

KAITAN EFEK *BLOCKING* PEGUNUNGAN TENGAH DENGAN DISTRIBUSI CURAH HUJAN DI WILAYAH PAPUA BAGIAN SELATAN

RELATIONSHIP BETWEEN *BLOCKING* EFFECT OF CENTRAL MOUNTAINS AND DISTRIBUTION OF PRECIPITATION IN THE SOUTHERN PAPUA REGION

Dian Mayangwulan^{1,2,*}, Nurjanna Joko Trilaksono³

¹⁾Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Stasiun Meteorologi Semarang

²⁾Prodi Sains Kebumihan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan (FITB), ITB

³⁾Kelompok Keahlian Sains Atmosfer, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan (FITB), ITB

*E-mail: d.mayangwulan@gmail.com

Naskah masuk: 5 Juli 2017

Naskah diperbaiki: 10 Oktober 2018

Naskah diterima: 5 Juli 2019

ABSTRAK

Pegunungan tengah Papua yang membentang lebih dari 500 km dengan ketinggian diatas 2000 m, khususnya wilayah kaki pegunungan bagian selatan menerima presipitasi tinggi, terutama pada periode musim dingin Australia (Mei-September). Penelitian ini membahas: (a) variasi tahunan efek *blocking* ditinjau dari nilai *Froude number* (*Fr*) pada periode Januari 2000 – Desember 2014, dan (b) variasi harian *moisture flux convergence* (*MFC*) pada studi kasus simulasi menggunakan model skala-meso *Weather Research and Forecasting – Enviromental Modeling System* (*WRF-EMS*) untuk periode Juli 2008, dan pengaruhnya terhadap presipitasi di wilayah tersebut. Metode *singular value decomposition* (*SVD*) digunakan untuk mengetahui hubungan spasial-temporal *Fr* dengan presipitasi, sedangkan hubungan variasi harian *Fr* dan *MFC* hasil simulasi terhadap variasi presipitasi menggunakan analisis *cross-correlation*. Analisis *Fr* selama periode penelitian menunjukkan aliran udara selalu terbenjung oleh pegunungan tersebut, dan pola *SVD* mode pertama menunjukkan aliran udara dari tenggara sefase dengan distribusi spasial presipitasi di selatan pegunungan namun memiliki korelasi lemah ($\leq 0,4$). Simulasi dilakukan pada bulan Juli 2008 saat kecepatan angin meridional mencapai maksimum untuk mengetahui variasi *MFC* dan kaitannya dengan presipitasi pada wilayah tersebut. Analisis *cross-correlation* antara presipitasi dan *MFC* menunjukkan korelasi maksimum (0,52) terjadi pada lag +6 jam. *MFC* relatif lebih kuat hubungannya terhadap curah hujan maksimum harian dibanding dengan *Fr*. Hari kering pada area selatan pegunungan ($< 0,5$ mm/jam) terjadi pada saat *MFC* lemah, sedangkan pada hari hujan maksimum ($\geq 2,0$ mm/jam) nilai *MFC* lebih kuat.

Kata kunci : presipitasi, topografi, *blocking*, *Froude number*, *moisture flux confergence*.

ABSTRACT

The central mountains of Papua stretches more than 500 km with altitude above 2000 m, in particular the southern foothills receives high precipitation, especially during Australian winter period (May to September). This study discusses: (a) the annual variation of blocking effect in terms of *Froude number* (*Fr*) during January 2000 - December 2014, and (b) the daily variation of moisture flux convergence (*MFC*) on a case study simulations using meso-scale models *WRF-EMS* during period July 2008, and its effect on precipitation in the region. Singular value decomposition method (*SVD*) is employed to determine the spatial-temporal relationship between *Fr* and precipitation, while the daily relationship of *Fr* and *MFC* to precipitation using cross-correlation analysis. Analysis of *Fr* in this period indicate that the air flow is always blocked or channeled by mountains, and the first mode pattern of *SVD* shows that the southeast flow is in-phase with the spatial distribution of precipitation in the southern mountains, but has a weak correlation (≤ -0.4). Simulations were conducted for period of July 2008, when the meridional flow reaches the maximum speed to analyze the variation of *MFC* and it relations to the precipitation over the region. The cross-correlation analysis between precipitation and *MFC* shows a maximum correlation (0.52) occured at time lag +6 hours. *MFC* relatively has a stronger relationship with the daily maximum precipitation than with *Fr*. Dry days in the southern area of the mountains (< 0.5 mm/h) have a weak *MFC*, while on rainy days (maximum ≥ 2.0 mm/h) the *MFC* is stronger.

Keywords: precipitation, topography, *blocking*, *Froude number*, *moisture flux confergence*.

1. Pendahuluan

Pegunungan tengah Papua terletak di provinsi Papua yang membentang lebih dari 500 km dengan ketinggian lebih dari 2000 m. Daerah ini merupakan pegunungan tertinggi di Indonesia dan unik untuk diteliti secara klimatologi [1][2][3]. Beberapa penelitian menunjukkan wilayah kaki pegunungan dibagian selatan pegunungan tengah Papua menerima curah hujan tinggi hingga 12.500 mm/tahun [1][2][4][5]. Hal ini disebabkan faktor lokal, yaitu topografi pegunungan (Cartenz) bertindak sebagai penghalang [2]. Parameter yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi suatu aliran udara menuju gunung apakah dapat menaiki gunung atau terhalang dan menyimpang di sekitar gunung pada topografi kompleks adalah *Froude number* (*Fr*) atau invers-nya [6][7]. Sementara itu parameter yang dapat digunakan untuk prediksi presipitasi yang berkaitan dengan sistem skala sinoptik adalah *moisture flux convergence* (*MFC*) [8][9].

