

VARIABILITAS DIVERGENSI FLUKS RADIASI DI INDONESIA

Rosida, Indah Susanti, dan Nani Cholianawati

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Dr Djundjunan 133 Bandung 40173
Pos-el : rosida2009@gmail.com

Abstract

Storage and transfer of energy in the atmosphere-ocean system has an important role in determining the average climate and the evolution of climate anomalies. The divergence of radiation flux is a value that can show how much energy is saved or lost as the difference between the net flux at top of atmosphere (TOA) and on the surface. Radiation data in this study were obtained from satellite instruments Aqua-CERES (the Clouds and the Earth's Radiant Energy System), with a spatial resolution of 10x10 and temporal resolution of the data on average a month, from January 2003 to June 2015. The average value of spatial determined based on monthly, seasonal and annual variability to indicate the divergence within the scope of the study areas of Indonesia (15°N-15°S and 90°E-150°E). In this study analyzed the tendency of heating or cooling, especially in the area of Indonesia based on the variability of its divergence of radiation flux. Fluctuations divergence that occurred more influenced by the value of the divergence of long waves. Thus, absorption or release of radiative energy by long wave radiation in the atmosphere is the determinant of fluctuations in the availability of radiative energy that is the implication of their divergences. LW radiation flux divergence showed a significant increasing trend. With linear regression, it can be shown that the divergence of long waves has increased 0.001 W / m² per month, or 0.012 W / m² annually.

Keywords : divergence, CERES, radiation, TOA, surface.

Abstrak

Penyimpanan dan transfer energi dalam sistem atmosfer-lautan memiliki peranan penting dalam menentukan iklim rata-rata dan evolusi anomali iklim. Divergensi fluks radiasi adalah nilai yang dapat menunjukkan berapa besar energi yang tersimpan atau yang hilang yang merupakan selisih antara fluks netto di *top of atmosphere* (TOA) dan di permukaan. Data radiasi dalam penelitian ini diperoleh dari instrumen satelit Aqua-CERES (*The Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), dengan resolusi spasial 10x10, dan resolusi temporal data rata-rata bulan, dari Januari 2003 sampai dengan Juni 2015. Nilai rata-rata spasial ditentukan berdasarkan bulanan, musiman dan tahunan untuk menunjukkan variabilitas divergensinya dalam ruang lingkup daerah kajian Indonesia (15°LU-15°LS dan 90°BT-150°BT). Dalam penelitian ini dianalisis kecenderungan pemanasan atau pendinginan khususnya di wilayah Indonesia berdasarkan variabilitas divergensi fluks radiasi-nya. Fluktuasi divergensi yang terjadi lebih dipengaruhi oleh nilai divergensi gelombang panjang. Dengan demikian, penyerapan atau pelepasan energi radiatif oleh radiasi gelombang panjang di atmosfer merupakan penentu dari fluktuasi ketersediaan energi radiatif yang merupakan implikasi dari adanya divergensi. Divergensi fluks radiasi LW menunjukkan tren peningkatan yang cukup signifikan. Dengan regresi linier, dapat ditunjukkan bahwa divergensi gelombang panjang mengalami peningkatan 0,001 W/m² setiap bulannya, atau 0,012 W/m² setiap tahunnya.

Kata Kunci : divergensi, CERES, Radiasi, TOA, permukaan

1. PENDAHULUAN

Pemanasan global memicu terjadinya perubahan iklim bumi yang diperkirakan telah menyebabkan perubahan-perubahan terhadap sistem fisik dan biologis bumi kita. Hasil kajian IPCC¹ menunjukkan bahwa 11 dari 12 tahun terpanas sejak tahun 1850 terjadi dalam waktu kurun 12 tahun terakhir. Kenaikan temperatur total dari tahun 1850-1899 sampai dengan tahun 2001-2005 adalah 0,76 °C. Muka air laut rata-rata global telah meningkat dengan laju rata-rata 1,8 mm per-tahun dalam rentang waktu antara tahun 1961 sampai 2003. Kenaikan total muka air laut yang berhasil dicatat pada abad ke-20 diperkirakan 0,17 m. Laporan IPCC juga menyatakan bahwa kegiatan manusia ikut berperan dalam pemanasan global sejak pertengahan abad ke-20.

Fenomena perubahan iklim melibatkan interaksi radiasi dengan sejumlah materi pada semua lapisan atmosfer dan permukaan. Oleh karena itu, pengukuran, pemahaman dan pemodelan distribusi spasial, temporal dan spektral dari fluks radiasi menjadi penting. Fluks radiasi yang terjadi memberikan karakter pada iklim dan dipresentasikan sebagai radiasi yang sampai (*down*) dan radiasi yang keluar (*up*). Fluks radiasi netto merupakan salah satu parameter penting yang dapat menunjukkan hilangnya energi atau tersimpannya energi dalam satu lapisan. Konsep ini penting untuk mendefinisikan pemanasan atau pendinginan radiatif dari setiap elemen atmosfer atau permukaan. Secara keseluruhan, pemanasan atau pendinginan terjadi karena adanya energi yang tersimpan atau hilang, yang akan mempengaruhi keseimbangan energi.

Keseimbangan energi ini penting, dan konsep keseimbangan radiasi yang paling sederhana ini telah menjadi dasar dalam model-model iklim dengan memperhitungkan cara radiasi diserap, ditransfer dan diemisikan kembali oleh atmosfer. Proses-proses transfer radiatif yang terjadi di atmosfer mencakup :

- Pemanasan permukaan melalui absorpsi gelombang pendek
- Pemanasan dan pendinginan atmosfer oleh absorpsi dan emisi radiasi inframerah

Sellers² menjelaskan bahwa dalam proses-proses tersebut, terdapat beberapa faktor yang menjadi pengendali interaksi, yaitu albedo dan absorptivitas terhadap gelombang pendek, yang mana absorptivitas terhadap radiasi sangat dipengaruhi oleh komposisi atmosfer yang ada. Dengan demikian, fluktuasi penyerapan radiasi di atmosfer dapat menjadi salah satu tolok ukur terjadinya perubahan komponen-komponen yang ada di atmosfer. Menurut Palmen dan Newton³ dan hasil penelitian Alexander dan Schubert⁴, penyimpanan dan transfer energi dalam sistem atmosfer-lautan memiliki peranan penting dalam menentukan iklim rata-rata dan evolusi anomali iklim. Model keseimbangan energi telah terbukti menjadi sangat berguna dalam menentukan proses-proses yang mempengaruhi iklim dengan memberikan keseimbangan dalam penyimpanan, divergensi fluks, sumber dan *sink* energi di wilayah terkait.

