

Evaluasi Skema Parameterisasi Model WRF untuk Pengamatan Kemunculan Awan dari Satelit Himawari-8 di atas Indonesia (Evaluation of WRF Model Parameterization Schemes for Observation of Cloud Occurrences from Himawari-8 Satellite over Indonesia)

F. Lasmono¹, Risyanto¹, I. Fathrio¹

¹Pusat Riset dan Teknologi Antariksa, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung

Riwayat naskah

Diterima: 20-11-2019

Direvisi: 03-02-2021

Disetujui: 24-08-2021

Korespondensi:

F. Lasmono

farid.lasmono@lapan.go.id

ABSTRAK

Berbagai kombinasi skema parameterisasi kumululus dan mikrofisika telah diimplementasikan pada model WRF untuk menemukan skema terbaik kemunculan awan saat siang hari di atas Indonesia. Parameterisasi dilakukan dengan melakukan simulasi model ensemble resolusi tinggi selama sebulan menggunakan delapan skema kumululus dan empat skema mikrofisika. Selanjutnya hasil simulasi dibandingkan dengan data awan yang diturunkan satelit Himawari-8 pada tiga level ketinggian. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa kombinasi skema kumululus Kain-Fritsch dan skema tanpa kumululus/eksplisit, serta skema mikrofisika WSM3 menghasilkan korelasi yang cukup tinggi untuk kemunculan awan berdasarkan perhitungan nilai skill (*score skill*) dan analisa spasial. Secara umum, korelasi kemunculan awan luaran WRF dan Himawari-8 lebih baik pada awan tinggi daripada awan menengah atau rendah, dan hasil model cenderung overestimate di semua level ketinggian.

Kata kunci: WRF, Awan, Himawari-8, Model, Satelit

ABSTRACT

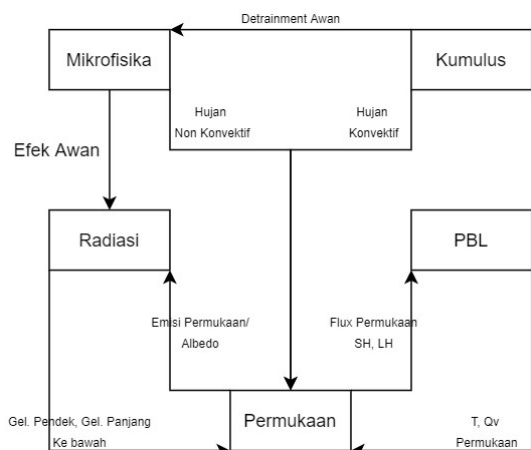
Various combinations of cumulus and microphysics parameterization schemes have been implemented in the WRF model to find the best scheme of cloud occurrences during the day over Indonesia. Parameterization was done by simulating a high-resolution ensemble model for a month using eight cumulus schemes and four microphysics schemes for three levels of height. The simulation results were then compared to cloud data derived from Himawari-8 satellite. The results of the comparison show that the combination of Kain-Fritsch and explicit cumulus scheme, and WSM3 microphysics scheme produced good correlations for cloud occurrences based on the calculation of skill scores and spatial analysis. In general, the cloud correlations of WRF output and Himawari-8 were better at high cloud levels than medium or low clouds, and the WRF model results tended to be over-estimated at all height levels.

Keywords: WRF, Cloud, Himawari-8, Model, Satellite

1. Pendahuluan

Awan merupakan salah satu elemen dan regulator penting untuk sistem cuaca. Simulasi awan dan evolusinya dapat membantu memahami terjadinya hujan, terutama di Indonesia. Hujan di Indonesia sangat sulit diprediksi karena dipengaruhi oleh berbagai kondisi topografis dan geografis kompleks, serta faktor-faktor fenomena variabilitas atmosfer seperti muson/*monsoon*, *Madden Julian Oscillation* (MJO), *Indian Ocean Dipole Mode* (IOD) dan *El-Nino Southern Oscillation* (ENSO) (Chang *et al.*,

2004; Hidayat & Kizu, 2010; Qian & Robertson, 2010; Rauniyar & Walsh, 2011; Lee, 2015). Prediksi cuaca operasional telah dilakukan Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA), Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) melalui aplikasi peringatan dini berbasis web dengan nama Sadewa (LAPAN. (2019). Dengan meningkatnya akurasi untuk simulasi awan, diharapkan dapat meningkatkan pemahaman dan akurasi untuk prediksi cuaca operasional wilayah Indonesia pada Sadewa.



Gambar 1. Parameterisasi dan interaksinya dalam model NWP (diadopsi dari Dudhia. (2014).

Weather and Research Forecasting (WRF, Skamarock *et al.*, 2008) sebagai salah satu model *Numerical Weather Prediction* (NWP), menggunakan parameterisasi untuk simplifikasi proses fisika yang terjadi dalam setiap grid. Dari beberapa skema fisika di WRF yang terkait dengan simulasi awan adalah skema mikrofisika dan skema kumululus (Gambar 1). Skema mikrofisika menangani proses awan dan hujan non-konvektif termasuk proses evolusi dan interaksinya, sedangkan skema kumululus menangani updraft dan downdraft vertikal dalam proses konveksi, termasuk hujan konvektif (Dudhia, 2014). Kombinasi skema mikrofisika dan kumululus yang tepat diharapkan mampu meningkatkan tingkat realisme simulasi awan di wilayah Indonesia.

