

PERKIRAAN KENAIKAN SUHU PERMUKAAN DI INDONESIA BILA CO₂ MENGALAMI KENAIKAN 2 kali LIPAT BERDASARKAN MODEL ATMOSFER SEDERHANA

Sri Kaloka Prabotosari, Waluyo Eko Cahyono, Saipul Hamdi
Rosida, Indah Susanti, Nani Cholianawati, Lilik Slamet, Toni Samiaji
Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer - LAPAN
sri.kaloka@lapan.go.id

ABSTRACT. *The rising temperatures occurring in various regions of the world have been suspected as a result of increasing greenhouse gases in the atmosphere caused by various sources, both from human activities and from nature. Indonesia as a developing country can not be separated from the problem even forests that function as absorber of CO₂ is decreasing. This study aims to determine the role of Greenhouse Gases (CO₂, CH₄, N₂O) to temperature changes occurring in Indonesia and the rise in temperature that occurs when the concentration of CO₂ gas increases 2x. The data used are surface temperature and GHG's (CO₂, CH₄, N₂O) in 1900 (2009 and 2013 obtained from Tyndal Center File, EDGAR and AQUA-AIRS satellite data, AURA-MLS satellite data. The Simple Atmospheric Model is used as the basis for calculating atmospheric emissivity ϵ and radiative forcing RF. The calculation results obtained RF = 2.018, $\epsilon = 0.94231$ for the year 2009 and RF = 2.435; $\epsilon = 0.94232$ for 2013. Based on the calculation of RF and ϵ in 2009 if CO₂ increased 2x then the average surface temperature for Indonesia will be 300.14 K or 26.99 °C which means an increase of 1.23 °C when compared to the temperature on 1900.*

Keywords : *simple atmospheric model, greenhouse gas, temperature, radiative forcing*

ABSTRAK. *Kenaikan suhu yang terjadi di berbagai wilayah dunia ini telah diduga dikarenakan sebagai akibat meningkatnya Gas Rumah Kaca di atmosfer yang disebabkan oleh berbagai sumber, baik berasal dari aktivitas manusia maupun dari alam. Indonesia sebagai negara berkembang tidak lepas dari masalah tersebut bahkan hutan yang berfungsi sebagai penyerap CO₂ semakin berkurang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peran Gas Rumah Kaca (CO₂, CH₄, N₂O) terhadap perubahan suhu yang terjadi di Indonesia dan kenaikan suhu yang terjadi bila konsentrasi gas CO₂ mengalami kenaikan 2x lipat. Data yang digunakan berupa suhu permukaan dan GRK (CO₂, CH₄, N₂O) tahun 1900 (2009 dan 2013 yang didapat dari Tyndal Center File, EDGAR dan data Satelit AQUA-AIRS, AURA-MLS. Model Atmosfer Sederhana dijadikan dasar untuk melakukan perhitungan emisivitas atmosfer ϵ dan radiative forcing RF. Hasil perhitungan diperoleh RF = 2,018, $\epsilon = 0,94231$ untuk tahun 2009 dan RF = 2,435; $\epsilon = 0,94232$ untuk tahun 2013. Berdasarkan hasil perhitungan RF dan ϵ tahun 2009 jika CO₂ mengalami kenaikan 2x maka suhu permukaan rata-rata untuk Indonesia akan menjadi 300,14 K atau 26,99 °C yang berarti mengalami kenaikan sebesar 1,23 °C bila dibandingkan dengan suhu tahun 1900.*

Kata kunci : *model atmosfer sederhana, gas rumah kaca, suhu, radiative forcing*

1. PENDAHULUAN

Iklim telah menjadi bagian penting karena berkaitan dengan berbagai sektor dalam kehidupan masyarakat seperti pertanian, transportasi, pariwisata, kehutanan, lingkungan hidup, kesehatan yang beberapa tahun terakhir ini makin dirasakan adanya perubahan dibanding dengan iklim beberapa puluh tahun yang lalu. Berbagai fenomena alam seperti banjir, kekeringan, dan badai telah melanda diberbagai negara termasuk Indonesia diduga terkait dengan adanya perubahan iklim tersebut. Menurut Shindell dkk., (2003) bahwa perubahan iklim sudah ada sejak ratusan tahun lalu yang disebabkan oleh fluktuasi radiasi matahari atau dampak dari letusan gunung berapi.

Satterthwaite D (2008) mengemukakan bahwa fenomena perubahan iklim yang kini terjadi lebih disebabkan oleh aktivitas manusia seperti pembakaran batubara, minyak, hutan yang pada akhirnya berujung dengan meningkatnya produksi Gas Rumah Kaca (GRK) terutama Karbon Dioksida (CO_2), Methana (CH_4), dan Nitrogen Oksida (N_2O). Dari sekian banyak GRK, CO_2 merupakan kontributor utama. Konsentrasi CO_2 terus meningkat dari sekitar 278 ppm pada era sebelum industri dan pada tahun 2007 konsentrasinya telah mencapai 380 ppm. Peningkatan konsentrasi CO_2 tersebut umumnya disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil yang berkaitan dengan berkembangnya aktivitas industri (Ru,F., dkk., 2014 dan Solomon, S., dkk., 2007). Dengan adanya GRK maka radiasi matahari yang menembus atmosfer akan menghangatkan bumi dan selanjutnya GRK mencegah pemantulan kembali sebagian udara panas ke ruang angkasa, akibatnya bumi dan atmosfer sedikit demi sedikit bertambah panas. Penambahan GRK di atmosfer dilakukan oleh banyak negara dan dilakukan tanpa berhenti, sedangkan hutan yang berfungsi sebagai penyerap CO_2 telah berkurang secara drastis.

