

# TREN CURAH HUJAN DI ASIA TENGGARA BERDASARKAN MODEL CORDEX-SEA DAN DATA ERA5

Tugiyo Aminoto<sup>1\*</sup>, Akmad Faqih<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Kampus Mendalo, Muaro Jambi, 36361, Indonesia

<sup>2</sup> Departmen Geofisika and Meteorologi, IPB University, Bogor, Indonesia

\*email: tugiyo@unja.ac.id

## ABSTRAK

Curah hujan merupakan salah satu variabel iklim yang paling berpengaruh terhadap keberlanjutan berbagai sektor. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa sembilan model hujan CORDEX-SEA terhadap data referensi (ERA5) pada aspek tren curah hujan pada rentang tahun 1976-2005. Analisis tren menggunakan uji Mann-Kendall (MK) dan untuk menyelidiki efek autokorelasi digunakan uji pre-whitened Mann-Kendall (PVMK). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model yang memiliki tingkat kemiripan tertinggi terhadap data referensi adalah IPSL\_b (0.65) diikuti oleh model GFDL\_b (0.64). Model CNRM\_a yang pada banyak aspek evaluasi mengungguli model lainnya menunjukkan performa yang cukup rendah dan hal yang sama terjadi pada rata-rata ansambel model (MME) yang pada kebanyakan kasus memiliki performa lebih tinggi dari model tunggal lainnya namun pada aspek tren curah hujan tidak demikian. Untuk tren yang signifikan secara statistik ( $p\text{-value} < 0.05$ ), berdasarkan uji MK model yang memiliki similaritas tertinggi dengan data referensi adalah IPSL\_b (0.85) diikuti oleh GFDL\_b (0.92) sedangkan dengan uji PVMK hasilnya secara umum sedikit berbeda. Hal ini mengindikasikan bahwa efek autokorelasi tidak signifikan terjadi sehingga dua uji tersebut tidak jauh berbeda hasilnya.

**Kata Kunci:** CORDEX-SEA; ERA5; Curah hujan; tren; Uji Mann-Kendall; Uji pre-whitened Mann-Kendall

## ABSTRACT

**[Title: Rainfall Trends In Southeast Asia Based On Cordex-Sea Model And Era5 Data]** This study aims to evaluate the performance of nine CORDEX-SEA rainfall models against reference data (ERA5) in terms of rainfall trends in the 1976-2005 period. The trend analysis uses the Mann-Kendall (MK) test and to investigate the autocorrelation effect, the pre-whitened Mann-Kendall (PVMK) test is used. The evaluation results show that the model with the highest level of similarity to the reference data is IPSL\_b (0.65) followed by the GFDL\_b model (0.64). The CNRM\_a model, which outperforms other models in many aspects of the evaluation, shows a fairly low performance and the same thing happens to the average model ensemble (MME) which in most cases has a higher performance than other single models but not in terms of rainfall trends. For statistically significant trends ( $p\text{-value} < 0.05$ ), based on the MK test, the model with the highest similarity to the reference data is IPSL\_b (0.85) followed by GFDL\_b (0.92) while the PVMK test results are generally slightly different. This indicates that the autocorrelation effect is not significant, so the results of the two tests are not much different.

**Keywords:** CORDEX-SEA; ERA5; Rainfall trend; Mann-Kendall test; Pre-whitened Mann-Kendall test

## PENDAHULUAN

Curah hujan merupakan salah satu variabel iklim yang paling berpengaruh terhadap keberlanjutan berbagai sektor kehidupan di Asia Tenggara. Sebagai wilayah yang berada di daerah tropis, Asia Tenggara mengalami variasi curah hujan yang signifikan sepanjang tahun, yang dipengaruhi oleh fenomena iklim global dan regional seperti El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Indian Ocean Dipole (IOD), dan monsun Asia. Perubahan pola curah hujan akibat variabilitas iklim dan perubahan iklim global dapat

berdampak besar pada sektor pertanian, sumber daya air, dan ketahanan pangan di wilayah ini (Tangang *et al.* 2020; Juneng *et al.* 2016).

