IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

PREDIKSI CURAH HUJAN MUSIMAN DENGAN *MACHINE LEARNING* DI PAPUA

STEVEN CAHYA ANDIKA

PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
   a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul "Prediksi Curah Hujan Musiman Dengan *Machine Learning* di Papua" adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Maret 2026

Steven Cahya Andika
G2501222004

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

RINGKASAN

STEVEN CAHYA ANDIKA. Prediksi Curah Hujan Musiman Dengan *Machine Learning* di Papua. Dibimbing oleh I PUTU SANTIKAYASA dan DONALDI SUKMA PERMANA.

Papua merupakan wilayah di Indonesia yang rentan terhadap bencana hidrometeorologi, sehingga informasi prediksi hujan musiman yang akurat dan andal sangat dibutuhkan. Penelitian ini bertujuan untuk 1) mengevaluasi performa prediksi hujan musiman dari *Seasonal Forecast Sistem* 5 (SEAS5) European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), 2) menilai kemampuan model machine learning (ML) dalam meningkatkan kualitas prediksi hujan musiman di Papua, serta 3) mengaplikasikan model ML terbaik untuk perbaikan prediksi. Metode ML yang digunakan meliputi *ElasticNet* (ENet), *Support Vector Machine* (SVM), *Random Forest* (RF), dan *Extreme Gradient Boosting* (XGB), dengan model regresi linier (LR) sebagai acuan. Luaran *hindcast* SEAS5 digunakan sebagai prediktor, dengan seleksi prediktor iklim lokal dan global dilakukan secara objektif menggunakan konsensus Lasso dan RF.

Hasil evaluasi beberapa metrik, yakni *mean error* (ME), koefisien korelasi (Corr), *root mean square error* (RMSE), dan Kling-Gupta Efficiency (KGE), menunjukkan bahwa model mentah (Raw) SEAS5 memiliki keterbatasan yang signifikan dalam merepresentasikan hujan musiman di Papua, ditandai oleh kecenderungan bias basah pada periode MAM, SON, dan DJF, RMSE yang tinggi (hingga 103,9 mm), serta nilai KGE rendah atau negatif, terutama di wilayah pegunungan. Performa Raw SEAS5 relatif lebih baik pada JJA dan SON, namun menurun tajam pada DJF dengan Corr yang bahkan bernilai negatif di beberapa lokasi. Model LR mampu memperbaiki performa Raw SEAS5 dan digunakan sebagai benchmark untuk mengevaluasi peningkatan relatif model ML.

Model ML yang dioptimasi secara *gridwise* menunjukkan peningkatan performa yang konsisten dibandingkan Raw SEAS5, dengan penurunan RMSE menjadi 33,7–48,3 mm, bias mendekati nol, serta peningkatan nilai KGE menjadi 0.15 s.d. 0.23 di Papua. Secara musiman, model ML unggul pada periode MAM, JJA, dan DJF, sementara pada SON model LR menunjukkan performa yang lebih baik di banyak lokasi. Secara keseluruhan, XGB dan SVM merupakan model dengan performa terbaik, dengan XGB menempati peringkat KGE tertinggi pada 62,5% lokasi. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan *machine learning* yang teroptimasi berpotensi menjadi solusi efektif untuk meningkatkan kualitas prediksi hujan musiman di Papua, meskipun tantangan masih tersisa pada musim basah dan wilayah bertopografi kompleks.

Kata kunci: hujan musiman, *machine learning*, SEAS5 ECMWF, prediksi iklim, Papua

@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

SUMMARY

STEVEN CAHYA ANDIKA. Seasonal Rainfall Prediction Using Machine Learning in Papua. Supervised by I PUTU SANTIKAYASA and DONALDI SUKMA PERMANA.

