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

# *STACKING ENSEMBLE* PADA *STATISTICAL DOWNSCALING* UNTUK PREDIKSI CURAH HUJAN DI RIAU

**NISA NUR AISYAH USMAN**

**PROGRAM STUDI MAGISTER STATISTIKA DAN SAINS DATA**
**SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA**
**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

@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

# PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul " *Stacking Ensemble* pada *Statistical Downscaling* untuk Prediksi Curah Hujan di Riau" 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 proposal tesis ini.

Dalam penyusunan karya ini, penulis menggunakan bantuan kecerdasan buatan *Claude* (Anthropic), dan *Gemini* (Google) untuk membantu penulisan, pemahaman konsep, penyusunan struktur teks, serta pengecekan tata bahasa dan logika dalam penulisan ilmiah. Setelah menggunakan alat/layanan tersebut, penulis meninjau dan menyunting konten sesuai kebutuhan serta bertanggung jawab penuh atas karya tugas akhir ini.

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

Bogor, Agustus 2026

Nisa Nur Aisyah Usman
M0501241078

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

# RINGKASAN

NISA NUR AISYAH. *Stacking Ensemble* pada *Statistical Downscaling* untuk Prediksi Curah Hujan di Riau. Dibimbing oleh ANIK DJURAIDAH dan SEPTIAN RAHARDIANTORO.

*Ensemble learning*, yang salah satunya adalah pendekatan *stacking ensemble*, merupakan metode *machine learning* yang telah banyak diaplikasikan pada berbagai kajian data klimatologi karena kemampuannya mengombinasikan beberapa algoritma prediksi *(base learner*) melalui satu model penggabung (*meta learner*) untuk menghasilkan akurasi yang lebih baik dibandingkan model tunggal. Pendekatan ini memanfaatkan data GCM untuk memprediksi curah hujan lokal melalui metode *statistical downscaling*. Koreksi bias dilakukan terlebih dahulu guna meningkatkan kemiripan pola GCM terhadap curah hujan lokal. Penelitian ini bertujuan meningkatkan akurasi prediksi curah hujan melalui penerapan koreksi bias menggunakan *Empirical Quantile Mapping* (EQM) serta membandingkan kinerja model *stacking ensemble* dan *single learner*.

Provinsi Riau memiliki karakteristik lingkungan berupa lahan gambut yang luas serta aktivitas kehutanan dan perkebunan yang memerlukan informasi curah hujan yang akurat. Keterbatasan cakupan pengamatan menyebabkan informasi curah hujan beresolusi tinggi belum tersedia secara memadai untuk mendukung analisis dan pengambilan keputusan berbasis data. Kondisi tersebut mendorong pengembangan metode yang mampu menghasilkan prediksi curah hujan dengan resolusi spasial lebih tinggi melalui pendekatan berbasis data.

Penelitian ini menggunakan data curah hujan bulanan keluaran lima model CMIP6-DCPP periode 1991–2020 sebagai peubah prediktor, data CHIRPS sebagai acuan koreksi bias, serta data curah hujan bulanan dari sepuluh stasiun BMKG di Provinsi Riau sebagai peubah respons. Data dibagi menjadi data latih periode 1991–2017 dan data uji periode 2018–2020. Koreksi bias dilakukan menggunakan metode EQM sebelum tahap *statistical downscaling* untuk meningkatkan kesesuaian distribusi data model terhadap data observasi.

Pemodelan *statistical downscaling* dilakukan menggunakan pendekatan *stacking ensemble* yang mengombinasikan algoritma XGBoost, LightGBM, dan Extra Trees sebagai *base learner* serta Regresi Gulud (*Ridge Regression*) sebagai *meta learner*. Algoritma XGBoost dan LightGBM menggunakan fungsi kerugian (*loss function*) Tweedie untuk menangani karakteristik distribusi curah hujan yang bersifat tidak simetris dan memiliki banyak nilai rendah atau mendekati nol. Pelatihan model menerapkan skema *rolling-origin cross-validation* untuk menjaga kemampuan generalisasi model pada data deret waktu, sedangkan evaluasi kinerja dilakukan menggunakan RMSE dan koefisien korelasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh model *machine learning* memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan regresi linear sebagai model pembanding. Kombinasi *Stacking* XGBoost-LightGBM-ExtraTrees menghasilkan performa terbaik dengan nilai RMSE rata-rata sebesar 69,2 mm/bulan dan korelasi sebesar 0,520, lebih baik dibandingkan model tunggal terbaik, yaitu XGBoost yang menghasilkan RMSE sebesar 71,1 mm/bulan dan koefisien korelasi sebesar 0,50. Performa model pada setiap stasiun menunjukkan bahwa tidak terdapat satu model

yang secara konsisten memberikan hasil terbaik di seluruh lokasi pengamatan, yang mengindikasikan adanya variasi karakteristik curah hujan lokal antarstasiun.

