

KARAKTERISTIK RUANG-WAKTU SUMBER UAP AIR DI ATAS BENUA MARITIM INDONESIA MENGGUNAKAN DATA ERA INTERIM [SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF MOISTURE SOURCE OVER THE INDONESIAN MARITIME CONTINENT USING ERA INTERIM DATA]

Suaydhi

Peneliti Bidang Pemodelan Atmosfer, Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lapan
e-mail: suaydhi@lapan.go.id

Diterima 15 Juli 2014; Disetujui 22 September 2014

ABSTRACT

The atmospheric moisture source over three sub regions within the Indonesian Maritime Continent have been studied using the ERA Interim dataset. There are two important sources of atmospheric moisture, i.e. advection and convection. The Pacific Ocean and Indian Ocean are the main sources for precipitation over the Maritime Continent. However, the region is also one of the three main convection centers in the world. Therefore, contribution of the local evaporation to the precipitation plays an important role. A dynamic precipitation-recycling model is used to estimate this contribution. The recycling ratio varies across different sub regions, but it generally peaks during the boreal spring with the highest value being 60% which coincides with the ITCZ being located over the Maritime Continent. The lowest recycling ratio is 25% which occurs during the boreal summer, where the ITCZ position is the furthest away from the equator. The annual cycle of precipitation from the local moisture source resembles that of the convective precipitation from TRMM. The recycling ratio increases (decreases) during El Niño (La Niña) years. It indicates that the strong moisture flux that is transported into the region suppresses the contribution of local evaporative moisture, while during El Niño the flux weakens or even reverses into transporting moisture out of the region.

Keywords: *Moisture, Maritime continent, Recycled precipitation, El Niño, La Niña*

ABSTRAK

Sumber uap air di atmosfer di tiga sub wilayah dalam Benua Maritim Indonesia telah dianalisis menggunakan data ERA Interim. Ada dua sumber uap air atmosfer yang penting, yaitu adveksi dan konveksi. Samudera Pasifik dan Samudera India merupakan sumber uap air utama untuk curah hujan di Benua Maritim. Namun demikian wilayah ini juga merupakan salah satu dari tiga pusat konveksi utama di dunia. Oleh karena itu kontribusi penguapan lokal terhadap curah hujan mempunyai peranan penting. Sebuah model daur ulang curah hujan dinamis digunakan untuk melakukan estimasi kontribusi tersebut. Nisbah hujan daur ulang ini bervariasi di berbagai sub wilayah yang berbeda, namun umumnya berpuncak pada musim semi belahan bumi utara dengan nilai tertinggi 60% yang bertepatan dengan keberadaan ITCZ di atas Benua Maritim. Nilai nisbah terendah adalah 25% yang terjadi selama musim panas belahan bumi utara, di mana ITCZ berada paling jauh dari ekuator. Siklus curah hujan tahunan dari sumber uap air lokal ini mirip dengan hujan konvektif dari TRMM. Nisbah hujan daur ulang meningkat (turun) waktu El Niño (La Niña). Hal ini memberikan indikasi bahwa fluks uap air yang kuat yang masuk ke wilayah ini menekan kontribusi uap air hasil penguapan lokal, sementara selama El

Niño fluks tersebut melemah bahkan berbalik arah dengan membawa uap air keluar dari wilayah Indonesia.

Kata Kunci: *Uap air, Benua maritim, Hujan daur ulang, El Niño, La Niña*

1 PENDAHULUAN

Siklus hidrologi memainkan peranan penting dalam variabilitas dan perubahan iklim, sebab siklus ini mengendalikannya dan mencerminkan variabilitas alami cuaca dan iklim pada skala regional dan global (Eltahir dan Bras, 1996). Pentingnya fluks uap air horizontal dan vertikal terhadap siklus hidrologi global telah lama dikenali dan anomali dari fluks ini dapat dikaitkan secara langsung pada banjir dan kekeringan (Rosen dkk., 1979). Beberapa peranan penting uap air dalam siklus hidrologi global, khususnya di daerah tropis, adalah jumlahnya menentukan potensi curah hujan, panas laten yang dilepaskan ketika uap air mengembun menjadi sumber energi penting untuk pergerakan atmosfer, dan transport vertikal uap air merupakan transport panas ke atas di daerah tropis yang sangat penting (Laing dan Evans, 2011). Pemahaman proses-proses hidrologi ini juga penting dalam memahami dampak aktivitas manusia pada iklim. Dalam kondisi pemanasan global siklus hidrologi diperkirakan menjadi lebih kuat sebab hujan dan penguapan juga semakin kuat akibat meningkatnya radiasi gelombang panjang yang ke bawah. Hal ini bisa berakibat lebih parahnya kekeringan atau banjir di beberapa tempat (IPCC, 1996).

Dalam konteks siklus hidrologi, air di permukaan yang menguap dari suatu wilayah dapat jatuh lagi sebagai hujan di wilayah yang sama. Hal ini disebut hujan daur ulang (*recycled precipitation*). Prosentase jumlah uap air yang diubah kembali menjadi hujan disebut nisbah hujan daur ulang (*recycling ratio*). Jika penguapan dibawa angin keluar dari wilayah tersebut (proses adveksi), maka penguapan tersebut menjadi sumber uap air untuk hujan di wilayah lain tersebut. Sumber curah hujan yang lain adalah uap air yang telah tersedia di atmosfer. Sumber yang terakhir ini hanya signifikan pada skala waktu harian dan dapat diabaikan pada skala bulanan atau yang lebih lama lagi (Dominguez dkk., 2006). Oleh karena itu, untuk studi klimatologi, penguapan, dan adveksi dapat dianggap sebagai dua sumber utama untuk hujan di suatu wilayah tertentu.