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa distribusi spasial curah hujan rata-rata (komposit) di wilayah Papua pada bulan Mei-September sebagian besar terkonsentrasi di lembah selatan pegunungan tengah Papua (5° - 7° LS 135° - 141° BT) [2][3][10][11]. Lebih lanjut, curah hujan tinggi disebabkan oleh efek *blocking* pegunungan [2]. Meskipun demikian, presipitasi tidak terjadi setiap saat, sehingga perlu diteliti kondisi fisis dan dinamis atmosfer yang menyebabkan presipitasi berkurang. Kondisi fisis dan dinamis yang dapat ditinjau antara lain: (a) berkurangnya efek *blocking* karena variasi nilai *Froude number* (*Fr*) [6], dan (b) berkurangnya *MFC* [8] di wilayah tersebut. Tujuan studi ini adalah: (1) untuk mengetahui hubungan antara *Fr* dengan presipitasi, dan hubungan *MFC* dengan presipitasi di wilayah kajian baik secara statistik maupun menggunakan simulasi model numerik, dan (2) untuk mengetahui hubungan antara *Fr* dengan *MFC*.

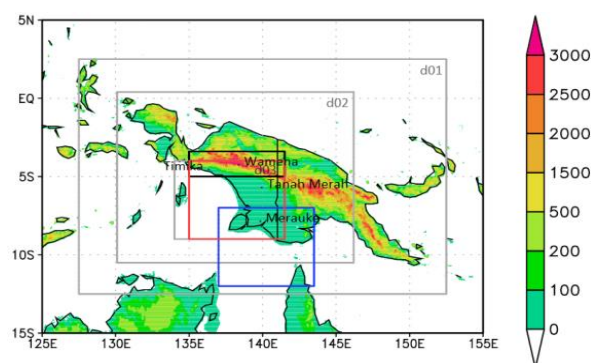
2. Data dan Metode

Data. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah: (a) data bulanan observasi empat stasiun (stasiun Timika, Wamena, Tanah Merah, dan Merauke), estimasi presipitasi *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B43* resolusi $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ [12], model reanalisis *ERA-Interim* resolusi $0,125^{\circ} \times 0,125^{\circ}$ [13] digunakan untuk analisis tahunan dengan rentang waktu 1 Januari 2000 – 31 Desember 2014; (b) data tiap 6 jam *ERA-Interim* resolusi $0,75^{\circ} \times 0,75^{\circ}$ selama bulan Juli 2008 digunakan untuk simulasi model skala-meso (lebih detail dijelaskan pada pembahasan Simulasi Dinamis) dan dibandingkan dengan data tiap 3 jam estimasi presipitasi *TRMM 3B42* [12]; (c) dan data topografi *ETOPO2v2* tahun 2006 dari *National*

Centers for Environmental Information (NCEI; sebelumnya adalah National Geophysical Data Center – National Oceanic and Atmospheric Administration [NGDC-NOAA]) dengan resolusi $0,033^{\circ} \times 0,033^{\circ}$ [14].

Data curah hujan rata-rata bulanan observasi stasiun dan data udara atas (CLIMAT TEMP) yang meliputi data temperatur, *dewpoint*, tinggi geopotensial, dan arah dan kecepatan angin pada stasiun Merauke diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Data observasi bulanan digunakan untuk memvalidasi data spasial-temporal estimasi presipitasi *TRMM 3B43* dan reanalisis *ERA-Interim* rata-rata bulanan. Untuk data reanalisis *ERA-Interim*, parameter yang digunakan adalah rata-rata bulanan geopotensial, temperatur, arah dan kecepatan angin, dan data kelembapan spesifik lapisan 1000–500mb.

Metode. Tahapan analisis dan metode yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan sebagai berikut. Validasi data spasial-temporal bulanan (data *TRMM* dan *ERA-Interim*) menggunakan data observasi stasiun, selanjutnya data yang telah divalidasi digunakan untuk analisis lebih lanjut. Analisis variasi tahunan di wilayah penelitian untuk melihat periode ketika aliran udara skala regional periode monsun dingin Australia yang dominan dari tenggara dan cenderung tegak lurus pegunungan. Selanjutnya pembendungan aliran udara dari tenggara tersebut ditinjau dari nilai *Fr*. Hubungan pembendungan aliran udara dengan presipitasi dianalisis menggunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD; [15][16]).



Gambar 1. Peta topografi (dari data ETOPO 2006) wilayah penelitian.

Selanjutnya, akan ditentukan bulan dengan aliran angin meridional positif terkuat (anomali komponen angin *v* positif terbesar di lapisan bawah selama periode 2000-2014) untuk studi kasus dan disimulasikan dengan menggunakan model cuaca skala-meso *WRF-EMS*. Simulasi ini bertujuan untuk melihat lebih detail variasi harian konvergensi uap air dan *blocking* dari aliran udara skala yang lebih besar dengan dinamika harian di wilayah penelitian.

Validasi Presipitasi TRMM dan Reanalisis ERA-Interim dengan Observasi. Estimasi presipitasi dari satelit *TRMM 3B43* divalidasi pada empat titik stasiun, yaitu: Timika, Wamena, Tanah Merah, dan Merauke. Jumlah data curah hujan bulanan observasi 2001-2010 untuk masing-masing stasiun tersebut adalah 120, 72, 109, dan 116.

Analisis korelasi antara data stasiun dan *TRMM 3B43* dengan menggunakan rata-rata 9-grid terdekat menghasilkan secara keseluruhan koefisien korelasi cukup kuat (0,46; 0,72; 0,77; 0,90), dengan korelasi terlemah di wilayah Timika. Estimasi presipitasi di wilayah Merauke cukup baik dengan *error* dibawah 100 mm/bulan. Meskipun demikian untuk stasiun yang lain nilai *RMSE* menunjukkan *error* lebih dari 150 mm/bulan.