Untuk memvalidasi simulasi awan dari model global atau regional, penggunaan data observasi awan dari satelit polar atau geostasioner sangatlah penting (Otkin *et al.*, 2008). Produk observasi awan satelit Himawari-8 (Bessho *et al.*, 2016) digunakan karena resolusi kanal visible yang digunakan dalam penelitian ini beresolusi tinggi, yaitu 1 km, dengan pembagian level ketinggian dan jenis awan sebagai fitur produk. Walaupun secara umum akurasi untuk data satelit terlalu rendah untuk pengukuran absolut properti awan (Zhang *et al.*, 2005), namun dataset observasi awan dari Himawari-8 ini berguna untuk mengevaluasi hasil simulasi awan.

Penelitian ini melakukan simulasi awan dengan kombinasi parameterisasi yaitu skema mikrofisika dan skema kumululus yang dibandingkan dengan observasi awan dari satelit pada siang hari selama bulan Maret 2017. Beberapa penelitian sebelumnya

tentang akurasi simulasi awan (Westphal *et al.*, 1996; Yu *et al.*, 1996; Garand & Nadon, 1998; Klein & Jakob, 1998; Mathieu *et al.*, 1999; Chaboureau *et al.*, 2000; Norris & Weaver, 2001) menunjukkan bahwa properti awan hasil simulasi sangat sensitif terhadap perubahan di skema mikrofisika. Penelitian ini akan mengkaji kemampuan kombinasi skema kumululus dan mikrofisika berbeda untuk mensimulasikan kemunculan awan. Algoritma untuk menghasilkan variabel awan yang dibedakan berdasarkan ketinggian dijelaskan pada Bab 2 termasuk kombinasi skema yang digunakan, sedangkan hasil dan pembahasan pada Bab 3, serta kesimpulan pada Bab 4.

2. Metodologi

2.1. Lokasi dan Data

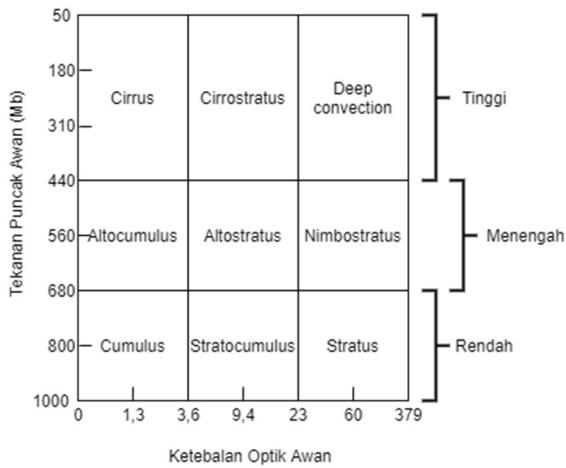
Lokasi penelitian pada studi ini adalah wilayah Indonesia (90° - 140° BT, 10° LS - 10° LU) dengan periode penelitian 1-31 Maret 2017, pukul 05.00, 06.00 dan 07.00 UTC (11.00, 12.00 dan 13.00 WIB). Pemilihan waktu siang hari dengan mempertimbangkan bahwa produk pengamatan ini merupakan keluaran dari kanal VIS (*visible*) yang lebih optimal di siang hari dibandingkan pagi atau sore hari (JAXA, 2019).

Data yang digunakan adalah data per-jam luaran model WRF Versi 3.7 dengan 32 level vertikal dan resolusi spasial 5 km. Data initial condition model menggunakan *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) FNL (Final) *Operational Global Analysis Data* 0.1° diunduh dari situs *Research Data Archive University Corporation for Atmospheric Research* (RDA UCAR). Sedangkan data observasi awan menggunakan produk tipe awan (*cloud type*) Himawari-8 luaran *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) yang didasarkan pada klasifikasi awan *International Satellite Cloud Climatology Project* (ISCCP) (Rossow & Schiffer, 1991).

2.2. Metode Penelitian

Pembagian ketinggian awan pada model WRF menggunakan metode *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) (Fita *et al.*, 2019). Variabel luaran WRF yang digunakan untuk mendapatkan awan tinggi, menengah, dan rendah adalah fraksi awan/*cloud fraction* (CLDFRA) dan tekanan/*pressure* (p, PB). Kriteria penentuan level ketinggian awan tersebut adalah sebagai berikut:

- Awan Tinggi : $p < 440$ hPa
- Awan Menengah : $660 > p > 440$ hPa
- Awan Rendah : $p > 660$ hPa



Gambar 2. Klasifikasi awan ISCCP yang selanjutnya dikelompokkan menjadi awan tinggi, menengah dan rendah. (ISCCP. (2019).

Pembagian ketinggian awan pada observasi satelit Himawari-8 diperoleh dengan mengelompokkan produk tipe awan ISCCP ke awan tinggi (*high*), menengah (*middle*) dan rendah (*low*) (Gambar 2).