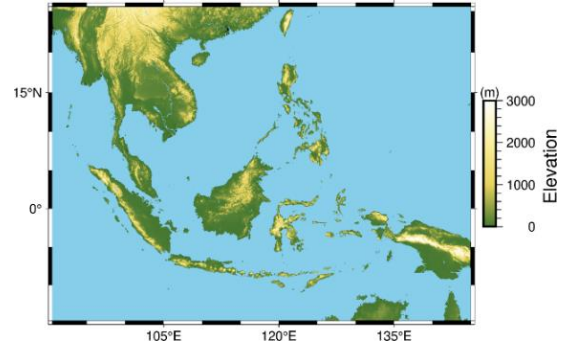
Seiring dengan perubahan iklim global, pola curah hujan di Asia Tenggara mengalami perubahan signifikan. Peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem seperti banjir dan kekeringan telah menimbulkan berbagai tantangan bagi keberlanjutan pembangunan di wilayah ini. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang tren curah hujan di Asia Tenggara sangat diperlukan untuk mendukung

upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim (Supari et al., 2020; Tangang et al., 2018). Untuk memahami tren curah hujan di Asia Tenggara, diperlukan analisis yang komprehensif menggunakan data iklim yang dapat diandalkan dan pemodelan iklim yang canggih. ERA5, sebagai reanalisis data atmosfer yang diproduksi oleh European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), menyediakan data curah hujan dengan resolusi tinggi yang mencakup periode yang cukup panjang (Hersbach et al., 2020). Selain itu, proyek Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment for Southeast Asia (CORDEX-SEA) menawarkan berbagai model iklim regional yang dirancang untuk mensimulasikan kondisi iklim dengan lebih spesifik dan terperinci untuk wilayah Asia Tenggara (Tangang et al. 2020).

Penelitian yang membahas tren hujan di kawasan Asia Tenggara berdasarkan *gridded data* (ERA5) dan model CORDEX-SEA masih jarang ditemui. Penelitian oleh Supari et al. (2017) meneliti tren hujan di Indonesia menggunakan data stasiun BMKG sehingga hasilnya hanya untuk Indonesia dan khusus lokasi yang ada stasiunnya. Penelitian lain yaitu oleh Sa'adi et al (2019) menganalisis tren hujan khusus untuk wilayah Malaysia dan Sukmara et al. 2022 pulau Kalimantan. Penelitian-penelitian tersebut juga tidak memperhitungkan efek autokorelasi dari data hujan yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji tren curah hujan di Asia Tenggara dengan menganalisis data curah hujan dari ERA5 dan membandingkannya dengan simulasi dari sembilan model iklim regional yang tersedia dalam CORDEX-SEA. Dengan memadukan data reanalisis dari ERA5 dan model dari CORDEX-SEA, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang dinamika khusus tren curah hujan di wilayah Asia Tenggara.

## METODE

Studi ini mengevaluasi tren curah hujan pada sembilan model iklim dari simulasi hujan CORDEX-SEA pada wilayah Asia Tenggara yang secara geografis terletak pada 90,5°BT hingga 145°BT dan 14,5°LS hingga 25,5°LU (Gambar 1).



**Gambar 1.** Peta topografi Asia Tenggara

Jenis data yang digunakan adalah data sekunder yaitu data bulanan dari hasil simulasi sembilan model hujan CORDEX-SEA pada periode historis 1976 hingga 2005 dengan resolusi 0,22° (25 km). Data observasi/referensi yang digunakan adalah ERA5 (Hersbach et al., 2020). Penelitian Tangang et al. (2020) menggunakan ERA Interim (0,25°) sebagai data referensi utama dalam mengevaluasi performa model iklim CORDEX-SEA. Pada tahap persiapan data, penyamaan resolusi data dan skala waktu dilakukan pada semua data model dan observasi. Catatan, pada peta hasil *running* program evaluasi, karena nama model merupakan gabungan dari nama model GCM dan RCMnya (terlalu panjang) maka untuk penyederhanaan pada nama peta, nama model RCMnya menggunakan singkatan berupa huruf kecil a=RC4, b=RegCM4-3, c=RegCM4-7 dan d=REMO2015, misalnya model CNRM ditulis menjadi CNRM\_a.