Divergensi fluks radiasi adalah nilai yang dapat menunjukkan berapa besar energi yang tersimpan atau yang hilang yang merupakan selisih antara fluks radiasi netto di *top of atmosphere* (TOA) dan di permukaan. Observasi divergensi fluks radiasi pertama dilakukan oleh Funk⁵ dan juga oleh Fuggle dan Oke⁶ di atas padang rumput pada ketinggian 0,5 dan 1,5 m dan mencatat divergensi fluks radiasi pada malam hari yang cenderung menunjukkan kecepatan pendinginan pada -120 K day^{-1} . Lieske dan Stroschein⁷ melaporkan hasil pengukuran pertamanya di atas salju pada dua level ketinggian udara 1 m dan 5 m di atas Alaska dan menemukan efek pemanasan radiasi rata-rata pada 120 K day^{-1} . Nunez dan Oke⁸ mengembangkan analisisnya untuk perkotaan dan melaporkan bahwa rata-rata kecepatan pemanasan radiasi di perkotaan adalah $0,6 \text{ K hour}^{-1}$.

Garratt dan Brost⁹, Andre dan Mahrt¹⁰, dan Raisanen¹¹ mempelajari divergensi fluks radiasi dan divergensi fluks panas *sesible* dengan menggunakan model numerik dan hasilnya

menunjukkan bahwa masing-masing divergensi fluks tersebut mendominasi pendinginan di lapisan permukaan paling bawah dan bagian paling atas dari lapisan batas nocturnal (*nocturnal boundary layer*, NBL).

Rascke dkk.¹² menjelaskan bahwa penyerapan sinar matahari pada semua kondisi bernilai positif, dan nilai rata-rata tahunan pada semua kondisi di atas daerah tropis mencapai nilai sampai 90 Wm^{-2} . Pada beberapa wilayah efek awan cukup tinggi terutama pada wilayah yang aktivitas konveksinya tinggi, namun ada juga wilayah yang efek awannya relatif kecil. Selanjutnya dengan menggunakan data ISCCP untuk periode 1991-1995, Rascke mengilustrasikan divergensi terrestrial dan efek awan terhadap penyerapan gelombang panjang dengan mengkonversi nilainya menjadi nilai riil (negatif).

Bohren dkk.¹³ menemukan divergensi fluks yang bernilai negatif berkaitan dengan pemanasan dan hampir semuanya terjadi di lapisan atmosfer di bawah 30 km. Di bawah 15 km pemanasan terjadi oleh absorpsi radiasi matahari yang cepat meningkat seperti peristiwa pendinginan yang terjadi akibat emisi radiasi terrestrial. Divergensi fluks total diantara 8 km dan 14 km bernilai positif, sedangkan di antara 8 km sampai *ground* bernilai negatif.

Seperti yang telah dijelaskan dalam paragraf sebelumnya bahwa nilai divergensi fluks radiasi merupakan indikasi keseimbangan energi radiasi, maka dengan mengetahui besaran divergensi fluks radiasinya dapat diperkirakan kondisi keseimbangan radiasinya. Namun studi yang berkaitan dengan divergensi fluks radiasi ini, khususnya di Indonesia masih sangat jarang ditemukan, sehingga hal tersebut menjadi motivasi yang kuat untuk melakukan penelitian ini. Untuk memenuhi tercapainya tujuan penelitian ini yaitu mengetahui kondisi keseimbangan energi radiasi di wilayah Indonesia dan sekitarnya berdasarkan divergensi fluks radiasi di atmosfer, maka dalam penelitian ini diidentifikasi dan dianalisis variabilitas radiasi gelombang pendek (*shortwave*) dan gelombang panjang (*longwave*) serta variabilitas divergensi fluks radiasinya di permukaan dan di lapisan atmosfer atas (*top of atmosphere*, TOA) di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

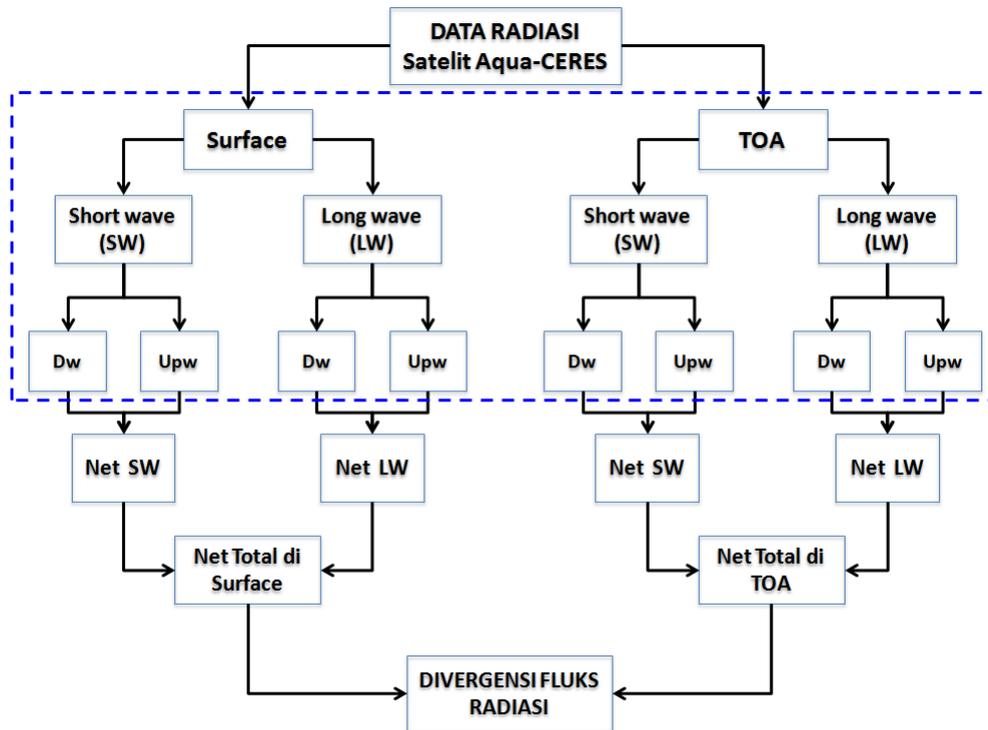
Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari instrumen satelit Aqua-CERES (*The Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), dengan resolusi spasial $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, dan resolusi temporal data rata-rata bulan dalam format hdf. Produk data radiasi yang tersedia pada instrumen tersebut adalah data radiasi gelombang pendek (*shortwave*, SW) dan radiasi gelombang panjang (*longwave*, LW) di *top of atmosphere* (TOA) dan di permukaan yang masing-masing mencakup komponen radiasi yang mengarah ke bawah (*downward*) dan komponen radiasi yang mengarah ke atas (*upward*). Untuk dapat mengkaji variabilitas divergensi fluks radiasinya digunakan data mulai dari Januari 2003 sampai dengan Juni 2015, dengan batas wilayah kajian pada $15^{\circ}\text{LU} - 15^{\circ}\text{LS}$ dan $90^{\circ}\text{BT} - 150^{\circ}\text{BT}$.