Indonesia dikenal dengan negara berhutan tropis terbesar ketiga di dunia sesudah Brazil dan Zaire dengan luas 133,7 juta hektar, luas ini meliputi 60% dari luas seluruh wilayah Indonesia, akan tetapi menurut Sibarani J.(2014) hutan Indonesia telah mengalami deforestasi dan degradasi dengan rata-rata penurunan deforestasi pada periode 2003-2006 ke 2009-2011 seluas 0,675 juta ha per tahun. Bila diasumsikan 1 ha hutan menyerap CO_2 sebesar 725 ton maka penurunan emisi oleh hutan sebesar 489 juta ton atau setara 72,8% dari kewajiban Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca sektor kehutanan sampai dengan tahun 2020.

Menurut Ch. Purba (2014) bahwa dalam kurun waktu 2009-2013 Indonesia kehilangan hutan seluas 4,6 juta hektar atau seluas Provinsi Sumatera Barat atau tujuh kali luas Provinsi DKI Jakarta, bahkan dalam kurun waktu itu kecepatan hilangnya hutan setiap menit seluas tiga lapangan bola, yang kini hutan Indonesia yang tersisa tinggal 82 juta hektar. Bila praktik tata kelola lahan hutan tak berubah dan pembukaan hutan terus dibiarkan, jumlah hutan akan terus menyusut dan menurut prediksi 10 tahun ke depan hutan di Riau akan hilang diikuti dengan Kalimantan Tengah dan Jambi. Dengan demikian sangat jelas bahwa setiap tahun Indonesia mengalami penurunan daya serap karbon dioksida. Dengan meningkatnya emisi dan berkurangnya penyerapan, tingkat GRK di atmosfer makin menjadi lebih tinggi dibanding yang pernah terjadi di dalam catatan sejarah. Badan dunia yang bertugas memonitor isu ini yaitu Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) telah menyampaikan laporan bahwa pada tahun 1750 konsentrasi

karbon dioksida di atmosfer yang pada mulanya sekitar 280 ppm (parts per million) menjadi 354 ppm pada tahun 1990, menjadi 367 ppm pada tahun 2000 selanjutnya pada tahun 2050 dan 2100 diperkirakan menjadi sekitar 463-623 ppm dan 478-1099 ppm. Akibatnya, pada tahun 2100 nanti suhu global diperkirakan naik antara 1,4 hingga 5,8 °C (IPCC, 2007a). Kenaikan suhu permukaan bumi ini dimungkinkan karena energi matahari yang menembus atmosfer hingga permukaan bumi, maka sebagian energinya dipantulkan, diabsorpsi dan diradiasikan kembali dalam bentuk panas. GRK di atmosfer menyerap dan meradiasikan kembali energi panas ke angkasa.

Besarnya net energi panas yang masuk ke bumi dikarenakan proses diatas diukur secara kuantitas dengan besaran yang disebut *net radiative forcing*. Jika laju energi yang masuk positif maka akan terjadi pemanasan bumi. Pada tahun 2005 *net radiative forcing* secara global sebesar + 1.6 W/m², ini salah satu faktor yang menyebabkan adanya kenaikan suhu bumi (Raupach M dan P. Fraser, 2011). Mengingat GRK yang bertambah di atmosfer dan berdampak pada peningkatan suhu permukaan termasuk di Indonesia, maka dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui berapa besar kenaikan suhu rata-rata permukaan Indonesia bila konsentrasi CO₂ mengalami kenaikan 2x lipat. Dalam penelitian ini digunakan Model Atmosphere Satu Lapis (*A Single Layer Atmosphere Model*) yang diadopsi dari *American Chemical Society Climate Science Toolkit* yang diunduh pada <https://www.acs.org/content/acs/en/.../atmosphericwarming/singlelayermodel.html> untuk memperkirakan kenaikan suhu rata-rata permukaan Indonesia.

1.1 Kondisi GRK Indonesia

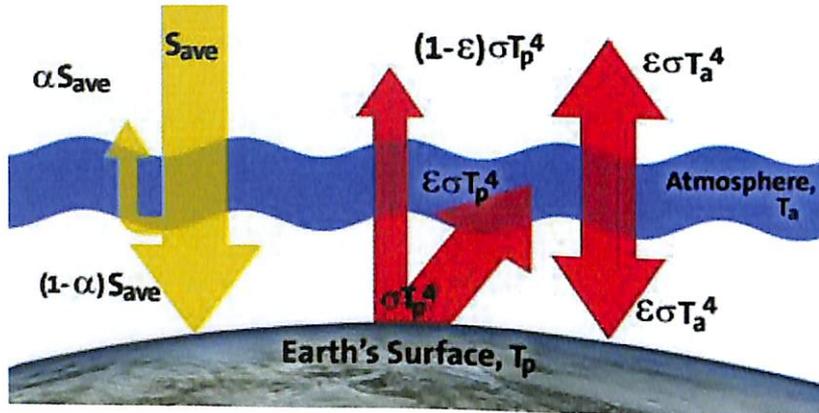
Nahas A.C dan B. Setiawan (2010) telah melakukan pengukuran CO₂, CH₄ dan N₂O pada tahun 2009 di Kototabang yang menunjukkan hasil konsentrasi secara berurutan sebesar 381.7 ppm, 1824,5 ppb dan 323 ppb. Jika dibandingkan dengan konsentrasi ketiga gas tersebut di masa pra revolusi industri, maka telah terjadi kenaikan 37,3% untuk CO₂, 160,6% untuk CH₄ dan 19,6% untuk N₂O. Kenaikan konsentrasi GRK tersebut menyebabkan peningkatan nilai *radiative forcing*. Hasil pengukuran *radiative forcing* pada tahun 2009 untuk CO₂ adalah 1,634 ± 0,04 W/m², CH₄) 0,509 ± 0,003 W/m², N₂O) 0,168 ± 0,005 W/m² dengan jumlah ketiga komponen GRK tersebut sebesar 2,311 W/m². Hasil ini masih dibawah *radiative forcing* GRK global 2009 yaitu untuk CO₂) 1,696 W/m², CH₄) 0,513 W/m², N₂O) 0,174 W/m² dengan jumlah 2,383 W/m² (Hoffman dkk., 2006).

