Evaluasi dan Koreksi Bias Curah Hujan Cmip6 Ssp5-8.5 Tahun 2025–2050 di Dta Waduk Sutami

Abdul Razaq[1]*, Mahendra Andiek Maulana[2], Anak Agung Ngurah Satria Damar Negara[3]
[1]Postgraduate Student at Institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia
[2-3]Institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : *abdul.razaq.zaqi@gmail.com*

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981
ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin
https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada
Vol. 04, No. 10 Oktober, 2026
Page: 7031-7042

DOI:
https://doi.org/10.55681/armada.v4i10.4639

Article History:
Received: Agustus 14, 2026
Revised: September 01, 2026
Accepted: Oktober 19, 2026

Abstract *: Rainfall bias evaluation and correction are essential for supporting water resources modelling and sedimentation management in the Sutami Reservoir Catchment Area. This study evaluates five CMIP6 climate models and projects bias-corrected rainfall under the high-emission SSP5-8.5 scenario for 2025–2050. Missing observations from six rain gauges during 2012–2014 were filled using Inverse Distance Weighting (IDW), while areal rainfall was calculated using Thiessen polygons. Model performance was evaluated at daily and monthly scales using mean values, correlation, RMSE, and MAE before and after Quantile Mapping (QM) correction. The results show that QM improves statistical agreement at the monthly scale, achieving a correlation of up to 0.94, whereas daily correlations remain low (0.19–0.33). The ensemble projection indicates an annual mean rainfall of 1,290.93 mm, representing a 3.90% decrease compared with the historical mean of 1,343.35 mm. These findings support water balance analysis, hydrological simulation, and sedimentation risk mitigation, while accounting for inter-model uncertainty.*

Keywords : *Rainfall; NEX-GDDP-CMIP6; Quantile Mapping; SSP5-8.5; Sutami Reservoir*

Abstrak : Evaluasi dan koreksi bias curah hujan diperlukan untuk mendukung pemodelan sumber daya air dan pengelolaan sedimentasi di Daerah Tangkapan Air Waduk Sutami. Penelitian ini mengevaluasi lima model iklim CMIP6 dan memproyeksikan curah hujan terkoreksi berdasarkan skenario SSP5-8.5 periode 2025–2050. Data kosong observasi enam stasiun hujan periode 2012–2014 dilengkapi menggunakan Inverse Distance Weighting (IDW), sedangkan curah hujan wilayah dihitung dengan Poligon Thiessen. Kinerja model dievaluasi pada skala harian dan bulanan menggunakan rata-rata, korelasi, RMSE, dan MAE sebelum serta sesudah koreksi Quantile Mapping (QM). Hasil menunjukkan bahwa QM meningkatkan kesesuaian statistik pada skala bulanan dengan korelasi hingga 0,94, tetapi korelasi harian tetap rendah (0,19–0,33). Proyeksi ansambel menunjukkan rata-rata curah hujan tahunan sebesar 1.290,93 mm, menurun 3,90% dibandingkan kondisi historis sebesar 1.343,35 mm. Temuan ini mendukung analisis neraca air, simulasi hidrologi, dan mitigasi sedimentasi dengan mempertimbangkan ketidakpastian antarmodel.

Kata Kunci : Curah Hujan; NEX-GDDP-CMIP6; Quantile Mapping; SSP5-8.5; Waduk Sutami

PENDAHULUAN

Pengelolaan sumber daya air di masa depan sangat bergantung pada keakuratan informasi perubahan pola dan curah hujan akibat perubahan iklim. Pada daerah tangkapan air (DTA) Waduk Sutami salah satu infrastruktur air vital di Jawa Timur informasi presipitasi ini sangat krusial untuk mengantisipasi ketersediaan air, risiko banjir, hingga laju pendangkalan akibat sedimentasi. Namun, analisis dampak iklim dapat terkendala oleh kualitas data hujan. Kesalahan atau ketidakakuratan data di tingkat awal dapat memengaruhi hasil analisis serta keputusan perencanaan dan pengambilan keputusan di tahap berikutnya. Oleh karena itu, evaluasi terhadap data hujan lapangan (observasi) mutlak dilakukan untuk menguji sejauh mana model data iklim global dapat dipercaya dan di mana letak penyimpangannya. Untuk memprediksi kondisi iklim masa depan, *Coupled Model Intercomparison Project Phase* 6 (CMIP6) menyediakan kerangka pemodelan iklim global yang membandingkan berbagai simulasi model iklim bumi (Eyring et al., 2016). Proyeksi ini menggunakan skenario *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) untuk menggambarkan berbagai potensi iklim berdasarkan arah perkembangan sosial-ekonomi global dan tingkat emisi gas rumah kaca. Penelitian ini memanfaatkan skenario SSP5-8.5 sebagai gambaran kondisi emisi tinggi, yang digunakan sebagai bahan analisis risiko, bukan sebagai ramalan tunggal yang pasti terjadi (O'Neill et al., 2016).

Tantangan sedimentasi di Waduk Sutami semakin mempertegas pentingnya data iklim yang andal pada skala lokal. Sisinggih et al. (2023) menyoroti peluang dan tantangan teknis serta lingkungan dalam pengelolaan sedimen di Waduk Sutami. Kajian tersebut menunjukkan betapa pentingnya isu sedimentasi bagi keberlanjutan fungsi waduk. Penelitian ini mendukung upaya tersebut dengan berfokus pada tahap awal, yaitu menyediakan input data hujan yang akurat. Dengan kata lain, hubungan dengan aspek sedimentasi digunakan untuk memperjelas konteks pemanfaatan data, tanpa memperluas cakupan penelitian hingga ke pemodelan pergerakan atau pengendapan sedimen itu sendiri.

