



JURNAL SEGARA

<http://ejournal-balitbang.kkp.go.id/index.php/segara>

ISSN : 1907-0659

e-ISSN : 2461-1166

Nomor Akreditasi: 766/AU3/P2MI-LIPI/10/2016

PENENTUAN RADIATIVE FORCING DARI KARBONDIOKSIDA (CO₂) DAN METANA (CH₄) DI GAW BUKIT KOTOTABANG SERTA HUBUNGANNYA DENGAN SUHU PERMUKAAN ATMOSFER DAN LAUT

RADIATIVE FORCING DETERMINATION FROM CARBON DIOXIDE (CO₂) AND METHANE (CH₄) IN GAW KOTOTABANG AND THE RELATIONSHIP WITH ATMOSPHERIC AND SEASURFACE TEMPERATURE

Noor Laily Adhayani¹⁾, Syahrul Romadhon¹⁾, Terry Louise Kepel²⁾ & Herlina Ika Ratnawati²⁾

¹⁾Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

²⁾Pusat Riset Kelautan, Badan Riset dan Sumberdaya Manusia, Kementerian Kelautan dan Perikanan

Diterima: 1 Maret 2018; Diterima Setelah Perbaikan: 9 Desember 2019; Disetujui Terbit: 15 Desember 2019

ABSTRAK

Radiative Forcing (RF) didefinisikan sebagai perubahan jumlah energi radiasi yang masuk dan keluar di lapisan troposfer sehingga dapat menyatakan adanya gangguan yang merusak pola energi radiasi matahari, dengan laju perubahan energi per satuan luas, yang diukur di bagian atas atmosfer dan dinyatakan dalam satuan W/m². RF dapat digunakan sebagai parameter untuk menunjukkan gejala fenomena perubahan iklim. Karbondioksida (CO₂) dan Metana (CH₄) merupakan gas rumah kaca utama di atmosfer. Eksistensi gas karbondioksida dan metana di atmosfer dapat terjadi akibat kegiatan manusia (*antropogenik*) dan alami (*natural*). Penentuan RF gas karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄) yang diukur di GAW Bukit Kototabang memperlihatkan tren peningkatan seperti halnya dengan meningkatnya konsentrasi dari masing-masing gas rumah kaca tersebut pada periode pengukuran 2004-2013. Puncaknya peningkatan terjadi pada akhir tahun 2013. Besarnya rerata RF gas rumah kaca berturut-turut adalah CO₂ = 1.686 ± 0.08 Wm⁻²; dan CH₄ = 0.511 ± 0.004 Wm⁻². Perbandingan konsentrasi CO₂ dan CH₄ di GAW Kototabang dengan masa pra revolusi industri pada 1750 diperoleh hasil bahwa terjadi peningkatan yang cukup signifikan. Peningkatan konsentrasi CO₂ dan CH₄ di atmosfer berturut-turut sebesar 41,05% dan 162,76%. Nilai radiative forcing CO₂ dan CH₄ di atmosfer memiliki koefisien determinasi (R²) yang relatif lebih kecil, dibandingkan dengan faktor anomali suhu permukaan laut Indonesia. Hal ini mengindikasikan bahwa respon laut terhadap kenaikan CO₂ dan CH₄ lebih besar dibandingkan dengan atmosfer.

Kata Kunci: *Radiative Forcing*, Karbon dioksida, Metana, GAW Bukit Kototabang, SST, Suhu Permukaan Atmosfer.

ABSTRACT

Radiative Forcing is defined as the change of incoming and outgoing radiation energy in the troposphere that depict interference on solar radiation energy, the rate of energy change per unit area measured in the upper atmosphere and expressed as W / m². RF can be used as an indicator of climate change phenomenon. Carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) are the main greenhouse gases in the atmosphere. Existence of carbon dioxide and methane in the atmosphere can occur due to human activity (*anthropogenic*) and natural (*natural*). Determination of RF carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) measured in GAW Bukit Kototabang shows an increasing trend as well as increasing concentrations of each of these greenhouse gases in 2004-2013. The peak occurred at the end of 2013. The average of RF greenhouse gas is CO₂ = 1.686 ± 0.08 Wm⁻²; and CH₄ = 0.511 ± 0.004 Wm⁻². Concentration of CO₂ and CH₄ in GAW Kototabang compared to the pre industrial revolution in 1750 showed that there was a significant increase. Increasing concentration of CO₂ and CH₄ in the atmosphere were 41.05% and 162.76% respectively. Radiation forcing of CO₂ and CH₄ in the atmosphere has smaller coefficient of determination (R²)

Corresponding author:

Jl. Pasir Putih I Ancol Timur, Jakarta Utara 14430. Email: kepel74@gmail.com

Copyright © 2019 Jurnal Segara

DOI: <http://dx.doi.org/10.15578/segara.v15i3.6677>

compared to the anomaly factor of Indonesia's sea surface temperature. This indicates that ocean has greater response to CO₂ and CH₄ than the atmosphere.

Keywords : Radiative Forcing, Carbondioxide, Methane, GAW Bukit Kototabang, SST, surface atmospheric temperature.

PENDAHULUAN

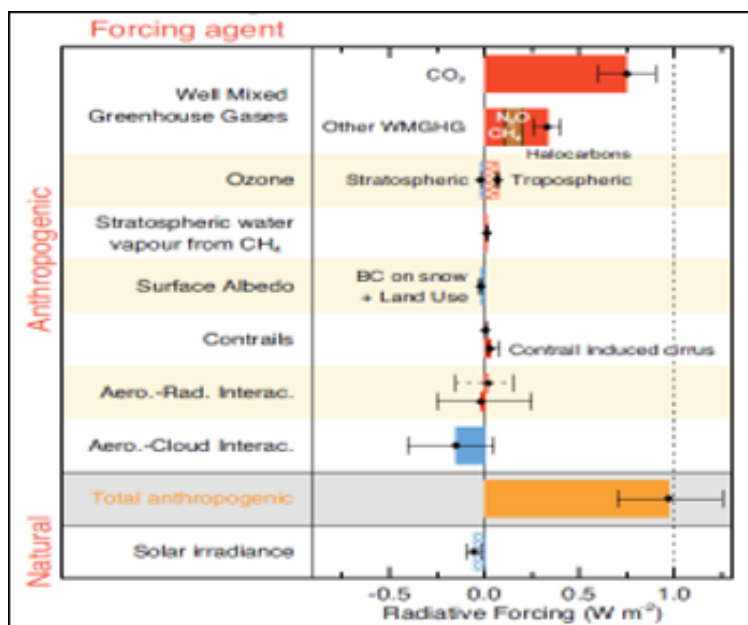
Radiative Forcing (RF) didefinisikan sebagai perubahan netto fluks radiasi yang masuk di tropopause setelah suhu stratosfir menyesuaikan kesetimbangan radiasi terhadap suhu troposfer dan suhu permukaan bumi, dengan variabel seperti uap air dan tutupan awan bernilai tetap pada keadaan yang stabil (IPCC, 2013a). Beberapa faktor yang berperan dalam menentukan kesetimbangan energi adalah *albedo* (tingkat reflektivitas) permukaan bumi, tutupan awan, dan komposisi gas rumah kaca (GRK). Semua faktor ini memiliki kontribusi terhadap besarnya energi yang diserap maupun diemisikan.