Menurut Susandi (2005) hasil penelitian yang dilakukan oleh Hulme dan Sheard (1999) suhu udara di Indonesia sejak 1900 juga telah mengalami kenaikan sekitar 0.3 °C yang terjadi sepanjang musim. Guna mengetahui kondisi iklim di masa mendatang salah satu upaya yang dilakukan adalah membangun model iklim. Berbagai model iklim baik yang sederhana maupun dengan tingkat kesulitan yang tinggi telah disusun oleh berbagai ahli, meskipun demikian untuk mengetahui model yang lebih rumit perlu pemahaman dari model yang sederhana terlebih dahulu.

Dalam penelitian ini akan ditunjukkan kenaikan GRK yang akan meningkatkan suhu rata-rata di wilayah Indonesia dengan tujuan untuk mengetahui berapa besar kenaikan suhu di Indonesia bila terjadi kenaikan konsentrasi gas CO₂ sebesar 2 kali lipat dari tahun 1900 berdasarkan model atmosfer satu lapis atau model atmosfer sederhana

1.2 Model Atmosfer Sederhana

Untuk mengetahui peran GRK terhadap perubahan iklim dalam penelitian ini digunakan Model Atmosfer Satu Lapis atau Model Atmosfer Sederhana yang berbasis kesetimbangan energi.



Gambar 1. Model Atmosfer Sederhana
Sumber). American Chemical Society

Besarnya energi radiasi matahari rata-rata yang menuju permukaan bumi sebesar

$$S_{ave} = \frac{1}{4} S_o = S_r$$

Dengan S_o = flux radiasi matahari (1368 Wm^{-2})

Dalam keadaan keseimbangan energi, maka :

- Di permukaan).
 $(1-\alpha) S_r + \epsilon\sigma T_a^4 = \sigma T_p^4$ (1)

- Di lapisan atmosfer :
 $\sigma T_p^4 = 2 \epsilon\sigma T_a^4 + (1-\epsilon)\sigma T_p^4$ (2)

dengan

- α = albedo bumi (0.3) ;
- ϵ = emisivitas efektif ;
- σ = konstanta Stefan-Boltzman ($5,67051 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$);
- T_p = suhu permukaan bumi (K)

dengan mensubstitusikan persamaan (2) kedalam persamaan (1) diperoleh

$$T_a^4 = \frac{1}{2} T_p^4$$
 (3)

Jika definisi *Radiative forcing* (RF) adalah selisih antara energi yang memasuki bumi dengan yang keluar bumi dan atmosfer maka :

$$RF = (1-\alpha) S_r - \{(1-\epsilon)\sigma T_p^4 + \epsilon\sigma T_a^4\} \quad (4)$$

Untuk $RF > 0$ (*Radiative forcing* positif), energi yang masuk lebih besar dari pada yang keluar, agar terjadi hal tersebut maka dibutuhkan energi yang membuat suhu permukaan bumi harus ada peningkatan sebesar ΔT_p , sehingga

$$RF = \sigma (1 - \frac{1}{2} \epsilon)(T_p + \Delta T_p)^4 - (1-\alpha)S_r \quad (5)$$

Dengan demikian perubahan suhu ΔT_p yang terjadi karena *Radiative forcing* RF adalah :

$$\Delta T_p \approx T_p \Delta F / [4(1-\alpha)S_r] \quad (6)$$

2. DATA DAN METODOLOGI

Dalam penelitian ini data yang digunakan berupa :

1. Suhu permukaan rata-rata Indonesia tahun 1900, 2009, 2013. Data suhu permukaan wilayah Indonesia tahun 1900 diperoleh dari hasil regresi berdasar data suhu tahun 1901 sampai tahun 2000 dari *Tyndall Centre File* (www.tyndall.ac.uk) yang dibangun oleh Dr. Tim Mitchell. Untuk suhu rata-rata permukaan tahun 2009 dan 2013 didapat dari data satelit Aqua –AIRS.
2. Konsentrasi GRK (CO_2 , N_2O , CH_4) rata-rata wilayah Indonesia tahun 1900, 2009, 2013. Data tersebut merupakan data pada level 2 yang di peroleh dari satelit Aqua-AIRS, dengan temporal rata-rata bulan dan resolusi spasial data 10×10 yang diunduh dari website <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/>. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GrADS.
3. Konstanta emisivitas ϵ dan *Radiative forcing* RF dihitung berdasar model atmosfer satu lapis dengan menggunakan persamaan (4) dan (5), dengan melakukan tahapan sebagai berikut).
 - a. ΔT_p akan dapat diperoleh dengan melakukan pengurangan kedua rata-rata suhu permukaan wilayah Indonesia yaitu $T_{2009} - T_{1900}$ selanjutnya RF dapat dihitung menggunakan persamaan (5), dalam hal ini diperoleh RF_1 .
 - b. Berdasarkan RF yang diperoleh dapat dihitung emisivitas atmosfer ϵ berdasar persamaan (4), dalam hal ini diperoleh ϵ_1 .
 - c. Rata-rata konsentrasi GRK tahun 1900, 2009 dan 2013 diperlukan untuk menunjukkan bahwa telah terjadi kenaikan konsentrasi GRK secara global maupun di Indonesia.
4. Dengan melakukan pengulangan tahapan 1 sampai 3 tersebut diatas namun dengan menggunakan data tahun 1900 dan data tahun 2013. Hasil diharapkan akan diperoleh emisivitas ϵ_2 yang lebih besar dibanding ϵ_1 sebelumnya serta *radiative forcing* RF_2 yang juga lebih besar dari RF_1 . Kenaikan konsentrasi GRK tahun 2013 terhadap tahun 1900 diharapkan mempunyai peningkatan yang lebih signifikan dibanding

