Analisis Performa Pemodelan Iklim Global dalam Prediksi Awal Musim di Sulawesi

Performance Analysis of Global Climate Models for Predicting the Onset of Seasons in Sulawesi

Kadek Valerina Kitana Sanjaya[1], Sayful Amri[1]*, Yahya Darmawan[1], Ervan Ferdiansyah[1]
[1]Program Studi Sekolah Tinggi meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tanah Tinggi, Tangerang, Indonesia
*Corresponding author: Sayful Amri, sayful.amri@stmkg.ac.id

ABSTRAK

Keberagaman tipe Zona Musim (ZOM) di sulawesi, sebagai wilayah dengan tipe ZOM terbanyak, memberikan tantangan dalam memprediksi awal musim. Penelitian ini mengevaluasi dan membandingkan performa model ECMWF SEAS5 dan CFSv2 dalam memprediksi awal musim hujan (AMH) dan awal musim kemarau (AMK) di berbagai tipe ZOM di Sulawesi pada periode tahun 1991-2020. Data yang digunakan berupa data prediksi curah hujan SEAS5 dan CFSv2, yang telah dikoreksi bias, serta data observasi CH Blending. Analisis dilakukan dengan mengelompokkan ZOM ke dalam 10 tipe klimatologis, kemudian menentukan *Lead Time* (LT) berdasarkan normal awal musim tiap kelompok. Evaluasi performa model dihitung menggunakan metode Multi-Category Contingency Table (MCCT) yang dilengkapi dengan perhitungan akurasi dasarian (ACC1) dan dasarian±1 (ACC2) serta perhitungan skill menggunakan Heidke Skill Score (HSS).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa secara umum model SEAS5 lebih baik dalam memprediksi awal musim dibandingkan model CFSv2. Nilai akurasi tertinggi dicapai oleh SEAS5-*corr*, dengan akurasi AMH tertinggi pada ZOM Monsunal-2A inisial prediksi September (90-100%), serta akurasi AMK tertinggi pada Monsunal-2B dan Ekuatorial-4A pada inisial September (80-90%). Sebaran nilai HSS menunjukkan pola yang sesuai dengan akurasi, di mana ZOM Monsunal dan Ekuatorial-2 menghasilkan skill terbaik yang dominasi nilai positif. Sebaran HSS tinggi, lebih besar dari 0.50, dijumpai pada ZOM Monsunal-2A, monsunal-2B dan Ekuatorial-4A. Secara umum, kedua model menunjukkan performa yang lebih baik pada pendekatan ACC2 dan LT pendek. Model SEAS5-*corr* menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan CFSv2-*corr*, kecuali pada AMK Lokal-4 dan AMH Ekuatorial-4B.

Kata kunci: SEAS5; CFSv2; Awal Musim; Evaluasi; HSS

ABSTRACT

The diversity of Seasonal Zone (ZOM) types in Sulawesi, as the region with the highest number of ZOM in Indonesia, poses a challenge in predicting seasonal onset. This study evaluates and compares ECMWF SEAS5 and CFSv2 model performance in predicting the rainy season onset and dry season onset across various ZOM types in Sulawesi for the 1991-2020 period. The data used includes bias-corrected SEAS5 and CFSv2 precipitation prediction, and blended observed precipitation. The analysis was conducted by grouping the ZOMs into 10 climatological types, followed by determining the Lead Time (LT) based on the normal seasonal onset of each group. Model performance evaluation was calculated using Multi-Category Contingency Table (MCCT) method, complemented by exact ten-day accuracy (ACC1) and ten-day±1 (ACC2) approach, and Heidke Skill Score (HSS).

The result show that both models are generally capable to represent the climatological patterns of ZOM in Sulawesi, although SEAS5-corr predictions are more representative. The highest accuracy was achieved by SEAS5-corr, with the highest AMH accuracy found in Monsoonal-2A for initial month in September (90-100%), and the highest AMK accuracy in Monsoonal-2B (July and September initialization) and Equatorial-4A (September initialization) at 80-90%. The distribution of HSS values aligns with the accuracy patterns, where Monsoonal and Equatorial-2 shows the best skills, dominated by high values. Highest HSS values were observed exceeding 0-50 in Monsoonal-2A/2B and Equatorial-4A. In general, both models perform better using the ACC2 approach and short LT. Overall, the SEAS5-corr model consistently outperformed CFSv2-corr, except for AMK in Local-4 and AMH in Equatorial-4B.

Keywords: *SEAS5; CFSv2; seasonal onset; evaluation; HSS*

ARTICLE IDENTIFIERS

ORIGINAL ARTICLE
Volume 9 - Issue 10 - 2026
Pages 4755-4768
DOI: 10.56338/jks.v9i10.12040

ARTICLE HISTORY

Received: 14 August 2026
Revised: 12 October 2026
Accepted: 22 October 2026

CC BY-SA 4.0

PENDAHULUAN

Prediksi awal musim merupakan salah satu informasi iklim yang berperan penting dalam mendukung berbagai sektor, terutama pertanian, pengelolaan sumber daya air, dan mitigasi bencana hidrometeorologi. Kesalahan dalam menentukan awal musim dapat menyebabkan ketidaktepatan penyusunan kalender tanam, meningkatnya risiko gagal panen, serta kerugian ekonomi pada sektor pertanian (Marjuki dkk., 2025; Naylor dkk., 2007). Oleh karena itu, evaluasi terhadap kemampuan model prediksi musiman menjadi langkah penting untuk meningkatkan kualitas informasi prakiraan musim.

Dalam operasional prakiraan musim, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) memanfaatkan luaran model iklim *global European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Seasonal Prediction System 5* (ECMWF SEAS5) dan *Climate Forecast System Version 2* (CFSv2) dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Perbedaan karakteristik kedua model dipengaruhi oleh arsitektur sistem prediksi, resolusi horizontal, serta skema parameterisasi atmosfer yang digunakan. ECMWF SEAS5 merupakan pengembangan terbaru dari sistem prediksi musiman ECMWF yang memiliki peningkatan kemampuan dalam merepresentasikan proses atmosfer dan hidrologi global dibandingkan pendahulunya (Johnson dkk., 2019; Wang dkk., 2019). Sementara itu, CFSv2 menunjukkan peningkatan performa dalam memprediksi variabilitas curah hujan antartahun dan mampu merepresentasikan pola spasial hujan monsun dengan lebih baik dibandingkan generasi sebelumnya (Saha dkk., 2014; Acharya dkk., 2014).

