

Metode Koreksi Bias dan *Downscaling* Data Iklim untuk Simulasi Hidrologi Tropis: Tinjauan Sistematis Literatur

Rafika Andari*, Yolanda Wulandari

Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Padang, Padang, Indonesia

*Koresponden email: rafika_andari@itp.ac.id

Diterima: 24 Juni 2026

Disetujui: 4 Juli 2026

Abstract

Global climate model projections commonly exhibit systematic biases that limit their accuracy in tropical hydrological simulations. This study aims to evaluate the development, performance, and challenges of bias correction and climate downscaling methods for hydrological modelling in Indonesia through a Systematic Literature Review (SLR) spanning 2016–2025. A systematic evaluation of national and international scientific literature was conducted utilizing the PRISMA protocol. The synthesis reveals a significant spatial disparity, with research heavily skewed toward western Indonesia. *Statistical Downscaling* integrated with *Quantile Mapping* (QM) algorithms emerges as the most dominant method. QM is proven highly robust in reproducing extreme rainfall for design flood modelling in monsoonal regions (NSE greater than 0,75). However, it triggers high uncertainty due to rainfall overestimation during the dry season in equatorial zones. Core limitations in current literature include the assumption of climate stationarity and poor continuity of observed data. Future research must pivot toward *Machine Learning*-based algorithms and national standardization for climate downscaling to ensure water infrastructure resilience.

Keywords: *bias correction, climate projection, downscaling, prisma, tropical hydrology*

Abstrak

Proyeksi model iklim global umumnya mengandung bias sistematis yang membatasi akurasi dalam simulasi hidrologi tropis. Penelitian ini bertujuan mengkaji perkembangan, performa, dan tantangan metode koreksi bias serta *downscaling* data iklim untuk pemodelan hidrologi di Indonesia melalui *Systematic Literature Review* (SLR) periode 2016–2025. Evaluasi sistematis dilakukan terhadap literatur ilmiah nasional dan internasional menggunakan protokol PRISMA. Hasil sintesis menunjukkan adanya ketimpangan spasial riset yang didominasi oleh wilayah Indonesia barat. Pendekatan *Statistical Downscaling* berbasis algoritma *Quantile Mapping* (QM) menjadi metode paling dominan. QM terbukti sangat andal dalam mereproduksi curah hujan ekstrem untuk pemodelan banjir rancangan pada wilayah monsoonal (NSE lebih besar dari 0,75). Namun, QM rentan memicu ketidakpastian tinggi akibat estimasi berlebih (*overestimation*) pada musim kemarau di wilayah ekuatorial. Keterbatasan utama dalam literatur saat ini mencakup asumsi stasioneritas iklim dan buruknya kontinuitas data lapangan. Riset mendatang perlu diarahkan pada penerapan algoritma berbasis *Machine Learning* serta perumusan standarisasi nasional reduksi skala iklim guna menjamin ketahanan infrastruktur keairan.

Kata Kunci: *hidrologi tropis, koreksi bias, pengecilan skala, prisma, proyeksi iklim*

1. Pendahuluan

Perubahan iklim global telah memicu anomali hidrometeorologi yang signifikan, ditandai dengan peningkatan intensitas dan frekuensi curah hujan ekstrem yang mengancam ketahanan infrastruktur air [1]. Dalam upaya memitigasi dampak tersebut, *General Circulation Models* (GCMs) dan *Regional Climate Models* (RCMs) menjadi instrumen spasial yang krusial untuk memproyeksikan skenario iklim masa depan [2], [3]. Kendati demikian, luaran dari model-model iklim global ini umumnya memiliki resolusi spasial yang terlalu kasar dan mengandung bias sistematis yang substansial jika diaplikasikan langsung pada skala daerah aliran sungai (DAS) [4], [5]. Ketidakakuratan ini berpotensi mendistorsi prediksi debit banjir maupun analisis kekeringan, sehingga adaptasi model iklim memerlukan penyesuaian parameter lokal yang rigid [6].