Sumber daya air di Benua Maritim Indonesia tidak terdistribusi secara merata (e.g. Hamada dkk., 2002; Aldrian dan Susanto, 2003). Sumber air yang melimpah dapat dijumpai di tiga pulau terbesar (Sumatera, Kalimantan, dan Papua) sepanjang tahun, namun kesulitan air sering dialami oleh penduduk di Nusa Tenggara Timur, terutama pada musim kemarau (JJA). Banyak faktor yang mempengaruhi distribusi hujan di wilayah Benua Maritim. Faktor utama meliputi monsun, *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), sirkulasi angin darat/laut, dan kondisi topografi yang kompleks (Qian, 2008). Beberapa bagian dipengaruhi oleh *Madden-Julian Oscillation* (MJO; Madden dan Julian, 1971) dan *Indian Ocean Dipole Mode* (IODM; Saji dkk., 1999). Karena variabilitas suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature* atau, SST) berpengaruh pada anomali hujan, beberapa studi telah dilakukan untuk meneliti pola hujan Benua Maritim dan kaitannya dengan SST lokal dan juga SST Samudera Pasifik dan Samudera India dalam beberapa tahun terakhir (e.g., Aldrian dan Susanto, 2003; Hendon, 2003; dan Chang dkk., 2004). Studi-studi tersebut mengungkap bahwa korelasi kuat antara curah hujan Indonesia dengan SST Samudera Pasifik hanya terjadi pada musim panas dan musim gugur Belahan Bumi Utara (BBU), yaitu pada periode Juni-Juli-Agustus (JJA) dan September-Oktober-Nopember (SON), yang bertepatan dengan musim kemarau di Indonesia. Korelasi antara curah hujan dan SST tetap rendah di musim dingin dan musim semi BBU (Desember-Januari-Februari [DJF] dan Maret-April-Mei [MAM]), meskipun analisis dilakukan pada skala sub wilayah

(Chang dkk., 2004). Prediksi iklim untuk musim semi dikatakan mempunyai nilai kinerja (*skill*) paling rendah dan dikenal sebagai *spring predictability barrier* (Aldrian dan Susanto, 2003).

Makalah ini akan mengkaji transport uap air di atas Benua Maritim. Sebuah model daur ulang hujan akan digunakan untuk mengidentifikasi sumber-sumber potensial uap air yang mempengaruhi curah hujan di Benua Maritim dan beberapa sub wilayah. Data reanalisis terbaru dari *the European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF), ERA Interim atau ERAI untuk singkatnya (Berrisford dkk., 2011), akan digunakan dalam studi ini.

Klimatologi dan variabilitas transport uap air di atmosfer akan dikaji untuk beberapa sub wilayah. Hal ini bisa dijadikan basis untuk penelitian lebih lanjut tentang peranan hidrologi permukaan dalam variabilitas dan perubahan iklim. Karakteristik umum tentang data ERAI dan data lainnya yang digunakan dalam makalah ini akan dijelaskan sekilas pada seksi 2 bersama dengan penjelasan metodologi dan persamaan-persamaan fundamental yang digunakan untuk mengembangkan model hujan daur ulang. Seksi 3 akan memaparkan hasil klimatologis dari model tersebut, sedangkan variasi antar tahunannya akan dipaparkan pada seksi 4. Ringkasan hasil penelitian ini akan ditampilkan pada seksi 5 beserta dengan kesimpulannya.

2 DATA DAN METODOLOGI

2.1 Data

ERA-40 adalah produk antara yang menjembatani antara ERA-40 (1957-2002; Uppala dkk., 2005) dan reanalisis jangka panjang generasi berikutnya. Perbaikan pada data ERAI dari pendahulunya didapatkan melalui banyak perbaikan pada model yang digunakan untuk memproduksi reanalisis, penggunaan analisis variasi 4 dimensi, perbaikan analisis kelembapan, penggunaan koreksi bias variasi untuk data satelit, dan perbaikan-perbaikan lain dalam penanganan *error* (Dee dkk., 2011). Model yang digunakan untuk memproduksi data reanalisis ERAI adalah ECMWF *Integrated Forecast System* (IFS; Tompkins dkk., 2007). Model atmosfernya mempunyai resolusi sekitar 79 km dan model gelombang lautnya mempunyai grid berukuran 1,0° x 1,0° pada garis lintang dan garis bujurnya. Produk reanalisis terakhir ini menyediakan data atmosfer global pada 30 level dari 1000 hPa sampai 10 hPa empat kali tiap hari pada pukul 00, 06, 12, 18 waktu universal (UT) dari tahun 1979 sampai sekarang pada berbagai resolusi horizontal dengan resolusi tertinggi tersedia pada grid berukuran 0,5°x0,5°bujur/lintang.

Untuk keperluan perbandingan, data *the second version of the Global Precipitation Climatology Project* (GPCP2; Adler dkk., 2003), dan data hujan konvektif dari *Tropical Rainfall Measuring Measurement* (TRMM). Data curah hujan bulanan dari GPCP2 mempunyai resolusi 2,5°x2,5°. Produk 3B31 dari TRMM digunakan untuk perbandingan dengan hujan daur ulang yang diestimasi dari model hujan daur ulang. Hal ini dikarenakan hujan estimasi dari model hujan daur ulang ini berasal dari penguapan lokal (proses konveksi).

2.2 Metodologi

Persamaan kesetimbangan uap air di atmosfer dapat dituliskan dalam bentuk berikut (Peixoto dan Oort, 1992)

$$E - P = \frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{Q} \quad (2-1)$$

di mana E adalah laju evaporasi (penguapan), dan P adalah laju hujan. $\frac{\partial W}{\partial t}$ mewakili laju perubahan *precipitable water* (terhadap waktu), dan $\nabla \cdot \mathbf{Q}$ adalah divergensi fluks uap

air horizontal. Untuk periode yang cukup lama, misal orde bulan atau musim, $\frac{\partial W}{\partial t}$ dapat diabaikan (Trenberth, 1999), dan perata-rataan persamaan (2-1) terhadap waktu dan wilayah menghasilkan

$$\overline{E} - \overline{P} \approx \nabla \cdot \overline{\mathbf{Q}} \tag{2-2}$$

di mana garis di atas huruf menandakan rata-rata dalam waktu. \mathbf{Q} adalah fluks uap air horizontal yang terintegrasi secara vertikal dan didefinisikan sebagai

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q \mathbf{v} dp \tag{2-3}$$

dimana q adalah kelembaban spesifik dari atmosfer, g adalah percepatan gravitasi, \mathbf{v} adalah vektor kecepatan horizontal dan integral dimulai dari tekanan permukaan (P_s) hingga tekanan pada level atmosfer teratas (P_t).