Divergensi fluks radiasi diperoleh melalui serangkaian tahap penentuan net radiasi SW dan LW yang melibatkan komponen radiasi *downward* dan *upward* masing-masing untuk komponen radiasi di permukaan dan di TOA (Gambar 1). Perhitungan net radiasi total di permukaan dan net radiasi total di TOA dilakukan dengan menggunakan persamaan :

$$R_n = R_S \text{ in} + R_L \text{ in} - R_S \text{ out} - R_L \text{ out} \quad (1)$$

dengan R_n adalah radiasi netto, R_S adalah radiasi gelombang pendek dan R_L adalah radiasi gelombang panjang. Seperti yang telah dijelaskan pada pendahuluan bahwa divergensi fluks radiasi

adalah nilai yang dapat menunjukkan berapa besar energi yang tersimpan atau yang hilang yang merupakan selisih antara fluks radiasi netto di *top of atmosphere* (TOA) dan di permukaan.



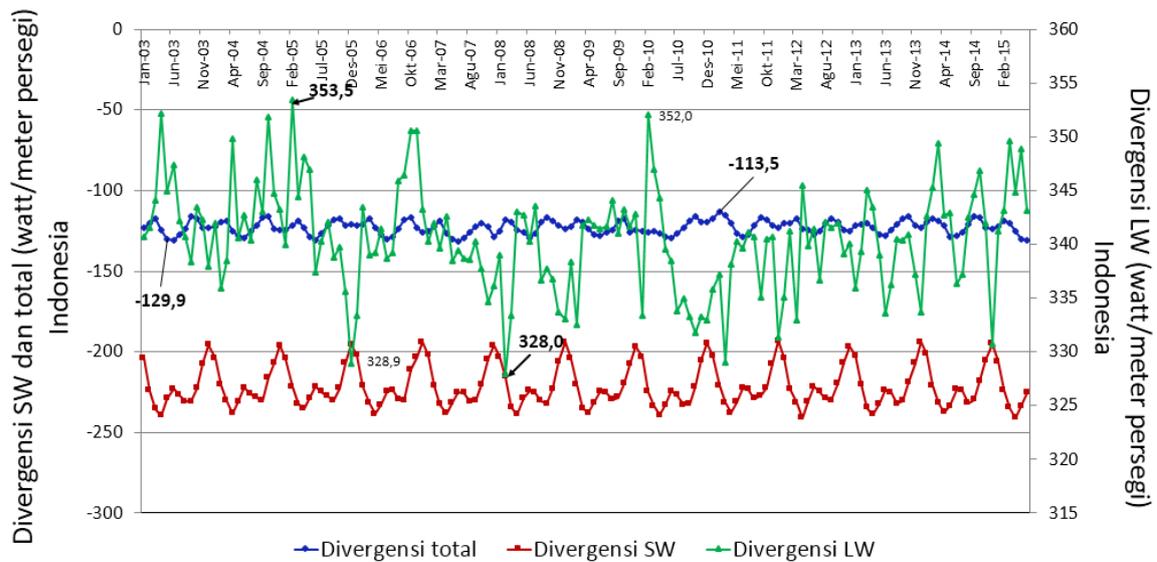
Gambar 1. Bagan alir perolehan divergensi fluks radiasi.

Data yang berada dalam kotak arsir warna biru adalah data yang sudah tersedia dan dapat diperoleh dari satelit Aqua-CERES. Dw adalah radiasi yang mengarah ke bawah (*downward*), Upw adalah radiasi yang mengarah ke atas (*upward*). Net SW dan Net LW masing masing adalah net radiasi gelombang pendek dan net radiasi gelombang panjang.

Untuk dapat menganalisis variabilitas divergensi fluks radiasinya, pengolahan yang dilakukan meliputi perhitungan secara temporal rata-rata bulan, musiman dan variasi klimatologinya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Variasi temporal rata-rata bulan dari ketiga komponen radiasi gelombang panjang dan gelombang pendek serta komponen net radiasinya, masing-masing menunjukkan tren yang spesifik dan berfluktuasi sangat variatif. Pada Gambar 2 berikut ini diperlihatkan pola ketiga komponen radiasi tersebut dari hasil pengolahan data tahun 2003 sampai 2015. Pada grafik dapat dilihat bahwa tren divergensi fluks radiasi SW selama kurang lebih 12 tahun menunjukkan pola yang sangat konsisten di sepanjang tahunnya. Divergensi fluks radiasi SW menunjukkan nilai yang positif yang artinya terdapat energi yang tersimpan atau terserap di atmosfer. Fluktuasi nilai divergensi fluks radiasi SW berfluktuasi antara minimum pada sekitar 200 watt/m² sampai nilai maksimum yang mencapai kurang lebih 245 watt/m². Minimum divergensi terjadi hampir di setiap bulan Juni sepanjang tahun data. Sementara maksimum divergensi rata-rata terjadi di bulan September–Oktober dan atau Februari–Maret.