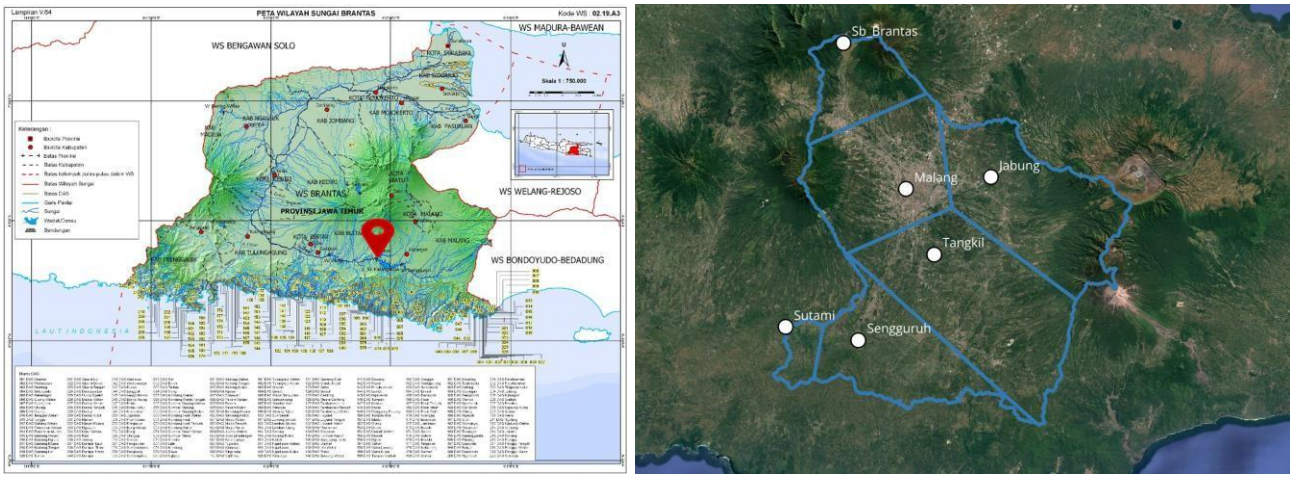
Salah satu produk data iklim global yang banyak digunakan adalah NEX-GDDP-CMIP6, yang menyediakan data hujan harian hasil penyelarasan skala global ke skala regional (*downscaling*) serta koreksi penyimpangan pada resolusi 0,25° (Thrasher et al., 2022). Meskipun telah disesuaikan secara global, keandalan data ini terhadap kondisi nyata di lapangan khususnya curah hujan wilayah yang dihitung dari stasiun pengamat lokal, tetap wajib diuji. Koreksi bias dalam penelitian ini berfungsi sebagai penyesuaian tambahan agar data simulasi lebih sesuai dengan karakter hujan lokal DTA Waduk Sutami. Koreksi bias bertujuan menyelaraskan karakteristik statistik data simulasi model dengan data riil di lapangan. Metode Quantile Mapping digunakan karena mampu mencocokkan distribusi data secara menyeluruh, tidak hanya menyelaraskan nilai rata-ratanya (Teutschbein & Seibert, 2012). Dalam skala nasional, Prasetya et al. (2026) telah mengevaluasi model NEX-GDDP-CMIP6 berdasarkan pola iklim bulanan. Penelitian ini melengkapi gambaran tersebut dengan menguji kesesuaian data pada skala yang lebih mendetail, yaitu skala DTA Waduk Sutami secara harian maupun bulanan.

Penggunaan data hujan wilayah sebagai acuan utama membantu menjembatani pengamatan lapangan dengan kebutuhan analisis pengelolaan air di tingkat DAS. Penelitian ini menempatkan evaluasi dan koreksi bias sebagai tahap penting dalam penjaminan mutu (*quality control*) data iklim. Informasi yang dihasilkan mencakup tingkat keakuratan, besarnya penyimpangan (*error*), serta keterbatasan data pada skala harian dan bulanan. Hal ini sangat berguna bagi para peneliti, praktisi, maupun pembuat kebijakan dalam menentukan langkah pengolahan data sebelum digunakan untuk kajian dampak perubahan iklim lebih lanjut. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menyeleksi data hujan observasi lokal sebagai acuan, (2) mengevaluasi kinerja historis lima model CMIP6, (3) menilai peningkatan kinerja model setelah penerapan metode Quantile Mapping, dan (4) menyusun basis data hujan proyeksi terkoreksi skenario SSP5-8.5 untuk periode 2025–2050. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah menyajikan penilaian kesesuaian data iklim pada skala DTA Waduk Sutami serta memberikan panduan praktis mengenai kelebihan dan keterbatasan koreksi data pada skala harian dan bulanan sebagai masukan bagi perencanaan sumber daya air

berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengambil lokasi di Daerah Tangkapan Air (DTA) Waduk Sutami yang terletak pada Sistem Sungai Brantas Hulu, Jawa Timur. Wilayah kajian ini mencakup area seluas 2.014,98 km² . Untuk menghitung rata-rata curah hujan wilayah, digunakan data dari enam stasiun/pos hujan pengamat setempat. Pembobotan dan batas luas pengaruh masing-masing stasiun ditentukan menggunakan metode Poligon Thiessen.



Gambar 1. Peta batas DTA Waduk Sutami, sebaran pos hujan, dan Poligon Thiessen
Sumber: Diolah dari Permen PUPR No. 04/PRT/M/2015 dan Hasil Analisis (2026)

Data hujan observasi diperoleh dari stasiun pemantau telemetri periode 2009–2014, dengan periode 2012–2014 sebagai basis evaluasi dan pembentukan fungsi koreksi bias. Penelitian ini menggunakan lima model iklim NEX-GDDP-CMIP6, yaitu ACCESS-CM2, TaiESM1, CanESM5, CMCC-ESM2, dan MRI-ESM2-0. Data historis model dibatasi hingga 31 Desember 2014, sedangkan proyeksi skenario SSP5-8.5 dianalisis untuk periode 2025–2050. Data presipitasi diunduh melalui Google Earth Engine (GEE) dari direktori NASA/GDDP-CMIP6, kemudian dikonversi menjadi curah hujan harian dan diseragamkan satuan, kalender, tanggal, serta cakupan wilayahnya. Kualitas data observasi diperiksa berdasarkan kelengkapan dan kontinuitas deret waktu, dengan membedakan data hilang dari curah hujan nol. Kekosongan data diisi menggunakan Inverse Distance Weighting (IDW), sedangkan curah hujan wilayah observasi dihitung menggunakan Poligon Thiessen berdasarkan enam stasiun hujan, yaitu Sumber Brantas, Malang, Jabung, Tangkil, Sutami, dan Sengguruh. Curah hujan model dihitung berdasarkan rata-rata spasial dalam batas Daerah Tangkapan Air (DTA).