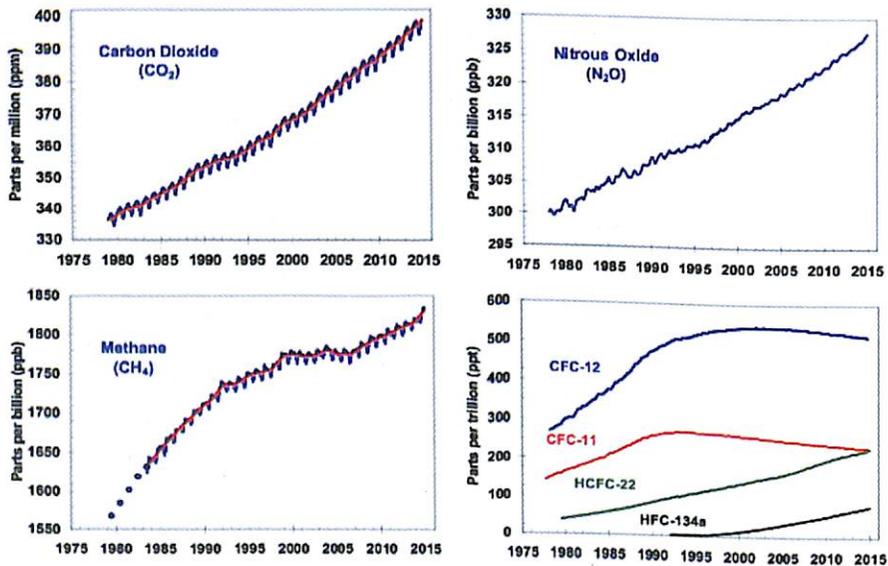
dengan kenaikan konsentrasi GRK tahun 2009 terhadap tahun 1900.

Untuk melaksanakan kegiatan penelitian ini digunakan hipotesis bahwa :

1. Emisivitas ϵ atmosfer Indonesia berubah seiring kenaikan konsentrasi GRK di atmosfer Indonesia.
2. Emisivitas ϵ dianggap homogen untuk seluruh atmosfer Indonesia.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kenaikan GRK (CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC) secara global ditunjukkan oleh NOAA yang dilaporkan dalam *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index: (AGGI)* yang ditunjukkan pada gambar 2 sebagai berikut :



Gambar 2. Konsentrasi Gas Rumah Kaca secara global dari tahun 1975-2014(Sumber : Butler, J.H., S.A.Montzka, 2014).

GRK (CO_2 , CH_4 , N_2O) global dari tahun 1975 – 2014 menunjukkan adanya peningkatan, hal ini disebabkan makin meningkatnya aktivitas manusia seperti penggunaan batubara, pembakaran hutan dll, sedangkan konsentrasi CFC -11 dan CFC-12 secara perlahan menurun dikarenakan terjadi program penggantian CFC dengan HCFC dan HFC untuk mengurangi kecepatan kerusakan lapisan ozon.

Bagaimana mendapatkan suhu rata-rata permukaan Indonesia dimasa lampau? *Tyndall Centre File* yang dapat diunduh pada web www.tyndall.ac.uk memiliki data suhu permukaan rata-rata bulanan Indonesia dari tahun 1901- 2000 dalam satuan oC seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Terlihat bahwa suhu permukaan rata-rata bulanan tersebut tidak membentuk pola trend kenaikan linier, sehingga untuk mengetahui suhu

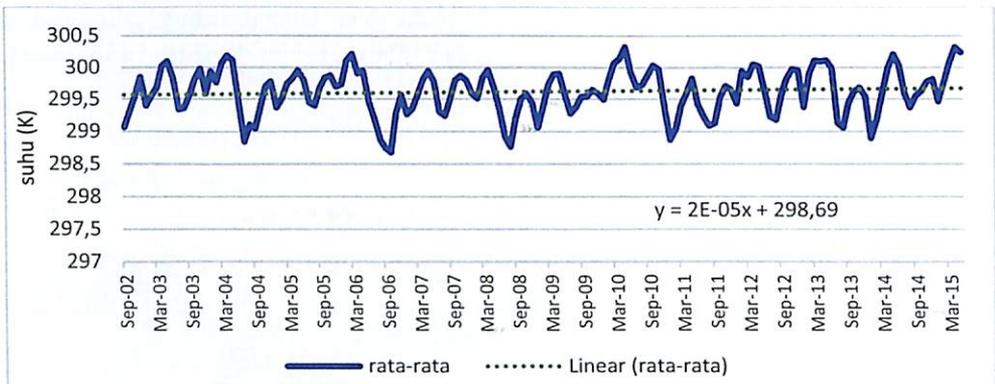
permukaan rata-rata Indonesia tahun 1900 perlu dicari terlebih dahulu persamaan yang sesuai untuk bisa mendapatkan hasil yang baik. Dalam hal ini dianggap bahwa masa pra industri Indonesia terjadi pada tahun 1900.