Untuk menghitung kontribusi evaporasi lokal terhadap hujan, yaitu nisbah daur ulang lokal ρ , sebuah model daur ulang hujan dinamis yang dikembangkan oleh Dominguez dkk. (2006) digunakan dalam penelitian ini. Nisbah daur ulang lokal dalam satu sel grid i dalam suatu wilayah didefinisikan sebagai:

$$\rho_i = \frac{P_{ri}}{P_i} \tag{2-4}$$

dimana P_{ri} adalah hujan yang berasal dari daur ulang dalam suatu sel grid i dan P_i adalah hujan total dalam sel grid i . Dalam model ini, uap air di atmosfer dalam grid sel i dilacak ke belakang dalam waktu sepanjang lintasan-lintasan yang didefinisikan oleh fluks-fluks uap air zonal dan meridional. Ilustrasi “lintasan” yang ditempuh oleh *parcel* uap air dalam suatu domain tertentu dapat dilihat pada **Gambar 3** di Dominguez dkk. (2006).

Pada penurunan nisbah daur ulang lokal berikut, *subscript i* dihilangkan agar lebih sederhana dalam penulisan rumusnya. Untuk menyederhanakan komputasi, sebuah sistem koordinat baru ($\chi = x - ut, \xi = y - vt, \tau = t$) untuk nisbah daur ulang lokal $R(\chi, \xi, \tau)$, evaporasi $\varepsilon(\chi, \xi, \tau)$, dan *precipitable water* $\omega(\chi, \xi, \tau)$ diterapkan untuk mengikuti lintasan-lintasan aliran uap air ke belakang dalam waktu, dengan u dan v laju angin zonal dan meridional. Nisbah daur ulang lokal dihitung dengan mengintegrasikan uap air yang ada dalam kolom pada semua trayektori pada tiap langkah waktu dari waktu uap air masuk ke wilayah tersebut sampai airnya berubah menjadi hujan (Dominguez dkk., 2006):

$$R(\chi, \xi, \tau) = 1 - \exp \left[- \int_0^\tau \frac{\varepsilon(\chi, \xi, \tau)}{\omega(\chi, \xi, \tau)} \partial \tau \right] \tag{2-5}$$

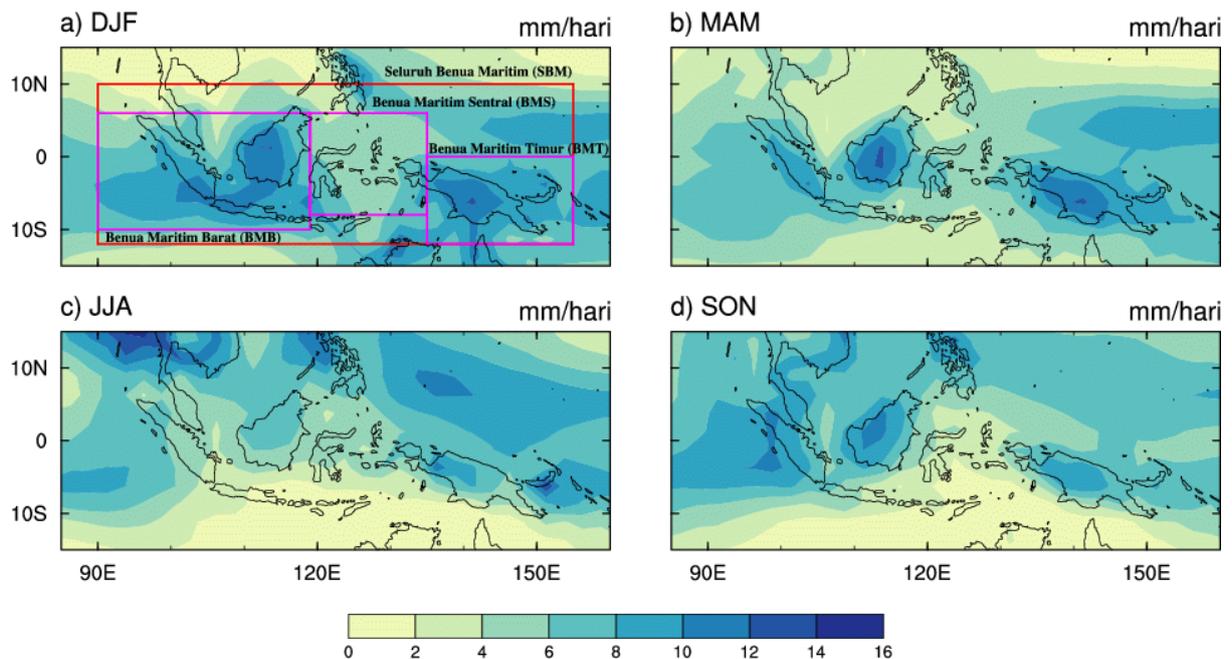
Untuk mendapatkan nisbah daur ulang lokal ρ , nilai R diubah kembali ke sistem koordinat aslinya dengan substitusi $\chi(x, y, t)$ dan $\xi(x, y, t)$ ke dalam ekspresi R (Dominguez dkk., 2006).

Model daur ulang ini mempunyai keunggulan karena memasukkan unsur ketersediaan uap air atmosfer secara eksplisit. Asumsi yang digunakan dalam model hanya atmosfer yang tercampur secara merata. Besaran-besaran rata-rata bulanan dengan langkah waktu 6-jam dari data reanalisis digunakan sebagai masukan untuk perhitungan nisbah daur ulang dalam makalah ini (mirip dengan yang dilakukan oleh Bisselink dan Dolman, 2008). Nisbah daur ulang regional (rr) dalam wilayah yang terdiri dari n sel sebagai sebuah fungsi nisbah daur ulang lokal diperoleh dengan menggunakan pendekatan berbasis grid dari Eltahir dan Bras (1994):

$$rr = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i P_i \Delta A_i}{\sum_{i=1}^n P_i \Delta A_i} \tag{2-6}$$

di mana ΔA_i adalah luas selidalam wilayah tersebut. Jadi kita mempunyai alat sederhana untuk melakukan analisis ruang waktu dari pendaoran ulang hujan.