Evaluasi kinerja model dilakukan pada skala harian dan bulanan menggunakan rata-rata, koefisien korelasi, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), dan Percent Bias (PBIAS). Koreksi bias diterapkan menggunakan Quantile Mapping (QM) dengan membandingkan distribusi kumulatif empiris curah hujan model dan observasi selama periode referensi 2012–2014. Koreksi dilakukan berdasarkan bulan kalender untuk mempertimbangkan variasi musiman, kemudian diterapkan secara konsisten pada data historis dan proyeksi masa depan. Kinerja model sebelum dan sesudah koreksi dibandingkan pada periode referensi yang sama. Proyeksi curah hujan terkoreksi periode 2025–2050 dianalisis dalam agregasi bulanan dan tahunan untuk mengidentifikasi rata-rata curah hujan tahunan, pola klimatologi bulanan, perubahan relatif terhadap periode referensi, serta rentang variasi antarmodel. Periode referensi tiga tahun diperlakukan sebagai periode referensi pendek, bukan normal klimatologis standar. Hasil proyeksi diinterpretasikan sebagai gambaran potensial berdasarkan skenario SSP5-8.5 dengan mempertimbangkan ketidakpastian antarmodel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kelayakan jaringan observasi

Evaluasi kelengkapan dan kontinuitas data pos hujan dilakukan pada periode 2009–2014 untuk memperoleh gambaran mengenai riwayat pencatatan, termasuk durasi kekosongan data terpanjang. Sementara itu, periode 2012–2014 dipilih sebagai periode referensi untuk pengisian data kosong dan koreksi bias karena memiliki kelengkapan data yang lebih baik. Proses seleksi menghasilkan lima stasiun utama (*core stations*) dan satu stasiun pendukung (*complementary station*). Pada periode 2012–2014, lima stasiun utama memiliki tingkat kelengkapan data antara 92,70% dan 97,45%, lebih tinggi dibandingkan dengan tingkat kelengkapannya pada periode 2009–2014. Stasiun Sengguruh dikategorikan sebagai stasiun pendukung dengan tingkat kelengkapan sebesar 83,67%, sehingga memerlukan pengisian data kosong (*gap filling*) sebelum digunakan dalam perhitungan hujan wilayah. Stasiun Pujon dan Poncokusumo diklasifikasikan sebagai stasiun terbatas, sedangkan Stasiun Dampit dan Wagir tidak digunakan dalam analisis utama karena memiliki persentase data hilang yang tinggi. Ringkasan hasil seleksi stasiun disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kelengkapan awal pos hujan dan klasifikasi

Pos	2009–2014 (%)	2012–2014 (%)	Gap terpanjang*	Klasifikasi
Sumber Brantas	84,93	95,16	8	Inti
Malang	58,39	97,45	8	Inti
Jabung	73,15	93,98	29	Inti
Tangkil	57,92	92,70	25	Inti
Sutami	59,28	93,16	19	Inti
Sengguruh	55,68	83,67	39	Pelengkap
Pujon	49,90	73,08	115	Terbatas
Poncokusumo	34,41	51,82	506	Terbatas
Dampit	14,03	16,15	848	Gugur
Wagir	11,63	14,78	848	Gugur

*Catatan: Gap terpanjang dihitung berdasarkan durasi hari tanpa pencatatan berturut-turut pada periode 2009–2014. (Sumber: Hasil Analisis, 2026)

Berdasarkan analisis Poligon Thiessen pada enam stasiun terpilih, diperoleh proporsi luas area pengaruh dan bobot masing-masing stasiun terhadap luas total DTA Waduk Sutami (2.014,98 km^2) sebagaimana tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Luas pengaruh dan bobot Thiessen pos terpilih

Pos	Luas (km^2)	Bobot (%)
Sumber Brantas	185,78	9,22
Malang	390,62	19,39
Jabung	471,26	23,39
Tangkil	583,20	28,94
Sutami	51,61	2,56
Sengguruh	332,51	16,50
Total	2.014,98	100,00

Sumber: Hasil Analisis (2026)

Stasiun Tangkil memiliki bobot terluas (28,94%), disusul oleh Stasiun Jabung (23,39%) dan Stasiun Malang (19,39%). Stasiun Sengguruh memberikan kontribusi yang tergolong signifikan, yaitu sebesar 16,50%. Mengingat bobotnya yang cukup besar, pengisian data kosong pada Stasiun Sengguruh memiliki pengaruh material terhadap estimasi curah hujan wilayah. Oleh sebab itu, transparansi mengenai proporsi data estimasi IDW terhadap total data observasi sangat penting untuk diperhatikan agar ketergantungan data acuan terhadap metode interpolasi dapat terukur secara objektif.

Analisis Hasil Rekonstruksi Data Kosong

Evaluasi terhadap kontinuitas pencatatan hujan harian periode 2012–2014 menunjukkan bahwa metode Inverse Distance Weighting (IDW) berhasil merekonstruksi seluruh data yang hilang pada enam stasiun pengamat. Stasiun Sengguruh mencatat frekuensi pengisian tertinggi yaitu sebanyak 179 hari (16,33%), diikuti oleh Stasiun Tangkil sebanyak 80 hari (7,30%), dan Stasiun Sutami sebanyak 75 hari (6,84%). Sebaliknya, Stasiun Malang memiliki kontinuitas data terbaik dengan hanya membutuhkan pengisian sebanyak 28 hari 2,55%).