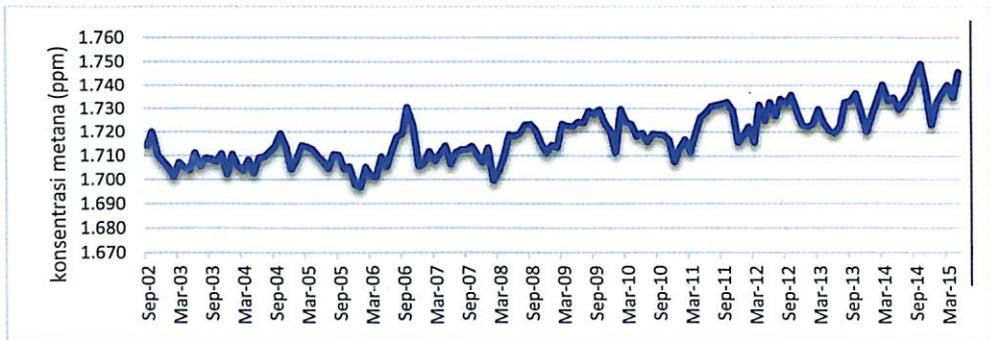
Gambar 3. Suhu permukaan rata-rata wilayah Indonesia tahun 1901-2000 dalam °C

Untuk mendapatkan data suhu permukaan wilayah Indonesia tahun 1900 didekati dengan model ARIMA. Dari perhitungan didapat model ARIMA yang sesuai adalah ARIMA (0,1,1) dengan bentuk persamaan $(Y_t) \hat{=} Y_{(t-1)} + 0,002753 - 0,6742a_{(t-1)}$. Persamaan ini menghasilkan suhu permukaan rata-rata wilayah Indonesia tahun 1900 sebesar $25,76 \text{ } ^\circ\text{C} = 298,91 \text{ K}$.

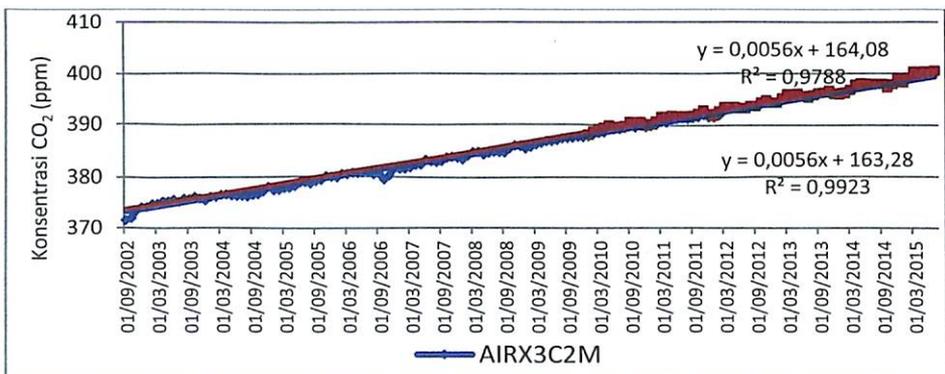
Konsentrasi GRK (CH_4 , CO_2) rata-rata bulanan untuk Indonesia didapatkan dari pengolahan data satelit Aqua-AIRS pada level2 dengan resolusi spasial data 10×10 yang diunduh dari website <http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/>. Selain konsentrasi CH_4 dan CO_2 dapat pula diolah suhu permukaan rata-rata bulanan. Berdasarkan hasil olahan data satelit dari bulan September 2002 hingga Mei 2015 dapat ditunjukkan suhu permukaan rata-rata bulanan, konsentrasi CH_4 dan CO_2 seperti pada gambar 4, 5 dan 6. Ketiga gambar tersebut memperlihatkan bahwa dalam periode waktu 1975-2015 telah terjadi kenaikan suhu permukaan, konsentrasi CH_4 dan CO_2 . Kenaikan suhu permukaan ini diperkirakan disebabkan oleh adanya kenaikan GRK yang dalam hal ini CH_4 dan CO_2 secara global seperti yang dilaporkan oleh Butler, J.H., S.A.Montzka (2014).



Gambar 4. Trend kenaikan suhu permukaan rata-rata wilayah Indonesia (oK) dari September 2002 – Mei 2015



Gambar 5. Konsentrasi gas Metana (ppm) rata-rata bulanan dari bulan September 2002 – Mei 2015



Gambar 6. Konsentrasi CO₂ (ppm) rata-rata bulanan dari bulan September 2002 – Juli 2015

Selanjutnya hasil perhitungan suhu dan GRK wilayah Indonesia tahun 1900, 2009 dan 2013 serta data global suhu dan GRK pada tahun yang sama ditabelkan pada tabel 1.