Parameterisasi pada model WRF untuk kajian kemunculan awan tinggi, menengah dan rendah pada penelitian ini menggunakan 17 kombinasi dari skema kumulat dan skema mikrofisika sebagai berikut:

- Skema kumulat (cu):
 - Kain-Fritsch (cu1) (Kain, 2004)
 - Betts-Miller-Janjic (cu2) (Janjic, 1994)
 - Grell-Freitas (cu3) (Grell & Freitas, 2014)
 - Old Simplified Arakawa-Schubert (cu4) (Pan & Wu, 1995)
 - Grell-3D (cu5) (Grell, 1993; Grell & Devenyi, 2002)
 - Tiedtke (cu6) (Tiedtke, 1989; Zhang *et al.*, 2011)
 - New Tiedtke (cu16) (Zhang & Wang, 2017)
 - Tanpa kumulat/eksplisit (nocu).
- Skema mikrofisika (mp):
 - WSM3 (mp3) (Hong *et al.*, 2004)
 - WSM6 (mp6) (Hong & Lim, 2006)
 - Thompson (mp8) (Thompson *et al.*, 2008)
 - Morrison 2-moment (mp10) (Morrison *et al.*, 2009)

Selanjutnya, performa kombinasi skema parameterisasi WRF untuk kemunculan awan tinggi, menengah dan rendah dievaluasi dan dibandingkan dengan produk pengamatan awan Himawari-8 menggunakan analisis spasial dan berdasarkan nilai *skill* statistik, yang meliputi: *Probability of Detection* (POD), *Probability of False Detection* (POFD), *False Alarm Ratio* (FAR) dan *Critical Score Index*

(CSI). Formula perhitungan nilai *skill* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{POD} &= H / (H + M) \dots\dots\dots(1) \\
 \text{POFD} &= F / (F + C) \dots\dots\dots(2) \\
 \text{FAR} &= F / (H + F) \dots\dots\dots(3) \\
 \text{CSI} &= H / (H + M + F) \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

Metode simulasi WRF yang dilakukan menggunakan konfigurasi serupa dengan prediksi operasional yang digunakan oleh Sadewa, yang saat ini menerapkan skema kumulat Kain-Fritsch dan skema mikrofisika WSM3. Skema dan konfigurasi model WRF yang digunakan dalam penelitian ini tersaji pada Tabel 2.

Tabel 1. Tabel kontingensi nilai *skill*.

Model	Observasi	
	Awan	Bukan Awan
Awan	Hits (H)	False Alarm (F)
Bukan Awan	Misses (M)	Correct Negative (C)

Tabel 2 Skema dan konfigurasi model WRF yang digunakan dalam penelitian ini.

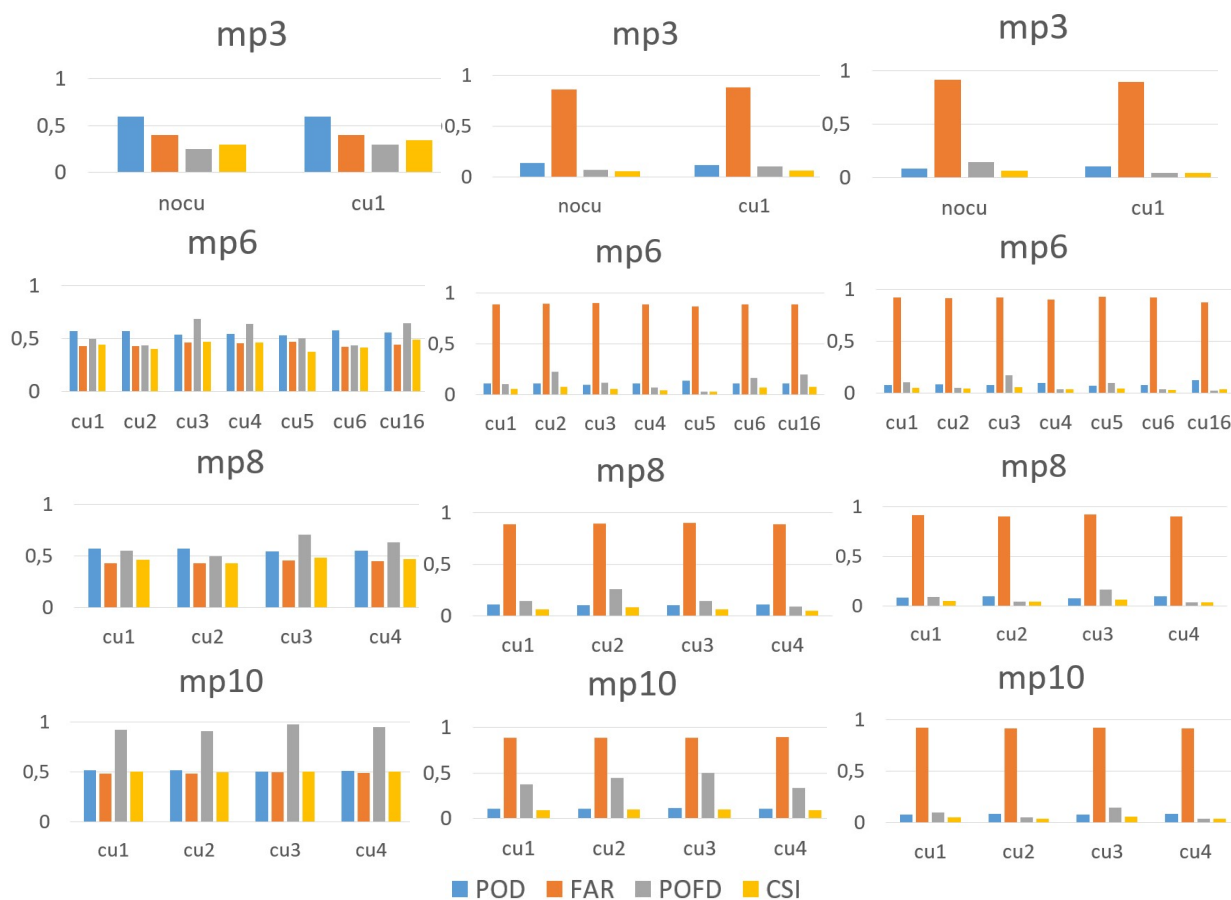
Parameter	Keterangan
Domain	Indonesia (90-140E 10S-10N), 400x1000 grids
Resolusi	5 km ² , 31 level vertical
Resolusi temporal	1 jam
Input	Global Forecasting System (GFS) 0.25° x 0.25°
Variabel	CLDFRA, P, PB
Skema kumulat	<ul style="list-style-type: none"> • Kain-Fritsch (cu1) • Betts-Miller-Janjic (cu2) • Grell-Freitas (cu3) • Old Simplified Arakawa-Schubert (cu4) • Grell-3D (cu5) • Tiedtke (cu6) • New Tiedtke (cu16) • Tanpa kumulat/eksplisit (nocu)
Skema mikrofisika	<ul style="list-style-type: none"> • WSM3 (mp3) • WSM6 (mp6) • Thompson (mp8) • Morrison 2-moment (mp10)
Boundary layer	Yonsei University (YSU)
Skema radiasi	Longwave (LW): RRTM; Shortwave (SW): Dudhia
Surface kayer	MM5 Similarity
Land Surface	Noah Land Surface Model