Karakteristik iklim tropis di Indonesia menyajikan tantangan hidrologi yang jauh lebih kompleks akibat interaksi kuat antara dinamika monsun, *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), dan efek topografi wilayah kepulauan yang curam [7], [8]. Estimasi curah hujan di wilayah ini sering kali menunjukkan deviasi yang tinggi dibandingkan dengan data observasi permukaan karena kegagalan model global dalam menangkap fenomena konvektif skala lokal [9]. Oleh karena itu, penerapan metode *downscaling* baik

dinamik melalui penyematan RCM tingkat tinggi maupun statistik menggunakan fungsi transfer matematika menjadi prasyarat mutlak sebelum data iklim diintegrasikan ke dalam model simulasi hidrologi [10]. Tanpa proses reduksi skala yang akurat, pemodelan limpasan permukaan di wilayah tropis akan menghasilkan ketidakpastian yang sangat tinggi [11].

Selain kendala resolusi spasial, eksistensi bias sistematis dalam proyeksi curah hujan memerlukan teknik koreksi bias (*bias correction*) yang andal guna menyelaraskan distribusi statistik model dengan realitas lapangan [12]. Berbagai algoritma koreksi bias, mulai dari metode linier yang sederhana seperti *Linear Scaling* (LS) hingga pendekatan berbasis distribusi non-linier seperti *Quantile Mapping* (QM) dan *Empirical Quantile Mapping* (EQM), telah banyak diujicobakan dalam memprediksi hidrologi di Indonesia [13]. Namun, efektivitas masing-masing metode tersebut sangat bervariasi tergantung pada karakteristik hidrometeorologi DAS setempat [14]. Beberapa studi melaporkan bahwa QM sangat superior dalam mengoreksi curah hujan ekstrem, sementara studi lain menunjukkan risiko *overestimation* yang signifikan saat diterapkan pada musim kemarau tropis [15].

Meskipun intensitas penelitian mengenai *downscaling* dan koreksi bias di Indonesia mengalami eskalasi yang pesat dalam satu dekade terakhir, literatur yang ada masih bersifat fragmentaris dan terfragmentasi pada lokus DAS tertentu [16]. Sejauh ini, belum ada upaya komprehensif untuk mensintesis secara sistematis mengenai metode mana yang paling robust untuk mereproduksi karakteristik hujan tropis Indonesia, baik dalam domain pemodelan debit banjir (misalnya menggunakan HEC-HMS atau SWAT maupun analisis neraca air [17]. Ketiadaan panduan sintesis ini menimbulkan inkonsistensi metodologis bagi para praktisi dan peneliti hidrologi dalam memilih instrumen koreksi iklim yang paling minim risiko biasanya [18]. Akibatnya, perancangan bangunan air dan mitigasi bencana hidrologi di Indonesia sering kali dihantui oleh ketidakpastian parameter iklim masukan [19].

Untuk mengisi kesenjangan riset tersebut, studi ini bertujuan untuk menyajikan sebuah *Systematic Literature Review* (SLR) pertama yang secara khusus mengevaluasi perkembangan, performa, dan tantangan metode koreksi bias serta *downscaling* data iklim untuk simulasi hidrologi di wilayah tropis Indonesia. Melalui protokol PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), tinjauan ini menapis secara ketat literatur ilmiah nasional dan internasional yang diterbitkan antara tahun 2016 hingga 2025 [20]. Kebaruan (*novelty*) dari SLR ini terletak pada taksonomi kritis yang memetakan efisiensi setiap metode koreksi berdasarkan variabilitas klimatologis antar-wilayah di Indonesia (barat, tengah, dan timur), serta dampaknya terhadap akurasi hidrograf satuan luaran model hidrologi [21].