Pengolahan data dalam penelitian ini diawali dengan melakukan validasi data input yaitu memeriksa nilai minimum dan maksimum pada data input. Pengecekan data input ini dilakukan dengan menjalankan koding Python dalam aplikasi instrumen analisis yang digunakan (Aminoto et al., 2024a). Pengecekan ini sangat penting untuk memastikan tidak adanya data ekstrem dan/atau *outlier* yang terkait dengan kesalahan teknis komputasi serta bukan merupakan hasil proses alamiah yang terjadi akibat terjadinya dinamika atmosfer. Pada simulasi/model iklim regional yang merupakan hasil *dynamic downscaling* dari model iklim global sering kali dijumpai adanya data tidak wajar di daerah perbatasan domain akibat efek samping dari proses komputasi tersebut.

Dalam penelitian ini pengukuran kemampuan model terkait tren hujan dilakukan dengan menggunakan metrik Taylor (persamaan 1).

$$S = \frac{4(1+r)}{(\sigma_r+1/\sigma_r)^2 (1+r_0)} \quad (1)$$

Dalam persamaan tersebut,  $r$  menyatakan koefisien korelasi antara data observasi dan model,  $r_0$  menunjukkan korelasi maksimum (yaitu 1),  $\sigma_r$  adalah

rasio deviasi standar antara data simulasi dan observasi. Metrik ini secara kuantitatif mengukur seberapa dekat hasil model dengan data referensi (Taylor, 2001). Dengan kata lain metrik Taylor tersebut menghasilkan nilai skor yang dapat disebut sebagai nilai/skor similaritas model terhadap data referensi/observasi. Keunggulan metrik ini dibandingkan metrik lainnya yaitu metrik ini merupakan metrik gabungan dari dua parameter yaitu korelasi dan standar deviasi. Dalam konteks data deret waktu curah hujan yang digunakan dalam penelitian ini maka korelasi merupakan ukuran

pola variabilitas dan standar deviasi adalah ukuran amplitudonya (Taylor, 2001).

Pengukuran tren dilakukan menggunakan uji statistik Mann-Kendall (MK) (Um *et al.* 2017; Narayanan *et al.* 2013). Untuk mengatasi kemungkinan adanya efek autokorelasi dalam data deret waktu (yang dapat menghasilkan pengukuran tren secara tidak akurat) maka uji MK yang dimodifikasi juga digunakan yaitu uji *pre-whitened* Mann-Kendall disingkat PWMK (Supari *et al.*, 2017).

**Tabel 1.** Deskripsi model iklim yang digunakan

No	GCMs (driving model)		RCMs (dynamical downscaler)		ID Model	Referensi
	Institusi	Model	Institusi	Model		
1	CNRM (Prancis)	CNRM-CM5	SMHI (Swedia)	RCA4	CNRM_a	(Nikulin <i>et al.</i> , 2012)
2	EC-Earth (Eropa)	EC-Earth	ICTP (Italia)	RegCM4-3	ECE_b	(Gao & Giorgi, 2017)
3	NOAA (USA)	GFDL-ESM2M	ICTP	RegCM4-3	GFDL_b	(Gao & Giorgi, 2017)
4	IPSL (Prancis)	IPSL-CM5A-LR	ICTP	RegCM4-3	IPSL_b	(Gao & Giorgi, 2017)
5	Hadley Centre (Inggris)	HadGEM2-ES	SMHI (Swedia)	RCA4	HadGEM2_a	(Nikulin <i>et al.</i> , 2012)
6	Hadley Centre (Inggris)	HadGEM2-ES	ICTP	RegCM4-7	HadGEM2_c	Elguindi <i>et al.</i> (2017)
7	Hadley Centre (Inggris)	HadGEM2-ES	GERICS (Jerman)	REMO2015	HadGEM2_d	Sein <i>et al.</i> (2015)
8	MPI (Jerman)	MPI-ESM-MR	ICTP	RegCM4-7	MPI_c	Elguindi <i>et al.</i> (2017)
9	NCC (Norwegia)	NorESM1-M	GERICS	REMO2015	NorESM1_d	Sein <i>et al.</i> (2015)