3. Hasil dan Pembahasan

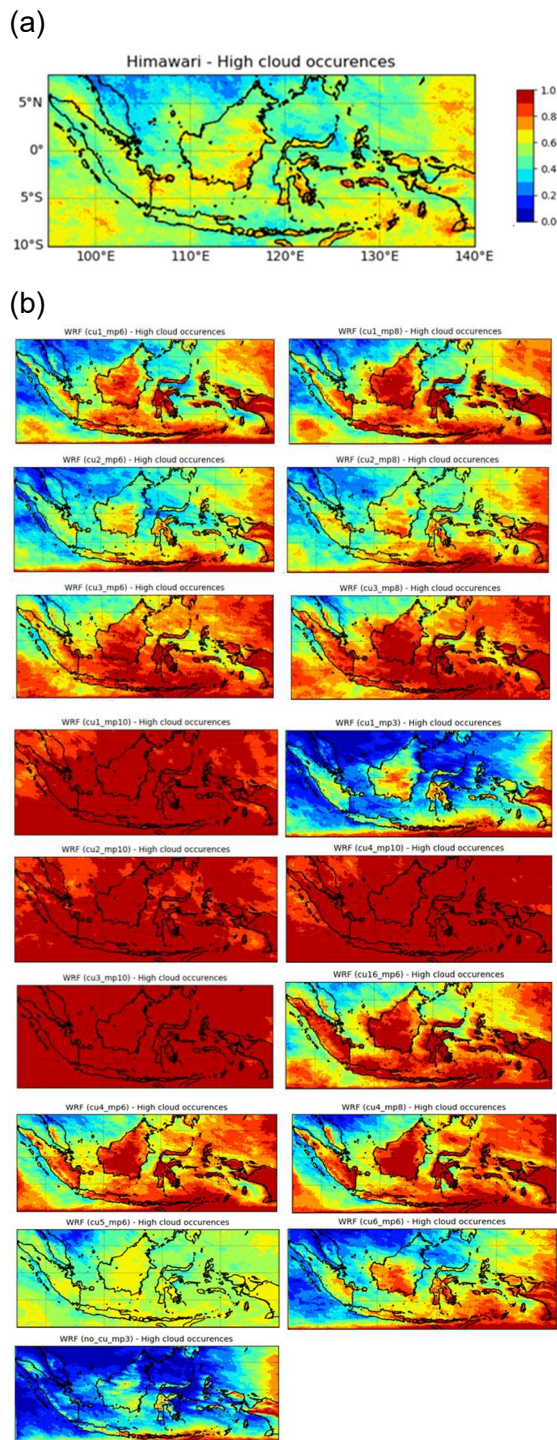
Nilai *skill* perbandingan hasil simulasi kemunculan awan selama bulan Maret 2017 pada pukul 11.00, 12.00 dan 13.00 WIB dengan produk observasi Himawari-8 ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai POD menunjukkan seberapa banyak piksel kemunculan awan yang berhasil diprediksi dengan tepat sesuai dengan kemunculan awan observasi Himawari-8. Hampir serupa dengan POD, CSI menunjukkan seberapa banyak piksel kemunculan awan yang diprediksi secara tepat namun juga memperhatikan nilai *False Alarm*. Rentang nilai POD dan CSI adalah 0-1 dengan nilai terbaik adalah 1. POFD menunjukkan seberapa banyak piksel yang menunjukkan prediksi kemunculan awan namun pada observasi tidak ada. Hampir serupa dengan POFD, FAR menunjukkan nilai yang sama dengan memperhatikan nilai *Hits*. Jarak nilai FAR dan POFD adalah 0-1 dengan nilai terbaik adalah 0.