Evaluasi prediksi merupakan bagian penting dalam menilai kualitas suatu model prakiraan. Suatu prakiraan dinilai berdasarkan kemampuan model dalam menghasilkan informasi yang memiliki kesesuaian dengan referensi (Murphy, 1993). Jolliffe dan Stephenson (2003) menjelaskan bahwa verifikasi prakiraan digunakan untuk mengukur kualitas dan *skill* suatu prediksi. Dalam prediksi musim, evaluasi diperlukan karena model iklim global dapat menghasilkan bias sistematis akibat perbedaan antara kondisi yang direpresentasikan model dan kondisi aktual. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi performa model prediksi musiman di Indonesia. Muharsyah et al. (2020) membandingkan kemampuan ECMWF System 4 dan CFSv2 dalam prediksi musim di Indonesia dan menunjukkan bahwa model SEAS4 lebih unggul dibandingkan CFS, teutama pada tipe ZOM Monsunal dan Ekuatorial. Safi'i dan Sopaheluwakan (2020) juga menunjukkan bahwa CFSv2 memiliki *skill* dalam memprediksi anomali curah hujan di Indonesia. Selain itu, Kurnia dkk. (2020) menunjukkan bahwa prakiraan curah hujan ECMWF di Sulawesi masih memiliki bias sehingga diperlukan proses koreksi bias untuk meningkatkan kesesuaian hasil prakiraan dengan observasi. Penelitian Miokta (2023) di Pulau Jawa menunjukkan bahwa penggunaan data SEAS5 yang telah dikoreksi bias (SEAS5-*corr*) memberikan akurasi yang lebih baik dibandingkan data SEAS5 tanpa koreksi (SEAS5-*raw*) dalam prediksi awal musim. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa penggunaan toleransi ±1 dasarian dapat memberikan informasi akurasi yang lebih representatif dalam menentukan ketepatan awal musim. Selanjutnya, Rohmah (2025) di Kalimantan menunjukkan bahwa pemilihan inisial prediksi berdasarkan karakteristik normal musim pada kelompok ZOM dapat menghasilkan performa prediksi yang lebih baik pada beberapa kelompok ZOM dibandingkan penggunaan inisial yang seragam. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa performa model prediksi musim tidak hanya dipengaruhi oleh model yang digunakan, tetapi juga oleh karakteristik wilayah, waktu inisiasi, serta karakteristik awal musim yang diprediksi.

Pulau Sulawesi merupakan wilayah yang memiliki tingkat kompleksitas iklim yang tinggi karena dipengaruhi oleh topografi berbentuk K-shape serta keberadaan tiga tipe utama pola hujan, yaitu monsunal, ekuatorial, dan lokal, dalam satu pulau yang sama (Aldrian dan Susanto, 2003; Kurnia dkk., 2020). Berdasarkan pemutakhiran ZOM periode 1991–2020, Sulawesi terdiri atas 104 ZOM yang terbagi ke dalam delapan subtipe, yaitu monsunal-1, monsunal-2, ekuatorial-1, ekuatorial-2, ekuatorial-4, lokal-2, lokal-4, dan lokal-5 (BMKG, 2022). Keragaman pola hujan tersebut menjadikan Sulawesi sebagai salah satu wilayah dengan tantangan prediksi musim yang lebih besar dibandingkan wilayah lain di Indonesia. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa model iklim global cenderung mengalami penurunan performa pada wilayah dengan variabilitas iklim dan pengaruh topografi yang kompleks (Kurnia dkk., 2020; Muharsyah dkk., 2020).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan membandingkan performa model ECMWF SEAS5 dan CFSv2 dalam memprediksi awal musim di Pulau Sulawesi berdasarkan ZOM periode 1991–2020. Evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan variasi LT yang disesuaikan dengan karakteristik normal awal musim pada masing-masing kelompok ZOM sehingga dapat diperoleh LT dan model yang paling representatif dalam memprediksi awal musim di Sulawesi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan bagi

CC BY-SA 4.0

pengembangan sistem prediksi musim serta meningkatkan akurasi informasi awal musim pada wilayah dengan karakteristik iklim yang kompleks.

METODE

Wilayah dan Data Penelitian

Penelitian dilakukan di Pulau Sulawesi yang terdiri atas 104 ZOM berdasarkan pemutakhiran ZOM periode 1991–2020 (Supari dkk., 2022). Wilayah ini dipilih karena memiliki karakteristik iklim yang kompleks dengan kombinasi pola hujan monsunal, ekuatorial, dan lokal.

Data yang digunakan meliputi curah hujan dasarian observasi blending BMKG, curah hujan prediksi ECMWF SEAS5-*corr*, dan NOAA CFSv2-*corr* selama periode 1991–2020. Data observasi memiliki resolusi spasial 0,05° × 0,05°, sedangkan data SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr* masing-masing memiliki resolusi asli 0,4° × 0,4° dan 1,0° × 1,0°. Seluruh data model telah melalui proses koreksi bias Linear Scaling dan disetarakan ke resolusi 0,05° × 0,05° serta diagregasikan berdasarkan poligon ZOM sebelum dilakukan analisis.

Pengelompokan ZOM dan Penentuan LT

Sebanyak 104 ZOM di Sulawesi dikelompokkan berdasarkan karakteristik normal awal musim hujan (AMH) dan awal musim kemarau (AMK) mengacu pada buku Pemutakhiran Zona Musim Indonesia Periode 1991–2020 (Supari dkk., 2022). Pengelompokan menghasilkan sepuluh kelompok ZOM, yaitu Monsunal-2A, Monsunal-2B, Monsunal-2C, Ekuatorial-2, Ekuatorial-4A, Ekuatorial-4B, Lokal-2A, Lokal-2B, Lokal-2C, dan Lokal-4.

LT prediksi tidak diseragamkan untuk seluruh wilayah, tetapi disesuaikan dengan rentang normal awal musim pada masing-masing kelompok ZOM. Pendekatan ini bertujuan memperoleh inisial prediksi yang paling representatif sesuai karakteristik musim setiap kelompok ZOM.

Penentuan dan Verifikasi Awal Musim

AMH ditentukan ketika curah hujan pada suatu dasarian mencapai ≥50 mm dan diikuti oleh dua dasarian berikutnya dengan curah hujan ≥50 mm. Sebaliknya, AMK ketika curah hujan pada suatu dasarian <50 mm dan diikuti oleh dua dasarian berikutnya dengan curah hujan <50 mm. Kriteria tersebut diterapkan pada data observasi maupun luaran model SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr*.

Hasil penentuan awal musim selanjutnya diverifikasi menggunakan Multi-category Contingency Table (MCCT) untuk membandingkan kategori awal musim hasil prediksi dengan observasi. Tingkat keakuratan prediksi

CC BY-SA 4.0

dihitung menggunakan pendekatan ACC2, yang memberikan toleransi ±1 dasarian dari waktu observasi (persamaan 1.1).

$$ACC2 = \left(\frac{\begin{matrix} n(P_1O_1)+n(P_1O_2)+ \\ n(P_2O_1)+n(P_2O_2)+ \\ n(P_2O_3)+n(P_3O_2)+ \\ n(P_kO_k)+ n(P_{k+1}O_k)+ \\ n(P_{k-1}O_k) \end{matrix}}{N} \right) \times 100\% \quad (1.1)$$

Keterangan:
P : nilai prediksi awal musim model
P_(k-1) : prediksi maju satu dasarian
P_(k+1) : prediksi mundur satu dasarian
O : nilai awal musim observasi
k : kategori waktu akumulasi
N : jumlah kejadian
ACC1 : akurasi dasarian
ACC2 : akurasi dasarian±1

Evaluasi Skill Model

Kemampuan prediksi kedua model dievaluasi menggunakan Heidke Skill Score (HSS). Nilai HSS digunakan untuk mengukur tingkat keterampilan model setelah memperhitungkan peluang kecocokan yang terjadi secara acak. Nilai HSS berkisar dari −1 hingga 1, dengan nilai positif menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan prediksi yang lebih baik dibandingkan tebakan acak, nilai 0 menunjukkan tidak adanya keterampilan prediksi, sedangkan nilai negatif menunjukkan performa yang lebih buruk daripada tebakan acak.