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Analisis terhadap tren curah hujan merupakan bagian dari evaluasi performa model pada aspek temporal. Hal ini dilakukan dengan membandingkan data model dengan referensi terkait adanya tren peningkatan atau penurunan curah hujan (Endo *et al.*, 2009). Analisis ini menggunakan uji Mann-Kendall pada data deret waktu curah hujan bulanan dan tahunan di setiap titik grid wilayah studi. Hasilnya, untuk skala waktu bulanan sebagian besar model menunjukkan similaritas rendah terhadap data referensi. Untuk skala waktu tahunan (data bulanan dikelompokkan menjadi data tahunan), hasilnya menunjukkan similaritas yang lebih tinggi (Gambar 2a) yaitu hasil beberapa model sangat mirip dengan referensi (ERA5). Berdasarkan gambar tersebut model yang memiliki tingkat kemiripan paling tinggi terhadap data referensi yaitu model IPSL\_b (0.65) diikuti oleh model GFDL\_b (0.64), meskipun selisih skor Taylor keduanya sedikit namun perbedaan visual pada petanya cukup berbeda misalnya pada pulau Kalimantan. Hal ini disebabkan karena skor Taylor hanya menghitung performa pada keseluruhan titik koordinat secara

rata-rata. Selain itu, model CNRM\_a yang pada banyak aspek evaluasi mengungguli model lainnya (Aminoto *et al.* 2024b; Siew *et al.* 2014) namun dalam hal tren curah hujan menunjukkan performa yang cukup rendah. Hal yang sama terjadi pada rata-rata ansambel model (MME), pada kebanyakan kasus MME memiliki performa yang mengungguli model tunggal lainnya namun pada aspek tren curah hujan tidak demikian. Ketika membandingkan hasil analisis tren curah hujan di pulau Kalimantan (data ERA5), hasilnya sejalan dengan hasil yang dikemukakan oleh Sukmara *et al.* (2022) yaitu menunjukkan adanya tren kenaikan yang signifikan di bagian selatan Kalimantan (penelitian tersebut menggunakan data curah hujan MEERA).