Selain melakukan analisis pada Benua Maritim Indonesia sebagai satu kesatuan, studi ini juga melakukan analisis pada tiga sub wilayah. Pembagian tiga sub wilayah ini dapat dilihat pada Gambar 2-1a. Benua Maritim secara keseluruhan atau Seluruh Benua Maritim (SBM) dibatasi oleh garis lintang antara 12°LS dan 10°LU dan garis bujur antara 90° dan 155°BT (kotak dengan garis merah pada Gambar 2-1a). Batas-batas untuk ketiga sub wilayah (kotak dengan garis ungu pada Gambar 2-1a) mempunyai garis lintang dan garis bujur sebagai berikut: 10°LS - 6°LU dan 90° - 119°BT untuk Benua Maritim Barat (BMB), 8°LS - 6°LU dan 119° -135°BT untuk Benua Maritim Sentral (BMS), dan 12°LS - 0° dan 135° - 155°BT untuk Benua Maritim Timur (BMT). Batas-batas tersebut dipilih agar melintasi daratan sesedikit mungkin. Ketiga sub wilayah tersebut dibagi berdasarkan karakter curah hujannya. BMS mempunyai jumlah curah hujan paling sedikit dibandingkan daerah lainnya (Gambar 2-1).

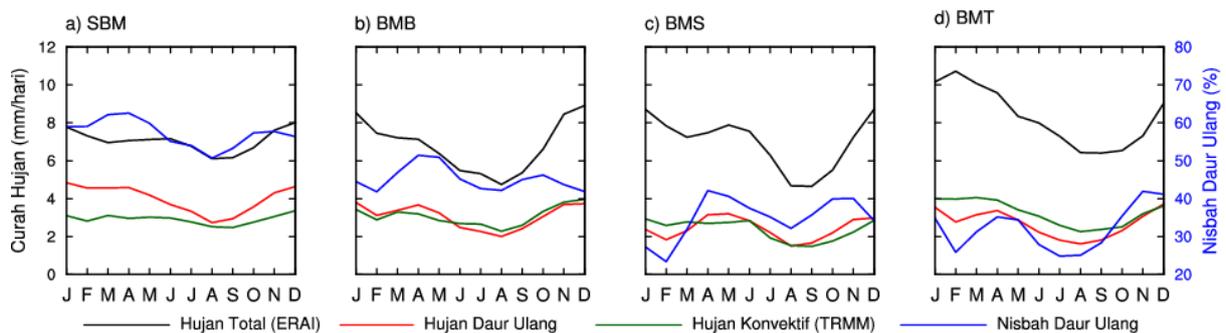


Gambar 2-1: Curah hujan musiman (mm/hari) dari data GPCP2 dan domain wilayah yang dipakai dalam penelitian ini adalah Seluruh Benua Maritim (SBM), Benua Maritim Barat (BMB), Benua Maritim Sentral (BMS), dan Benua MaritimTimur (BMT).

3 SIKLUS TAHUNAN HUJAN DAUR ULANG

Siklus tahunan rata-rata curah hujan daur ulang, hujan konvektif dari TRMM, dan nisbah daur ulang regional dapat dilihat pada Gambar 3-1. Nisbah daur ulang regional adalah besaran yang bergantung pada skala dan tidak linier (Bisselink dan Dolman, 2008). Besaran ini merupakan ukuran kasar berapa besar curah hujan suatu wilayah berasal dari penguapan lokal di wilayah tersebut. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 3-1 bahwa curah hujan daur ulang mempunyai siklus tahunan yang mirip dengan hujan konvektif dari produk TRMM 3B31, kecuali untuk SBM (Gambar 3-1a). Hal ini disebabkan domain SBM yang mencakup wilayah Samudera Pasifik sebelah utara Papua yang merupakan kolam hangat (*warm pool*). Saat hujan konvektif dominan