Perbandingan kemunculan awan WRF dengan observasi Himawari-8 secara spasial ditunjukkan pada Gambar 4 hingga 5. Pada

awan menengah dan rendah (Gambar 3), nilai FAR mendekati 1 (sekitar 0,9) menunjukkan hampir seluruh prediksi kemunculan awan menengah dan rendah tidak ada dalam observasi (*false alarm*). Di sisi lain, nilai POFD yang rendah (antara 0,1 – 0,2) hanya menunjukkan sekitar 10 – 20% prediksi yang salah untuk ketidakmunculan awan menengah dan rendah. Kecuali pada awan menengah, skema mikrofisika mp10 memiliki nilai POFD lebih tinggi yaitu antara 0,3 – 0,5. Sementara nilai POD dan CSI yang mendekati 0 di simulasi awan menengah dan rendah menunjukkan bahwa hampir semua skema tidak mampu memprediksi kemunculan awan menengah dan rendah. Sebaliknya, pada nilai *skill* kemunculan awan tinggi, nilai POD pada semua kombinasi skema sekitar 0,5 – 0,6 mengindikasikan bahwa semua skema mampu memprediksi kemunculan awan tinggi 50% – 60%. Nilai POD paling tinggi ditunjukkan oleh kombinasi skema cu1_mp3 dan nocu_mp3, yaitu kombinasi skema kumululus Kain-Fritsch dan eksplisit, dengan skema mikrofisika WSM3. Demikian juga untuk nilai FAR dan POFD



Gambar 3. Nilai *skill* perbandingan kemunculan awan WRF dengan observasi Himawari-8 untuk awan tinggi (kiri), awan menengah (tengah) dan awan rendah (kanan).



Gambar 4. Kemunculan awan tinggi observasi Himawari-8 (a) dan 17 kombinasi simulasi WRF (b) saat siang hari selama bulan Maret 2017. Legenda menunjukkan persentase kemunculan.

kecil ditunjukkan oleh kombinasi skema kumululus dan mikrofisika yang sama, yaitu antara 0,2 – 0,4. Sedangkan nilai CSI, untuk ketiga skema terbaik tersebut memperoleh nilai terkecil diantara kombinasi skema lainnya, yaitu 0,3 dibandingkan 0,4 – 0,5 di kombinasi skema selain mp3 (WSM3).

Hal ini disebabkan karena frekuensi kemunculan awan pada kedua kombinasi skema tersebut relatif pendek dibandingkan yang lain. Mengingat bahwa CSI merupakan nilai yang biasanya tergantung frekuensi kejadian yang diprediksi atau disimulasikan (Schaefer, 1990).

Pembahasan perbandingan spasial observasi dan prediksi kemunculan awan akan dibagi menjadi wilayah lautan, pegunungan dan daratan untuk mengetahui performa masing-masing kombinasi skema.

Hasil observasi kemunculan awan tinggi pada bulan Maret 2017 (Gambar 4) menunjukkan sekitar 40% – 80% kejadian di daratan dan lautan Indonesia, dan sekitar 10% – 30% kejadian di lautan bagian utara Indonesia. Sementara, hasil simulasi dengan nilai *skill* terbaik yaitu skema cu1_mp3 menunjukkan 10% – 20% kemunculan awan tinggi di hampir seluruh lautan, kecuali di bagian tenggara dengan kemunculan lebih banyak yaitu 60% – 100%. Di atas daratan, kemunculan awan tinggi 100% ditunjukkan di wilayah selatan Indonesia, Papua, Sulawesi dan sekitar Kalimantan Tengah dari hasil observasi Himawari-8. Sedangkan hasil simulasi kemunculan awan tinggi dengan nilai terbaik berikutnya, yaitu skema nocu_mp3, menunjukkan area 10% – 20% yang lebih besar dan menutupi hampir seluruh Pulau Sumatera. Namun untuk kemunculan 60% – 100% masih serupa dengan skema cu1_mp3 yaitu di selatan dan timur Indonesia. Dibandingkan dengan observasi, hasil simulasi kemunculan awan tinggi kedua skema dengan nilai *skill* terbaik menunjukkan *underestimate* di sebagian besar perairan Indonesia dan *overestimate* di sebagian besar daratan Indonesia.

Hasil observasi kemunculan awan menengah pada bulan Maret 2017 (Gambar 5) menunjukkan sekitar 10% – 20% kejadian di lautan Indonesia, dan sekitar 30% – 40% di daratan. Pola kemunculan awan menengah dari observasi Himawari-8 menunjukkan bentuk pegunungan di semua pulau di Indonesia, yang berarti sebagian besar awan menengah terjadi di atas pegunungan dari proses orografis. Hasil simulasi kemunculan awan menengah dengan nilai *skill* terbaik yaitu skema nocu_mp3 menunjukkan pola serupa dengan observasi, dengan frekuensi kemunculan awan menengah sebesar 60% – 100%.

Hasil observasi kemunculan awan rendah pada bulan Maret 2017 (Gambar 6)