Integrasi koreksi bias EQM dengan pendekatan stacking ensemble mampu meningkatkan kualitas prediksi curah hujan pada skala lokal dibandingkan pendekatan konvensional. Model yang dikembangkan berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber informasi curah hujan beresolusi tinggi untuk mendukung perencanaan wilayah, pengelolaan sumber daya alam, serta mitigasi risiko bencana hidrometeorologi. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan metode *statistical downscaling* berbasis machine learning ensemble untuk menghasilkan prediksi curah hujan yang lebih akurat di Provinsi Riau dan wilayah lain dengan karakteristik serupa.

Kata kunci: curah hujan; *empirical quantile mapping*; *stacking ensemble; statistical downscaling*

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

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

NISA NUR AISYAH. Stacking Ensemble for Statistical Downscaling in Rainfall Prediction in Riau. Supervised by ANIK DJURAIDAH and SEPTIAN RAHARDIANTORO.

Ensemble learning, including the stacking ensemble approach, is a machine learning method that has been widely applied in various climatological studies due to its ability to combine several prediction algorithms (base learners) through a single combining model (meta-learner) to produce better accuracy than a single model. This approach utilizes GCM data to predict local rainfall through statistical downscaling methods. Bias correction is performed beforehand to improve the similarity between the GCM pattern and local rainfall. This study aims to improve rainfall prediction accuracy through the application of bias correction using Empirical Quantile Mapping (EQM) and to compare the performance of stacking ensemble models against single learners.

Riau Province has environmental characteristics in the form of extensive peatlands as well as forestry and plantation activities that require accurate rainfall information. Limited observation coverage has resulted in high-resolution rainfall information not yet being adequately available to support data-based analysis and decision-making. This condition encourages the development of methods capable of producing rainfall predictions with higher spatial resolution through a data-driven approach.

This study used monthly rainfall data output from five CMIP6-DCPP models for the 1991–2020 period as predictor variables, CHIRPS data as the bias correction reference, and monthly rainfall data from ten BMKG stations in Riau Province as the response variable. The data were divided into training data for the 1991–2017 period and testing data for the 2018–2020 period. Bias correction was performed using the EQM method prior to the statistical downscaling stage to improve the correspondence between the distribution of model data and observational data.

Statistical downscaling modeling was carried out using a stacking ensemble approach that combined the XGBoost, LightGBM, and Extra Trees algorithms as base learners, with Ridge Regression as the meta-learner. The XGBoost and LightGBM algorithms used the Tweedie loss function to handle the asymmetric characteristics of the rainfall distribution, which has many low or near-zero values. Model training applied a rolling-origin cross-validation scheme to preserve the model's generalization ability on time series data, while performance evaluation was carried out using RMSE and correlation coefficients.

The results showed that all machine learning models performed better than linear regression as the benchmark model. The Stacking XGBoost-LightGBM-ExtraTrees combination produced the best performance, with an average RMSE value of 69.7 mm/month and a correlation of 0.52, outperforming the best single model, XGBoost, which produced an RMSE of 71.1 mm/month and a correlation coefficient of 0.50. Model performance at each station showed that no single model consistently produced the best results across all observation locations, indicating variation in local rainfall characteristics between stations.

The integration of EQM bias correction with the stacking ensemble approach was able to improve the quality of rainfall predictions at the local scale compared to conventional approaches. The developed model has the potential to be utilized as a source of high-resolution rainfall information to support regional planning, natural resource management, and hydrometeorological disaster risk mitigation. This study contributes to the development of machine learning ensemble-based statistical downscaling methods to produce more accurate rainfall predictions in Riau Province and other regions with similar characteristics.