Besarnya nilai RF dari beberapa komponen disajikan dalam Gambar 1. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa terdapat komponen-komponen yang memiliki *positive feedback*, *negative feedback*, maupun keduanya sekaligus. Ozon yang terdapat di lapisan troposfer dan stratosfer memberikan respon yang berbeda, dimana secara umum ozon cenderung memberikan respon positif terhadap nilai RF. Sementara itu aerosol dapat memberikan *positive feedback* maupun *negative feedback* bergantung dari karakteristiknya. Hal ini dikarenakan sifat aerosol yang dapat menyerap maupun menghamburkan energi radiasi. Namun umumnya, aerosol memberikan *negative feedback* terhadap RF. Gambar tersebut juga

mengindikasikan bahwa keberadaan gas rumah kaca di atmosfer merupakan komponen utama yang berpengaruh terhadap nilai RF.

Karbondioksida (CO₂) dan Metana (CH₄) merupakan GRK utama di atmosfer. Sumber gas-gas ini di atmosfer berasal dari proses alami (natural) maupun akibat kegiatan manusia (antropogenik). Secara alami, CO₂ dan CH₄ berasal dari letusan gunung berapi dan pembusukan material organik. Sedangkan kegiatan antropogenik yang menyumbang emisi kedua gas ini antara lain adalah produksi bahan bakar fosil, industri semen dan industri lainnya, transportasi, kegiatan peternakan, budi daya, pembakaran dan pengelolaan limbah. Menurut laporan UNEP (2007), emisi CO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil adalah penyumbang tertinggi (56,6%) dari total emisi 49 GT CO_{2-eq} per tahun pada 2004.

GRK yang ada di atmosfer dapat meneruskan gelombang pendek dari matahari, tetapi dapat menahan radiasi gelombang panjang sehingga panas yang berasal dari permukaan bumi tertahan sebagian dan menyebabkan suhu di permukaan bumi menjadi hangat. GRK memberikan kontribusi yang sangat besar pada sistem kesetimbangan energi. Lebih dari 80% total energi radiasi yang diemisikan oleh permukaan bumi akan dikembalikan lagi dan kemudian diserap oleh permukaan bumi (Kiehl & Trenberth, 1997).



Gambar 1. Komponen RF (1980 - 2011) yang mempengaruhi iklim di bumi. (IPCC, 2011)

Tabel 1. Waktu tinggal beberapa gas rumah kaca di atmosfer

Gas Rumah Kaca	Waktu Tinggal (tahun)
Karbon dioksida (CO ₂)	s/d 100
Metana (CH ₄)	10
Nitrous oksida (N ₂ O)	120
Diklorodifluorometana (CFC-12)	102
Diklorotrifluoroetana (HCFC-123)	1,4
Sulfur heksafluorida (SF ₆)	3200

Peran GRK di atmosfer terutama terkait dengan RF, ditentukan oleh sifat dan karakteristiknya. Sifat dan karakteristik tersebut adalah kemampuan GRK dalam menyerap dan mengemisikan radiasi yang berada dalam daerah sinar infra merah atau radiasi gelombang panjang serta waktu tinggalnya yang sangat lama di atmosfer (Tabel 1).

Banyak penelitian tentang GRK dan RF yang telah dilakukan, namun informasi tentang hal ini khususnya di Indonesia masih sangat terbatas. Nahas & Setiawan (2008) mengukur RF dari tiga GRK utama yaitu CO₂, CH₄ dan NO₂ serta nilai *Annual Greenhouse Gas Index* (AGGI). Penelitian lain oleh Pujiastuti (2013) tentang hubungan antara RF senyawa metana dan perubahan suhu di Kototabang - Sumatera Barat selang waktu 2004-2009.

Tulisan ini bertujuan untuk menggambarkan nilai RF dari CO₂ dan CH₄ selang waktu 2004 - 2013 serta hubungannya dengan suhu udara permukaan dan suhu muka laut di wilayah Indonesia. Pemilihan stasiun GAW (*Global Atmosphere Watch*) kototabang penting karena merupakan stasiun pengamatan yang merepresentasikan wilayah yang hampir tepat berada di lintang 0° selain Mount Kenya, namun berbeda dengan Kenya yang merupakan daerah gurun. Kototabang mewakili daerah yang memiliki hutan hujan tropis dengan tingkat kelembaban dan curah hujan yang tinggi (Pujiastuti, 2013). Selain itu, jarak stasiun

GAW Kototabang relatif dekat (kurang dari 50 Km) dengan laut sebelah barat Sumatera.

METODE PENELITIAN

Data

Data yang dipakai adalah data pengukuran konsentrasi gas karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄) di atmosfer permukaan yang diperoleh dari stasiun GAW Bukit Kototabang. Data kedua gas ini merupakan rata-rata bulanan pada periode Januari 2004 sampai dengan Desember 2013. Data konsentrasi rata-rata bulanan CO₂ global diperoleh dari *website* NOAA (<ftp://ftp.cmdl.noaa.gov>).

Data suhu udara permukaan menggunakan data suhu udara permukaan rata-rata yang diperoleh dari hasil pengukuran di stasiun GAW Bukit Kototabang. Data suhu permukaan laut anomali Indonesia adalah data reanalisis global yang diperoleh dari *Japan Meteorological Agency* (<http://extreme.kishou.go.jp>), dengan menyeleksi wilayah Indonesia.

Analisis Radiative Forcing

Data pengukuran karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄) selanjutnya dianalisis untuk menentukan RF dengan menggunakan persamaan yang diperoleh dari IPCC (2001) (Tabel 2). IPCC 2011 menyatakan bahwa C0, M0 dan N0 menunjukkan konsentrasi CO₂, CH₄ dan N₂O pada 1750 (pre-revolusi

Tabel 2. Persamaan untuk menentukan RF berdasarkan konsentrasi gas rumah kaca sebelum masa revolusi industri

Jenis Gas	Persamaan <i>Radiative Forcing</i>	Konstanta
CO ₂	$\Delta F = \alpha \ln \pi \left(\frac{C}{C_0} \right)$	$\alpha = 5,35$
CH ₄	$\Delta F = \alpha \left(\sqrt{M} - \sqrt{M_0} \right) - \left(f(M, N_0) - f(M_0, N_0) \right)$	$\alpha = 0,036$

dimana,

- C = konsentrasi CO₂ (ppm)
- M = konsentrasi CH₄ (ppb)
- N = konsentrasi N₂O (ppb)

Sumber : <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-06.pdf>; diakses 24 Feb 2019

industri). Besarnya nilai konsentrasi CO₂, CH₄ dan N₂O tersebut berturut-turut adalah 278 ppm, 722 ppb, dan 270 ppb.