Tabel 3. Rekapitulasi Pengisian Data Hujan Kosong Menggunakan Metode IDW (2012–2014)

Stasiun	Total Hari	Data Kosong (Hari)	Proporsi (%)	Rata-Rata Data Asli (mm/hari)	Rata-Rata Data IDW (mm/hari)	Rata-Rata Gabungan (mm/hari)	Hujan Maks. Asli (mm/hari)	Hujan Maks. IDW (mm/hari)
Sb Brantas	1.096	53	4,84%	8,68	2,96	8,40	192,00	17,55
Malang	1.096	28	2,55%	3,87	0,16	3,77	113,00	3,92
Jabung	1.096	66	6,02%	3,37	0,77	3,22	57,00	32,46
Tangkil	1.096	80	7,30%	2,77	2,54	2,75	75,00	26,22
Sengguruh	1.096	179	16,33%	3,31	2,53	3,18	55,00	22,71
Sutami	1.096	75	6,84%	3,40	2,51	3,34	76,00	27,91

Sumber: Hasil Analisis (2026)

Berdasarkan perbandingan statistik pada Tabel 3, nilai rata-rata curah hujan hasil estimasi IDW berada dalam rentang yang sangat konsisten dengan rata-rata historis data observasi asli. Sebagai contoh, pada Stasiun Sengguruh, rata-rata curah hujan asli sebesar 3,31 mm/hari berubah menjadi 3,18 mm/hari setelah digabungkan dengan data IDW (rata-rata estimasi IDW 2,53 mm/hari). Hal ini membuktikan bahwa pembobotan berbasis kuadrat jarak (k=2) tidak menimbulkan pergeseran nilai tengah (mean shift) yang signifikan pada deret data hujan wilayah. Dari segi nilai ekstrem, hujan maksimum hasil estimasi IDW pada seluruh stasiun berada pada kisaran 3,92 mm/hari hingga 32,46 mm/hari . Nilai ini secara alami lebih rendah dibandingkan nilai hujan maksimum observasi asli (yang mencapai 192,00 mm/hari di Sumber Brantas). Kondisi ini mencerminkan sifat khas metode IDW yang meratakan pengaruh spasial (spatial smoothing effect), di mana nilai estimasi dihasilkan dari gabungan stasiun donor di sekitarnya sehingga terhindar dari pemunculan nilai ekstrem palsu (spurious extreme values). Pengisian data yang kontinu dan realistis ini meningkatkan kelengkapan data deret waktu hujan sebelum digunakan dalam analisis Poligon Thiessen dan evaluasi model CMIP6.

Kinerja historis sebelum koreksi

Evaluasi terhadap simulasi historis periode 2012–2014 menunjukkan bahwa sebelum dikenai koreksi bias, seluruh model CMIP6 secara konsisten memperkirakan curah hujan harian yang lebih tinggi (overestimate) dibandingkan dengan data observasi lapangan. Rata-rata curah hujan harian simulasi model berada pada rentang 6,51 hingga 8,14 mm/hari, sedangkan rata-rata observasi lapangan hanya sebesar 3,67 mm/hari. Pada skala harian, koefisien korelasi (r) yang dihasilkan tergolong rendah, yaitu berkisar antara 0,18 hingga 0,33. Hal ini mengindikasikan terbatasnya kemampuan model iklim global dalam menyelaraskan waktu kejadian hujan harian secara presisi di tingkat lokal. Secara individual, model CMCC-ESM2 mencatatkan kinerja statistik harian terbaik untuk indikator korelasi (r=0,33) dan Mean Absolute Error (MAE=5,57 mm/hari), sedangkan model CanESM5 menghasilkan nilai Root Mean Square Error terendah (RMSE=8,61 mm/hari). Hasil ini menunjukkan bahwa tidak ada satu pun model yang secara mutlak unggul di seluruh indikator statistik pada skala harian.

Tabel 4. Evaluasi Kinerja Statistik Historis Lima Model CMIP6 Sebelum Koreksi Bias (2012–2014)

Skala / Indikator	Observasi	ACCESS-CM2	CanESM5	CMCC-ESM2	MRI-ESM2-0	TaiESM1
Skala Harian						
Rata-Rata (mm/hari)	3,67	7,01	6,81	6,51	6,72	8,14
Korelasi (r)	-	0,18	0,26	0,33	0,23	0,21
RMSE (mm/hari)	-	10,12	8,61	8,97	10,25	10,97
MAE (mm/hari)	-	6,51	5,86	5,57	6,06	6,99
Skala Bulanan						
Rata-Rata (mm/bulan)	111,58	213,52	207,30	198,10	204,52	247,69
Korelasi (r)	-	0,55	0,75	0,82	0,70	0,72
RMSE (mm/bulan)	-	168,03	137,12	125,40	143,77	170,14
MAE (mm/bulan)	-	122,55	108,27	88,98	103,28	136,96

Sumber: Hasil Analisis (2026)

Ketika data diagregasikan ke skala bulanan, korelasi antara simulasi model dan observasi meningkat menjadi 0,55 hingga 0,82. Model CMCC-ESM2 kembali menunjukkan kinerja tertinggi pada skala bulanan dengan nilai r=0,82, RMSE=125,40 mm/bulan, dan MAE=88,98 mm/bulan. Agregasi ke skala bulanan terbukti efektif meredam noise atau pergeseran waktu kejadian harian (daily timing mismatch), sehingga pola siklis musiman dapat tertangkap dengan lebih jelas. Kendati demikian, tingginya korelasi bulanan tidak serta-merta menjamin ketepatan model dalam mensimulasikan kejadian hujan ekstrem harian maupun variabilitas antar-tahun (interannual variability). Satu hal penting yang perlu dipahami adalah bahwa simulasi historis model iklim global didesain untuk merepresentasikan karakteristik statistik iklim jangka panjang, bukan sebagai rekonstruksi cuaca harian aktual (day-to-day weather forecast). Oleh karena itu, rendahnya korelasi harian berpasangan dijadikan sebagai gambaran keterbatasan temporal model, bukan satu-satunya tolok ukur dalam menilai kelayakan proyeksi iklim. Penilaian keandalan model akan lebih komprehensif apabila didukung oleh evaluasi bentuk distribusi frekuensi, akumulasi musiman, frekuensi hari hujan, serta kuantil hujan ekstrem. Penemuan ini juga melengkapi kajian Prasetya et al. (2026) yang mengevaluasi klimatologi bulanan skala nasional, di mana analisis dalam penelitian ini memberikan gambaran yang lebih detail mengenai respons model pada skala lokal DTA Waduk Sutami.

Kinerja setelah Quantile Mapping

Penerapan metode *Quantile Mapping* (QM) terbukti meningkatkan kesesuaian statistik simulasi model CMIP6 terhadap acuan observasi lapangan pada periode referensi (2012–2014). Pada skala harian, metode QM berhasil mereduksi kecenderungan *overestimation* dengan menurunkan rata-rata curah hujan harian model dari rentang awal 6,51–8,14 mm/hari menjadi 3,61–3,70 mm/hari, yang mendekati rata-rata observasi (3,67 mm/hari). Selain itu, besaran kesalahan pada seluruh model mengalami penurunan, dengan persentase penurunan RMSE harian berkisar antara 16,1% hingga 35,9%.

