



ISSN 1411 - 3082
eISSN 2527- 5372

JURNAL METEOROLOGI DAN GEOFISIKA

Volume 18, Nomor 2 - 2017

Terakreditasi LIPI, Nomor: 603/AU2/P2MI-LIPI/03/2015

PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA

JURNAL METEOROLOGI DAN GEOFISIKA

Volume 18, Nomor 2 - Tahun 2017
ISSN 1411 – 3082, eISSN 2527 - 5372

Jurnal Meteorologi dan Geofisika merupakan jurnal riset yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) sebagai sarana untuk mempublikasikan hasil pencapaian penelitian dan pengembangan di bidang Meteorologi, Klimatologi, Kualitas Udara, dan Geofisika. Terbit 3 kali dalam setahun dan terbit pertama kali tahun 2000. Memperoleh akreditasi dari LIPPI sebagai jurnal ilmiah dengan nomor akreditasi: 603/AU2/P2MI/03/2015 yang berlaku 3 tahun (15 April 2015 – 15 April 2018).

TIM REDAKSI

PENASEHAT
Kepala Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika

KETUA DEWAN REDAKSI
Dr. Urip Haryoko, M.Si

DEWAN REDAKSI

Prof. Dr. Madlazim	(Geofisika)	Dr. Erwin Eka S. Makmur (Meteorologi)
Ir. Sudaryanto, MT	(Geofisika)	Donaldi S. Permana, Ph.D (Klimatologi & Kualitas Udara)
Dr. Tri Handoko Seto	(Meteorologi)	Thomas Hardy, M.Kom (Geofisika)
Dr. Ardhasena Sopaheluwakan	(Klimatologi dan Kualitas Udara)	Roni Kurniawan, ST, M.Si (Meteorologi)
Dr. Supriyanto Rohadi	(Geofisika)	Wahyu Widiyanto, S.Sos (Meteorologi)

SEKRETARIAT

Utoyo Ajie Linarka, S.T	Shelly Dharma Putri, A.Md
Rian Anggraeni, S.T	Sulyanti Pakpahan, S.Si
Sulyanti Pakpahan, S.Si	Drajat Ngadmantoro, S.Si
Sri Noviati, S.Si	Tri Astuti Nuraini, M.Si
Rahayu Sapta S. Sudewi, S.Kel	Ratna Satyaningsih, M.Si

ALAMAT REDAKSI:

Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika
Jl. Angkasa I No.2, Kemayoran, Jakarta 10720, Telp : (021) 4246321 ext. 1900 Fax : (021) 65866238
E-mail : jurnal.mg@bmkg.go.id, Website: <http://puslitbang.bmkg.go.id/jmg>

Redaksi menerima naskah hasil penelitian dan pengembangan di bidang Meteorologi, Klimatologi, Kualitas udara dan Geofisika yang belum pernah diterbitkan dalam jurnal ilmiah yang lain, dengan format dan sistematika seperti tercantum pada petunjuk penulisan naskah di halaman belakang.

PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas izin dan kehendak-Nya, Jurnal Meteorologi dan Geofisika Volume 18 Nomor 2 Tahun 2017 ini dapat diterbitkan dan hadir ke hadapan pembaca. Edisi ini menampilkan 5 (lima) karya tulis ilmiah yang terdiri dari 3 (tiga) karya tulis ilmiah di bidang Meteorologi, yaitu: Pengaruh Asimilasi Data Radar Cuaca Dalam Prediksi Cuaca Numerik Di Provinsi Lampung (Studi Kasus Pada 28 Februari 2015); Penerapan Metode Statistik Untuk Perbandingan Parameter Atmosfer Permukaan Antara Padang dan Selaparang; Profil Lapse Rate Vertikal Di Wilayah Indonesia, 1 (satu) naskah bidang Klimatologi yaitu Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Produksi Padi di Lahan Tadah Hujan, serta 1 (satu) naskah bidang Geofisika yaitu Relokasi Hiposenter dan Tomografi Gelombang P Menggunakan Metode Inversi Simultan Di Wilayah Papua.

Kritik dan saran kami harapkan dari pembaca untuk kemajuan dan penyempurnaan penerbitan Jurnal Meteorologi dan Geofisika. Dalam kesempatan ini Dewan Redaksi mengucapkan terimakasih kepada semua pihak, baik penulis, dewan editor, mitra bestari, maupun redaksi pelaksana yang telah banyak membantu dalam proses penerbitan jurnal ilmiah ini.

Sebagai penutup, semoga sajian ini dapat bermanfaat dan menambah wawasan bagi kita semua.
Selamat membaca!

Jakarta, Desember 2017
Dewan Redaksi

JURNAL METEOROLOGI DAN GEOFISIKA

Volume 18, Nomor 2 - Tahun 2017
ISSN 1411 – 3082 ; eISSN 2527 - 5372

DAFTAR ISI

Pengaruh Asimilasi Data Radar Cuaca Dalam Prediksi Cuaca Numerik di Provinsi Lampung (Studi Kasus Pada 28 Februari 2015) Jaka Anugrah Ivanda Paski, Indra Gustari	55-64
Relokasi Hiposenter dan Tomografi Gelombang P Menggunakan Metode Inversi Simultan di Wilayah Papua Arif Rachman Hakim, Supriyanto Rohadi, Jajat Jatnika	65-71
Penerapan Metode Statistik Untuk Perbandingan Parameter Atmosfer Permukaan Antara Padang dan Selaparang Ina Juaeni	73-81
Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Produksi Padi di Lahan Tadah Hujan Woro Estiningtyas, Muhammad Syakir	83-93
Profil Lapse Rate Vertikal di Wilayah Indonesia Lisnawati, Erwin E. S. Makmur, Donaldi S. Permana	95-106

JURNAL METEOROLOGI DAN GEOFISIKA

Volume 18, Nomor 2 - Tahun 2017

ISSN 1411 - 3082

eISSN 2527 - 5372

Kata kunci bersumber dari artikel. Lembar abstrak ini boleh diperbanyak tanpa ijin dan biaya

UDC. 551.5

Jaka Anugrah Ivanda Paski (Puslitbang BMKG, Jakarta)
Indra Gustari (Pusat Informasi Perubahan Iklim BMKG, Jakarta)

Pengaruh Asimilasi Data Radar Cuaca Dalam Prediksi Cuaca Numerik Di Provinsi Lampung (Studi Kasus pada 28 Februari 2015)

J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 2, hal. 55-64.

Prediksi cuaca merupakan suatu hal yang menjadi kebutuhan saat ini, sehingga kebutuhan akan prediksi cuaca yang akurat semakin besar. Kondisi awal (initial condition) sangat menjadi perhatian dalam prediksi cuaca, maka dikembangkan metode asimilasi data hasil pengamatan (observasi) sebagai data tambahan. Selanjutnya, asimilasi berbasis data radar cuaca yang memiliki data yang cukup untuk merepresentasikan keadaan cuaca dalam suatu daerah mulai diperkenalkan. Tulisan ini membahas bagaimana kemampuan model WRF tanpa asimilasi dan model WRF asimilasi menggunakan data radar dalam prediksi kejadian hujan di Lampung. Dalam penelitian ini menggunakan model numerik Weather Research Forecasting (WRF), baik WRF-ARW (The Advance Research-WRF) untuk menjalankan model tanpa asimilasi dan model WRFDA (WRF Data Assimilation) dengan sistem 3D-Var untuk model dengan asimilasi data radar. Analisa dilakukan secara kualitatif dengan melihat nilai prediksi spasial reflektifitas dan distribusi hujan juga secara kuantitatif dengan menguji skill dan keandalan model terhadap data observasi. Hasil menunjukkan perbaikan hasil prediksi nilai spasial reflektivitas radar dan distribusi hujan spasial oleh model asimilasi data radar terhadap data model numerik WRF tanpa asimilasi. Pada uji skill dan keandalan model, model WRF dengan asimilasi data reflektifitas radar memberikan prediksi hujan yang paling baik.

Kata kunci: WRF, Asimilasi data, Radar cuaca, 3D-Var

UDC. 550.3

Arif Rachman Hakim (Puslitbang BMKG, Jakarta)
Supriyanto Rohadi (Puslitbang BMKG, Jakarta)
Jajat Jatnika (³Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG, Jakarta)
Relokasi Hiposenter dan Tomografi Gelombang P Menggunakan Metode Inversi Simultan di Wilayah Papua
J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 2, hal. 65-71.

Papua merupakan bagian dari pulau *New Guinea*, yang memiliki tatanan tektonik sangat komplek, dimana tektonik papua dipengaruhi 4 lempeng utama yaitu Lempeng Australia, Lempeng Pasifik, Lempeng Filipina dan Lempeng Eurasia, serta sesar lokal aktif seperti Sesar Sorong, Sesar Yapen, dan lainnya. Tatanan tektonik yang sangat kompleks ini, menjadikan Papua menarik untuk dikaji lebih lanjut. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan posisi sumber gempa yang akurat sehingga didapatkan gambaran struktur bawah permukaan dengan merelokasi sumber gempa dan tomografi gelombang P menggunakan program simulIPS12, yang secara simultan menghitung kecepatan 3-D gelombang P dengan hasil relokasinya. Data yang digunakan adalah katalog gempa PGR V Jayapura hasil analisa seiscomp3 dari tahun 2010 hingga 2015, dengan 19 stasiun pencatat. Hasil relokasi gempabumi memperlihatkan adanya perubahan sebesar 75%, baik secara kedalaman maupun secara lintang ataupun bujur, dengan nilai RMS mendekati 0. Sedangkan hasil tomogram pada penampang horizontal menunjukkan resolusi yang baik pada kedalaman 30 km dan 50 km, yang di indikasikan sebagai zona dengan kecepatan rendah berasosiasi dengan sesar sorong dan manokwari trench. Pada penampang vertikal didapatkan tomogram yang juga mengindikasikan zona lemah teridentifikasi sesar sorong, patahan ransiki dan manokwari trench.

Kata Kunci : relokasi, tomografi, struktur kecepatan, gelombang P, Papua.

UDC. 551.5

Ina Juaeni (Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN, Bandung)

Penerapan Metode Statistik Untuk Perbandingan Parameter Atmosfer Permukaan Antara Padang dan Selaparang

J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 1, hal. 73-81.

Sudut datang sinar matahari menentukan banyaknya sinar matahari yang sampai dipermukaan sehingga faktor ini menentukan karakter cuaca suatu lokasi. Padang dan Selaparang (Mataram) selalu memiliki sudut datang sinar matahari yang berbeda setiap bulannya. Penelitian ini bertujuan membuktikan adanya perbedaan karakter parameter atmosfer antara dua lokasi tersebut. Pengujian dilakukan dengan dua metode. Pertama dengan metode statistik sederhana yaitu penentuan nilai rata-rata, maksimum dan koefisien variasi dan kedua dengan metode penentuan variansi dalam ANOVA1. Data yang digunakan adalah data tekanan, kelembapan, temperatur, curah hujan dan kecepatan angin dari OGIMET periode Januari sampai dengan Desember 2015. Berdasarkan selisih nilai-nilai maksimum, minimum, rata-rata dan koefisien variasi untuk tekanan, kelembapan, temperatur, kecepatan angin dan curah hujan antara Padang dan Selaparang menunjukkan kedua data berbeda. Hasil perbandingan dengan metode ANOVA1 menunjukkan bahwa curah hujan bulan Maret dan kelembapan serta temperatur bulan April mempunyai karakter yang sama dengan p-value 0,6 sampai 0,9. Selain variabel dan bulan tersebut, karakter parameter di dua lokasi tersebut berbeda dengan p-value 0,0 sampai 0,2.

Kata kunci: sudut datang sinar matahari, parameter atmosfer, ANOVA1

UDC. 551.58

Woro Estiningtyas (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor)

Muhammad Syakir (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta)

Pengaruh Perubahan Iklim Terhadap Produksi Padi di Lahan Tadah Hujan

J. Met & Geo. 2018, Vol. 18 No. 1, hal. 83-93.

Ketergantungan yang sangat tinggi terhadap curah hujan menjadikan lahan sawah tada hujan memiliki periode tanam yang terbatas. Sementara curah hujan itu sendiri sangat dipengaruhi oleh perubahan iklim. Makalah ini menyajikan hasil analisis tentang dampak perubahan iklim terhadap produksi padi di lahan sawah tada hujan dengan model simulasi tanaman DSSAT. Lokasi penelitian yaitu Jakenan dan Ngale. Skenario perubahan iklim yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil analisis menggunakan model *Coordinated Climate-Crop Modeling Program (C3MP) Sensitivity test* Versi 2.0. Uji sensitivitas C3MP dilakukan dengan menyesuaikan kondisi iklim historis untuk mencerminkan perubahan suhu, presipitasi, dan CO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Perubahan suhu 0,5 °C dan konsentrasi CO₂ 537 ppm masih meningkatkan produksi 2,2 hingga 502,5 kg/ha di Jakenan dan 15,9 hingga 507,7 kg/ha di Ngale yang terjadi hampir di setiap Bulan mulai Januari-Desember. Perubahan suhu 1 °C dan konsentrasi CO₂ 403 ppm secara umum masih meningkatkan hasil tetapi hanya terjadi pada bulan-bulan tertentu yaitu sebesar 57,4 hingga 366,2 kg/ha di Jakenan dan 21,9 - 320,4 kg/ha di Ngale.

Kata kunci : Padi, tada hujan, DSSAT, suhu udara, curah hujan dan konsentrasi CO₂

UDC. 551.5

Lisnawati (Pusat Layanan Informasi Iklim Terapan BMKG, Jakarta)

Erwin E. S. Makmur (Puslitbang BMKG, Jakarta)

Donald S. Permana (Puslitbang BMKG, Jakarta)

Profil Lapse Rate Vertikal Di Wilayah Indonesia

J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 2, hal. 95-106.

Profil lapse rate (penurunan suhu terhadap ketinggian) vertikal di wilayah Indonesia sangat penting dalam menganalisa pengaruh lapse rate terhadap proses pembentukan awan dan inversi di lapisan troposfer bawah serta terjadinya kabut di pagi hari. Penelitian ini menggunakan 5 lokasi (Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon) di Indonesia yang dipilih berdasarkan ketersediaan, kelengkapan, dan validitas data observasi udara lapisan atas yang paling optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun dan menganalisa profil bulanan lapse rate vertikal pada jam 00 dan 12 UTC berdasarkan data observasi radiosonde yakni suhu udara vertikal harian pada tahun 2007-2016. Metode yang digunakan adalah proses menghilangkan data pencilan, interpolasi data, dan menghitung nilai statistik, dan lapse rate. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata ketinggian troposfer mencapai 16,8 km dengan lapse rate rata-rata kelima wilayah tersebut pada jam 00 UTC adalah ~0,64°C/100 m dan pada jam 12 UTC adalah ~0,65°C/100 m. Selain itu, ketinggian puncak tropopause pada bulan Desember dan Januari-April lebih tinggi daripada saat bulan Juni-September. Inversi permukaan terjadi pada bulan Maret, Juni, dan Juli di Medan serta pada bulan September-Okttober di Jakarta dengan rata-rata inversi permukaan adalah sekitar -0,07°C/100 m pada jam 00 UTC. Rata-rata tahunan tinggi inversi di stratosfer pada jam 00 dan 12 UTC yakni pada 17,1 km dengan rata-rata bulanan tinggi inversi pada Januari-Mei dan Desember lebih tinggi daripada saat Juni-November sedangkan rata-rata inversi di stratosfer adalah -0,265°C/100 m.

Kata kunci: profil lapse rate vertikal, suhu udara, inversi, radiosonde, tropopause

JURNAL METEOROLOGI DAN GEOFISIKA

Volume 18, Nomor 2 - Tahun 2017

ISSN 1411 - 3082

eISSN 2527 - 5372

The keywords noted here are the words which represent the concept applied in an article. These abstract sheets may be reproduced without permission or charge

UDC. 551.5

Jaka Anugrah Ivanda Paski (Puslitbang BMKG, Jakarta)

Indra Gustari (Pusat Informasi Perubahan Iklim BMKG, Jakarta)

Pengaruh Asimilasi Data Radar Cuaca Dalam Prediksi Cuaca Numerik Di Provinsi Lampung (Studi Kasus pada 28 Februari 2015)

J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 2, pp. 55-64.

Weather forecast has become very important nowadays, so the need for accurate weather prediction is greater. Initial condition has become very concern in weather prediction, hence developed method of assimilation of observation data as additional data. Furthermore, the assimilation of weather-based radar data that has sufficient data to represent weather conditions in an area is introduced. This paper discusses the capability of the WRF model without assimilation and WRF model assimilation using radar data in rainfall event prediction in Lampung. This study used Weather Research Forecasting (WRF) numerical model, both WRF-ARW (The Advance Research-WRF) to run assimilation model and WRFDA (WRF Data Assimilation) model with 3D-Var system for model radar data assimilation. The analysis was done qualitatively by checking at spatial prediction values of reflectivity and rain distribution also quantitatively by testing the skill and model reliability on observation data. The result showed that the prediction value of the radar spatial reflectivity and the distribution of the spatial rainfall by the radar data assimilation model against the numerical WRF model without assimilation has improved. In the skill test and model reliability, the WRF model with assimilation of radar reflectivity data provides the best rain prediction.

Keywords: WRF, Data Assimilation, Radar, 3Dvar

UDC. 550.3

Arif Rachman Hakim (Puslitbang BMKG, Jakarta)

Supriyanto Rohadi (Puslitbang BMKG, Jakarta)

Jajat Jatnika (Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG, Jakarta)

Relocation of Hypocenters and P Wave Tomography From Simultaneous Inversion Method In Papua

J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 2, pp. 65-71.

Papua is the western part of the island of New Guinea with a very complex tectonic structure due to four tectonic plates, i.e. the Australian, Pacific, Philippine and Eurasian Plates; and the local active faults like Sorong, Yapen and others. The very complex tectonic setting makes the Papua region interesting to study further. This study was conducted to determine the pattern of tectonic region of Papua, using a simultaneous method of simulPS12. This research was conducted to obtain accurate earthquake source position so as to obtain the description of subsurface structure by relocating earthquake source and wave tomography P using simulPS12 program, which simultaneously calculate speed 3-D wave P with the result of its relocation. The data used is the PGR V Jayapura earthquake catalog based on the SeisComP3 analysis results from 2010 to 2015, with 19 recording stations. The result of the relocation of earthquakes showed a change of 75%, both in depth and in latitude or longitude, and the RMS value is close to zero. While the resulting tomogram on the horizontal cross section shows a good resolution at a depth range of 30 km to 50 km, which is indicated as the zone with low wave speed, associated with the Sorong fault and Manokwari trench.

Keywords : Relocation, tomography, velocity structure, Papua.

UDC. 551.5

Ina Juaeni (Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN, Bandung)

Application Statistical Methods For Comparison of Atmosphere Surface Parameters Between Padang and Selaparang

J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 1, hal. 73-81.

Insolation angles determines the amount of incoming solar radiation (Insolasi) at the surface then to determine characteristic of the weather. Padang and Selaparang (Mataram) always has different the angle every month. This study aims to prove the difference in atmospheric parameters characteristic for those locations. Assesment to be done by using two methods, First, using average, maximum/minimum and coefficient of varians value as a simple statistic, second using variance on ANOVA1. OGIMET data of pressure, relative humidity, temperature, rainfall and wind speed from January to December 2015 is used. Based on bias of maximum value, minimum value, average values and coefficient of variation, Padang and Selaparang have different value of pressure, humidity, temperature, wind speed and rainfall. The results of comparison using ANOVA1 indicate that rainfall on March and humidity and temperature on April have similar character in p-value from 0.6 to 0.9. In addition to these variables, character is differ in p-value from 0.0 to 0.2.

Keywords: incoming solar radiation angle, atmosphere parameter, character, ANOVA1

UDC. 551.58

Woro Estiningtyas (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor)

Muhammad Syakir (Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta)

Impact of Climate Change On Rice Production in Rainfed Area

J. Met & Geo. 2018, Vol. 18 No. 1, pp. 83-93.

Very high dependence on rainfall makes rain-fed land has limited the planting period for rice cultivation. While the rainfall itself strongly influenced by climate change. This paper presents the results of analysis of the relationship of climate change expressed by changes in temperature, precipitation and CO₂ concentrations on rice production in rain-fed land with crop simulation models DSSAT. Location of this research are Jakenan and Ngale. Parameters are indicators of climate change is the air temperature and CO₂ concentrations with two scenarios. Climate change scenarios used in this study is the result of analysis using a model - Crop Coordinated Climate Modeling Program (C3MP) Sensitivity test Version 2.0. C3MP sensitivity test is done by adjusting the historical climate conditions to reflect changes in temperature, precipitation, and CO₂. The results showed that the temperature change of 0.5 oC and 537 ppm CO₂ concentration still increased the production of 2.2 to 502.5 kg/ha in Jakenan and 15.9 to 507.7 kg/ha in Ngale which occurred almost every month starting January-December. Changes in temperature of 1 oC and concentration of CO₂ 403 ppm in general still increase yield but only occur in certain months that is equal to 57.4 to 366.2 kg/ha in Jakenan and 21.9 - 320.4 kg/ha in Ngale.

Keywords : Rice, rainfed, DSSAT, temperature, rainfall and CO₂ concentration

UDC. 551.5

Lisnawati (Pusat Layanan Informasi Iklim Terapan BMKG, Jakarta)

Erwin E. S. Makmur (Puslitbang BMKG, Jakarta)

Donaldi S. Permana (Puslitbang BMKG, Jakarta)

Profil Lapse Rate Vertikal Di Wilayah Indonesia

J. Met & Geo. 2017, Vol. 18 No. 2, pp. 95-106.

The vertical lapse rate profiles in Indonesia is very crucial in analyzing the lapse rate effect on cloud formation and inversion at the lower troposphere and the morning fog occurrence. This study uses 5 selected locations (Medan, Padang, Jakarta, Palu and Ambon) in Indonesia based on the availability, completeness, and validity of the observed upper-air data. The research aim to create and analyze the monthly vertical lapse rate profiles at 00 and 12 UTC based on daily vertical air temperature in 2007-2016. The methods include removing outlier, data interpolation and calculating statistics, and lapse rate. The results show that the mean troposphere altitude reaches 16.8 km with the mean lapse rate at 00 and 12 UTC are ~0.64°C/100 m and ~0.65°C/100 m, respectively. The tropopause peak altitude in December and January-April is higher than during June-September. Surface inversion occurred on March, June, and July in Medan and during September-October in Jakarta with the mean surface inversion is -0.07°C/100 m at 00 UTC. Annual mean inversion altitude in the stratosphere at both times is 17.1 km with monthly mean of inversion altitude during January-May and December is higher than during June-November, while the mean inversion in the stratosphere is -0.265°C/100 m.

Keywords: vertical lapse rate profile, air temperature, inversion, radiosonde, tropopause

PENGARUH ASIMILASI DATA RADAR CUACA DALAM PREDIKSI CUACA NUMERIK DI PROVINSI LAMPUNG (STUDI KASUS PADA 28 FEBRUARI 2015)

*IMPACT OF RADAR DATA ASSIMILATION IN NUMERICAL WEATHERFORECASTS IN LAMPUNG
(CASE STUDY AT 28th FEBRUARY 2015)*

Jaka Anugrah Ivanda Paski^{1*}, Indra Gustari²

¹Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, Jl. Angkasa 1 no. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat 10720 Indonesia

²Pusat Informasi Perubahan Iklim BMKG, Jl. Angkasa 1 no. 2 Kemayoran, Jakarta Pusat 10720 Indonesia

*E-mail: jaka.paski@yahoo.com

Naskah masuk: 6 Oktober 2016; Naskah diperbaiki: 16 November 2017; Naskah diterima: 22 Desember 2017

ABSTRAK

Prediksi cuaca merupakan suatu hal yang menjadi kebutuhan saat ini, sehingga kebutuhan akan prediksi cuaca yang akurat semakin besar. Kondisi awal (*initial condition*) sangat menjadi perhatian dalam prediksi cuaca, maka dikembangkan metode asimilasi data hasil pengamatan (observasi) sebagai data tambahan. Selanjutnya, asimilasi berbasis data radar cuaca yang memiliki data yang cukup untuk merepresentasikan keadaan cuaca dalam suatu daerah mulai diperkenalkan. Tulisan ini membahas bagaimana kemampuan model WRF tanpa asimilasi dan model WRF asimilasi menggunakan data radar dalam prediksi kejadian hujan di Lampung. Dalam penelitian ini menggunakan model numerik *Weather Research Forecasting* (WRF), baik WRF-ARW (*The Advance Research-WRF*) untuk menjalankan model tanpa asimilasi dan model WRFDA (*WRF Data Assimilation*) dengan sistem 3D-Var untuk model dengan asimilasi data radar. Analisa dilakukan secara kualitatif dengan melihat nilai prediksi spasial reflektifitas dan distribusi hujan juga secara kuantitatif dengan menguji *skill* dan keandalan model terhadap data observasi. Hasil menunjukkan perbaikan hasil prediksi nilai spasial reflektivitas radar dan distribusi hujan spasial oleh model asimilasi data radar terhadap data model numerik WRF tanpa asimilasi. Pada uji *skill* dan keandalan model, model WRF dengan asimilasi data reflektifitas radar memberikan prediksi hujan yang paling baik.

Kata kunci: WRF, Asimilasi data, Radar cuaca, 3D-Var

ABSTRACT

*Weather forecast has become very important nowadays, so the need for accurate weather prediction is greater. Initial condition has become very concern in weather prediction, hence developed method of assimilation of observation data as additional data. Furthermore, the assimilation of weather-based radar data that has sufficient data to represent weather conditions in an area is introduced. This paper discusses the capability of the WRF model without assimilation and WRF model assimilation using radar data in rainfall event prediction in Lampung. This study used Weather Research Forecasting (WRF) numerical model, both WRF-ARW (*The Advance Research-WRF*) to run assimilation model and WRFDA (*WRF Data Assimilation*) model with 3D-Var system for model radar data assimilation. The analysis was done qualitatively by checking at spatial prediction values of reflectivity and rain distribution also quantitatively by testing the skill and model reliability on observation data. The result showed that the prediction value of the radar spatial reflectivity and the distribution of the spatial rainfall by the radar data assimilation model against the numerical WRF model without assimilation has improved. In the skill test and model reliability, the WRF model with assimilation of radar reflectivity data provides the best rain prediction.*

Keywords: WRF, Data Assimilation, Radar, 3Dvar

1. Pendahuluan

Prediksi cuaca merupakan suatu hal yang menjadi kebutuhan saat ini. Semakin berkembang zaman, kebutuhan akan prediksi cuaca yang akurat semakin besar. Teknik prediksi cuaca yang sangat berkembang adalah prediksi cuaca numerik. Salah satu informasi cuaca yang sangat dibutuhkan adalah mengenai prediksi hujan. Fenomena hujan di dalam model numerik cuaca seringkali disebut parameter diagnostik, yakni parameter yang tidak terdapat dalam persamaan-persamaan numerik dari model tersebut secara eksplisit [1].

Prediksi cuaca numerik atau *Numerical Weather Prediction* (NWP) merupakan teknik prediksi cuaca yang dilakukan dengan menyelesaikan persamaan-persamaan numerik dari persamaan primitif pengendali atmosfer yang memuat bentuk-bentuk persamaan diferensial terhadap waktu dan ruang [2]. Dalam pengertian sederhana, prediksi cuaca numerik merupakan prakiraan unsur meteorologi menggunakan solusi perhitungan numerik dari persamaan pengatur gerak atmosfer.

Model *Weather Research and Forecasting* (WRF) adalah salah satu model prediksi cuaca numerik skala meso yang digunakan secara luas dalam prediksi cuaca diseluruh dunia. Model WRF sangat baik untuk diaplikasikan dari skala spasial meter sampai dengan ribuan meter [3]. Kemudian dalam perkembangannya diperkenalkan *Advanced Research WRF* (WRF-ARW) yang merupakan model generasi lanjutan sistem prediksi cuaca numerik skala meso yang didesain untuk melayani prediksi untuk kebutuhan operasional dan penelitian atmosfer [4].

Secara umum, hal yang penting dalam prediksi cuaca numerik adalah permasalahan keadaan awal (*initial condition*) dan syarat batas (*boundary condition*). Dengan memberikan estimasi kondisi atmosfer pada keadaan awal serta syarat batas permukaan dan lateral, maka model akan mensimulasikan (memprediksi) evolusi atmosfer. Sehingga, semakin tinggi akurasi estimasi keadaan awal atmosfer maka semakin baik kualitas prediksi yang dihasilkan [5].

Oleh karena itu, keadaan awal atmosfer sangat menjadi perhatian dalam prediksi cuaca numerik saat ini, banyak dari pusat-pusat prediksi cuaca numerik di dunia mengkombinasikan data pengamatan (observasi) sebagai keadaan awal. Pendekatan ini disebut asimilasi data (*Data Assimilation*, DA). Selama beberapa tahun terakhir, model skala meso resolusi tinggi diinisialisasi dengan menggunakan teknik variasi 3 dimensi asimilasi data (3D-Var) memberi perbaikan dalam beberapa parameter meteorologi [6,7,8,9].

Dalam perkembangannya, asimilasi data hanya menggunakan data observasi dari beberapa titik pengamatan. Namun data observasi yang didapatkan sangat kurang untuk merepresentasikan suatu daerah karena jarak antar titik pengamatan sangat renggang. Oleh sebab itu dikembangkan asimilasi data berbasis data radar cuaca yang cukup untuk merepresentasikan keadaan cuaca dalam suatu daerah dengan resolusi spasial yang tinggi. Seperti yang telah dilakukan oleh Juanzhen Sun (2010) menggunakan model WRFDA (*WRF Data Assimilation*) dalam asimilasi data radar cuaca [10]. Dari data radar yang dihasilkan digunakan data *reflectivity* dan *radial velocity*.

Model WRFDA adalah sistem data asimilasi variasional yang dirancang dan dibangun untuk model WRF termasuk kedua komponen 3DVar dan 4DVar. Sistem ini merupakan pengembangan dari generasi kelima Mesoscale Model (MM5) 3DVar - Universitas Nasional Pennsylvania Pusat Riset Atmosfer Negara (PSU-NCAR) [11]. Barker et al (2003) memberikan rincian lebih lanjut terhadap 3DVar dan aspek-aspek teknisnya [6]. Skamarock et al. (2008) menggambarkan perbaikan terbaru dari kedua model yaitu WRF dan WRFDA atau yang dikenal juga dengan WRF-Var [3]. Sebagai dasar dari sistem variational sekarang yang sepenuhnya konsisten dengan model WRF, serta memungkinkan di masa depan penerapan 4DVar.

Penelitian ini membahas masalah terkait asimilasi data radar dalam prediksi cuaca numerik, yakni bagaimana kemampuan model WRF tanpa asimilasi dan dengan asimilasi menggunakan data radar cuaca dalam prediksi kejadian hujan di Lampung pada tanggal 28 Februari 2015. Prediksi numerik menggunakan model WRF dan data radar cuaca yang digunakan untuk asimilasi adalah radar Doppler tipe *C-Band EEC* (*Enterprise Electronics Corporation*) BMKG Lampung.

Penelitian ini menggunakan data *Global Forecast System* (GFS) sebagai model global dalam WRF-ARW dan WRFDA yang bertujuan untuk membandingkan tingkat akurasi hasil luaran model WRF sebelum dan setelah asimilasi data terhadap data observasi pengamatan di beberapa pos hujan BMKG di provinsi Lampung sehingga dapat diketahui *skill* dan keandalan model WRF. Dalam konteks ini, sasaran utama dari asimilasi data radar Doppler *C-band* yang dikombinasikan dengan skema parameterisasi konveksi dan inisialisasi yang lebih sesuai adalah perbaikan prediksi secara menyeluruh. Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam prediksi cuaca di wilayah Lampung dan penelitian di wilayah lain agar mendapatkan hasil prediksi cuaca yang lebih baik lagi.

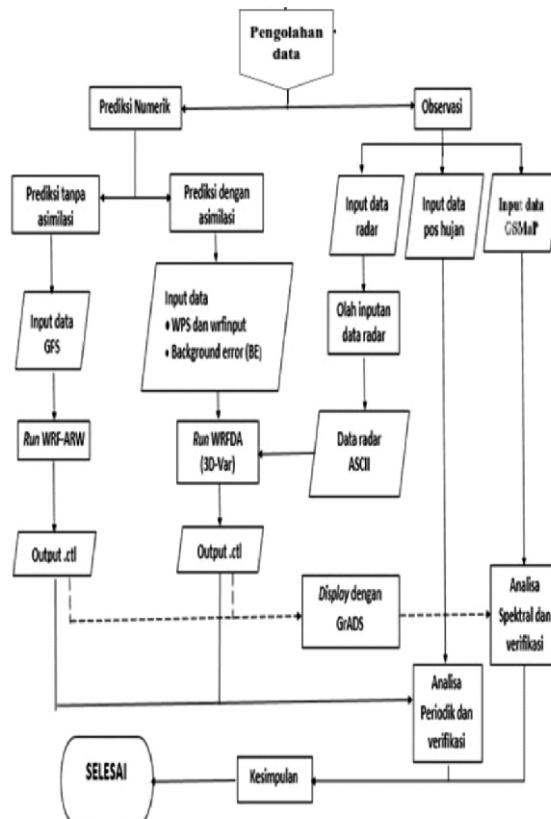
2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan inisial data GFS dengan resolusi $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ tanggal 28 Februari 2015 00.00 UTC yang diakses dari <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>. Data observasi yang digunakan sebagai asimilasi merupakan data C-Band Doppler Radar (CDR) BMKG Lampung tanggal 28 Februari 2015 pukul 00.00 UTC. Selain itu, diperlukan data *Background Error* (BE) yang didapat dari modul WRFDA untuk mendapatkan data inisial tambahan yang diperlukan. BE adalah data inisiasi sebagai data koreksi model terhadap prediksinya. Data ini dimasukan sebagai data inisiasi seperti halnya data GFS untuk data model dan data radar untuk inisiasi data observasi. Nilai B atau BE dihitung dengan menggunakan metode NMC yaitu rata-rata perbedaan hasil statistik dari prakiraan 24 jam ($xT+24$) dikurangi prakiraan 12 jam ($xT+12$) yang valid pada waktu yang sama selama satu bulan [6].