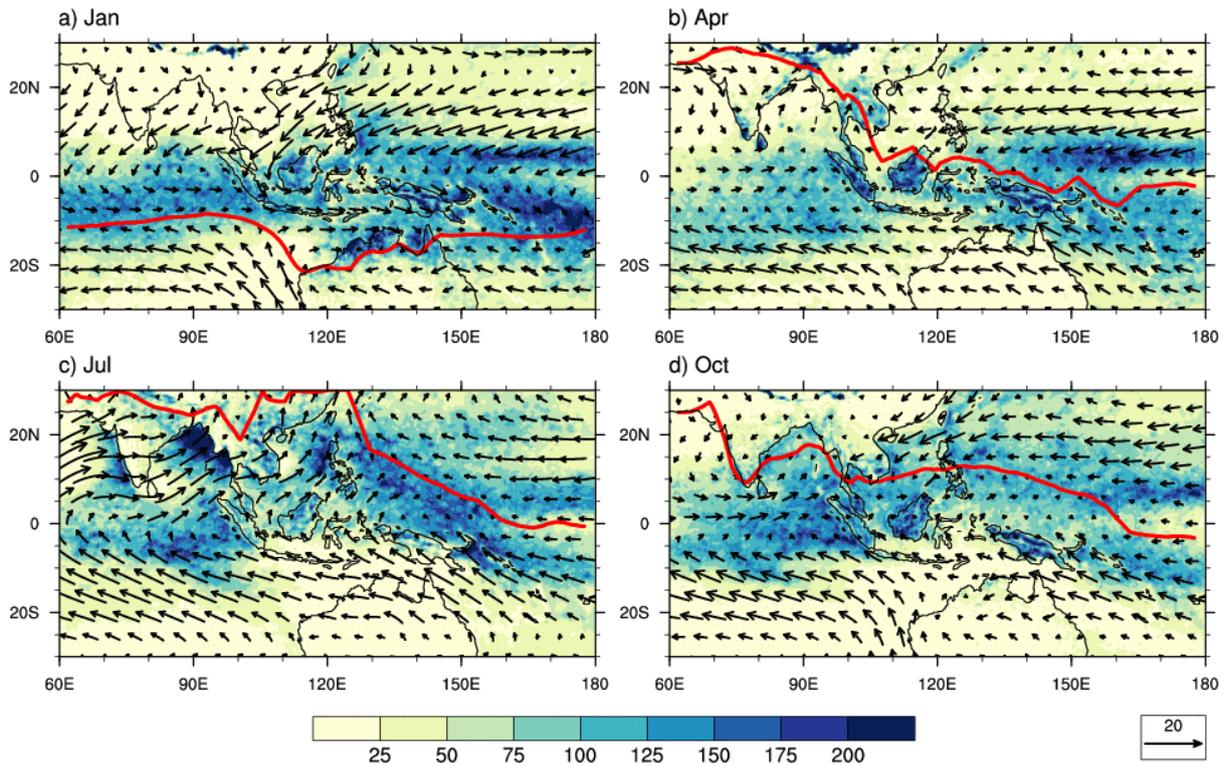
di wilayah Benua Maritim, prosentase hujan dari sumber lokal (nisbah daur ulang) bisa diharapkan akan tinggi. Sebagai contoh, nisbah daur ulang untuk SBM paling sedikit 50% selama musim kemarau dan dapat melebihi 60% selama MAM (Gambar 3-1a). BMB mempunyai bagian wilayah laut yang besar, sehingga sekitar 40% curah hujannya berasal dari sumber penguapan lokal. Nisbah daur ulangnya juga mencapai puncak pada musim MAM, yaitu sekitar 50%. BMS dan BMT mempunyai luas wilayah yang hampir sama, namun luas masing-masing wilayah tersebut kira-kira setengah dari luas wilayah BMB. Kedua sub wilayah ini masing-masing mempunyai nisbah daur ulang sekitar 25% dan 40% secara berurutan, namun puncaknya terjadi pada bulan-bulan yang berbeda (Gambar 3-1c and d). Nisbah daur ulang terendah untuk BMS terjadi pada bulan Februari dan tertinggi pada sekitar April-Mei dan sekitar Oktober-November. Sementara itu, daur ulang terendah untuk BMT terjadi sekitar JJA dan tertinggi sekitar Nopember-Desember.



Gambar 3-1: Siklus tahunan hujan total dari ERAI (garis hitam), hujan daur ulang (garis merah), hujan konvektif dari TRMM (garis hijau), dan nisbah daur ulang (garis biru).

Hal yang menarik diperhatikan adalah nilai nisbah daur ulang dari ketiga sub wilayah tersebut mempunyai dua puncak dan dua lembah, meskipun dengan magnitudo yang berbeda. Terlihat pada Gambar 3-1 bahwa nilai tertinggi terjadi waktu *equinox* (matahari berada di ekuator), khususnya waktu MAM. Puncak yang kedua di wilayah barat terjadi lebih cepat daripada di wilayah timur, dan semakin ketimur magnitudonya semakin besar. Kejadian ini ada hubungannya dengan posisi *Inter Tropical Convergence Zone* (ITCZ). Gambar 3-2 menunjukkan lokasi pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober, bersama dengan hujan konvektif (dalam mm) dari produk TRMM 3B31 dan vektor angin horizontal (dalam m/det) pada ketinggian 925 mb dari data ERAI. Terlihat dari Gambar 3-2 bahwa puncak hujan konvektif dan konvergensi angin berada di sekitar garis ITCZ. Garis ITCZ ini terletak di atas Benua Maritim pada bulan April dan semua domain mengalami puncak nisbah daur ulang. Kemudian garis ini bergerak ke posisi paling jauh dari ekuator di Belahan Bumi Utara (BBU) pada bulan Juli yang mengakibatkan nisbah daur ulang terendah di Benua Maritim. Pada bulan Oktober, garis ITCZ masih terletak di sebelah utara Benua Maritim dan puncak nisbah daur ulang pada periode ini lebih kecil daripada bulan April. Tingginya nisbah daur ulang pada awal musim hujan di atas BMT disebabkan oleh posisi ITCZ yang relatif dekat dengan wilayah ini pada akhir tahun.

Puncak nisbah daur ulang selama musim semi BBU (*boreal spring*), khususnya di atas BMB, menjadi salah satu sebab rendahnya tingkat prediktibilitas iklim waktu MAM, yang dikenal sebagai *spring predictability barrier* (Aldrian dan Susanto, 2003). Kontribusi yang lebih besar dari sumber uap air lokal selama MAM dibandingkan dengan musim lain menyebabkan masalah ketika prediksi iklim musim semi hanya didasarkan atas SST daerah NINO di Samudera Pasifik. Selama MAM, transfer uap air di atas Benua Maritim, khususnya di atas BMB, merupakan yang paling lemah di antara semua musim. Hal ini berakibat pada peningkatan konveksi lokal.