Validasi data reanalisis ERA-Interim. Validasi dilakukan untuk variabel tinggi geopotensial, temperatur, kelembapan spesifik, dan komponen angin zonal maupun meridional menggunakan data rata-rata bulanan radiosonde Merauke periode 2005-2014 sejumlah 58 data.

Pada lapisan 850mb secara umum korelasi rata-rata bulanan radiosonde Merauke dengan model reanalisis grid terdekat menghasilkan nilai koefisien korelasi diatas 0,9 kecuali komponen angin meridional sekitar 0,8. Nilai *RMSE* untuk masing-masing variabel lainnya pada lapisan ini juga relatif kecil. Semakin tinggi lapisan umumnya nilai koefisien korelasinya cenderung menurun, namun nilai tersebut masih diatas 0,6 pada lapisan 500 mb. Nilai *RMSE* komponen angin relatif besar sekitar 1,6-1,8 m/s pada lapisan 850 mb namun koefisien korelasinya tinggi 0,8-0,9. Secara keseluruhan model reanalisis cenderung *under-estimate* untuk variabel angin.

Analisis Variasi Tahunan. Data estimasi presipitasi bulanan *TRMM 3B43* dan data reanalisis bulanan *ERA-Interim* digunakan untuk melihat variasi tahunan dan distribusi spasial presipitasi dan variasi angin, kelembapan dan *Fr* di wilayah penelitian untuk mengetahui pola tahunan dan *blocking* aliran udara dari selatan pegunungan yang terjadi pada setiap bulannya.

Perhitungan Froude Number. *Froude number* digunakan sebagai indikator pembendungan aliran udaradari tenggara oleh topografi pegunungan tengah Papua. Nilai Fr^2 merupakan rasio energi kinetik terhadap energi potensial gravitasi diketinggian puncak pegunungan [17].

$$Fr = \frac{U}{NH} \quad (1)$$

Perhitungan *Fr* terlebih dahulu ditentukan area dan *depth* untuk perhitungan rata-rata *U*, *Brunt Väisälä*

frequencies (N^2) dan ketinggian (*H*) rata-rata yang sesuai penghalang gunung yang kompleks [6].

$$N^2 = \frac{g}{\Theta_v} \frac{d\Theta_v}{dz} \quad (2)$$

dengan *g* adalah percepatan gravitasi (9,8 m/s²), Θ_v adalah temperatur potensial virtual. Dalam penelitian ini ketinggian *H* ditentukan konstan 2000 meter, sedikit dibawah rata-rata elevasi pada area 3°-5°LS 136°-142°BT (kotak hitam pada Gambar 1), sedangkan *U* dan *N* dihitung di area relatif terbuka (belum terpengaruh topografi) yaitu 7°-12°LS 137°-143,5°BT (Kotak biru pada Gambar 1). *U* dalam hal ini komponen angin *cross-barrier* hanya menggunakan komponen angin meridional, sedangkan komponen zonal diabaikan. *U* dan N^2 dihitung menggunakan rata-rata pada lapisan 1000–800 mb.

Metode Singular Value Decomposition. Untuk mengetahui variansi yang dapat dijelaskan antara variabel *Fr* dengan estimasi presipitasi *TRMM3B43* (Kotak merah pada Gambar 1) pada wilayah dengan batasan 4°-9°LS 135°–141°BT, digunakan metode *Singular Value Decomposition* (SVD) [15,16,18,19].

Simulasi Dinamis. Model *WRF-EMS* merupakan varian dari *WRF* yang dikembangkan oleh *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) dan *National Center for Environmental Predictions* (NCEP). *Running* model menggunakan inisial data *ERA-Interim* resolusi spasial 0,75°×0,75° tiap 6 jam selama satu bulan, *running* tiap tiga hari dengan *spin-up* 12 jam menggunakan modul python *ems_chunk.py* [20]. Simulasi ini bertujuan untuk melihat lebih detail variasi harian curah hujan, *Fr* dan *moisture flux convergence*. Pengaturan domain simulasi model dapat dilihat pada Gambar 1. Pengaturan model menggunakan konfigurasi parameterisasi model yang secara umum sama dengan penelitian sebelumnya [21] dengan ringkasan pengaturan parameter dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengaturan Model *WRF*

Pengaturan	D1	D2	D3
Res. Spasial	27 km	9 km	3 km
Res. Temporal	3 jam	3 jam	1 jam
Res. Geografi	10 m	5 m	2 m
Grid	100 x 70	235 x 145	301 x 241
Parameterisasi			
<i>Cumulus</i>	<i>KF</i>	<i>KF</i>	<i>KF</i>
<i>Microphysics</i>	<i>WSM6</i>	<i>WSM6</i>	<i>WSM6</i>
<i>PBL</i>	<i>MYJ</i>	<i>MYJ</i>	<i>MYJ</i>
<i>LSM</i>	<i>Noah</i>	<i>Noah</i>	<i>Noah</i>
Radiasi <i>longwave</i>	<i>RRTM</i>	<i>RRTM</i>	<i>RRTM</i>
Radiasi <i>shortwave</i>	<i>Goddard</i>	<i>Goddard</i>	<i>Goddard</i>

Perhitungan Moisture Flux Convergence. Dalam persamaan konservasi uap air dikenal *moisture flux convergence (MFC)* yang proporsional dengan konvergensi massa horizontal. Persamaan ini sering digunakan dalam memprediksi inisiasi konveksi [8].