Untuk memverifikasi dan memvalidasi data hasil keluaran model digunakan data observasi curah hujan tanggal 28 Februari 2015 dari 6 titik pengamatan hujan BMKG antara lain; AWS Cahaya Negeri, AWS Selagi Lingga, AWS Way Tenong, data Penakar Hujan Hilman Stamet Raden Inten II, data Penakar Hujan Hilman Stasiun Maritim Panjang dan AWS Bakauheni, serta data estimasi curah hujan satelit GSMAp berupa *rain rate* tiap jam pada tanggal 28 Februari 2015 yang didownload dari <ftp://hokusai.eorc.jaxa.jp/>. Pembuatan analisa hasil luaran model dilakukan dengan menggunakan aplikasi GrADS (Grid Analysis and Display System), curah hujan ditampilkan secara spasial dan dibandingkan dengan hasil luaran model WRF tanpa asimilasi dan WRF dengan asimilasi data radar. Langkah-langkah yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini diberikan dalam diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 1. Lokasi Pengamatan hujan BMKG



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Konfigurasi Model WRF. Dalam penelitian ini model WRF dijalankan secara bersarang (*nesting*) pada 3 domain agar resolusi model prediksi semakin baik dengan domain terkecil beresolusi 3 km yang mencakup wilayah Lampung dan sebagian wilayah Provinsi Banten sebagai lokasi penelitian (lihat gambar 3). Parameterisasi model WRF menggunakan konfigurasi yang telah diteliti untuk wilayah Sumatra bagian selatan termasuk wilayah Bengkulu dan Lampung [1] yang ditampilkan pada tabel 1.



Gambar 3. Domain penelitian model WRF

Tabel 1. Konfigurasi parameterisasi model WRF

Konfigurasi	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Resolusi Grid Horizontal	27 Km	9 Km	3 Km
Skema Mikrofisik	Purdue-Lin	Purdue-Lin	Purdue-Lin
Skema PBL	YSU	YSU	YSU
Skema Parameterisasi Kumulus	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch	Kain-Fritsch
Resolusi Temporal	180 detik	180 detik	180 detik
Level Vertikal	30 Lapisan	30 Lapisan	30 Lapisan

Data radar cuaca Doppler EEC memiliki radius mencapai 250 km dengan resolusi spasial 250 m. Resolusi terkecil pada domain model WRF yaitu 3 km yang artinya dalam satu grid domain WRF dapat mencakup ratusan grid data radar. Dari penelitian sebelumnya bahwa teknik sampling dengan nilai dBZ (reflektifitas) terbesar (*biggest*) merupakan teknik sampling yang menghasilkan akurasi yang paling baik, jadi penelitian ini hanya menggunakan teknik dengan nilai dBZ terbesar dalam pengolahan data radar [12].

Model asimilasi data radar cuaca menggunakan WRFDA. Dalam menjalankan model WRF dengan asimilasi data radar pada WRFDA untuk 3D-Var diperlukan beberapa data asimilasi yang dapat dilihat pada tabel 2. proses yang dipersiapkan sedikit berbeda dengan menjalankan model tanpa asimilasi, terutama pada bagian *namelist* dan *post processing*. Data yang dihasilkan juga memiliki format yang sama yaitu .ctl dan .dat. Skema yang dijalankan sesuai dengan konfigurasi *namelist.input* pada WRF. Teknik 3D-Var merupakan Teknik yang biasa digunakan dalam asimilasi data, Teknik ini hanya menggunakan satu data tambahan *initial condition* observasi pada model. Skema asimilasi data yang dijalankan dalam penelitian ini adalah seperti berikut:

- Model A: model WRF tanpa asimilasi data radar.
- Model B: model WRF menggunakan asimilasi data radar *reflectivity* (Z) dan *radial velocity* (V).
- Model C: model WRF menggunakan asimilasi data radar hanya data *reflectivity* (Z).
- Model D: model WRF menggunakan asimilasi data radar hanya data *radial velocity* (V).

Untuk melakukan analisis terhadap tabel kontingensi pada Tabel 3 dapat menggunakan nilai-nilai seperti *Percent Correct* (PC), *Treat Score* (TS), *Probability of Detection* (POD) dan *False Alarm Ratio* (FAR) dari table tersebut.

Tabel 2. Data inisiasi model WRFDA untuk 3D-Var

Input Data	Format	Produk
Prediksi Awal	NetCDF	WPS dan real.exe
Observasi Radar	ASCII (PREPBUFR juga dimungkinkan)	(OBSPROC)
BE Statistik	Binary (txt)	WRFDA gen_be

Tabel 3. Tabel kontingensi

Observation		
	Yes	No
Forecast	Yes	<i>Hits</i> <i>False Alarms</i>
	No	<i>Misses</i> <i>Correct Negatives</i>

PC dapat menjawab secara keseluruhan berapa besar *forecast* yang bernilai benar. TS digunakan untuk melihat kemampuan model dalam memprediksi kejadian hujan. POD digunakan untuk mengukur banyaknya kejadian hujan yang dapat diprakirakan dengan benar. FAR digunakan untuk mengukur banyaknya hasil *forecast* yang tidak benar-benar terjadi. Nilai PC, TS dan POD sempurna bila bernilai 1. Sedangkan nilai FAR sempurna bila bernilai 0.

$$PC = \frac{Hits + Correct Negatives}{Total} \quad (1)$$

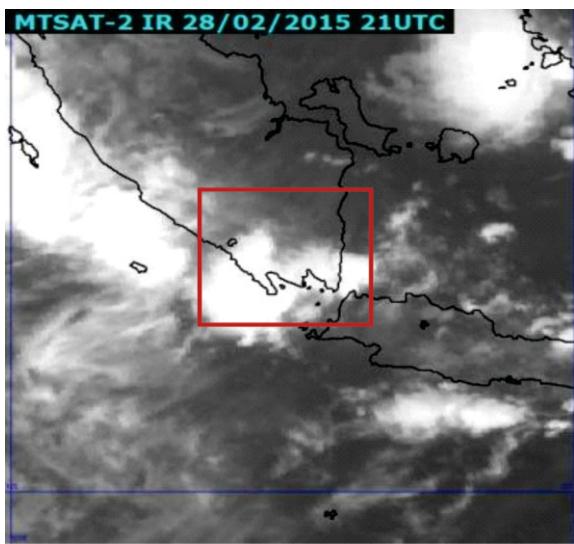
$$POD = \frac{Hits}{Hits + Misses} \quad (2)$$

$$FAR = \frac{False Alarms}{Hits + False Alarms} \quad (3)$$

$$TS = \frac{Hits}{Hits + False Alarms + Misses} \quad (4)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Kasus kejadian hujan 28 Februari 2015 di Lampung terjadi secara tidak merata, yakni terjadi kondisi hujan sangat lebat, lebat, sedang dan ringan di berbagai tempat di Lampung pada waktu yang sama (Lihat gambar 4). Berdasarkan skala BMKG untuk curah hujan per jam dengan kategori curah hujan ringan > 0.1 mm/jam (batasan hujan dikotomi), curah hujan sedang > 5 mm/jam dan curah hujan lebat > 10 mm/jam, kejadian hujan umumnya terjadi diatas pukul 12.00 UTC dengan intensitas tertinggi terjadi di Bakauheni. Hujan yang terjadi di Lampung tidak berlangsung secara terus-menerus di beberapa daerah seperti Bakauheni dan Way Tenong.



Gambar 4. Citra Satelit MTSAT-2

Tercatat total curah hujan tertinggi adalah 66.6 mm/hari yang dalam kategori BMKG tergolong kedalam hujan lebat (hujan lebat BMKG adalah 50.0 - 100.0 mm/hari). Hal ini bisa disebabkan karena sebaran awan yang tidak merata seperti yang ditunjukkan oleh citra satelit. Selain sebaran awan yang tidak merata, awan yang bergerak juga mengakibatkan curah hujan yang terukur berbeda di setiap tempat pengamatan. Konsentrasi hujan cenderung berada di selatan Lampung.

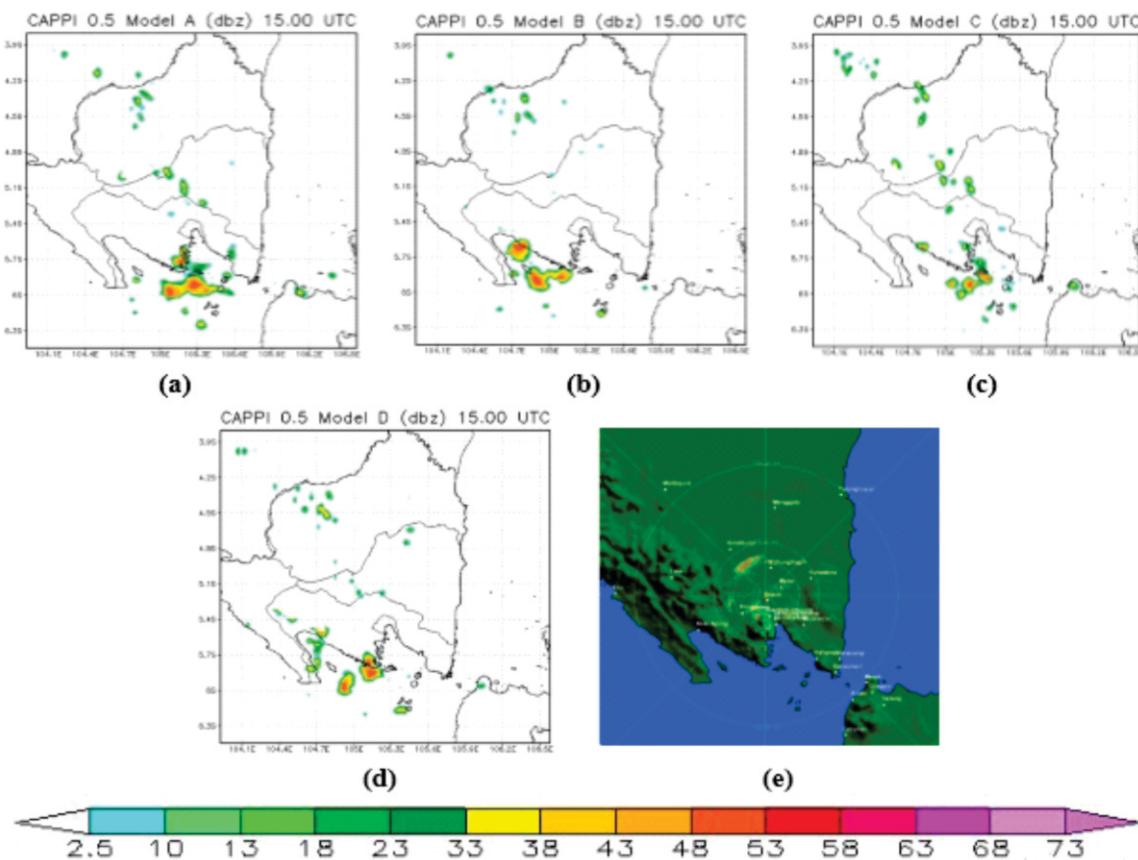
Multi Transpose Satellite (MTSAT) merupakan satelit cuaca yang tersedia dalam berbagai kanal pengolahan. Dua kanal utama adalah visible dan infrared. Dalam pembahasan digunakan kanal IR-1 yang berfungsi untuk melihat cakupan awan. Warna putih cerah menggambarkan bahwa adanya tutupan awan, semakin cerah warna putih menunjukkan semakin rendah suhu puncak awan. Semakin rendah suhu puncak awan menggambarkan adanya kumpulan awan konvektif yang tinggi menjulang. Citra satelit digunakan sebagai validasi kejadian hujan lebat yang terjadi di Lampung. Pada pukul 21.00 UTC tampak pertumbuhan awan yang signifikan yang menutupi sebagian daerah di Lampung bagian barat hingga selatan. Wilayah tutupan awan dapat dilihat pada gambar 4 yang berada pada kotak merah.

Perbandingan luaran model spasial dengan reflektivitas citra radar Lampung. Reflektivitas sebaran awan dapat dijadikan acuan dalam distribusi hujan secara spasial dengan melihat sebaran awan berdasarkan observasi radar *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI). CAPPI yang digunakan dalam pembahasan ini adalah CAPPI 0.5 yang artinya potongan horizontal pada ketinggian 0.5 km. Pemilihan ketinggian ini didasarkan pada ketinggian dasar awan rendah ataupun awan cumulus yang menjulang.

Dari hasil tampilan Gambar 5 model WRF tanpa asimilasi (a) menggambarkan adanya cakupan awan di selatan radar yang dominan dan lokasinya hampir serupa seperti yang digambarkan oleh citra radar observasi (e) namun intensitas dan luasannya cenderung lebih besar dibanding citra radar observasi Lampung. Selain itu, adanya pola cakupan awan di utara pusat radar namun cenderung lebih kecil intensitasnya. Model WRF dengan asimilasi (b) yang menggunakan data *reflectivity* dan *radial velocity* juga menggambarkan cakupan awan dominan di selatan namun cenderung lebih ke barat daya dari radar dengan intensitas dBZ yang lebih besar. Tidak terlihat adanya pola cakupan awan di utara pusat radar seperti digambarkan citra radar observasi Lampung.

Model WRF dengan asimilasi (c) menggunakan data *reflectivity* saja juga menggambarkan cakupan awan dominan di selatan namun cenderung lebih ke barat daya dari radar dengan intensitas dBZ dan luasannya yang hampir serupa dengan data citra radar observasi. Terlihat juga adanya pola cakupan awan di utara pusat radar namun cenderung lebih kecil intensitasnya. Model WRF dengan asimilasi (d) menggunakan data *radial velocity* saja, menggambarkan cakupan awan dominan di selatan namun cenderung lebih ke barat daya dari radar dengan intensitas dBZ yang lebih besar. Selain itu, tidak terlihat adanya pola cakupan awan di utara pusat radar seperti digambarkan citra radar observasi Lampung.

Model WRF dengan asimilasi (e) yang menggunakan data *reflectivity* (z), lebih terlihat mendekati hasil citra radar pukul 15.00 UTC jika dibandingkan dengan model lainnya untuk pola cakupan awannya namun tetap masih ada *overestimate* (prakiraan diatas nilai observasi) di wilayah selatan pusat radar dan *underestimate* (prakiraan dibawah nilai observasi) di wilayah pusat radar untuk intensitasnya. Hal ini dikarenakan nilai masukan reflektifitas dari data radar diolah oleh WRFDA yang kemudian digunakan untuk menggantikan nilai *rain-water mixing ratio* (qr) tebakan pertama pada model dan menghasilkan perbaikan pada hasil luaran prediksi. Hasil juga menunjukkan bahwa kecepatan radial radar yang diolah untuk menggantikan nilai komponen u dan v pada model tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap perbaikan hasil prediksi. Sedangkan untuk asimilasi yang menggunakan reflektifitas dan kecepatan radial memberi perbaikan namun tidak terlalu signifikan. Untuk analisis lebih lanjut dapat dilihat pada hasil analisis penampang vertikal dan estimasi curah hujan.



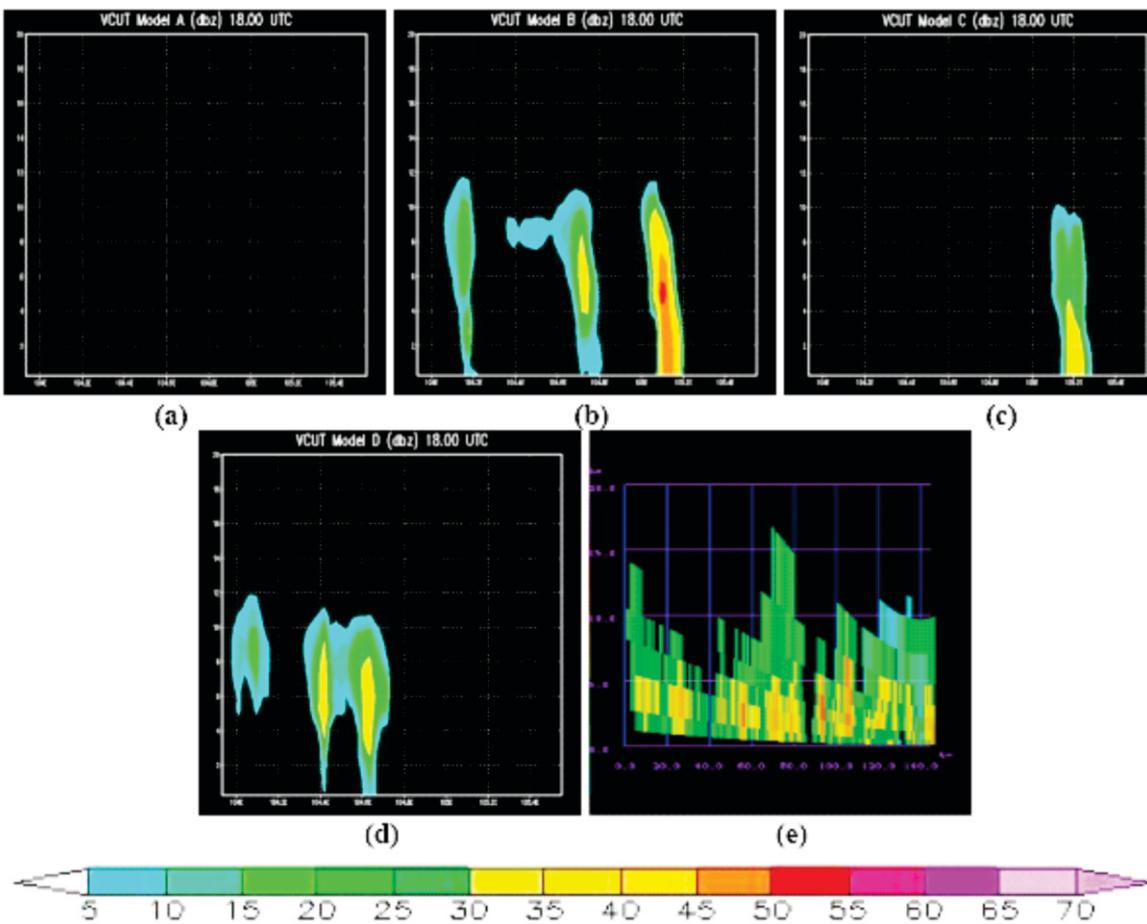
Gambar 5. Hasil prakiraan model WRFDA (prakiraan 15 jam ke depan) pada ketinggian 0.5 km pukul 15.00 UTC untuk Model A (a), Model B (b), Model C (c), Model D (d) dan observasi reflektivitas CAPPI 0.5 pukul 15.00 UTC dari radar cuaca Lampung (e) dengan intensitas dalam (dBZ)

Perbandingan hasil model vertikal reflektivitas terhadap citra radar Lampung. Ketinggian awan atau objek yang dapat di gambarkan oleh citra radar juga dapat digambarkan oleh model WRF. Profil vertikal ketinggian awan pada citra radar dihasilkan dengan produk *Vertical Cut* (VCUT) dari data *Column Maximum* (CMAX). Intensitas radar dBZ ditampilkan dengan skala yang sama antara model yang dijalankan dengan hasil citra radar Lampung. Potongan vertikal dilakukan pada lintang yang tetap yaitu 5.576° LS dan pada bujur 103.934° BT - 105.553° BT. Pemilihan lokasi pemotongan ini dikarenakan terdapat nilai reflektifitas yang tinggi. Penampang vertikal diambil pada pukul 18.00 UTC dari citra CMAX dengan sumbu X merupakan ketinggian dan sumbu Y merupakan bujur.

Analisis penampang vertikal ini dilakukan untuk melihat sejauh mana model asimilasi dapat menggambarkan ketigian dan nilai reflektifitas cakupan awan yang sama seperti yang ditangkap oleh radar. Dari hasil tampilan Gambar 6, penampang vertikal awan citra radar, terlihat ketinggian awan mencapai 15 km dari permukaan tanah dengan nilai intensitas tertinggi berkisar > 50.0 dbz. Terlihat ada 3 kumpulan awan dan puncaknya pada citra radar.

Jika membandingkan hasil keluaran model yang dijalankan, model WRF tanpa asimilasi (a) tidak menggambarkan adanya cakupan awan pada penampang vertikal tersebut. Sedangkan ketiga hasil luaran model lainnya dapat menggambarkan penampang vertikal pada lintang dan bujur yang sudah ditentukan dari citra radar CMAX. Model WRF dengan asimilasi (b) yang menggunakan data *reflectivity* dan *radial velocity* menggambarkan 3 cakupan awan dengan puncaknya mencapai ketinggian 12 km. Intensitas terbesar dari citra model b berkisar 45.0-50.0 dBZ.

Dari hasil terlihat adanya pola cakupan awan yang hampir sama seperti digambarkan citra radar cuaca Lampung. Model WRF dengan asimilasi (c) data *reflectivity* juga menggambarkan cakupan awan, namun cakupan awan yang terlihat hanya satu dan intensitasnya rendah. Kemudian pada model WRF dengan asimilasi (d) data *radial velocity* menggambarkan adanya 2 cakupan awan dominan namun cenderung lebih ke barat dari hasil yang ditunjukkan oleh citra radar dengan intensitas dBZ yang lebih kecil.



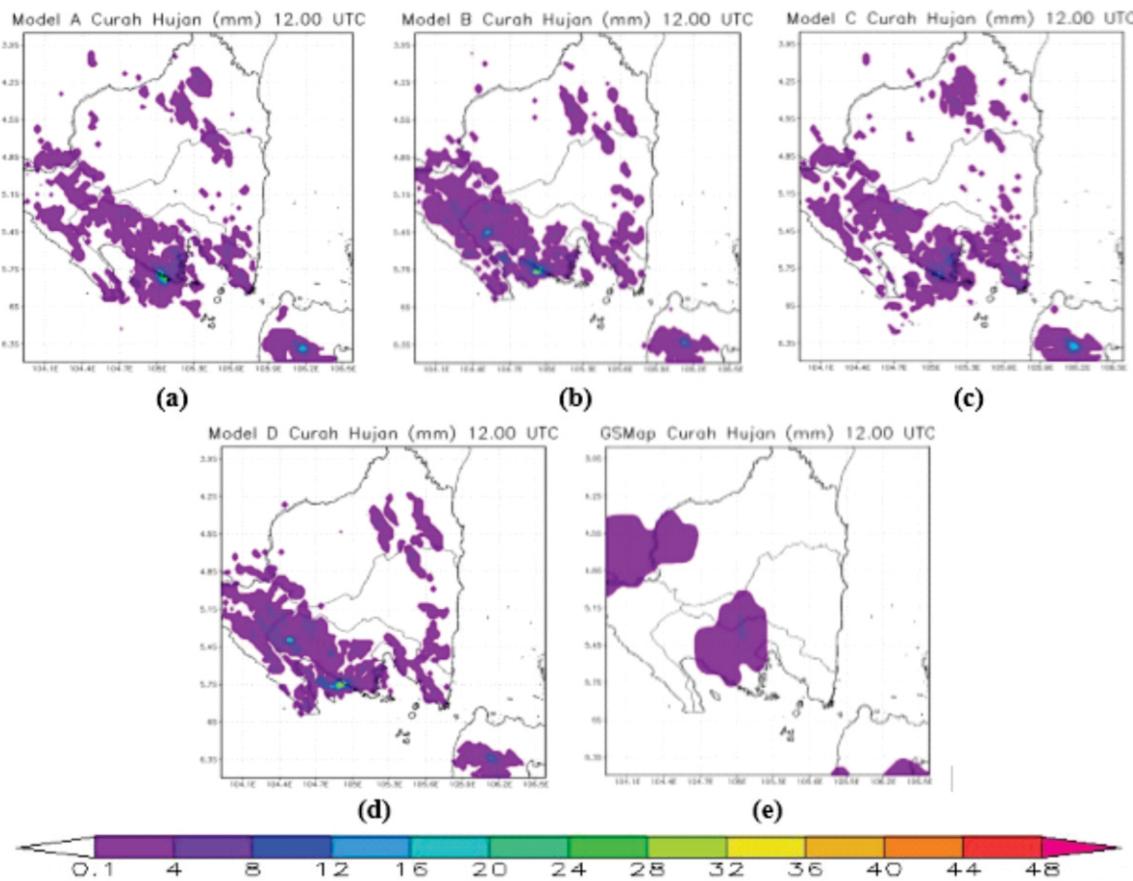
Gambar 6. Analisa ketinggian awan dari produk reflektivitas VCUT pukul 18.00 UTC untuk Model A (a), Model B (b), Model C (c), Model D (d) dan observasi citra radar EEC Lampung (e) dengan intensitas dalam (dBz)

Dari semua model WRF yang dijalankan untuk menghasilkan citra radar penampang vertikal dBZ pukul 18.00 UTC dari citra radar CMAX, model asimilasi b yang menggunakan data *reflectivity* dan *radial velocity* lebih mendekati hasil dari citra radar untuk pola cakupan awannya namun untuk ketinggiannya masih dibawah dari hasil observasi. Ketiga luaran model dengan asimilasi dapat menangkap nilai reflektivitas sedangkan luaran model tanpa asimilasi tidak dapat menggambarkan nilai reflektifitas.

Perbandingan hasil model prediksi distribusi spasial hujan terhadap curah hujan GSMAp. Curah hujan yang ditampilkan oleh GSMAp dapat digunakan sebagai verifikator hasil luaran model WRF dalam menganalisa distribusi hujan secara spasial. Analisa dilakukan terhadap curah hujan perjam di wilayah Lampung pada 28 Februari 2015. Hasil distribusi hujan GSMAp pada pukul 12.00 UTC pada Gambar 7 terlihat adanya 3 konsentrasi distribusi hujan di daerah Lampung yaitu bagian barat daya, bagian selatan dan di daerah Jawa. Jika dibandingkan dengan hasil keluaran dari ke-4 model yang dijalankan, distribusi hujan pada tiap-tiap model masih sedikit berbeda lokasi dengan observasi dan cenderung *overestimate*.

Namun bila dilihat lebih seksama, hasil luaran model tanpa asimilasi (a) dan model asimilasi (b, c, dan d) menggambarkan adanya pola distribusi hujan yang mendekati observasi baik model tanpa asimilasi maupun model asimilasi, ini terlihat dari intensitas hujan yang tinggi digambarkan pada selatan Lampung dimana hasil observasi GSMAp menggambarkan hal yang sama.

Model tanpa asimilasi (a) menggambarkan adanya distribusi hujan di selatan Lampung yang dominan dan lokasinya hampir serupa seperti yang digambarkan oleh hasil observasi pada GSMAp namun dengan intensitas dan luasan yang cenderung lebih besar. Untuk pola distribusi hujan bagian barat Lampung sedikit berbeda dengan luasan yang lebih kecil. Model WRF dengan asimilasi (b) yang menggunakan data *reflectivity*, *radial velocity* dan model WRF dengan asimilasi (d) data *radial velocity* juga menggambarkan adanya distribusi hujan di selatan Lampung yang dominan dan dengan lokasinya yang bergeser sedikit ke barat dari yang digambarkan oleh hasil observasi pada GSMAp. Pola hujan lebih terpusat ke bagian barat Lampung, namun tetap menggambarkan pola yang hampir serupa.



Gambar 7. Analisa curah hujan spasial wilayah Lampung pukul 12.00 UTC untuk Model A (a), Model B (b), Model C (c), Model D (d) dan observasi citra satelit GSMap(e) intensitas dalam (mm)

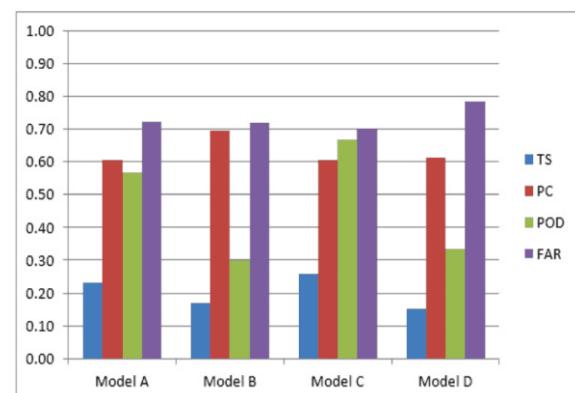
Model WRF dengan asimilasi (c) data *reflectivity* juga menggambarkan adanya distribusi hujan di selatan Lampung yang dominan dan lokasinya hampir serupa seperti yang digambarkan oleh hasil observasi pada GSMap dengan intensitas dan luasan yang cenderung lebih mendekati hasil model lainnya. Untuk pola distribusi hujan bagian barat Lampung sedikit berbeda dengan luasan yang lebih kecil. Dari semua model yang dijalankan untuk menghasilkan distribusi spasial hujan pukul 12.00 UTC, model WRF dengan asimilasi (c) yang menggunakan data *reflectivity* lebih mendekati hasil luaran dari observasi GSMap. Pola distribusi terlihat serupa namun tetap *overestimate* untuk intensitas dan luasannya.

Verifikasi terhadap titik observasi permukaan dilakukan dengan tabel kontingensi untuk mendapatkan nilai-nilai yang dibutuhkan dalam uji kendalan dan *skill* dari hasil prediksi luaran model seperti PC, TS, POD dan FAR. Titik-titik observasi yang digunakan merupakan titik pos pengamatan hujan yang tersebar di wilayah Lampung. Hasil analisis dibagi dalam tiga kategori hujan BMKG.

Analisa prediksi hujan ringan kategori BMKG. Dari hasil pengolahan tabel kontingensi dengan batasan curah hujan ringan > 0.1 mm/jam (batasan hujan dikotomi) kategori BMKG diperoleh nilai-nilai

TS, PC, POD dan FAR seperti terlihat pada Gambar 8.

Nilai TS semakin besar menunjukkan skil dari model semakin baik, nilai TS terbesar pada model WRF dengan asimilasi (c), nilai ini lebih baik dibandingkan pada model tanpa asimilasi (a). Nilai PC terbaik yang digunakan untuk menentukan seberapa besar akurasi dari suatu model terdapat pada model WRF dengan asimilasi (b) dan diikuti oleh model (a) dan (c) dengan nilai yang sama.



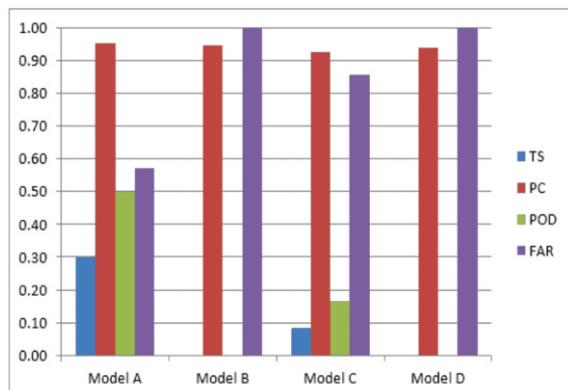
Gambar 8. Grafik nilai TS, PC, POD dan FAR tiap-tiap model untuk curah hujan ringan kategori BMKG

Untuk nilai POD terbaik terdapat pada model WRF dengan asimilasi (c). Sedangkan nilai FAR digunakan untuk melihat seberapa sering model salah dalam memprediksi, semakin kecil nilai FAR maka keandalan model semakin baik.

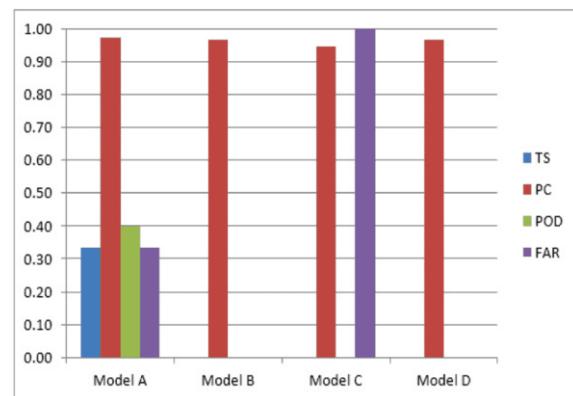
Pada grafik terlihat bahwa model yang menunjukkan *skill* dan keandalan terbaik adalah model WRF dengan asimilasi (c) data *reflectivity* untuk batasan curah hujan ringan > 0.1 mm/jam (batasan hujan dikotomi) kategori BMKG. Hal ini didapatkan karena model asimilasi (c) memiliki nilai TS dan POD terbesar serta FAR dengan nilai terendah. Model asimilasi (c) menunjukkan adanya perbaikan pada nilai TS, POD dan FAR dari model tanpa asimilasi (a).

Analisa prediksi hujan sedang kategori BMKG. Hasil pengolahan tabel kontingensi dengan batasan curah hujan sedang > 5 mm/jam kategori BMKG diperoleh nilai-nilai TS, PC, POD dan FAR seperti pada Gambar 9. Namun, hasil yang didapatkan kurang baik dikarenakan hujan yang terjadi dengan intensitas sedang sangat jarang sehingga data yang didapatkan tidak banyak. Hal ini dimungkinkan terjadi karena dalam penelitian ini hanya mengambil satu kasus kejadian hujan sehingga jumlah kejadian hujan intensitas sedang yang terukur sangat sedikit.

Pada grafik terlihat bahwa beberapa nilai tidak muncul karena memang keterbatasan dari data pada tabel kontingensi. Model yang menunjukkan *skill* dan keandalan terbaik adalah model tanpa asimilasi (a) dengan nilai PC yang sangat baik. Namun nilai TS dan POD terbilang cukup rendah. Untuk model asimilasi yang menunjukkan keandalan terbaik adalah model asimilasi (c) dengan data *reflectivity* dibandingkan kedua model asimilasi lainnya. Pada nilai batasan curah hujan sedang > 5 mm/jam kategori BMKG tidak didapatkan adanya perbaikan pada nilai TS, POD dan FAR dari model tanpa asimilasi (a) sehingga model asimilasi kurang baik dalam memprediksi kejadian hujan sedang.