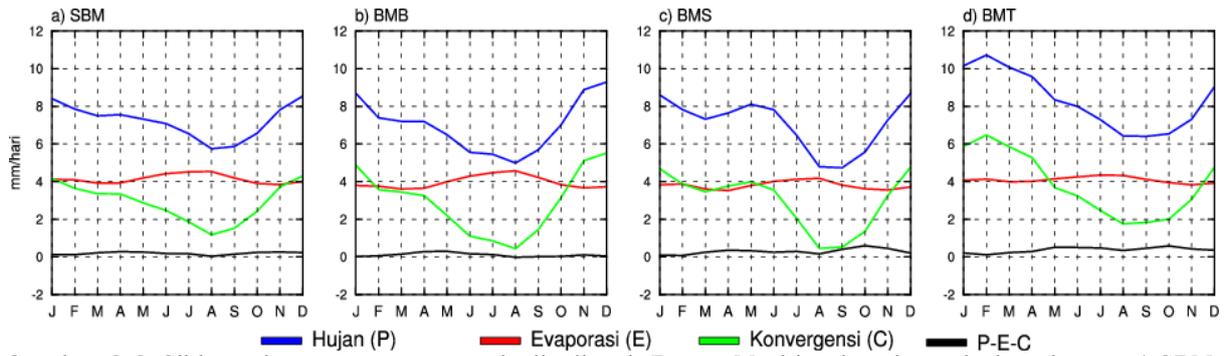


Gambar 2-2: Posisi ITCZ (garis merah), hujan konvektif dari TRMM (kontur), dan vektor angin horizontal 925 mb di atas wilayah Benua Maritim untuk bulan-bulan: a) Januari, b) April, c) Juli, dan d) Oktober.

Lautan Pasifik adalah sumber utama fluks uap air Benua Maritim. Bagian barat dan barat laut wilayah ini juga menerima fluks uap air dari Lautan India. Karena wilayah ini sebagian besar terdiri dari laut dengan SST hangat yang memberikan kondisi ideal untuk proses konveksi, maka kontribusi uap air dari penguapan lokal tidak dapat diabaikan.

Analisis komponen-komponen neraca uap air (Gambar 3-3) menunjukkan siklus tahunan hujan rata-rata di wilayah Benua Maritim merupakan cerminan konvergensi uap air, dengan besarnya curah hujan lebih tinggi daripada konvergensi uap air sepanjang tahun (sekitar 2 mm/hari). Perbedaan ini memberikan indikasi bahwa kontribusi uap air lokal terhadap hujan lokal sangat signifikan. Hasil-hasil dari model daur ulang ini menunjukkan bahwa kontribusi ini dapat mencapai sebesar 60% untuk seluruh Benua Maritim. Meskipun hasil-hasil model ini tergantung pada ukuran domain, hasil-hasil tersebut menunjukkan kontribusi sumber uap air lokal berperan penting dalam pemahaman siklus hidrologi Benua Maritim. Penguapan lokal merupakan sumber uap air konveksi di wilayah yang bersangkutan, sebab curah hujan dari sumber uap air lokal ini sangat mirip dengan hujan konvektif yang diamati dari TRMM. Model juga menunjukkan puncak nisbah daur ulang terjadi terutama pada MAM. Hal ini bertepatan dengan lokasi ITCZ di atas Benua Maritim pada periode ini.

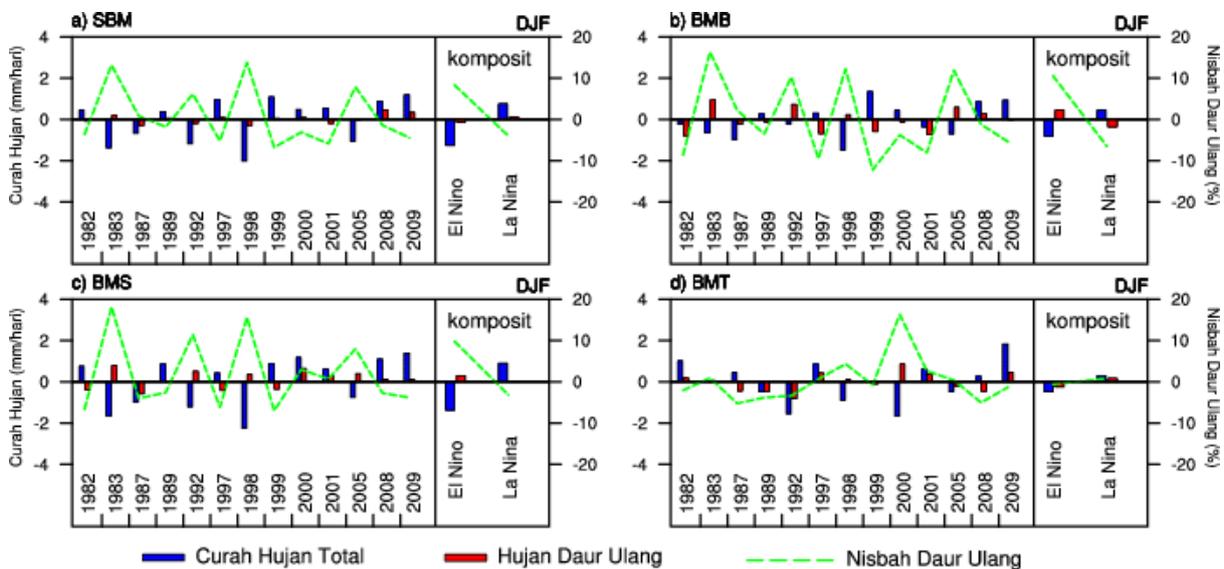
Kontribusi dari konveksi lokal yang ditunjukkan oleh model daur ulang, khususnya pada waktu musim semi BBU, perlu dipertimbangkan dalam prediksi curah hujan di wilayah Benua Maritim. Korelasi yang lemah antara curah hujan dan ENSO mungkin menjadi penyebab *spring predictability barrier* yang dibahas dalam Aldrian and Susanto (2003) dan rujukan-rujukan di dalamnya. Hujan dari sumber uap air lokal yang diteliti dalam makalah ini menunjukkan kontribusi tertinggi selama MAM. Menggabungkan prediksi berdasar SST dan penguapan lokal dapat meningkatkan prediksi curah hujan di wilayah Benua Maritim, khususnya selama MAM.