Tabel 5. Perbandingan Indikator Statistik Harian Sebelum dan Sesudah Quantile Mapping

Model CMIP6	ACCESS-CM2	CanESM5	CMCC-ESM2	MRI-ESM2-0	TaiESM1
Rata-Rata (mm/hari)	7,01→3,7	6,81→3,61	6,51→3,7	6,72→3,7	8,14→3,67
Korelasi (r)	0,18→0,19	0,26→0,22	0,33→0,33	0,23→0,26	0,21→0,28
RMSE (mm/hari)	10,12→7,42	8,61→7,23	8,97→6,74	10,25→7,05	10,97→7,03
MAE (mm/hari)	6,51→4,36	5,86→4,27	5,57→3,99	6,06→4,18	6,99→4,03

Sumber: Hasil Analisis (2026)

Setelah dikoreksi, model CMCC-ESM2 menghasilkan nilai RMSE harian terendah (6,74 mm/hari), CMCC-ESM2 mencatatkan MAE terendah (3,99 mm/hari), dan TaiESM1 menghasilkan rata-rata harian yang paling mendekati observasi (3,67 mm/hari). Namun demikian, korelasi harian (r) setelah koreksi tetap berada pada rentang rendah (0,19–0,33). Pada model seperti CanESM5 nilai r bahkan mengalami sedikit penurunan. Hal ini menegaskan sifat mendasar dari Quantile Mapping, yaitu menyelaraskan bentuk distribusi marginal (distribution shape) dan kuantil nilai curah hujan, tanpa mengoreksi atau mengubah urutan kronologis tanggal kejadian hujan (daily sequence timing). Peningkatan kinerja yang jauh lebih dramatis terlihat pada agregasi skala bulanan, di mana akumulasi curah hujan bulanan berhasil diselaraskan dengan baik terhadap data observasi. Metode QM mampu memangkas nilai RMSE bulanan sebesar 48,6% hingga 79,7%.

Tabel 6. Perbandingan Indikator Statistik Bulanan Sebelum dan Sesudah Quantile Mapping

Model CMIP6	ACCESS-CM2	CanESM5	CMCC-ESM2	MRI-ESM2-0	TaiESM1
Rata-Rata (mm/bulan)	213,52→112,67	207,3→109,98	198,1→112,51	204,52→112,76	247,69→111,81
Korelasi (r)	0,55→0,62	0,75→0,81	0,82→0,9	0,7→0,83	0,72→0,94
RMSE (mm/bulan)	168,03→86,41	137,12→59,96	125,4→43,34	143,77→57,13	170,14→34,57
MAE (mm/bulan)	122,55→61,32	108,27→44,1	88,98→32,21	103,28→42,01	136,96→22,17

Sumber: Hasil Analisis (2026)

Pada skala bulanan, TaiESM1 menunjukkan peningkatan kinerja paling menonjol setelah koreksi, dengan nilai korelasi mencapai r=0,94, serta kesalahan terendah (RMSE=34,57 mm/bulan dan MAE=22,17 mm/bulan). Model CMCC-ESM2 menempati posisi kedua dengan RMSE sebesar 43,34 mm/bulan. Perbedaan peringkat kinerja model pada skala harian dan bulanan memperlihatkan pentingnya pemilihan model yang disesuaikan dengan tujuan kajian (fitness-for-purpose). Apabila fokus analisis berorientasi pada neraca air atau total ketersediaan air bulanan, model TaiESM1 memberikan tingkat akurasi tertinggi. Namun, jika analisis memerlukan masukan kejadian hujan harian yang minim kesalahan magnitudo ekstrem (seperti untuk studi limpasan permukaan atau sedimentasi harian), model CMCC-ESM2 memberikan estimasi kesalahan harian terendah. Oleh karena itu, penggunaan pendekatan multi-model (multi-model ensemble) serta evaluasi berimbang lintas skala temporal sangat direkomendasikan daripada mengandalkan satu model tunggal sebagai masukan kajian dampak perubahan iklim.

Koreksi proyeksi SSP5 8 5 tahun 2025 sampai 2050

Hasil koreksi bias Quantile Mapping (QM) yang dibentuk dari periode referensi historis (2012–2014) diterapkan pada deret proyeksi iklim skenario emisi tinggi SSP5-8.5 untuk periode 2025–2050 (26 tahun kalender). Data curah hujan harian terkoreksi diringkas ke dalam agregasi total bulanan dan tahunan untuk mengidentifikasi pergeseran tren curah hujan tahunan, variabilitas musiman, serta potensi kecenderungan iklim di DTA Waduk Sutami. Ringkasan kuantitatif proyeksi curah hujan tahunan hasil koreksi dari kelima model CMIP6 disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Ringkasan Statistik Curah Hujan Tahunan Historis dan Proyeksi CMIP6 SSP5-8.5 Setelah Koreksi Bias

Model CMIP6	Rata-Rata Historis 2012–2014 (mm/tahun)	Rata-Rata Proyeksi 2025–2050 (mm/tahun)	Perubahan terhadap Referensi (%)*	Hujan Tahunan Minimum Proyeksi (mm)	Hujan Tahunan Maksimum Proyeksi (mm)
ACCESS-CM2	1.352,02	1.338,78	-0,98%	573,19	2.132,75
TaiESM1	1.341,70	1.321,24	-1,53%	563,43	1.805,49
CanESM5	1.319,81	1.253,27	-5,04%	833,86	1.678,85
CMCC-ESM2	1.350,12	1.335,51	-1,08%	583,50	2.249,33

MRI-ESM2-0	1.353,11	1.205,86	-10,88%	724,71	2.008,08
(*Ensemble Mean*)	1.343,35	1.290,93	-3,90%	563,43	2.249,33