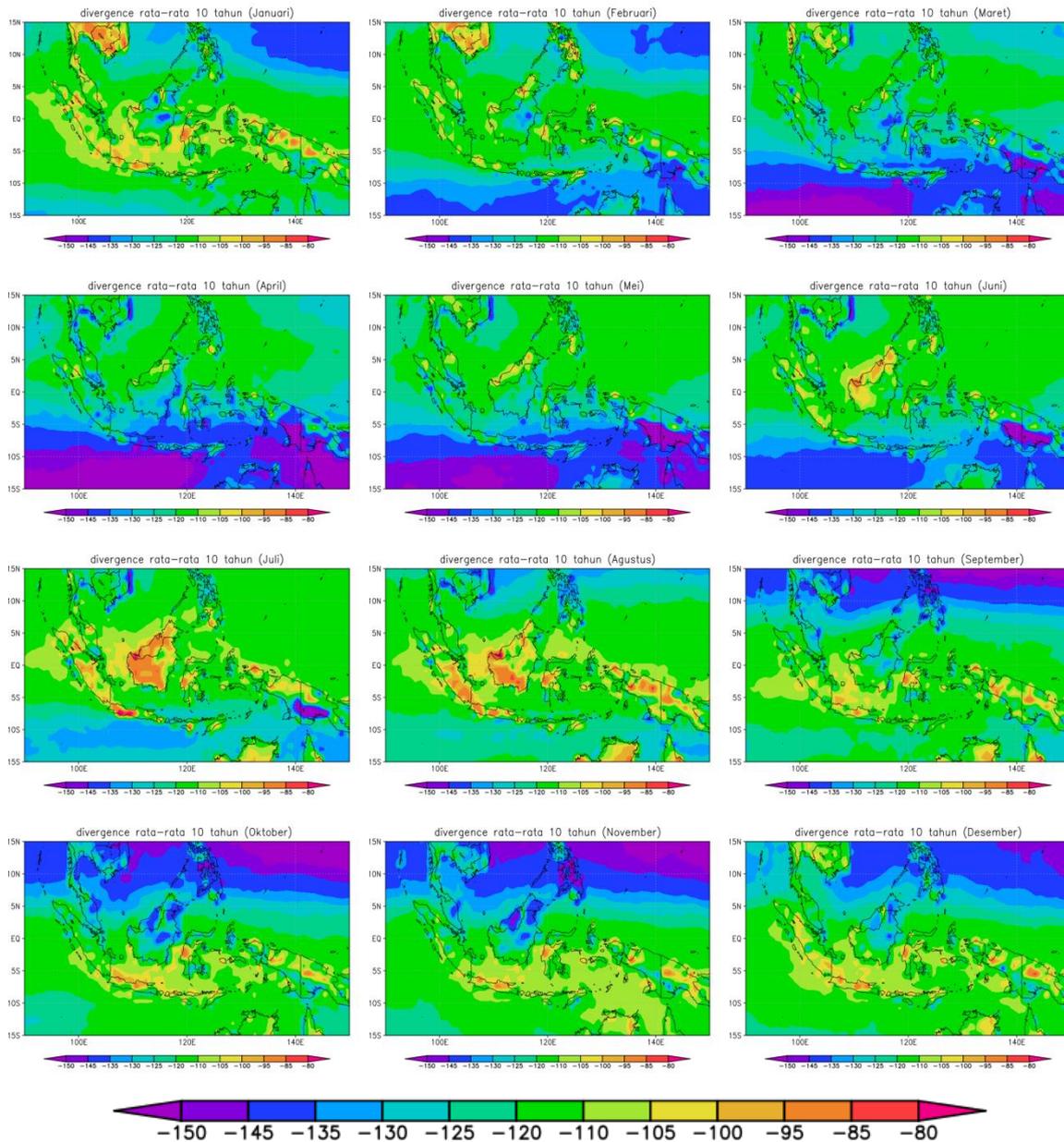


Gambar 2. Pola divergensi fluks radiasi gelombang pendek SW, radiasi total dan radiasi gelombang panjang LW dari Januari 2003 sampai Juni 2015, untuk wilayah Indonesia dan sekitarnya.

Berbeda dengan divergensi SW, divergensi LW menunjukkan adanya tren fluktuatif yang sangat signifikan dengan pola yang tidak beraturan (Gambar 2). Dari hasil identifikasi data yang diolah diperoleh divergensi LW yang mencapai minimum sebesar 328 watt/m² dan maksimum sebesar 353,5 watt/m². Raschke dkk.¹⁴ menjelaskan bahwa terminologi divergensi yang digunakan di sini, mempunyai arti kebalikan dengan definisi matematika klasik. Jadi apabila nilai divergensi fluks-nya positif maka artinya ada pelepasan energi radiasi, dan sebaliknya apabila nilai divergensi fluks-nya negatif maka berarti telah terjadi penyerapan energi radiasi. Maka nilai positif divergensi LW dalam hal ini menunjukkan jumlah atau besarnya radiasi gelombang panjang yang hilang/dilepaskan. Dengan menggunakan regresi linier diperoleh bahwa divergensi LW mengalami peningkatan 0,001 W/m² setiap bulannya, atau 0,012 W/m² setiap tahunnya.

Dari ketiga komponen divergensi, maka divergensi total menunjukkan variabilitas yang paling kecil, dan rata-rata fluktuasi divergensi total-nya antara -110 dan -130 watt/m². Fluktuasi yang terjadi lebih dipengaruhi oleh divergensi LW. Dengan demikian, besarnya pelepasan atau hilangnya energi radiasi gelombang panjang di atmosfer menentukan fluktuasi ketersediaan energi radiatif di atmosfer yang merupakan implikasi dari adanya divergensi.

Distribusi spasial dari masing-masing divergensi menunjukkan variasi spasial yang cukup besar. Baik untuk variasi divergensi total, divergensi SW dan LW menunjukkan adanya perbedaan divergensi antara daratan dan lautan. Gambar 3 berikut mempresentasikan pola spasial dari variasi klimatologi divergensi total rata-rata bulan selama 12 tahun data yaitu dari Januari 2003 sampai Juni 2015. Pada gambar jelas terlihat bahwa distribusi variasi spasialnya menunjukkan adanya variasi musiman yang sangat dipengaruhi oleh siklus matahari yang perubahannya ditunjukkan oleh adanya perbedaan divergensi antara daratan dan lautan dari perubahan warna spasialnya. Penyerapan energi radiasi di daratan wilayah Indonesia rata-rata besarnya antara 80 sampai 150 watt/m² pada gambar ditunjukkan oleh perubahan luasan warna spasialnya.