Gambar 9. Grafik nilai TS, PC, POD dan FAR tiap-tiap model untuk curah hujan sedang kategori BMKG



Gambar 10. Grafik nilai TS, PC, POD dan FAR tiap-tiap model untuk curah hujan lebat kategori BMKG

Analisa prediksi hujan lebat kategori BMKG. Hasil pengolahan data tabel kontingensi dengan batasan curah hujan lebat > 10 mm/jam kategori BMKG diperoleh nilai-nilai TS, PC, POD dan FAR seperti pada Gambar 10. Grafik nilai yang didapatkan kurang baik dikarenakan hujan yang terjadi dengan intensitas lebat tidak banyak sehingga data yang ditampilkan kurang baik.

Pada grafik terlihat jelas model yang menunjukkan skil dan keandalan terbaik adalah model tanpa asimilasi (A) dengan nilai PC hamper mendekati 1. Namun nilai TS dan POD lebih rendah dibanding untuk memprediksi curah hujan sedang. Untuk model asimilasi yang menunjukkan keandalan terbaik adalah model asimilai (C) dengan data *reflectivity* (z) dibandingkan kedua model asimilasi lainnya. Pada nilai batasan curah hujan lebat > 10 mm/jam kategori BMKG jelas tidak adanya perbaikan pada nilai TS, POD dan FAR dari model tanpa asimilasi (A) sehingga model asimilasi kurang baik dalam memprediksi kejadian hujan lebat.

3. Kesimpulan

Perbedaan kondisi awal dengan mengasimilasikan data radar ke dalam masukan model WRF memberikan pengaruh dari hasil data estimasi hujan yang dalam hal ini sebagai tujuan dari penelitian. Perbaikan hasil prediksi nilai spasial reflektivitas radar CAPPI, produk VCUT dari model asimilasi mempengaruhi hasil prediksi distribusi hujan spasial oleh model asimilasi data radar (b, c, dan d) terhadap data model numerik WRF tanpa asimilasi (a). Terlihat dari hasil pembahasan distribusi spasial curah hujan, asimilasi menggunakan data *reflectivity* (c) menghasilkan perbaikan prediksi yang paling baik meskipun belum signifikan terhadap prediksi tanpa asimilasi jika dibandingkan dengan model asimilasi data radar lainnya. Namun keseluruhan nilai yang didapatkan masih *overestimate* dibandingkan data observasinya.

Pada uji keandalan dan skil model melalui tabel kontingenensi untuk nilai TS, PC, POD dan FAR dari kasus kejadian hujan di Lampung pada tanggal 28 Februari 2015. Model WRF dengan asimilasi (c) data *reflectivity* menunjukkan adanya perbaikan *skill* dan keandalan daripada model tanpa asimilasi untuk kategori hujan ringan BMKG (hujan dikotomi). Untuk kategori hujan sedang dan lebat, model tanpa asimilasi memberikan hasil yang paling baik hal ini dikarenakan nilai prediksi hujan menggunakan model dengan asimilasi cenderung tidak *underestimate* sehingga tidak masuk kedalam kriteria hujan BMKG untuk hujan sedang dan lebat. Secara keseluruhan sistem model WRF dengan asimilasi (c) data *reflectivity* merupakan model terbaik untuk memprediksi kejadian hujan di Lampung terutama secara dikotomi.

Saran. Perlu penelitian lebih lanjut dengan menggunakan data yang lebih panjang untuk menentukan performa model dengan asimilasi data radar. Diharapkan penelitian ini menjadi gambaran awal untuk penelitian sejenis dimasa depan, terutama dalam memperbaiki hasil prediksi curah hujan menggunakan model WRF.

Daftar Pustaka

- [1] Handoyo, M, F. "Analisa Dinamika Atmosfer Saat Kejadian Hujan Lebat Menggunakan Simulasi Model WRF-ARW (Studi Kasus Bengkulu Tanggal 27 Agustus 2014)". Skripsi Diploma IV STMKG: Jakarta, 2015
- [2] Warner, C. "Numerical Weather Prediction". Mon. Wea. Rev., 135, 2011.
- [3] Scamarock *et al.* "A Description of the Advanced Research WRF Version 3". NCAR Technical Note. Mesoscale and Microscale Meteorology Division. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, 2008.
- [4] Listiaji, E. "Simulasi curah hujan diatas pulau Lombok studi kasus bulan januari 2007". Bandung: ITB, 2009.
- [5] Junnaedhi, I. D. "Pengaruh Asimilasi Data dengan Metode 3DVar Terhadap Hasil Prediksi Cuaca Numerik di Indonesia". Bandung: Meteorologi ITB, 2008.
- [6] Kalnay, E. "Atmospheric Modelling, Data Assimilation and Predictability". Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [7] Dash, S. K., Sahu, D.K., Sahu, S.C. "Impact of AWS observation in WRF-DVAR data assimilation system: a case study on abnormal warming condition in Odisha". Nethazard. 65, 767-798, 2013.
- [8] Hou, T., Kong, F., Chen, X. and Lei, H. "Impact of 3DVAR data assimilation on the prediction of heavy rainfall over Southern China". Advances in Meteorology. 1-17, 2013.
- [9] Sahu, D.K., Dash, S.K., Bhan, S.C. "Impact of Surface Observations on simulation of rainfall over NCR Delhi using Regional background error statistic in WR-3DVAR model". Meterolo Atmos Phys. 125; 17-42, 2014.
- [10] Sun, J. "Doppler Radar Data Assimilation with WRFDA. NCAR", 2010. Cited in http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/Tutorials/2010_Feb/docs/WRFVAR_Tut_RADAR_Feb10.pdf [1 Maret 2015]
- [11] Barker, D., Huang, W., Guo, Y.-R., & Bourgeois, A. "A Three-Dimensional Variational (3DVAR) Data Assimilation System For Use With MMS". Mon. Wea. Rev., 132, 897-914, 2004.
- [12] Satrya, L. I. "Asimilasi Data Radar dalam Penerapan Prediksi Cuaca Numerik di Indonesia (Studi Kasus di Jawa Barat)". Meteorologi ITB: Bandung, 2012.

RELOKASI HIPOSENTER DAN TOMOGRAFI GELOMBANG P MENGGUNAKAN METODE INVERSI SIMULTAN DI WILAYAH PAPUA

RELOCATION OF HYPOCENTERS AND P WAVE TOMOGRAPHY FROM SIMULTANEOUS INVERSION METHOD IN PAPUA

Arif Rachman Hakim^{1*}, Supriyanto Rohadi², Jajat Jatnika³

¹Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah V Jayapura, Entrop Jayapua

²Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta

³Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG, Jl. Angkasa I no 2 Kemayoran Jakarta Jakarta

*E-mail: hakiem87@gmail.com

Naskah masuk: 10 Januari 2017; Naskah diperbaiki: 28 November 2017; Naskah diterima: 22 Desember 2017

ABSTRAK

Papua merupakan bagian dari pulau *New Guinea*, yang memiliki tatanan tektonik sangat komplek, dimana tektonik papua dipengaruhi 4 lempeng utama yaitu Lempeng Australia, Lempeng Pasifik, Lempeng Filipina dan Lempeng Eurasia, serta sesar lokal aktif seperti Sesar Sorong, Sesar Yapen, dan lainnya. Tatanan tektonik yang sangat komplek ini, menjadikan Papua menarik untuk dikaji lebih lanjut. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan posisi sumber gempa yang akurat sehingga didapatkan gambaran struktur bawah permukaan dengan merelokasi sumber gempa dan tomografi gelombang P menggunakan program simulPS12, yang secara simultan menghitung kecepatan 3-D gelombang P dengan hasil relokasinya. Data yang digunakan adalah katalog gempa PGR V Jayapura hasil analisa seiscomp3 dari tahun 2010 hingga 2015, dengan 19 stasiun pencatat. Hasil relokasi gempabumi memperlihatkan adanya perubahan sebesar 75%, baik secara kedalaman maupun secara lintang ataupun bujur, dengan nilai RMS mendekati 0. Sedangkan hasil tomogram pada penampang horizontal menunjukkan resolusi yang baik pada kedalaman 30 km dan 50 km, yang di indikasikan sebagai zona dengan kecepatan rendah berasosiasi dengan sesar sorong dan manokwari trench. Pada penampang vertikal didapatkan tomogram yang juga mengindikasikan zona lemah teridentifikasi sesar sorong, patahan ransiki dan manokwari trench.

Kata Kunci : relokasi, tomografi, struktur kecepatan, gelombang P, Papua.

ABSTRACT

Papua is the western part of the island of New Guinea with a very complex tectonic structure due to four tectonic plates, i.e. the Australian, Pacific, Philippine and Eurasian Plates; and the local active faults like Sorong, Yapen and others. The very complex tectonic setting makes the Papua region interesting to study further. This study was conducted to determine the pattern of tectonic region of Papua, using a simultaneous method of simulPS12. This research was conducted to obtain accurate earthquake source position so as to obtain the description of subsurface structure by relocating earthquake source and wave tomography P using simulPS12 program, which simultaneously calculate speed 3-D wave P with the result of its relocation. The data used is the PGR V Jayapura earthquake catalog based on the SeisComP3 analysis results from 2010 to 2015, with 19 recording stations. The result of the relocation of earthquakes showed a change of 75%, both in depth and in latitude or longitude, and the RMS value is close to zero. While the resulting tomogram on the horizontal cross section shows a good resolution at a depth range of 30 km to 50 km, which is indicated as the zone with low wave speed, associated with the Sorong fault and Manokwari trench.

Keywords : Relocation, tomography, velocity structure, Papua.

1. Pendahuluan

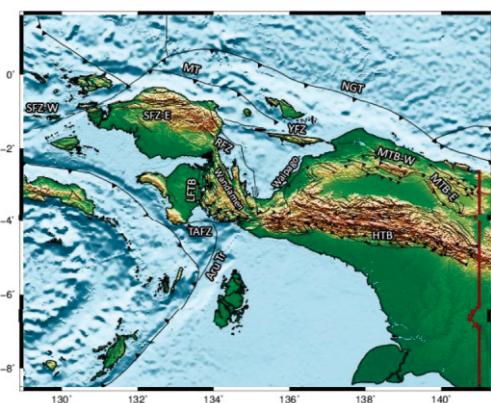
Papua merupakan bagian dari pulau *New Guinea*, dimana wilayah ini dibagi menjadi dua yaitu bagian barat adalah Indonesia, sedangkan bagian Timur adalah Negara Papua Nugini. Tatanan tektonik Papua

dipengaruhi 4 Lempeng utama yaitu Lempeng Australia, Lempeng Pasifik, Lempeng Filipina dan Lempeng Eurasia, Serta Lempeng Mikro, seperti Lempeng Mikro Solomon, Lempeng Mikro Bismarck [1], serta Sesar Lokal Aktif seperti Sesar Sorong, Lajur Anjak Mamberamo, Sesar Yapen

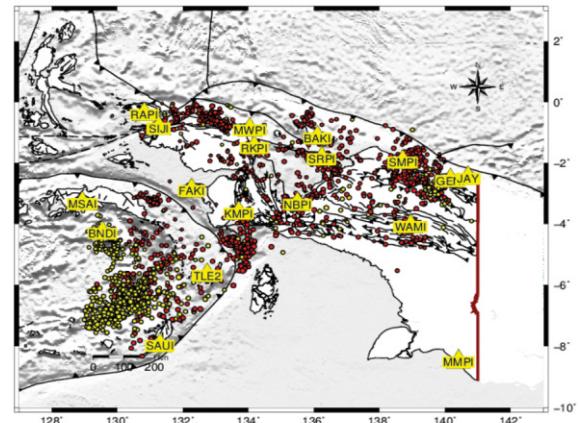
(gambar 1), yang menjadikan tatanan tektonik Papua sangat kompleks, sehingga menarik untuk dikaji.[2] Dengan Kondisi tektonik tersebut wilayah Papua memiliki tingkat kerawanan gempa dan tsunami cukup tinggi. Upaya mitigasi bencana gempa dan tsunami diperlukan, salah satunya dengan kajian tektonik untuk mengetahui struktur bawah permukaan, sehingga didapatkan pola tektonik sebagai data dukung dalam upaya pemetaan daerah rawan gempa dan tsunami secara baik.

Posisi hiposenter atau sumber gempa yang akurat sangat dibutuhkan untuk analisis kegempaan selanjutnya, dalam penentuan ketepatan posisi hiposenter ditentukan oleh beberapa faktor, diantaranya: waktu tiba gelombang, fase gelombang, geometri jaringan dan model kecepatan yang digunakan. *Update* posisi sumber gempa dilakukan untuk mendapatkan posisi sumber gempa yang lebih tepat[3]. Tomografi seimik secara simultan menghitung waktu tiba gelombang untuk mendapatkan model kecepatan dan relokasi hiposenter.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan posisi sumber gempa yang akurat dan model kecepatan di wilayah papua serta gambaran bawah permukaan dengan menggunakan data hasil pengamatan Pusat Gempabumi Regional V Jayapura. Pada penelitian ini digunakan program SimulPS12[4], dimana program ini mampu menghitung inversi simultan antara penentuan model kecepatan dan relokasi sumber gempa[5].



Gambar 1. Peta tektonik dan sesar wilayah Papua [2].



Gambar 2. Peta sebaran gempabumi dan stasiun penerima, periode November 2010 – Desember 2015 [6].

2. Metode Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data *arrival format* berupa parameter waktu kejadian gempa, lokasi, kedalaman, magintudo, serta catatan waktu tiba gelombang P dan Gelombang S pada tiap stasiun. Data dari katalog repo gempa BBMKG V (pusat gempabumi regional V) dari bulan November 2010 hingga Desember 2015, dengan kriteria data magnitude terendah skala 3, data yang digunakan minimal 6 stasiun pencatat, data sebelumnya direlokasi dulu sehingga mendapatkan variasi kedalaman yang baik, data sebanyak 1500 event hasil relokasi dengan batasan wilayah penelitian, yaitu Pulau Papua dengan koordinat 128°- 142° BT dan 9° LS - 0°.

Tomografi Seismik. Tomografi seismik adalah teknik mencitrakan struktur bumi secara dua atau tiga dimensi, dengan parameter berupa waktu penjalanan suatu gelombang seismik, dari sumber (*source*) yang melewati suatu medium tertentu[7] dan tercatat pada stasiun (*receiver*). Penjalanan suatu gelombang seismik dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$T_{ij} = \int_{source}^{receiver} u ds \quad (1)$$

dimana T_{ij} waktu tempuh gelombang seismik dari sumber (i) ke stasiun (j), u adalah perlambatan (*slowness*) dan ds adalah panjang lintasan gelombang seismik dari sumber ke stasiun. Sedangkan waktu tiba (*arrival times*) gelombang seismik pada stasiun dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$t_{ij} = \tau_i + T_{ij} \quad (2)$$

dengan t_{ij} = waktu tiba yang tercatat di stasiun, T_{ij} adalah waktu tempuh gelombang seismik dan τ_i adalah waktu kejadian gempa [8].

Residual time ialah selisih waktu antara waktu tiba gelombang pada stasiun penerima (t_{ij}^{obs}) dengan waktu tiba gelombang hasil perhitungan berdasarkan model kecepatan awal (t_{ij}^{cal}). Residual time dapat dinyatakan dalam persamaan berikut, yang didapat dari perhitungan waktu tiba kalkulasi dari persamaan (1) dan (2) :

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_k} \Delta x_k + \Delta \tau_i + \int_{source}^{receiver} \delta u ds \quad (3)$$

Dimana, Δx_k perubahan hiposenter, $\Delta \tau_i$ waktu kejadian gempabumi (*origin time*) dan δu adalah perlambatan atau *slowness*. Turunan parsial dari hiposenter ($\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_k}$) sebanding dengan perkalian antara perlambatan dengan vektor sinar gelombang seismik [9], sehingga persamaan (3) dapat dituliskan dalam bentuk diskrit sebagai berikut dengan Parameter model kecepatan disimbolkan dengan m_i :

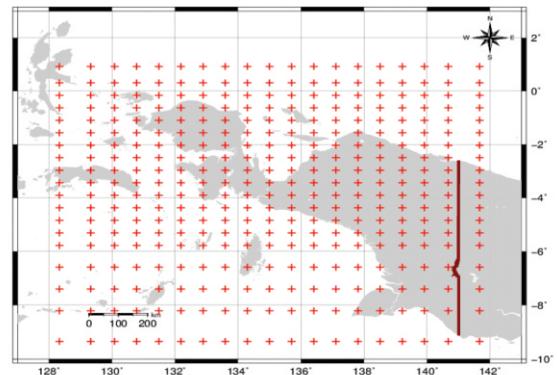
$$r_{ij} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_k} \Delta x_k + \Delta \tau_i + \sum_{i=1}^L \frac{\partial T_{ij}}{\partial m_i} \Delta m_i \quad (4)$$

Parameterisasi model ialah penentuan grid (gambar 3) dan kecepatan model awal yang digunakan dalam proses inversi tomografi, dimana grid yang digunakan tidak uniform [10]. Penentuan besaran parameterisasi berdasarkan distribusi gempa dan distribusi stasiun (gambar 4), penentuan besaran parameterisasi berpengaruh pada kualitas resolusi yang dihasilkan.

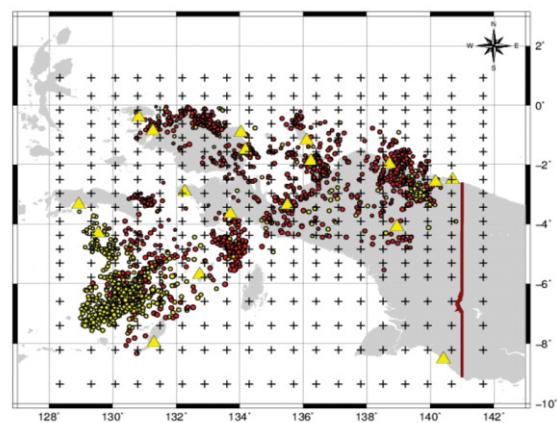
Uji resolusi setelah tahap inversi tomografi bertujuan untuk melihat resolusi yang dihasilkan, dan dilakukan sebelum interpretasi terhadap tomogram hasil inversi data observasi. Hasil resolusi dipengaruhi oleh distribusi gempa dan stasiun pencatat. Dalam uji resolusi dikenal juga uji *checkboard* atau model papan, digunakan untuk menguji model menggunakan metode pemodelan kedepan.[11], Uji *checkboard* dilakukan dengan penetapan ukuran grid berdasar distribusi gempabumi, posisi stasiun dan struktur kecepatan referensi yang baik. Apabila hasil yang didapatkan dari proses uji resolusi sama mendekati model awal, maka hasil inversi tomografi sudah baik.

Penentuan nilai redaman (damping) untuk mendapatkan nilai redaman (damping) optimum.
Pada penelitian ini, nilai redaman dilakukan beberapa kali dengan memberikan nilai tertentu. Nilai redaman dicari untuk mendapatkan nilai redaman yang

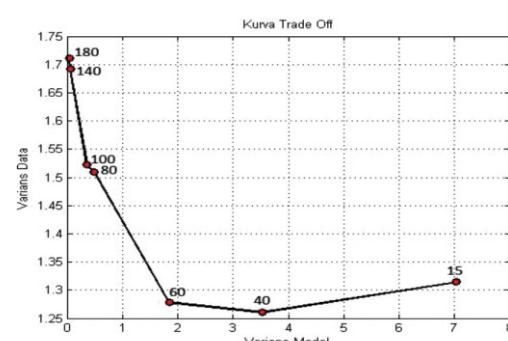
optimum, nilai redaman optimum dilakukan agar meningkatkan nilai varian model dan menurunkan varian data[5]. Pada penelitian ini didapatkan nilai redaman optimum dengan nilai redaman 40 (gambar 5).



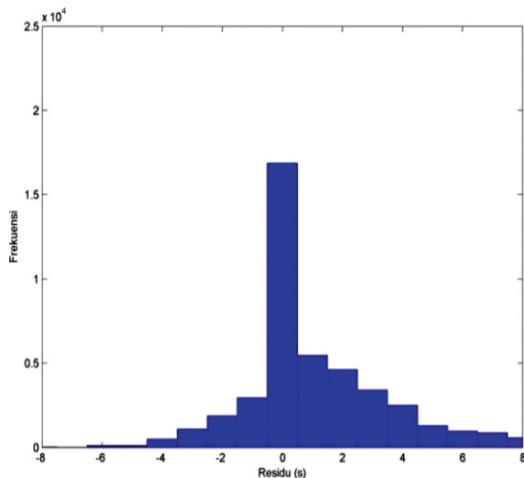
Gambar 3. Parameterisasi model pada wilayah Papua.



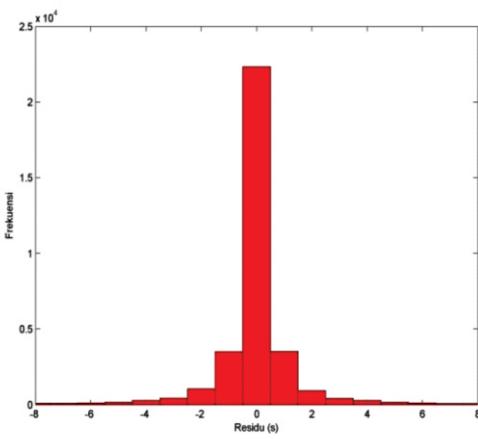
Gambar 4. Parameterisasi model pada wilayah Papua berdasarkan sebaran gempabumi dan stasiun pencatat.



Gambar 5. Kurva *trade off*, memperlihatkan varians data dengan varian model dimana terlihat damping 40 merupakan damping optimum.



(a)



(b)

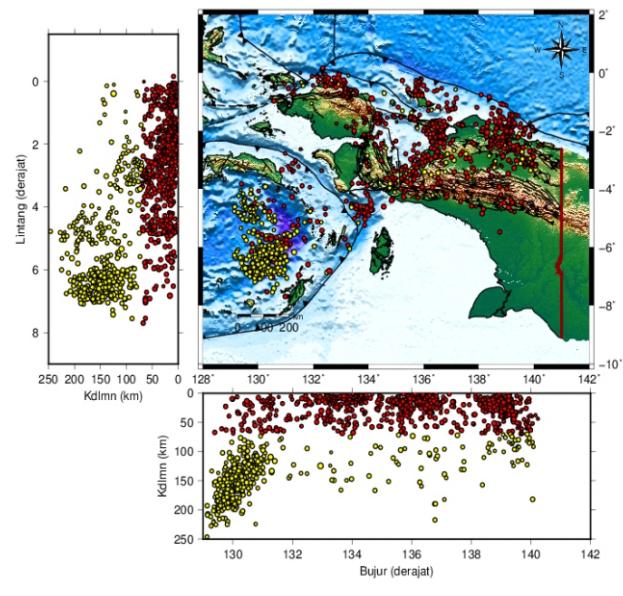
Gambar 6. Histogram nilai residual, selisih waktu tempuh observasi dan waktu tempuh perhitungan, dimana warna biru sebelum relokasi (a) dan merah sesudah relokasi (b) menunjukkan peningkatan pada nilai 0.

Sebagai validasi dari penelitian relokasi hiposenter dibuat perbandingan antara frekuensi nilai residual sebelum dan setelah relokasi hiposenter (gambar 6). Validasi ini dilakukan untuk menguji keakuratan hasil relokasi, hasil relokasi dikatakan baik jika nilai waktu residual mendekati nol.

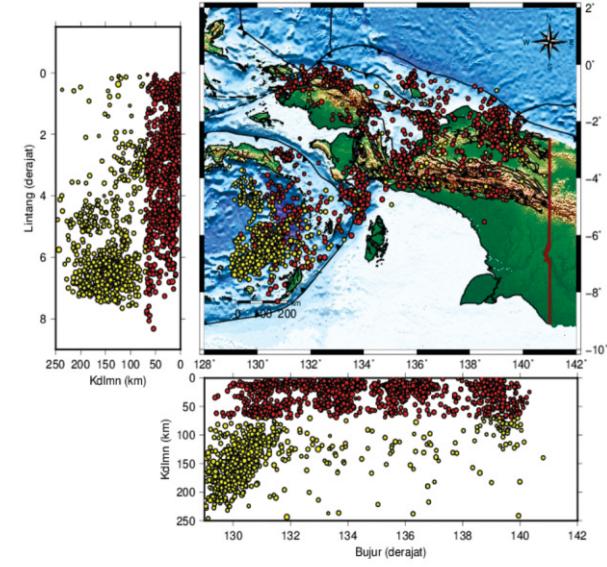
3. Hasil dan Pembahasan

Sebagian hasil relokasi gempabumi, menunjukkan adanya liniasi geologi terhadap zona sesar, dimana titik gempabumi terjadi mengelompok pada bagian/zona sesar tertentu (gambar 7), hasil relokasi memperlihatkan perubahan terhadap suatu titik gempabumi secara kedalaman dan lintang atau pun bujur. Kejadian gempabumi sebelum relokasi sebanyak 1500 event, setelah direlokasi dengan simulasi PS12 didapatkan 1115 event, sebanyak 74 %

gempabumi mengalami perubahan baik secara kedalaman maupun lintang dan bujurnya. Dengan melihat nilai residual sebelum dan sesudah relokasi, nilai residual sesudah relokasi mengalami peningkatan mendekati 0, dengan nilai residual mendekati 0 maka selisih waktu observasi dan perhitungan tidak jauh berbeda dan hasil relokasi dikatakan sudah baik.



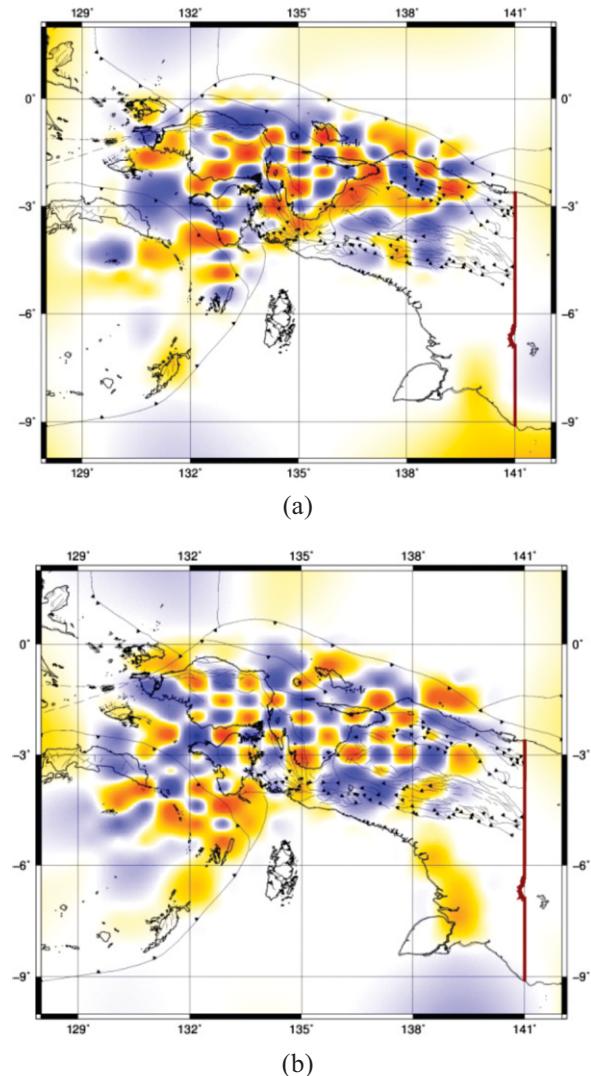
(a)



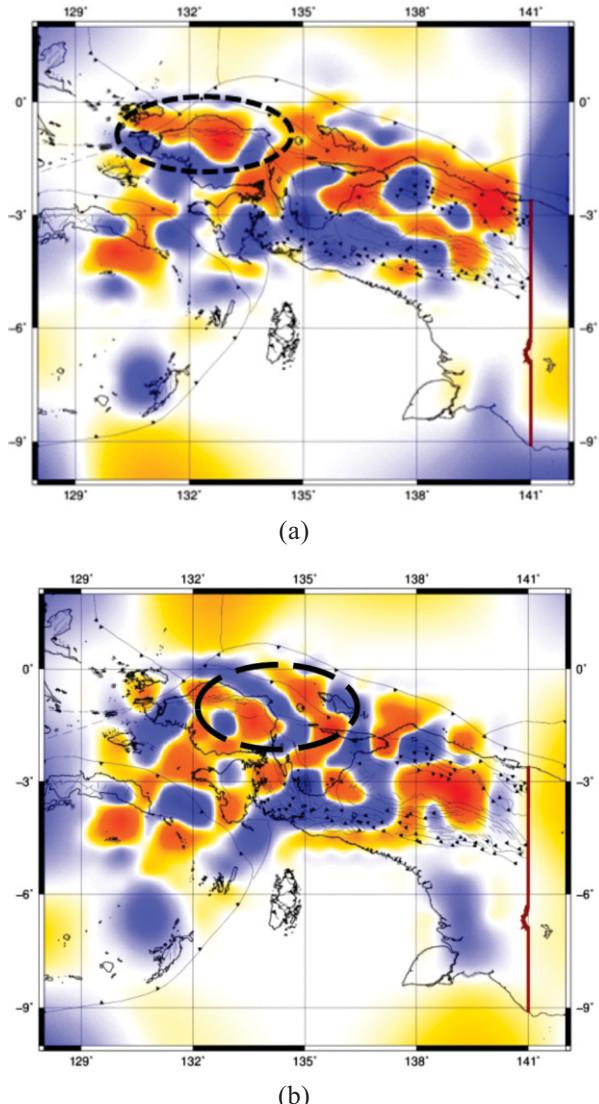
(b)

Gambar 7. Peta Sebaran gempabumi dan cross section setelah (a) dan sebelum (b) relokasi.

Struktur Kecepatan gelombang P pada penampang horisontal. Pada penampang horisontal, model kecepatan gelombang P didapatkan hasil yang cukup baik pada kedalaman 30 dan 50 km, karena setelah proses uji validasi menggunakan *checkerboard* dengan nilai anomali positif dan negatif 10% dari kecepatan awal, pada kedalaman 30 dan 50 km hasil *checkerboard* kembali kebentuk papan catur (gambar 8). Pada gambar9, memperlihatkan citra penampang horisontal anomali kecepatan gelombang P pada kedalaman 30 dan 50 km, pada kedalaman ini teridentifikasi adanya zona anomali kecepatan rendah berasosiasi dengan zona *Sorong Fault* dan *Manokwari Trench*.

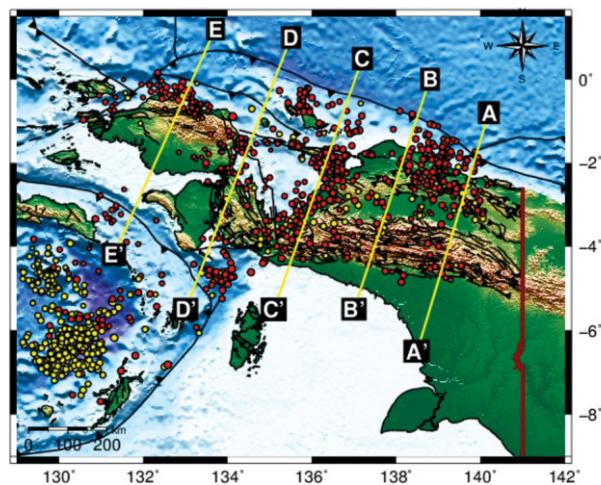


Gambar 8. *Checkerboard* kedalaman 30 km (a) dan *checkerboard* kedalaman 50 km(b).

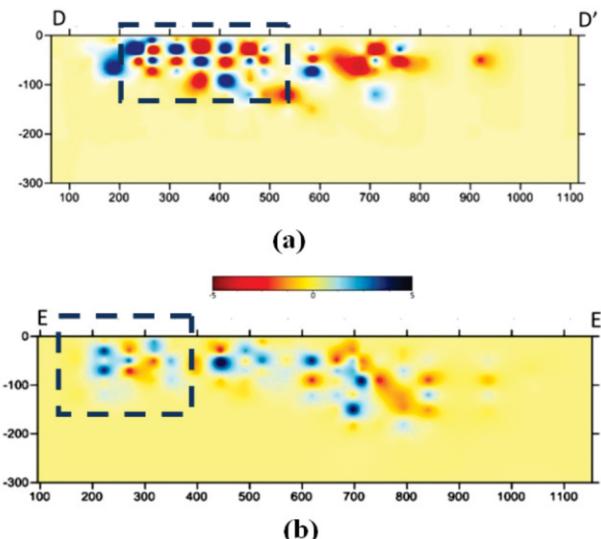
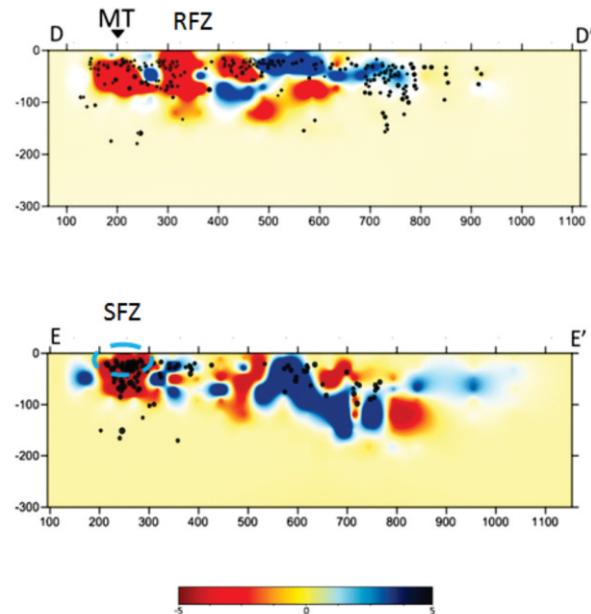


Gambar 9. (a) Citra kecepatan gelombang P pada kedalaman 30 km dan (b) Citra kecepatan gelombang P pada kedalaman 50 km.

Struktur kecepatan gelombang P pada penampang vertikal. Pada penampang vertikal, dilakukan dengan membagi wilayah penelitian dengan 5 potongan (gambar 10). Hasil potongan vertikal menunjukkan adanya asosiasi zona kecepatan rendah dengan zona sesar di wilayah penelitian dan zona yang memiliki rigiditas batuan lemah, akan tetapi dalam uji resolusi didapatkan resolusi yang kurang baik pada setiap potongan sehingga mempengaruhi dalam interpretasi.