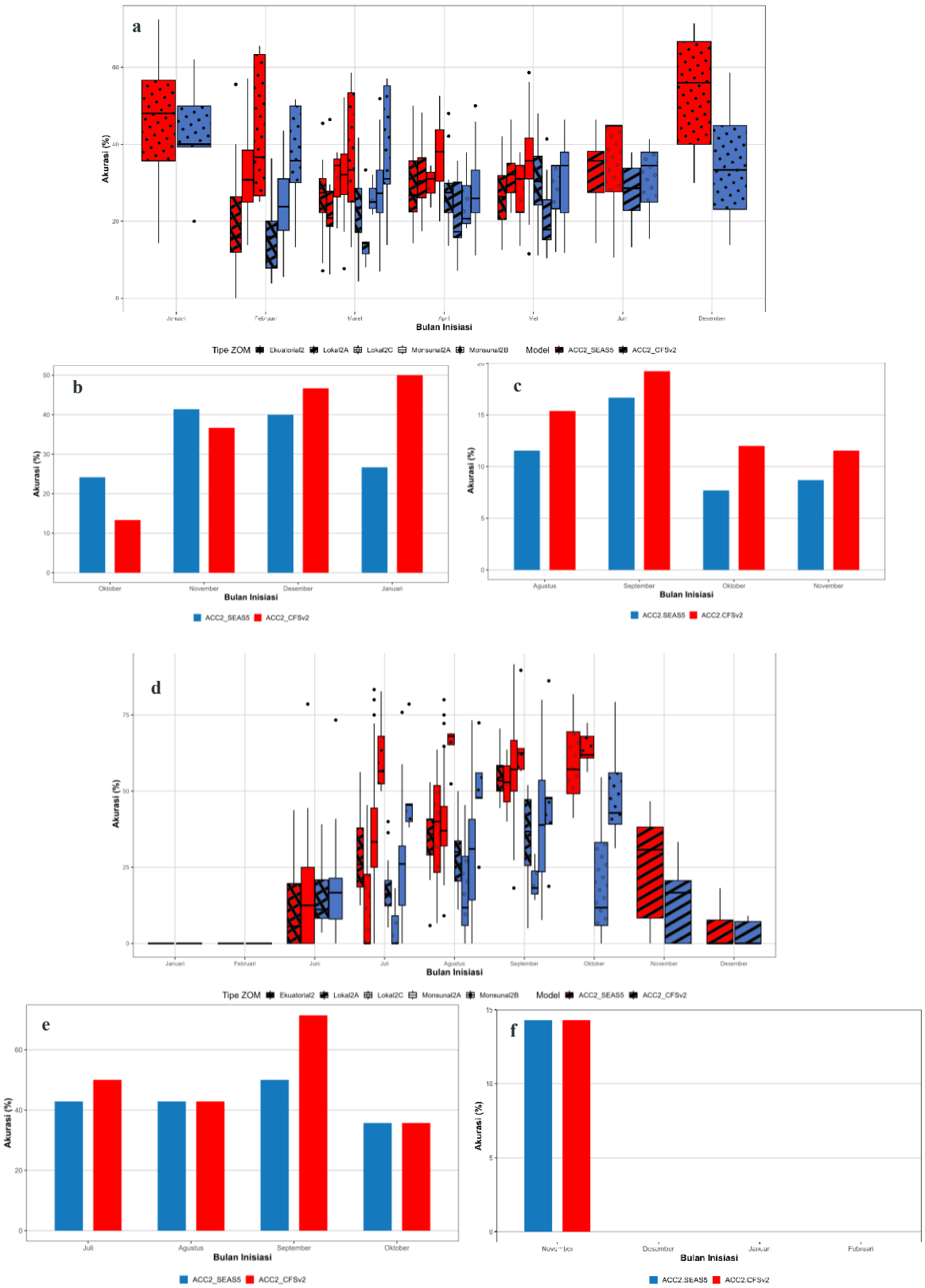
Perbandingan performa dilakukan terhadap seluruh kelompok ZOM untuk prediksi AMH dan AMK pada berbagai lead time. Selanjutnya, nilai ACC2 dan HSS dibandingkan antara SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr* guna mengidentifikasi model dan lead time terbaik dalam memprediksi awal musim di Pulau Sulawesi.

HASIL

Perbandingan performa model SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr* pada kelompok ZOM dua musim

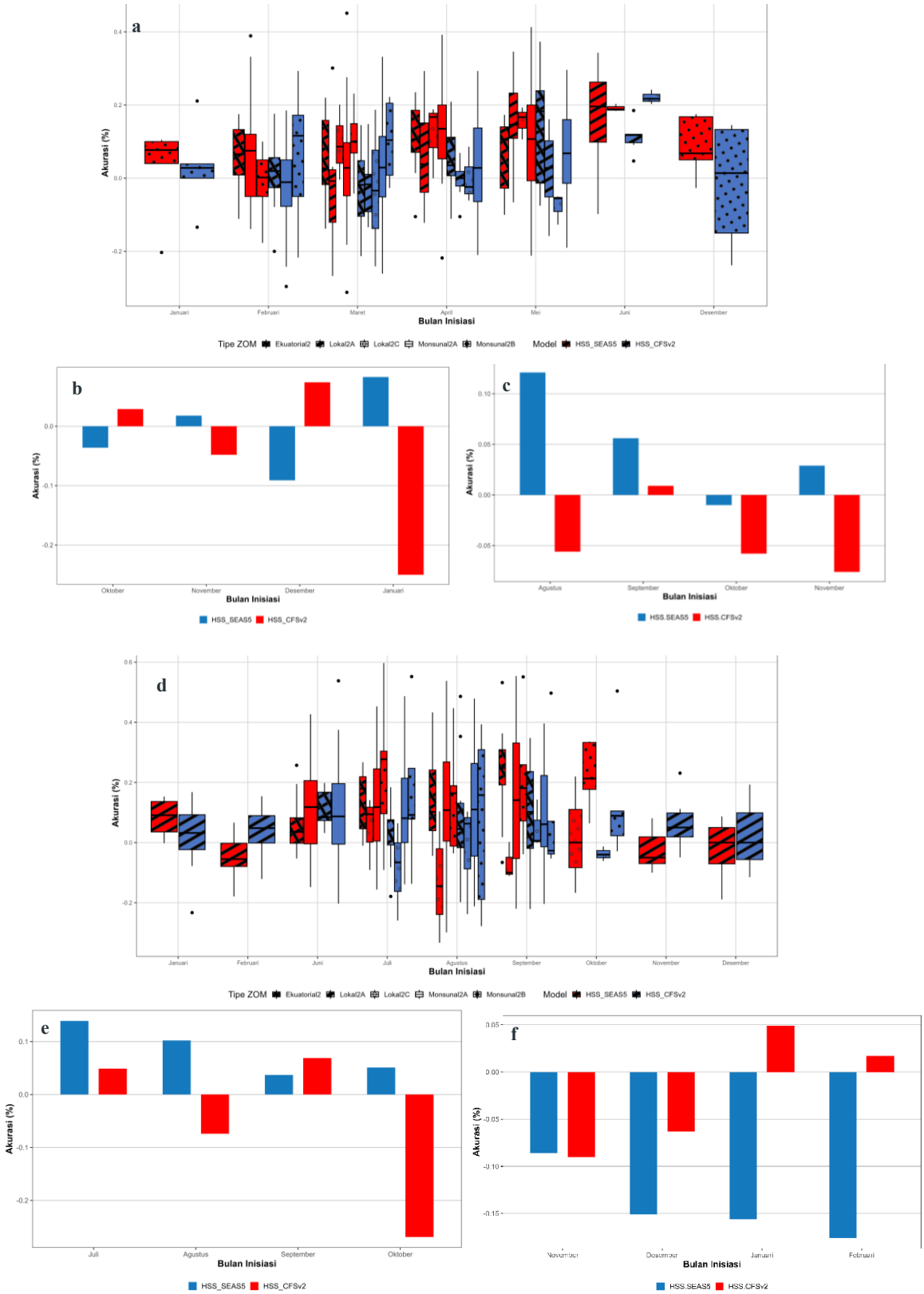
Gambar 1 dan 2 menyajikan performa model SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr* dalam memprediksi AMK dan AMH kelompok ZOM dua musim di Sulawesi dalam bentuk boxplot berdasarkan nilai ACC2 serta bulan inisial prediksi terbaik. Kelompok ZOM monsunal menunjukkan performa prediksi yang paling baik dibandingkan kelompok lainnya. Pada prediksi awal musim, model SEAS5-*corr* umumnya menghasilkan nilai ACC2 yang lebih tinggi dibandingkan CFSv2-*corr*. Pada Gambar 3 (a,b,e,f) menampilkan sebaran akurasi ACC2 luaran model SEAS5 (a,e) dan CFSv2 (b,f) pada tipe ZOM Monsunal-2A, Monsunal-2B, Monsunal-2C, dan Ekuatorial-2. Monsunal-2A memberikan performa terbaik dengan ACC2 mencapai 100% pada SEAS5-*corr* dan 80% pada CFSv2-*corr*. Pada Monsunal-2B dan Monsunal-2C juga memperlihatkan keunggulan SEAS5-*corr* dengan ACC2 lebih tinggi dibandingkan CFSv2-*corr*. Pada prediksi AMH, kedua model mengalami peningkatan akurasi dibandingkan AMK. Nilai HSS pada kelompok monsunal umumnya berada pada kisaran positif hingga 0,6, yang menunjukkan bahwa kedua model memiliki kemampuan prediksi yang baik. Selain itu, inisial prediksi terbaik untuk AMK didominasi bulan Mei dan Desember, sedangkan untuk AMH didominasi bulan September, menunjukkan konsistensi waktu prediksi terbaik pada kelompok monsunal.