Hasil perhitungan dengan menggunakan kedua persamaan dalam tabel 2 selanjutnya akan digunakan untuk menghitung selisih suhu udara akibat RF dengan menggunakan persamaan :

$$\Delta T_s = \lambda \Delta F \quad \text{Keterangan :}$$

- ΔT_s = selisih temperatur permukaan bumi
- ΔF = Radiative forcing
- λ = parameter sensitivitas iklim
- ($\lambda = 0,5 \text{ KWm}^{-2}$)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsentrasi dan Radiative Forcing Gas CO₂ dan CO₄

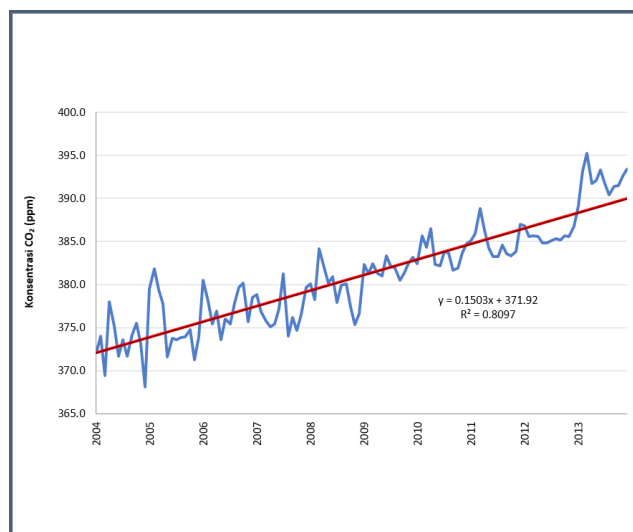
Tren kenaikan konsentrasi CO₂ di GAW Bukit Kototabang yang konsisten jelas terlihat pada Gambar 2. Laju peningkatan konsentrasi CO₂ tahunan (periode 2004-2013) sekitar 5,11% dengan prosentase peningkatan terbesar terjadi pada tahun 2012-2013 yang mencapai 1,7% dan peningkatan rata-ratanya 0,56% per tahun pada periode tersebut. Nilai rata-rata RF untuk CO₂ selama 10 tahun (2004-2013) adalah $1,686 \pm 0,08 \text{ W/m}^2$. Apabila periode data dibagi menjadi 5 tahun, yaitu periode 2004-2008 dan 2009-2013, maka pada periode 2004-2008 didapat nilai rata-rata RF sebesar $1,621 \pm 0,0033 \text{ W/m}^2$ dan periode 2009-2013 sebesar $1,750 \pm 0,0054 \text{ W/m}^2$. Hal ini berarti bahwa periode 2009-2013 terjadi kenaikan nilai rata-rata RF untuk CO₂ sebesar kira-kira 0,13 W/m² atau sekitar 8% dibandingkan periode 2004-2008. Sementara itu jika dikumulatifkan sejak masa pra-industri di 1750, peningkatan konsentrasi CO₂ pada

akhir 2013 mencapai 41,05%.

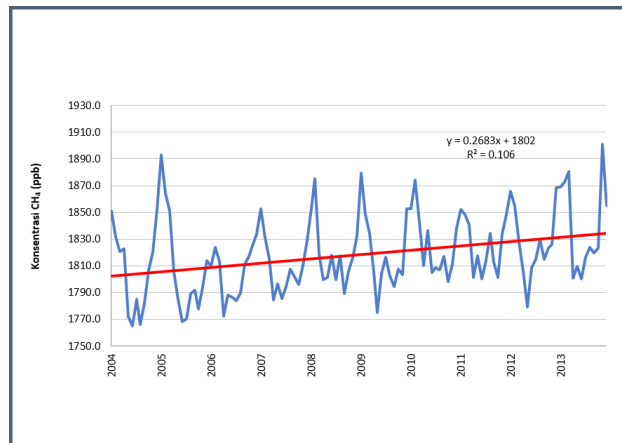
Dergiades *et al.* (2016) mengidentifikasi adanya kenaikan radiatif forcing gas rumah kaca sebesar 2.0 W/m² selama 500 tahun. Pada penelitian ini, Dergiades *et al.* (2016) menggunakan data tahunan selang waktu tahun 1500 - 2011 yang antara lain meliputi data gas rumah kaca (CO₂, CH₄, N₂O, CFC11 dan CFC12), index ENSO dan rerata suhu permukaan di belahan bumi utara.

Konsentrasi CH₄ di atmosfer juga yang mengalami tren peningkatan dari tahun ke tahun dengan variasi keragaman konsentrasi bulanan yang lebih besar apabila dibandingkan dengan CO₂ (Gambar 3). Peningkatan konsentrasi CH₄ tahunan (periode 2004-2013) sekitar 4,92% dengan presentase peningkatan terbesar terjadi pada 2012-2013 yang mencapai 0,71% dan laju peningkatan rata-ratanya 0,53% per tahun pada periode tersebut. Nilai rata-rata RF untuk CH₄ selama 10 tahun (2004-2013) adalah $0,511 \pm 0,004 \text{ W/m}^2$. Jika periode datanya dibagi menjadi masing-masing 5 tahun yaitu periode 2004-2008 dan 2009-2013, maka diperoleh nilai rata-rata RF $0,508 \pm 0,002 \text{ W/m}^2$ pada periode tahun 2004-2008, sedangkan periode 2009-2013 bernilai $0,515 \pm 0,003 \text{ W/m}^2$ yang berarti bahwa periode 2009-2013 terjadi kenaikan nilai rata-rata RF untuk CH₄ sebesar kira-kira 0,007 W/m² atau sekitar 1,38% dibandingkan periode 2004-2008. Sementara itu jika peningkatan konsentrasi CH₄ dikumulatifkan sejak masa pra-industri pada 1750, pada akhir 2013 peningkatannya mencapai 162,76%.

Peningkatan konsentrasi CH₄ yang signifikan tersebut sempat memasuki keadaan dimana konsentrasinya berada dalam keadaan stabil pada akhir 1990-an sampai dengan awal 2000-an (Dlugokencky *et al.*, 2003; Kirschke *et al.*, 2013). Hal tersebut juga



Gambar 2. Konsentrasi CO₂ di GAW Bukit Kototabang, Tahun 2004 - 2013.



Gambar 3. Konsentrasi CH₄ di GAW Bukit Kototabang, Tahun 2004 – 2013.

sempat terpantau dalam pengamatan gas tersebut di Bukit Kototabang dimana CH₄ memperlihatkan tren konsentrasi yang stabil (Nahas *et al.*, 2008) meskipun tren tersebut tampaknya mulai berangsur naik kembali ketika memasuki tahun 2007.

Pada prinsipnya sumber gas CO₂ dan CH₄ berasal dari proses alami dan hasil kegiatan manusia (antropogenik), (Jacobson, 2001). Sumber alami gas-gas ini adalah proses geologi termasuk proses vulkanik, serta proses-proses alami yang terjadi di hutan, danau, daratan dan laut. Sedangkan sumber antropogenik kedua gas ini dari kegiatan industri, penggunaan bahan bakar fosil, pertanian (terutama untuk CH₄) serta limbah industri dan rumah tangga, (Khan *et al.*, 2007; Zimnoch *et al.*, 2018).