**Catatan: Periode historis 2012–2014 dan proyeksi 2025–2050. Perubahan relatif dihitung terhadap rerata historis setelah koreksi bias.*
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Berdasarkan hasil analisis, rata-rata curah hujan tahunan DTA Waduk Sutami pada periode 2025–2050 diproyeksikan berada pada rentang 1.205,86 mm/tahun (MRI-ESM2-0) hingga 1.338,78 mm/tahun (ACCESS-CM2), dengan rata-rata ansambel (ensemble mean) sebesar 1.290,93 mm/tahun. Dibandingkan dengan periode referensi historis terkoreksi (1.343,35 mm/tahun), kelima model CMIP6 secara konsisten menyepakati arah perubahan berupa penurunan rata-rata curah hujan tahunan sebesar 0,98% hingga 10,88% (rata-rata ansambel turun sebesar 3,90%). Meskipun secara akumulasi tahunan terjadi penurunan moderat, variabilitas antar-tahun (interannual variability) menunjukkan rentang fluktuasi yang sangat lebar, yaitu antara nilai ekstrem minimum 563,43 mm/tahun (TaiESM1 pada tahun kering) hingga maksimum 2.249,33 mm/tahun (CMCC-ESM2 pada tahun basah). Pada skala musiman, perubahan yang cukup dinamis terlihat pada peralihan musim:Musim Hujan (Puncak Basah): Pada bulan Januari–Maret, beberapa model memproyeksikan peningkatan curah hujan bulanan, seperti model ACCESS-CM2 (+32,76% pada Februari) dan MRI-ESM2-0 (+16,89% pada Februari).

Musim Kemarau (Puncak Kering): Pada bulan Juni–Oktober, sebagian besar model memproyeksikan penurunan curah hujan. Penurunan terbesar terjadi pada bulan September dan Oktober (mencapai -40% hingga -68% pada beberapa model), mengindikasikan potensi penurunan pasokan hujan pada bulan-bulan kering di masa mendatang. Untuk membandingkan dinamika internal masa depan, periode proyeksi dibagi menjadi dua sub-periode berdurasi sama: Periode I (2025–2037) dan Periode II (2038–2050). Hasil perbandingan menunjukkan bahwa model CanESM5 memproyeksikan penurunan hujan yang cukup tajam sebesar -19,46% dari Periode I (1.388,35 mm/tahun) ke Periode II (1.118,19 mm/tahun). Sebaliknya, model MRI-ESM2-0 memproyeksikan tren pemulihan sebesar +6,18% pada Periode II. Perlu untuk dicermati bahwa sebelum dikoreksi bias, data mentah (*raw*) CMIP6 memperkirakan rata-rata hujan tahunan sebesar 2.014,01 hingga 2.573,30 mm/tahun dengan proyeksi penurunan yang jauh lebih drastis (hingga -17,94%). Penerapan metode *Quantile Mapping* (QM) mampu mengeliminasi overestimation awal tersebut dan menyelaraskan distribusi presipitasi ke skala geografis DTA Waduk Sutami.

Implikasi bagi pengelolaan Sumber Daya Air dan kajian sedimentasi

Peningkatan akurasi statistik pada data curah hujan merupakan tahap awal yang krusial dalam menyiapkan input analisis pengelolaan sumber daya air (SDA) masa depan. Penurunan besaran kesalahan (RMSE dan MAE) setelah koreksi bias menunjukkan bahwa masukan presipitasi proyeksi telah berada pada skala magnitudo yang konsisten dengan karakteristik lokal DTA Waduk Sutami. Namun, penting bagi para praktisi dan pengambil kebijakan untuk memahami bahwa keselarasan statistik data hujan pada periode referensi tidak otomatis menjamin keakuratan simulasi debit sungai maupun keputusan operasional waduk secara langsung. Hubungan kausalitas tersebut tetap memerlukan pengujian hidrologi lanjutan. Dalam konteks kajian ketersediaan air dan neraca air, akumulasi curah hujan bulanan beserta pola distribusinya antarmusim memberikan gambaran potensial mengenai pasokan air jangka panjang. Hasil koreksi bias pada skala bulanan yang mencatatkan peningkatan korelasi hingga $r = 0{,}94$ (model TaiESM1) menyediakan basis data yang andal untuk penyiapan model neraca air waduk. Kendati demikian, angka ketersediaan air tetap harus memperhitungkan variabel evapotranspirasi, tingkat kehilangan air, kondisi tampungan mati (dead storage), proyeksi kebutuhan air (irigasi, air baku, dan PLTA), serta aturan alokasi air sebelum diterjemahkan menjadi kebijakan operasional. Penelitian ini mendukung penyiapan masukan iklim dengan keterbatasan yang telah diidentifikasi di tingkat masukan presipitasi, sedangkan evaluasi kecukupan alokasi air merupakan tahap analisis lanjutan.

Untuk kajian banjir dan respons limpasan permukaan, besaran (magnitude) serta urutan kronologis kejadian hujan harian menjadi faktor penentu utama. Koreksi bias dengan metode Quantile Mapping mampu menurunkan RMSE dan MAE harian pada periode referensi, namun korelasi harian berpasangan (*r*) yang tetap berada pada rentang rendah (0,19–0,33) menegaskan bahwa data proyeksi ini tidak ditujukan sebagai prakiraan cuaca harian aktual (daily weather forecast) pada tanggal tertentu di masa depan. Dataset ini lebih tepat ditafsirkan sebagai rangkaian skenario iklim untuk menguji sensitivitas respons hidrologi daerah tangkapan air terhadap tren ekstremitas hujan, bukan sebagai dasar langsung untuk menetapkan pengoperasian pintu pelimpah (spillway gate) pada tanggal spesifik. Dalam kajian sedimentasi dan erosi lahan, perubahan pola hujan memengaruhi laju erosi tanah dan transportasi sedimen menuju Waduk Sutami. Namun, besarnya laju sedimentasi riil tidak hanya ditentukan oleh total hujan tahunan, melainkan juga oleh tingkat kebasahan tanah, tutupan lahan (land cover), kemiringan lereng, serta konektivitas alur sungai (sediment delivery ratio). Dua tahun dengan akumulasi hujan yang sama dapat menghasilkan beban sedimen yang berbeda apabila intensitas hujan per kejadiannya berbeda. Oleh karena itu, data hujan proyeksi terkoreksi dalam penelitian ini diposisikan sebagai variabel pembentuk respons hidrologi, sedangkan estimasi penurunan kapasitas tampungan aktif maupun estimasi sisa usia guna Waduk Sutami memerlukan pemodelan angkutan sedimen tersendiri (sediment transport modeling).