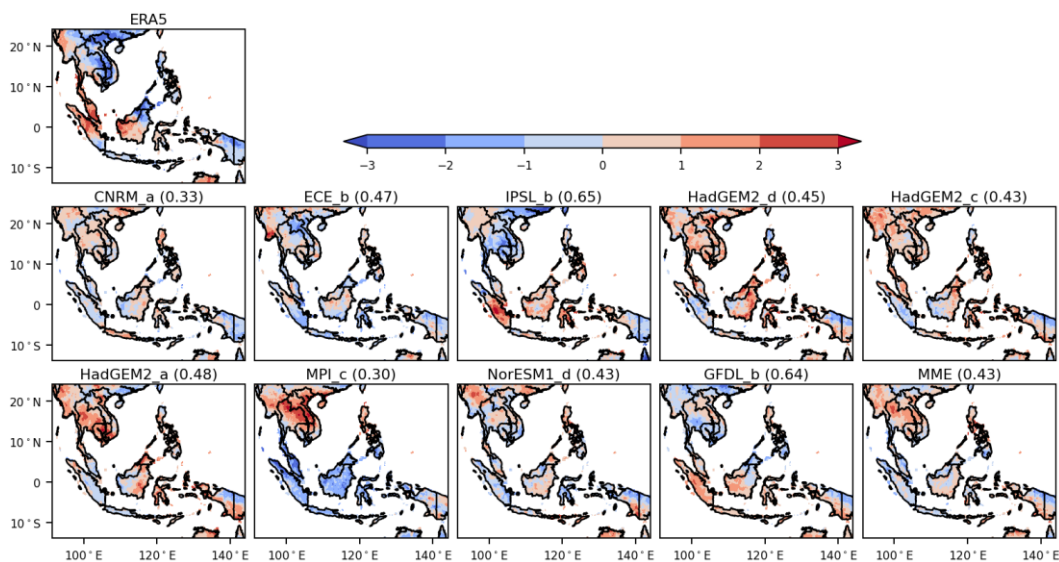
Berdasarkan Gambar 2b yaitu khusus untuk tren yang signifikan secara statistik ( $p\text{-value} < 0,05$ ), model yang memiliki similaritas tertinggi dengan data referensi (ERA5) adalah IPSL\_b (0.85), adapun GFDL\_b meskipun secara skor Taylor memiliki nilai tertinggi (0.92) namun secara visual tampak sedikit kesamaannya. Hal ini kemungkinan karena skor Taylor pada kasus ini hanya menghitung pada grid yang sesuai yaitu yang memiliki kesamaan letak pada