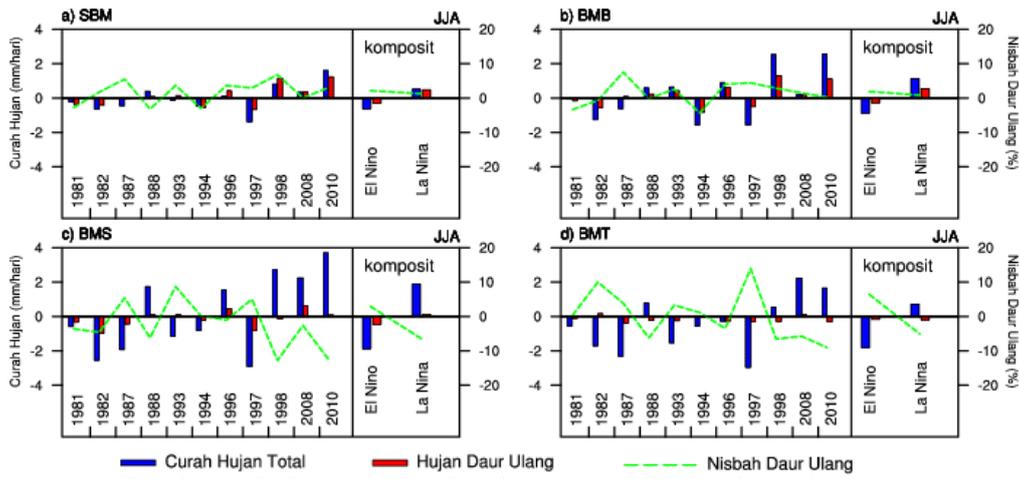
Gambar 3-3: Siklus tahunan neraca uap air di wilayah Benua Maritim dan tiga sub domainnya: a) SBM, b) BMB, c) BMS, dan d) BMT.

4 PENGARUH ENSO PADA HUJAN DAUR ULANG

Gambar 4-1 dan 4-2 menunjukkan anomali curah hujan total, hujan daur ulang, dan nisbah daur ulang selama tahun-tahun El Niño dan La Niña di empat domain untuk musim DJF dan JJA. Kedua gambar ini menunjukkan bahwa nisbah daur ulang dan hujan daur ulang meningkat pada waktu El Niño dan melemah pada waktu La Niña, kecuali pada DJF di BMT. Nilai rendah untuk nisbah daur ulang selama La Niña disebabkan oleh Sirkulasi Walker yang menguat di atas Benua Maritim. Fluks uap air dari luar yang masuk ke wilayah ini selama El Niño menekan kontribusi sumber uap air lokal. Berlawanan dengan kondisi La Niña, konvergensi ke Benua Maritim melemah pada waktu terjadi El Niño. Dengan berkurangnya aliran uap air yang masuk ke wilayah ini selama El Niño, kontribusi sumber uap air lokal meningkat yang dapat dilihat dengan meningkatnya nisbah daur ulang dan hujan daur ulang. Namun demikian mekanisme ini tak berlaku untuk wilayah BMT.



Gambar 4-1: Anomali pada musim DJF untuk curah hujan total (warna merah), hujan daur ulang (warna biru) dan nisbah daur ulang (garis hijau) di empat domain untuk tahun-tahun El Niño dan La Niña antara tahun 1979 dan 2010.



Gambar 4-2: Sama seperti Gambar 4-1, tetapi untuk musim JJA.

Dari hasil di atas terlihat bahwa aliran fluks uap air berpengaruh kuat pada magnitudo (besarnya) nisbah daur ulang. Ada faktor-faktor lain yang berpengaruh pada fluktuasi nisbah daur ulang di wilayah ini, dua diantaranya adalah besarnya sumber uap air ($P - E$) dan evaporasi (E). Untuk memperkirakan besarnya pengaruh faktor-faktor ini pada nisbah daur ulang (rr), koefisien korelasi antara rr dan $P - E$, rr dan E , serta rr dan $|Q|$ dihitung untuk setiap domain yang dipakai dalam studi ini. $|Q|$ adalah magnitudo fluks uap air yang mengalir ke masing-masing domain. Hasilnya diperlihatkan pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1 menunjukkan bahwa korelasi antara nisbah daur ulang dan sumber uap air ($P-E$) bervariasi, dari tidak ada korelasi sama sekali sampai korelasi sedang ($\pm 0,40$), tetapi umumnya sangat lemah di semua wilayah. Tidak ada pola yang jelas, pada musim apa atau daerah mana sumber uap air ini berpengaruh pada nisbah daur ulang. Pola yang tidak jelas ini juga terjadi pada korelasi antara nisbah daur ulang dan evaporasi, namun nilai korelasinya umumnya negatif rendah sampai sedang. Pola korelasi yang jelas baru terlihat antara nisbah daur ulang dengan aliran uap air horizontal dengan koefisien korelasi yang umumnya negatif kuat (mencapai $-0,89$). Korelasi yang kuat ini terjadi pada semua musim dan domain, kecuali untuk MAM di SBM dan BMB. Hasil ini terlihat bahwa konvergensi uap air yang kuat berakibat pada rendahnya nisbah daur ulang, sedang sumber uap air ($P-E$) dan evaporasi tidak berpengaruh secara signifikan pada nisbah daur ulang.

Tabel 4-1: KOEFISIEN KORELASI ANTARA NISBAH DAUR ULANG DENGAN, SUMBER UAP AIR ($P-E$), EVAPORASI (E), DAN MAGNITUDO ALIRAN FLUKS UAP AIR ($|Q|$) UNTUK MASING-MASING DOMAIN DALAM STUDI INI.

Domain	Musim	rr vs ($P - E$)	rr vs E	rr vs $ Q $
SBM	DJF	-0,54	-0,21	-0,59
	MAM	-0,25	-0,08	-0,30
	JJA	0,08	-0,03	-0,31
	SON	-0,09	-0,24	-0,39
BMB	DJF	0,01	-0,54	-0,83
	MAM	-0,21	0,13	-0,35
	JJA	0,40	-0,49	-0,58
	SON	0,24	-0,37	-0,71
BMS	DJF	-0,01	-0,50	-0,83
	MAM	-0,19	0,13	-0,61
	JJA	0,07	0,02	-0,66
	SON	0,13	-0,45	-0,71
BMT	DJF	-0,43	-0,45	-0,78
	MAM	0,00	-0,43	-0,59
	JJA	-0,40	0,08	-0,86
	SON	-0,12	-0,27	-0,89

5 KESIMPULAN

Dalam studi ini, hujan yang berasal dari penguapan lokal (hujan daur ulang) diestimasi dengan menggunakan model hujan daur ulang dinamik dari Dominguez dkk. (2006). Hasilnya menunjukkan bahwa nisbah daur ulang dan hujan daur ulang mempunyai nilai tertinggi (60%) pada periode MAM dan terendah (25%) pada periode JJA. Hal ini dipengaruhi oleh posisi ITCZ, dimana selama MAM posisi ITCZ berada tepat di atas wilayah Benua Maritim dan selama JJA berada paling jauh dari Benua Maritim di BBU.