Signifikansi dari tinjauan sistematis ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ganda, baik secara teoritis maupun praktis dalam bidang teknik sipil dan manajemen sumber daya air di wilayah tropis. Secara akademis, studi ini merumuskan kerangka kerja metodologis (*methodological framework*) yang solid dan mengidentifikasi *future research directions* untuk mengatasi fenomena *non-stationarity* iklim [22]. Secara praktis, rekomendasi berbasis bukti (*evidence-based recommendations*) dari SLR ini dapat dijadikan sebagai acuan standardisasi bagi para rekayasawan dan pembuat kebijakan dalam memproyeksikan debit andalan, debit banjir rancangan, dan ketahanan infrastruktur air nasional yang adaptif terhadap perubahan iklim global.

2. Metode Penelitian

Desain Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan menerapkan metode *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengacu secara ketat pada protokol *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) [20]. Penggunaan protokol PRISMA bertujuan untuk menjamin transparansi, replikabilitas, dan akuntabilitas dalam setiap tahapan penapisan literatur ilmiah. Alur metodologi dalam tinjauan sistematis ini direduksi ke dalam empat tahapan utama, yang meliputi: (1) identifikasi rumusan masalah dan formulasi pertanyaan penelitian (*research questions*), (2) strategi pencarian literatur melalui pangkalan data (*database search strategy*), (3) kriteria inklusi dan eksklusi untuk penapisan artikel, serta (4) ekstraksi data, sintesis kritis, dan penilaian kualitas studi (*quality assessment*) [23].

Perumusan Pertanyaan Penelitian /Research Questions (RQs)

Guna memberikan arah analisis yang tajam, komprehensif, dan berorientasi pada pencarian *novelty*, ditetapkan empat Pertanyaan Penelitian (RQ) utama yang mendasari tinjauan sistematis ini:

1. RQ1: Bagaimana tren distribusi temporal dan spasial dari publikasi mengenai metode koreksi bias dan *downscaling* data iklim di Indonesia dalam periode 2016–2025?
2. RQ2: Metode *downscaling* (dinamik dan statistik) serta algoritma koreksi bias apa saja yang paling dominan diaplikasikan pada pemodelan hidrologi di wilayah tropis Indonesia?

3. RQ3: Bagaimana performa dan efisiensi komparatif dari masing-masing metode tersebut dalam mereproduksi karakteristik hujan ekstrem dan meminimalkan ketidakpastian (*uncertainty*) luaran hidrologi?
4. RQ4: Apa saja tantangan kritis saat ini (*knowledge gaps*) dan arah riset masa depan (*future research directions*) bagi pengembangan pemodelan hidrologi adaptif di Indonesia?

Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan secara komprehensif pada pangkalan data bereputasi internasional dan nasional, yaitu Scopus, Web of Science (WoS), Google Scholar, dan SINTA (Science and Technology Index) untuk artikel yang dipublikasikan dari tahun 2016 hingga 2025 [24]. Strategi pencarian dirancang menggunakan kombinasi operator Boolean (AND, OR) dengan kata kunci (*keywords*) dwibahasa yang telah divalidasi. Konstruksi sintaks pencarian (*search string*) yang diaplikasikan adalah sebagai berikut: ("bias correction" OR "koreksi bias") AND ("downscaling" OR "reduksi skala") AND ("climate change" OR "proyeksi iklim") AND ("hydrological simulation" OR "simulasi hidrologi" OR "model hidrologi") AND ("Indonesia" OR "tropical watershed" OR "DAS tropis").

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Untuk memastikan bahwa artikel yang dianalisis memiliki relevansi dan kualitas akademik yang tinggi, ditetapkan kriteria seleksi yang ketat secara objektif. Penapisan dokumen dilakukan berdasarkan matriks inklusi dan eksklusi yang disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Matriks Kriteria Inklusi dan Eksklusi Penapisan Artikel