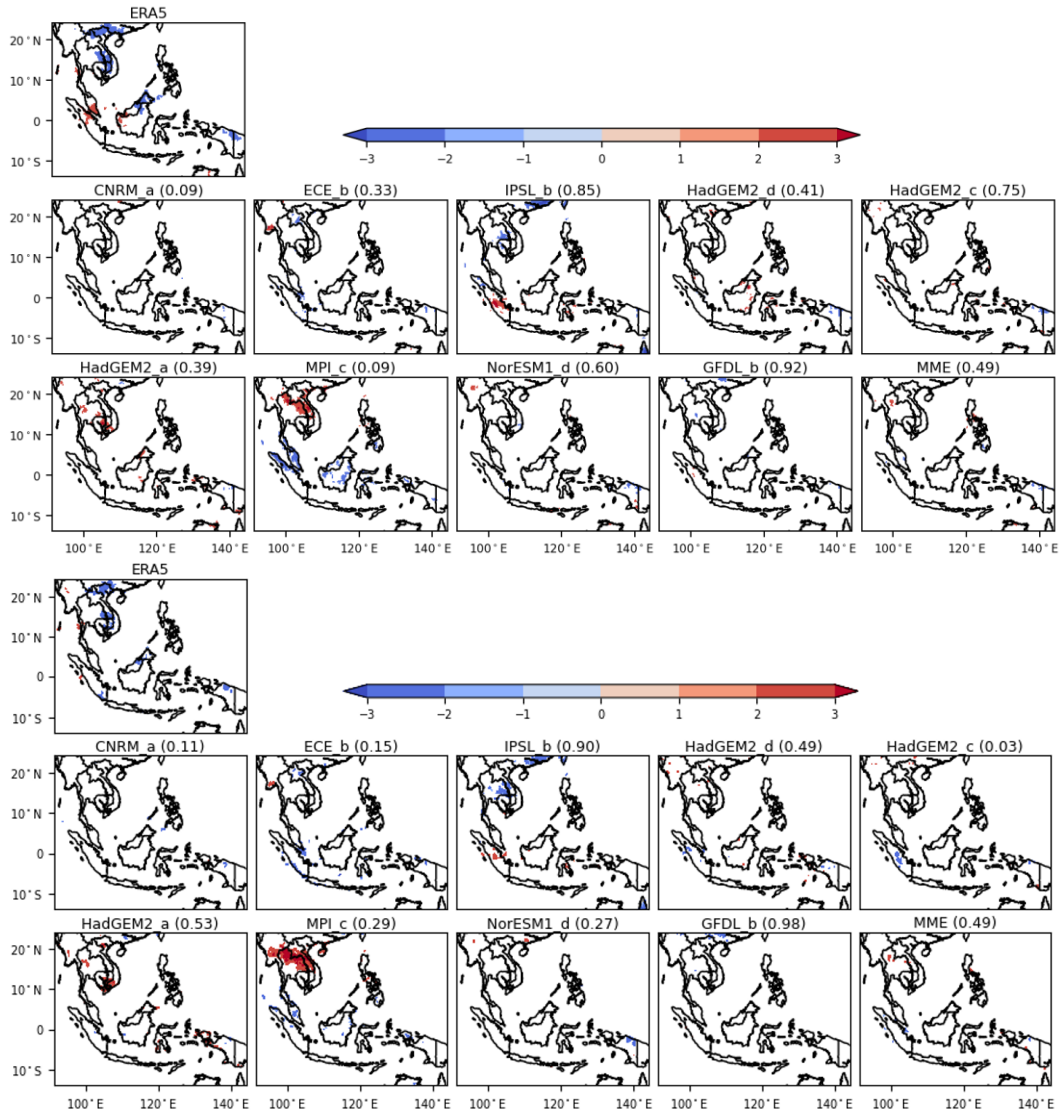
saat  $p\text{-value} < 0,05$  (perlu peningkatan ketelitian perhitungan pada kodingnya). Untuk analisis tren dengan uji MK dan PWMK (Gambar 2c) hasilnya secara umum sedikit berbeda. Hal ini mengindikasikan bahwa efek autokorelasi tidak signifikan terjadi sehingga dua uji tersebut tidak jauh berbeda hasilnya. Perbedaan keduanya yaitu pada data ERA5, ada tren curah hujan signifikan naik di Malaysia bagian Selatan berdasarkan tes MK namun tidak tren berdasarkan tes PMK, sama halnya terjadi pada tren naik pada wilayah Sumatera Selatan berdasarkan model IPSL\_b. Pada model MPI\_c terjadi hal sebaliknya yaitu tren naik di sekitar Thailand yang hanya tampak sedikit berdasarkan tes MK namun tampak lebih banyak berdasarkan tes PMK.

Model CNRM\_a yang pada banyak aspek evaluasi mengungguli model lainnya menunjukkan performa yang cukup rendah dan hal yang sama terjadi pada rata-rata ansambel model (MME) yang pada kebanyakan kasus memiliki performa yang mengungguli model tunggal lainnya namun pada aspek tren curah hujan tidak demikian.

Beberapa hasil penelitian terkait yang terkait dengan perbedaan hasil di atas. Tangang et al. (2020) mengemukakan bahwa simulasi iklim di Asia Tenggara sangat kompleks karena kerumitan geografisnya, yang meliputi banyak pulau, laut yang luas, serta topografi yang beragam. Juneng et al. (2016), menggunakan model RegCM4 dengan berbagai parameterisasi, menunjukkan bahwa model tersebut menghadapi kesulitan dalam mensimulasikan curah hujan di daerah khatulistiwa, termasuk wilayah pegunungan. Untuk wilayah