Papua is vulnerable to hydrometeorological disasters, making accurate and reliable seasonal rainfall prediction essential. This study aims to evaluate the performance of the Seasonal Forecast System 5 (SEAS5) from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF, evaluate machine learning (ML) models for enhancing seasonal rainfall prediction in Papua, and apply the best-performing ML model to improve predictions in Papua. The ML models evaluated include ElasticNet (ENet), Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), and Extreme Gradient Boosting (XGB), with simple linear regression (LR) serving as the benchmark. SEAS5 hindcast were used as predictors, and objective feature selection was conducted using consensus between Lasso and RF.

Evaluation using multiple metrics, mean error (ME), correlation coefficient (Corr), root mean square error (RMSE), and Kling–Gupta Efficiency (KGE), indicates that raw SEAS5 exhibits substantial limitations in representing seasonal rainfall over Papua. These limitations are characterized by a systematic wet bias during MAM, SON, and DJF, high RMSE values (up to 103.9 mm), and low or negative KGE, particularly over mountainous regions. Although raw SEAS5 performs relatively better during JJA and SON, its performance deteriorates markedly during DJF, with negative correlations observed at several locations. The LR model improves upon raw SEAS5 performance and is therefore adopted as the primary benchmark for evaluating ML-based enhancements.

Gridwise-optimized ML models consistently outperform raw SEAS5, as indicated by reduced RMSE values (33.7–48.3 mm), near-zero bias, and overall improvements in KGE across most of Papua. Seasonally, ML models outperform LR during MAM, JJA, and DJF, whereas LR shows superior performance during SON in many locations. Overall, XGB and SVM emerge as the most effective ML models, with XGB achieving the highest KGE in 62.5% of the study area. These findings demonstrate that optimized ML approaches have strong potential to enhance seasonal rainfall prediction in Papua, although challenges remain during the wet season (DJF) and over regions with complex topography.

Keywords: seasonal rainfall, machine learning, SEAS5 ECMWF, climate prediction, Papua

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
   a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

PREDIKSI CURAH HUJAN MUSIMAN DENGAN *MACHINE LEARNING* DI PAPUA

STEVEN CAHYA ANDIKA

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Klimatologi Terapan

PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
1. Prof. Dr. Muh. Taufik, S.Si., M.Si.

Judul Tesis : Prediksi Curah Hujan Musiman dengan *Machine Learning* di Papua
Nama : Steven Cahya Andika
NIM : G2501222004

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. I Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc

Pembimbing 2:
Dr. Donaldi Sukma Permana, M.Sc.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. I Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc
NIP. 197902242005011002

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam:
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.
NIP. 197807232007011001

Tanggal Ujian: 18 Februari 2026

Tanggal Lulus:

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian ini adalah Ilmu Keteknikan, Teknologi Informasi, dan Perencanaan dengan judul "Prediksi Curah Hujan Musiman dengan *Machine Learning* di Papua".

Penulisan tesis ini tidak terlepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penghargaan dan ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Ketua komisi pembimbing Dr. I Putu Santikayasa, M.Sc. dan anggota komisi pembimbing, Dr. Donaldi Sukma Permana, M.Sc. yang telah membimbing, mendukung, memotivasi serta banyak memberi saran dalam menyelesaikan tesis ini.
2. Penguji luar komisi pembimbing Prof. Dr. Muh. Taufik, S.Si., M.Si. dan pimpinan sidang Dr. Drs. Bambang Dwi Dasanto, M.Si. atas arahan dan masukan yang diberikan.
3. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) yang telah menyediakan data selama periode penelitian.
4. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas dukungan beasiswa magister dalam negeri yang telah diberikan.
5. Keluarga tercinta (Mama Tuty, Adek Lina, ponakanku yang lucu-lucu, Pakdhe Har) yang selalu memberikan doa dan dukungan. Buat papa sama masaten, maaf ya aku terlalu lama hehe.
6. Teman-teman IPB dan BMKG yaitu Nastiti, Dara, Tya, Dinda, Sulis, Nizar, Nazma, Jassica, Mas Ben, dan semua teman-teman mahasiswa Pasca Prodi Klimatologi Terapan yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
7. Segenap civitas akademik Departemen GFM yang telah menjadi bagian dari keluarga selama proses menimba ilmu.
8. Saya menyampaikan apresiasi saya kepada semua individu yang tidak disebutkan namanya yang telah berkontribusi dalam penyelesaian tesis ini.
9. StackOverflow dan GitHub sebagai sumber inspirasi.