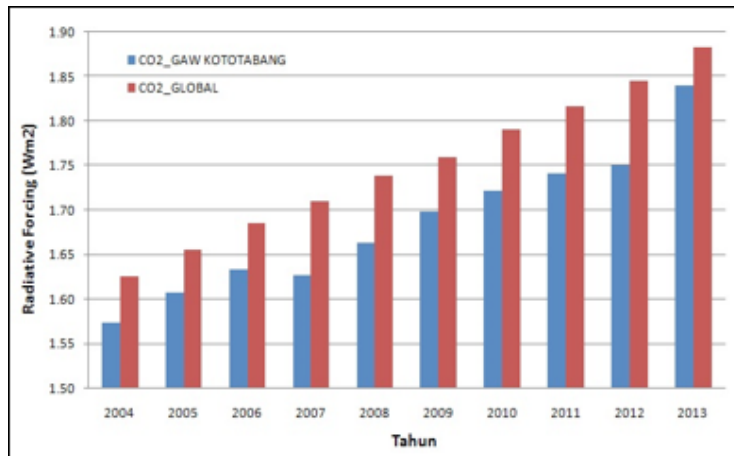
Produksi kedua gas dari proses alami lebih kecil dari antropogenik. Secara global diperkirakan bahwa produksi antropogenik CH₄ sebesar 60% dibandingkan dengan produksi alami (EPA, 2010). Dengan demikian maka, penyebab meningkatnya konsentrasi CO₂ dan CH₄ pada pengukuran di Kototabang mungkin disebabkan oleh meningkatnya konversi lahan dari tutupan hijau seperti sawah dan hutan menjadi daerah industri, pemukiman, perkantoran maupun untuk infrastruktur. Konversi lahan sawah secara nasional kurun waktu 15 tahun (2000 - 2015) adalah sebesar 96.512 ha th⁻¹ (Mulyani *et al.*, 2016). Selain itu, sumbangan CO₂ juga berasal dari peningkatan jumlah kendaraan bermotor serta adanya produksi asap akibat kebakaran hutan. Hasil penelitian REDD+ menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca terbesar berasal dari deforestasi (Krisnawati *et al.*, 2015). Lebih lanjut, kebakaran lahan gambut juga berkontribusi pada peningkatan emisi pada 2006 – 2009. Menurut Yoshiro *et al.* (2008), terjadi peningkatan emisi CH₄ dan N₂O sampai dengan setahun setelah terjadi penebangan hutan tropis.

Konsentrasi CO₂ dan CH₄ Terhadap Radiative Forcing

Persamaan untuk menentukan besarnya RF ($\Delta T_s = \lambda \Delta F$), untuk masing-masing gas rumah kaca mengindikasikan hubungan yang linier ($y = 0,2683x + 1802$, $R^2 = 0,106$) antara terjadinya kenaikan konsentrasi gas rumah kaca dengan peningkatan energi radiasi matahari yang tertahan di permukaan bumi (RF bernilai positif). Hal tersebut sejalan dengan kenyataan bahwa keberadaan gas rumah kaca di atmosfer akan meningkatkan kemampuan atmosfer menahan radiasi gelombang panjang sehingga semakin banyak energi radiasi yang tertahan di atmosfer bumi daripada energi radiasi yang diemisikan ke luar angkasa, (Kiehl & Trenberth, 1997).

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada periode yang sama, nilai RF CO₂ lebih tinggi daripada CH₄ (Gambar 4 dan Gambar 5). Hal ini menunjukkan bahwa kumulatif peningkatan konsentrasi CH₄ di atmosfer sebenarnya jauh lebih besar dibandingkan CO₂. Namun demikian, karena proporsi konsentrasi CH₄ jauh lebih kecil daripada CO₂, maka secara umum pengaruh CO₂ sebagai gas rumah kaca utama di atmosfer menjadi lebih dominan.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa nilai RF CO₂ yang diukur di GAW Bukit Kototabang pada periode 2004-2013 relatif lebih rendah dibandingkan dengan rerata global. Secara umum tren kenaikan nilai RF per tahunnya selalu mengikuti nilai rerata globalnya kecuali pada tahun 2007 RF di Kototabang mengalami penurunan. Pada akhir periode analisis (2013), nilai RF CO₂ di GAW Kototabang mengalami nilai terbesar dibandingkan tahun-tahun pengukuran sebelumnya, begitu pula dengan rerata globalnya. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh Rata-rata kenaikan RF CO₂ di Kototabang dan global selang waktu 2004-2013 adalah berturut-turut sebesar 1,77% dan 1,64%, sehingga dapat disimpulkan bahwa kenaikan rata-rata tahunan RF CO₂ di Kototabang lebih tinggi dibandingkan RF



Gambar 4. KRF CO₂ di GAW Bukit Kototabang dan Rerata Global.

CO₂ global.

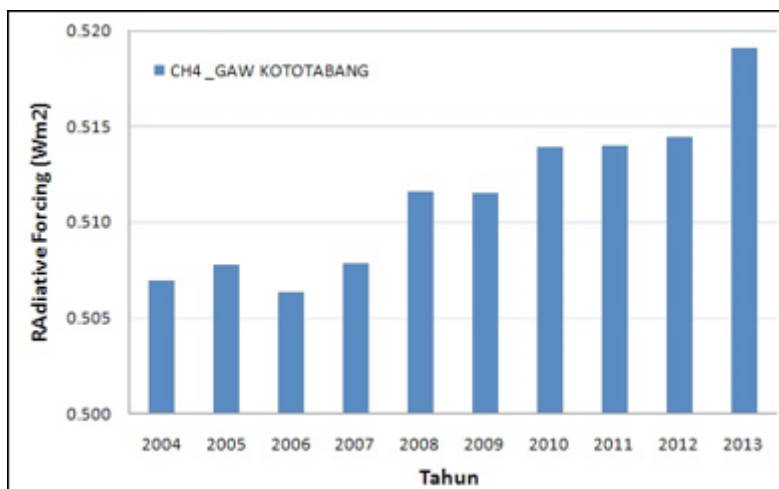
Kondisi ini diperkuat dengan hasil penelitian Nahas & Setiawan (2008) bahwa seluruh gas rumah kaca menunjukkan tren positif. Khusus untuk CH₄ yang sejak 1999 secara global memiliki konsentrasi yang stabil, berdasarkan hasil pengukuran di Bukit Kototabang dan secara global, sejak 2007 sampai dengan semester pertama 2008 konsentrasinya cenderung meningkat.

Nilai RF CH₄ yang diukur di GAW Bukit Kototabang juga relatif mengalami tren naik secara tahunan pada periode pengukuran 2004-2013 (Gambar 5). Pada 2013 nilai RF CH₄ mengalami puncaknya. Rata-rata kenaikan RF CH₄ di Kototabang pada periode 2004-2013 adalah sebesar 0,26%. Jika dibandingkan dengan rata-rata kenaikan RF CO₂ maka rata-rata kenaikan RF CH₄ lebih rendah. Hal ini sesuai dengan hasil beberapa penelitian sebelumnya bahwa perbandingan kenaikan RF CO₂ lebih besar daripada RF CH₄, (IPCC, 2013b) dan (<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-06.pdf>; diakses 6 Maret 2019).