$$MFC = -\frac{1}{g} \nabla \cdot \int_{850}^{1000} q \vec{v} dp \quad (3)$$

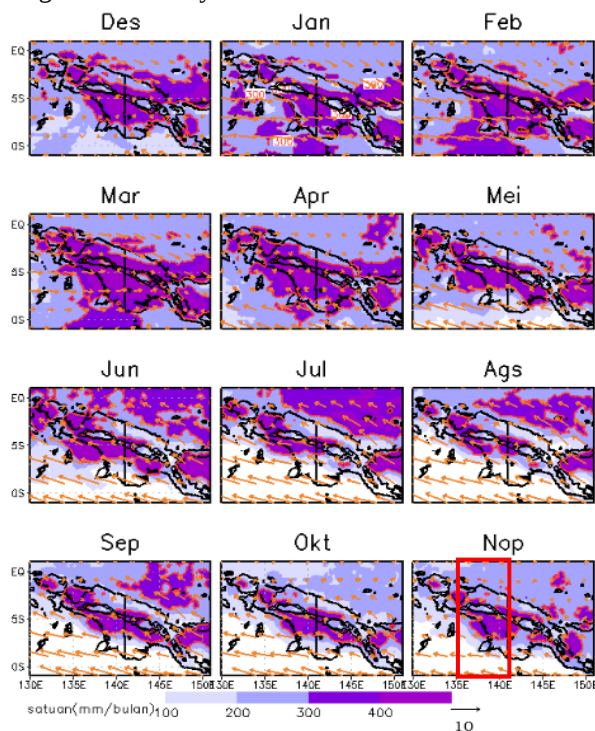
Cross-correlation. Secara matematis *cross-correlation* dinyatakan sebagai berikut [22]:

$$R_{xy}(l) = \frac{C_{xy}(l)}{S_x S_y} \quad (4)$$

dengan $R_{xy}(l)$ adalah *cross-correlation* antara x dan y pada waktu ke- l , $C_{xy}(l)$ adalah kovarian antara x (curah hujan) dan y (Fr dan MFC) pada waktu ke- l , S_x adalah standar deviasi x , dan S_y adalah standar deviasi y .

3. Hasil dan Pembahasan

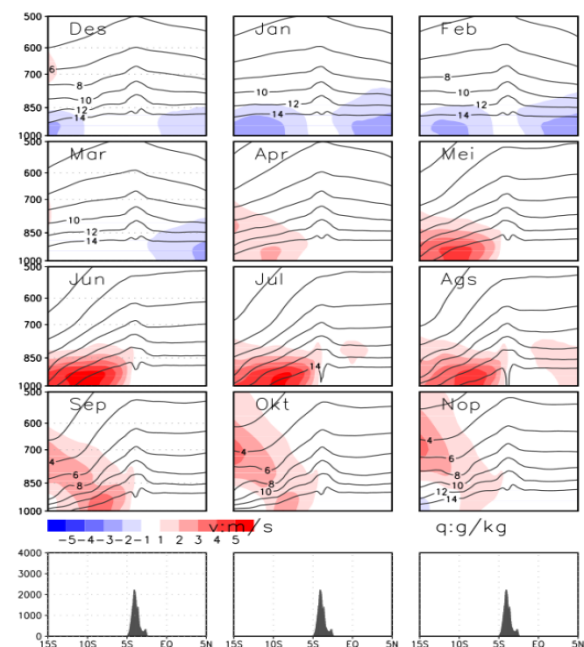
Variasi Tahunan Presipitasi dan Angin di Wilayah Papua. Gambar 2 menunjukkan vektor angin pada lapisan 850 mb dari data reanalisis *ERA-Interim* dan curah hujan rata-rata bulanan dari data *TRMM 3B43*. Pada bulan DJF umumnya angin pada lapisan ini bertiup dari barat-barat laut bertepatan dengan periode monsun dingin Asia. Sedangkan pada bulan JJA pola angin dari tenggara bertepatan dengan periode monsun dingin Australia. Pola angin pada lapisan 850 mb menunjukkan bahwa pola regional khususnya monsun relatif terlihat kuat.



Gambar 2. Kontur gradasi rata-rata bulanan estimasi presipitasi dan angin lapisan 850 mb (vektor dalam m/s).

Pola presipitasi monsunial terlihat di wilayah Merauke dengan curah hujan dibawah 100 mm/bulan pada bulan JJA. Berbeda dengan presipitasi di wilayah tepat di selatan pegunungan tengah Papua yang nilainya diatas 300 mm/bulan pada bulan JJA. Perbedaan ini mengindikasikan adanya peran topografi terhadap terjadinya presipitasi tepat di selatan pegunungan Papua, sesuai penelitian sebelumnya [1][3].

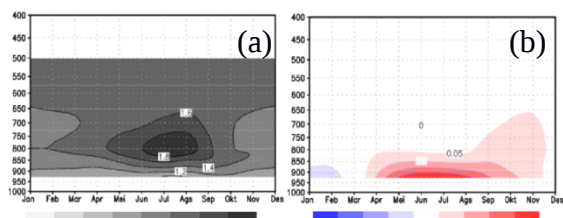
Kotak merah Gambar 2 (135°-140°BT 5°LU-15°LS) digunakan untuk menghitung rata-rata bujur dan melihat penampang meridional-vertikal pada Gambar 3. Pola tahunan angin vertikal dari data reanalisis *ERA-Interim* ditunjukkan pada Gambar 3. Di wilayah selatan pegunungan tengah Papua pada periode DJF terlihat komponen v negatif di lapisan bawah. Pola ini mulai berbalik pada bulan April, dengan ditunjukkan oleh terjadinya perubahan komponen angin v menjadi bernilai positif (dari selatan), dan pengeringan atmosfer di lapisan bawah (1000-700 mb) terutama di lintang 15°LS dengan ditunjukkan oleh kontur kelembapan spesifik < 12 g/kg (relatif kering). Pola ini semakin jelas pada periode JJA dilapisan bawah hingga 700mb, dengan angin tenggara terlihat kuat pada bulan Juli. Angin ini melemah ketika dekat dengan lereng selatan pegunungan tengah Papua dan mengalami peningkatan kelembapan spesifik (> 14 g/kg di lapisan 1000-850 mb), menunjukkan aliran ini dibendung oleh pegunungan tersebut.