Gambar 10. Proyeksi potongan melintang di wilayah penelitian, terdapat 5 proyeksi potongan melintang.



Gambar 11. (a) *Checkerboard* potongan D-D' dan (b) *checkerboard* potongan E-E'.

Uji resolusi *checkerboard* penampang vertikal dengan nilai anomali positif dan negatif 10% dari kecepatan awal diperlihatkan pada gambar 11, penampang vertikal yang baik terdapat pada potongan melintang D-D' dan potongan melintang E-E' ditandai garis kotak putus-putus.

Hasil Tomogram struktur kecepatan gelombang P pada daerah penelitian ditunjukkan pada gambar 12, yang menggambarkan adanya anomali positif dengan ditandai warna biru dan anomali negatif ditandai dengan warna merah. Anomali positif menandakan daerah tersebut memiliki nilai kecepatan gelombang lebih tinggi, dan menandakan kepadatan struktur yang lebih padat

Gambar 12. (a) Potongan vertikal daerah D-D' zona anomali negatif berasosiasi dengan titik gempabumi yang mengindikasikan adanya sesar (Manokwari Trench dan Ransiki Fault) dan (b) Potongan vertikal daerah E-E', lingkaran putus-putus di indikasikan Sorong Fault yang berasosiasi dengan anomali negatif.

Anomali negatif yang ditandai dengan warna merah, menandakan adanya daerah yang memiliki nilai kecepatan gelombang yang lebih lemah atau rendah. Zona dengan anomali negatif biasanya, merupakan daerah-daerah yang memiliki tingkat kepadatan batuan yang lemah atau zona hancuran dan zona lelehan atau dapur magma pada daerah pegunungan aktif.

Pada penelitian ini terlihat adanya zona lemah, terlihat melalui penampang horisontal yang memiliki uji resolusi *checkerboard* yang baik. Kedalaman 30 km dan 50 km memperlihatkan uji resolusi yang baik, dan pada hasil citra struktur kecepatan gelombang P, mengindikasikan anomali kecepatan negatif berasosiasi dengan zona sesar Sorong dan palung Manokwari. Palung Manokwari memiliki kedalaman sekitar 20 km dengan panjang segmen 218,1 km [12], dan menurut Sabtaji [2], dalam penelitiannya yang merelokasi tiap zona patahan yang ada di Papua, palung Manokwari memiliki kedalaman 100 km. Untuk Sorong fault, Irsyam dkk [12] menjelaskan bahwa kedalaman untuk Sorong fault rata-rata memiliki kedalaman sekitar 3 km hingga 18 km, dan menurut Sabtaji [2] Sorong fault, berkisar 29 km.

Pada gambar 9, terlihat zona lemah yang terdapat garis lingkar putus-putus, tampak jelas warna merah

atau zona anomali rendah berada pada sekitar daerah Manokwari *trench* dan Sorong *fault*. Dilihat dari penelitian sebelumnya, yang sudah dijelaskan diatas, maka penelitian ini mendapatkan kedalaman pada Manokwari *trench* dan Sorong *fault* berkisar antara 30 km hingga 50 km.

Hasil potongan vertikal D-D' memperlihatkan, adanya zona lemah berasosiasi dengan titik gempabumi, yang memperlihatkan bahwa zona lemah dengan anomali negatif merupakan daerah yang memiliki tingkat seismisitas tinggi dan merupakan zona hancuran ataupun sesar, terlihat pada gambar 12, teridentifikasi Manokwari *trench* dan Ransiki *fault zone*. Hasil potongan E-E' teridentifikasi zona lemah anomali negatif berasosiasi dengan Sorong *fault*. Terlihat dari sebaran titik gempabumi berada pada zona dengan nilai anomali negatif.

4. Kesimpulan

Hasil relokasi gempabumi pada daerah penelitian, lebih banyak disebabkan oleh patahan atau sesar lokal, terlihat kedalaman rata – rata sekitar 50 km, dengan kedalaman paling dalam sekitar \pm 200km yang kemungkinan disebabkan oleh subduksi utara papua atau *New Guinea Trench*.

Hasil tomogram struktur kecepatan gelombang P, memperlihatkan adanya zona lemah atau anomali negatif yang berasosiasi dengan patahan lokal aktif yaitu Manokwari *trench* dan Sorong *fault*, patahan lokal aktif ini teridentifikasi pada kedalaman antara 30 km sampai 50 km, dan terlihat juga dari penampang vertikal dengan *overlay* potongan melintang gempabumi dengan pencitraan struktur gelombang P, terlihat gempabumi terjadi pada daerah yang memiliki anomali negatif, dimana anomali negatif ini berasosiasi dengan zona sesar atau zona hancuran.

Daftar Pustaka

- [1] Baldwin, S.L, Fitzgerald, P.G, dan Webb, L.E., Tectonic of the New Guinea Region, *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40:495-520, DOI: 10.1146/annurev-earth-040809-152540, 2012.
- [2] Sabtaji, A., Struktur Kecepatan 1-D Gelombang P dan Relokasi Gempa Bumi Menggunakan Metode Double – Difference di Wilayah Papua Bagian Barat, Tesis, Program Studi Magister Sains Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Bandung. 2015.
- [3] Nugroho. H. Widjiantoro, S. dan Ibrahim, G “Penentuan hiposenter gempabumi dengan menggunakan metode guided grid search dan model struktur kecepatan tiga dimensi,” *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 8, hal. 48-60, 2007.
- [4] Evans, J.R., Eberhart-Philips, D., Thurber, C.H. User's Manual for SIMULPS12 for Imaging Vp and Vp/Vs : A Derivative of the “Thurber” Tomographic Inversion SIMUL3 for Local Earthquakes and Explosions, U.S. Geological Survey. USGS-OFR-94-431. 1994.
- [5] Jatnika, J., Nugraha, A.D., Wandono., Relokasi Sumber Gempa Di Daerah Sumatera Bagian Utara Menggunakan Hasil Inversi Simultan Relokasi Dan Kecepatan Gelombang P Tiga Dimensi, *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol 16, No.2.hal:113-121. 2015.
- [6] Balai Besar Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika Wilayah V Jayapura, *Laporan Gempa Tahunan 2015*. 2016.
- [7] Widjiantoro, S., Seismisitas dan Model Subduksi di Indonesia Resolusi Tinggi, Seminar dan Pameran HAKI 2008: Pengaruh Gempa dan Angin Terhadap Strukur. 2008.
- [8] Nugraha, A.D, Syahputra, A, Fatkhan, Pemrograman Ray Tracing – Metode Pseudo Bending Medium 2-D Untuk Menhitung Waktu Tempuh Antara Sumber dan Penerima, *Jurnal Geofisika*, ISSN : 0854-4352, 2011.
- [9] Thurber, C. H., Local earthquake tomography: velocities and Vp/Vs theory, H. M. Iyer and K. Hirahara, *Seismic Tomography: Theory and Practice*, pp. 563– 583, Chapman and Hall, London. 1993.
- [10] Rohadi, S., Widjiantoro, S., Nugraha, A. D., Pencitraan Struktur 3D Kecepatan Gelombang Seismik Menggunakan Metode Tomografi Double-Difference dan Data Gempa di Jawa Tengah, *JTM* Vol. XIX No. 2, hal 82-94. 2012.
- [11] Humphreys, E., and Clayton, R. W., Adaption of back projection tomography to seismic travel time problems, *J. Geophys. Res.*, 93, 1073-1085. 1988.
- [12] Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widjiantoro, S., Triyoso, W., Hilman, D., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., dan Ridwan, M., Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia, Bandung-Indonesia. 2010,

PENERAPAN METODE STATISTIK UNTUK PERBANDINGAN PARAMETER ATMOSFER PERMUKAAN ANTARA PADANG DAN SELAPARANG

*APPLICATION STATISTICAL METHODS FOR COMPARISON OF ATMOSPHERE SURFACE
PARAMETERS BETWEEN PADANG AND SELAPARANG*

Ina Juaeni

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN, Jl. Dr. Djunjunan No. 103 Bandung 40173
E-mail: inajuaeni@yahoo.com

Naskah masuk: 21 Maret 2017; Naskah diperbaiki: 17 Nopember 2017; Naskah diterima: 22 Desember 2017

ABSTRAK

Sudut datang sinar matahari menentukan banyaknya sinar matahari yang sampai dipermukaan sehingga faktor ini menentukan karakter cuaca suatu lokasi. Padang dan Selaparang (Mataram) selalu memiliki sudut datang sinar matahari yang berbeda setiap bulannya. Penelitian ini bertujuan membuktikan adanya perbedaan karakter parameter atmosfer antara dua lokasi tersebut. Pengujian dilakukan dengan dua metode. Pertama dengan metode statistik sederhana yaitu penentuan nilai rata-rata, maksimum dan koefisien variasi dan kedua dengan metode penentuan variansi dalam ANOVA1. Data yang digunakan adalah data tekanan, kelembapan, temperatur, curah hujan dan kecepatan angin dari OGIMET periode Januari sampai dengan Desember 2015. Berdasarkan selisih nilai-nilai maksimum, minimum, rata-rata dan koefisien variasi untuk tekanan, kelembapan, temperatur, kecepatan angin dan curah hujan antara Padang dan Selaparang menunjukkan kedua data berbeda. Hasil perbandingan dengan metode ANOVA1 menunjukkan bahwa curah hujan bulan Maret dan kelembapan serta temperatur bulan April mempunyai karakter yang sama dengan *p-value* 0,6 sampai 0,9. Selain variabel dan bulan tersebut, karakter parameter di dua lokasi tersebut berbeda dengan *p-value* 0,0 sampai 0,2.

Kata kunci: sudut datang sinar matahari, parameter atmosfer, *ANOVA1*

ABSTRACT

*Insolation angles determines the amount of incoming solar radiation (Insolasi) at the surface then to determine characteristic of the weather. Padang and Selaparang (Mataram) always has different the angle every month. This study aims to prove the difference in atmospheric parameters characteristic for those locations. Assesment to be done by using two methods, First, using average, maximum/minimum and coefficient of varians value as a simple statistic, second using variance on ANOVA1. OGIMET data of pressure, relative humidity, temperature, rainfall and wind speed from January to December 2015 is used. Based on bias of maximum value, minimum value, average values and coefficient of variation, Padang and Selaparang have different value of pressure, humidity, temperature, wind speed and rainfall. The results of comparison using ANOVA1 indicate that rainfall on March and humidity and temperature on April have similar character in *p-value* from 0.6 to 0.9. In addition to these variables, character is differ in *p-value* from 0.0 to 0.2.*

Keywords: incoming solar radiation angle, atmosphere parameter, character, *ANOVA1*

1. Pendahuluan

Salahsatu faktor yang menentukan iklim dan cuaca hari ke hari adalah energi matahari. Sebagian dari energi matahari yang diterima permukaan bumi, rata-rata sebesar 340 watt/m^2 , dipantulkan kembali ke angkasa, dan sisanya diserap oleh daratan dan lautan untuk dilepaskan kembali sebagai panas radiasi gelombang panjang. Panas radiasi ini diserap dan diemisikan lapisan atmosfer bawah ke lapisan

atmosfer di atasnya. Temperatur rata-rata bumi ditentukan oleh keseimbangan antara radiasi matahari yang datang dengan radiasi panas yang diemisikan ke angkasa. Karena dalam proses pantulan dan radiasi energi matahari ini berkaitan keberadaan gas-gas di atmosfer, Kiehl dan Trenberth [1] menyatakan bahwa temperatur rata-rata permukaan bumi ditentukan oleh dua hal: fluks energi antara atmosfer dan permukaan dan pengaruh gas-gas di atmosfer.

Ketergantungannya pada kondisi permukaan bumi menyebabkan energi matahari tidak terdistribusi secara seragam, ekuator menerima energi matahari berlebih, sementara kutub menerima energi tersebut dalam jumlah yang sangat kurang. Energi yang diterima secara tidak seragam inilah yang menimbulkan perbedaan panas. Panas yang tidak seragam membangkitkan angin, kemudian meningkatkan evaporasi, dan presipitasi. Dengan kata lain panas yang tidak seragam di permukaan bumi membentuk cuaca.

Padang (Sumatera Barat) dan Selaparang (Lombok/Mataram/Nusa Tenggara Barat) tidak hanya memiliki perbedaan dalam *altitude* saja. Padang adalah wilayah tepi pantai sementara Selaparang adalah dataran rendah. Selain itu posisi dua lokasi penelitian ini juga berbeda, Padang terletak di wilayah Indonesia bagian barat, dan Selaparang terletak di sebelah timur. Posisi lintang menentukan jumlah energi matahari yang diterima permukaan bumi. Berkaitan dengan hal itu penting dilakukan penelitian karakter parameter atmosfer untuk berbagai macam kondisi permukaan dengan sasaran diperoleh rangkuman yang bisa memberikan kesimpulan umum tentang keterkaitan cuaca dan aspek geografi. Padang dan Selaparang memenuhi persyaratan untuk penelitian ini. Parameter atmosfer yang dianalisis untuk dua lokasi tersebut adalah tekanan, kelembapan relatif, temperatur, kecepatan angin dan curah hujan. Tujuan penelitian ini adalah mengkaji perbedaan karakter parameter atmosfer antara Padang dan Selaparang dengan menggunakan metode ANOVA1.

Analysis of variance (ANOVA) adalah metode yang sangat penting untuk eksplorasi dan konfirmasi analisis data [2]. Pengembangan ANOVA dilakukan oleh Gelman [2] yang menyajikan fungsi *S user friendly* untuk *fitting* berbagai model seperti (a) model regresi non-parametrik, (b) model semi-parametrik linear; (c) model regresi non-parametrik nonlinear; (d) model regresi semi-parametrik nonlinear; dan (e) model semi-parametrik nonlinear campuran. Metode ANOVA juga dapat digunakan untuk menguji perbedaan antara dua fungsi dalam [3] dan [4]. Metode ANOVA sudah banyak digunakan dalam analisis data dalam berbagai latar belakang ilmu, seperti kedokteran, geografi, pertanian, kehutanan dan juga meteorologi. Dalam Zhang et al [5] ANOVA digunakan menguji keterkaitan wilayah dengan wabah berbagai penyakit. Sementara dalam Oliva [6] ANOVA digunakan untuk penelitian di bidang biologi lingkungan. Wang dan Brown [7] menggunakan *smoothing spline* untuk mempelajari efek wabah pada ritme sirkadian kortisol, yaitu hormon yang dipengaruhi oleh stres. Penggunaan ANOVA dalam penelitian atmosfer dilakukan juga oleh Sain et al [8], dan Kaufman dan Sain [9]. Dalam

penelitian Sain [8] ANOVA digunakan untuk menguji dua metode *dynamic downscaling* yang berbeda. Pengembangan ANOVA dilakukan oleh Kaufman dan Sain [9], dengan cara memfungsikan ANOVA dalam pemodelan. Penggunaan ANOVA dalam sains atmosfer masih dominan dalam bidang pemodelan, dengan tujuan untuk konfirmasi dan juga menentukan besar simpangan data model yang satu terhadap model lain atau data model terhadap observasi, meskipun ANOVA mempunyai potensi untuk digunakan dalam kajian penelitian proses atmosfer.

2. Metode Penelitian

Padang dan Selaparang merupakan dua lokasi dengan posisi lintang bujur dan ketinggian tempat yang berbeda. Tabel 1 menunjukkan lintang, bujur dan ketinggian Padang dan Selaparang. Selain berbeda aspek tempat dan ketinggian, sudut datang sinar matahari Padang dan Selaparang juga berbeda seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data OGIMET, yang dijelaskan secara rinci dalam subbab 2.1. Untuk menguji/membuktikan adanya perbedaan karakter parameter atmosfer di dua lokasi di atas digunakan metode ANOVA1 dalam Matlab. Angka 1 menunjukkan bahwa analisis dilakukan hanya untuk satu arah relasi. Metode ANOVA 1 dijelaskan lebih rinci dalam subbab 2.2.

Tabel 1. Posisi Lokasi Penelitian

Lokasi	Ketinggian tempat
Selaparang	0-26 m
8° 34' LS, 116° 7' BT Padang	0-1,853 m 0°57'0" LS, 100°21'11" BT

Tabel 2. Sudut datang sinar matahari perbulan di Padang dan Selaparang [10]

Bulan	Padang	Selaparang
Januari	105°	97°
Februari	97°	89°
Maret	89°	81°
April	81°	73°
Mei	73°	65°
Juni	66°	58°
Juli	73°	65°
Agustus	81°	73°
September	89°	81°
Oktober	97°	89°
November	105°	97°
Desember	112°	104°

Keterangan: Sudut datang sinar matahari perbulan yang diukur dari arah vertikal 0°

Data OGIMET. Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data parameter atmosfer permukaan (tekanan, kelembaban relatif, temperatur, kecepatan angin dan curah hujan) per tiga jam di Padang dan Selaparang untuk pengamatan bulan Januari sampai Desember tahun 2015. Data diperoleh dari <http://ogimet.com/gsynres.phtml.en>. Data Ogimet menjadi data alternatif terbaik, paling tidak sampai saat ini. Ogimet adalah Layanan Informasi Cuaca melalui www.ogimet.com. OGIMET dikembangkan oleh Guillermo Ballester Valor, meteorologis dari *Spanish Meteorological Institute*. Kontribusi juga diperoleh dari Dr. D. José Manuel García López, *Catedratic* dari *Department of Histology of Granada University*. Data yang dipublikasi adalah data yang digunakan oleh beberapa jaringan informasi dunia, terutama dari *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, dan menggunakan software bebas lisensi untuk mengolahnya. Data parameter meteorologi seperti temperatur, kelembaban relatif, tekanan udara, angin dan presipitasi dari seluruh dunia berasal dari jalur khusus seperti jalur kerjasama internasional. Web OGIMET memberikan informasi beberapa jenis data. Salah satunya adalah data cuaca harian OGIMET yang diperoleh berdasarkan data sinop dan tersedia sejak Juli 2004.

Metode ANOVA. Untuk menemukan karakter parameter atmosfer yang berbeda antara Padang dan Selaparang, digunakan nilai maksimum, nilai minimum, nilai rata-rata dan koefisien variasi. Juga digunakan nilai rata-rata kuadrat dengan *Analysis of Variance (ANOVA)* dalam Matlab. ANOVA adalah sebuah metode untuk mendekati kesamaan/perbedaan sifat dua atau lebih grup data.

Dalam penelitian ini, fungsi atau grup yang akan diuji dengan ANOVA adalah grup data parameter atmosfer Padang dan grup data atmosfer Selaparang. Karena waktu pengamatan sama, maka ANOVA satu arah memungkinkan untuk melihat apakah dua grup yang berbeda menghasilkan tanggapan yang sama atau berbeda. Persamaan ANOVA satu arah adalah [11]:

$$y_{ij} = \alpha_j + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

dengan asumsi bahwa:

Tabel 3. ANOVA dalam Matlab memperlihatkan variabilitas model dengan sumber, test F dan nilai [11]

Sumber	SS	df	MS	F	Nilai p
Grup	SSR	k-1	MSR=SSR/(k-1)	MSR/MSE	$p(F_{k-1, N-k}) > F$
Kolom	SSE	N-k	MSE=SSE/(N-k)		
Total	SST	N-1			

- y_{ij} adalah data, i menyatakan jumlah data, dan j menyatakan level grup lain dari prediktor variabel y . Semua y_{ij} independent.
- α_j menyatakan rata-rata populasi untuk grup ke j .
- ε_{ij} adalah kesalahan acak, independent dan terdistribusi normal, dengan rata-rata nol dan konstanta variansi $\varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.

Model ANOVA seperti ini disebut model rata-rata. Model mengasumsikan bahwa kolom y adalah konstanta α_j ditambah komponen kesalahan ε_{ij} . Test hipotesa ANOVA dilakukan untuk semua rata-rata grup terhadap hipotesa alternatif sama jika paling sedikit satu grup beda dengan yang lain.

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k H_1: \text{tidak semua rata-rata grup sama} \quad (2)$$

Untuk penelitian ini digunakan ANOVA dalam Matlab. Dalam matlab ANOVA satu arah disebut ANOVA1 yang menguji kesamaan rata-rata kolom dalam matriks y , dimana setiap kolom adalah grup yang berbeda. ANOVA1 berdasarkan pada asumsi bahwa semua sampel populasi terdistribusi normal. Data kosong atau NaN dalam ANOVA1 diabaikan dalam perhitungan. Bentuk matriks y seperti ditunjukkan dalam persamaan

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1k} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nk} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \text{Grup 1} & \text{Grup 2} & \dots & \text{Grup ke } k \end{matrix} \quad (3)$$

Dalam penelitian ini metode ANOVA dalam Matlab menghasilkan koefisien-koefisien SS, MS, df, F, dan p>F dalam bentuk tabel (**Tabel 3**).

Dengan definisi:

Sumber:Sumber variabilitas

- SS : Jumlah kuadrat (*sum of squares*) setiap sumber
- df : Derajat kebebasan (*degrees of freedom*) setiap sumber. Karena N adalah jumlah observasi/data dan k adalah jumlah grup, maka $N - k$ adalah derajat kebebasan dalam grup (kesalahan), $k - 1$ adalah derajat kebebasan antar grup (kolom), dan $N - 1$ adalah derajat kebebasan total: $N - 1 = (N - k) + (k - 1)$
- MS : Kuadrat rata-rata (*mean squares*) setiap sumber, yaitu SS/df
- F : F -statistik, yaitu perbandingan MS atau σ
- Prob>F: p -value, probabilitas F -statistik lebih besar dari F hitung.
anova1 memberikan probabilitas ini dari *cdf* distribusi F
- Grup : Variabilitas karena perbedaan antar grup
- Kolom : Variabilitas karena perbedaan data setiap grup dan rata-rata grup (variabilitas didalam grup)
- Total : Variabilitas total

Jika nilai p lebih kecil dari level signifikansi, maka paling sedikit satu sampel sangat berbeda dengan sampel lainnya. Level signifikansi yang biasa digunakan adalah 0,05 dan 0,01. Untuk penelitian ini digunakan 0,05. F -statistik adalah perbandingan kesalahan rata-rata kuadrat. p -value adalah probabilitas bahwa tes statistik dapat mencapai nilai lebih besar atau sama dengan nilai tes hitung. p -value yang kecil berarti hipotesa nol ditolak atau ada perbedaan antara dua sampel.

Data OGIMET adalah data sekunder. Data primer (*insitu*) bisa menghasilkan nilai-nilai SS, df, MS, F dan p -value yang berbeda dengan data-data sekunder (OGIMET), tetapi karena metode ANOVA1 tidak memperhatikan nilai mutlak, maka karakter yang dihasilkan akan sama.

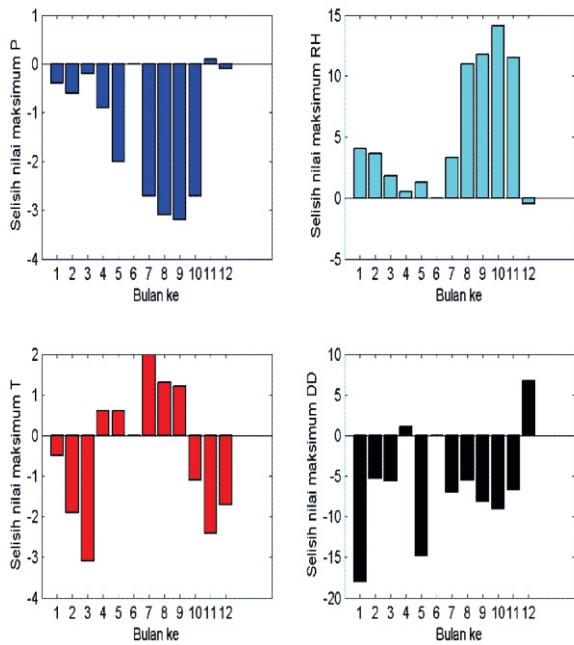
3. Hasil dan Pembahasan

Pada **Tabel 2** ditunjukkan bahwa sudut datang sinar matahari untuk Padang berbeda dengan sudut datang sinar matahari di Selaparang. Jika hanya faktor sudut datang saja yang diperhatikan maka dapat dipastikan bahwa intensitas radiasi matahari yang diterima di dua lokasi tersebut berbeda. Intensitas radiasi matahari yang berbeda menyebabkan karakter parameter atmosfer juga berbeda. Perbedaan atau kesamaan antara parameter atmosfer permukaan di Padang dan Selaparang, dalam penelitian ini akan dikaji berdasarkan data. Bab ini akan menguraikan perbandingan pola parameter atmosfer di Padang dengan parameter sejenis di Selaparang. Yang

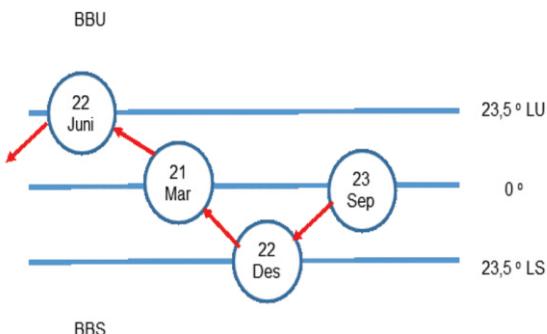
pertama, perbandingan dilakukan melalui nilai-nilai maksimum, minimum, rata-rata dan koefisien variasi. Selanjutnya perbandingan akan dilihat melalui ANOVA1 yang sudah menjadi pilihan menu metode dalam Matlab.

Perbandingan Berbasis Nilai. Pada subbab ini, selanjutnya diuraikan perbandingan berdasarkan nilai maksimum, nilai minimum, nilai rata-rata dan nilai koefisien variasi. Perbandingan nilai maksimum, minimum dan nilai rata-rata antara parameter atmosfer Padang dengan Selaparang disajikan dalam bentuk selisih keduanya. Selisih nilai maksimum tekanan, kelembapan, suhu dan kecepatan angin antara Padang dan Selaparang ditunjukkan pada Gambar 1. Selisih tekanan maksimum dan kecepatan angin maksimum umumnya negatif atau tekanan/kecepatan angin Padang lebih rendah dibandingkan tekanan di Selaparang. Sedangkan selisih kelembapan relatif bernilai positif atau berarti kelembapan Padang lebih tinggi dibandingkan kelembapan Selaparang. Selisih nilai suhu maksimum menunjukkan nilai positif dan negatif. Artinya bahwa perbedaan suhu maksimum antara Padang dan Selaparang tidak konsisten. Pada bulan-bulan Januari, Februari, Maret, Oktober, November dan Desember suhu Padang lebih dingin dibandingkan Selaparang sedangkan pada bulan-bulan April sampai dengan September suhu di Padang lebih panas dibandingkan Selaparang. Berdasarkan selisih nilai maksimum, maka tekanan, kelembapan, temperatur dan kecepatan angin di Padang berbeda dengan parameter sejenis di Selaparang.

Suhu maksimum di Padang lebih tinggi pada bulan April sampai dengan Oktober, karena berkaitan dengan posisi matahari. Pada Gambar 2 nampak bahwa matahari berada di Belahan Bumi Utara (BBU) mulai bulan Maret akhir sampai awal bulan September, sehingga suhu permukaan di Padang lebih tinggi dibandingkan Selaparang yang berada lebih ke selatan. Pola selisih nilai maksimum tekanan, kelembapan dan angin tidak menunjukkan keterkaitan dengan posisi semua matahari terhadap bumi. Tekanan dan kecepatan angin di Padang yang lebih rendah dibandingkan tekanan/kecepatan angin di Selaparang dan kelembapan yang lebih tinggi lebih berkaitan dengan ketinggian tempat. Ketinggian tempat Padang dari 0 sampai 1,85 m di atas permukaan laut, sedangkan Selaparang ketinggian maksimum mencapai 26 m.

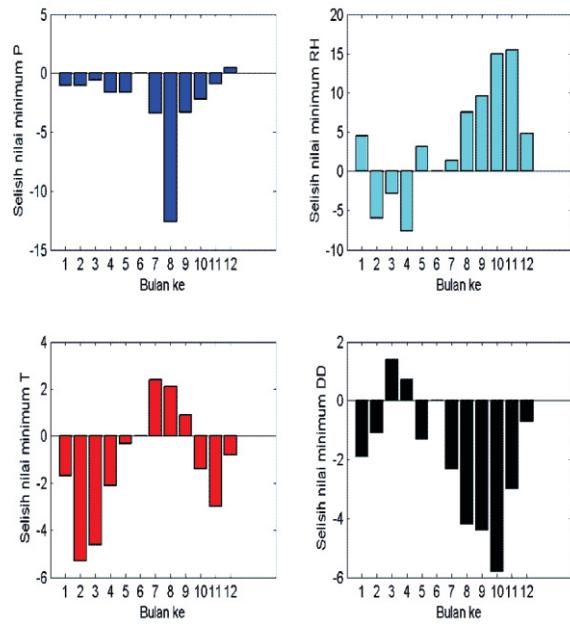


Gambar 1. Selisih nilai maksimum P (tekanan), RH (kelembapan), T (suhu) dan DD (kecepatan angin) antara Padang dan Selaparang

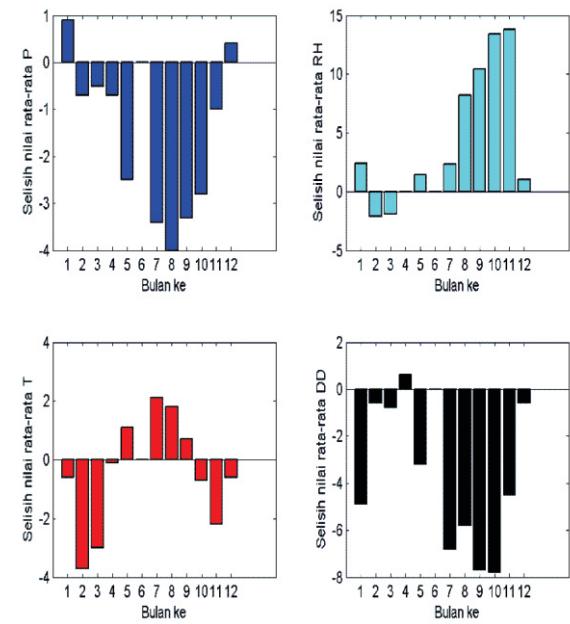


Gambar 2. Posisi semu matahari

Pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**, diperlihatkan selisih nilai minimum dan rata-rata untuk tekanan, kelembapan, temperatur dan kecepatan angin. Adanya nilai selisih nilai minimum tekanan, kelembapan, temperatur dan kecepatan angin antara Padang dan Selaparang menunjukkan perbedaan karakter keduanya. Demikian pula untuk selisih nilai rata-rata, menunjukkan perbedaan antara Padang dan Selaparang. Pola selisih nilai minimum (Gambar 3) dan pola nilai rata-rata (Gambar 4) memiliki pola yang serupa dengan pola selisih nilai maksimum (Gambar 1). Hal ini menunjukkan konsistensi parameter-parameter tersebut terhadap faktor pemicunya, yaitu posisi lintang dan posisi ketinggian.



Gambar 3. Selisih nilai minimum P (tekanan), RH (kelembapan), T (suhu) dan DD (kecepatan angin) antara Padang dan Selaparang

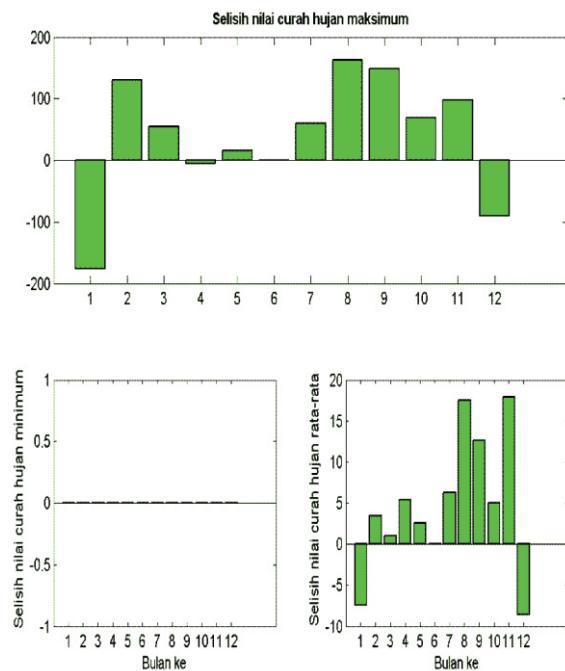


Gambar 4. Selisih nilai rata-rata P (tekanan), RH (kelembapan), T (suhu) dan DD (kecepatan angin)

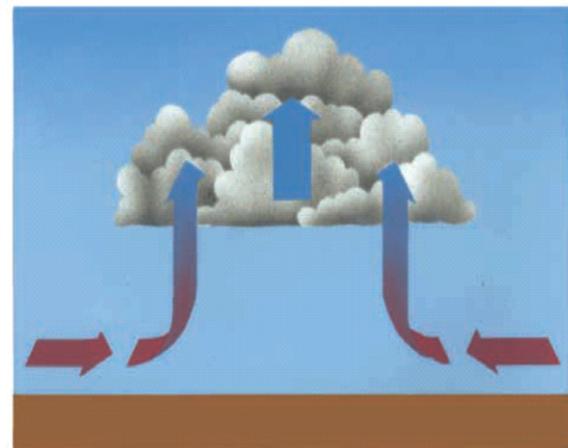
Selisih nilai maksimum, minimum dan rata-rata untuk curah hujan diperlihatkan pada **Gambar 5**. Nampak dari gambar tersebut selisih-selisih untuk nilai maksimum, minimum dan rata-rata untuk curah hujan tidak nol, atau parameter yang dibandingkan tidak sama. Selisih nilai minimum nol karena nilai minimum rata-rata masing-masing adalah nol.