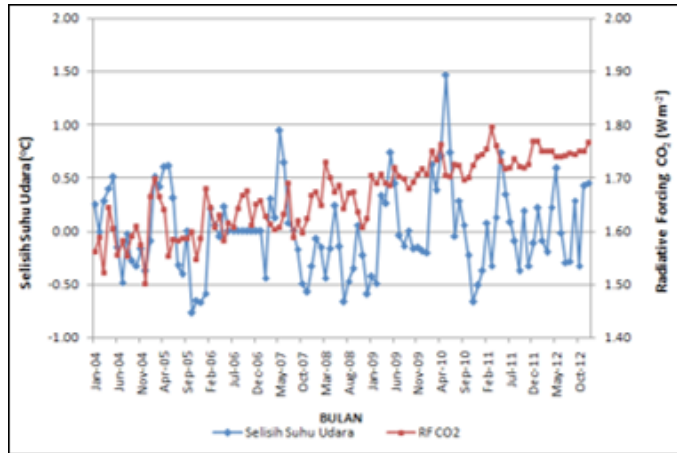
Kenaikan RF kedua GRK ini dapat saja berpengaruh pada kondisi iklim. Xie *et al* (2016) meneliti tentang efektif RF dan respon iklim terhadap kenaikan konsentrasi CH₄. Kenaikan konsentrasi CH₄ berpengaruh pada kenaikan suhu permukaan dan presipitasi. Terjadi peningkatan presipitasi di lautan pada posisi 10°N - 20°N, sebaliknya di lautan sedangkan penurunan presipitasi terjadi di lautan posisi 10°S – 10°N terjadi penurunan presipitasi.

Radiative Forcing dan Suhu Permukaan Atmosfer

Gambar 6 memperlihatkan perbandingan selisih suhu permukaan atmosfer dan RF CO₂ serta hubungannya. Hasil *scatter plot* tren kenaikan RF CO₂ mengikuti kenaikan selisih suhu permukaan atmosfer dengan koefisien determinasinya (R²) sebesar 0,021 (Gambar 7). Hal ini menunjukkan bahwa variasi oleh kenaikan selisih suhu permukaan atmosfer akibat dari kenaikan RF CO₂ sebesar 2,1% sedangkan sisanya diduga kuat oleh faktor lain. Kecilnya hubungan kemungkinan disebabkan oleh penurunan tren selisih suhu udara periode pertengahan 2010 - akhir 2012. Penurunan tren selisih suhu udara ini diduga terkait



Gambar 5. RF CH₄ di GAW Bukit Kototabang.

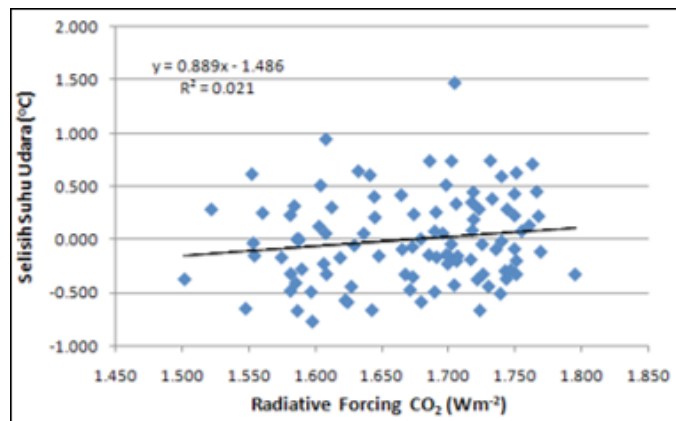


Gambar 6. Perbandingan Suhu Udara dan *Radiative Forcing* Karbondioksida di Bukit Kototabang.

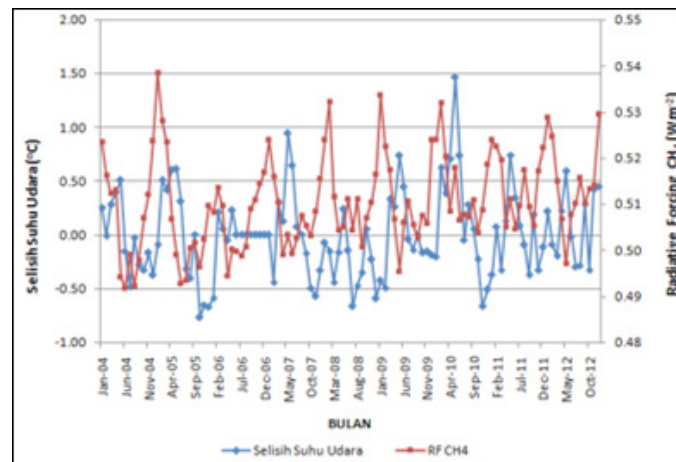
dengan fenomena *La Nina* kuat pada periode 2010-2011 dan *La Nina moderat* pada periode 2011-2012, berdasarkan data *Oceanic Niño Index* (ONI), (<https://ggweather.com/enso/oni.htm>, diakses 6 Maret 2019). Kejadian *La nina* pada periode ini juga didahului oleh *El Nino* moderat. Namun masih diperlukan kajian lebih lanjut untuk mengidentifikasi penyebabnya. Menurut penelitian Azmoodehfar & Azarmsa (2013), pada tahun-tahun normal tanpa peristiwa ENSO, suhu udara

maksimum lebih besar daripada tahun-tahun dengan peristiwa *El Nino*. Sedangkan pada tahun-tahun *La Nina*, perubahan suhu maksimum dan minimum menurun lebih kecil dibandingkan dengan tahun-tahun dengan peristiwa *El Nino*.

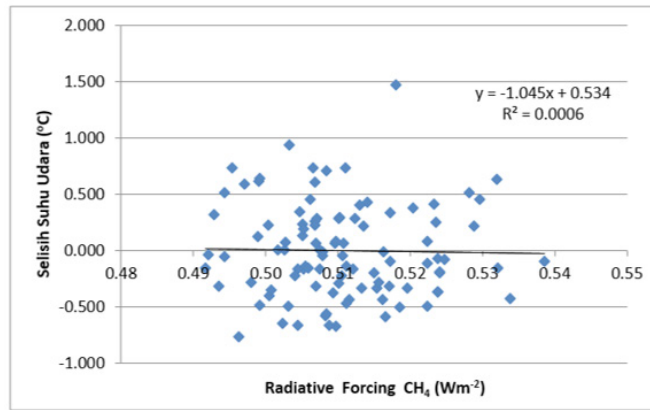
Gambar 8 memperlihatkan perbandingan selisih suhu permukaan atmosfer dan RF CH₄ serta hubungannya. kenaikan RF CH₄ dengan selisih suhu