Gambar 3. Penampang vertikal meridional variasi tahunan komponen angin meridional (gradasi warna) dan kontur kelembapan spesifik (2-14 interval 2 g/kg). Bawah, kontur rata-rata ketinggian pegunungan tengah Papua dari kotak merah Gambar 2.

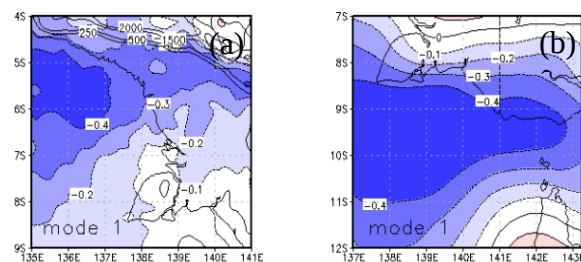
Secara bulanan terlihat pola presipitasi yang berbeda antara selatan pegunungan Papua dengan Merauke (lihat Gambar 2). Indikasi terjadinya penumpukan kelembapan spesifik terutama di lapisan bawah terlihat di sekitar wilayah selatan pegunungan Papua (lihat Gambar 3).

Penelitian ini difokuskan pada aliran massa udara dari tenggara yang terbendung oleh pegunungan tengah Papua pada bulan Mei hingga September. Selanjutnya variasi tahunan N^2 dan Fr rata-rata dapat dilihat pada Gambar 4. Variasi N^2 pada lapisan 800-700mb menunjukkan kondisi lingkungan cenderung lebih stabil ($1,6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) pada bulan Juni hingga Agustus. Meskipun demikian pada bulan yang sama nilai Fr mencapai maksimum (0,2) pada lapisan 925-850 mb. Hal ini disebabkan karena nilai komponen angin v lapisan bawah mendekati pegunungan paling kuat pada periode tersebut, yaitu diatas 5 m/s. Meskipun demikian nilai ini menunjukkan aliran udara selalu dibendung karena Fr jauh lebih kecil dari 1, serupa hasil penelitian sebelumnya di pulau Hawaii [23].



Gambar 4. Komposit annual (a) variasi N^2 ($\times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) dan (b) variasi Fr .

Hubungan Pola Spasial Presipitasi dengan Froude Number. Hasil analisis SVD TRMM dan Fr (lapisan 925-800mb) periode MJJAS menunjukkan *Square covariance fractions* (*scf*) mode pertama mewakili 52,3% dengan korelasi 0,43. *Scf* menurun drastis (sekitar 20%) pada mode kedua dan demikian pula pada mode-mode selanjutnya.



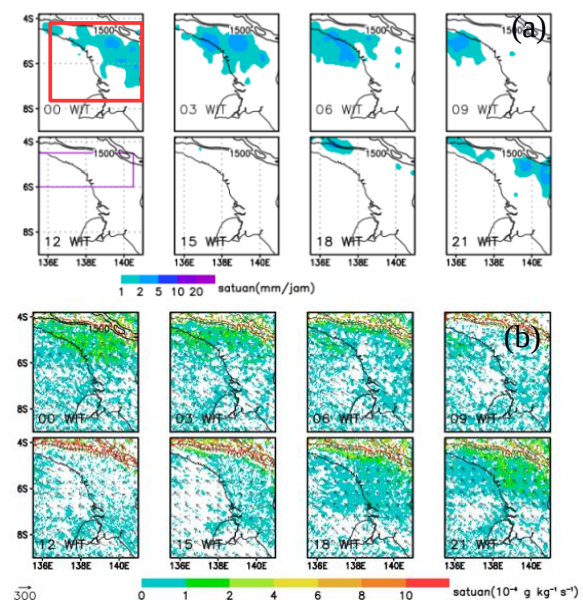
Gambar 5 (a) *Heterogenous correlation map* dari TRMM
(b) *Heterogenous correlation map* dari Fr

Selanjutnya analisis *Heterogenous correlation map* dilakukan dengan menggunakan mode pertama (Gambar 5), menunjukkan keterkaitan sefase antara presipitasi di selatan pegunungan (Gambar 5a sesuai kotak merah Gambar 1) dengan variasi Fr di

perairan selatan Merauke (Gambar 5b sesuai kotak biru Gambar 1) dengan nilai korelasi diatas 0,3. Sedangkan korelasi antara presipitasi di wilayah Merauke dengan Fr di atas perairan selatan Merauke menghasilkan nilai koefisien korelasi dibawah 0,1.

Dari analisis pada Gambar 5 menunjukkan terdapat hubungan sefase antara presipitasi di selatan pegunungan Papua dengan aliran udara lapisan bawah di selatan perairan Merauke, namun korelasinya kecil ($< 0,4$). Hasil analisis pada Gambar 3 menunjukkan indikasi penumpukan kelembapan spesifik lapisan bawah di wilayah selatan pegunungan Papua. Oleh karena itu perlu ditinjau variabel lain yaitu MFC , dan sekaligus untuk melihat pola harian yang terjadi di wilayah ini. Untuk tujuan ini maka dilakukan studi kasus simulasi menggunakan model skala-meso WRF-EMS. Studi kasus diambil dari nilai anomali positif terbesar komponen angin v di lapisan bawah. Anomali maksimum (lebih kuat +1,5 m/s) terjadi pada bulan Juli 2008. Hal ini meningkatkan nilai Fr pada bulan tersebut meskipun kecil.