Pada Gambar 5 juga ditunjukkan bahwa curah hujan di Padang lebih tinggi dibandingkan di Selaparang. Konveksi akan terjadi jika suhu tinggi menyebabkan

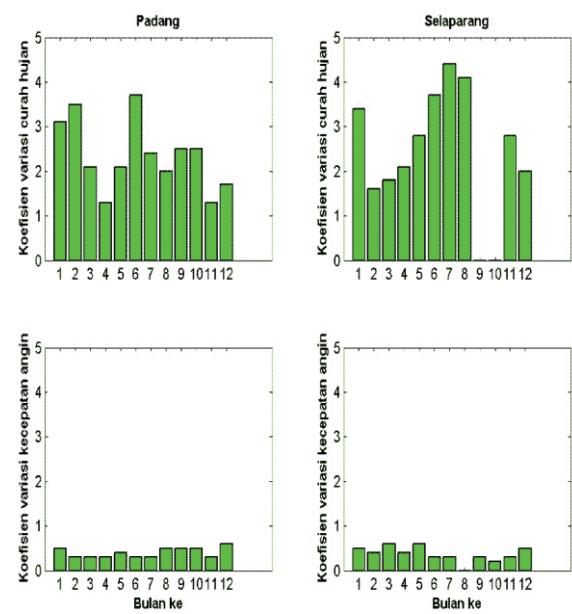
udara memuoi, menjadi ringan, kemudian bergerak ke atas. Di permukaan datar gerak massa udara ke lapisan atas terjadi karena konvergensi (Gambar 6). Agar gerakan ke atas terjadi secara kontinu maka perlu pendorong yang tidak lain adalah kontras suhu/tekanan dengan lingkungan, baik diperlukan maupun sepanjang kolom konveksi. Selanjutnya, jika udara yang naik bisa mencapai titik kondensasi akan membentuk butir-butir awan dan faktor yang bekerja selanjutnya adalah kelembapan yang dibawa dari permukaan ke level atas. Semakin banyak terbentuk butir-butir awan maka semakin banyak kemungkinan terbentuknya tetes-tetes hujan. Konvergensi menjadi penting dalam mekanisme pembentukan awan dan hujan, meskipun tidak semua konvergensi dapat menghasilkan awan dan hujan, jika massa udara yang naik mempunyai kadar kelembapan yang rendah. Kelembapan di Padang secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan di Selaparang, ini menjadi faktor penentu mengapa curah hujan di Padang lebih tinggi daripada di Selaparang.



Gambar 5. Selisih nilai maksimum, minimum dan rata-rata curah hujan antara Padang dan Selaparang



Gambar 6. Konvergensi di permukaan [12]



Gambar 7. Koefisien variasi curah hujan dan kecepatan angin (kiri: Padang, kanan: Selaparang)

Perbandingan terakhir adalah berdasarkan koefisien variasi. Koefisien variasi adalah rata-rata dibagi deviasi standar. Perbedaan koefisien variasi yang sangat kecil nampak pada koefisien variasi untuk tekanan, kelembapan dan temperatur, karena memang nilai koefisien variasinya kecil. Sedangkan untuk curah hujan dan kecepatan angin nampak ada perbedaan antara Padang dan Selaparang pada nilai-nilai tersebut (Gambar 7).

Dari perbandingan nilai-nilai maksimum, minimum, rata-rata dan koefisien variasi, secara umum menunjukkan nilai yang tidak nol, berarti ada perbedaan antara Padang dan Selaparang pada nilai-nilai tersebut.

Perbandingan kelembapan, tekanan, temperatur, curah hujan dan kecepatan angin antara Padang dan Selaparang berdasarkan nilai dan koefisien variasi menunjukkan bahwa dua data tersebut berbeda.

Perbandingan Berbasis Kuadrat Rata-rata (ANOVA). Selanjutnya adalah penggunaan ANOVA untuk memperoleh kesamaan/perbedaan karakter parameter atmosfer di Padang dan Selaparang. Pada Tabel 4 untuk P (tekanan bulan Januari) nilai F statistiknya adalah 49,817. Sedangkan *p-value* adalah 0,00, artinya bahwa kemungkinan F statistik > F hitung sangat kecil, ini berarti test ditolak yang berarti pula bahwa tekanan pada bulan Januari di Padang berbeda dengan tekanan di Selaparang. Contoh lain, untuk temperatur pada bulan April menunjukkan *p-value* yang sedang yaitu 0,698. Ini berarti hipotesa diterima dan temperatur bulan April di Padang sama dengan temperatur bulan yang sama di Selaparang. Pada Tabel 4, nampak bahwa pada umumnya hipotesa ditolak (*p-value* <<) atau berarti data Padang dan Selaparang berbeda kecuali curah hujan pada bulan Maret, kelembapan dan temperatur pada bulan April. Bulan Maret dan April adalah waktu dimana matahari berada tepat di atas ekuator dan dekat ekuator. Meskipun beda sudut datang matahari antara Padang dan Selaparang pada bulan tersebut 8° , namun tidak berpengaruh pada curah hujan, kelembapan dan temperatur pada saat itu. Jarak matahari yang dekat ke bumi bisa saja menyebabkan panas yang diterima permukaan Padang dan Selaparang sama. Sedangkan kelembapan udara Selaparang yang hampir sama dengan di Padang di bulan April bisa disebabkan ada suplai massa lembap dari tempat lain.

Penelitian ini merupakan salah satu penelitian yang memanfaatkan metode ANOVA1 untuk menggali karakter parameter atmosfer secara statistik. Telah ditunjukkan bahwa metode ini mendukung hasil yang diperoleh dari metode statistik sederhana (nilai maksimum, nilai minimum, rata-rata dan koefisien variasi). Telah disinggung diatas bahwa dalam [7] *Analysis of variance* (ANOVA) digunakan dalam bidang pemodelan atmosfer, tepatnya adalah untuk menguji perbedaan hasil antara dua model dinamik. Hasilnya menunjukkan bahwa ada perbedaan proyeksi temperatur dan hujan antara dua model tersebut. Dampak dari hasil ini adalah memberikan pilihan model mana yang terbaik setelah dibandingkan dengan observasi. Penerapan ANOVA dalam pemodelan atmosfer juga dilakukan dalam [8]. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaruh geografi pada profil temperatur dan variabilitas parameter atmosfer model perlu mendapatkan perhatian untuk koreksi pemodelan selanjutnya. Penerapan ANOVA dalam [13] yang menggali kinerja model memberikan masukan untuk pengembangan RCM-GCM (Regional Climate Model-Global Climate Model) selanjutnya. Metode ANOVA digunakan dalam [14] untuk menguji keterkaitan parameter dalam kasus benda jatuh di atmosfer, menunjukkan bahwa energi kinetik atmosfer lebih ditentukan oleh kecepatan

awal dibandingkan massa dan sudut azimuth. Kajian-kajian iklim terkait proyeksi iklim, perubahan iklim ataupun pemodelan cuaca yang menggunakan metode lain diantaranya seperti yang dilakukan dalam [15], [16], [17] dapat memanfaatkan metode ANOVA. Metode ANOVA juga mempunyai potensi digunakan dalam membandingkan kinerja instrument baru terhadap instrument lainnya. Salah satunya adalah RASS (Radio Acoustic Sounding System). RASS adalah sebuah instrument yang dikembangkan untuk dapat mengukur profil temperatur atmosfer (T) dengan akurasi seperti Radiosonde [18]. Pembandingan profil temperatur hasil pengukuran Radiosonde dengan profil temperatur hasil pengukuran RASS dengan ANOVA akan menambah informasi seberapa besar bias antar keduanya dan faktor apa yang mungkin bisa diperbaiki dalam pengukuran T dengan RASS sehingga akurasi semakin mendekati hasil pengukuran Radiosonde. Hasil dalam penelitian ini sejalan dengan hasil referensi-referensi tersebut di atas yang menunjukkan potensi penggunaan ANOVA dalam bidang sains atmosfer, klimatologi dan meteorologi.

Perbedaan hasil antara metode statistik sederhana manual dengan ANOVA, diduga berasal dari variasi spasial yang kecil pada periode pengamatan (Maret-April) sehingga terdeteksi adanya kesamaan pada curah hujan, kelembapan dan temperatur antara Padang dan Selaparang. Perbedaan hasil juga dimungkinkan dari pengambilan level signifikansi [8].

4. Kesimpulan

Penelitian terhadap data atmosfer permukaan yang berasal dari OGIMET periode Januari sampai Desember 2015, berdasarkan metode statistik sederhana yaitu penentuan nilai-nilai maksimum, minimum, rata-rata dan koefisien variasi untuk tekanan, temperatur, kelembapan, curah hujan dan kecepatan angin menunjukkan bahwa parameter-parameter tersebut untuk Padang berbeda dengan Selaparang. Hasil yang sama juga diperoleh dengan penerapan ANOVA. Tekanan, temperatur, kelembapan, curah hujan dan kecepatan angin antara Padang dan Selaparang berbeda dengan nilai *p-value* antara 0,0 sampai 0,2 atau lebih kecil dari 0,5, kecuali untuk curah hujan pada bulan Maret, kelembapan dan temperatur pada bulan April yang menunjukkan kesamaan atau nilai *p-value* antara 0,6 sampai 0,9. Analisis statistik sederhana tidak berhasil mengungkapkan adanya perbedaan tersebut, maka metode ANOVA1 dapat digunakan untuk mengeksplorasi karakter parameter atmosfer suatu lokasi atau perbandingannya dengan lokasi lain dengan lebih teliti.

Tabel 4. Hasil analisis ANOVA1 masing-masing parameter dan masing-masing lokasi berbasis Matlab (P = tekanan, RH = kelembaban relatif, T = temperatur, RR = curah hujan, DD = kecepatan angin)

Januari		Februari		Maret		April	
P	49,82	p-value	56,998	p-value	σ	p-value	σ
RH	54,33	0,000	46,649	0,000	29,284	0,000	0,026
T	76,31	0,000	11,060	0,001	60,385	0,000	0,151
RR	4,07	0,044	1,803	0,180	0,355	0,552	10,927
DD	253,71	0,000	6,297	0,012	10,858	0,001	12,712
Mei		Juni		Juli		Agustus	
P	755,285	0,000	362,853	0,000	796,205	0,000	637,696
RH	29,095	0,000	61,907	0,000	84,749	0,000	1797,478
T	205,825	0,000	407,999	0,000	1190,951	0,000	592,222
RR	20,691	0,000	74,626	0,000	42,497	0,000	58,832
DD	115,339	0,000	209,432	0,000	1029,208	0,000	542,110
September		Oktober		November		Desember	
P	1017,636	0,000	723,461	0,000	133,805	0,000	32,461
RH	2146,382	0,000	5513,21	0,000	2495,833	0,000	9,503
T	96,163	0,000	283,504	0,000	1226,824	0,000	65,395
RR	37,275	0,000	38,786	0,000	100,9	0,000	8,682
DD	923,203	0,000	2101,88	0,000	624,733	0,000	5,139

Dari penelitian ini juga terbukti bahwa perbedaan sudut datang matahari menyebabkan perbedaan karakter tekanan, kelembaban, temperatur, kecepatan angin dan curah hujan antara Padang dan Selaparang, secara umum. Sedikit perbedaan hasil antara metode statistik sederhana dengan ANOVA menjadi input untuk penelitian serupa.

Ucapan Terima Kasih. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fitri Rahmawati dan Hotjen Manullang (mahasiswa Universitas Sriwijaya) serta Juniarti Visa yang telah membantu pengadaan data OGIMET dan kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer atas dukungan seluruh fasilitas yang digunakan.

Daftar Pustaka

- [1] Kiehl, J. and Trenberth K. E. "Earth's Annual Global Mean Energy Budget." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol 78, pp. 197-208. 1997.
- [2] Gelman, A. (2005). "Discussion paper analysis of variance- Why it is more important than ever." *The Annals of Statistics*, vol 33, no. 1, pp. 1-53.
- [3] Härdle, W. and J. S. Marron. "Semi parametric comparison of regression curves", *The Annals. Of Statistics*, vol. 18, pp. 63-89. 1990
- [4] Wang, Y. and C. Ke. Assist: A suite of s-plus function implementing spline smoothing techniques, *Manual for the ASSIST package*. 2002
- [5] Zhang, Y., J. S. Hodges and S. Banerjee. "Smoothed ANOVA with spatial effects as a competitor to MCAR in multivariate spatial smoothing." *Annals. of Applied Statistics*, vol 3, pp. 1805-1830. 2009
- [6] Oliva, S. R. and A. J. F. Espinosa. "Monitoring of heavy metals in topsoils, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources", *Microchemical Journal*, vol 86, pp. 131-139. 2007
- [7] Wang, Y., C. Ke and M. Brown. "Shape Invariant Modelling of Circadian Rhythms with Random Effects and Smoothing Spline ANOVA Decompositions". *Bio-metrics*, vol 59, pp. 804-812. 2003
- [8] Sain, S.R., D. Nychka and L. Mearns. "Functional ANOVA and regional climate experiments: A statistical analysis of dynamic downscaling". *Environmetrics*, vol 22, no. 6, pp. 699-797. 2010.
- [9] Kaufman, C. and S. Sain. Bayesian Functional ANOVA Modeling Using Gaussian Process Prior Distributions," *Bayesian Analysis*, vol 5, pp. 123-150. 2010
- [10] Boxwell, M.. *Solar Electricity Handbook*, 204 pp, Greenstream Publishing. 2015
- [11] Wu, C. F. J., and M. Hamada. *Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*, ISBN-13: 978-0471699460, ISBN-10: 0471699462 Wiley, 2nd edition. 2009
- [12] Peterson, J. F. and D. Sack. *Physical Geography*, Chapter V: Atmospheric Pressure, Winds, and Circulation Patterns, 113-137. 2012
- [13] Mearns L. O., S. Sain, L. R. Leung, M. S. Bukovsky, S. McGinnis, S. Biner, D. Caya,

- R. W. Arritt, W. Gutowski, E. Takle, M. Snyder, R. G. Jones, A. M. B. Nunes, S. Tucker, D. Herzmann, L. McDaniel and L. Sloan. "Climate change projections of the North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP)". This article is published with open access at Springer Climatic Change, DOI 10.1007/s10584-013-0831-3. 2013
- [14]Bastien, P., S. Martin, R. Vincent and E. B. Didier. "Monte-Carlo Analysis of Object Reentry in Earth's Atmosphere Based On Taguchi Method", Conference Paper on Conference: 8th European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles Final, At Lisbon. 2015
- [15]Li, W. and Qiu B. Sensitivity of a regional climate model to land surface parameterization schemes for East Asian summer monsoon simulation, Climate Dynamics, vol 47, pp. 2293-2308. 2016.
- [16]Ham, S., Ji-Woo L. and K. Yoshimura .Assessing Future Climate Changes inthe EastAsian Summer and Winter Monsoon Using Regional Spectral Model, J. of the Meteorol. Soc. of Jpn. vol 94, pp. 69-87. 2016.
- [17]Yign Noh, Eunjeong Lee, Dong-Hoon Kim, Song-You Hong, Mee-Ja Kim, and Mi-Lim Ou. "Prediction of the diurnal warming of sea surface temperature using an atmosphere-ocean mixed layer coupled model." J. of Geophy. Res., vol 116. 2011
- [18]Alexander, S. P., T. Tsuda and J. Furumoto. Effects os Atmospheric stability on wave and energy propagation in the troposphere, J. of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 24, pp. 602- 615. 2007

PENGARUH PERUBAHAN IKLIM TERHADAP PRODUKSI PADI DI LAHAN TADAH HUJAN

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON RICE PRODUCTION IN RAINFED AREA

Woro Estiningtyas^{1*} dan Muhammad Syakir²

¹Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jl. Tentara Pelajar No 1A Cimanggu Bogor

²Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jl. Ragunan 29 Pasar Minggu Jakarta Selatan

E-mail: woro_esti@yahoo.com

Naskah masuk: 5 April 2017; Naskah diperbaiki: 21 November 2017; Naskah diterima : 22 Desember 2017

ABSTRAK

Ketergantungan yang sangat tinggi terhadap curah hujan menjadikan lahan sawah tada hujan memiliki periode tanam yang terbatas. Sementara curah hujan itu sendiri sangat dipengaruhi oleh perubahan iklim. Makalah ini menyajikan hasil analisis tentang dampak perubahan iklim terhadap produksi padi di lahan sawah tada hujan dengan model simulasi tanaman DSSAT. Lokasi penelitian yaitu Jakenan dan Ngale. Skenario perubahan iklim yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil analisis menggunakan model *Coordinated Climate-Crop Modeling Program (C3MP) Sensitivity test* Versi 2.0. Uji sensitivitas C3MP dilakukan dengan menyesuaikan kondisi iklim historis untuk mencerminkan perubahan suhu, presipitasi, dan CO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Perubahan suhu 0,5 °C dan konsentrasi CO₂ 537 ppm masih meningkatkan produksi 2,2 hingga 502,5 kg/ha di Jakenan dan 15,9 hingga 507,7 kg/ha di Ngale yang terjadi hampir di setiap Bulan mulai Januari-Desember. Perubahan suhu 1 °C dan konsentrasi CO₂ 403 ppm secara umum masih meningkatkan hasil tetapi hanya terjadi pada bulan-bulan tertentu yaitu sebesar 57,4 hingga 366,2 kg/ha di Jakenan dan 21,9 - 320,4 kg/ha di Ngale.

Kata kunci : Padi, tada hujan, DSSAT, suhu udara, curah hujan dan konsentrasi CO₂

ABSTRACT

Very high dependence on rainfall makes rain-fed land has limited the planting period for rice cultivation. While the rainfall itself strongly influenced by climate change. This paper presents the results of analysis of the relationship of climate change expressed by changes in temperature, precipitation and CO₂ concentrations on rice production in rain-fed land with crop simulation models DSSAT. Location of this research are Jakenan and Ngale. Parameters are indicators of climate change is the air temperature and CO₂ concentrations with two scenarios. Climate change scenarios used in this study is the result of analysis using a model - Crop Coordinated Climate Modeling Program (C3MP) Sensitivity test Version 2.0. C3MP sensitivity test is done by adjusting the historical climate conditions to reflect changes in temperature, precipitation, and CO₂. The results showed that the temperature change of 0.5 °C and 537 ppm CO₂ concentration still increased the production of 2.2 to 502.5 kg/ha in Jakenan and 15.9 to 507.7 kg/ha in Ngale which occurred almost every month starting January-December. Changes in temperature of 1 °C and concentration of CO₂ 403 ppm in general still increase yield but only occur in certain months that is equal to 57,4 to 366,2 kg/ha in Jakenan and 21,9 - 320,4 kg/ha in Ngale.

Keywords : Rice, rainfed, DSSAT, temperature, rainfall and CO₂ concentration

1. Pendahuluan

Dalam budidaya tanaman, ada 3 faktor yang memegang peran utama yaitu iklim, tanah dan tanaman. Ketiga faktor ini secara bersinergi menentukan tingkat produksi tanaman. Ketimpangan pada salah satu faktor akan mempengaruhi hasil akhirnya. Ketika kondisi tanah dan tanaman dalam kondisi optimal, maka iklim yang memegang peran yang lebih besar, namun kondisinya tidak bisa

dikendalikan oleh manusia. Iklim sangat dinamis dan kompleks sehingga hal yang bisa dilakukan adalah menyesuaikan dengan iklim setempat. Selain sifatnya yang sangat dinamis dan kompleks, iklim dalam jangka panjang juga telah mengalami perubahan. Indikator iklim seperti suhu udara, curah hujan telah mengalami perubahan akibat pemanasan global. Konsentrasi CO₂ juga mengalami peningkatan akibat perubahan iklim.

Lahan sebagai tempat tumbuh tanaman memiliki karakteristik yang berbeda-beda di setiap tempat dan menjadi tumpuan keberhasilan produksi. Menurut BPS luas lahan sawah di Indonesia adalah 8,1 juta hektar dimana 82% nya merupakan sawah irigasi dan 18% non irigasi, dan sebagian besar (40%) berada di Pulau Jawa [1]. Dibandingkan dengan sawah irigasi, lahan sawah tada hujan di Indonesia relatif sedikit yaitu sekitar 2,08 juta ha [2]. Lahan tada hujan bervariasi di setiap wilayah dan merupakan bagian penting dalam menghasilkan bahan pangan khususnya di negara sedang berkembang. Di Sahara Afrika lebih dari 95% lahan pertaniannya adalah tada hujan, sementara di Amerika Latin sekitar 90%, Asia Selatan 60%, Asia Timur 65% dan wilayah Timur dan Utara Afrika sekitar 75% [3]. Sementara itu, dinyatakan bahwa 2,46% wilayah dunia tidak sesuai untuk pertanian tada hujan karena perubahan iklim dan kondisi meteorologi lainnya [4]. Masalah utama di lahan tada hujan adalah kondisi biofisik dan infrastruktur sosial ekonomi yang terbatas, jaminan ketersediaan air yang tidak menentu, kesuburan tanah rendah dan pada umumnya masih tradisional dengan varietas lokal. Kondisi lahan tada hujan memperlihatkan kelangkaan air, lingkungan yang rapuh, kekeringan dan degradasi lahan karena erosi tanah oleh angin dan air, rendahnya efisiensi air (35-45%), tekanan penduduk yang tinggi, kemiskinan serta infrastruktur yang masih terbatas [5,6].

Di beberapa wilayah dunia, lahan tada hujan bisa menghasilkan produksi yang tinggi yaitu di wilayah dengan curah hujan yang relatif tersedia dan tanah yang produktif. Bahkan di daerah tropis terutama di sub humid dan zona lembab, hasil pertanian tada hujan di lahan yang komersial bisa mencapai 5-6 ton/ha [5,6]. Berdasarkan rata-rata hasil panen di lahan tada hujan sejak tahun 1960 an menunjukkan bahwa penggunaan lahan pertanian telah diperluas 20-25% dan telah memberikan kontribusi sekitar 30% dari keseluruhan pertumbuhan produksi gabah [7,8]. Output hasil yang tersisa berasal dari intensifikasi melalui peningkatan hasil per satuan luas lahan. Namun demikian variasi regional cukup besar seperti perbedaan antara pertanian lahan irigasi dan tada hujan. Di negara-negara berkembang, hasil gabah tada hujan rata-rata 1,5 ton/ha, sedangkan di lahan irigasi 3,1 ton/ha [9], dan peningkatan produksi di lahan tada hujan sebagian besar berasal dari perluasan lahan. Produktivitas padi pada lahan tada hujan umumnya lebih rendah dari hasil padi di lahan sawah irigasi dan di tingkat petani produktivitas padi sawah tada hujan berkisar 3,0 – 3,5 t/ha produktivitas lahan untuk padi gogo rancah 2,5-4 ton/ha dan 2-3 ton/ha walik jerami dan pada umumnya hanya satu kali tanam [10,11].

Terkait dengan produksi padi, maka penguasaan tentang lingkungan tumbuh padi ini sangat penting untuk menentukan cara budidaya yang paling tepat dan menguntungkan [11]. Salah satu unsur iklim yang sangat berperan terhadap ketersediaan air bagi tanaman adalah curah hujan. Tinggi rendahnya produksi padi tidak bisa dipisahkan dengan ketersediaan air bagi tanaman. Hal ini juga diungkapkan bahwa potensi hasil tanaman padi erat hubungannya dengan jaminan ketersediaan air selama musim tanam [12]. Di Indonesia, faktor penentu musim tanam adalah ketersediaan air yang dipengaruhi oleh curah hujan. Meskipun penerimaan hujan tahunan tinggi, bahkan di beberapa wilayah telah tersedia fasilitas jaringan irigasi, namun demikian periode tanam pada sebagian besar wilayah produksi tanaman pangan tetap tergantung pada kondisi penerimaan hujan musiman [13]. Artinya, curah hujan merupakan indikator yang cukup kuat untuk mengetahui fluktuasi produksi padi.

Tanaman padi membutuhkan 600 – 1200 mm air selama 90 – 120 hari dari tanam hingga panen [14]. Selama pertumbuhan tanaman padi, fase yang paling rentan terhadap kekurangan air adalah awal fase vegetatif, fase pembangunan dan fase pengisian bulir atau polong [15,16]. Kekurangan air pada fase reproduktif memberikan dampak penurunan produksi yang lebih besar dibandingkan kekurangan air pada masa vegetatif [15]. Dinyatakan bahwa peranan ketersediaan air sangat penting (kritis) pada awal pertumbuhan dan pada fase pembangunan [17]. Kekurangan air pada fase ini akan berdampak besar terhadap pertumbuhan tanaman, Peranan ketersediaan air juga penting pada saat pembentukan anakan dan pada awal fase pemasakan (pengisian biji).

Faktor iklim juga sangat mempengaruhi pertumbuhan dan produksi padi. Kenaikan suhu udara akan berdampak pada penurunan produktivitas tanaman karena peningkatan respirasi pada malam hari dan peningkatan serangan hama dan penyakit tanaman. Kejadian iklim ekstrim yang seringkali muncul berupa banjir dan kekeringan serta serangan OPT membawa dampak menurunnya luas panen akibat kerusakan tanaman dan puso. Pengaruh perubahan iklim berupa peningkatan suhu dan CO_2 terhadap tanaman juga telah banyak dilakukan penelitian [18-26].

Hubungan antara faktor iklim, tanah dan tanaman dapat dipelajari dengan melakukan simulasi tanaman. Simulasi tanaman memungkinkan untuk membuat berbagai skenario terkait dengan budidaya tanaman seperti tanggal tanam, pupuk, jenis tanah, kebutuhan air dari curah hujan dan lain-lain. Dengan demikian bisa dipelajari hubungan antar parameter

serta aplikasinya untuk budidaya tanaman. Penelitian simulasi tanaman terkait dengan peningkatan suhu dan CO₂ juga telah banyak dilakukan [27,28,29], namun untuk lahan tada hujan masih sangat terbatas. Dalam penelitian ini simulasi tanaman dilakukan untuk lahan sawah tada hujan, sedangkan perubahan iklim diwakili oleh peningkatan suhu udara, presipitasi dan konsentrasi CO₂. Hal ini didasari pertimbangan bahwa perubahan iklim akan terus terjadi dengan peningkatan aktifitas kegiatan manusia yang menghasilkan emisi karbon, dan selanjutnya akan terjadi kenaikan temperatur global. Berdasarkan simulasi model MERGE - *Model for Evaluating the Regional and Global Effects of Greenhouse Gas Reduction Policies* [30] diperoleh bahwa konsentrasi karbon global akan naik mencapai titik tertinggi sebesar 500 ppm pada tahun 2060, dan selanjutnya akan turun dengan peningkatan konsumsi teknologi rendah emisi (*carbon-free technology*). Oleh karena itu skenario perubahan suhu dan konsentrasi CO₂ dijadikan indikator untuk menggambarkan pengaruh perubahan iklim terhadap hasil tanaman. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh perubahan iklim terhadap hasil padi pada tipe lahan sawah tada hujan.

2. Metode Penelitian

Pengaruh perubahan iklim terhadap produksi padi dilakukan melalui simulasi tanaman di 2 lokasi yang mewakili sawah tada hujan, yaitu : Jakenan-Kabupaten Pati-Jawa Tengah dan Ngale-Kabupaten Ngawi-Jawa Timur. Data yang digunakan adalah data iklim, tanah dan tanaman. Data iklim yang digunakan adalah data curah hujan harian selama 30 tahun, periode 1980-2009, data tanaman yaitu padi varietas IR-64. Dominasi varietas IR-64 ditingkat petani disebabkan produksinya yang cukup tinggi. Hal ini diungkapkan juga bahwa varietas IR64 merupakan varietas yang secara nyata mampu meningkatkan potensi hasil padi sawah yang diindikasikan dari dominasi varietas IR-64 di daerah-daerah sentra produksi padi [31]. Skenario tanggal tanam yaitu tanggal 15 setiap bulan. Umur tanaman padi rata-rata 85-95 hari. Metode tanam adalah per baris dengan populasi tanaman 50 tanaman per meter persegi. Jarak tanam 25 cm, kedalaman tanam 5 cm, berat kering material tanam adalah 19 kg/ha, umur bibit 20 hari dan *initial sprout length* 10 cm. Pupuk diberikan dalam 3 tahap, yaitu pada 7, 20 dan 30 hari setelah tanam (HST). Pada 7 HST diberikan pupuk antara lain Urea 30%, SP36 100% dan KCl 50%. Pada 20 HST diberikan urea saja 40%, dan pada 30 HST diberikan lagi Urea 30% dan KCl 50%. Jenis dan dosis pupuk yang digunakan dalam input model pada setiap lokasi disajikan dalam Tabel 1. Jenis tanah untuk Ngale dan Jakenan adalah vertisol. Vertisol ini secara umum memiliki sifat sebagian besar subur, namun apabila

kekeringan retaknya bisa mencapai 10 cm atau lebih sehingga padi mudah kekeringan, sementara kalau basah sangat lengket.

Skenario perubahan iklim dilakukan menggunakan model *Coordinated Climate-Crop Modeling Program* (C3MP) *Sensitivity test* Versi 2.0. Uji sensitivitas C3MP dilakukan dengan menyesuaikan kondisi iklim historis untuk mencerminkan perubahan suhu, presipitasi, dan CO₂. Skenario dan analisis ketiga indikator ini dilakukan oleh *The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project* (AgMIP) dalam *Coordinated Climate Crop-Modelling Project* (C3MP). Running dilakukan untuk 99 skenario dimana setiap skenario berisikan perubahan suhu (*change in temperature, °C*), perubahan curah hujan (*rainfall change, %*), *rainfall multiplier (fraction of baseline)* dan konsentrasi CO₂ (ppm). Dalam 99 hasil running model tersebut skenario perubahan suhu dilakukan mulai dari -1 °C hingga 7,9 °C, perubahan curah hujan mulai dari -50% hingga 49%, rainfall multiplier 0,5 hingga 1,5 dan konsentrasi CO₂ mulai dari 333,3 ppm hingga 898,2 ppm.

Dalam makalah ini dibahas secara khusus untuk skenario 6 dan 43 untuk mewakili perubahan iklim. Skenario 43 mewakili perubahan suhu 0,5°C, perubahan curah hujan -7%, rainfall multiplier 0,93 dan konsentrasi CO₂ 537 ppm. Untuk skenario 6 mewakili perubahan suhu 1°C, perubahan curah hujan 34%, rainfall multiplier 1,34 dan konsentrasi CO₂ 403 ppm.

Estimasi produksi padi dalam penelitian ini menggunakan model simulasi tanaman *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT ver.4.5). Skenario dan simulasi tanam dilakukan dengan asumsi tidak ada simbiosis, efisiensi radiasi dan panen pada saat tanaman sudah masak. Lahan untuk padi dibuat tergenang selama masa pertumbuhan sehingga pemberian pupuknya dipilih *broadcast onflooded*.

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Curah Hujan dan Suhu Udara. Berdasarkan data curah hujan rata-rata bulanan periode 1980-2010 (31 tahun) menunjukkan bahwa pola curah hujan di lokasi penelitian adalah monsunal. Hal ini dicirikan dengan satu puncak hujan terendah. Curah hujan terendah pada umumnya terjadi pada Bulan Agustus, sedangkan curah hujan tertinggi pada Bulan Januari (Gambar 1). Rata-rata curah hujan di Jakenan 131 mm/bulang dengan kisaran 40-291 mm/bulang. Untuk Ngale memiliki curah hujan rata-rata sedikit lebih tinggi yaitu 168 mm/bulang dengan kisaran 26-309 mm/bulang. Apabila dibandingkan dengan evaporasi, baik Jakenan maupun Ngale

memiliki pola evaporasi yang mirip dengan pola curah hujan namun besarnya jauh lebih tinggi dibandingkan curah hujannya. Hal ini merupakan salah satu ciri lahan tada hujan. Evaporasi di Jakenan berkisar antara 605-1056 mm/bulan dengan rata-rata 895 mm/bulan, sedangkan di Ngale berkisar antara 547-1102 mm/bulan dengan rata-rata 924 mm/bulan (Gambar 1). Ditinjau dari tren curah hujan, baik di lokasi Jakenan maupun Ngale keduanya mengalami penurunan selama kurun waktu 30 tahun (1980-2010). Kisaran penurunan curah hujan sekitar 13-18 mm per tahun (Gambar 2).

Fluktuasi suhu udara minimum dan maksimum memperlihatkan pola yang hampir seragam karena memang untuk suhu perbedaan nilainya tidak terlalu besar sehingga cenderung rata dan hampir sama setiap bulan. Ada sedikit peningkatan di Bulan Oktober November seiring dengan peningkatan curah hujan. Hal ini menjelaskan bahwa pada bulan-bulan tersebut potensi penguapannya tinggi yang memicu turunnya hujan. Suhu minimum di Jakenan dan Ngale tidak berbeda jauh, berkisar antara 23,9-25,3 °C dan suhu maksimum 30,4-32,5 °C (Gambar 3). Ditinjau dari klimatologi pertanian, di Indonesia suhu udara dapat berperan sebagai kendali pada usaha pengembangan tanaman padi di dataran tinggi. Sebagian besar padi

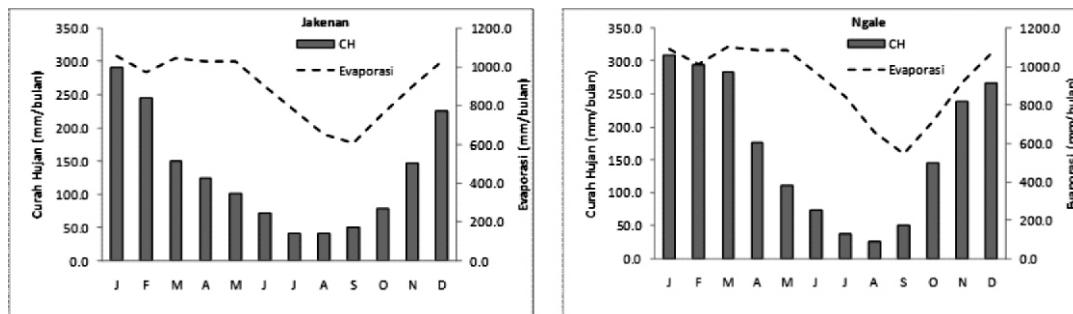
unggul dapat berproduksi dengan baik sampai pada ketinggian 700 mdpl, demikian juga kedelai, kacang tanah dan kacang hijau.