Guna mendukung perencanaan SDA yang adaptif, ketidakpastian dan variabilitas antar-model (inter-model spread) harus tetap dipertahankan dalam penyajian hasil proyeksi. Pemilihan satu model tunggal berpotensi mengabaikan rentang risiko iklim di masa depan. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan pendekatan ansambel lima model (ACCESS-CM2, TaiESM1, CanESM5, CMCC-ESM2, dan MRI-ESM2-0) sebagai alternatif masukan simulasi. Rentang hasil proyeksi terkoreksi (1.205,86 hingga 1.338,78 mm/tahun) menggambarkan spektrum kemungkinan di bawah skenario emisi tinggi (SSP5-8.5), yang memberikan ruang fleksibilitas bagi pengelola SDA dalam merumuskan strategi adaptasi terhadap perubahan iklim. Secara keseluruhan, penelitian ini telah menyelesaikan tahap standarisasi dan penjaminan mutu (quality control) data iklim global untuk skala DTA Waduk Sutami. Transparansi metodologi mulai dari rekonstruksi data stasiun pengamat berbasis IDW hingga koreksi bias kuantil menjadi fondasi penting agar sinyal perubahan iklim dapat dibedakan secara jelas dari penyimpangan pemrosesan data. Informasi ini diharapkan dapat menjadi rujukan ilmiah dasar bagi pengelola Wilayah Sungai Brantas dalam mengkaji prioritas konservasi lahan, perencanaan pengerukan sedimen, serta penyesuaian panduan operasi waduk di masa depan.

Keterbatasan penelitian

Penafsiran dan pemanfaatan hasil penelitian ini perlu mempertimbangkan beberapa keterbatasan metodologis. Pertama, penggunaan data observasi selama periode referensi tiga tahun (2012–2014) relatif singkat untuk merepresentasikan variabilitas iklim antartahun (interannual variability) dan karakteristik ekor distribusi (distribution tail) curah hujan ekstrem, terutama dalam penerapan Quantile Mapping (QM) berbasis bulan kalender. Kedua, pengisian data kosong menggunakan metode Inverse Distance Weighting (IDW) menghasilkan deret data yang kontinu, tetapi keberadaan data estimasi tetap menimbulkan ketidakpastian pada data acuan observasi. Ketiga, evaluasi kinerja koreksi bias dilakukan pada periode yang sama dengan pembentukan fungsi QM, yaitu 2012–2014, sehingga berpotensi menghasilkan tingkat kesesuaian statistik yang lebih tinggi dibandingkan dengan evaluasi menggunakan data independen (out-of-sample validation). Keempat, proyeksi masa depan hanya mencakup lima model iklim CMIP6 dengan satu skenario emisi tinggi, yaitu SSP5-8.5, sehingga belum merepresentasikan keseluruhan spektrum ketidakpastian proyeksi iklim, termasuk variasi skenario emisi lain dan metode downscaling alternatif. Oleh karena itu, keterbatasan tersebut perlu menjadi pertimbangan bagi praktisi dan peneliti dalam menafsirkan hasil koreksi bias secara proporsional serta menyusun panduan penggunaan dataset untuk kajian dampak hidrologi dan pengelolaan sumber daya air.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengevaluasi kinerja historis lima model iklim NEX-GDDP-CMIP6 dan menyusun proyeksi curah hujan terkoreksi untuk Daerah Tangkapan Air (DTA) Waduk Sutami pada skenario emisi tinggi SSP5-8.5 periode 2025–2050. Rekonstruksi data kosong menggunakan metode Inverse Distance Weighting (IDW) menghasilkan deret data harian yang kontinu sebagai dasar perhitungan curah hujan wilayah. Evaluasi menunjukkan bahwa kelima model cenderung melebihestimasi curah hujan sebelum koreksi, dengan kesesuaian yang lebih baik pada skala bulanan dibandingkan skala harian. Penerapan Quantile Mapping (QM) menurunkan RMSE harian sebesar 16,1%–35,9% dan RMSE bulanan sebesar 48,6%–79,7%. Kinerja terbaik pada skala bulanan diperoleh TaiESM1 dengan korelasi 0,94 dan RMSE 34,57 mm/bulan, sedangkan CMCC-ESM2 menghasilkan RMSE harian terendah sebesar 6,74 mm/hari. Namun, korelasi harian tetap rendah setelah koreksi, yang menunjukkan bahwa QM memperbaiki distribusi statistik curah hujan tanpa memperbaiki kronologi kejadian hujan. Proyeksi ansambel menghasilkan rata-rata curah hujan tahunan sebesar 1.290,93 mm, atau menurun 3,90% dibandingkan periode referensi sebesar 1.343,35 mm. Hasil ini menunjukkan potensi penurunan curah hujan tahunan, dengan variasi proyeksi antarmodel yang tetap perlu diperhitungkan.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan periode observasi yang lebih panjang, idealnya lebih dari sepuluh tahun, serta melakukan validasi independen (out-of-sample validation) untuk menguji kemampuan koreksi bias pada data di luar periode kalibrasi. Evaluasi tambahan terhadap frekuensi hari kering, kuantil curah hujan ekstrem, dan konsistensi sinyal perubahan iklim sebelum serta sesudah koreksi juga diperlukan untuk meningkatkan keandalan proyeksi. Bagi pengelola Wilayah Sungai Brantas dan praktisi sumber daya air, dataset curah hujan terkoreksi dapat dimanfaatkan sebagai masukan untuk analisis neraca air dan pemodelan hidrologi lanjutan. Akan tetapi, penggunaannya perlu mempertimbangkan keterbatasan periode referensi, rendahnya korelasi harian, dan ketidakpastian antarmodel. Pada tingkat kebijakan, hasil proyeksi sebaiknya digunakan melalui pendekatan ansambel multi-model beserta rentang variabilitasnya sebagai dasar perencanaan pengelolaan sumber daya air, evaluasi potensi perubahan ketersediaan air, dan mitigasi risiko sedimentasi Waduk Sutami yang adaptif terhadap perubahan iklim.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung penelitian ini, khususnya penyedia data curah hujan observasi, data iklim NEX-GDDP-CMIP6, serta pihak yang memberikan bimbingan dan masukan selama pelaksanaan penelitian. Dukungan tersebut berkontribusi terhadap penyelesaian penelitian mengenai evaluasi dan koreksi bias curah hujan untuk mendukung pengelolaan sumber daya air di DTA Waduk Sutami.