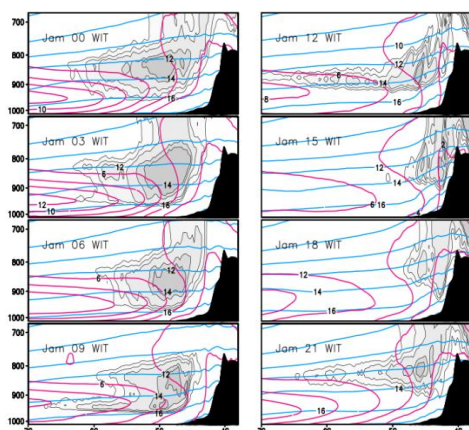
Hubungan Pola Harian Presipitasi dengan Moisture Flux Convergence dari Hasil Simulasi WRF. Hasil simulasi model WRF studi kasus bulan Juli 2008 dilakukan komposit harian untuk mengetahui pola umum pada periode tersebut. Gambar 6 menunjukkan pola spasial rata-rata harian presipitasi TRMM 3B42 (a) dan hasil simulasi model WRF (b); *moisture transport* dalam vektor satuan kg/ms dan MFC satuan 10^{-4} g/kg .



Gambar 6. (a) Komposit harian presipitasi (mm jam^{-1}) TRMM 3B42 dan
(b) Komposit harian simulasi model WRF, *moisture transport* (vektor satuan kg/ms), gradasi warna MFC satuan ($10^{-4} \text{ g/kg s}^{-1}$).

Akumulasi presipitasi (Gambar 6a) terjadi pada pukul 21.00 WIT di sebelah timur wilayah lembah pegunungan ($4,5^{\circ}$ - 6° LS kotak ungu Gambar 6a). Presipitasi 1-5 mm/jam bergerak ke barat hingga sampai di perairan barat Timika pada pagi hari (09.00 WIT). Pada wilayah Timika terlihat, adanya presipitasi pada sore hari dan dini-pagi hari. Bagian timur wilayah selatan pegunungan umumnya tidak terjadi hujan (< 1 mm/jam) pada pukul 11.00-18.00 WIT. Pola harian distribusi *MFC* simulasi model *WRF* (Gambar 6b) menunjukkan adanya konvergensi uap air $1-4 \times 10^{-4}$ g/kgs pada malam hingga pagi hari (21.00-09.00 WIT). Hal ini menunjukkan pola yang sefase antara *MFC* dan presipitasi. Pagi (09.00 WIT) hingga sore hari (15.00 WIT) *MFC* melemah ($0-1 \times 10^{-4}$ g/kgs) di wilayah ini, dan bahkan beberapa lokasi menunjukkan adanya divergen (*MFC* bernilai negatif). Sedangkan pada awal malam (18.00 WIT) *MFC* relatif kuat ($1-4 \times 10^{-4}$ g/kgs) tepat di selatan lereng pegunungan.

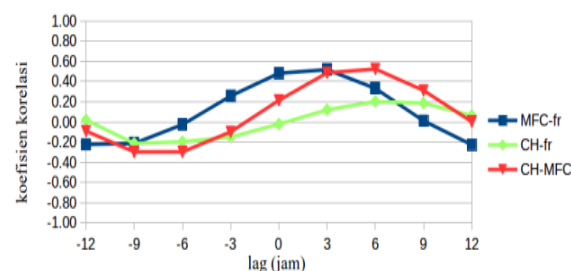
Penampang vertikal meridional rata-rata bujur $135,5^{\circ}$ - 140° BT (kotak merah Gambar 6a) hasil simulasi model *WRF* dapat dilihat pada gambar 7, menunjukkan pola yang sesuai dengan *MFC*. Mulai siang hari (12.00 WIT) udara bergerak mendekati pegunungan didukung angin lembah yang menaiki lereng selatan dan membentuk awan dengan tinggi dasar sekitar 900 mb atau ± 1000 m (*Total Cloud Cover* dalam %) di lereng pegunungan. Pada malam hari (21.00 WIT), aliran udara dari selatan meningkat dan aktivitas pembentukan awan menyebar ke selatan $\pm 1,5^{\circ}$ (sekitar 150 km) dengan puncak awan dibawah 700 mb (± 3000 m) yang mengindikasikan tipe awan *stratiform* hingga pagi hari (09.00 WIT). Pembentukan awan mulai berkurang di lembah hingga siang hari (12.00 WIT).



Gambar 7. Penampang vertikal meridional rata-rata hasil simulasi model *WRF*, komposit bulan Juli 2008 fraksi *total cloud cover* (0,1-0,2), kecepatan angin (2-12 m/s kontur merah) dan kelembapan spesifik (6-18 g/kg kontur biru).

Awan terbentuk umumnya pada saat angin geser (*shear*) relatif lemah (2-6 m/s) di lembah dan kurang dari 4 m/s di lereng gunung. Hasil simulasi menunjukkan pola awan harian di wilayah ini mengindikasikan tipe awan *stratiform*, sesuai dengan penelitian sebelumnya [2] namun terbentuk di lapisan berbeda. Penelitian sebelumnya [2] menyatakan awan *stratiform* sering terbentuk di lapisan menengah sedangkan hasil simulasi, awan terbentuk di lapisan bawah.