CC BY-SA 4.0



Gambar 1. Boxplot sebaran akurasi ACC2 tipe ZOM dua musin untuk AMK (a,b,c) dan AMH (d,e,f) pada Monsunal-2A, Monsunal-2B, Ekuatorial-2, Lokal-2A, dan Lokal-2C (a,d), Monsunal-2C (b,e), dan Lokal-2B (c,f)

CC BY-SA 4.0

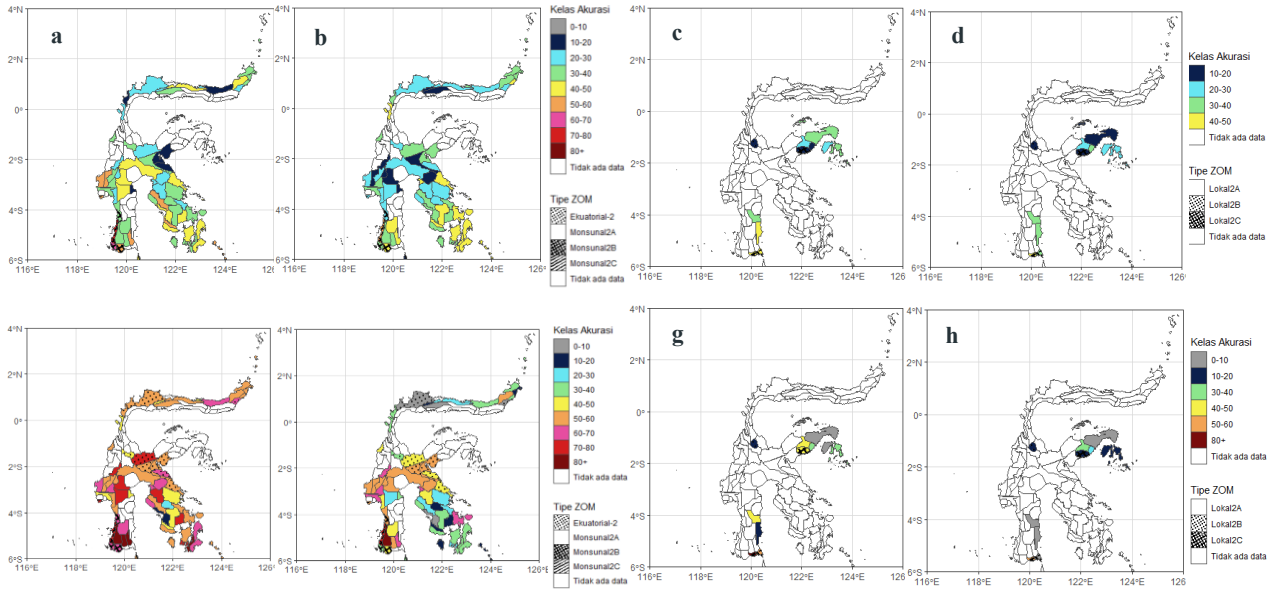


Gambar 2. Boxplot sebaran akurasi HSS tipe ZOM dua musin untuk AMK (a,b,c) dan AMH (d,e,f) pada Monsunal-2A, Monsunal-2B, Ekuatorial-2, Lokal-2A, dan Lokal-2C (a,d), Monsunal-2C (b,e), dan Lokal-2B (c,f)

CC BY-SA 4.0

Pada kelompok ZOM ekuatorial, kedua model memperlihatkan performa yang relatif seimbang. Untuk prediksi AMK pada Ekuatorial-2, baik SEAS5-*corr* maupun CFSv2-*corr* menghasilkan ACC2 yang sama, yang berada pada kategori rendah ke menengah, dengan nilai HSS berkisar dari negatif hingga sekitar 0,4. Namun, pada prediksi AMH, SEAS5-*corr* memberikan hasil yang sedikit lebih baik dengan model SEAS5-*corr* menunjukkan performa lebih baik. Nilai HSS kedua model juga menunjukkan kemampuan prediksi yang cukup baik dengan dominasi nilai positif hingga sekitar 0,5. Inisial prediksi terbaik pada kelompok ekuatorial2 yaitu bulan Mei untuk AMK dan September untuk AMH, yang menunjukkan bahwa penyesuaian LT berdasarkan karakteristik normal musim mampu menghasilkan performa prediksi yang lebih optimal.

Kelompok ZOM lokal yang ditampilkan pada Gambar 3 (c,d,g,h) menunjukkan performa yang lebih bervariasi dibandingkan kelompok monsunal dan ekuatorial. Pada Lokal-2A, SEAS5-*corr* secara umum memberikan nilai ACC2 dan HSS yang sedikit lebih tinggi dibandingkan CFSv2-*corr* baik untuk AMK maupun AMH. Sebaliknya, Lokal-2B merupakan kelompok dengan performa terendah pada kedua model, dengan nilai HSS yang rendah bahkan bernilai negatif pada prediksi AMH menggunakan CFSv2-*corr*. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kedua model masih mengalami kesulitan dalam merepresentasikan wilayah dengan pola hujan lokal yang dipengaruhi oleh faktor topografi dan proses atmosfer skala kecil. Pada Lokal-2C, kedua model kembali menunjukkan peningkatan performa, khususnya pada prediksi AMH, dengan ACC2 mencapai 40–90% pada SEAS5-*corr* dan 0–60% pada CFSv2-*corr*. Nilai HSS juga didominasi nilai positif hingga sekitar 0,3. Secara umum, kelompok lokal masih memperlihatkan variasi performa yang lebih besar dibandingkan kelompok monsunal dan ekuatorial, meskipun SEAS5-*corr* cenderung memberikan hasil yang sedikit lebih baik pada sebagian besar parameter evaluasi.