DAFTAR PUSTAKA

Arif Rafhida, S., Nurdiati, S., Budiarti, R., & Khoirun Najib, M. (2025). Bias correction of CMIP6 rainfall projection for the Lake Toba region, Indonesia, using quantile delta mapping with monthly distribution fitting. *Vietnam Journal of Earth Sciences, 48*(1), 89–112. https://doi.org/10.15625/2615-9783/23833

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development, 9*(5), 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Fidari, J. S., Bisri, M., & Suhartanto, E. (2013). Studi pendugaan sisa usia guna Waduk Sutami dengan pendekatan sedimentasi. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering, 4*(2).

Hidayat, R., & Taufik, M. (2025). Bias correction of CMIP6 models for assessment of wet and dry conditions over Sumatra. *Agromet, 39*(1), 33–39. https://doi.org/10.29244/j.agromet.39.1.33-39

Hidayati, F., Iriawan, N., Kuswanto, H., & Sopaheluwakan, A. (2026). Improving local rainfall projections in Bali through bias correction of CMIP6 data: A contribution to hydro-meteorological disaster mitigation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1607*(1), Article 012045. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1607/1/012045

Hutauruk, R. C. H., Rahmanto, E., Al Habib, A. H., Yoku, P. W., Giriharta, I. W. G., Trilaksono, N. J., & Hadi, T. W. (2025). Evaluation of bias correction method for monthly rainfall prediction of ECMWF SEAS5 in Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika, 25*(2), 103–112. https://doi.org/10.31172/jmg.v25i2.1124

Kurniadi, A., Weller, E., Kim, Y.-H., & Min, S.-K. (2023). Evaluation of Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 model-simulated extreme precipitation over Indonesia. *International Journal of Climatology, 43*(1), 174–196. https://doi.org/10.1002/joc.7744

Kurniadi, A., Firmansyah, Wati, T., Nazarudin, L., Puspita, N. C. I., Fauziyah, A. R., Meisda, D. F., Wicaksono, A., Kadarsah, Hadi, A. S., & Radjab, A. F. (2026). Evaluating NEX-GDDP CMIP6 models for extreme wet and dry events over Indonesia. *International Journal of Climatology, 46*(10), Article e70437. https://doi.org/10.1002/joc.70437

Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development, 12*(7), 3055–3070. https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019

Lehner, F., Nadeem, I., & Formayer, H. (2023). Evaluating skills and issues of quantile-based bias adjustment for climate change scenarios. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography, 9*, 29–43. https://doi.org/10.5194/ascmo-9-29-2023

Maraun, D., Shepherd, T. G., Widmann, M., Zappa, G., Walton, D., Gutierrez, J. M., Hagemann, S., Richter, I., Soares, P. M., Hall, A., & Mearns, L. O. (2017). Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change, 7*(11), 764–773. https://doi.org/10.1038/nclimate3418

Mardwiono, F., Sedyowati, L., & Wibisono, G. (2022). Integrated sediment management as a sustainable effort of reservoir function: A case study on the Sengguruh and Sutami reservoirs. *International Journal of Innovative Science and Research Technology, 7*(2), 492–500. https://doi.org/10.5281/zenodo.6333773

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development, 9*(9), 3461–3482. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016

Padulano, R., Gomez-Mogollon, L. A., Napolitano, L., & Rianna, G. (2025). Quantile-based bias-correction of extreme rainfall: Pros & cons of popular methods for climate signal preservation. *Journal of Hydrology, 653*, Article 132814. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132814

Pimonsree, S., Kamworapan, S., Gheewala, S. H., Thongbhakdi, A., & Prueksakorn, K. (2023). Evaluation of CMIP6 GCMs performance to simulate precipitation over Southeast Asia. *Atmospheric Research, 282*, Article 106522. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106522

Potter, N. J., Chiew, F. H. S., Charles, S. P., Fu, G., Zheng, H., & Zhang, L. (2020). Bias in dynamically downscaled rainfall characteristics for hydroclimatic projections. *Hydrology and Earth System Sciences, 24*, 2963–2979. https://doi.org/10.5194/hess-24-2963-2020

Prasetya, R., Djuhana, D., Saputro, A. H., & Permana, D. S. (2026). Evaluation and ranking of NEX-GDDP-CMIP6 models based on monthly precipitation climatology over Indonesia. *Frontiers in Climate, 8*, Article 1748663. https://doi.org/10.3389/fclim.2026.1748663

Primartono, D. Y., Hidayat, R., Supari, Prasetia, R., & Taufik, M. (2025). A spatially distributed rainfall dataset for West Java, Indonesia. *Data in Brief, 62*, Article 111974. https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111974

Putra, M., Rosid, M. S., & Handoko, D. (2024). A review of rainfall estimation in Indonesia: Data

sources, techniques, and methods. *Signals, 5*(3), 542–561. https://doi.org/10.3390/signals5030030

Rajulapati, C. R., & Papalexiou, S. M. (2023). Precipitation bias correction: A novel semi-parametric quantile mapping method. *Earth and Space Science*. https://doi.org/10.1029/2023EA002823

Rodríguez González, C. A., Rodríguez-Pérez, Á. M., López, R., Hernández-Torres, J. A., & Caparrós-Mancera, J. J. (2023). Sensitivity analysis in mean annual sediment yield modeling with respect to rainfall probability distribution functions. *Land, 12*(1), Article 35. https://doi.org/10.3390/land12010035

Sisinggih, D., Wahyuni, S., Juwono, P. T., & Hidayat, F. (2023). Discharging sediment downstream: The opportunities and challenges of sediment management in Sutami Reservoir, Indonesia. *International Journal of Sustainable Development and Planning, 18*(2), 541–548. https://doi.org/10.18280/ijsdp.180223

Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology, 456–457*, 12–29. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Scientific Data, 9*, Article 262. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4

Zhang, H., Chapman, S., Trancoso, R., Toombs, N., & Syktus, J. (2024). Assessing the impact of bias correction approaches on climate extremes and the climate change signal. *Meteorological Applications, 31*(3), Article e2204. https://doi.org/10.1002/met.2204