Presipitasi estimasi *TRMM 3B42* dan *MFC* hasil simulasi model *WRF* dirata-rata untuk area kotak ungu pada Gambar 6a, kemudian dilakukan analisis *cross-correlation* yang ditampilkan pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan korelasi maksimum (0,52) terjadi pada lag +6 jam (kurva merah). Dengan demikian *MFC* mencapai maksimum 6 jam sebelum curah hujan maksimum. Hal ini sedikit berbeda dengan penelitian sebelumnya [8] yang menyatakan *MFC* sering digunakan sebagai kuantitas dalam prakiraan jangka-pendek 0-3 jam.



Gambar 8. *Cross-correlation* presipitasi *TRMM 3B42*, *Fr* dan *MFC* simulasi model *WRF* rata-rata area. Korelasi *CH-MFC* maksimum 0,52 pada lag +6 jam.

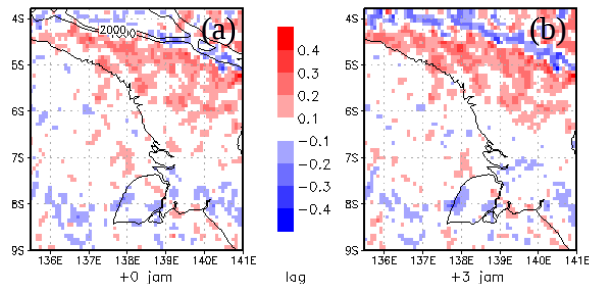
Selanjutnya dihitung *Fr* rata-rata area (Gambar 1 kotak biru). Hasil simulasi *WRF* domain satu, menghasilkan nilai *Fr* maksimum 0,41 minimum-0,05 dan rata-rata 0,15 yang menunjukkan aliran dari perairan selatan Merauke tidak dapat melintasi pegunungan tengah Papua. *Cross-correlation* presipitasi dan *Fr* lemah (0,20) pada lag +6 jam (Gambar 8).

Hasil rata-rata area presipitasi *TRMM 3B42* dan *MFC* simulasi *WRF* dipilih nilai maksimum harian untuk area tersebut dan dirangkum dalam Tabel 4. Terdapat tujuh hari dengan curah hujan $< 0,5$ mm/jam pada area tersebut. Sedangkan curah hujan ≥ 2 mm/jam terjadi dalam 10 hari. Korelasi dari data maksimum harian curah hujan dan *MFC* cukup kuat (0,66).

Tabel 2. Curah hujan rata-rata area maksimum harian

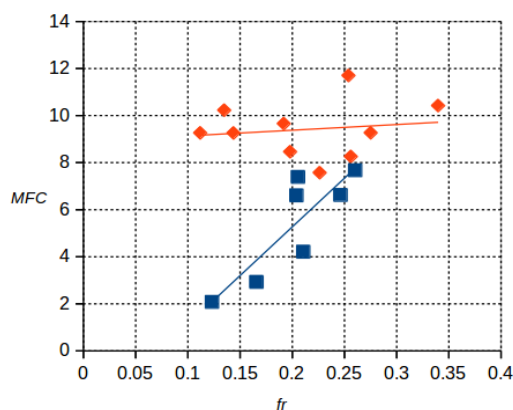
CH rata-rata area (mm jam ⁻¹)	Hari	Jumlah hari
$< 0,5$	11, 12, 15, 16, 23, 29, 30	7
≥ 2	1, 2, 4, 7, 13, 14, 18, 19, 25, 26	10

Hubungan Moisture Flux Convergence dengan Froude number Hasil Simulasi WRF. Untuk melihat hubungan *Fr*-*MFC*, dilakukan menggunakan analisis korelasi spasial antara *MFC* di selatan pegunungan dengan *Fr* rata-rata area. Hasil analisis korelasi menunjukkan aliran udara skala sinoptik (diatas perairan selatan Merauke) mempengaruhi *MFC* di selatan pegunungan sefase dalam skala sedang (dilihat dari nilai korelasi pada Gambar 8 dan Gambar 9).



Gambar 9. Korelasi spasial *Fr* rata-rata area dan *MFC* pada a) lag +0jam dan b) lag +3 jam.

Gambar 10 menunjukkan hubungan *Fr* dan *MFC* terhadap presipitasi rata-rata area maksimum harian. Hari dengan presipitasi maksimum $< 0,5$ mm/jam memiliki hubungan *Fr* dan *MFC* sefase linier dengan rentang *Fr* dari 0,1-0,27 dan *MFC* dari $2-8 \times 10^{-4}$ g/kgs. Sedangkan pada saat presipitasi maksimum $\geq 2,0$ mm/jam, nilai *MFC* $\geq 8 \times 10^{-4}$ g/kgs dengan nilai *Fr* mempunyai rentang nilai 0,1-0,3. Hal ini menunjukkan *Fr* lebih lemah dalam hubungannya dengan presipitasi, sedangkan *MFC* relatif lebih kuat dalam hubungannya terhadap presipitasi maksimum harian. Hari kering pada area selatan pegunungan ($< 0,5$ mm/jam) terjadi pada saat *MFC* lemah ($2-8 \times 10^{-4}$ g/kgs), sedangkan pada hari hujan maksimum $\geq 2,0$ mm/jam nilai *MFC* lebih kuat ($\geq 8 \times 10^{-4}$ g/kgs).



Gambar 10. Scatter plot *Fr* dan *MFC* satuan 10^{-4} g/kg simulasi model WRF saat presipitasi $< 0,5$ mm/jam (biru) dan saat presipitasi $\geq 2,0$ mm/jam (merah) beserta trendline-nya.

4. Kesimpulan

Variasi *Fr* pada periode Mei-September menunjukkan aliran massa udara dari selatan selalu terbendung atau dialirkan mengelilingi pegunungan, meskipun demikian hubungan variasi *Fr* dengan presipitasi lemah pada periode tersebut.