Gambar 3. Peta sebaran akurasi ACC2 pada LT terbaik luaran model SEAS5 (a,c,e,g) dan CFSv2 (b,d,f,h) tipe ZOM dua musin untuk AMK (a,b,c,d) dan AMH (e,f,g,h) pada Monsunal-2A, Monsunal-2B, Monsunal-2C, dan Ekuatorial-2(a,b,e,f) Lokal-2A, Lokal-2B, dan Lokal-2C (c,d,g,h)

Perbandingan performa model SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr* pada kelompok ZOM empat musim

Berdasarkan Gambar 4 dan 5 menampilkan sebaran akurasi ACC2 dan HSS tipe ZOM empat Musim dengan AMK1, AMK2, AMH1, dan AMH2, dimana Lokal-4 dipisah karena hanya terdapat satu ZOM. Sebaran spasial akurasi dan HSS kelompok Ekuatorial-4A, Ekuatorial-4B, dan Lokal-4 ditampilkan pada Gambar 6. Kelompok ZOM Ekuatorial-4A dan menunjukkan performa prediksi yang relatif lebih baik dibandingkan kelompok empat

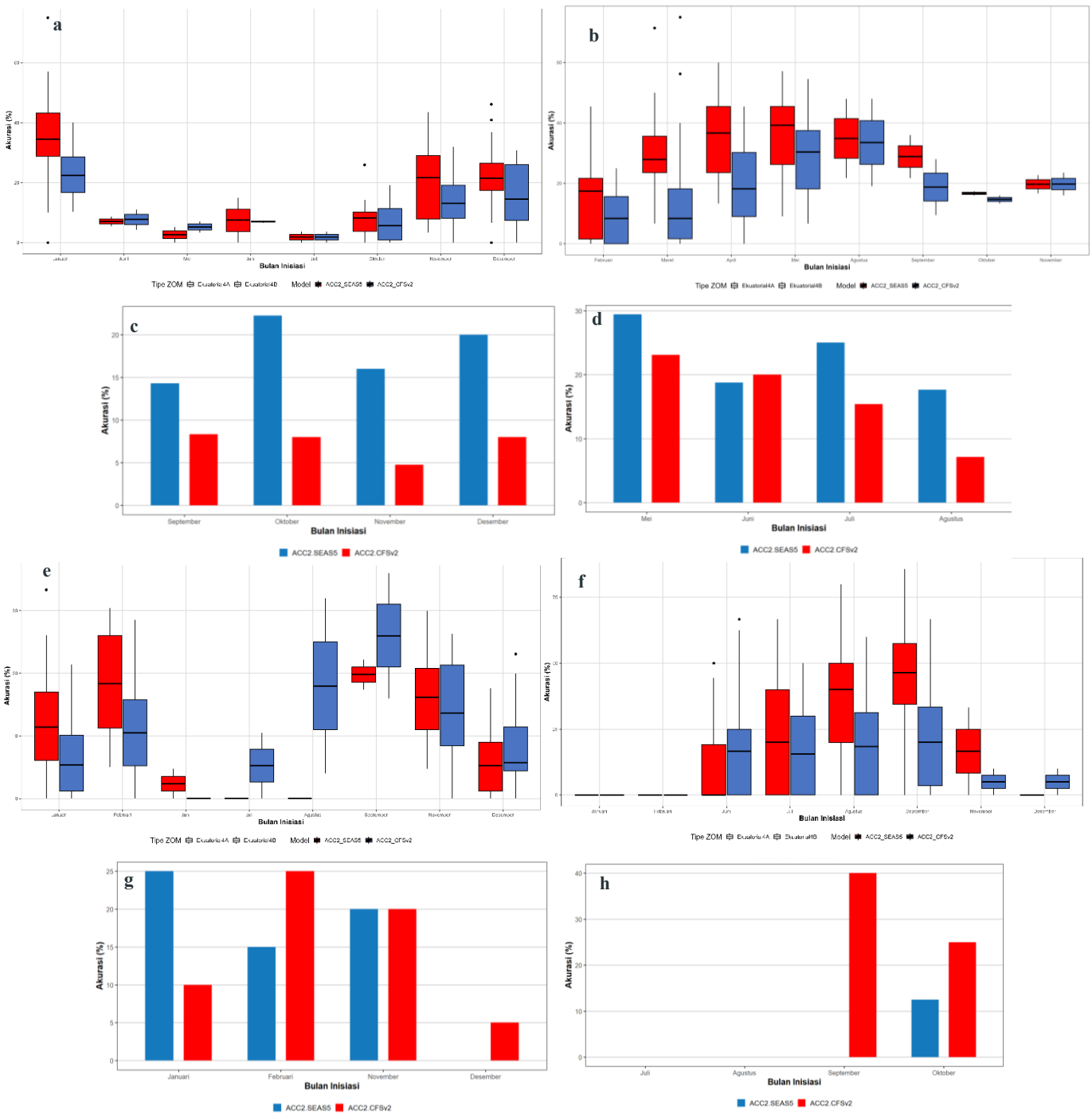
CC BY-SA 4.0

musim lainnya. Pada prediksi AMK1, model SEAS5-*corr* menghasilkan nilai ACC2 lebih tinggi dibandingkan CFSv2-*corr*. Nilai HSS kedua model didominasi nilai positif hingga sekitar 0,4–0,5, dengan inisial prediksi terbaik pada bulan Januari (LT1). Pada AMK2, kedua model memiliki nilai ACC2 yang sama, namun SEAS5-*corr* menghasilkan nilai HSS maksimum yang lebih dibandingkan CFSv2-*corr*. Untuk prediksi AMH1, SEAS5-*corr* kembali menunjukkan performa yang lebih baik daripada CFSv2-*corr*, meskipun keduanya berada dalam kategori rendah. Perbedaan yang lebih jelas terlihat pada AMH2, di mana SEAS5-*corr* memperoleh ACC2 hingga 90%, sedangkan CFSv2-*corr* mencapai 70%. Nilai HSS pada kedua model tetap didominasi nilai positif hingga sekitar 0,5, menunjukkan bahwa kedua model mampu merepresentasikan dua siklus musim pada kelompok Ekuatorial-4A dengan cukup baik, meskipun SEAS5-*corr* memberikan performa yang lebih konsisten. Pada kelompok Ekuatorial-4B, kemampuan prediksi kedua model cenderung lebih rendah dibandingkan Ekuatorial-4A. Prediksi AMK1 hanya menghasilkan ACC2 dibawah nilai 20% untuk kedua model. Performa meningkat pada AMK2, di mana kedua model menghasilkan ACC2 hingga 50%, meskipun SEAS5-*corr* memiliki rentang HSS yang sedikit lebih tinggi. Pada prediksi AMH1, kedua model menunjukkan akurasi dengan ACC2 mencapai 30% pada SEAS5-*corr* dan 40% pada CFSv2-*corr*. Sebaliknya, AMH2 masih memperlihatkan performa yang relatif rendah. Nilai HSS pada AMH2 juga masih didominasi nilai rendah hingga mendekati nol, mengindikasikan bahwa kemampuan kedua model dalam memprediksi musim kedua pada kelompok Ekuatorial-4B masih terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa pergeseran waktu awal musim pada kelompok Ekuatorial-4B lebih sulit direpresentasikan oleh model dibandingkan Ekuatorial-4A.