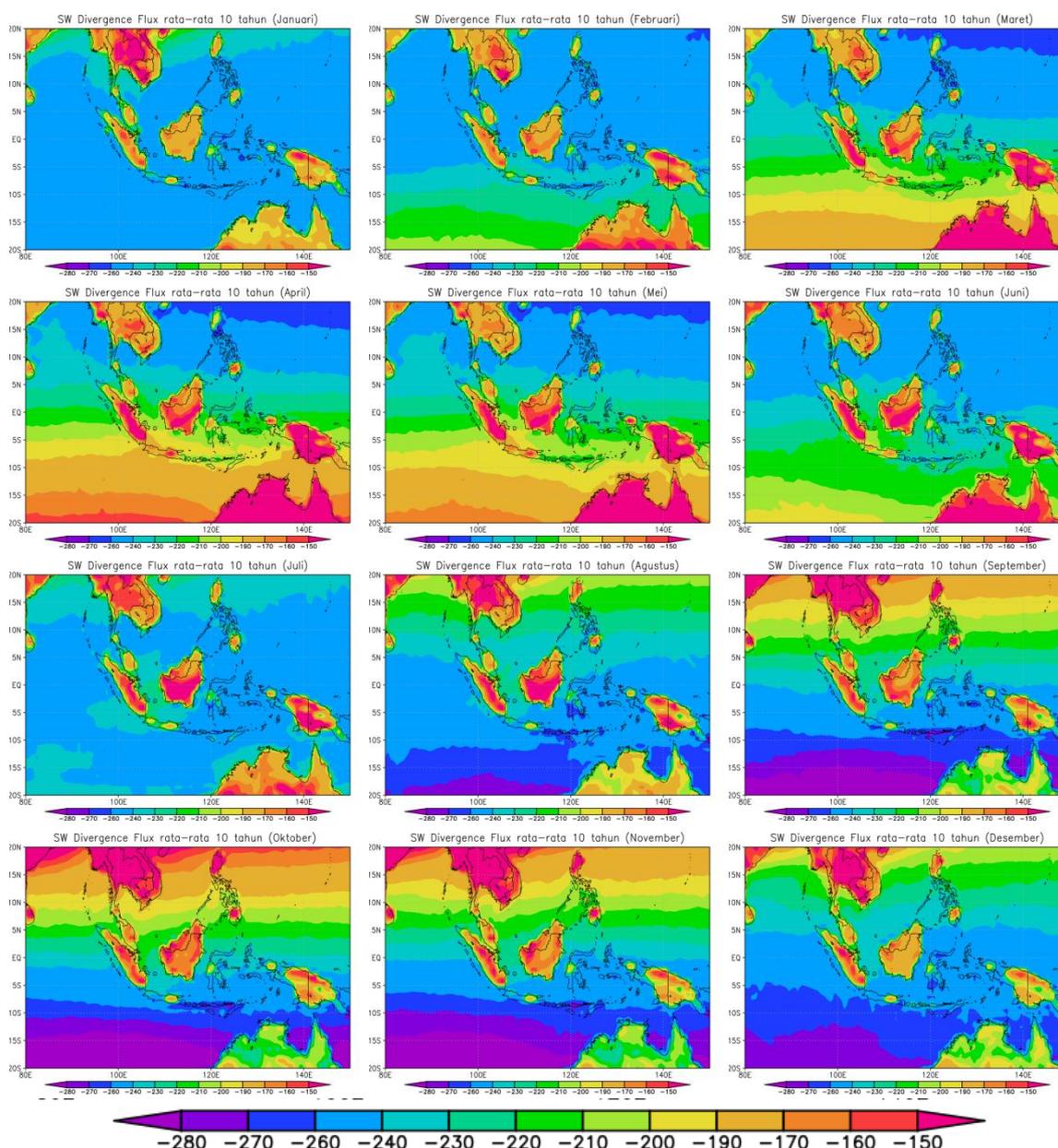


Gambar 3. Pola klimatologi distribusi spasial divergensi fluks radiasi total dari Januari 2003 sampai Juni 2015, untuk wilayah Indonesia dan sekitarnya.

Divergensi fluks radiasi total yang cukup tinggi di wilayah Indonesia diperkirakan terjadi pada bulan Maret-April dan pada bulan Oktober –November dengan perkiraan besarnya divergensi fluks radiasi total pada nilai 135 sampai 150 watt/m², pada gambar di perhatikan adanya perubahan luasan spasial dari warna biru tua sampai ungu terutama yang terjadi di Kalimantan. Pada periode bulan Juni – Agustus, besar divergensi fluks radiasi total mengalami penurunan, hal ini terjadi karena pada periode Juni sampai Agustus merupakan puncak musim kemarau dimana kandungan uap air di atmosfer diestimasi cukup rendah dan kondisi awan cukup cerah. Hal tersebut sangat memungkinkan terjadinya penyerapan atau penyimpanan energi radiasi gelombang pendek yang hampir sebanding dengan energi radiasi gelombang panjang yang dilepaskan atau hilang, sehingga

divergensi fluks radiasi total menjadi rendah. Pada gambar terlihat adanya perubahan warna dari kuning sampai warna merah.