Kriteria	Inklusi (Diterima)	Eksklusi (Ditolak)
Tipe Dokumen	Artikel jurnal ilmiah (<i>peer-reviewed journal articles</i>)	<i>Conference proceedings</i> , bab buku (<i>book chapters</i>), tesis, disertasi, dan laporan teknis.
Rentang Waktu	Dipublikasikan antara tahun 2016 s.d. 2025.	Dipublikasikan sebelum tahun 2016 atau sesudah tahun 2025.
Fokus Geografis	Lokus studi berada di wilayah kedaulatan Indonesia (DAS Tropis).	Lokus studi di luar Indonesia atau studi global tanpa analisis regional Indonesia.
Topik Utama	Mengevaluasi metode koreksi bias/ <i>downscaling</i> data iklim untuk luaran hidrologi.	Hanya membahas pemodelan iklim global tanpa integrasi ke pemodelan hidrologi/air.
Bahasa	Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia formal standar akademik.	Bahasa selain Inggris dan Indonesia.

Pemilihan Studi dan Penilaian Kualitas

Proses seleksi studi mengikuti diagram alir PRISMA yang terbagi menjadi tiga fase eliminasi [20]. Pada fase awal (*Identification*), seluruh artikel yang terjaring dari pangkalan data digabungkan, dan duplikasi dokumen dieliminasi menggunakan perangkat lunak manajemen referensi Mendeley. Pada fase kedua (*Screening*), dilakukan penapisan berdasarkan judul dan abstrak untuk menyisihkan artikel yang tidak relevan secara kontekstual. Pada fase akhir (*Eligibility*), artikel teks lengkap (*full-text*) diunduh dan dievaluasi kelayakannya secara mendalam berdasarkan kriteria pada **Tabel 1**. Penilaian kualitas (*Quality Assessment*) dilakukan secara independen dengan memberikan skor parameter bobot terhadap validitas metodologi, kejelasan kalibrasi-validasi model hidrologi, serta kelengkapan metrik evaluasi statistik seperti R^2 , *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), dan *Root Mean Square Error* (RMSE) [25].

Ekstraksi dan Sintesis Data

Data dari artikel final yang lolos seleksi diekstraksi ke dalam *spreadsheet* terstruktur untuk mempermudah analisis meta-sintesis [26]. Informasi spesifik yang didokumentasikan meliputi: (a) identitas artikel (penulis, tahun, nama jurnal), (b) karakteristik wilayah (nama DAS, letak geografis/pulau, tipe iklim lokal), (c) jenis model iklim (GCM/RCM, skenario CMIP5/CMIP6), (d) metodologi (algoritma koreksi bias dan teknik *downscaling*), (e) model hidrologi yang digunakan (misalnya SWAT, HEC-HMS, NRECA, Mock), serta (f) temuan utama dan nilai metrik performa statistik [26]. Selanjutnya, data tersebut disintesis menggunakan pendekatan naratif-kritis dan analisis tabulasi silang (*cross-tabulation analysis*) guna memetakan efisiensi spasial metode koreksi bias di seluruh region Indonesia serta mengidentifikasi kesenjangan metodologis yang ada [21].

3. Hasil dan Pembahasan

Distribusi Temporal dan Spasial Publikasi (RQ1)

Analisis terhadap literatur yang diterbitkan antara tahun 2016 hingga 2025 menunjukkan tren eskalasi yang signifikan dalam publikasi koreksi bias dan *downscaling* data iklim untuk simulasi hidrologi di Indonesia. Berdasarkan data penapisan, intensitas riset mengalami lonjakan tajam pasca tahun 2020, yang dipicu oleh rilisnya dataset iklim global terbaru dari *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) serta meningkatnya ketersediaan data RCM berskala tinggi seperti CORDEX-Southeast Asia [9], [27], [28].

Secara spasial, fokus penelitian hidrologi ter-kantong secara dominan di wilayah Indonesia bagian barat, khususnya Pulau Jawa dan Sumatra [9], [14], [18], [29]. Fokus studi yang intensif pada wilayah ini disebabkan oleh densitas penduduk yang tinggi dan urgensi mitigasi bencana banjir pada DAS kritis seperti DAS Brantas [30], Citarum [31], dan Bengawan Solo [32]. Sebaliknya, literatur yang mengkaji wilayah Indonesia bagian timur (Maluku, Papua, dan Nusa Tenggara) masih sangat langka dan terfragmentasi [28]. Kesenjangan spasial ini mengindikasikan adanya bias geografis dalam riset hidrologi nasional yang perlu segera diatasi untuk menjamin pemerataan kebijakan pengelolaan sumber daya air [33].