Tabel 1. Suhu rata-rata dan GRK tahun 1900, 2009 dan 2013 global dan Indonesia

Lokasi & Tahun	Suhu (K)	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	N ₂ O (ppb)
Global 1900	287,07	292*	942*	285*
Indonesia 1900	298,91	-	-	-
Kototabang 2009		381,7	1824,5	323,0
Global 2009	287,73	386	1795*	322
Indonesia 2009	299,54	386,75	1714	430,2 **
Global 2013	287,76	396	1820	325
Indonesia 2013	299,67	395,69 ***	1726	413,6**
Kototabang 2013		414		

Sumber :

*) IPCC WGI TAR

***) Data satelit AURA-MLS

****) Data satelit AIRS3C2M

Untuk melihat tingkat akurasi data satelit Aqua/AIRS maka data suhu permukaan untuk Indonesia tahun 2009 yang mengambil luasan wilayah (6°LU-11°LS dan 95°BT-141°BT) yang memiliki suhu 299,54 K dibandingkan dengan data hasil pengamatan suhu permukaan rata-rata dari 11 kota yang diamati oleh BMKG yaitu Bandung, Jakarta, Padang, Pondok Betung, Pontianak, Palembang, Surabaya, Medan, Palangkaraya, Menado, Palangkaraya. Hasil pengamatan suhu permukaan rata-rata dari 11 kota tersebut sebesar 300,41 K, dengan demikian terdapat perbedaan relatif kecil terhadap hasil pengamatan satelit yaitu hanya sebesar 0,87 K (0,29%). Oleh sebab itu selanjutnya suhu rata-rata Indonesia digunakan data yang berasal dari satelit Aqua/AIRS.

Suhu permukaan bumi ditentukan oleh keseimbangan antara radiasi matahari yang masuk dan radiasi infra merah yang keluar. *Radiative forcing* (RF) merupakan pengukur kapasitas gas atau bahan lainnya dalam mempengaruhi keseimbangan energi di atmosfer yang akan berkontribusi terhadap perubahan iklim. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa RF mengungkapkan perubahan energi di atmosfer akibat dari emisi gas rumah kaca. RF didefinisikan sebagai perbedaan antara radiasi matahari yang masuk dan radiasi infra merah yang keluar yang disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi GRK tersebut. RF dinyatakan dalam Watts per meter persegi (W/m²) atau laju perubahan energi per satuan luas yang diukur di atmosfer.

Radiative forcing dinyatakan positif karena menghasilkan peningkatan energi budget bumi yang pada akhirnya menyebabkan pemanasan karena gas rumah kaca menyerap radiasi infra merah yang kemudian dipancarkan kembali ke permukaan bumi, sehingga meningkatkan keseimbangan energi Bumi.

Radiative forcing dinyatakan negatif karena menghasilkan penurunan energi budget dan pada akhirnya menyebabkan pendinginan. Aerosol merupakan salah satu partikel yang memantulkan radiasi matahari, yang menyebabkan terjadinya penurunan suhu (IPCC, 2001).

Berdasarkan data suhu dan GRK yang terdapat pada Tabel 1, terlihat bahwa secara global telah terjadi kenaikan suhu dari tahun 1900, 2009 dan 2013 yang disertai dengan

kenaikan GRK, demikian pula untuk Indonesia. Kenaikan suhu dari tahun 1900 ke 2009 sebesar 0,63 K, selanjutnya dengan menggunakan persamaan (5) model atmosfer sederhana diperoleh *Radiative forcing* RF1 sebesar 2,018. Dengan mensubstitusikan $RF_1 = 2,018$ kedalam persamaan (4) didapat Emisivitas ϵ_1 sebesar 0,9423. Perhitungan berikutnya adalah terhadap data tahun 2013 maka kenaikan suhu terhadap tahun 1900 sebesar 0,76 K dan hasil perhitungan dari model didapat $RF_2 = 2,435$ dan $\epsilon_2 = 0,9423$.

Besarnya RF masing2 jenis GRK dapat dihitung berdasarkan perumusan yang disampaikan dalam laporan IPCC (2001); Butler, J.H.dan Montzka, S.A. (2014) seperti dalam Tabel 2.

Tabel 2. Penghitungan *Radiative forcing* GRK (Wm-2)

Jenis Gas	<i>Radiative forcing</i>	Konstanta
CO ₂	$\Delta F = \alpha \ln(C/C_0)$	$\alpha = 0.35$
CH ₄	$\Delta F = \beta(M^{1/2} - M_0^{1/2}) - [f(M, N_0) - f(M_0, N_0)]$	$\beta = 0.036$
N ₂ O	$\Delta F = \epsilon(N^{1/2} - N_0^{1/2}) - [f(M_0, N) - f(M_0, N_0)]$	$\epsilon = 0.12$

Subskrip 0 dalam rumusan menunjukkan nilai konsentrasi referensi pra revolusi industri tahun 1750, masing-masing untuk CO₂ = 278 ppm, CH₄ = 700 ppb, dan untuk N₂O = 270 ppb

$$f(M, N) = 0.47 \ln[1 + 2.01 \times 10^{-5} (MN)^{0.75} + 5.31 \times 10^{-15} M(MN)^{1.52}]$$