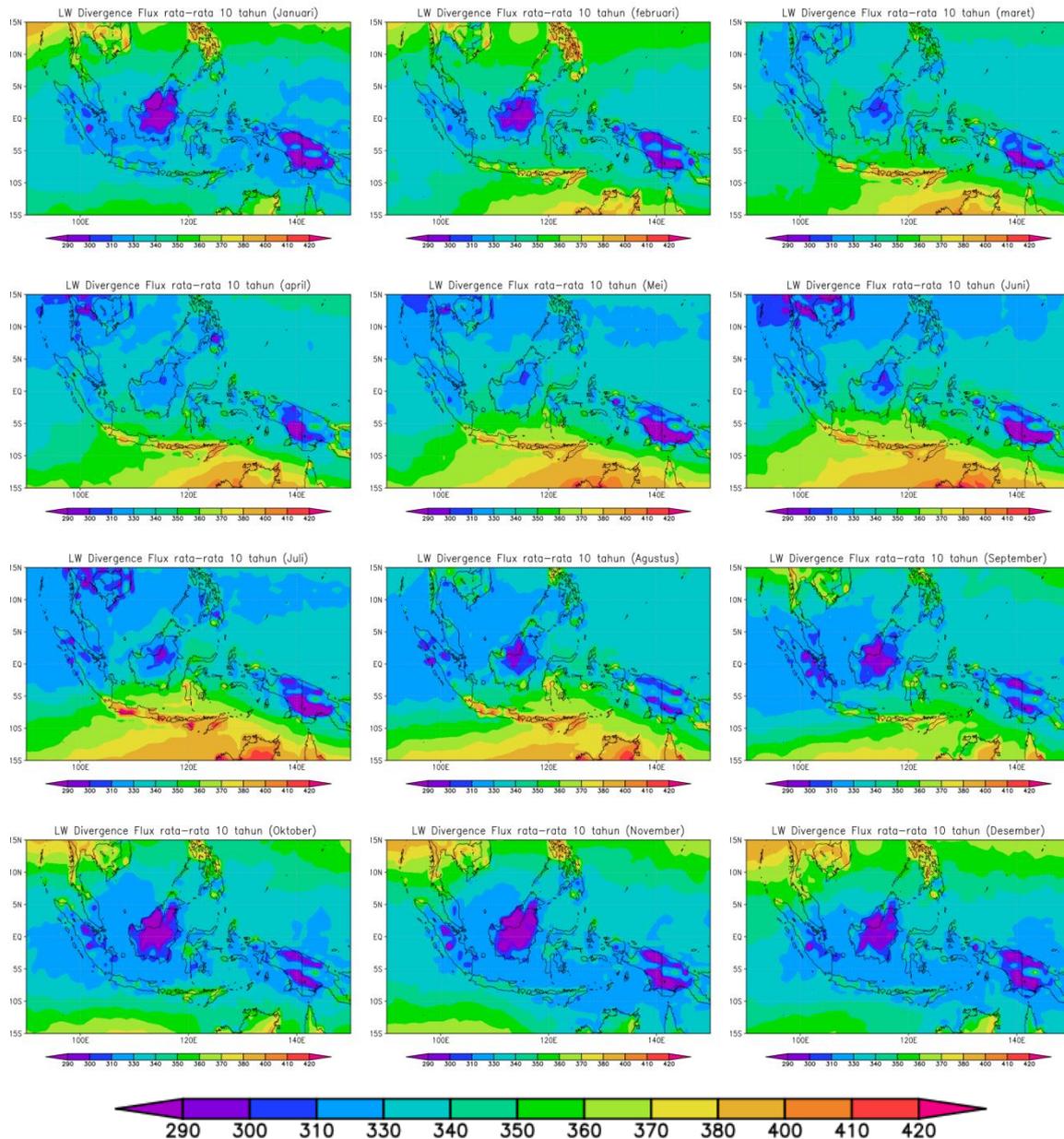
Pola spasial rata-rata divergensi fluks radiasi SW di atas daratan menunjukkan nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan divergensi fluks radiasi SW di lautan. Artinya penyerapan atau tersimpannya energi radiatif gelombang pendek di atas daratan jauh lebih sedikit dibandingkan penyerapan yang terjadi di atas lautan. Rata-rata divergensi fluks radiasi SW di atas daratan menunjukkan nilai divergensi yang berfluktuasi antara 150 – 200 watt/m², dan di atas lautan divergensi SW diperkirakan mencapai nilai rata-rata >230 watt/m². Pada Gambar 4 ditunjukkan rata-rata klimatologi dari 12 tahun data, nilai divergensi fluks radiasi SW tertinggi yang tercapai di daratan terjadi pada bulan Januari dan Desember dengan perkiraan jumlah energi radiasi yang terserap antara 160-190 watt/m².



Gambar 4. Pola klimatologi distribusi spasial divergensi fluks radiasi SW dari Maret 2000 sampai Juni 2015, untuk wilayah Indonesia dan sekitarnya.

Nilai divergensi fluks radiasi SW mengalami penurunan pada beberapa bulan berikutnya yang terus menurun sampai mencapai nilai divergensi terendah yang besarnya $< 150 \text{ watt/m}^2$ yang diperlihatkan oleh perubahan warna spasial merah. Menjelang musim kemarau JJA besar divergensi meningkat lagi. Dari pola spasial klimatologi divergensi fluks radiasi SW yang mencapai nilai divergensi terendah, terjadi pada dua puncak musim peralihan MAM dan musim kemarau JJA.

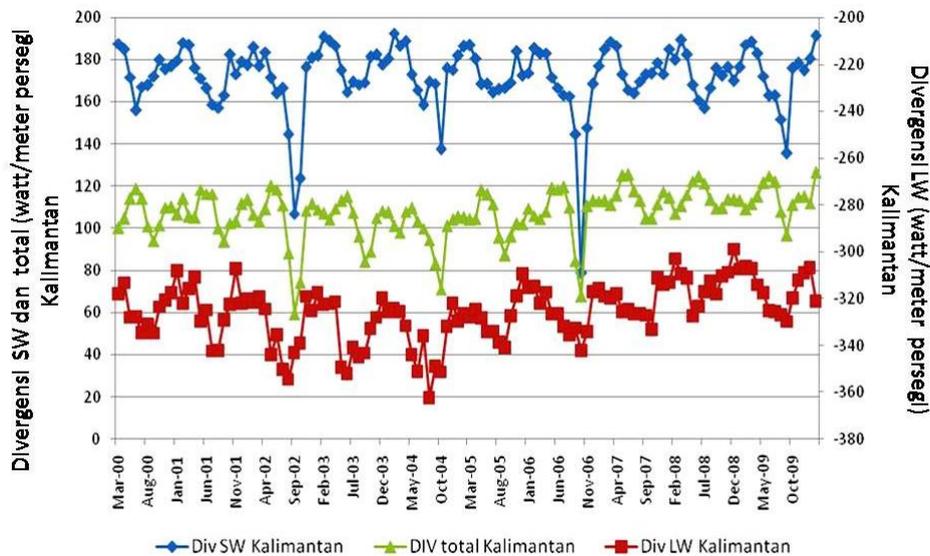
Seperti halnya dengan divergensi SW, maka variasi pola spasial divergensi gelombang panjang, LW, (Gambar 5) juga memperlihatkan perbedaan yang sangat jelas antara distribusi spasial divergensi LW yang terjadi di daratan dan di lautan. Selain itu dari pola spasial divergensi nya juga memperlihatkan adanya pengaruh dari siklus musiman matahari.



Gambar 5. Pola klimatologi distribusi spasial divergensi fluks radiasi LW dari Januari 2003 sampai Juni 2015, untuk wilayah Indonesia dan sekitarnya.