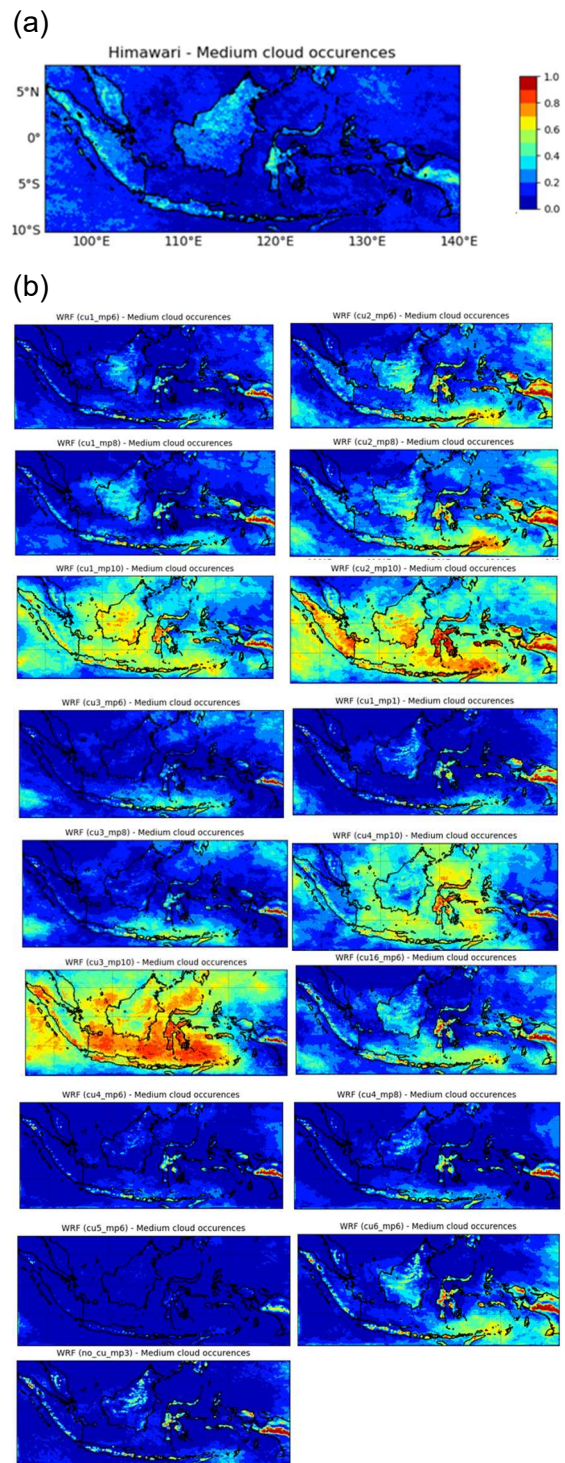
menunjukkan sekitar 10% – 20% kemunculan awan terjadi di lautan Indonesia, dan sekitar 30% – 40% di daratan. Pola kemunculan awan menengah menunjukkan bentuk pegunungan di semua pulau di Indonesia namun tidak mendetail, sedangkan hampir semua skema simulasi pada awan rendah menunjukkan detail pegunungan di Indonesia.

Secara umum hasil perbandingan spasial simulasi awan dan observasi satelit menunjukkan perbandingan terbaik terjadi pada kemunculan awan tinggi dibandingkan awan menengah dan rendah. Pada perbandingan kemunculan awan tinggi, untuk skema terbaik menurut perhitungan nilai *skill* yaitu skema cu1_mp3 (Kain-Fritsch dan WSM3) dan nocu_mp3 (eksplisit dan WSM3), secara spasial terlihat lebih didominasi oleh kemunculan awan dengan persentase kejadian 0% – 20% (biru-ungu) dibandingkan kemunculan awan dengan persentase kejadian 60% (kuning-merah). Ini menunjukkan bahwa nilai *skill* yang tinggi pada kedua kombinasi skema tersebut kemungkinan didapatkan dari banyaknya nilai 0 (tidak memprediksi) dibandingkan kesalahan memprediksi.

Secara spasial, kemunculan awan tinggi pada skema cu5_mp6 (Grell-3D dan WSM6) paling mendekati observasi, dengan rata-rata frekuensi kemunculan awan sebesar 60%. Namun demikian, skema ini tidak menghasilkan pola yang serupa dengan observasi pada awan menengah dan rendah. Kemunculan awan menengah dan awan rendah hasil simulasi pada sebagian besar skema menunjukkan pola kemunculan awan di sepanjang pegunungan di Indonesia. Sementara pada hasil observasi, awan di pegunungan hanya ditemui pada awan menengah. Awan rendah pada hasil observasi tidak menunjukkan pola pegunungan, kemungkinan disebabkan oleh keterbatasan satelit yang hanya dapat mendeteksi permukaan bumi dan awan secara 2-dimensi saja. Skema yang mendekati kemunculan awan menengah observasi adalah cu2_mp6 (Betts-Miller-Janjic dan WSM6) dan cu2_mp8 (Betts-Miller-Janjic dan Thomson) dengan rata-rata frekuensi kemunculan sebesar 60% di daratan yang masih overestimate.