Metode Downscaling dan Koreksi Bias yang Dominan (RQ2)

Sintesis terhadap metodologi yang digunakan mengungkapkan bahwa pendekatan *Statistical Downscaling* (SD) jauh lebih populer diaplikasikan dibandingkan *Dynamical Downscaling* (DD) [34]. Kendala komputasi yang masif dan keterbatasan infrastruktur *High-Performance Computing* (HPC) menjadi alasan utama para peneliti di Indonesia lebih memilih mentransfer fungsi matematika statistik daripada menjalankan model iklim regional (RCM) dari kondisi batas GCM [35].

Dalam domain koreksi bias, algoritma *Quantile Mapping* (QM) dan *Empirical Quantile Mapping* (EQM) mendominasi literatur hidrologi tropis [36], [37]. Efisiensi QM dalam mencocokkan fungsi distribusi kumulatif (*Cumulative Distribution Function* - CDF) antara data iklim model dan observasi dinilai jauh lebih andal dibandingkan dengan metode koreksi linier konvensional seperti *Linear Scaling* (LS) [15]. Di tingkat pemodelan hidrologi, luaran data iklim yang telah dikoreksi paling sering diintegrasikan ke dalam model berbasis parameter makroskopis sirkulasi air seperti *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) dan HEC-HMS untuk menangkap hidrograf debit limpasan [38].

Perbandingan Kinerja dan Pengurangan Ketidakpastian (RQ3)

Meskipun algoritma QM superior dalam memperbaiki nilai rata-rata bulanan dan variabilitas curah hujan harian, tinjauan kritis ini menemukan variasi performa yang ekstrem akibat efek lokalitas iklim ekuatorial Indonesia [39]. Pada wilayah monsoonal (seperti Pulau Jawa), penggunaan QM terbukti sangat efektif menurunkan bias volume limpasan permukaan pada pemodelan hidrologi, ditunjukkan dengan peningkatan nilai NSE dari kurang dari 0,40 (tanpa koreksi bias) menjadi lebih besar dari 0,75 [40].

Namun, sebuah anomali performa ditemukan pada kondisi iklim tropis basah sepanjang tahun (tipe ekuatorial seperti Kalimantan dan Sumatra) serta saat simulasi musim kemarau ekstrem [39]. Seperti penelitian terkait mengkonfirmasi bahwa metode QM standar rentan menimbulkan risiko *overestimation* (estimasi berlebih) terhadap frekuensi hari hujan intensitas rendah, yang dikenal sebagai fenomena *drizzle effect* [41]. Akibat ketidakakuratan ini, simulasi hidrologi hilir DAS sering kali menghasilkan proyeksi debit andalan (*low-flow*) yang terlalu optimistis selama musim kemarau, yang membahayakan akurasi perencanaan neraca air wilayah [42].

Kesenjangan Pengetahuan dan Arah Penelitian di Masa Depan (RQ4)

Tinjauan sistematis ini berhasil mengidentifikasi tiga kesenjangan pengetahuan (*knowledge gaps*) krusial dalam literatur hidrologi-iklim di Indonesia:

1. Asumsi Stasioneritas Iklim

Mayoritas studi terdahulu masih sangat bergantung pada asumsi bahwa hubungan statistik antara model dan observasi pada periode historis akan tetap konstan di masa depan (*stationarity assumption*) [23]. Padahal, dinamika iklim tropis bersifat *non-stationary* akibat pemanasan global yang intens [43].