Untuk suhu udara, hampir semua menunjukkan tren meningkat. Rata-rata laju peningkatan suhu udara sekitar 0,01°C per tahun (Gambar 4). Terjadinya peningkatan suhu akan berpengaruh pada berbagai aktivitas biologi dan fisiologi berbagai makhluk hidup. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kenaikan suhu sangat berpengaruh pada perubahan tingkat serangan berbagai jenis penyakit baik pada manusia, hewan maupun tanaman. Pada tanaman, peningkatan suhu berdampak pada pemasakan phisiologis tanaman lebih awal, outbreak OPT sehingga dapat menurunkan produksi tanaman.

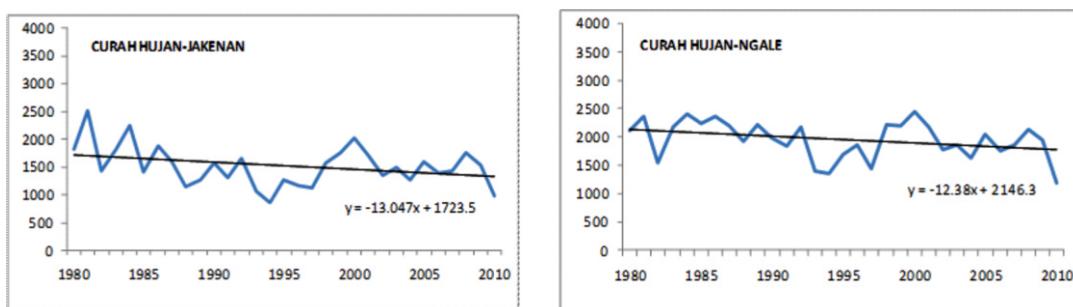
Proyeksi Perubahan Iklim. Proyeksi perubahan iklim yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil proyeksi oleh *The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project* (Ag MIP) dengan model C3MP yang menghasilkan 99 skenario. Dalam proyeksi ini digunakan 3 parameter iklim, yaitu perubahan suhu udara, presipitasi dan konsentrasi CO₂. Pembahasan proyeksi perubahan iklim didasarkan pada perbandingan pola suhu dan curah hujan pada kondisi riil dengan pola setelah ada proyeksi perubahan iklim.

Tabel 1. Jenis dan dosis pupuk pada setiap lokasi

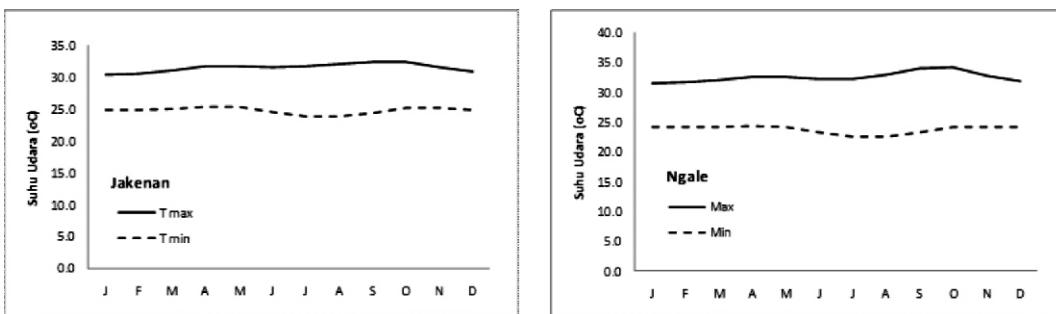
Kec	Kab	Prov	Lat	Long	Elevasi	Urea	Pupuk SP 36	KCl
Jakenan	Pati	Jawa Tengah	-6.633	111.167	7	350	75	50
Ngale	Ngawi	Jawa Timur	-7.433	111.383	55	300	75	50



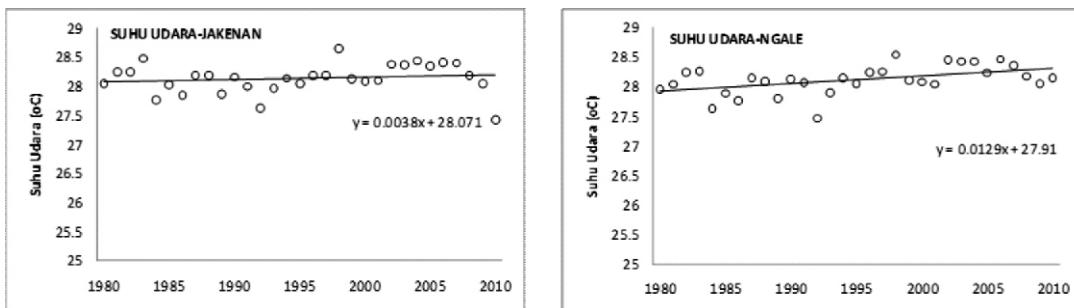
Gambar 1. Pola curah hujan dan evaporasi di Jakenan dan Ngale



Gambar 2. Tren curah hujan di Jakenan dan Ngale selama 30 tahun (1980-2010)



Gambar 3. Fluktuasi suhu udara maksimum dan minimum di Jakenan dan Ngale



Gambar 4. Tren suhu udara periode 1980-2010 (30 tahun) di Jakenan dan Ngale

Berdasarkan skenario perubahan suhu udara dengan 99 skenario, maka diperkirakan suhu akan menurun 1°C hingga meningkat $7,9^{\circ}\text{C}$. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2000) telah menyusun berbagai skenario proyeksi gas rumah kaca sampai tahun 2100. Berdasarkan pendekatan modeling diperoleh bahwa apabila konsentrasi CO_2 meningkat dua kali lipat dari konsentrasi saat ini maka diperkirakan suhu udara global akan meningkat antara 1.3°C sampai 2.7°C . Perubahan ini akan mengakibatkan terjadinya perubahan sistem iklim global akibat terjadinya perubahan berbagai proses fisika yang terjadi antara laut dan atmosfer.

Untuk presipitasi diskenariokan mengalami penurunan hingga 50% atau peningkatan hingga 49%. Artinya pada skenario yang minimum, curah hujan menurun hingga setengahnya atau meningkat 1,49 kali dari normalnya. Untuk CO_2 , kisarannya mulai dari 333 hingga 898 ppm. Sebagai perbandingan saat ini konsentrasi CO_2 di Atmosfer mencapai 400 ppm. Ketua *the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Profesor Rajendra Pachauri, menyatakan pada awal industrialisasi konsentrasi CO_2 hanya 280 ppm, namun saat ini kadar CO_2 di udara telah melewati ambang batas aman.

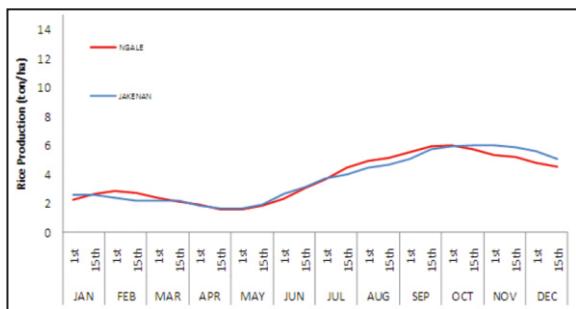
Studi yang dilakukan LAPAN [32] menunjukkan bahwa pada kondisi konsentrasi CO_2 dua kali lipat dari konsentrasi CO_2 saat ini, frekuensi kejadian ENSO yang saat ini terjadi sekali dalam 3-7 tahun akan meningkat menjadi sekali dalam 2-5 tahun. Apabila konsentrasi 3 kali konsentrasi sekarang, frekuensi kejadian meningkat menjadi sekali dalam 2-3 tahun.

Selain itu, intensitas ENSO juga diperkirakan meningkat menjadi dua sampai tiga kali lipat. Dengan demikian dalam kondisi terjadinya pemanasan global, frekuensi dan intensitas kejadian iklim ekstrim akan meningkat.

Potensi Hasil Padi Tanpa Skenario Perubahan Iklim. Hasil simulasi tanaman padi tanpa skenario perubahan iklim menunjukkan untuk padi tada hujan rata-rata potensi hasilnya adalah 3700 kg/ha atau sekitar 3,7 ton/ha, dengan kisaran hasil padi pada sawah tada hujan adalah 1,6 – 6 ton/ha. Puncak hasil tertinggi padi tada hujan adalah sekitar Bulan Oktober-November (Gambar 5).

Hal ini sangat terkait dengan pola curah hujan masing-masing lokasi. Untuk lokasi sawah tada hujan (Ngale dan Jekenan) hasil tertinggi seiring dengan curah hujan tinggi yang terjadi pada musim hujan (MH) sekitar Bulan Oktober-Maret untuk sebagian besar wilayah di Pulau Jawa. Sementara hasil rendah terjadi pada Bulan April-Mei.

Penelitian untuk mengetahui hubungan antara presipitasi dengan suhu udara dilakukan di United States dengan menggunakan data selama 80 tahun pada 1000 stasiun hujan. Hasilnya menunjukkan bahwa pada musim panas, presipitasi dan suhu udara memiliki korelasi negatif yang diindikasikan dengan musim panas yang hangat cenderung kering terutama di bagian pusat dan bagian selatan Great Plains. Sebaliknya pada musim basah berkorelasi positif terutama di bagian selatan Great Lakes [33].



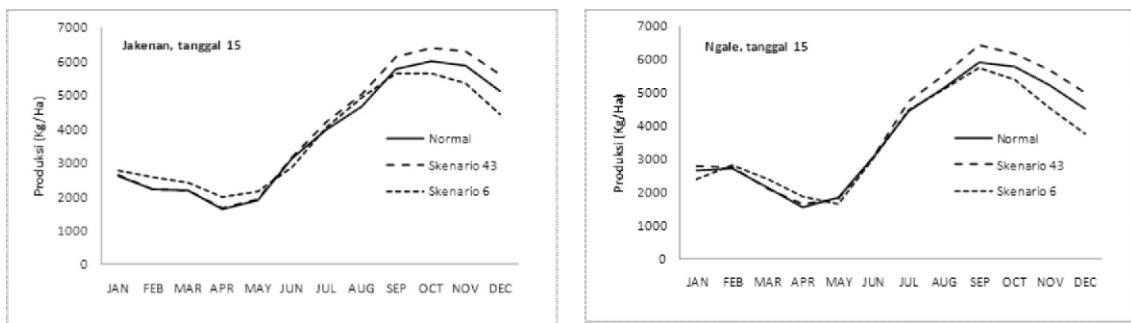
Gambar5. Fluktuasi hasil padi tada hujan tanpa skenario perubahan iklim

Potensi Hasil Padi Berdasarkan Skenario Perubahan Iklim. Untuk mengetahui keragaman produksi padi akibat perubahan iklim, maka dilakukan running dengan 2 skenario, yaitu : (1) skenario 6 dengan batasan : perubahan suhu 1°C , perubahan curah hujan 34%, rainfall multiplier 1,34 dan konsentrasi CO_2 403 ppm, (2) skenario 43 dengan batasan : perubahan suhu $0,5^{\circ}\text{C}$, perubahan curah hujan -7%, rainfall multiplier 0,93 dan konsentrasi CO_2 537 ppm. Skenario perubahan suhu dilakukan sebagai pendekatan dalam running karena berdasarkan hasil proyeksi suhu diperkirakan terus meningkat. Informasi ini sejalan dengan hasil penelitian [34] yang menyebutkan bahwa diperkirakan akan terjadi kenaikan suhu udara sebesar $0,5^{\circ}\text{C}$ pada tahun 2025 dan 1°C pada tahun 2050. Selain itu juga digunakan skenario kenaikan konsentrasi CO_2 dua kali lipat berdasarkan hasil kajian dari IPCC [35]. Dalam penelitian ini skenario perubahan suhu udara $0,5^{\circ}\text{C}$ dan 1°C , sedangkan konsentrasi CO_2 yang digunakan yaitu 403 ppm dan 537 ppm. Tanggal tanam adalah tanggal 15 setiap bulan. Pembandingan dilakukan untuk kondisi baseline (normal) dan kondisi berdasarkan skenario 6 dan 43. Lahan sawah tada hujan diwakili oleh kondisi di Jakenan, Kabupaten Pati, Provinsi Jawa Tengah dan Kecamatan Ngale, Kabupaten Ngawi, Provinsi Jawa Timur.

Hasil analisis di Jakenan menunjukkan bahwa pada kondisi normal produksi padi berkisar antara 1629,7 hingga 5990,3 kg/ha. Penerapan skenario perubahan suhu sebesar $0,5^{\circ}\text{C}$ dan konsentrasi CO_2 537 ppm (skenario 43) menghasilkan potensi hasil berkisar antara 1663,5 hingga 6399,8 kg/ha. Apabila dibandingkan antara hasil normal dengan hasil skenario 43 diperoleh bahwa terjadi peningkatan hasil hampir di setiap bulannya kecuali Bulan Februari yang terjadi penurunan tetapi sangat kecil yaitu 0,1 kg/ha. Peningkatan hasil berkisar antara 2,2 hingga 502,5 kg/ha. Peningkatan hasil tertinggi terjadi pada Bulan Desember bertepatan dengan musim hujan sehingga kebutuhan air untuk tanaman tercukupi. Untuk skenario perubahan suhu 1°C dan konsentrasi CO_2 403 ppm menghasilkan potensi hasil 1995,9 sampai dengan 5623,0 kg/ha. Perubahan suhu dan konsentrasi

CO_2 meningkatkan hasil di bulan tertentu yaitu Januari-Mei dan Juli-Agustus, sedangkan pada Bulan Juni, September hingga Desember terjadi penurunan hasil. Peningkatan hasil berkisar antara 57,4 hingga 366,2 kg/ha, sedangkan penurunan hasil berkisar antara 142,9 hingga 677,3 kg/ha. Peningkatan hasil yang paling tinggi terjadi pada Bulan April (Gambar 6). Berdasarkan hasil rata-rata MH pada skenario 43 lebih tinggi dibandingkan kondisi normalnya, sedangkan pada skenario 6 lebih rendah. Artinya peningkatan suhu $0,5^{\circ}\text{C}$ masih memberikan dampak positif berupa peningkatan hasil pada MH di Jakenan sebesar 225,7 kg/ha. Sementara peningkatan suhu 1°C akan memberikan dampak berupa penurunan produksi sekitar 143,6 kg/ha. Pada MK, kedua skenario memberikan dampak berupa peningkatan produksi rata sebesar 92,1 kg/ha pada skenario 6 dan 171,6 kg/ha pada skenario 43 (Tabel 2).

Untuk kabupaten Ngale, pada kondisi normal potensi hasil berkisar antara 1557,7 hingga 5908,3 kg/ha. Perubahan suhu $0,5^{\circ}\text{C}$ dan konsentrasi CO_2 537 ppm (skenario 43) memberikan respon berupa peningkatan hasil kecuali pada Maret dan Mei. Peningkatan hasil berkisar antara 15,9 hingga 507,7 kg/ha. Sementara penurunan hasil terjadi pada Bulan Maret 32,7 kg/ha dan 59,7 kg/ha pada Bulan Mei. Untuk skenario perubahan suhu 1°C dan konsentrasi CO_2 403 ppm (skenario 6) memperlihatkan peningkatan hasil pada Bulan Februari-April dan Juli dengan kisaran 21,9 hingga 320,4 kg/ha. Sementara terjadi penurunan hasil di Bulan Januari, Mei-Juni, Agustus-Desember dengan kisaran 8,2 hingga 755,0 kg/ha (Gambar 6). Berdasarkan hasil rata-rata produksi pada MH, skenario 43 memberikan dampak berupa peningkatan produksi sebesar 243,0 kg/ha, sedangkan skenario 6 memberikan dampak berupa penurunan produksi 287,7 kg/ha. Dampak yang sama terjadi pada MK, dimana skenario 43 memberikan dampak positif peningkatan hasil sebesar 206,0 kg/ha dan skenario 6 penurunan hasil 13,4 kg/ha (Tabel 2). Berdasarkan hasil tersebut di atas, secara umum menunjukkan bahwa peningkatan suhu $0,5^{\circ}\text{C}$, CO_2 537 ppm dan penurunan curah hujan 7% masih memberikan dampak peningkatan produksi baik pada MH maupun MK. Sementara apabila suhu meningkat menjadi 1°C , CO_2 403 ppm dan perubahan curah hujan 34% dari normalnya akan memberikan dampak negatif berupa penurunan produksi baik pada MH maupun MK. Sebagai gambaran, hasil penelitian [36] menunjukkan bahwa hasil padi meningkat secara signifikan dengan peningkatan konsentrasi CO_2 tetapi menurun pada suhu malam hari yg tinggi. Pengaruh suhu dan curah hujan terhadap produktifitas padi juga menunjukkan bahwa peningkatan suhu $2,5^{\circ}\text{C}$ dan peningkatan curah hujan 25% akan menurunkan produktifitas padi dari 6,86 ton/ha menjadi 3,54 ton/ha [37].



Gambar 6. Fluktuasi produksi padi di Jakenan dan Ngale untuk skenario tanam tanggal 15

Tabel 2. Hasil simulasi produksi padi di Jakenan dan Ngale

Skenario/ lokasi	PRODUKSI PADA MUSIM HUJAN (Kg/ha)						PRODUKSI PADA MUSIM KEMARAU (Kg/ha)							
	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Rata2	Apr	Mei	Jun	Jul	Ags	Sep	Rata2
Jakenan														
Normal	5990.3	5876.5	5099.3	2603.4	2204.6	2180.0	3992.3	1629.7	1889.6	3108.6	3972.4	4648.8	5764.6	3502.3
Skenario 43	6399.8	6294.6	5601.8	2625.1	2204.5	2182.2	4218.0	1663.5	1912.2	3143.6	4208.3	5004.1	6111.6	3673.9
Skenario 6	5623.0	5326.7	4422.0	2749.2	2561.5	2409.8	3848.7	1995.9	2133.9	2867.9	4029.7	4917.2	5621.7	3594.4
Selisih hasil														
Skenario 43	-409.5	-418.1	-502.5	-21.7	0.1	-2.2	-225.7	-33.9	-22.6	-35.0	-236.0	-355.3	-347.0	-171.6
Skenario 6	367.2	549.8	677.3	-145.8	-357.0	-229.8	143.6	-366.2	-244.3	240.7	-57.4	-268.4	142.9	-92.1
Ngale														
Normal	5759.3	5215.2	4508.1	2645.7	2727.5	2147.7	3833.9	1557.7	1857.9	3028.8	4438.2	5121.3	5908.3	3652.1
Skenario 43	6161.6	5661.2	4984.2	2787.9	2751.7	2115.0	4076.9	1639.0	1798.3	3044.7	4731.2	5519.2	6416.0	3858.1
Skenario 6	5367.2	4543.5	3753.1	2404.1	2815.1	2394.2	3546.2	1878.1	1632.9	3020.7	4460.1	5100.8	5739.4	3638.7
Selisih hasil														
Skenario 43	-402.3	-446.0	-476.1	-142.2	-24.3	32.7	-243.0	-81.2	59.7	-15.9	-293.0	-397.9	-507.7	-206.0
Skenario 6	392.1	671.7	755.0	241.6	-87.7	-246.5	287.7	-320.4	225.0	8.2	-21.9	20.5	168.9	13.4

Berdasarkan hasil tersebut di atas terlihat bahwa perubahan suhu $0,5^{\circ}\text{C}$ dan konsentrasi CO_2 537 ppm masih mampu meningkatkan hasil hampir sepanjang tahun baik di Jakenan maupun di Ngale. Sementara pada perubahan suhu 1°C dan konsentrasi CO_2 403 ppm masih mampu meningkatkan hasil tetapi pada periode yang lebih pendek. Artinya pengaruh perubahan suhu dan konsentrasi CO_2 pada batas tertentu mampu meningkatkan hasil, tetapi selebihnya akan menurunkan produksi.

Tanaman membutuhkan CO_2 untuk pertumbuhannya. Peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer akan merangsang proses fotosintesis, meningkatkan pertumbuhan tanaman dan produktivitas pertanian tanpa diikuti oleh peningkatan kebutuhan air (transpirasi). Sebaliknya, kenaikan suhu di permukaan bumi mempunyai pengaruh yang "kurang menguntungkan" terhadap pertanian, dapat mengurangi bahkan menghilangkan pengaruh positif dari kenaikan CO_2 . Gas CO_2 merupakan sumber karbon utama bagi pertumbuhan tanaman. Konsentrasi CO_2 di atmosfer saat ini belum optimal, sehingga penambahan CO_2 kepada tanaman di dalam industri pertanian di dalam rumah kaca merupakan

kegiatan normal untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman seperti tomat, selada, timun dan bunga potong. Pengaruh fisiologis utama dari kenaikan CO_2 adalah meningkatnya laju assimilasi (laju pengikatan CO_2 untuk membentuk karbohidrat, fotosintesis) di dalam daun. Efisiensi penggunaan faktor-faktor pertumbuhan lainnya (seperti radiasi matahari, air dan nutrisi) juga akan ikut meningkat. Jika konsentrasi CO_2 di atmosfer ditingkatkan, hasil dari kompetisi antara CO_2 dan O_2 akan lebih menguntungkan CO_2 , sehingga fotorespirasi terhambat dan assimilasi akan bertambah besar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatnya suhu daun dari 15°C ke 35°C menyebabkan laju asimilasi (laju pengikatan CO_2 untuk membentuk karbohidrat, fotosintesis) di dalam daun bertambah besar. Meningkatnya asimilasi dengan kenaikan suhu merupakan fenomena umum, sampai suhu optimum tercapai, lalu akan terjadi penurunan. Adanya kenaikan CO_2 di atmosfer akan merubah suhu optimum tanaman. Dampak perubahan iklim juga dipelajari di India yang menunjukkan bahwa variasi iklim seperti kekeringan merupakan penyebab utama menurunnya produksi dan penurunan pendapatan bersih petani di lahan tada hujan di Dharwad India

[38]. Sebagai perbandingan hasil penelitian di Cina menunjukkan bahwa dengan skenario perubahan iklim sampai dengan 2050 diperkirakan hasil padi meningkat 7,9-11,9% [39].

Dalam rangka pencapaian dan mempertahankan swasembada pangan 7 komoditas utama Padi, Jagung, Kedelai (PAJALE), Sapi, Tebu, Bawang Merah, dan Cabe, Kementerian Pertanian sedang giat melaksanakan program Upaya Khusus (UPSK) di berbagai lokasi di seluruh Indonesia. UPSK dilaksanakan dengan mengimplementasikan berbagai teknologi dalam rangka peningkatan luas tambah tanam dan produksi. Hal ini juga sekaligus sebagai upaya mewujudkan harapan Indonesia menjadi lumbung pangan dunia pada tahun 2045. Berdasarkan data proyeksi, diperkirakan pada tahun 2045 dibutuhkan lahan sawah seluas 10,12 juta ha sementara luas sawah yang tersedia tahun 2016 adalah 8,11 juta ha (69.000 ha/tahun). Berdasarkan hasil penelitian [40] laju konversi lahan diperkirakan 1,19 %/tahun, dan karena konversi dengan laju tersebut, maka lahan sawah seluas 8,11 juta ha pada tahun 2010 tersebut akan mencuat menjadi 6,2 juta ha pada tahun 2045 bila konversi berlanjut dengan skenario *business as usual* (BAU). Peningkatan kebutuhan dan konversi lahan sawah mengharuskan adanya pencetakan sawah. Apabila laju konversi berlanjut seperti sekarang (BAU), maka untuk mengatasinya diperlukan pencetakan sawah seluas 130.000 ha/tahun. Pada tahun 2025 diperkirakan diperlukan sekitar 7,3 juta ha lahan bukaan baru untuk pengembangan padi, jagung, kedelai, tebu dan hortikultura, sedangkan pada tahun 2050 diperkirakan diperlukan tambahan lahan sekitar 14,9 juta ha sawah, lahan kering dan rawa. Oleh karena itu, saat ini Kementerian Pertanian giat melakukan upaya pemanfaatan lahan-lahan marginal dalam rangka menambah luas tanam seperti di lahan bekas tambang dan wilayah perbatasan. Untuk lahan sawah program peningkatan indeks pertanaman (IP) terus diupayakan melalui optimalisasi pemanfaatan sumber air. Sumber air diupayakan melalui embung, dam parit, *long storage*, pompanisasi dan saluran air dengan luas layanan saat ini sekitar 1.056.538 ha. Lahan sawah tada hujan juga menjadi salah satu peluang peningkatan luas tambah tanam dan produksi. Salah satu strategi peningkatan produksi di lahan tada hujan adalah optimalisasi lahan terutama terkait dengan pengelolaan sumberdaya iklim dan air. Perubahan iklim tidak dapat dihindari, oleh karena itu perlu dilakukan adaptasi atau penyesuaian tanpa mengabaikan mitigasi dengan tujuan peningkatan produksi. Penyesuaian dan pemilihan saat tanam yang tepat menjadi kunci keberhasilan tanam dan produksi. Penentuan teknologi seperti pemilihan varietas yang adaptif dan teknologi pengelolaan tanaman terpadu perlu dilakukan. Penggunaan

teknologi Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT) membuktikan bahwa VUB yang ditanam secara gogoranah pada lahan sawah tada hujan mampu menghasilkan gabah setara dengan hasil gabah VUB pada sawah irigasi. Kenaikan hasil 1-2 ton/ha akan menambah produksi padi nasional 2-4 juta ton [11]. Hal ini menunjukkan apabila dikelola dengan baik dan didukung dengan teknologi yang tepat, maka lahan tada hujan berpotensi dan berperan dalam peningkatan produksi padi nasional. Hasil penelitian di Jakenan menunjukkan bahwa petani sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor dalam budidaya tanaman yaitu : praktik pengelolaan, pengetahuan tentang prakiraan iklim, serta proses pengambilan keputusan terkait dengan informasi iklim [41]. Pemberdayaan sekolah lapang iklim, sekolah pengendalian hama terpadu dan lain-lain perlu dioptimalkan untuk meningkatkan pemahaman dan pemberdayaan petani untuk lebih peduli iklim. Pengelolaan sumberdaya lahan, iklim dan air menjadi kunci optimalisasi lahan tada hujan didukung dengan teknologi lainnya seperti penggunaan varietas yang adaptif, pupuk, dan sebagainya. Peran teknologi pertanian sangat besar dalam rangka meminimalkan risiko akibat perubahan iklim. Oleh karena itu, teknologi yang tepat guna, tepat sasaran dan tepat waktu perlu disosialisasikan dan didesiminasi.

4. Kesimpulan

Perubahan iklim yang diindikasikan melalui perubahan suhu udara, perubahan curah hujan dan konsentrasi CO_2 membawa pengaruh terhadap hasil padi di lahan tada hujan di Jakenan dan Ngale.

Untuk lokasi Jakenan, berdasarkan hasil rata-rata MH perubahan suhu $0,5^{\circ}\text{C}$, perubahan curah hujan -7% dan konsentrasi CO_2 537 ppm (skenario 43) masih memberikan dampak positif berupa peningkatan hasil pada MH sebesar 225,7 kg/ha. Sementara peningkatan suhu 1°C , perubahan curah hujan 34% dan CO_2 403 ppm (skenario 6) akan memberikan dampak penurunan produksi sekitar 143,6 kg/ha. Pada MK, kedua skenario memberikan dampak berupa peningkatan produksi rata sebesar 92,1 kg/ha pada skenario 6 dan 171,6 kg/ha pada skenario 43.

Untuk lokasi Ngale, berdasarkan hasil rata-rata produksi pada MH, skenario 43 memberikan dampak berupa peningkatan produksi sebesar 243,0 kg/ha, sedangkan skenario 6 memberikan dampak berupa penurunan produksi 287,7 kg/ha. Dampak yang sama terjadi pada MK, dimana skenario 43 memberikan dampak positif peningkatan hasil sebesar 206,0 kg/ha dan skenario 6 penurunan hasil 13,4 kg/ha.

Berdasarkan musim tanam, skenario 43 masih memberikan dampak peningkatan rata-rata produksi padi tada hujan pada MH di Jakenan 225,7 kg/ha, di

Ngale 243,0 kg/ha, dan pada MK di Jakenan 171,6 kg/ha dan di Ngale 206,0 kg/ha. Sementara skenario 6 akan memberikan dampak berupa penurunan produksi pada MH di Jakenan 143,6 kg/ha dan di Ngale 287,7 kg/ha serta MK di Ngale 13,4 kg/ha, sedangkan MK di Jakenan masih memberikan dampak peningkatan hasil padi rata-rata sebesar 92,1 kg/ha.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada *The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project* (Ag MIP) melalui *Coordinated Climate-Crop Modeling Program* (C3MP) untuk penyediaan data proyeksi perubahan iklim (suhu udara, presipitasi dan CO₂). Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Dr. Istiqlal Amien yang telah membantu memfasilitasi data-data proyeksi dengan C3MP serta Dr. Haris Syahbuddin yang telah memberikan saran dan masukan terhadap makalah ini. Ucapan terima kasih disampaikan juga kepada Sisi Febrianti Muin, SSi, MS yang telah membantu dalam running DSSAT. Semoga hasil penelitian ini bermanfaat bagi seluruh pengguna.