Kontribusi dari konveksi lokal ini patut diperhitungkan dalam prediksi curah hujan yang memakai anomali suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature* atau SST) dari daerah Niño di Samudera Pasifik sebagai prediktor, khususnya untuk periode MAM. Menggabungkan prediksi curah hujan menggunakan SST dan kontribusi konveksi lokal mungkin dapat meningkatkan akurasi prediksi curah hujan di wilayah Benua Maritim.

Analisis variabilitas hujan daur ulang dan nisbah daur ulang selama tahun-tahun El Niño dan La Niña menunjukkan bahwa kontribusi sumber uap air lokal meningkat selama kejadian El Niño dan melemah selama kejadian La Niña. Faktor yang sangat berpengaruh pada besar kecilnya nilai nisbah daur ulang dan hujan daur ulang adalah aliran fluks uap air yang masuk ke wilayah Benua Maritim. Hal ini dapat dilihat pada koefisien korelasi negatif yang sangat kuat di semua domain antara nisbah daur ulang dan magnitudo aliran fluks uap air. Sedangkan sumber uap air lokal dan evaporasi lokal mempunyai korelasi yang lemah dengan nisbah daur ulang. Hal ini mempunyai implikasi yang sangat penting dalam perubahan iklim di masa mendatang. Perubahan iklim akan berakibat pada menguatnya sirkulasi atmosfer (termasuk aliran uap air yang masuk ke wilayah Benua Maritim).

DAFTAR RUJUKAN

- Adler, R. F., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, dan P. Arkin, 2003. *The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present)*, J. Hydrometeor., 4, 1147-1167.
- Aldrian, E., dan R. D. Susanto, 2003. *Identification of Three Dominant Rainfall Regions within Indonesia and their Relationship to Sea Surface Temperature*, International Journal of Climatology, 23, 1435-1452, 10.1002/joc.950.
- Berrisford, P., D. Dee, P. Poli, R. Brugge, K. Fielding, M. Fuentes, P. Kallberg, S. Kobayashi, S. Uppala, dan A. Simmons, 2011. *The ERA-Interim Archive*, ERA Report Series, No. 1 Version 2.0, ECMWF, Reading, U.K., 27 pp.
- Bisselink, B., dan A. J. Dolman, 2008. *Precipitation Recycling: Moisture Sources over Europe using ERA-40 Data*, J. Hydrometeor., 9, 1073-1083, 10. 1175/2008 jhm 962.1.
- Chang, C.-P., Z. Wang, J. Ju, dan T. Li, 2004. *On the Relationship between Western Maritime Continent Monsoon Rainfall and ENSO During Northern Winter*, J. Climate, 12, 665-672.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J. J. Morcrette, B. K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J. N. Thépaut, dan F. Vitart, 2011. *The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System*, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 137, 553-597, 10.1002/qj.828.

- Dominguez, F., P. Kumar, X.-Z. Liang, dan M. Ting, 2006. *Impact of Atmospheric Moisture Storage on Precipitation Recycling*, J. Climate, 19, 1513-1530.
- Eltahir, E. A. B., dan R. L. Bras, 1994. *Precipitation Recycling in the Amazon Basin*, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 120, 861-880.
- , 1996. *Precipitation Recycling*, Reviews of Geophysics, 34, 367-378.
- Hamada, J.-I., M. D. Yamanaka, J. Matsumoto, S. Fukao, P. A. Winarso, dan T. Sribimawati, 2002. *Spatial and Temporal Variations of the Rainy Season Over Indonesia and their Link to ENSO*, J. Meteor. Soc. Japan, 80, 285-310.
- Hendon, H. H., 2003. *Indonesian Rainfall Variability: Impacts of ENSO and Local Air-Sea Interaction*, J. Climate, 16, 1775-1790.
- IPCC, 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, dan K. Maskell, Eds. Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp.
- Laing, A., dan J.-L. Evans, 2011. *Introduction to Tropical Meteorology*, 2nd. [Diunduh dari www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition/.]
- Madden, R. A., dan P. R. Julian, 1971. *Detection of a 40-50 Day Oscillation in the Zonal Wind in the Tropical Pacific*, J. Atmos.Sci., 28, 702-708.
- Peixoto, J. P., dan A. H. Oort, 1992. *Physics of Climate*, Springer-Verlag, New York, 520 pp.
- Qian, J.-H., 2008. *Why Precipitation Is Mostly Concentrated Over Islands in the Maritime Continent*, J. Atmos.Sci., 65, 1428-1441, 10.1175/2007jas2422.1.
- Rosen, R. D., D. A. Salstein, dan J. P. Peixoto, 1979. *Variability in the Annual Fields of Large-Scale Atmospheric Water Vapor Transport*, Mon. Wea. Rev., 107, 26-37.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, dan T. Yamagata, 1999. *A Dipole Mode in the Tropical Indian Ocean*, Nature, 401, 360-363.
- Tompkins, A. M., K. Gierens, dan G. Radel, 2007. *Ice Supersaturation in the ECMWF Integrated Forecast System*, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 133, 622.
- Trenberth, K. E., 1999. *Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation*, J. Climate, 12, 1368-1381.
- Uppala, S. M., P. W. Kallberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. Da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. Van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Holm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P. McNally, J. F. Mahfouf, J. J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo, dan J. Woollen, 2005. *The ERA-40 re-analysis*, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 2961-3012