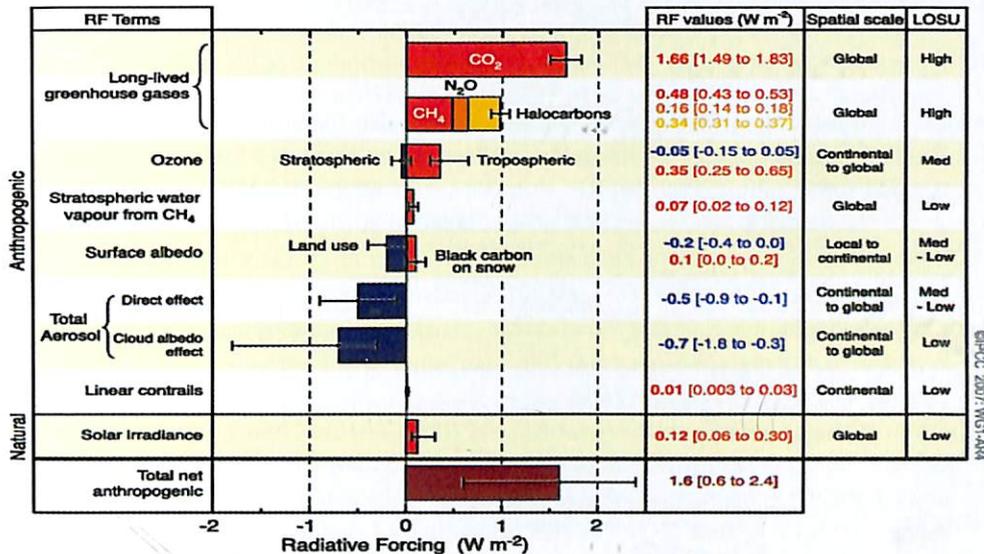
C adalah CO₂ dalam ppm, M adalah CH₄ dalam ppb dan N adalah N₂O dalam ppb. Hasil perhitungan RF untuk CO₂, CH₄, N₂O global dan Indonesia ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. *Radiative forcing*

Lokasi & Tahun	RF-CO ₂ (ppm)	RF-CH ₄ (ppb)	RF-N ₂ O (ppb)	RF CFC- 11 (ppb)	RF CFC- 12 (ppb)	15 minor (ppb)	Total
Kototabang 2009*	1,634	0,509	0,168	-	-	-	2,311
Global 2009**	1,760	0,489	0,172	0,171	0,061	0,103	2,755
Indonesia 2009***	1,781	0,503	0,488				2,018 ^{MAS} 2,772 ^{HIT}
Global 2013	1,882	0,496	0,183	0,167	0,059	0,114	2,901
Indonesia 2013	1,889	0,477	0,442				2,435 ^{MAS} 2,808 ^{HIT}

Hasil perhitungan *Radiative forcing* RF berdasarkan Model Atmosfer Sederhana (MAS) untuk tahun 2009 diperoleh 2,018 yang lebih kecil dibandingkan dengan jumlah (RF CO₂+ RF CH₄ + RF N₂O) sebesar 2,772, demikian juga untuk tahun 2013 diperoleh 2,435 yang nilainya lebih kecil dibandingkan dengan jumlah (RF CO₂+ RF CH₄ + RF N₂O) sebesar 2,808. Hasil penjumlahan RF tersebut baru terdiri dari 3 komponen GRK saja yaitu CO₂, CH₄ dan N₂O belum memperhitungkan RF gas lain yang bernilai positif seperti CFC dan gas minor lainnya, serta RF aerosol yang bernilai negatif. Rosida dkk

(2015) melakukan penghitungan RF aerosol rata-rata untuk data tahun 2000-2012 berdasar data satelit sebesar -0,4854. Gambar 7 memperlihatkan nilai RF untuk beberapa gas dan partikel yang dapat menaikkan suhu (RF positif) maupun yang dapat menurunkan suhu (RF negatif). GRK (CO_2 , CH_4 , N_2O), ozon, uap air, CFC merupakan komponen yang berdampak meningkatkan suhu, sedangkan aerosol berdampak sebaliknya yaitu menurunkan suhu.



Gambar 7. Radiative forcing Positif dan Negatif

Jika diasumsikan tahun 1900 konsentrasi GRK Indonesia sama dengan kondisi konsentrasi GRK pra industri tahun 1750 maka telah terjadi kenaikan CO_2 sebesar 1,39 kali terhadap tahun 2009 yang menyebabkan kenaikan suhu sebesar 0,63 K atau kenaikan CO_2 sebesar 1,42 kali terhadap tahun 2013 dengan kenaikan suhu sebesar 0,76 K. Berdasarkan data GRK (CO_2 , CH_4 , N_2O) dan suhu permukaan dari tahun 1900 (2009 dan 2013) telah terjadi kenaikan, baik untuk global maupun Indonesia. Demikian pula terjadi kenaikan *Radiative forcing* dari ketiga komponen GRK bila dibandingkan tahun 2013 yaitu 2,808 terhadap tahun 2009 sebesar 2,772. Emisivitas atmosfer tahun 2009 yang sebesar $\epsilon_1 = 0,94231$ juga mengalami kenaikan pada tahun 2013 menjadi $\epsilon_2 = 0,94232$. Kenaikan emisivitas atmosfer ini relatif kecil hanya sekitar 0,0021% dari kenaikan CO_2 sebesar 1.02%.

Lenton, T.M dan N.E Vaughan (2009) menyatakan bahwa kenaikan CO_2 secara global 2x(560 ppm) maka *Radiative forcing* menjadi 3.71 W/m^2 akan mengakibatkan kenaikan suhu global antara $1.5\text{-}4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Lindsey, R., 2014) Dengan menggunakan Model Atmosfer Sederhana yang telah dihitung *Radiative forcing* dan emisivitas atmosfernya untuk Indonesia maka akan dapat diketahui nilai suhu permukaan rata-rata Indonesia dan kenaikan suhunya bila dibandingkan dengan suhu rata-rata Indonesia tahun 1900 bila terjadi peningkatan CO_2 global 2x. Berdasarkan hasil perhitungan Model Atmosfer