Daftar Pustaka

- [1] BPS. *Laporan Hasil Sensus Pertanian 2013 (Pencacahan Lengkap)*. Badan Pusat Statistik. 2013
- [2] Fagi, A.M.. *Strategies for Improving Rainfed Lowland Rice Production System in Central Java*. In Ingram, K.T.(Ed), *Rainfed Lowland Rice : Agricultural Research for High-Risk Environments*, Manila : IRRI, p 189-199. 1995
- [3] Wani,S.P, T.K. Sreedevi, J. Rockström and Y.S. Ramakrishna. *Rainfed Agriculture-Past Trend and Future Prospects. Book Rainfed Agriculture : Unlocking the Potential*. Cabi in association with ICRISAT and IWMI. 2009
- [4] Valipour, M. Necessity of Irrigated and Rainfed Agriculture in The World. Irrigation and Drainage Systems Enginerring. 2013.
- [5] Wani, S.P., Pathak, P., Jangawad, L.S., Eswaran, H. and Singh, P. "Improved management of vertisols in the semi-arid tropics for increased productivity and soil carbon sequestration." *Soil Use and Management*, vol. 19, pp. 217–222. 2003.
- [6] Rockström, J., Hatibu, N., Oweis, T. and Wani, S.P. Managing water in rainfed agriculture. In: Molden, D. (ed.) *Water for Food, Water for Life: a Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Earthscan, London, UK and International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka, pp. 315–348. 2007
- [7] FAO Agriculture: towards 2015/30. Technical Interim Report. <http://www.fao.org/es/esd/at2015/toce.htm>, diakses 2 Maret 2017.
- [8] Ramankutty, N., Foley, J.A. and Olejniczak, N.J. "People and land: changes in global population and croplands during the 20th century." *Ambio*, vol 31, no3, pp. 251–257. 2002.
- [9] Rosegrant, M., Ximing, C., Cline, S. and Nakagawa, N. *The role of rain-fed agriculture in the future of global food production. EPTD Discussion Paper No. 90*, Environment and Production Technology Division, IFPRI, Washington, DC, USA. 2002.
- [10] Setiobudi, D. and B. Suprihatno. *Res-pone of flooding in gogorancah rice and moisture stress effect at repro-ductive stage in walik jerami rice*. p.: 80-90 In *Physiology of Stress Tolerance in Rice* (V.P. Singh, R.K. Singh, B.B. Sing and R.S. Zeigler, ed.). NDUAT, India – IRRI, Philippines. 1996.
- [11] Fagi, A.M, dan I. Las. *Lingkungan Tumbuh Padi dalam Padi Buku 1*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor. 319 Hal. 1988
- [12] Taslim, H, dan A.M. Fagi. *Ragam Budidaya Padi dalam Padi Buku 1*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor. 319 Hal. 1988.
- [13] Hidayati, R., Impron, and B. D. Dasanto. Pengembangan kalender tanaman semi-dinamik untuk penyusunan alternatif pola tanam dengan risiko iklim minimum berdasarkan karakteristik ENSO. Laporan Hasil Penelitian-Hibah Penelitian I-MHERE B2C. Bogor. 2010
- [14] De Datta, S. K. *Principles and Practices of Rice Production*. John Wiley & Sons, New York. 1981.
- [15] Biswas, A.K and Chouduri, M.A. "Effect of water stress at different development stages of fiefs grown rice". *Biol. Plant.* vol 26, pp. 263-266. 1984
- [16] Mapegau. "Pengaruh cekaman air terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai (*Glycine max L. Merr.*)". *J. Ilmiah Pertanian*, vol. 41, pp. 43-51. 2006.
- [17] Vergara, B.S, Jackson, B and Datta, S.K. de. "Deep water rice and its response to deep water stress". In *Climate and Rice*. vol 30, pp. 1-19. 1976
- [18] Weiguo Cheng, Hidemitsu Sakai, Kazuyuki Yagi, Toshihiro Hasegawa. 2009. Interactions of elevated [CO₂] and night temperature on rice growth and yield. *Agricultural and Forest*

- Meteorology*, vol 149, pp 51–58. 2009.
- [19] Roy, K.S, P. Bhattacharyya, S. Neogi, K.S. Rao, T.K. Adhya. “Combined effect of elevated CO₂ and temperature on dry matter production, net assimilation rate, C and N allocations in tropical rice (*Oryza sativa* L.)”. *Field Crops Research*, vol 139, pp. 71–79. 2012.
- [20] Bhattacharyya, P, K.S. Roy, S. Neogi, P.K. Dash a, A.K. Nayak, S. Mohanty a, M.J. Baig, R.K. Sarkar, K.S. Rao. “Impact of elevated CO₂ and temperature on soil C and N dynamics in relation to CH₄ and N₂O emissions from tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.)”. *Science of the Total Environment*, vol 461–462, 2013.
- [21] Chen Chao1, Zhou Guang-sheng and Zhou Li.. “Impacts of Climate Change on Rice Yield in China From 1961 to 2010 Based on Provincial Data”. *Journal of Integrative Agriculture*, vol 13, no 7, pp. 1555-1564. 2014
- [22] Bocchiola, D.. “Impact of potential climate change on crop yield and water footprint of rice in the Po valley of Italy.” *Agricultural Systems*, vol 139, pp. 223-237. 2015
- [23] Nanyan Deng, Xiaoxia Ling, Yang Sun, Congde Zhang, Shah Fahad, Shaobing Peng, Kehui Cui, Lixiao Nie, Jianliang Huang. 2015. “Influence of temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system.” *Europ. J. Agronomy*, vol 64, pp. 37–46.
- [24] Sushree Sagarika Satapathy, Dillip Kumar Swain, Surendranath Pasupalak, and Pratap Bhanu Singh Bhadoria. “Effect of elevated [CO₂] and nutrient management on wet and dry season rice production in subtropical India.” *The Crop Journal*, vol 3, pp. 468–480. 2015.
- [25] Zhang Jiahua, Fengmei Yao, Cui Hao, and Vijendra Boken. “Impacts of temperature on rice yields of different rice cultivation systems in southern China over the past 40 years”. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol 87, 153–159. 2015
- [26] Shuai Zhang, Fulu Tao, and Zhao Zhang. “Changes in extreme temperatures and their impacts on rice yields in southern China from 1981 to 2009.” *Field Crops Research*, vol 189, pp. 43–50. 2016.
- [27] Krishnan P, D.K. Swain, B. Chandra Bhaskar, S.K. Nayak, and R.N. Dash. “Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies.” *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol 122, pp. 233–242. 2007.
- [28] Kazuki Saito, Ibnou Dieng, Ali A.Toure, Eklou A.Somado, and Marco C.S.Wopereis. “Rice yield growth analysis for 24 African countries over 1960–2012.” *Global Food Security*, vol 5, pp. 62–69. 2015.
- [29] Casper J. van der Kooi, Martin Reich, Markus Löwc, Luit J. De Koka, Michael Tausza. “Growth and yield stimulation under elevated CO₂ and drought: A meta-analysis on crops.” *Environmental and Experimental Botany*, vol 122, pp. 150–157. 2016
- [30] Manne, A and R. Richels. “The greenhouse debate : economic efficiency burden sharing and hedging strategies.” *The Energy Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 1-37. 1995.
- [31] Hafsa, M.J. dan T. Sudaryanto. *Sejarah Intensifikasi Padi dan Prospek Pengembangannya. Ekonomi Padi dan Beras Indonesia. (Ed. F. Kasryno, et.al., 2004)*. Badan Litbang Pertanian, Jakarta. 2004.
- [32] Ratag, M.A., Nested Climate Modelling. *First International Conference on Science and Its Impact on Indonesian Maritim Continent*, Jakarta. Desember 1997
- [33] Zhao, W and M.A.K. Khalil. “The Relationship between Precipitation and Temperature over the Contiguous United States.” *American Meteorology Society*, vol. 6, no. 6, 1993
- [34] Boer, R, I. Las dan J.S. Baharsjah, 2003. “Analisis Kerentanan dan Adaptasi Terhadap Keragaman dan Perubahan Iklim.” *Paper disajikan dalam Simposium VI Perhimpini, Biotrop 9-10 September 2003*.
- [35] IPCC. Emission scenarios. *A Special Report of Working Group III of the IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. 2000
- [36] Cheng, W, H. Sakai, K. Yagi and T. Hasegawa. “Interactions of elevated [CO₂] and night temperature on rice growth and yield. Agricultural and Forest Meteorology”, vol 149, pp. 51-58. 2009
- [37] Hosang, P.R, J. Tatuh dan J.E.X, Rogi. 2012. “Analisis Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produksi Beras Provinsi Sulawesi Utara Tahun 2013 – 2030.” *Eugenia*, vol. 18, no. 3, 2012.
- [38] Asha latha K. V., Munisamy Gopinath, and A. R. S. Bhat. “Impact of Climate Change on Rainfed Agriculture in India : A Case Study of Dharwad.” *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 3, no. 4, 2012.
- [39] Zang J, L. Feng, H. Zou and D.L. Liu. 2015. “Using ORYZA2000 to model cold rice yield response to climate change in the Heilongjiang province, China.” *The Crop Journal*, vol 3, 317-327.
- [40] Ka Balai Besar Penelitian dan Pengembangan

- Sumberdaya Pertanian (BBSDLP). *Grand Design Penyediaan Sumberdaya Lahan untuk Pengembangan Tujuh Komoditas Strategis*. Bahan Tayang. 2016.
- [41] Dewi, E.R. and A.M. Whitbread. "Use of Climate Forecast Information to Manage Lowland Rice-Based Cropping Systems in Jakenan, Central Java, Indonesia." *Asian Journal of Agricultural Research*. vol 11, 66-77. 2017

PROFIL LAPSE RATE VERTIKAL DI WILAYAH INDONESIA

VERTICAL LAPSE RATE PROFILE OVER INDONESIA

Lisnawati^{1*}, Erwin E. S. Makmur², Donaldi S. Permana²

¹Pusat Layanan Informasi Iklim Terapan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, 10610

^{2,3}Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, 10610

*Email : lisna94.watiamg@gmail.com

Naskah masuk: 6 November 2017; Naskah diperbaiki: 24 November 2017; Naskah diterima: 22 Desember 2017

ABSTRAK

Profil *lapse rate* (penurunan suhu terhadap ketinggian) vertikal di wilayah Indonesia sangat penting dalam menganalisa pengaruh *lapse rate* terhadap proses pembentukan awan dan inversi di lapisan troposfer bawah serta terjadinya kabut di pagi hari. Penelitian ini menggunakan 5 lokasi (Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon) di Indonesia yang dipilih berdasarkan ketersediaan, kelengkapan, dan validitas data observasi udara lapisan atas yang paling optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun dan menganalisa profil bulanan *lapse rate* vertikal pada jam 00 dan 12 UTC berdasarkan data observasi radiosonde yakni suhu udara vertikal harian pada tahun 2007-2016. Metode yang digunakan adalah proses menghilangkan data pencilan, interpolasi data, dan menghitung nilai statistik, dan *lapse rate*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata ketinggian troposfer mencapai 16,8 km dengan *lapse rate* rata-rata kelima wilayah tersebut pada jam 00 UTC adalah $\sim 0,64^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan pada jam 12 UTC adalah $\sim 0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Selain itu, ketinggian puncak tropopause pada bulan Desember dan Januari-April lebih tinggi daripada saat bulan Juni-September. Inversi permukaan terjadi pada bulan Maret, Juni, dan Juli di Medan serta pada bulan September-Oktober di Jakarta dengan rata-rata inversi permukaan adalah sekitar $-0,07^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ pada jam 00 UTC. Rata-rata tahunan tinggi inversi di stratosfer pada jam 00 dan 12 UTC yakni pada 17,1 km dengan rata-rata bulanan tinggi inversi pada Januari-Mei dan Desember lebih tinggi daripada saat Juni-November sedangkan rata-rata inversi di stratosfer adalah $-0,265^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Kata kunci: profil *lapse rate* vertikal, suhu udara, inversi, radiosonde, tropopause

ABSTRACT

The vertical lapse rate profiles in Indonesia is very crucial in analyzing the lapse rate effect on cloud formation and inversion at the lower troposphere and the morning fog occurrence. This study uses 5 selected locations (Medan, Padang, Jakarta, Palu and Ambon) in Indonesia based on the availability, completeness, and validity of the observed upper-air data. The research aim to create and analyze the monthly vertical lapse rate profiles at 00 and 12 UTC based on daily vertical air temperature in 2007-2016. The methods include removing outlier, data interpolation and calculating statistics, and lapse rate. The results show that the mean troposphere altitude reaches 16.8 km with the mean lapse rate at 00 and 12 UTC are $\sim 0.64^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ and $\sim 0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, respectively. The tropopause peak altitude in December and January-April is higher than during June-September. Surface inversion occurred on March, June, and July in Medan and during September-October in Jakarta with the mean surface inversion is $-0,07^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ at 00 UTC. Annual mean inversion altitude in the stratosphere at both times is 17.1 km with monthly mean of inversion altitude during January-May and December is higher than during June-November, while the mean inversion in the stratosphere is $-0.265^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Keywords: vertical *lapse rate* profile, air temperature, inversion, radiosonde, tropopause

1. Pendahuluan

Pengamatan udara atas di Indonesia dilakukan dengan pengamatan PIBAL (Pilot Balon) dan RASON (Radiosonde) yang merupakan tugas pokok Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Menurut *Global Climate Observing System Upper-air Network* (GUAN) dalam *World Meteorological Organization* (WMO) No 544 tahun

2003 [1], diketahui bahwa pengamatan udara atas merupakan bagian dari bahan analisis klimatologi yang dilakukan sebagai bahan pertimbangan untuk analisis cuaca. Selain itu, sejak tahun 1940 observasi udara atas dengan menggunakan Radiosonde telah menjadi bagian yang representatif untuk digunakan dalam observasi atmosfer [2]. Berdasarkan informasi BMKG, pengamatan Radiosonde hingga tahun 2015 sudah dilakukan di 23 lokasi di wilayah Indonesia,

tetapi masih jarang dimanfaatkan datanya, sebagaimana dalam pencarian referensi untuk analisis klimatologis Indonesia yang menggunakan pengolahan data Radiosonde, seperti suhu udara dan laju susut suhu (*lapse rate*) yang masih jarang ditemukan. Menurut *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) [3], *lapse rate* adalah laju perubahan dari variabel atmosfer, yaitu biasanya suhu terhadap ketinggian. *Lapse rate* dianggap positif ketika variabel menurun terhadap ketinggian. *Lapse rate* (laju susut suhu) didefinisikan sebagai penurunan suhu terhadap ketinggian atmosfer atau gradien suhu vertikal negatif [4]. Selain itu, diketahui bahwa penyusutan suhu terjadi dengan cepat, akibat kenaikan ketinggian di atas benua dalam musim panas dan di atas lautan pada musim dingin.

Penelitian terkait perhitungan nilai *lapse rate* di Indonesia telah dilakukan oleh Permana [5] untuk wilayah Papua berdasarkan data *Automatic Weather Stations* (AWSs) dan radiosonde. Penelitian terbaru dari Syaifulullah [6] telah menganalisis kondisi udara atas di Indonesia secara umum menggunakan rentang data 5 tahun (2010-2014). Tujuan penelitian ini adalah secara spesifik membuat dan menganalisis profil bulanan *lapse rate* vertikal di beberapa wilayah di Indonesia yang memiliki data historis yang lengkap dan rentang waktu yang lebih panjang (2007 – 2016), diantaranya, yaitu Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon.

2. Metode Penelitian

Data yang digunakan adalah data observasi suhu udara vertikal harian pada jam 00 dan 12 UTC berdasarkan waktu pengamatan Radiosonde yang dilakukan oleh BMKG pada periode 1 Januari 2007-31 Desember 2016. Wilayah penelitian yang dipilih berdasarkan kelengkapan dan historis data yang baik, lengkap, dan panjang adalah Unit Pelaksana Teknis (UPT) BMKG yaitu, Stasiun Meteorologi Kualanamu, Medan, Stasiun Meteorologi Minangkabau, Padang, Stasiun Meteorologi Soekarno-Hatta Cengkareng, Jakarta, Stasiun Meteorologi Mutiara, Palu, dan Stasiun Meteorologi Pattimura, Ambon. Datanya diperoleh pada alamat: <https://esrl.noaa.gov/raobs/> dengan format FSL (*Forecast Systems Laboratory*) (berbentuk teks ASCII) [7].

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah: **Interpolasi.** Interpolasi adalah cara menentukan nilai yang berada di antara dua nilai diketahui berdasarkan suatu fungsi persamaan. Interpolasi linear adalah cara menentukan nilai yang berada di antara dua nilai diketahui berdasarkan persamaan linear (persamaan garis lurus) [8].

Sehingga diperoleh persamaan dari interpolasi linier sebagai berikut:

$$Y = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} (X - X_1) + Y_1 \quad (1)$$

Menghilangkan Data Penculan. *Outlier* atau data penculan adalah suatu data yang menyimpang dari sekumpulan data lainnya dan tidak mengikuti sebagian besar pola data. Data yang dihilangkan adalah yang termasuk *outlier* dan ekstrim. Pada penelitian ini, semua data baik *outlier* ataupun ekstrim dihilangkan karena analisis klimatologis dan hanya menggunakan data rata-rata. Suatu nilai dikatakan *outlier* jika::

$$Q3 + (1.5 \times IQR) < \text{outlier} \leq Q3 + (3 \times IQR)$$

Atau

$$Q1 - (1.5 \times IQR) > \text{outlier} \geq Q1 - (3 \times IQR) \quad (2)$$

Selain itu, suatu nilai dikatakan ekstrim jika lebih besar dari $Q3 + (3 \times IQR)$ atau lebih kecil dari $Q1 - (3 \times IQR)$ [9].

Rata-Rata. *Mean* atau rata-rata adalah nilai yang mewakili himpunan atau sekelompok data [10]. Dengan kata lain, nilai rata-rata mempunyai kecenderungan memusat sehingga sering disebut ukuran kecenderungan memusat, rata-rata dapat dirumuskan:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3)$$

Keterangan:

μ = mean atau rata-rata

N = jumlah semua data

$\sum_{i=1}^N X_i$ = jumlah semua frekuensi dari 1 hingga N

Perhitungan rata-rata ini digunakan untuk memperoleh profil suhu udara dan *lapse rate* vertikal pada jam 00 dan 12 UTC per lapisan ketinggian untuk tiap bulan. Kemudian, dari hasil tersebut dibuat grafik profil suhu udara vertikal per bulan pada jam 00 dan 12 UTC untuk wilayah Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon

Median, Maksimum, dan Minimum. Median dapat dibatasi sebagai suatu nilai yang membatasi 50% frekuensi distribusi bagian bawah dengan 50% frekuensi distribusi bagian atas [11]. Untuk mencari median pada data tak berkelompok, dilakukan dengan [12]:

a. Menyusun data dari terkecil ke terbesar.

b. Mencari letak median dengan rumus:

$$\text{Letak median saat ukuran data N ganjil} = \frac{(N+1)}{2} \quad (4)$$

$$\text{Letak median saat ukuran data N genap} = \frac{(N+2)}{2} \text{ dan } \frac{(N)}{2} \quad (5)$$

Nilai median untuk N genap adalah rata-rata dari dua nilai antara data yang terletak di $(N+2)/2$ dan data yang terletak di $(N/2)$ [13].

Keterangan: N = banyaknya data

c. Mencari harga atau nilainya.

Perhitungan Lapse Rate. Menghitung *lapse rate* antar lapisan per bulan pada jam 00 dan 12 UTC dapat dilakukan dengan rumusan sebagai berikut [14]:

$$\gamma = -\frac{\partial T}{\partial Z} \quad (6)$$

Keterangan:

γ = *lapse rate* ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)

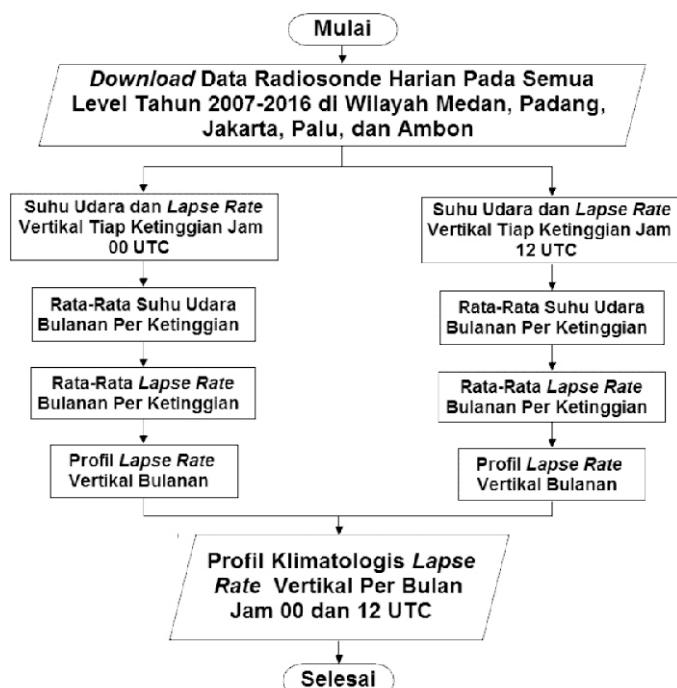
∂T = perubahan suhu ($^{\circ}\text{C}$)

∂Z = perubahan ketinggian (m)

Berdasarkan perhitungan *lapse rate*, per bulan, dan pada jam 00 dan 12 UTC maka dapat diperoleh informasi mengenai profil *lapse rate* bulanan pada jam 00 dan 12 UTC di wilayah Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon. Pada Gambar 1. diketahui 5 lokasi penelitian di Indonesia dan pada Gambar 2. diketahui diagram alir penelitiannya.



Gambar 1. Lokasi penelitian.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

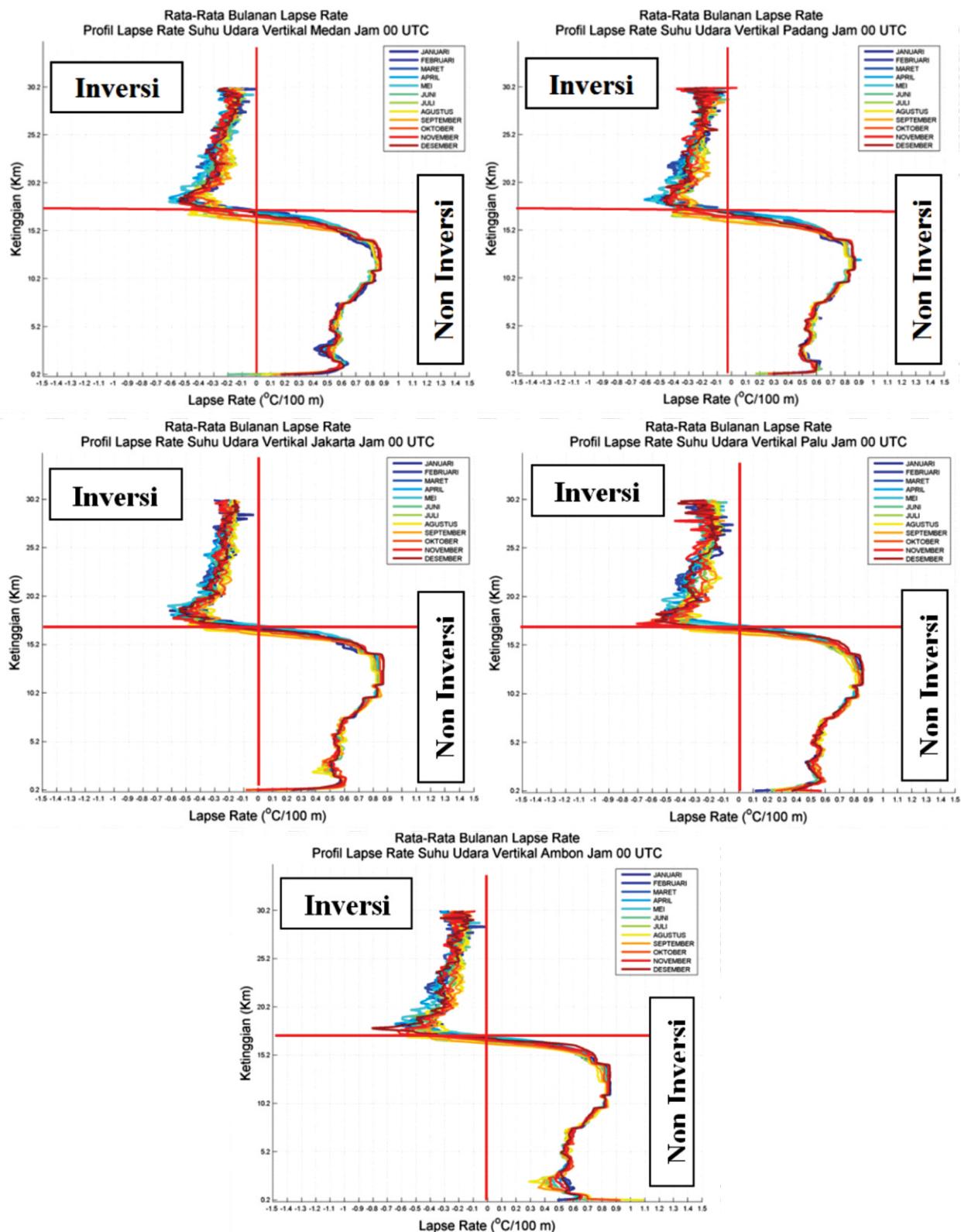
Profil Lapse Rate Jam 00 UTC. Untuk menyatakan penurunan suhu terhadap perubahan ketinggian (*lapse rate*) yang biasanya terjadi di lapisan troposfer dan peningkatan suhu terhadap ketinggian (inversi) yang biasanya terjadi di lapisan stratosfer digunakan satuan $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ yang merupakan salah satu satuan standar yang lazim digunakan di BMKG. Pada Gambar 3. diketahui bahwa *lapse rate* positif adalah kejadian penurunan suhu terhadap ketinggian dan berada di lapisan troposfer dan lapisan bukan (non) inversi (peningkatan suhu udara terhadap ketinggian), sedangkan *lapse rate* negatif adalah kejadian kenaikan suhu terhadap ketinggian (inversi) dan juga sudah berada di lapisan stratosfer [4], walaupun juga terdapat inversi di permukaan (troposfer) yang dapat menimbulkan terjadinya kabut di pagi hari. Berdasarkan Gambar 3. dapat diketahui bahwa secara umum pola profil *lapse rate* bulanan untuk kelima wilayah pada jam 00 UTC hampir sama dengan variasi berbeda yang terjadi pada setiap bulannya, seperti perbedaan *lapse rate* di wilayah Padang dan Medan di permukaan troposfer. Medan mempunyai *lapse rate* negatif, sedangkan Padang tidak mempunyai *lapse rate* negatif serta perbedaan suhu awal inversi dan ketinggian tropopausenya sebagaimana yang terlihat pada Gambar 3, Gambar 7, dan Tabel 2.

Berdasarkan Gambar 4. diketahui inversi (peningkatan suhu terhadap ketinggian) permukaan yang terjadi di troposfer pada ketinggian sekitar 0,2 km (200 meter) hanya terjadi di Medan dan Jakarta pada jam 00 UTC. Hal ini menunjukkan bahwa inversi tidak hanya terjadi di lapisan stratosfer, tetapi terjadi juga di permukaan (troposfer). Pada Gambar 5. menunjukkan pola profil di troposfer bawah untuk wilayah Medan diketahui *lapse rate* negatif yang berarti terjadi inversi permukaan yang dapat menimbulkan kabut di pagi hari terjadi pada bulan Maret, Juni, dan Juli dengan nilai $-0,2$ sampai $-0,05^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ pada ketinggian 0,2 km (200 m) yang berarti bahwa pada ketinggian kurang dari 200 m suhu lingkungan meningkat $0,05\text{--}0,2^{\circ}\text{C}$ setiap ketinggian 100 meter. Kemudian, untuk Jakarta diketahui *lapse rate* negatif atau inversi di permukaan (troposfer) terjadi pada bulan September-November dengan nilai $-0,08$ sampai $-0,01^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ pada ketinggian 0,2 km (200 m) (Gambar 6). Kemudian, pada Gambar 3. untuk wilayah Medan diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 2-4 km hingga mencapai nilai $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ yang berarti bahwa suhu lingkungan menurun $0,4^{\circ}\text{C}$ setiap 100 meter. Selanjutnya, untuk wilayah Padang diketahui

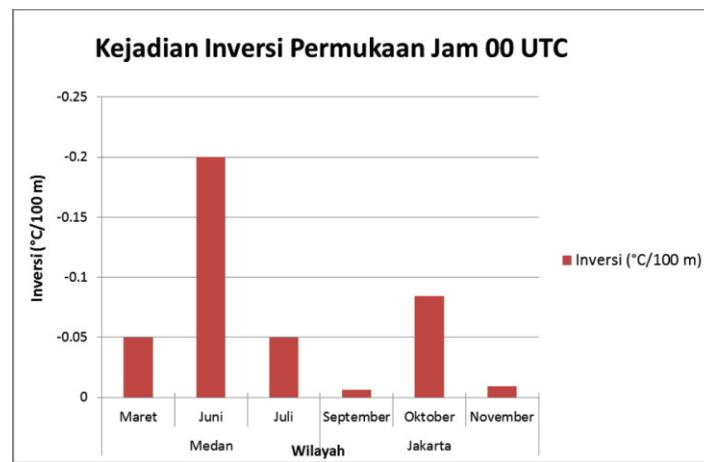
terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 4,5-4,9 km hingga mencapai nilai $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Selain itu, untuk wilayah Jakarta diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 1,2-2,3 km hingga mencapai nilai $0,4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Kemudian, untuk wilayah Palu diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 2,3-3,1 km dan 5-5,2 km hingga mencapai nilai $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Lalu, untuk wilayah Ambon diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 1,8-2,3 km hingga mencapai nilai $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Selain itu, pada Gambar 3. juga diketahui pola profil saat berada di lapisan troposfer atas, puncak tropopause, hingga stratosfer untuk wilayah Medan terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Januari-Mei lebih besar sekitar $-0,61^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (tanda minus (-) hanya menunjukkan terjadinya inversi) dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 18,1 km daripada bulan lainnya. Kemudian, untuk wilayah Padang terjadi *lapse rate* negatif atau inversi dengan nilai inversi pada bulan Januari-Mei lebih besar sekitar $-0,61^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 18,3 km daripada bulan lainnya. Selanjutnya, untuk wilayah Jakarta terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Januari-Mei lebih besar sekitar $-0,63^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 19,1 km daripada bulan lainnya. Selain itu, untuk wilayah Palu terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Oktober-November lebih besar sekitar $-0,71^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ di ketinggian 17,3 km serta Januari-Mei sekitar $-0,55^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 17,8 km daripada bulan lainnya serta untuk wilayah Ambon diketahui terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Desember lebih besar sekitar $-0,81^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ di ketinggian 17,9 km serta April-Mei sekitar $-0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 18,3 km daripada bulan lainnya.

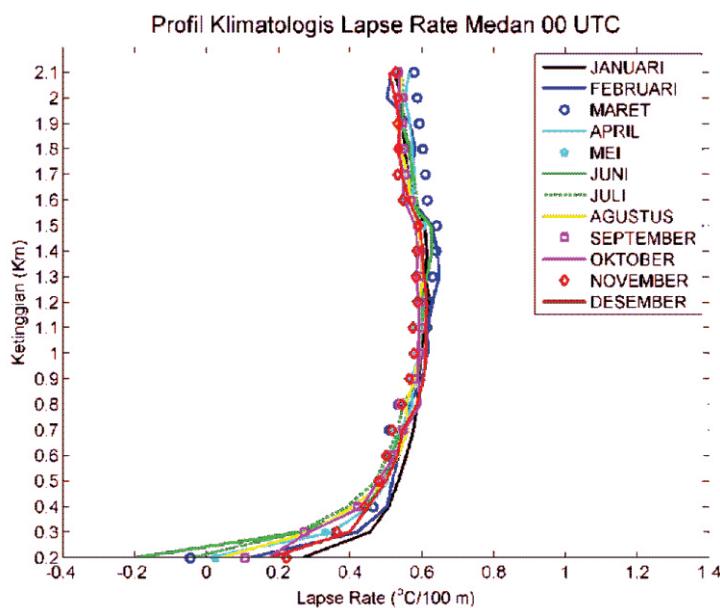
Pada Gambar 7. menunjukkan ketinggian rata-rata bulanan saat awal inversi di lapisan Stratosfer jam 00 UTC untuk kelima wilayah dengan nilai disetiap bulan tidak ada yang lebih dari 17,5 km, lebih tinggi pada bulan Januari-Mei, lalu mengalami penurunan pada Juni-September, dan meningkat kembali pada Oktober-Desember. Berdasarkan Tabel 1. diketahui nilai maksimum, minimum, dan median dari rata-rata bulanan *lapse rate* jam 00 UTC, yang terdiri juga dari nilai inversi sebagai nilai minimum. Pada Tabel 2. diketahui nilai rata-rata tahunan ketinggian awal inversi di lapisan Stratosfer pada jam 00 UTC, yaitu 17,1 km dan rata-rata suhu awal inversi sekitar $-80,24^{\circ}\text{C}$.



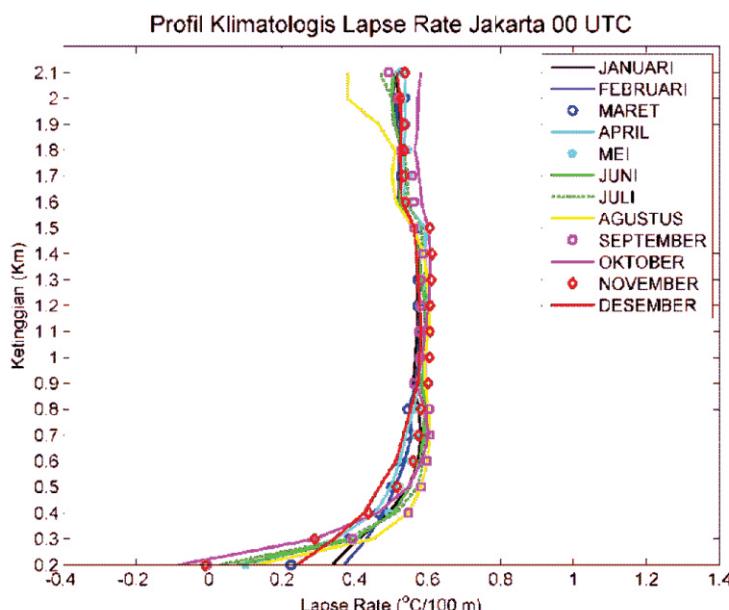
Gambar 3. Profil *lapse rate* bulanan Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon jam 00 UTC.



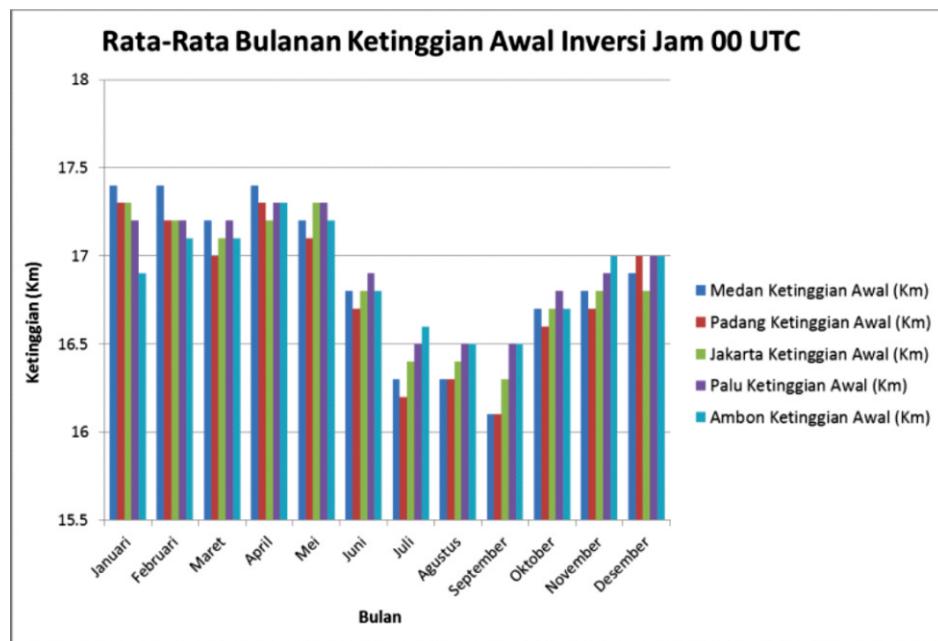
Gambar 4. Inversi permukaan di Troposfer pada ketinggian 0,2 km yang terjadi pada jam 00 UTC.



Gambar 5. Inversi permukaan (Troposfer) pada ketinggian 0,2 km (200 m) yang terjadi di Medan pada jam 00 UTC.



Gambar 6. Inversi permukaan (Troposfer) pada ketinggian 0,2 km (200 m) yang terjadi di Jakarta pada jam 00 UTC.



Gambar 7. Rata-rata bulanan ketinggian saat inversi di lapisan Stratosfer jam 00 UTC.

Tabel 1. Nilai maksimum, minimum, dan median dari rata-rata bulanan *lapse rate* jam 00 UTC.

Rata-Rata Bulanan Lapse Rate ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$) Jam 00 UTC di Setiap Wilayah dari Semua Ketinggian (m)													
Wilayah	Nilai	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	November	Desember
MEDAN	Maksimum	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.84	0.86	0.86	0.87	0.88	0.88	0.88
	Minimum	-0.57	-0.91	-0.54	-0.68	-0.61	-0.50	-0.51	-0.48	-0.59	-0.56	-0.66	-0.54
	Median	0.44	0.42	0.46	0.48	0.50	0.45	0.33	0.30	0.27	0.36	0.44	0.45
PADANG	Maksimum	0.85	0.86	0.85	0.92	0.84	0.84	0.84	0.83	0.85	0.87	0.87	0.87
	Minimum	-0.55	-0.51	-0.56	-0.61	-0.57	-0.47	-0.42	-0.42	-0.43	-0.45	-0.49	-0.48
	Median	0.48	0.47	0.49	0.49	0.49	0.49	0.37	0.36	0.32	0.32	0.48	0.46
JAKARTA	Maksimum	0.87	0.87	0.85	0.86	0.84	0.84	0.84	0.85	0.86	0.85	0.87	0.87
	Minimum	-0.62	-0.44	-0.50	-0.61	-0.63	-0.50	-0.45	-0.49	-0.45	-0.51	-0.59	-0.55
	Median	0.47	0.48	0.47	0.49	0.49	0.48	0.41	0.38	0.38	0.44	0.47	0.46
PALU	Maksimum	0.86	0.86	0.86	0.84	0.84	0.84	0.86	0.83	0.83	0.85	0.86	0.86
	Minimum	-0.54	-0.52	-0.47	-0.55	-0.53	-0.48	-0.45	-0.55	-0.49	-0.66	-0.71	-0.58
	Median	0.42	0.45	0.43	0.45	0.48	0.39	0.37	0.39	0.33	0.41	0.48	0.47
AMBON	Maksimum	0.86	0.86	0.85	0.86	0.85	0.85	0.84	1.09	0.94	0.92	0.85	0.86
	Minimum	-0.64	-0.49	-0.54	-0.65	-0.60	-0.54	-0.50	-0.65	-0.46	-0.57	-0.63	-0.81
	Median	0.52	0.50	0.51	0.51	0.47	0.42	0.41	0.36	0.38	0.43	0.49	0.52

Tabel 2. Nilai rata-rata tahunan ketinggian dan suhu awal inversi di lapisan Stratosfer jam 00 UTC.