Dari pola spasial divergensi fluks radiasi LW, pada umumnya di daratan, terutama di Kalimantan, Sumatera dan Papua, menunjukkan terjadi pelepasan atau hilangnya energi radiasi yang cukup rendah dan terjadi hampir di sepanjang musim. Pada saat musim MAM jumlah energi radiasi yang hilang di wilayah ini sedikit meningkat. Rata-rata energi radiasi gelombang panjang yang hilang yaitu $< 310 \text{ watt/m}^2$, pada Gambar 5 diperlihatkan dengan perubahan warna spasial dari biru tua sampai ungu. Sedikit berbeda dengan apa yang terjadi di wilayah Kalimantan, Sumatera dan Papua, maka di bagian selatan wilayah Indonesia tepatnya di Pulau Jawa, Bali, Lombok menunjukkan nilai divergensi fluks radiasi LW yang lebih tinggi $> 400 \text{ watt/m}^2$ di sepanjang musim MAM dan JJA, yang artinya bahwa telah terjadi pelepasan energi radiasi yang nilainya $>400 \text{ watt/m}^2$ di sepanjang musim MAM dan JJA. Pelepasan energi radiasi di wilayah Pulau Jawa, Bali dan Lombok berkurang jumlahnya selama musim SON dan DJF.

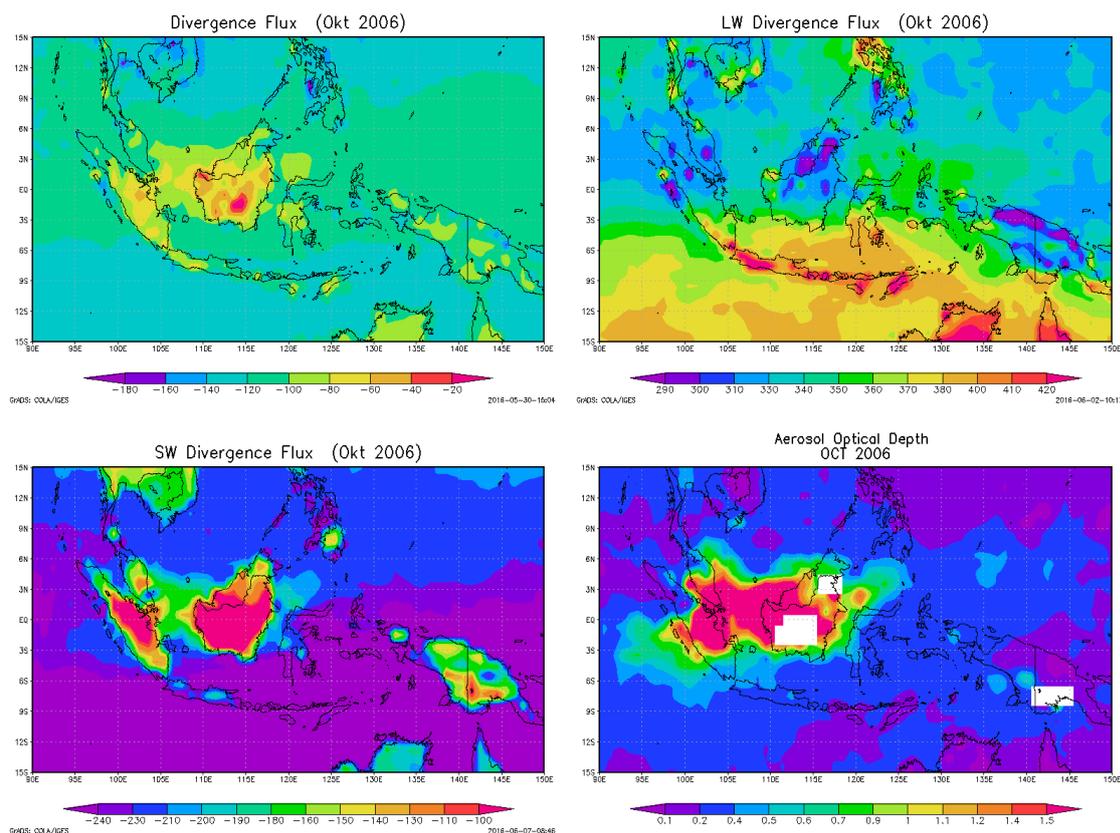
Untuk studi kasus, diamati kembali, Pulau Kalimantan yang menunjukkan adanya perbedaan pola yang cukup mencolok. Apabila dalam nilai rata-rata divergensi gelombang pendek untuk seluruh Indonesia tidak menunjukkan fluktuasi yang signifikan, maka dalam nilai rata-rata yang diambil hanya untuk wilayah Kalimantan menunjukkan adanya fluktuasi yang berbeda. Pada Gambar 6 berikut diperlihatkan keterkaitan antara nilai divergensi fluks radiasi SW dengan divergensi fluks radiasi total dan divergensi fluks radiasi LW.



Gambar 6. Pola divergensi fluks radiasi gelombang pendek SW, divergensi fluks radiasi total dan divergensi fluks radiasi gelombang panjang LW dari Maret 2000 sampai Desember 2009, untuk wilayah Kalimantan.

Pada dasarnya, pola umumnya tetap sama, namun nampaknya terdapat fenomena tahun 2002, 2004 dan 2006 yang memberikan dampak cukup besar pada penurunan penyerapan fluks radiasi gelombang pendek di atmosfer di atas Kalimantan. Dari nilai rata-rata seluruh Indonesia, fluktuasi yang cukup besar pada periode yang sama lebih terlihat dari divergensi gelombang pendek SW dibandingkan dari divergensi gelombangnya (LW).

Sebagai perkiraan awal untuk mengetahui adanya keterkaitan penurunan penyerapan atau berkurangnya energi radiatif di atmosfer dari divergensi fluks radiasi, digunakan data rata-rata bulan untuk semua komponen radiasinya dan ditentukan pada saat peristiwa akumulasi partikel aerosol mencapai puncaknya ($AOD > 2$) yaitu pada saat kebakaran hutan pada Oktober 2006.



Gambar 7. Hubungan divergensi fluks radiasi total, divergensi fluks radiasi gelombang pendek SW, dan divergensi fluks radiasi gelombang panjang LW dengan aerosol optical depth (AOD) pada peristiwa kebakaran hutan di Kalimantan pada bulan Oktober 2006.

Divergensi fluks radiasi gelombang pendek SW menunjukkan adanya penurunan nilai divergensi yang lebih besar dari divergensi fluks radiasi gelombang panjangnya. Pada Gambar 7 dipresentasikan perubahan luasan berwarna biru untuk perubahan divergensi fluks radiasi SW dan radiasi total.