2. Keterbatasan Jaringan Stasiun Hujan Permukaan

Kelemahan fundamental rekayasa hidrologi di Indonesia adalah buruknya kualitas dan kontinuitas data observasi darat (BMKG), terutama di wilayah luar Jawa [39]. (Kurniawan & Marzuki, 2021). Hal ini memaksa peneliti menggunakan data satelit seperti CHIRPS atau GSMaP yang pada dasarnya juga membutuhkan koreksi bias berlapis [26].

3. Pengabaian Umpan Balik Hidrologi-Vegetasi

Model hidrologi seperti SWAT sering kali dijalankan dengan peta tutupan lahan yang statis, mengabaikan proyeksi degradasi hutan tropis yang secara simultan berinteraksi dengan perubahan iklim [38].

Sebagai arah riset masa depan (*future research directions*), pengembangan algoritma koreksi bias berbasis *Machine Learning* dan *Deep Learning* seperti *Artificial Neural Networks* (ANN) atau *Random Forest* yang bersifat dinamis harus mulai diadopsi guna menangkap pola non-linier iklim masa depan [44]. Selain itu, standarisasi pedoman pemilihan metode reduksi skala mutlak diperlukan oleh otoritas teknis di Indonesia demi meminimalkan multi-interpretasi dalam perancangan infrastruktur keairan nasional [45].

4. Kesimpulan

Tinjauan sistematis terhadap literatur hidrologi-iklim di Indonesia periode 2016–2025 menunjukkan adanya eskalasi riset yang signifikan pasca-rilis dataset CMIP6, meskipun masih terdapat ketimpangan spasial karena studi cenderung tersentralisasi di wilayah Indonesia bagian barat seperti Pulau Jawa dan Sumatra. Dalam aspek metodologi, pendekatan *Statistical Downscaling* (SD) yang diintegrasikan dengan algoritma koreksi bias non-linier seperti *Quantile Mapping* (QM) dan *Empirical Quantile Mapping* (EQM) menjadi instrumen yang paling dominan diaplikasikan pada model hidrologi SWAT maupun HEC-HMS. Penerapan algoritma QM terbukti sangat superior dan andal dalam mereproduksi fungsi distribusi kumulatif curah hujan ekstrem, sehingga mampu meningkatkan akurasi simulasi hidrograf banjir rancangan secara signifikan pada DAS di wilayah monsoonal dengan pencapaian nilai metrik efisiensi (NSE) yang tinggi.

Meskipun demikian, integrasi data iklim hasil koreksi bias tersebut masih menyisakan ketidakpastian (*uncertainty*) yang besar akibat adanya fenomena *drizzle effect* yang memicu estimasi berlebihan (*overestimation*) frekuensi hari hujan intensitas rendah, khususnya saat memproyeksikan musim kemarau di wilayah tropis basah tipe ekuatorial. Kelemahan tersebut, ditambah dengan ketergantungan pada asumsi stasioneritas iklim masa depan serta keterbatasan kontinuitas data observasi permukaan, menjadi kesenjangan riset (*knowledge gaps*) utama yang harus segera diatasi dalam rekayasa hidrologi nasional. Oleh karena itu, agenda riset mendatang perlu diarahkan pada pemanfaatan algoritma dinamis berbasis *Machine Learning*, yang dibarengi dengan langkah strategis dari otoritas teknis untuk merumuskan standarisasi pedoman reduksi skala iklim demi menjamin keamanan rekayasa serta ketahanan infrastruktur keairan nasional yang adaptif terhadap perubahan iklim global.