Presipitasi di wilayah selatan pegunungan tengah Papua lebih dipengaruhi oleh mekanisme lainnya yaitu *MFC* dengan korelasi sedang pada lag +6 jam. Meskipun demikian *MFC* di selatan pegunungan tengah Papua dengan variasi *Fr* memiliki korelasi sedang pada lag +3 jam, hubungan *MFC* dan *Fr* terlihat lebih kuat pada hari kering, meskipun demikian pada rentang *Fr* yang sama, jika *MFC* di wilayah tersebut kuat ($\geq 8 \times 10^{-4}$ g/kgs) maka cenderung terjadi hujan. Nilai *MFC* $6-8 \times 10^{-4}$ g/kgs merupakan rentang transisi yang dapat terjadi saat hari kering hingga hujan lebat.

Daftar Pustaka

- [1] Permana, D.S., 2011. Climate, Precipitation Isotopic Composition and Tropical Ice Core Analysis of Papua, Indonesia. Thesis. Ohio State University.
- [2] Christianto, D., 2014. Pengaruh Topografi Terhadap Curah Hujan di Selatan Papua. Tesis. Institut Teknologi Bandung.
- [3] Smith, I., Moise, A., Inape, K., Murphy, B., Colman, R., and Power, S., 2013. ENSO-Related Rainfall Changes Over The New Guinea Region. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 118. pp 1-11.
- [4] Zhou, L., and Wang, Y., 2006. Tropical Rainfall Measuring Mission Observation and Regional Model Study of Precipitation Diurnal Cycle in The New Guinean Region. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 111.
- [5] Rauw, A., 2014. Pengaruh Variabilitas Iklim Inter-decadal Terhadap Pergeseran Pola Hujan di Wilayah Papua. Disertasi. Institut Teknologi Bandung.
- [6] Hughes, M., Hall, A., and Fovell, R.G., 2008. Blocking in Area of Complex Topography, and Its Influence on Rainfall Distribution. Journal of The Atmospheric Sciences. Vol. 66. pp 508-518.
- [7] Reinecke, P.A., and Durran, D.R., 2008. Estimating Topographic Blocking Using a Froude Number When The Static Stability Is Nonuniform. Journal of The Atmospheric Sciences. Vol. 65. pp 1035-1048.
- [8] Banacos, P.C. and Schultz, D.M., 2005. The Use of Moisture Flux Convergence in Forecasting Convective Initiation: Historical and Operational Perspectives. FORECASTERS' FORUM. Weather and Forecasting. Vol. 20 pp 351-366.

- [9] Wei, J., Su, H., and Yang, ZL., 2015. Impact of Moisture Flux Convergence and Soil Moisture on Precipitation: A Case Study For The Southern United States With Implications For The Globe. *Climate Dynamics*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/s00382-015-2593-2
- [10] Permana, D. S. (2011). Analisis Data Meteorologi dari Pemantau Cuaca Otomatis Berbagai Elevasi dan Data Radiosonde di Papua. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 12 (2).
- [11] Permana, D. S., Thompson, L. G., & Setyadi, G. (2016). Tropical West Pacific Moisture Dynamics and Climate Controls on Rainfall Isotopic Ratios in Southern Papua, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(5), 2222-2245.
- [12] Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., and Nelkin, E. J.: The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA), in: *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology*, chap. 1, edited by: Hossain, F. and Gebremichael, M., Springer Verlag, the Netherlands, 3–22, doi:10.1007/978-90-481-2915-7_1, 2010.
- [13] _anonymous, 2011. The ERA-Interim Archive. ERA Report Series. European Centre for Medium Range Weather Forecasts.
- [14] National Geophysical Data Center, 2006. 2-minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) v2. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5J1012Q [diakses tanggal 28/09/2016].
- [15] Bjornson, H. and Venegas, S.A., 1997. A Manual for EOF and SVD Analysis of Climatic Data. Departement of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research. Mc Gill University.
- [16] Gunawan, D., Linarka, U.A., 2011. Penentuan Prediktor untuk Prediksi Curah Hujan Bulanan Menggunakan Metode Statistical Dynamical Downscaling. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. Vol. 12. No.1. pp 93-102.
- [17] Crushman-Roisin, B., and Beckers, J.M., 2008. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Academic Press.
- [18] Safril, A., Hadi, T.W., Hadi, S., Tjasyono, B.H.K., 2013. Prediksi Hujan Bulanan Menggunakan Adaptive Statistical Downscaling. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. Vol. 14. No.1. pp 27-34.
- [19] Putra, M.D.J., 2014. Analisis Siklus Hujan Tahunan di Sulawesi Selatan. Tesis. Institut Teknologi Bandung.
- [20] Qiu, X., Yang, F., Corbett, H., and Roth, M., 2015. ASHRAE Research Project 1561-RP Procedure to Adjust Observed Climatic Data for Regional Or Mesoscale Climatic Variations. *Final Report*. ASHRAE.
- [21] Hassim, M.E.E., Lane, T.P., Grabowski, W.W., 2016. The Diurnal Cycle of Rainfall Over New Guinea in Convection-Permitting WRF Simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 161–175.
- [22] Wigena, A.H., Djuraidah, A., Sahrman, S., 2015. Statistical Downscaling dengan Pergeseran Waktu Berdasarkan Korelasi Silang. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*. Vol. 16. No.1. pp 1924.
- [23] Esteban, M.A., and Chen, Y.L., 2008. The Impact of Trade Wind Strength on Precipitation Over The Windward Side of The Island of Hawaii. *Mon. Wea. Review*. 136 pp 913-928.