Sederhana tahun 2009, jika CO₂ terjadi peningkatan 2x maka nilai RF pada Model menjadi (3,71-1,781) + 2,018 = 3,947 W/m². Selanjutnya dengan mensubstitusikan kedalaman persamaan (4) diperoleh suhu permukaan sebesar 300,14 K atau 26,99 °C. Bila dibandingkan dengan suhu permukaan Indonesia tahun 1900 yang besarnya 298,91 K atau 25,76 °C, berarti akan terjadi kenaikan suhu rata-rata sebesar 1,23 K atau 1,23 °C yang kenaikannya lebih kecil dari pada kenaikan suhu global yang diperkirakan sebesar antara 1.5-4.5 °C

4. KESIMPULAN

Berdasarkan Model Atmosfer Sederhana telah dapat dihitung *Radiative forcing* RF dan Emisivitas atmosfer (ϵ), dengan perolehan RF = 2,018 dan Emisivitas atmosfer (ϵ) = 0,94231 untuk tahun 2009 dan RF = 2,435; ϵ = 0,94232 untuk tahun 2013.

Kenaikan konsentrasi GRK tahun 2009 dan 2013 terhadap tahun 1900 tampaknya tidak secara signifikan menaikkan emisivitas atmosfer (ϵ). Kenaikan emisivitas tahun 2013 terhadap tahun 2009 hanya sebesar 0,001%, sedangkan terhadap *Radiative forcing* meningkat 21%. Meningkatnya *Radiative forcing* akan menaikkan suhu permukaan, hal ini terlihat pada kenaikan suhu permukaan tahun 2009 dan tahun 2013 terhadap tahun 1900 masing-masing sebesar 0,63 K dan 0.76 K.

Dengan menggunakan nilai RF = 2,018 dan Emisivitas atmosfer (ϵ) = 0,94231 sebagai hasil perhitungan dari Model Atmosfer Sederhana maka jika terjadi kenaikan konsentrasi CO₂ menjadi 2 kali nya (560 ppm) maka suhu permukaan di Indonesia akan menjadi 300,14 K atau 26,99 °C. Bila dibandingkan dengan suhu permukaan Indonesia tahun 1900 yang besarnya 298,91 K atau 25,76 °C, berarti akan terjadi kenaikan suhu rata-rata sebesar 1,23 K atau 1,23 °C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dra. Ina J. Visa (PSTA-LAPAN) yang telah memberi data suhu permukaan di 11 kota yang diperoleh dari BMKG sebagai pembandingan terhadap suhu yang diamati dengan satelit Aqua AIRS.

DAFTAR RUJUKAN

- Butler, J.H., S.A.Montzka (2014). The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI), NOAA Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division.<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.
- Hoffman, D.J, J.H Butler, E.J Dlugokencky, J.W Elkins, K. Masarie, S.A. Montzka and P.Tans (2006). The Role of Carbon Dioxide in Climate Forcing From 1979 to 2004). Introduction of the Annual Greenhouse Gas Index. *Tellus* 58B). 614-619.
- Hulme,M. and N. Sheard (1999). Climate Change Scenarios for Indonesia. Leaflet CRU and WWF. Climatic Research Unit. UEA, Norwich,UK.
- IPCC (2001). Climate Change - The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC [Houghton, J.T., dkk. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.

- IPCC (2007a). Fourth Assessment Report Working Group II). Impact, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC (2007b). Fourth Assessment Report Working Group I). Scientific Basis Chapter 2). Changes in Atmospheric Constituents and in *Radiative forcing*. Cambridge University Press. Cambridge, UK
- Lindsey R (2014). How much will Earth warm if carbon dioxide doubles pre industrial levels?. Climate Watch Magazine. NOAA. January 24 2014.
- Nahas A.C, B. Setiawan (2010). Penentuan *Radiative forcing* dan Annual Greenhouse Gas Index dari Karbon Dioksida, Metana dan Nitrous Oksida hasil pengukuran di Bukit Kototabang.
- Purba, Ch., S.G. Nanggara, M. Ratriyono, I. Apriani, L. Rosalina, N.A. Sari, A.H. Meridian (2014). Potret Keadaan Hutan Indonesia Periode 2009-2013. Forest Watch Indonesia, Desember 2014.
- Raupach, M. and P. Fraser (2011). Climate and Greenhouse Gases in Climate Change). Science & Solutions for Australia, edited by Helen Cleugh, Mark Stafford Smith Michael Battaglia, and Paul Graham, CSIRO Publishing 2011.
- Rosida, Indah Susanti (2015). Laporan Kegiatan Pusat Sains dan Teknologi Antariksa 2015.
- Ru, F., L. Lei, R. Bu, X. Guan, J. Qi (2014). Regional scale variations of atmospheric CO₂ and CH₄ from satellite observation, 35th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE35), IOP Conf. Series). Earth and Environmental Science 17 (2014) 012022, IOP Publishing, doi:10.1088/1755-1315/17/1/012022.
- Satterthwaite, D (2008). Cities contribution to global warming)./notes on the allocation of greenhouse gas emissions. Environment & Urbanization. Vol.20, Issue 2.
- Shindell, D.T, G.A Schmidt, R.L Miller, M.E Mann (2003). Volcanic and Solar Forcing of Climate Change during the Pre Industrial Era. Journal of Climate. Vol.16
- Sibarani, J (2014). Melestarikan Hutan Indonesia. Kompasiana, Kompas.Com, 14 Maret 2014.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (2007). Climate Change - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the IPCC 2007. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Susandi, A (2005). Bencana Perubahan Iklim Global dan Proyeksi Perubahan Iklim Indonesia.