*Keywords: empirical quantile mapping; rainfall; statistical downscaling; stacking ensemble*

© 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

@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

@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
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.*

# *STACKING ENSEMBLE* PADA *STATISTICAL DOWNSCALING* UNTUK PREDIKSI CURAH HUJAN DI RIAU

**NISA NUR AISYAH USMAN**

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Statistika dan Sains Data

**PROGRAM STUDI MAGISTER STATISTIKA DAN SAINS DATA**
**SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA**
**INSTITUT PERTANIAN BOGOR**
**BOGOR**
**2026**

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

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
1 Dr. Farit Mochamad Afendi, S.Si, M.Si

Judul Tesis : *Stacking Ensemble* pada *Statistical Downscaling* untuk Prediksi Curah Hujan di Riau
Nama : Nisa Nur Aisyah
NIM : M0501241078

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Anik Djuraidah, MS

Pembimbing 2:
Dr. Septian Rahardiantoro, M.Si

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Dr. Agus Mohamad Soleh, S.Si, MT.
NIP 19750315 199903 1 004

Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP 19660702 199302 1 001

Tanggal Ujian: 10 Agustus 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

@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

@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 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

# PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini dapat diselesaikan dengan baik. Karya Ilmiah ini disusun sebagai bagian dari pemenuhan tugas akhir dengan judul "*Stacking Ensemble* pada *Statistical Downscaling* untuk Prediksi Curah Hujan di Riau" berhasil diselesaikan. Penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan doa berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Anik Djuraidah, MS. dan Bapak Dr. Septian Rahardiantoro, M.Si selaku pembimbing, yang dengan sangat sabar dan sepenuh hati telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan proposal tesis ini.
2. Seluruh dosen dan karyawan Program Studi Statistika dan Sains Data IPB University yang telah membantu dan memberikan ilmu yang bermanfaat serta pengalaman yang berharga selama penulis menempuh studi pascasarjana.
3. Ibu tercinta, kiranya sebanyak apa pun kalimat yang tertulis tidak akan mampu mengutarakan seluruh kasih sayang serta segala kebaikan yang Ibu berikan kepada penulis. Ibu merupakan alasan terbesar untuk penulis melanjutkan studi magister dan senantiasa menjadi sumber semangat dalam setiap langkah yang ditempuh. Doa yang tidak pernah putus, dukungan tanpa syarat, serta keyakinan yang selalu Ibu berikan menjadi kekuatan bagi penulis untuk bertahan dan menyelesaikan studi magister ini. Ayah tercinta, atas segala kerja keras, dan kasih sayang yang selalu menjadi kekuatan bagi penulis. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas cinta, doa, dan pengorbanan yang tidak akan pernah mampu terbalaskan.
4. Terima kasih kepada Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) yang telah menyediakan data untuk penelitian ini.
5. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Aa, Teteh, Adek, serta seluruh keluarga besar yang turut memberikan doa, dukungan, serta kasih sayang kepada penulis selama menempuh studi pascasarjana.
6. Sahabat selama proses perkuliahan, yaitu Zahra, Nabil, Lisa, Mardan, Hijra, serta rekan-rekan satu angkatan lainnya, yang senantiasa saling memberikan dukungan kepada penulis selama menjalani seluruh rangkaian studi. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada sahabat-sahabat penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang senantiasa memberikan dukungan dan doa kepada penulis.
7. Seluruh pihak yang telah membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir penulis baik secara langsung maupun tidak langsung termasuk pak Dhani yang telah banyak memberi informasi.

Semoga karya ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membutuhkan dan berkontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan perumusan kebijakan berbasis data di Indonesia.

.

Bogor, Agustus 2026

*Nisa Nur Aisyah Usman*

@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

@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

@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

# DAFTAR ISI


| | | |
|---|---|---|
| DAFTAR ISI | | ix |
| DAFTAR TABEL | | x |
| DAFTAR GAMBAR | | x |
| I. | PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 | Latar Belakang | 1 |
| 1.2 | Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 | Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 | Manfaat Penelitian | 3 |
| II | TINJAUAN PUSTAKA | 4 |
| 2.1 | *Ensemble Learning* | 4 |
| 2.1.1 | *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) | 4 |
| 2.1.2 | *Light Gradient Boosting Machine* (LightGBM) | 6 |
| 2.1.3 | *Extremely Randomized Trees* (Extra-trees) | 7 |
| 2.1.4 | Fungsi Kerugian Tweedie | 8 |
| 2.1.5 | *Stacking Ensemble* | 9 |
| 2.2 | Sebaran Tweedie | 10 |
| 2.3 | Regresi Gulud | 10 |
| 2.4 | *General Circulation Model* | 11 |
| 2.5 | *Empirical Quantile Mapping* | 12 |
| *2.6* | *Statistical Downscaling* | 13 |
| III | METODE | 15 |
| 3.1 | Data | 15 |
| 3.2 | Prosedur Analisis Data | 16 |
| IV | HASIL DAN PEMBAHASAN | 22 |
| 4.1 | Eksplorasi Data Curah Hujan | 22 |
| 4.2 | Pra-Pemrosesan Data | 25 |
| 4.3 | Koreksi Bias menggunakan EQM | 27 |
| 4.4 | *Statistical Downscaling* menggunakan *Ensemble Learning* | 29 |
| 4.4.1 | Optimasi *Hyperparameter* Model | 30 |
| 4.4.2 | Perbandingan Kinerja Model *Ensemble Learning* | 31 |
| 4.4.3 | Analisis Efektivitas Fungsi Kerugian Tweedie | 33 |
| 4.4.4 | Evaluasi Kinerja pada Setiap Stasiun | 34 |
| 4.4.5 | Pengaruh Koreksi Bias terhadap Model Terbaik | 36 |
| V | SIMPULAN DAN SARAN | 39 |
| 5.1 | Simpulan | 39 |
| 5.2 | Saran | 39 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 40 |
| RIWAYAT HIDUP | | 44 |