Kalimantan kemungkinan besar faktor spesifik yang mempengaruhi wilayah ini adalah fenomena Borneo vortex (BV) yang sering terjadi di sekitar Laut Cina Selatan dan sangat memengaruhi anomali curah hujan, yang menjadi tantangan bagi banyak model untuk menangkap fenomena tersebut secara akurat. Koseki & Teo (2014) juga mencatat bahwa BV merupakan faktor penting dalam iklim kawasan ini karena berdampak pada konvergensi kelembaban di lapisan rendah, yang berkontribusi pada peningkatan signifikan dalam curah hujan serta hujan konvektif mesoscale yang intens di sekitar pusat BV. Penelitian lain mengenai BV menunjukkan bahwa defisit curah hujan di wilayah ini mungkin terkait dengan ketidakmampuan model untuk secara akurat mensimulasikan sirkulasi kompleks dan dinamika curah hujan, seperti yang disebutkan oleh Tangang et al. (2020). Liang et al. (2021) menekankan bahwa simulasi BV yang akurat masih menjadi tantangan bagi model iklim saat ini, yang membutuhkan resolusi model yang lebih tinggi (25 km ke bawah). Penelitian mereka dengan menggunakan model HadGEM3 (GCM, 25 km) menunjukkan bahwa model tersebut mampu mensimulasikan BV dengan baik. Persamaan antara model ini dengan HadGEM2 (RCM, 25 km) yang digunakan dalam studi ini terletak pada resolusi, meskipun terdapat perbedaan yang signifikan dalam parameter lainnya. Analisis temporal dari tiga jenis HadGEM pada wilayah yang terdampak BV menunjukkan bahwa HadGEM2-REMO (dari RCM REMO) memiliki kemiripan paling tinggi dengan data referensi (ERA5), diikuti oleh HadGEM2-RCA4 (dari RCM RCA4).





**Gambar 2.** Plot tren rata-rata hujan tahunan pada model dan ERA5 menggunakan uji MK (atas), warna merah menunjukkan tren meningkat dan biru sebaliknya, nilai dalam kurung menyatakan skor similaritas model terhadap ERA5. Label huruf kecil setelah nama model menyatakan singkatan (a=RC4, b= RegCM4-3, c= RegCM4-7 dan d=REMO2015). Plot di tengah dan bawah adalah hasil uji MK dan PMK untuk signifikansi statistic dengan p-value < 0,05.

**KESIMPULAN DAN SARAN**

Berdasarkan hasil pembahasan di atas, pada aspek tren curah hujan dengan data dari tahun 1976-2005 diperoleh bahwa model hujan CORDEX-SEA yang memiliki tingkat kemiripan tertinggi terhadap data referensi (ERA5) yaitu model IPSL\_b (0.65) diikuti oleh model GFDL\_b (0.64). Untuk tren yang signifikan secara statistik (p-value<0,05), berdasarkan uji MK model yang memiliki similaritas tertinggi dengan data referensi (ERA5) adalah IPSL\_b (0.85) diikuti oleh GFDL\_b (0.92) sedangkan dengan uji PWMK hasilnya secara umum hanya sedikit berbeda. Hal ini mengindikasikan

bahwa efek autokorelasi tidak signifikan terjadi sehingga dua uji tersebut tidak jauh berbeda hasilnya.