Ketinggian dan Suhu Awal Inversi di Stratosfer Jam 00 UTC					
Identifikasi	Medan	Padang	Jakarta	Palu	Ambon
Ketinggian Awal Inversi (Km)	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
Suhu Awal Inversi ($^{\circ}\text{C}$)	-79.9	-79.6	-80.5	-80.2	-81

Profil Lapse Rate Jam 12 UTC. Berdasarkan Gambar 8. hasil profil *lapse rate* bulanan untuk kelima wilayah pada jam 12 UTC, dapat diketahui bahwa secara umum pola profil *lapse rate* hampir sama dengan variasi berbeda yang terjadi pada setiap bulannya. Selanjutnya, untuk Ambon diketahui pada ketinggian 0,2 km nilai *lapse rate* pada bulan September adalah $0,93^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$. Setelah itu, untuk wilayah Medan diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian $0,4-3,1 \text{ km}$ hingga mencapai nilai $0,48^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$. Kemudian, untuk Padang diketahui

terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 2-3 km sekitar $0,48^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ dan di ketinggian 4,7-5,2 km. Lalu, untuk Jakarta diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 2-3 km hingga mencapai nilai $0,4^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$. Kemudian, untuk Palu diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 2,5-3 km mencapai nilai $0,5^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$. Selanjutnya, untuk Ambon diketahui terjadi penurunan *lapse rate* di ketinggian 1,2-1,8 km hingga mencapai nilai $0,3^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$.

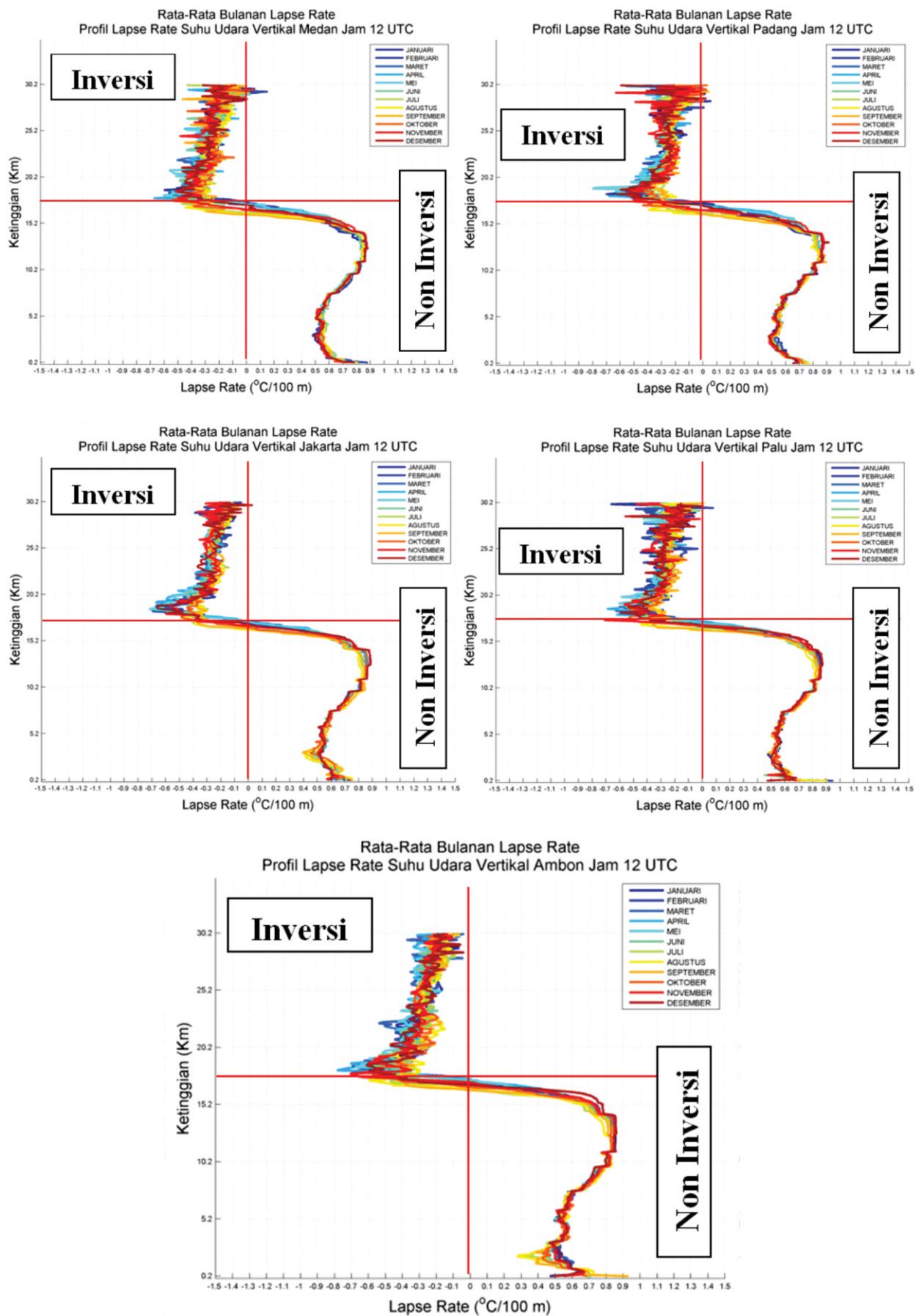
Selain itu, pada Gambar 8. diketahui pola profil saat berada di lapisan troposfer atas, puncak tropopause, hingga stratosfer untuk wilayah Medan diketahui terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Januari-Mei lebih besar sekitar $-0,68^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 17,8 km daripada bulan lainnya. Kemudian, untuk Padang diketahui terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Januari-Mei lebih besar sekitar $-0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 18,9 km daripada bulan lainnya. Selanjutnya, untuk Jakarta diketahui terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Januari-Mei lebih besar sekitar $-0,7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan lebih tinggi ketinggiannya sekitar 19,2 km daripada bulan lainnya. Kemudian, untuk Palu diketahui terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan November sekitar $-0,7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ di ketinggian 17,4 km, April sekitar $-0,69^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ di ketinggian 18,6 km dan September sekitar $-0,38^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ di ketinggian 17,9 km serta untuk Ambon diketahui terjadi *lapse rate* negatif (inversi) dengan nilai inversi pada bulan Februari lebih besar sekitar $-0,78^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ di ketinggian 18,1 km serta Agustus sekitar $-0,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ di ketinggian sekitar 17,2 km. Pada Gambar 9. menunjukkan ketinggian rata-rata bulanan saat awal inversi di lapisan Stratosfer jam 12 UTC untuk kelima wilayah dengan nilai lebih dari 17,5 km pada Januari di Medan, lebih tinggi pada bulan Januari-Mei, lalu mengalami penurunan pada Juni-September, dan meningkat kembali pada Oktober-Desember. Berdasarkan pada Tabel 3. diketahui nilai maksimum, minimum, dan median dari rata-rata bulanan *lapse rate* jam 12 UTC, yang terdiri juga dari nilai inversi sebagai nilai minimum. Pada Tabel 4. diketahui nilai rata-rata tahunan ketinggian awal inversi di lapisan Stratosfer pada jam 12 UTC, yaitu 17,1 km dan rata-rata suhu awal inversi sekitar $-80,5^{\circ}\text{C}$.

Berdasarkan Gambar 10. diketahui *lapse rate* rata-rata di troposfer pada jam 00 dan 12 UTC untuk 5 wilayah Indonesia, dengan nilai *lapse rate* pada jam 12 UTC sama di kelima wilayah, yaitu $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Kemudian, untuk nilai *lapse rate* pada jam 00 UTC, yaitu $0,64^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ untuk Jakarta, Padang, dan Ambon serta $0,63^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ untuk Medan dan Palu, sehingga diketahui rata-rata *lapse rate* pada jam 00

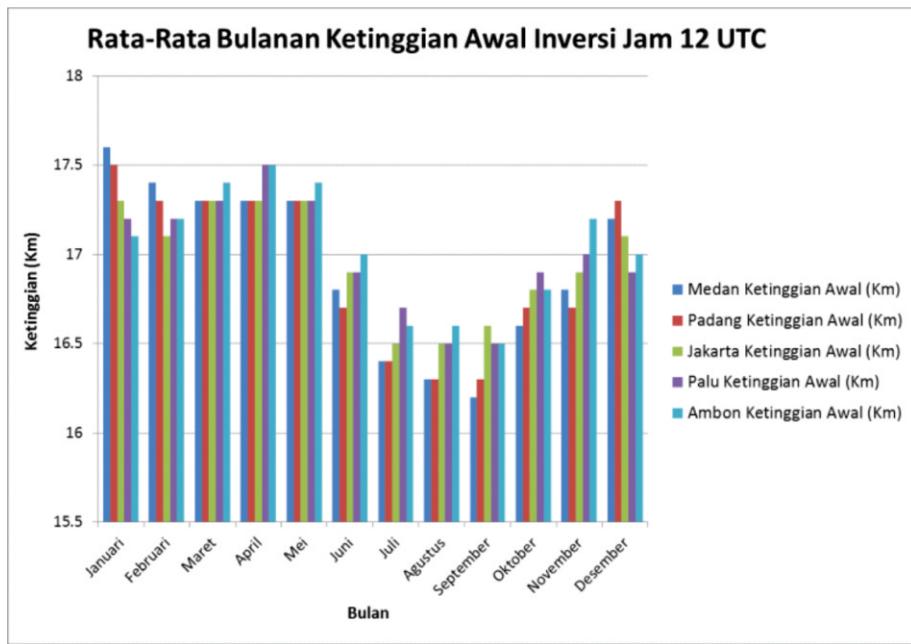
UTC, yaitu $0,64^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan rata-rata *lapse rate* pada jam 12 UTC, yaitu $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Jadi, rata-rata *lapse rate* di troposfer untuk wilayah Indonesia, yaitu $0,645^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan rata-rata *lapse rate* pada jam 12 UTC memiliki nilai yang lebih besar daripada jam 00 UTC. Nilai ini hampir sama dengan nilai *lapse rate* yang diperoleh dari studi sebelumnya, yakni $-0,62^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ [6]. Pada Gambar 11. diketahui inversi rata-rata di Stratosfer pada jam 00 dan 12 UTC untuk 5 wilayah Indonesia dengan inversi pada jam 12 UTC memiliki nilai yang lebih besar daripada jam 00 UTC. Dengan nilai inversi Jakarta dan Medan pada jam 00 UTC sama dengan jam 12 UTC. Kemudian, dapat diketahui rata-rata inversi pada jam 00 UTC, yaitu $-0,26^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan rata-rata inversi pada jam 12 UTC, yaitu $-0,27^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Jadi, rata-rata inversi di stratosfer untuk wilayah Indonesia, yaitu $-0,265^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Secara umum perbedaan *lapse rate* antara jam 00 dan 12 UTC adalah nilai rata-rata *lapse rate* jam 12 UTC lebih besar daripada jam 00 UTC, *lapse rate* jam 12 UTC cenderung sama di kelima wilayah, sedangkan *lapse rate* jam 00 UTC lebih bervariasi nilainya. Kemudian, pada jam 00 UTC juga terdapat inversi permukaan di Troposfer yang terjadi pada ketinggian 0,2 km (200 m) yang dapat menimbulkan kabut di pagi hari. Selanjutnya, perbedaan *lapse rate* per bulannya cenderung tidak berbeda jauh dan mengikuti musimnya, seperti di Jakarta yang *lapse rate*nya lebih besar saat musim hujan dibandingkan dengan musim kemarau.

Lapse rate atau laju penurunan suhu dapat menentukan kelabilan udara. Udara yang labil disertai lapisan lembab dekat permukaan merupakan potensi bagi pembentukan awan yang menghasilkan hujan. Jadi, dengan mengetahui nilai *lapse rate* aktual atau *lapse rate* lingkungan ini dapat dibandingkan dengan *lapse rate* adiabatik, baik adiabatik kering maupun adiabatik basah maka dapat menentukan tingkat stabilitas atmosfer, yaitu kondisi stabil mutlak, labil mutlak, dan netral atau labil bersyarat yang dapat mempengaruhi dan mempercepat proses terbentuknya awan, seperti awan konveksi dan berpotensi terjadinya hujan. Analisis pengaruh udara atas terhadap kestabilan atmosfer sangat penting untuk dikaji lebih lanjut [6].



Gambar 8. Profil *lapse rate* bulanan Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon jam 12 UTC.



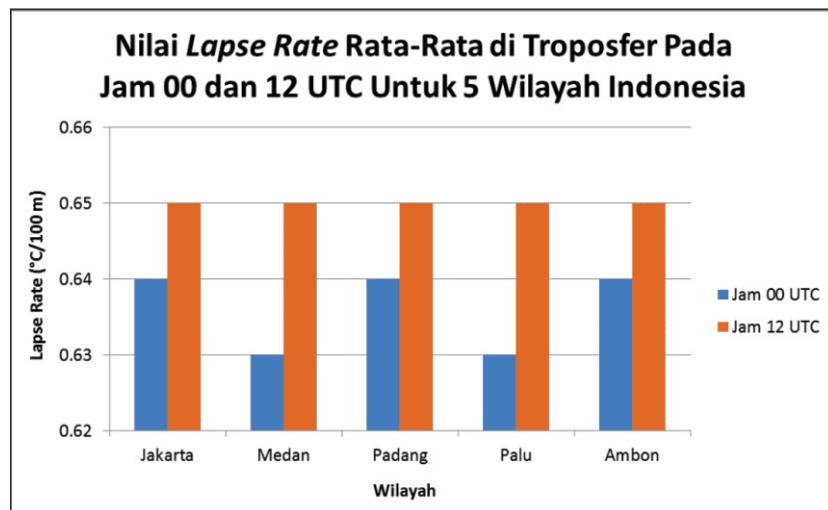
Gambar 9. Rata-rata bulanan ketinggian saat inversi di lapisan Stratosfer jam 12 UTC.

Tabel 3. Nilai maksimum, minimum, dan median dari rata-rata bulanan *lapse rate* jam 12 UTC.

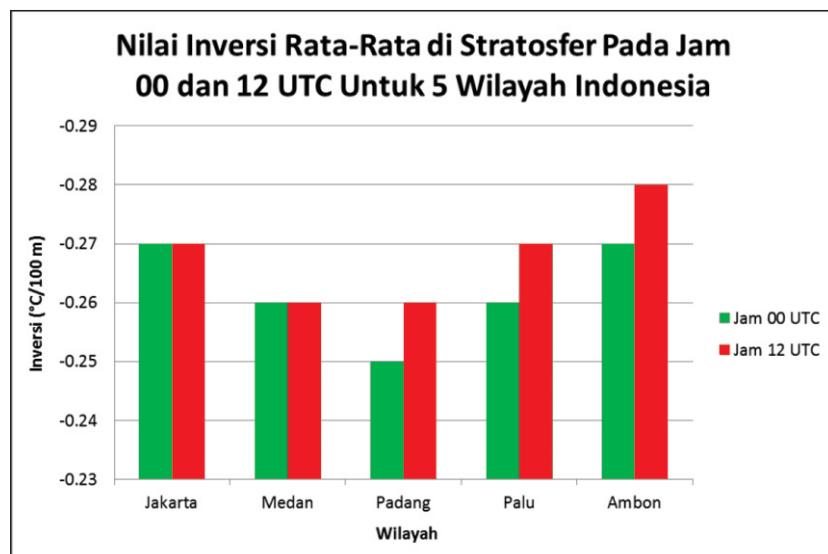
Rata-Rata Bulanan Lapse Rate (°C/100 m) Jam 12 UTC di Setiap Wilayah dari Semua Ketinggian (m)													
Wilayah	Nilai	Januari	Februari	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Okttober	November	Desember
MEDAN	Maksimum	0.85	0.88	0.85	0.85	0.85	0.85	0.86	0.87	0.89	0.87	0.88	0.88
	Minimum	-1.24	-1.37	-0.80	-0.68	-0.91	-0.49	-0.47	-0.47	-0.59	-1.25	-0.96	-1.24
	Median	0.50	0.48	0.52	0.53	0.53	0.52	0.46	0.48	0.40	0.51	0.51	0.49
PADANG	Maksimum	0.85	0.86	0.85	0.87	0.85	0.84	0.85	0.85	0.90	0.87	0.88	0.92
	Minimum	-0.70	-0.56	-0.54	-0.68	-0.80	-0.47	-0.42	-0.42	-0.38	-1.48	-0.64	-0.80
	Median	0.50	0.51	0.52	0.50	0.51	0.48	0.46	0.44	0.30	0.45	0.49	0.48
JAKARTA	Maksimum	0.86	0.86	0.86	0.87	0.85	0.84	0.84	0.85	0.85	0.85	0.88	0.89
	Minimum	-0.70	-0.67	-0.62	-0.68	-0.72	-0.49	-0.47	-0.49	-0.43	-0.49	-0.60	-0.66
	Median	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.49	0.45	0.41	0.41	0.47	0.51	0.52
PALU	Maksimum	0.86	0.95	0.85	0.86	0.86	0.85	0.84	0.91	0.83	0.85	0.87	0.87
	Minimum	-0.67	-0.59	-0.63	-0.69	-0.62	-0.55	-0.44	-0.45	-0.41	-0.66	-0.96	-0.76
	Median	0.49	0.50	0.50	0.51	0.52	0.51	0.51	0.50	0.49	0.51	0.52	0.51
AMBON	Maksimum	0.86	0.86	0.85	0.85	0.85	0.85	0.84	0.92	0.93	0.84	0.85	0.86
	Minimum	-0.70	-0.67	-0.66	-0.78	-0.68	-0.58	-0.49	-0.60	-0.45	-0.65	-0.71	-0.61
	Median	0.51	0.51	0.49	0.50	0.47	0.45	0.37	0.36	0.39	0.44	0.49	0.51

Tabel 4. Nilai ketinggian dan suhu awal inversi di lapisan Stratosfer jam 12 UTC.

Ketinggian dan Suhu Awal Inversi di Stratosfer Jam 12 UTC					
Identifikasi	Medan	Padang	Jakarta	Palu	Ambon
Ketinggian Awal Inversi (Km)	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
Suhu Awal Inversi (°C)	-79.9	-79.7	-80.9	-80.7	-81.3



Gambar 10. *Lapse rate* rata-rata di Troposfer pada jam 00 dan 12 UTC untuk 5 wilayah Indonesia.



Gambar 11. Inversi rata-rata di Stratosfer pada jam 00 dan 12 UTC untuk 5 wilayah Indonesia.

4. Kesimpulan/*Conclusion*

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan di atas, diketahui bahwa rata-rata ketinggian troposfer hingga 16,8 km dengan *lapse rate* rata-rata kelima wilayah tersebut dari permukaan hingga ke lapisan tropopause pada jam 00 UTC adalah sekitar $0,64^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan jam 12 UTC adalah sekitar $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ sehingga *lapse rate* rata-rata dari kedua waktu tersebut untuk wilayah Indonesia adalah $0,645^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Dengan ketinggian puncak tropopause pada bulan Desember dan Januari-April lebih tinggi daripada bulan Juni-September karena terdapat pengaruh dari musim kemarau dan musim hujan.

Terjadi inversi permukaan saat di troposfer untuk Medan pada bulan Maret, Juni, dan Juli serta di Jakarta pada bulan September-Oktober dengan nilai rata-rata inversi permukaan adalah sekitar $-0,07^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ pada jam 00 UTC. Rata-rata tahunan ketinggian awal inversi di stratosfer jam 00 dan 12 UTC adalah 17,1 km

dengan rata-rata bulanan Januari-Mei dan Desember lebih tinggi daripada Juni-November serta nilai rata-rata inversi di stratosfer pada jam 00 UTC adalah sekitar $-0,26^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ dan jam 12 UTC adalah sekitar $-0,27^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ sehingga rata-rata inversi di stratosfer untuk wilayah Indonesia adalah $-0,265^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

Profil *lapse rate* bulanan jam 12 UTC lebih besar daripada jam 00 UTC. Nilai *lapse rate* yang dihasilkan pada jam 00 dan 12 UTC oleh wilayah Medan, Padang, Jakarta, Palu, dan Ambon untuk bulan Januari-Desember adalah sekitar $0,35^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ sampai $0,88^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ yang berarti berada pada kondisi stabil mutlak dan labil bersyarat, yaitu kondisi keduanya berpotensi menunjukkan adanya pembentukan dan pertumbuhan awan menengah saat stabil mutlak dan awan konvektif saat labil bersyarat.

Perlu dilakukan kajian dan analisis lebih lanjut untuk mengetahui dampak langsung *lapse rate* terhadap fenomena cuaca atau iklim lainnya.

Daftar Pustaka

- [1] World Meteorological Organization No 544. *Manual on The Global Observing System Volume I (Annex V to the WMO Technical Regulations) Global Aspects*. Publications Board Geneva. Switzerland, 2003.
- [2] Haimberger, L. *Homogenization of Radiosonde Temperature Time Series Using Innovation Statistics*. Department of Meteorology and Geophysics, University of Vienna, Vienna. Austria, 2006.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Glossary of terms, In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)), A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press. Cambridge, UK. and New York. NY, USA, 2012, pp. 555-564.
- [4] Tjasyono, B. H. K. *Meteorologi Indonesia Volume 1, Karakteristik dan Sirkulasi Atmosfer*. Badan Meteorologi dan Geofisika. Jakarta, 2007.
- [5] Permana, D.S. "Analisis Data Meteorologi dari Pemantau Cuaca Otomatis Berbagai Elevasi dan Data Radiosonde di Papua." *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol 12, no. 2, hal. 151-162, 2011.
- [6] Syaifulah, M., Djazim. Analisis Kondisi Udara Atas di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, vol. 18, no. 1, hal. 1-12, 2017.
- [7] Website resmi National Oceanic Atmospheric Administration Earth System Research Laboratory. "NOAA ESRL." Internet: <https://esrl.noaa.gov/raobs/>, diakses 5 Desember 2016.
- [8] Alfaruqi. *Interpolasi Polinomial, dan Lagrange*. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya. Surabaya, 2008.
- [9] Junaidi, J. *Deskripsi Data melalui Boxplot*. Fakultas Ekonomi dan Bisnis. Universitas Jambi. Jambi, 2014.
- [10] Supranto, J. *Statistik Teori dan Aplikasi Jilid 1*. Gelora Aksara Pratama. Jakarta, 2008.
- [11] Hadi, S. *Statistik*. Pustaka Pelajar. Yogyakarta, 2015.
- [12] Sumanto. *Statistika Terapan*. CAPS (Center of Academic Publishing Service). Yogyakarta, 2014.
- [13] Saefuddin, A., Khairil, A. N., Aam, A., Kusman, S. *Statistika Dasar*. PT. Grasindo. Jakarta, 2009.
- [14] Wirjohamidjojo, S. dan Swarinoto, Y. S. *Meteorologi Sinoptik: Analisis dan Penaksiran Analisis Cuaca Sinoptik*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Jakarta, 2013.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih dan penghargaan diberikan kepada Mitra Bestari/Penyunting Ahli yang telah menelaah subtansi naskah-naskah yang masuk ke redaksi Jurnal Meteorologi dan Geofisika.

Berikut adalah Mitra Bestari/Penyunting Ahli yang berpartisipasi dalam Jurnal Meteorologi dan Klimatologi Volume 18 No. 2 tahun 2017:

- **Prof. Dr. Edvin Aldrian**
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT)
- **Prof. Dr. Sri Widiyantoro**
Institut Teknologi Bandung (ITB)
- **Prof. Dr. Nanang Puspito**
Institut Teknologi Bandung (ITB)
- **Dr. Deni Septiadi**
Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (STMKG)
- **Dr. Ardhasena Sopaheluwakan**
Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG)
- **Dr. Heri Kuswanto**
Institut Teknologi Sepuluh November (ITS)
- **Prof. Eddy Hermawan**
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

JUDUL NASKAH

TITLE OF MANUSCRIPT

Penulis Pertama^{1*}, Penulis Kedua², Penulis Ketiga³

¹Nama Lembaga, Alamat, Kota, Kode Pos

²Nama Jurusan, Nama Fakultas, Nama Univeristas, Alamat, Kota, Kode Pos

*E-mail: kontak_penulis@domain.com

Naskah masuk:

Naskah diperbaiki:

Naskah diterima: (diisi oleh redaksi)

ABSTRAK

Abstrak dalam bahasa Indonesia ditulis dengan jenis huruf Times New Roman, ukuran 10 pt, spasi tunggal. Abstrak bukanlah penggabungan beberapa paragraf, tetapi merupakan ringkasan yang utuh dan lengkap yang menggambarkan isi tulisan. Abstrak harus mencakup latar belakang dan atau tujuan, metode, hasil, serta kesimpulan utama dari penelitian. Abstrak tidak berisi acuan dan tidak menampilkan persamaan matematika. Abstrak dalam bahasa Indonesia terdiri dari satu paragraf dengan jumlah kata paling banyak 250 kata.

Kata kunci: kata, kunci, naskah (3 – 5 kata kunci)

ABSTRACT

Abstract in English using Times New Roman font, size 10 pt, italic, single spacing. Abstract is not a merger of several paragraphs, but it is a full and complete summary that describe content of the paper. It should contain background and or objective, methods, results, and main conclusion from the research. It should not contain any references or displayed mathematical equations. It consists of one paragraph and should be no more than 200 words in English.

Keywords: key, words, manuscript (3 – 5 keywords)

1. Pendahuluan/*Introduction*

Naskah disusun dalam 4 subjudul yaitu: Pendahuluan, Metode Penelitian, Hasil dan Pembahasan, dan Kesimpulan. Pendahuluan mencakup hal – hal berikut ini: latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, teori pendukung, dan hipotesis (jika ada).

Naskah ditulis dalam format kertas berukuran A4 (210 mm x 297 mm) dengan margin atas, bawah, kiri, dan kanan 2.5 cm. Bentuk naskah berupa 2 kolom dengan jarak antar kolom 1 cm. Naskah ditulis dengan tipe huruf *Times New Roman* ukuran 10 pt. Panjang naskah hendaknya maksimal 12 halaman, termasuk lampiran. Jarak antara paragraf adalah 1 spasi tunggal.

Pengutipan pustaka di dalam naskah dituliskan dengan menggunakan angka Arab dan diurutkan sesuai urutan pengutipan dalam naskah. Angka ditulis dalam kurung persegi/square bracket, contohnya [1], atau [1,3], atau [1-3]

Subsubjudul. Subsubjudul ditulis tanpa angka dan dicetak tebal (bold). Subsubjudul adalah bagian naskah yang perlu dijelaskan lebih detail. Kata-kata umum seperti: Latar Belakang, Tujuan, Rumusan masalah, Data, dan lain-lain tidak perlu dijadikan subsubjudul, cukup langsung penjelasan subtansinya saja. Naskah langsung ditulis setelah kata subsubjudul.

Apabila terdapat persamaan reaksi atau matematis, diletakkan simetris pada kolom. Nomor persamaan diletakkan di ujung kanan dalam tanda kurung, dan penomoran dilakukan secara berurutan. Apabila terdapat rangkaian persamaan yang lebih dari satu baris, maka penulisan nomor diletakkan pada baris terakhir. Penunjukkan persamaan dalam naskah dalam bentuk singkatan, seperti Pers. (1).

$$ka = - \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (1)$$

2. Metode Penelitian/*Methods*

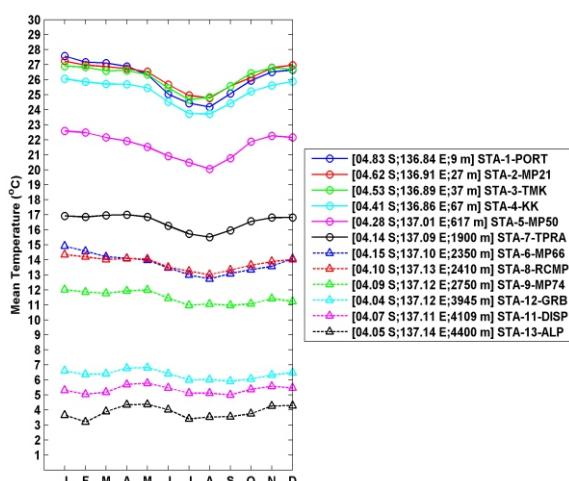
Metode penelitian yang digunakan harus ditulis sesuai dengan cara ilmiah, yaitu rasional, empiris dan sistematis. Metode penelitian berisi deskripsi mengenai prosedur penelitian, waktu dan tempat, bahan dan peralatan, serta metode yang digunakan. Metode penelitian harus diuraikan dengan jelas dan sesuai dengan tujuan penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan/*Result and Discussion*

Bagian ini menjelaskan hasil penelitian dan sekaligus memberikan pembahasan hasil penelitian secara komprehensif. Hasil penelitian bisa ditampilkan dalam bentuk gambar atau tabel sehingga pembaca lebih mudah memahaminya. Tabel dan gambar diletakkan segera setelah disebutkan dalam naskah dan diletakkan pada posisi paling atas atau paling bawah dari setiap halaman dan tidak diapit oleh kalimat. Jika tabel dan gambar terlalu kecil untuk format 2 kolom naskah, maka bisa menggunakan ukuran 1 kolom. Format tabel mengikuti contoh seperti Tabel 1. Gambar harus disediakan dalam ukuran yang proporsional dan beresolusi tinggi untuk penampilan yang terbaik, sehingga semua informasi dalam gambar terbaca.

Tabel 1. Tabel prosesi gerhana untuk daerah Lampung.

No	Prosesi Gerhana	Waktu (WIB)	Waktu (UTC)
1	Gerhana Matahari mulai (I)	15:19	08:19
2	Fase Gerhana Cincin mulai (II)	16:38	09:38
3	Puncak Gerhana Matahari Cincin	16:42	09:42
4	Fase Gerhana Cincin selesai (III)	16:45	09:45
5	Gerhana Matahari selesai (IV)	17:52	10:52



Gambar 1. Temperatur rata-rata bulanan AWS PTFI per ketinggian, dibuat dengan Matlab 7.

4. Kesimpulan/*Conclusion*

Kesimpulan bisa berupa kesimpulan khusus dan kesimpulan umum. Kesimpulan khusus merupakan hasil analisa data atau hasil uji hipotesa tentang fenomena yang diteliti. Kesimpulan umum sebagai hasil generalisasi atau keterkaitan dengan fenomena serupa di wilayah lain dari publikasi terdahulu. Kesimpulan harus bisa menjawab pertanyaan dan permasalahan penelitian. Hal yang perlu diperhatikan adalah segitiga konsistensi (masalah-tujuan-kesimpulan harus konsisten).

Saran/*Suggestion* (jika ada)

Apabila diperlukan saran dapat berisi rekomendasi, tindak lanjut nyata, atau implikasi kebijakan atas kesimpulan yang diperoleh

Ucapan Terima Kasih/*Acknowledgement* (jika ada)

Ucapan terima kasih diberikan sebagai penghargaan terhadap pihak-pihak yang terlibat dalam penyusunan naskah atau dalam penelitian. Pada bagian ini disebutkan siapa yang patut diberikan ucapan terima kasih, baik secara organisasi/intitusi, pemberi donor ataupun individu

Daftar Pustaka/*References*

Pustaka atau acuan yang digunakan dalam naskah minimal 10 pustaka, dengan komposisi minimal 80% berupa acuan primer (artikel jurnal, prosiding, skripsi, tesis) dan minimal 80% merupakan acuan mutakhir (terbitan 5 tahun terakhir).

- [1] S. Steinke, M. Mohtadi, M. Prange, V. Varma, D. Pittauerova, and H. W. Fischer, "Mid- to Late-Holocene Australian-Indonesian summer monsoon variability," *Quat. Sci. Rev.*, vol. 93, pp. 142–154, 2014.
- [2] R. Stefansson. *Advances in Earthquake Prediction, Research and Risk Mitigation*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [3] I. Meilano, H.Z. Abidin, and D.H. Natawidjaya, "Using 1-Hz GPS data to measure deformation caused by Bengkulu earthquake." *Proceeding of International Symposium on Earthquake and Precursor*, 2009, pp. 153-158.
- [4] M. Riyadi, "Pemodelan gaya berat tiga dimensi untuk melokalisir jebakan timah di daerah Pemali-Bangka." Tesis, Fakultas MIPA: Universitas Indonesia, 1996.
- [5] BMKG. "Monitoring SO₂ Bulan Desember 2014." Internet: http://www.bmkg.go.id/Kualitas_Udara/Informasi_SO2.bmkg, diakses 3 Januari 2015.



LEMBAGA
ILMU PENGETAHUAN
INDONESIA



SERTIFIKAT

Nomor: 603/AU2/P2MI-LIPI/03/2015

Akreditasi Majalah Ilmiah

Kutipan Keputusan Kepala Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Nomor 335/E/2015 Tanggal 15 April 2015

Nama Majalah : Jurnal Meteorologi dan Geofisika
ISSN : 1411-3082
Redaksi : Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi,
Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Jl. Angkasa I No. 2,
Kemayoran, Jakarta 10270.

Ditetapkan sebagai Majalah Ilmiah

TERAKREDITASI

Akreditasi sebagaimana tersebut di atas berlaku selama 3 (tiga) tahun

Cibinong, 15 April 2015
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Ketua Panitia Penilai Majalah Ilmiah-LIPI

Prof. Dr. Rochadi,
NIP 195007281978031001,





**PUSAT PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN
BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA**

Jl. Angkasa I No.2 Kemayoran Jakarta Pusat - 10720