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

# DAFTAR TABEL


| | | |
|---|---|---|
| 1 | Deskripsi model DCPP CMIP6 yang digunakan pada penelitian | 15 |
| 2 | Daftar stasiun pengamatan curah hujan di Riau | 15 |
| 3 | Spesifikasi *Hyperparameter* model *machine learning* | 19 |
| 4 | Statistik deskriptif curah hujan bulanan sebelum dan sesudah imputasi | 26 |
| 5 | Perbandingan nilai korelasi curah hujan DCPP terhadap CHIRPS sebelum dan setelah koreksi bias | 29 |
| 6 | Kombinasi parameter terbaik pada tiap stasiun | 30 |
| 7 | Penduga parameter $p$ dari sebaran Tweedie | 31 |
| 8 | Perbandingan rata-rata RMSE dan korelasi ($r$) antar model *single learner stacking* dan Regresi Linear | 33 |
| 9 | Perbandingan performa model antara *objective* Tweedie dan Default | 34 |
| 10 | Perbandingan hasil pemodelan berdasarkan nilai RMSE | 34 |
| 11 | Korelasi antar data aktual dan hasil prediksi model | 35 |
| 12 | Pengaruh Koreksi Bias terhadap Kinerja *Stacking* XGBoost-LightGBM-ExtraTrees | 38 |


# DAFTAR GAMBAR


| | | |
|---|---|---|
| 1 | Skema pembentukan model *gradient boosting* | 5 |
| 2 | Perbandingan strategi pertumbuhan pohon (a) *level-wise* (b) *leaf-wise* (Liang *et al.* 2020) | 7 |
| 3 | Ilustrasi proses *statistical downscaling* (Sutikno 2008) | 14 |
| 4 | Lokasi stasiun pengamatan curah hujan (peta tidak berskala) | 16 |
| 5 | Diagram alir analisis data | 17 |
| 6 | Diagram alir proses koreksi bias | 18 |
| 7 | *Stacking Ensemble* | 21 |
| 8 | Deret waktu curah hujan bulanan observasi pada sepuluh stasiun di Provinsi Riau periode 1991-2020 | 22 |
| 9 | *Boxplot* sebaran curah hujan di Riau periode 1991-2020 (a) Bangko, (b) Tanah Putih Tanjung Melawan, (c) Tapung, (d) Dayun, (e) Tempuling, (f) Enok, (g) Kandis, (h) Gaung Anak Serka, (i) Gauh Hulu (j) Bandara Pinang Kampai | 23 |
| 10 | Histogram dan plot densitas curah hujan (a) Bangko, (b) Tanah Putih Tanjung Melawan, (c) Tapung, (d) Dayun, (e) Enok, (f) Tempuling, (g) Gaung Anak Serka, (h) Gauh Hulu, (i) Kandis, (j) Bandara Pinang Kampai | 24 |
| 11 | Ketersediaan data curah hujan bulanan pada sepuluh stasiun BMKG di Provinsi Riau periode 1991-2020 | 25 |
| 12 | Ilustrasi tahapan koreksi bias metode EQM | 27 |


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

13 Kurva ECDF curah hujan model DCPP sebelum dan setelah koreksi bias (a) CNRM-ESM2-1, (b) MIROC6 , (c) MPI-ESM1-2-HR, (d) MRI-ESM2, (e) BCC-CSM2 28
14 Distribusi nilai RMSE antar model regresi linear, *single learner* dan *stacking* 32
15 Distribusi nilai korelasi antar model regresi linear, *single learner* dan *stacking* 32
16 Perbandingan RMSE pada *Stacking* XGBoost-LightGBM-ExtraTrees pada sepuluh stasiun sebelum dan setelah koreksi bias 36
17 Perbandingan korelasi pada *Stacking* XGBoost-LightGBM-ExtraTrees pada sepuluh stasiun sebelum dan setelah koreksi bias 37

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

@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