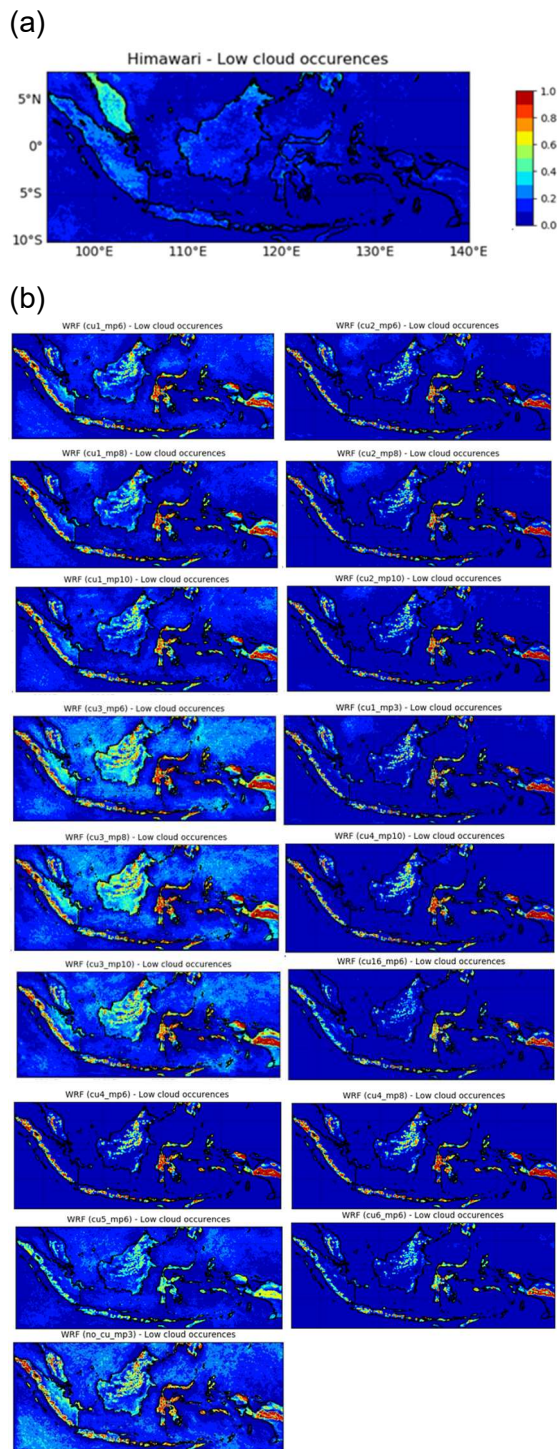
4. Kesimpulan

Berdasarkan nilai *skill* dan analisa spasial dapat disimpulkan bahwa kemunculan awan tinggi hasil simulasi lebih dapat



Gambar 5. Kemunculan awan menengah observasi Himawari-8 (atas) dan 17 kombinasi simulasi WRF (bawah) saat siang hari selama bulan Maret 2017. Legenda menunjukkan persentase kemunculan.

dibandingkan dengan observasi Himawari-8 daripada kemunculan awan menengah dan awan rendah. Dengan nilai FAR dan POFD paling rendah, dan nilai POD tertinggi diantara kombinasi skema kumululus dan mikrofisika, pasangan skema kumululus Kain-Fritsch dan



Gambar 6. Kemunculan awan rendah observasi Himawari-8 (a) dan 17 kombinasi simulasi WRF (b) saat siang hari selama bulan Maret 2017. Legenda menunjukkan persentase kemunculan.

eksplisit dengan skema mikrofisika WSM3 merupakan opsi terbaik dari 17 kombinasi yang dilakukan pada penelitian ini. Analisa spasial juga menunjukkan skema kumululus Grell-3D dan skema mikrofisika WSM6 pada kemunculan awan tinggi memiliki pola yang hampir sama dengan observasi dibandingkan

skema lainnya termasuk kedua skema dengan nilai skill tertinggi. Sementara pada awan menengah, skema kumululus Betts-Miller-Janjic dan skema mikrofisika WSM6 dan Thomson lebih mendekati pola yang sama dengan observasi dibanding kombinasi skema lainnya.

Hasil simulasi cenderung menghasilkan kemunculan awan yang overestimate di semua ketinggian (tinggi, menengah dan rendah), namun perbedaan pola spasial yang jauh dan nilai FAR yang tinggi pada ketinggian menengah dan rendah mengindikasikan bahwa performa WRF masih sulit dievaluasi untuk kemunculan awan menengah dan rendah yang dibandingkan dengan observasi Himawari-8 di tingkat ketinggian yang sama. Hal ini perlu diteliti lebih lanjut dengan periode data pengamatan dan simulasi yang lebih lama sehingga dapat merepresentasikan perbedaan akurasi di musim basah dan musim kering, termasuk juga pola diurnal awan yang perlu dikaji kesamaan karakteristiknya dengan pola diurnal hujan model WRF di Indonesia yang pernah diteliti sebelumnya (Suaydhi, 2016).

Selain itu hasil simulasi ini menunjukkan bahwa konfigurasi prediksi operasional Sadewa saat ini merupakan opsi terbaik dari beberapa opsi yang dikaji di penelitian ini. Namun mengingat bahwa penelitian ini masih berfokus ke parameter awan saja dengan resolusi waktu yang masih singkat, masih diperlukan evaluasi lanjutan dengan parameter-parameter berbeda dengan resolusi waktu yang lebih panjang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis pertama sebagai kontributor utama tulisan ini mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu penulisan KTI ini, yaitu Dr. Teguh Harjana dan Dr. Didi Satiadi atas saran dan masukannya sebagai pembimbing, instansi JAXA dan NASA sebagai penyedia data observasi, serta Mitra Bestari.

Makalah ini telah melewati proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Noersomadi selaku *section editor*.

Rujukan

Bessho, K., K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shimoji, Y. Sumida, M.

- Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota, R. Yoshida. (2016). An Introduction to Himawari-8/9 — Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 94(2), 151-183.
- Chaboureaud, J.P., J. -P. Cammas, P. Mascart, J. -P. Pinty. (2000). Evaluation of a cloud system lifecycle simulated by Meso-NH during FASTEX using METEOSAT radiances and TOVS-3I cloud retrievals. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 126, 1735–1750.
- Chang, C.-P., Z. Wang, J. Ju, T., Li. (2004). On the Relationship between Western Maritime Continent Monsoon Rainfall and ENSO during Northern Winter. *Journal of Climate*, 17, 665–672.
- Dudhia, J. (2014). A History of Mesoscale Model Development. Asia-Pac. *Journal of Atmospheric Science*, 50(1), 121-131.
- Fita, L., J. Polcher, T. M. Giannaros, T. Lorenz, J. Milovac, G. Sofiadis, E. Katragkou, S. Bastin. (2019). CORDEX-WRF v1.3). development of a module for the Weather Research and Forecasting (WRF) model to support the CORDEX community. *Geoscience Model Development*, 12, 1029–1066.
- Garand, L., S. Nadon. (1998). High-Resolution Satellite Analysis and Model Evaluation of Clouds and Radiation over the Mackenzie Basin Using AVHRR Data. *American Meteorological Society*, 11, 1976-1996.
- Grell, George A. (1993). Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121, 764–787.
- Grell, G. A, D. Devenyi. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letter*, 29, 1693.
- Grell, G. A. Freitas, S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 5233-5250.
- Hidayat, R., S., Kizu. (2010). Influence of the Madden-Julian Oscillation on Indonesian Rainfall Variability in Austral Summer. *International Journal of Climatology*, 30, 1816–1825.
- Hong, S. -Y, J. Dudhia, S. -H. Chen. (2004). A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 132, 103–120.
- Hong, S. -Y., J. -O. J. Lim. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of Korean Meteorological Society*, 42, 129–151.
- ISCCP. (2019, November 11). International Satellite Cloud Climatology Project. <https://isccp.giss.nasa.gov/cloudtypes.html>.
- Janjic, Zavisla I. (1994). The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Monthly Weather Review*, 122, 927–945.
- JAXA (2019, November 11). JAXA Himawari Monitor. <https://www.eorc.jaxa.jp/tree/userguide.html>.
- Kain, John S. (2004). The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170–181.
- Klein, S.A., C. Jakob. (1998). Validation and Sensitivities of Frontal Clouds Simulated by the ECMWF Model. *Monthly Weather Review*, 127, 2514-2531.
- Lee, H. S. (2015). General Rainfall Patterns in Indonesia and the Potential Impacts of Local Seas on Rainfall Intensity. *Water*, 7, 1751–1768.
- Mathieu, A., G. Seze, C. Guerin, H. Dupuis, A. Weill. (1999). Mesoscale boundary layer cloud structures as observed during the SEMAPHORE campaign. *Physics and Chemistry of Earth*, 8B, 933–938.
- Morrison, H., G. Thompson, V. Tatarskii. (2009). Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Monthly Weather Review*, 137, 991–1007.
- Norris, J. R., C. P. Weaver. (2001). Improved Techniques for Evaluating GCM Cloudiness Applied to the NCAR CCM3. *Journal of Climate*, 14, 2540-2550.
- Otkin, J. A., T. J. Greenwald. (2008). Comparison of WRF Model-Simulated and MODIS-Derived Cloud Data. *American Meteorological Society*, 136, 1957-1970.

- Pan, H. L., W. S. Wu. (1995). Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC medium range forecast model. NMC office note, 409.40, 20–233.
- Qian, J.-H., A. W., Robertson. (2010). Interactions Among ENSO, the Monsoon, and Diurnal Cycle in Rainfall Variability Over Java, Indonesia. *Journal of Atmospheric Science*, 67, 3509–3524.
- Rauniyar, S. P., K. J. E. Walsh. (2011). Scale Interaction of the Diurnal Cycle of Rainfall over the Maritime Continent and Australia : Influence of the MJO. *Journal of Climate*, 24, 325–348.
- Rossow, W. B., R. A. Schiffer. (1991). ISCCP Cloud Data Products. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 72:1-20.
- LAPAN (2019, November 11). Satellite-based Disaster Early Warning System. <https://sadewa.sains.lapan.go.id>.
- Schaefer, J. T. (1990). The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill. *American Meteorological Society*, 5, 570-575.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, W. Wang, J. G. Powers. (2008). A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note TN-475+STR, 125 pp.
- Suaydhi. (2016). Kemampuan Model WRF Dalam Memprediksi Curah Hujan Diurnal di Pulau Jawa. *Jurnal Sains Dirgantara*, 14(1), 57-70.
- Tiedtke, M. (1989). A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Monthly Weather Review*, 117, 1779–1800.
- Thompson, G., P. R. Field, R. M. Rasmussen, W. D. Hall. (2008). Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, 136, 5095–5115.
- Westphal, D. L., S. Kinne, P. Pilewskie, J. M. Alvarez, P. Minnis, D. F. Young, S. G. Benjamin, W. L. Eberhard, R. A. Kropfli, S. Y. Matrosov, J. B. Snider, T. A. Uttal, A. J. Heymsfield, G. G. Mace, S. H. Melfi, D. O. C. Starr, J. J. Soden. (1996). Initialization and validation of a simulation of cirrus using FIRE-II data. *Journal of Atmospheric Science*, 53, 3397–3429.
- Yu, W., M. Doutriaux, G. Seze, H. L. Treut, M. Desbois. (1996). A methodology study of the validation of clouds in GCMs using ISCCP satellite
- Zhang, M. H., W. Y. Lin, S. A. Klein, J. T. Bacmeister, S. Bony, R. T. Cederwall, A. D. Del Genio, J. J. Hack, N. G. Loeb, U. Lohmann, P. Minnis, I. Musat, R. Pincus, P. Stier, M. J. Suarez, M. J. Webb, J. B. Wu, S. C. Xie, M. S. Yao, J. H. Zhang. (2005). Comparing clouds and their seasonal variations in 10 atmospheric general circulation models with satellite observations. *Journal of Geophysical Research*, 110, D15S02 (1-18).
- Zhang, C., Y. Wang, K. Hamilton. (2011). Improved representation of boundary layer clouds over the southeast pacific in ARW–WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme. *Monthly Weather Review*, 139, 3489–3513.
- Zhang, C., Y. Wang. (2017). Projected Future Changes of Tropical Cyclone Activity over the Western North and South Pacific in a 20-km-Mesh Regional Climate Model. *Journal of Climate*, 30, 5923-5941.