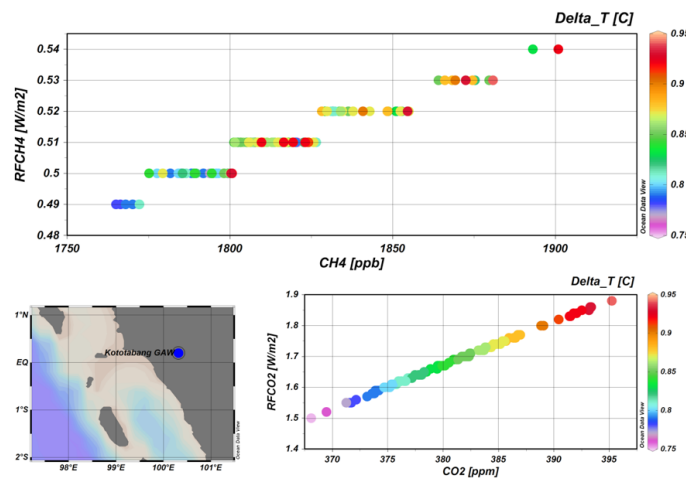
Gambar 7. Hubungan antara *Radiative Forcing* CO₂ dengan Selisih Suhu Udara 2004 - 2013.



Gambar 8. Perbandingan Selisih Suhu Udara dan *Radiative Forcing* Metana di Bukit Kototabang.



Gambar 9. Hubungan antara *Radiative Forcing* CH₄ dengan Selisih Suhu Udara pada 2004 - 2013.



Gambar 10. Hubungan antara *Radiative Forcing* CH₄ dengan Selisih Suhu Udara pada 2004 - 2013.

udara berbanding linier dengan tren kenaikan RF CH₄. Hubungan antara kenaikan RF CH₄ dengan suhu udara, terlihat adanya pola sebaran titik yang cenderung negatif. Hal ini menunjukkan bahwa jika terjadi kenaikan konsentrasi CH₄ akan disertai dengan penurunan suhu dan sebaliknya. Variasi selisih suhu permukaan atmosfer akibat dari kenaikan RF CO₂ sebesar 0,0006 sedangkan sisanya diduga kuat oleh faktor lain (Gambar 9).

Berdasarkan Gambar 10, terlihat bahwa kenaikan konsentrasi CH₄ di atmosfer mengakibatkan kenaikan RF CH₄. Kenaikan ini bersifat linier dan meningkat dalam interval tertentu (0,01 W/m²). Hal ini terlihat ketika kenaikan CH₄ mencapai sekitar 1800 ppb, maka RF CH₄ akan meningkat dari 0,50 W/m² menjadi 0,51 W/m². Peningkatan akan kembali terjadi ketika konsentrasi CH₄ mencapai sekitar 1825 ppb. Karakteristik hubungan antara kenaikan CO₂ terhadap RF terlihat berbeda dibandingkan dengan kenaikan CH₄ terhadap RF. Kenaikan RF CO₂ langsung terjadi saat kenaikan konsentrasi CO₂.

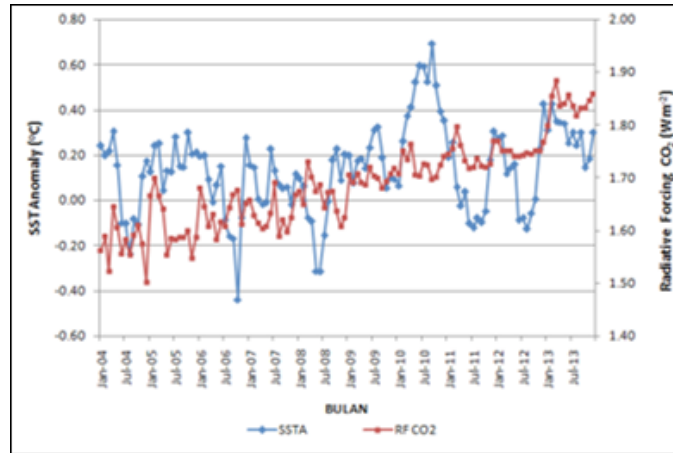
Radiative Forcing dan Suhu Permukaan Laut (SPL)

Grafik perbandingan anomali suhu permukaan

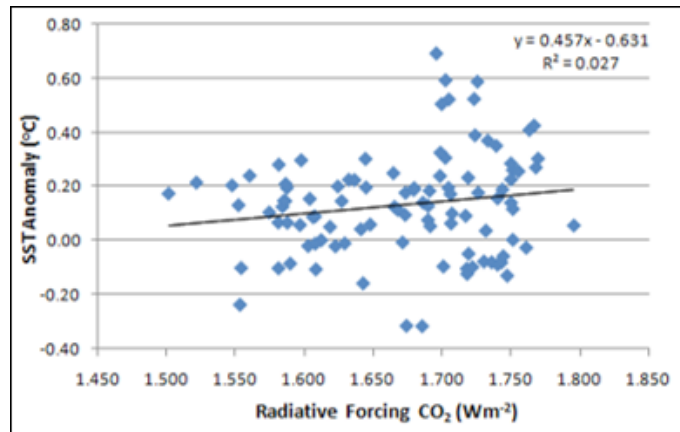
laut Indonesia dan CO₂ disajikan pada Gambar 11. Pada grafik tersebut terlihat adanya tren kenaikan anomali SPL pada kurun waktu 2004–2013. Apabila tren anomali suhu permukaan laut ini dihubungkan dengan RF CO₂ maka koefisien determinasinya (R²) adalah sebesar 0,027 (Gambar 12). Hal ini berarti bahwa hubungan kedua komponen ini sangat kecil.

Perbandingan anomali suhu permukaan laut Indonesia dan RF CH₄ ditampilkan pada Gambar 13. Dari hasil analisis Gambar 14 terlihat bahwa variasi suhu muka laut akibat perubahan RF CH₄ sangat kecil, dengan koefisien determinasi (R²=0,498). Hal ini mungkin disebabkan oleh respon yang lambat terhadap kenaikan RF seperti yang terjadi di laut Pasifik tropis (Zhang *et al.*, 2019). Kondisi di laut Pasifik ini bisa terjadi karena proses dinamika laut seperti umbalan (*upwelling*).

Kenaikan CO₂ di atmosfer dapat memberikan pengaruh yang signifikan bagi laut. Sebagai komponen iklim terluas di permukaan bumi, laut menjadi komponen penting dalam interaksi atmosfer laut (Siedler *et al.*, 2013). Interaksi laut dan atmosfer melalui pertukaran momentum, panas, juga berbagai



Gambar 11. Perbandingan Anomali Suhu Permukaan Laut Indonesia dan *Radiative Forcing* Karbondioksida di Bukit Kototabang.



Gambar 12. Hubungan antara *Radiative Forcing* CO₂ dengan Anomali Suhu Permukaan Laut di Indonesia pada 2004 - 2013.

substansi termasuk karbon. Pengukuran interaksi laut atmosfer melalui pertukaran karbon (*sink source* CO₂) di perairan Indonesia pernah dilakukan oleh Rustam *et al.* (2013) dan Ramawijaya *et al.* (2012).