Kelompok Lokal-4 merupakan kelompok empat musim dengan performa prediksi yang paling bervariasi. Pada AMK1, CFSv2-*corr* menghasilkan nilai ACC1 dan ACC2 yang sedikit lebih tinggi dibandingkan SEAS5-*corr*. Namun demikian, SEAS5-*corr* memiliki nilai HSS yang lebih tinggi. Pada AMK2, keduan model meunjukkan akurasi yang relatif sama, namun SEAS5-*corr* memiliki nilai HSS yang lebih tinggi. Untuk prediksi AMH1, CFSv2-*corr* memperoleh ACC2 yang lebih tinggi dibandingkan SEAS5-*corr*. Pada AMH2, CFSv2-*corr* juga menunjukkan performa yang lebih baik dengan ACC2 sebesar 30–40%, sedangkan SEAS5-*corr* hanya berkisar 0–10%. Meskipun demikian, nilai HSS kedua model pada kelompok Lokal-4 umumnya masih berada pada kisaran 0–0,2 sehingga menunjukkan bahwa kemampuan prediksi pada wilayah dengan pola hujan lokal empat musim masih relatif rendah dibandingkan kelompok ekuatorial empat musim.

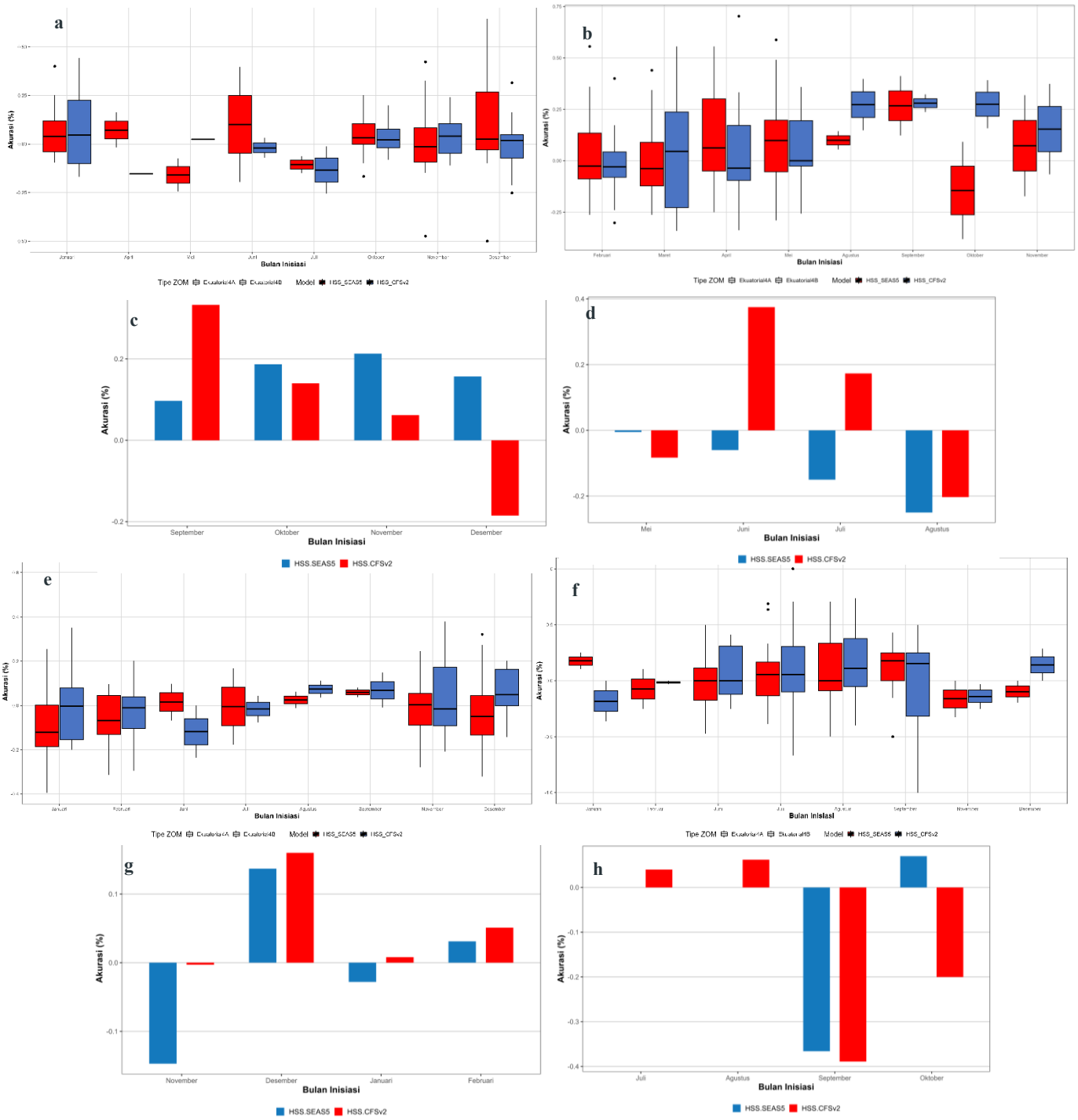
Secara keseluruhan, hasil pada kelompok ZOM empat musim menunjukkan bahwa Ekuatorial-4A merupakan kelompok dengan performa prediksi terbaik, ditandai oleh nilai ACC2 dan HSS yang lebih tinggi pada hampir seluruh parameter, terutama untuk prediksi AMH2. Sebaliknya, Ekuatorial-4B dan Lokal-4 masih memperlihatkan tingkat akurasi dan skill yang lebih rendah, terutama pada musim kedua. Dibandingkan CFSv2-*corr*, SEAS5-*corr* cenderung lebih unggul pada kelompok Ekuatorial-4A dan sebagian besar parameter Ekuatorial-4B, sedangkan CFSv2-*corr* menunjukkan performa yang sedikit lebih baik pada beberapa parameter kelompok Lokal-4, khususnya berdasarkan nilai ACC2.

CC BY-SA 4.0



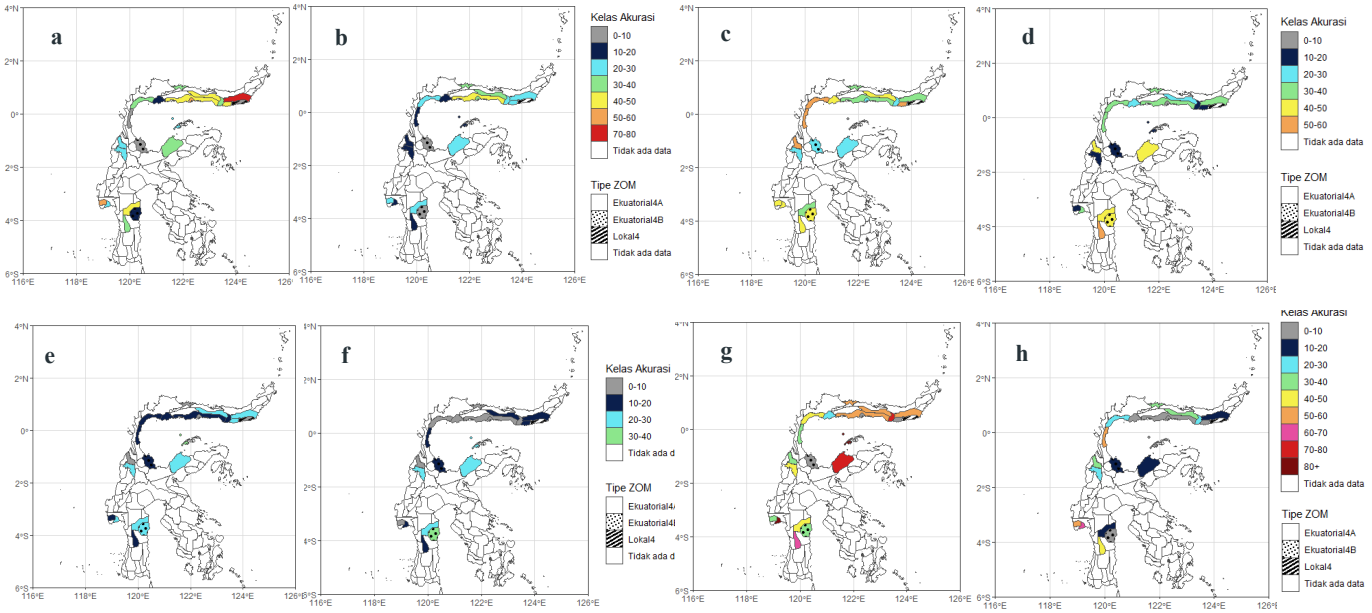
Gambar 4. Boxplot sebaran akurasi ACC2 tipe ZOM dua musin untuk AMK (a,b,c) dan AMH (d,e,f) pada Monsunal-2A, Monsunal-2B, Ekuatorial-2, Lokal-2A, dan Lokal-2C (a,d), Monsunal-2C (b,e), dan Lokal-2B (c,f)