Tesis ini masih jauh dari kata sempurna, namun diharapkan dapat memberikan manfaat dalam perkembangan ilmu pengetahuan.

Bogor, Maret 2026

Steven Cahya Andika

IPB University
Bogor Indonesia

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL xi
DAFTAR GAMBAR xi
I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 3
1.4 Manfaat 4
II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Prediksi Berbasis Machine Learning 5
2.2 Seleksi Prediktor 10
2.3 Metrik Performa 11
III METODE 13
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 13
3.2 Alat dan Bahan 14
3.3 Analisis data 16
IV HASIL DAN PEMBAHASAN 22
4.1 Curah Hujan di Papua 22
4.2 Performa Raw Model SEAS5 22
4.3 Seleksi Indeks Iklim 24
4.4 Performa Model 26
4.5 Prediktor Optimal Model ML di Papua 35
4.6 Diskusi 37
V SIMPULAN DAN SARAN 39
5.1 Simpulan 39
5.2 Saran 39
DAFTAR PUSTAKA 41
RIWAYAT HIDUP 54

© Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

DAFTAR TABEL

1	Ringkasan data observasi, hindcast SEAS5, dan indeks iklim turunan yang digunakan dalam penelitian ini	15
2	Ringkasan *hyperparameter* yang dioptimasi	18
3	Rekomendasi indeks iklim yang relevan dan tidak relevan dalam prediksi hujan di Papua	26
4	Nilai rata-rata metrik evaluasi masing-masing model	28

DAFTAR GAMBAR

1	Ilustrasi hubungan linear x dan y pada regresi linear (Wilks, 2019)	7
2	Ilustrasi model SVM pada prediksi deterministik (Wilks, 2019)	8
3	Keadaan topografi di Papua	13
4	Zona musim Indonesia termutakhir (BMKG, 2022)	14
5	Resolusi grid CHIRP+Pos	14
6	Ringkasan diagram alir penelitian	16
7	Ringkasan alur *preprocessing*	17
8	Diagram alir proses pelatihan (*training*) dan evaluasi model	20
9	Rata-rata hujan musiman berdasarkan CHIRP+Pos di Papua	22
10	Nilai metrik evaluasi: distribusi spasial Corr (a) dan KGE (b) beserta boxplot tiap metrik (c)	23
11	Heatmap FI dari Lasso (a) dan RF (b) pada model berbasis indeks iklim	25
12	Urutan indeks iklim	25
13	Evaluasi model berdasarkan Corr (a) dan RMSE (b) secara keseluruhan (*All*) terhadap *Raw*, LR, dan model ML	27
14	Peta metrik Corr musiman (berturut-turut dari kolom kiri ke kanan musim MAM, JJA, SON, dan DJF) dari model-model yang dianalisis (berturut-turut dari atas ke bawah model *Raw* SEAS5, LR, ENet, SVM, RF, dan XGB)	29
15	Peta metrik RMSE musiman (berturut-turut dari kolom kiri ke kanan musim MAM, JJA, SON, dan DJF) dari model-model yang dianalisis (berturut-turut dari atas ke bawah model *Raw* SEAS5, LR, ENet, SVM, RF, dan XGB)	30
16	*Boxplot* RMSE (a), Corr (b), Mean bias (c), dan KGE (d) evaluasi model simultan (*All*) dan musiman	31
17	Perbandingan delta KGE model yang dibangun terhadap model LR	33
18	*Boxplots* delta KGE model ML terhadap model LR secara keseluruhan (*All*) maupun secara musiman	34
19	Model terbaik urutan pertama (a) dan kedua (b) berdasarkan KGE. Warna titik menunjukkan model rekomendasi menurut metrik KGE	35
20	Grafik batang prediktor penting hasil analisis model Lasso (a) dan RF (b).	36

IPB University