**UCAPAN TERIMAKASIH**

Ucapan terimakasih disampaikan kepada beasiswa LPDP (Lembaga Pengelola Dana Pendidikan) di bawah kementerian keuangan RI selaku penyandang dana (hasil penelitian ini merupakan bagian dari disertasi penulis pertama). Terima kasih juga disampaikan kepada reviewer yang telah menelaah dan memberikan saran perbaikan pada penulisan hasil penelitian ini.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Aminoto T, Faqih A, Perdinan, Koesmaryono Y, Dasanto B. 2024a. Performa Model Hujan CORDEX-SEA pada Aspek Spatial-Temporal dan Implementasi Faktor Bobot pada Rata-rata Ansambel. IPB University.
- Aminoto T, Faqih A, Perdinan, Koesmaryono Y, Dwi Dasanto B. 2024b. A Comparison of the Performance of the Weighted Ensembles Means in CORDEX-SEA Precipitation Simulations. *Agromet.* 38(1):19–35. doi:10.29244/j.agromet.38.1.19-35.
- Endo N, Matsumoto J, Lwin T. 2009. Trends in precipitation extremes over Southeast Asia. *Sci Online Lett Atmos.* 5(1):168–171. doi:10.2151/sola.2009-043.
- Gao X, Giorgi F. 2017. Use of the RegCM System over East Asia: Review and Perspectives. *Engineering.* 3(5):766–772. doi:10.1016/J.ENG.2017.05.019.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, *et al.* 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* 146(730):1999–2049. doi:10.1002/qj.3803.
- Koseki S, Koh T, Teo C. 2014. Borneo vortex and mesoscale convective rainfall. *Atmos Chem Phys.* 14:4539–4562. doi:10.5194/acp-14-4539-2014.
- Juneng L, Tangang F, Chung JX, Ngai ST, Tay TW, Narisma G, Cruz F, Phan-Van T, Ngo-Duc T, Santisirisomboon J, *et al.* 2016. Sensitivity of Southeast Asia rainfall simulations to cumulus and air-sea flux parameterizations in RegCM4. *Clim Res.* 69(1):59–77. doi:10.3354/cr01386.
- Liang J, Catto J, Howcroft M, Hodges K, Tan M, Haywood J. 2021. Climatology of Borneo Vortices in the HadGEM3-GC3.1 General Circulation Model. *J Clim.*
- Narayanan P, Basistha A, Sarkar S, Kamna S. 2013. Trend analysis and ARIMA modelling of pre-monsoon rainfall data for western India. *Comptes Rendus - Geosci.* 345(1):22–27. doi:10.1016/j.crte.2012.12.001.
- Nikulin G, Jones C, Giorgi F, Asrar G, Büchner M, Cerezo-Mota R, Christensen OB, Déqué M, Fernandez J, Hänsler A, *et al.* 2012. Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *J Clim.* 25(18):6057–6078. doi:10.1175/JCLI-D-11-00375.1.
- Sa'adi, Z., Shahid, S., Ismail, T., Chung, E. S., & Wang, X. J. (2019). Trends analysis of rainfall and rainfall extremes in Sarawak, Malaysia using modified Mann–Kendall test. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131, 263-277.
- Siew JH, Tangang FT, Juneng L. 2014. Evaluation of CMIP5 coupled atmosphere-ocean general circulation models and projection of the Southeast Asian winter monsoon in the 21st century. *Int J Climatol.* 34(9):2872–2884. doi:10.1002/joc.3880.
- Sukmara RB, Wahab MF, Ariyaningsih. 2022. Climate change in south Kalimantan (Borneo): assessment for rainfall and temperature. *JIPE.* 1(2):51–59.
- Supari, Tangang F, Juneng L, Cruz F, Xiang J, Tieh S. 2020. Multi-model projections of precipitation extremes in Southeast Asia based on CORDEX-Southeast Asia simulations. *Environ Res.* 184 March:109350. doi:10.1016/j.envres.2020.109350.
- Tangang F, Chung JX, Juneng L, Supari, Salimun E, Ngai ST, Jamaluddin AF, Mohd MSF, Cruz F, Narisma G, *et al.* 2020. Projected future changes in rainfall in Southeast Asia based on CORDEX–SEA multi-model simulations. *Clim Dyn.* 55(5–6):1247–1267. doi:10.1007/s00382-020-05322-2.
- Tangang F, Supari S, Chung JX, Cruz FT, Observatory TM. 2018. Future changes in annual precipitation extremes over Southeast Asia under global warming of 2°C Future changes in annual precipitation extremes over Southeast

- Asia under global warming of 2°C.  
August:2–8.  
doi:10.30852/sb.2018.436.
- Taylor KE. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a Single Diagram. *J Geophys Res Atmos.* 106:7183–7192.
- Um MJ, Kim Y, Kim J. 2017. Evaluating historical drought characteristics simulated in CORDEX East Asia against observations [Cited by (since 2017): 13]. *Int J Climatol.* 37(13):4643–4655.  
doi:10.1002/joc.5112.