CC BY-SA 4.0



Gambar 5. Boxplot sebaran akurasi ACC2 tipe ZOM dua musin untuk AMK (a,b,c) dan AMH (d,e,f) pada Monsunal-2A, Monsunal-2B, Ekuatorial-2, Lokal-2A, dan Lokal-2C (a,d), Monsunal-2C (b,e), dan Lokal-2B (c,f)

CC BY-SA 4.0



Gambar 6. Peta sebaran akurasi ACC2 luaran model SEAS5 (a,c,e,g) dan CFSv2 (b,d,f,h) tipe ZOM empat musin untuk AMK1 (a,b) AMK2 (c,d) dan AMH1 (e,f) AMH2 (g,h)

PEMBAHASAN

Performa model SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr* dalam memprediksi awal musim di Sulawesi menunjukkan perbedaan yang dipengaruhi oleh karakteristik pola hujan masing-masing kelompok ZOM. Secara umum, kedua model memberikan hasil yang lebih baik pada kelompok ZOM yang memiliki pola musim global, sedangkan performanya menurun pada kelompok ZOM dengan pola hujan yang lebih kompleks. Hal ini terlihat dari nilai ACC2 dan HSS yang cenderung lebih tinggi pada kelompok Monsunal dan sebagian kelompok Ekuatorial dibandingkan kelompok Lokal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kompleksitas pola hujan menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi kemampuan model dalam merepresentasikan awal musim di Sulawesi.

Pada kelompok ZOM dua musim, tipe Monsunal-2A, Monsunal-2B, dan Monsunal-2C secara umum menunjukkan performa terbaik dibandingkan kelompok lainnya. Pola hujan monsunal memiliki satu musim hujan dan satu musim kemarau yang dikendalikan terutama oleh sirkulasi monsun Asia–Australia sehingga waktu transisi musim lebih konsisten dari tahun ke tahun. Nilai akurasi yang lebih tinggi pada prediksi AMH dibandingkan AMK juga menunjukkan bahwa kedua model lebih mampu merepresentasikan peningkatan curah hujan pada AMH daripada penurunan curah hujan pada AMK. Hasil ini sejalan dengan Wang dkk. (2019) yang menyatakan bahwa SEAS5 memiliki kemampuan yang baik dalam memprediksi variabilitas curah hujan musiman di wilayah tropis serta mampu merepresentasikan perkembangan sistem monsun dengan lebih baik dibandingkan generasi sebelumnya. Kelompok Ekuatorial-2 memperlihatkan performa yang sedikit lebih rendah dibandingkan kelompok monsunal, meskipun kedua model masih mampu menghasilkan nilai HSS yang didominasi positif. Berbeda dengan pola monsunal, wilayah ekuatorial dipengaruhi oleh pergerakan *Intertropical Convergence Zone* (ITCZ), aktivitas konveksi tropis, serta variabilitas ENSO dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) (Aldrian dan Susanto, 2003), sehingga waktu awal musim menjadi lebih dinamis. Variabilitas tersebut menyebabkan ketidakpastian prediksi meningkat, terutama pada tahun-tahun dengan anomali iklim yang kuat. Performa terendah pada kelompok dua musim ditemukan pada Lokal-2A, Lokal-2B, dan Lokal-2C, terutama pada Lokal-2B. Rendahnya nilai ACC maupun HSS menunjukkan bahwa kedua model masih mengalami kesulitan dalam memprediksi wilayah dengan pola hujan lokal. Pola hujan lokal di Sulawesi lebih

CC BY-SA 4.0

banyak dipengaruhi oleh kondisi topografi, sirkulasi angin lokal, serta proses konveksi berskala meso yang sulit direpresentasikan oleh model iklim global. Topografi Pulau Sulawesi yang berbentuk K-shape dengan pegunungan di bagian tengah menyebabkan distribusi curah hujan berubah secara signifikan dalam jarak yang relatif pendek. Akibatnya, proses pembentukan hujan lebih dipengaruhi oleh mekanisme lokal dibandingkan dinamika atmosfer skala global. Temuan ini sejalan dengan Kurnia dkk. (2020) dan Muharsyah dkk. (2020) yang menyatakan bahwa performa model global cenderung menurun pada wilayah dengan pengaruh topografi dan variabilitas lokal yang tinggi.

Pada kelompok ZOM empat musim, performa terbaik diperoleh pada Ekuatorial-4A. Kelompok ini memiliki dua periode musim hujan dan dua periode musim kemarau yang berlangsung relatif konsisten sehingga kedua model masih mampu memprediksi perubahan pola curah hujan antarperiode. Nilai ACC2 dan HSS yang relatif tinggi menunjukkan bahwa baik SEAS5-*corr* maupun CFSv2-*corr* mampu merepresentasikan dua siklus musim tersebut dengan cukup baik. Sebaliknya, pada Ekuatorial-4B, performa kedua model mengalami penurunan. Pergeseran waktu awal musim beberapa dasarian dibandingkan Ekuatorial-4A menyebabkan model lebih sulit menentukan waktu transisi musim secara tepat. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kedua kelompok sama-sama bertipe ekuatorial empat musim, perbedaan karakteristik klimatologis antarwilayah tetap memberikan pengaruh terhadap kemampuan prediksi model. Kelompok Lokal-4 menunjukkan performa yang paling rendah pada kelompok empat musim. Rendahnya nilai ACC dan HSS mengindikasikan bahwa pola hujan lokal empat musim merupakan pola yang paling sulit direpresentasikan oleh kedua model.

Secara keseluruhan, SEAS5-*corr* menunjukkan performa yang sedikit lebih baik dibandingkan CFSv2-*corr* pada sebagian besar kelompok ZOM, baik dua musim maupun empat musim. Keunggulan tersebut terlihat dari nilai ACC2 dan HSS yang umumnya lebih tinggi, terutama pada kelompok Monsunal dan Ekuatorial. Hasil ini diduga dipengaruhi oleh resolusi horizontal SEAS5 yang lebih tinggi (sekitar 36 km) dibandingkan CFSv2 (sekitar 100 km), sehingga representasi topografi, proses konveksi, dan interaksi laut-atmosfer menjadi lebih baik (Johnson dkk., 2019; Saha dkk., 2014). Namun, pada beberapa kelompok ZOM lokal, perbedaan performa kedua model relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan resolusi model saja belum cukup untuk mengatasi kompleksitas iklim lokal di Sulawesi.