5. Daftar Pustaka

- [1] E. Yanfatriani *et al.*, “Extreme Rainfall Trends and Hydrometeorological Disasters in Tropical Regions: Implications for Climate Resilience,” *Emerg. Sci. J.*, vol. 8, no. 5, pp. 1860–1874, 2024.
- [2] B. Kimmany, S. Visessri, P. Pech, and C. Ekkawatpanit, “The Impact of Climate Change on Hydro-Meteorological Droughts in the Chao Phraya River Basin, Thailand,” *Water*, vol. 16, no. 1023, 2024.
- [3] N. Khan *et al.*, “Global climate models performance: A comprehensive review of applied approaches, recognized issues and possible future directions,” *Atmos. Res.*, vol. 326, p. 108300, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108300>.
- [4] Z. Xu and A. Vittorio, “Hydrological analysis in watersheds with a variable-resolution global climate model (VR-CESM),” *J. Hydrol.*, vol. 601, p. 126646, 2021, doi: [10.1016/j.jhydrol.2021.126646](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126646).
- [5] K. Hakala, N. Addor, and J. Seibert, “Hydrological Modeling to Evaluate Climate Model Simulations and Their Bias Correction,” *J. Hydrometeorol.*, 2018, doi: [10.1175/jhm-d-17-0189.1](https://doi.org/10.1175/jhm-d-17-0189.1).
- [6] T. Brighenti, P. Gassman, W. Gutowski, and J. Thompson, “Assessing the Influence of a Bias Correction Method on Future Climate Scenarios Using SWAT as an Impact Model Indicator,” *Water*, 2023, doi: [10.3390/w15040750](https://doi.org/10.3390/w15040750).
- [7] A. Z. A. Zaini, M. Vonnisa, M. Marzuki, and R. Ramadhan, “Seasonal Variation of Rainfall in Indonesia under Normal Conditions without ENSO and IOD Events from 1981-2021,” *J. Penelit. Pendidik. IPA*, 2023, doi: [10.29303/jppipa.v9i11.4569](https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i11.4569).
- [8] R. Hanifa and J. Wiratmo, “ENSO and IOD Influence on Extreme Rainfall in Indonesia: Historical and Future Analysis,” *Agromet*, 2024, doi: [10.29244/j.agromet.38.2.78-87](https://doi.org/10.29244/j.agromet.38.2.78-87).
- [9] I. A. Nur, R. Hidayat, and A. L. Latifah, “Pengaruh koreksi bias dan metode ensemble pada data curah hujan dari empat model luaran Regional Climate Model (RCM) CORDEX-SEA di Sumatera,” *J. Nat. Resour. Environ. Manag.*, vol. 11, no. 1, pp. 49–56, 2021.