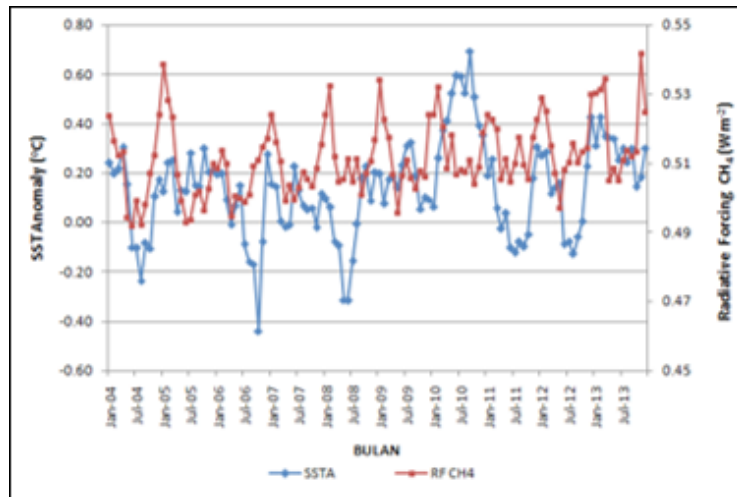
Kenaikan karbon di atmosfer yang kemudian diserap oleh laut akan menyebabkan meningkatnya konsentrasi CO₂. Peningkatan konsentrasi CO₂ di laut dapat menyebabkan nilai pH laut menjadi turun atau biasa disebut dengan pengasaman laut (*ocean acidification*), (Caldeira & Wickett, 2003). Pengasaman laut membawa konsekuensi pada berbagai biota yang mempunyai struktur kalsium karbonat (CaCO₃) seperti karang, kerang-kerangan atau plankton, (Orr *et al.*, 2005). Hal ini mengakibatkan terhambatnya pembentukan terumbu karang bahkan secara biodiversitas dapat terjadi penurunan jumlah taxa (Veron *et al.*, 2009; Hall-Spencer *et al.*, 2008).

Lebih lanjut, interaksi antara atmosfer dan laut juga terlihat dari pengaruh fenomena cuaca pada kondisi fisik, biologi dan kimia laut. Kejadian *Indian Ocean Dipole* (IOD) menyebabkan terjadinya peristiwa

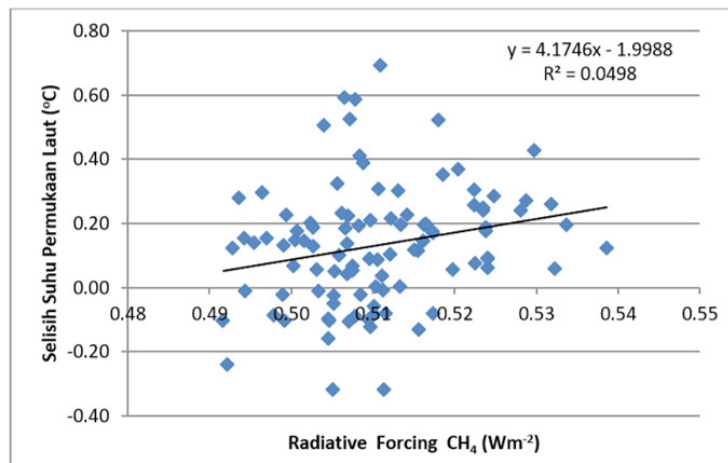
upwelling yang mana massa air dalam akan naik ke permukaan dan pada saat ini terjadi penurunan saturasi mineral aragonit (salah satu bentuk CaCO₃) di air laut (Xue *et al.*, 2016).

KESIMPULAN

Penentuan RF gas karbondioksida (CO₂) dan metana (CH₄) yang diukur di GAW Bukit Kototabang memperlihatkan tren peningkatan seperti halnya dengan meningkatnya konsentrasi dari masing-masing gas rumah kaca tersebut pada periode pengukuran 2004-2013. Besarnya rerata RF gas rumah kaca Bukit Kototabang berturut-turut sebagai berikut: CO₂ = 1,686 ± 0,08 Wm⁻²; CH₄ = 0,511± 0,004 Wm⁻². Jika dibandingkan dengan faktor anomali suhu permukaan laut Indonesia dan selisih suhu udara, maka nilai *radiative forcing* CO₂ dan CH₄ di atmosfer memiliki koefisien determinasi (R²) yang relatif lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa respon laut terhadap kenaikan CO₂ dan CH₄ lebih besar dibandingkan dengan atmosfer.



Gambar 13. Perbandingan Permukaan Laut Anomali Indonesia dan *Radiative Forcing* Metana di Bukit Kototabang.



Gambar 14. Hubungan antara *Radiative Forcing* CH₄ Suhu Permukaan Laut di Indonesia pada 2004 - 2013.

PERSANTUNAN

Kontribusi dari para penulis dalam tulisan ini adalah sama (seluruh penulis adalah kontributor utama). Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada Prof. Dr. Ahmad Bey atas diskusi dan masukannya untuk memperkaya tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Azmoodehfara, M.H., & Azarmsa, S.A. (2013). Assessment the Effect of ENSO on Weather Temperature Changes Using Fuzzy Analysis (Case Study: Chabahar), *APCBEE Procedia*, 5(2013) 508 – 513. doi: 10.1016/j.apcbee.2013.05.086
- Caldeira, K., & Wickett, M.E. (2003). Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425, 365-365. DOI : 10.1038/425365a
- Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Bruhwiler, L., Masarie, K.A., Lang, P.M., Miller, J.B. & Tans, P.P. (2003). Atmospheric Methane Levels Off: Temporary Pause or a New Steady-State?. *Geophysical Research Letters*, 30(19), 1-4.
- Enting, I.G. (1998). *Attribution of Greenhouse Gas Emissions, Concentrations and Radiative Forcing*. CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No. 38.
- EPA. (2010). Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Hall-Spencer, J.M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S.M., Rowley, S.J., Tedesco, D., & Buia, M.C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, 454, 96–99.