Menurut Raschke¹⁴ dan Hoch¹⁵ bahwa penyerapan radiasi matahari dikendalikan oleh uap air, partikel aerosol, *trace gases* dan sebagian lagi oleh awan. Oleh karena itu, perubahan yang terjadi salah satunya diduga yang menjadi penyebab penurunan ini adalah adanya kebakaran hutan yang menyebabkan perubahan komposisi atmosfer dan meningkatkan efek balik yang lebih besar terhadap gelombang panjang dan menurunkan penyerapannya di atmosfer.

Uap air merupakan gas rumah kaca yang sangat kuat dalam mempengaruhi keseimbangan radiasi di atmosfer, dan pengaruhnya lebih terlihat pada radiasi gelombang panjang. Pada saat uap air di atmosfer melimpah, maka akan semakin banyak radiasi gelombang panjang yang tertahan di atmosfer, dan semakin tinggi nilai divergensinya. Susanti¹⁶ menjelaskan bahwa kondisi uap air di atmosfer sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, salah satunya ENSO. Pada saat terjadi La Nina, uap air di atmosfer akan melimpah dan menahan radiasi gelombang panjang lebih banyak. Dengan demikian, saat La Nina akan menunjukkan divergensi gelombang panjang yang lebih tinggi. Hal ini dapat terlihat dari grafik, pada Gambar 1. Untuk membuktikan kebenarannya, diperlukan analisis yang lebih terfokus dengan melibatkan beberapa parameter yang mendukung dalam analisisnya.

4. KESIMPULAN

Dari variabilitas divergensi fluks radiasi gelombang pendek SW dan variabilitas fluks radiasi gelombang panjang LW, maka variabilitas divergensi fluks radiasi total menunjukkan variabilitas yang paling kecil. Fluktuasi dari divergensi yang terjadi lebih dipengaruhi oleh nilai divergensi gelombang panjang. Dengan demikian, penyerapan atau pelepasan energi radiatif oleh radiasi gelombang panjang di atmosfer merupakan penentu dari fluktuasi ketersediaan energi radiatif yang merupakan implikasi dari adanya divergensi. Variasi pola spasial untuk divergensi fluks radiasi gelombang pendek (SW), divergensi gelombang panjang (LW) dan divergensi totalnya (SW dan LW) menunjukkan adanya variasi siklus musiman yang dipengaruhi faktor posisi terhadap matahari, yang masing-masing menunjukkan variasi pola spasial yang berbeda-beda. Divergensi fluks radiasi LW menunjukkan tren peningkatan yang cukup signifikan. Dengan menggunakan regresi linier, dapat ditunjukkan bahwa divergensi gelombang panjang mengalami peningkatan 0,001 W/m² setiap bulannya, atau 0,012 W/m² setiap tahunnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional - LAPAN Bandung yang telah memfasilitasi kegiatan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan yang telah banyak membantu dalam pengolahan datanya.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹IPCC, 2007. Climate Change, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B.M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ²Sellers, W.D., 1965. *Physical Climatology*. The University of Chicago Press., 272.
- ³Palmen, E., and C.W. Newton, 1969. *Atmospheric circulation systems*. Academic Press, 603.
- ⁴Alexander, M.A., and S.D. Schubert, 1990. Regional Earth-Atmpsphere Energy Balance Estimates Based on Assimilations with a GCM. *Journal of Climate*, 3, 15-31.
- ⁵Funk, J. P., 1960. Measured radiative flux divergence near the ground at night. *Q.J. Royal Meteorology. Soc.* 86, 382-389, doi: 10.1002/qj.49708636910.
- ⁶Fuggle, R. F. and T. R. Oke, 1976. Long-wave Radiative Flux Divergence and Nocturnal Cooling of the Urban Atmosphere. *Bound. Layer Meteorol.* 10, 113-120, doi:10.1007/BF00229279.
- ⁷Lieske, B. J., and L. A. Stroschein, 1967. Measurements and radiative flux divergence in the Arctic, Arch. Meteorol. *Geophys. Bioklimatol.*, Ser. B, 15, 67– 81, doi:10.1007/BF02319112.
- ⁸Nunez, M., and T. R. Oke, 1976. Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere, *Boundary Layer Meteorol.*, 10, 121– 135, doi:10.1007/BF00229280.
- ⁹Garratt, J. R., and R. A. Brost, 1981. Radiative cooling effects within and above the nocturnal boundary layer. *J. Atmos.Sci.*, 38, 2730–2746.
- ¹⁰Andre, J. C., and L. Mahrt, 1982. The nocturnal surface inversion and influence of clear-air radiative cooling. *J. Atmos. Sci.*, 39, 864–878, doi:10.1175/1520-0469(1982)039<0864:TNSIAI >2.0.CO;2.
- ¹¹Raisanen, P., 1996. The effect of vertical resolution on clear-sky radiation calculations: Test with two schemes, *Tellus*, Ser. A, 48A, 403–423, doi:10.1034/j.1600-0870.1996.t01-2-00004.x.
- ¹²Raschke, E., A. Ohmura, W. B. Rossow, B. E. Carlson, Y.-C. Zhang, C. Stubenrauch, M. Kottek, M. Wild, 2005. Cloud effects on the radiation budget based on ISCCP data. *Int. J. Climatology*, 25, 1103-1142.
- ¹³Bohren, C.F., and E.E. Clothiaux, 2006. *Fundamentals of Atmospheric radiation*. Wiley-VCH, 472 pp. (A didactic jewel: discusses the fundamental concepts, laws and equations of the emission and transmission of radiation through the atmosphere, focusing on physical interpretation and avoiding the use of complex mathematics).

- ¹⁴Raschke, E., S.King and Y.-C. Zhang, 2012. Vertical Radiative Flux Divergence in the Atmosphere, in GEWEX Radiative Flux Assessment (RFA), World Climate Research Programme (WCRP) Report, 1, 189-208.
- ¹⁵Hoch, S. W., 2005. *Radiative flux divergence in the surface boundary layer—A study based on observations at Summit, Greenland*. Ph.D. thesis, ETH, Zurich, Switzerland., 181.
- ¹⁶Susanti, I., 2014. Analisis Transpor Uap Air Atmosfer di Benua Maritim Indonesia. Dalam *Kualitas Udara dan Komposisi Atmosfer Indonesia, Buku 2*, ISBN: 978-979-1458-82-5, 41-56.