Hasil penelitian ini mendukung penelitian Miokta (2023) di Pulau Jawa dan Rohmah (2025) di Kalimantan yang menunjukkan bahwa penyesuaian LT berdasarkan karakteristik normal awal musim mampu meningkatkan performa prediksi dibandingkan penggunaan LT yang diseragamkan. Penelitian ini memberikan hasil tambahan bahwa efektivitas pendekatan tersebut berbeda pada setiap kelompok ZOM. Kelompok dengan pola musim yang lebih teratur, seperti Monsunal-2 dan Ekuatorial-4A, memperoleh peningkatan performa yang lebih besar dibandingkan kelompok dengan dominasi variabilitas lokal, seperti Lokal-2 dan Lokal-4. Dengan demikian, karakteristik pola hujan regional menjadi faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan sistem prediksi musim operasional di Indonesia, khususnya pada wilayah dengan kompleksitas iklim tinggi seperti Pulau Sulawesi.

KESIMPULAN DAN IMPLIKASI

Sebaran akurasi model SEAS5-*corr* lebih unggul pada sebagian besar tipe ZOM daripada model CFSv2-*corr*, didukung melalui sebaran akurasi ACC dan *skill* HSS. Namun, CFSv2-*corr* menunjukkan performa setara atau pada ZOM Ekuatorial-4B dan Lokal-4. Umumnya tipe ZOM Monsunal-2 dan Ekuatorial-2 menunjukkan akurasi terbaik dengan dominasi akurasi AMH lebih dari 60% dan akurasi AMK lebih dari 40%. Tipe ZOM Ekuatorial-4 menghasilkan sebaran akurasi terbaik pada awal musim kedua dan sebaran HSS yang sangat fluktuatif, dengan HSS tertinggi dan terendah berada pada AMH2 ZOM Ekuatorial-4A. Tipe ZOM Lokal menghasilkan performa paling rendah, dengan ZOM Lokal-2C menunjukkan performa terbaik.

Pemilihan LT berdasarkan normal AMK AMH secara umum menunjukkan tren peningkatan dari LT4 ke LT1 pada kedua model, SEAS5-*corr* dan CFSv2-*corr*. Namun, terdapat pengecualian pada Ekuatorial-4B dimana LT

CC BY-SA 4.0

terbaik adalah LT4. Pada tipe ZOM Lokal pemilhan LT terbaik masih sulit untuk ditentukan, namun pada ZOM Lokal-2C inisial terbaik terjadi pada LT1.

DECLARATIONS

Persetujuan Etik: Penelitian ini menggunakan data Model Global dan data Curah Hujan Blending dari BMKG sehingga tidak membutuhkan persetujuan etik.

Pendanaan: Penelitian ini dilakukan secara mandiri dan tidak mendapatkan pendanaan khusus dari pihak manapun.

Kontribusi Penulis: Kadek Valerina Kitana Sanjaya sebagai penuis pertama berperan dalam pengolahan data, analisis, dan penulisan. Sayful Amri sebagai penulis kedua berperan dalam mengarahkan jalannya penelitian dan membantu dalam penyuntingan naskah. Yahya Darmawan dan Ervan Fediansyah sebagai penulis ketiga dan keempat berperan dalam evaluasi metodologis, penulisan, dan pembahasan penelitian.

Ucapan Terima Kasih: Penulis menyampaikan terima kaih kepada Program Studi Sarjana terapan Klimatologi Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika yang telah memberikan dukungan secara akademis. Serta semua pihak yang telah memeberikan bantuan baik akademis maupun materiil yang mendukung jalannya penelitian ini.

Pernyataan Penggunaan AI: Penulis menyatakan tidak adanya penggunaan teknologi AI (Artificial Intelegence) yang digunakan dalam pengolahan data maupun penulisan naskah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Acharya, N., Shrivastava, N. A., Panigrahi, B. K., & Mohanty, U. C. (2014). Performance of GCMs for seasonal prediction over India—a case study for 2009 monsoon. *Theoretical and Applied Climatology, 115*, 189–199.

Aldrian, E., & Susanto, R. D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology, 23*(12), 1435–1452.

Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. (2022). *Pemutakhiran zona musim Indonesia periode 1991–2020*. Pusat Informasi Perubahan Iklim, Kedeputian Bidang Klimatologi.

Heidke, P. (1926). Berechnung der erfolges und der güte der windstärkevorhersagen im sturmwarnungdienst. *Geografiska Annaler, 8*, 301–349.

Johnson, J. A. (2012). *Assessing the impact of climate change in Borneo*. World Wildlife Fund.

Johnson, S. J., Stockdale, T. N., Ferranti, L., Balmaseda, M. A., Molteni, F., Magnusson, L., & Mogensen, K. (2019). SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development, 12*(3), 1087–1117.

Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2003). *Forecast verification: A practitioner's guide in atmospheric science*. Wiley.

Kurnia, W., Muharsyah, R., & Widiyanto, S. (2020). Performa koreksi bias prakiraan curah hujan model European Centre Medium Weather Forecast (ECMWF) di Sulawesi. *Buletin GAW Bariri, 1*(2), 77–86.

Marjuki, M., Koesmaryono, Y., Santikayasa, I. P., & Sopaheluwakan, A. (2025). Assessing the influence of climate services and climate change adaptation strategies on smallholder agriculture: A systematic literature review. *Agromet, 39*(2), 75–85. https://doi.org/10.29244/j.agromet.39.2.75-85

Miokta, T. G. (2023). *Evaluasi model prediksi musim global menggunakan model ECMWF SEAS5 untuk penentuan awal musim berbasis ZOM9120 di Pulau Jawa* [Skripsi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika].

Muharsyah, R. (2017). Kajian verifikasi produk prakiraan curah hujan bulanan (2003–2012). *Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 18*(2), 51–59.

Muharsyah, R., Ripaldi, A., Maharani, T., Fitrianti, N., Hanif D., R., Denata, M., & Jauhari. (2020). Perbandingan model kopel ECMWF System 4 dan CFSv2 untuk prediksi musim di Indonesia. *Megasains, 11*(1), 1–11.

Murphy, A. H. (1993). What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. *Weather and Forecasting, 8*(2), 281–293.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2010). *Assessment of intraseasonal to interannual climate prediction and predictability*. The National Academies Press.

CC BY-SA 4.0

Naylor, R. L., Battisti, D. S., Vimont, D. J., Falcon, W. P., & Burke, M. B. (2007). Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 104*(19), 7752–7757. https://doi.org/10.1073/pnas.0701825104

Rohmah, I. A. S. (2025). *Evaluasi performa model ECMWF SEAS5 dalam prediksi awal musim di Kalimantan berbasis ZOM 1991–2020* [Skripsi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika].

Safi'i, A., & Sopaheluwakan, A. (2020). The skill of CFSv2 in predicting rainfall anomalies over Indonesia during different ENSO phases. *AIP Conference Proceedings, 2223*(1), 020005.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Ji, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate, 27*(6), 2185–2208.

Sanjaya, W. (2023). *Evaluasi curah hujan model ECMWF SEAS5 di Indonesia* [Skripsi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika].

Supari, S., et al. (2022). *Pemutakhiran zona musim (ZOM) berdasarkan normal curah hujan 1991–2020*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.

Wang, Q. J., Shao, Y., Song, Y., Schepen, A., Robertson, D. E., Ryu, D., & Pappenberger, F. (2019). An evaluation of ECMWF SEAS5 seasonal climate forecasts for Australia using a new forecast calibration algorithm. *Environmental Modelling & Software, 122*.

CC BY-SA 4.0