- Hartman, D.L. (1994). *Global Physical Climatology*. Academic Press. San Diego, California, USA.
- Hofmann, D.J., Butler, J.H., Dlugokencky, E.J., Elkins, J.W., Masarie, K. Montzka, S.A., & Tans, P. (2006). The Role of Carbon Dioxide in Climate Forcing From 1979 to 2004: Introduction of the Annual Greenhouse Gas Index. *Tellus* 58(5), 614-619.
- IPCC. (2001). *Third Assessment Report Working Group I: Scientific Basis Chapter 6: RF of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. (2007). *Fourth Assessment Report Working Group I: Scientific Basis Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in RF*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. (2013a). *Fifth Assessment Report Working Group I: Scientific Basis Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. (2013b). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp
- <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-06.pdf>; diakses 24 Feb 2019
- Jacob, D.J. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Jacobson, M.Z. (2001). Global Direct Radiative Forcing due to Anthropogenic and Natural Aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 106(D2), 1551-1568.
- Khan, M.D., Rashid, H., Blume, H.P., Adachi, T., Pfisterer, U., & Muller-Thomsen, U. (2007). Source and Sink Strength of Carbon Dioxide, Methane and Distribution of Sulfate in Salt-marsh Soils at the Wadden Sea Coast of Northern Germany. *Journal. Appl. Sci. Environ. Manage.* 11(2), 223-229.
- Kiehl, J.T., & Trenberth, K.E. (1997). Earth's Annual Global Mean Energy Budget. *Bulletin of American Meteorological Society*, 78(2), 197-208.
- Kirschke, S., P. Bousquet., P. Ciais., M. Saunois, J. G. Canadell., E. J. Dlugokencky., P. Bergamaschi., D. Bergmann., D. R. Blake, L. Bruhwiler., P. C. Smith, S. Castaldi., F. Chevallier., L. Feng., A. Fraser., M. Heimann., E. L. Hodson., S. Houweling., B. Josse., P. J. Fraser., P. B. Krummel., J-F. Lamarque., R. L. Langenfelds., C. Le Quéré., V. Naik., S. O'Doherty., P. I. Palmer., I. Pison., D. Plummer., B. Poulter., R. G. Prinn., M. Rigby., B. Ringeval., M. Santini., M. Schmidt., D. T. Shindell., I. J. Simpson., R. Spahni, L. P. Steele., S. A. Strode., K. Sudo., S. Szopa., G. R. van der Werf., A. Voulgarakis., M. van Weele., R. F. Weiss., J. E. Williams., & G. Zeng. (2013). Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 6:813-823.
- Knutti, R., & Hegerl, G.C. (2008). The equilibrium sensitivity of the Earth's Temperature to Radiation Changes. *Nature Geoscience*, 1(11), 735-743.
- Krisnawati, H., Adinugroho, W.C., Imanuddin, R., & Hutabarat, S. (2015). *Pendugaan Emisi Gas Rumah Kaca Tahunan dari Hutan dan Lahan Gambut di Kalimantan Tengah*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitasi, Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Bogor, Indonesia.
- Mulyani, A., Kuncoro, D., Nursyamsi, D., & Agus, F. (2016). Analisis Konversi Lahan Sawah: Penggunaan Data Spasial Resolusi Tinggi Memperlihatkan Laju Konversi yang Mengkhawatirkan. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 40(2), 121-133.
- Nahas, A.C., Setiawan, B., Herizal., Dlugokencky, E.J, & Conway, T. (2008). Analisis Konsentrasi Metana Atmosferik di Stasiun Pemantau Atmosfer Global Bukit Kototabang. *Buletin Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 4(3).
- Orr, J.C., V.J. Fabry., O. Aumont., L. Bopp., S.C. Doney., R.A. Feely., A. Gnanadesikan., N. Gruber., A. Ishida., F. Joos., R.M. Key., K. Lindsay., E. Maier-Reimer., R. Matear., P. Monfray., A. Mouchet., R.G. Najjar., G. Plattner., K.B. Rodgers., C.L. Sabine., J.L. Sarmiento., R. Schlitzer., R.D. Slater., I.J. Totterdell., M. Weirig., Y. Yamanaka & A. Yool. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, 681-686. doi:10.1038/nature04095
- Pujastuti, D. (2013). Analisis Korelasi RF Metana (CH₄) dengan Perubahan Temperatur di Kototabang tahun 2004-2013. *Jurnal Teknik Lingkungan UNAND*, 10(1), 29-37.

- Ramaswamy, V., Boucher, O., Haigh, J., Hauglustaine, D., Haywood, J., Myhre, G., Nakajima, T., Shi, G.Y., Solomon, S., Betts, R., Charlson, R., Chuang, C., Daniel, J.S., Del Genio, A., van Dorland, R., Feichter, J., Fuglestvedt, J., de, P.M., Forster, F., Ghan, S.J., Jones, A., Kiehl, J.T., Koch, D., Land, C., Lean, J., Lohmann, U., Minschwaner, K., Penner, J.E., Roberts, D.L., Rodhe, H., Roelofs, G.J., Rotstayn, L.D., Schneider, T.L., U. Schumann, U., Ramawijaya, S.E., Awaludin, M.Y., Pranowo, W.S., & Rosidah. (2012). Pemanfaatan Algoritma Zhu Untuk Analisis Karbon Laut di Teluk Banten, *J. Harpodon Borneo* 5(2), 131-136. agrformet.2008.01.010
- Zhang, L., Sun, D.Z., & Karnauskas, K.B. (2019). The Role of the Indian Ocean in Determining the Tropical Pacific SST Response to Radiative Forcing in an Idealized Model. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 86, 1-9. DOI : 10.1016/j.dynatmoce.2019.02.003
- Rustam, A., Pranowo, W.S. Kepel, T.L., Adi, N.S., & Hendrajana, B. (2013). Peran Laut Jawa dan Teluk Banten Sebagai Pelepas dan/atau Penyerap CO₂. *Jurnal Segara*. 9(1), 75-84.
- Zimnoch, M., Necki, J., Chmura, L., Jasek, A., Jelen, D., Galkowski, M., Kuc, T., Gorczyca, Z., Bartyzel, J., & Rozanski, K. (2018). Quantification of carbon dioxide and methane emissions in urban areas: source apportionment based on atmospheric observations. *Mitigation and Adaptation Strategies Global Change*, 24(6), 1051-1071. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9821-0>
- Schwartz, M.D. Schwarzkopf, K.P. Shine, S. Smith, D.S. Stevenson, F. Stordal, I. Tegen, & Zhang, Y. (2018). Radiative Forcing of Climate Change, <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/TAR-06.pdf>; diakses 6 Maret 2019
- Siedler, G., Griffies, S.M., Gould, J., & Church, J.A (Eds.). (2013). *Ocean Circulation and Climate - A 21 Century Perspective*. Academic Press.
- UNEP. (2007). Climate Change 2007 : Synthesis Report. Veron, J., Hoegh-Guldberg, O., Lenton, T. 2009. The coral reef crisis: The critical importance of <350 ppm CO₂. *Mar. Pollut. Bull.* 58, 1428–1436.
- Wallace, J.M., & Hobbs, P.V. (2006). *Atmospheric Science an Introductory Survey*. Academic Press is an imprint of Elsevier. San Diego, California, USA.
- Xie, B., Zhang, H., Yang, D., & Wang, Z.L. (2016). A modeling study of effective radiative forcing and climate response due to increased methane concentration. *Advances in Climate Change Research*, 7, 241-246. DOI : 10.1016/j.accre.2016.12.00
- Xue, L., Wang, H., Jiang, L.Q., Cai, W.J., Wei, Q., Song, H., Kuswardani, A.R.T.D., Pranowo, W.S., Beck, B., Liu, L., & Yu, W. (2016). Aragonite saturation state in a monsoonal upwelling system off Java, Indonesia. *Journal of Marine Systems*, 153, 10-17. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2015.08.003.
- Yashiro. Y., Kadir, W.R., Okuda, T., & Koizumi, H. (2008). The effects of logging on soil greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(5), 799-806. DOI : 10.1016/j.