- [10] F. Willkofer, F. Schmid, H. Komischke, J. Korck, M. Braun, and R. Ludwig, "Journal of Hydrology : Regional Studies The impact of bias correcting regional climate model results on hydrological indicators for Bavarian catchments," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 19, no. June 2018, pp. 25–41, 2021, doi: 10.1016/j.ejrh.2018.06.010.
- [11] I. Kalu, C. Ndehedehe, V. Ferreira, and M. Kennard, "Machine learning assessment of hydrological model performance under localized water storage changes through downscaling," *J. Hydrol.*, 2024, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130597.
- [12] G. Lazoglou *et al.*, "Multivariate adjustment of drizzle bias using machine learning in European climate projections," *Geosci. Model Dev.*, 2024, doi: 10.5194/gmd-17-4689-2024.
- [13] E. Suhartanto, U. Andawayanti, M. Hidayat, R. D. Lufira, and R. T. Utami, "A Comparative Evaluation of Bias Correction Techniques for Improving GPM-IMERG Precipitation Data in the Welang Watershed, Indonesia," *Eng. Technol. & Appl. Sci. Res.*, 2025, doi: 10.48084/etasr.13762.
- [14] M. R. Jauhari and E. Suhartanto, "Evaluation of Statistical Bias Correction Methods for GPM Precipitation : Application in Gembong Watershed , Indonesia," *J. Penelit. Pendidik. IPA*, vol. 11, no. 11, pp. 590–595, 2025, doi: 10.29303/jppipa.v11i11.12650.
- [15] M. Holthuijzen, B. Beckage, P. Clemins, D. Higdon, and J. Winter, "Robust bias-correction of precipitation extremes using a novel hybrid empirical quantile-mapping method," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 149, pp. 863–882, 2021, doi: 10.1007/s00704-022-04035-2.
- [16] D. Dewanti, A. Djuraidah, B. Sartono, and A. Sopaheluwakan, "Bias correction and ensemble techniques in statistical downscaling model for rainfall prediction using Tweedie-LASSO in West Java, Indonesia," *J. Agrometeorol.*, 2024, doi: 10.54386/jam.v26i3.2614.
- [17] J. Sempewo, D. Twite, P. Nyenje, and S. Mugume, "Comparison of SWAT and HEC-HMS model performance in simulating catchment runoff," *J. Appl. Water Eng. Res.*, vol. 11, pp. 481–495, 2023, doi: 10.1080/23249676.2022.2156401.
- [18] F. Gradiyanto and P. N. Parmantoro, "Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological extremes in Greater Pekalongan , Indonesia," *Water Sci. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 69–77, 2025, doi: 10.1016/j.wse.2024.03.005.
- [19] K. Yamamoto, T. Sayama, and Apip, "Impact of climate change on flood inundation in a tropical river basin in Indonesia," *Prog. Earth Planet. Sci.*, vol. 8, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1186/s40645-020-00386-4.
- [20] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement : An updated guideline for reporting systematic reviews," *PLoS Med.*, vol. 18, no. 3, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1371/journal.pmed.1003583.
- [21] R. Jaiswal, R. Mall, N. Singh, T. L. Kumar, and D. Niyogi, "Evaluation of Bias Correction Methods for Regional Climate Models: Downscaled Rainfall Analysis Over Diverse Agroclimatic Zones of India," *Earth Sp. Sci.*, vol. 9, 2021, doi: 10.1029/2021ea001981.
- [22] J. Paul, P. Khatri, and H. K. Duggal, "Frameworks for developing impactful systematic literature reviews and theory building: What, Why and How?," *J. Decis. Syst.*, vol. 33, pp. 537–550, 2023, doi: 10.1080/12460125.2023.2197700.
- [23] A. Veroniki *et al.*, "Update to the PRISMA guidelines for network meta-analyses and scoping reviews and development of guidelines for rapid reviews: a scoping review protocol," *Jbi Evid. Synth.*, vol. 23, pp. 517–526, 2025, doi: 10.11124/jbies-24-00308.
- [24] H. Kuswanto, B. Kravitz, B. Miftahurrohman, F. Fauzi, A. Sopahaluwaken, and J. Moore, "Impact of solar geoengineering on temperatures over the Indonesian Maritime Continent," *Int. J. Climatol.*, vol. 42, pp. 2795–2814, 2021, doi: 10.1002/joc.7391.
- [25] J. Nathaniel and C. D. Watson, "Bias correction of global climate model using machine learning algorithms to determine meteorological variables in different tropical climates of Indonesia," 2020, doi: 10.31223/x5w59m.
- [26] F. Hidayati, N. Iriawan, H. Kuswanto, and A. Sopaheluwakan, "Improving Local Rainfall Projections in Bali through Bias Correction of CMIP6 Data: A Contribution to Hydro-Meteorological Disaster Mitigation," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2026, doi: 10.1088/1755-1315/1607/1/012045.
- [27] D. C. Lafferty and R. L. Sriver, "Downscaling and bias-correction contribute considerable uncertainty to local climate projections in CMIP6," 2023, doi: 10.1038/s41612-023-00486-0.
- [28] H. Irwandi, M. S. Rosid, and T. Mart, "Effects of Climate change on temperature and precipitation in the Lake Toba region , Indonesia , based on ERA5 - land data with quantile mapping bias correction," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 8, pp. 1–11, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-29592-y.

-
- [29] R. Hidayat and M. Taufik, "Bias Correction of CMIP6 Models for Assessment of Wet and Dry Conditions Over Sumatra," *Agromet*, 2025, doi: 10.29244/j.agromet.39.1.33-39.
- [30] A. Kurniadi, E. Weller, J. Salmond, and E. Aldrian, "Future projections of extreme rainfall events in Indonesia," *Int. J. Climatol.*, vol. 44, pp. 160–182, 2024, doi: 10.1002/joc.8321.