

A HYBRID BIAS CORRECTION FRAMEWORK FOR DAILY SATELLITE PRECIPITATION

BENNY ISTANTO



**APPLIED CLIMATOLOGY STUDY PROGRAM
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
BOGOR AGRICULTURAL UNIVERSITY
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

DECLARATION ON THE MASTER'S THESIS AND INFORMATION SOURCES AND COPYRIGHT TRANSFER

I declare that the master's thesis with the title "A Hybrid Bias Correction Framework for Daily Satellite Precipitation" is my work under the direction of the supervisors and has not been submitted in any form to any other university. Sources of information derived from or cited from published or unpublished work by other authors have been mentioned in the text and included in the References at the end of this thesis.

I hereby transfer the copyright of my writing to Bogor Agricultural University.

Bogor, July 2026

Benny Istanto
G2501222008



@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

SUMMARY

BENNY ISTANTO. A Hybrid Bias Correction Framework for Daily Satellite Precipitation. Supervised by RIZALDI BOER and I PUTU SANTIKAYASA.

Daily satellite precipitation underpins flood early warning, drought monitoring, and water-budget analysis, but the Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement Late Run (IMERG-L) carries systematic biases over the Indonesian Maritime Continent. This thesis evaluates a four-stage hybrid bias correction pipeline: Linear Scaling (LS), Empirical Quantile Mapping (EQM) with a Gamma fit, Generalized Pareto Distribution (GPD) tail adjustment, and a station-density-aware Convolutional Neural Network (CNN) refinement, a Deep Learning (DL) architecture, denoted LSEQM+DL. The pipeline is applied to IMERG-L over Indonesia across 2001 to 2025, with gauge validation against 172 out-of-sample stations of Indonesia's Meteorological, Climatological, and Geophysical Agency (BMKG) over 2001 to 2021.

Against the out-of-sample BMKG network, three of the four verification pillars move close to the gauge target. Relative bias drops from -11.4% for the raw Linear-Scaling stage to -0.6% for LSEQM+DL, the standard-deviation ratio moves from 0.71 to 1.00, the Kolmogorov-Smirnov p -value rises from 0.01% to 19.1%, and the ratios at the 95th and 99th percentiles move from 0.74 and 0.71 to 1.05 and 1.01. Event detection shows a designed trade-off: the full pipeline detects fewer light-rain events than the Linear-Scaling stage at and below 10 mm/day but achieves higher critical success at every threshold from 20 mm/day upward, with a 45% Critical Success Index gain at the 50 mm/day threshold (0.091 versus 0.062). The crossover coincides with the internationally standardised very-heavy-precipitation-day threshold of 20 mm/day, the regime in which flood and drought decisions are made.

One diagnostic barely moves. Measured per pixel against the in-sample CPC-UNI target, the Pearson correlation between paired daily values stays near 0.35 across all three corrected stages. It also stays in the narrow band $[0.332, 0.348]$ across all fifteen settings of a Bali sensitivity sweep over the blending weight, the GPD threshold percentile, and the station-density saturation count, none of which was formally optimised. This is the predicted behaviour of marginal bias correction, where rank preservation and variance inflation without time-dependent skill leave the correlation pinned close to that of the raw retrieval.

A separate and distinct effect governs the comparison against the independent BMKG stations, whose daily totals close at the morning observation and carry a date label one day later than the UTC-dated satellite and CPC-UNI archives. The satellite can be matched to that label in two ways: by shifting the date of the daily archive by one day, or by re-aggregating the half-hourly source to a -23 -hour window. Either raises the pooled correlation over the GPM era (2015 to 2021) from $r = 0.20$ to $r = 0.57$, with a per-station median of 0.56. The daily archive alone recovers almost all of the gain, so the half-hourly source is not required. The CPC-UNI calibration correlation carries no such offset and is not improved by the shift. Nor does the



correction itself improve the day-by-day timing once the labels are matched, which places the remaining ceiling in the timing of the raw retrieval rather than in the calendar alone.

The same -23 -hour offset is optimal in all twelve three-month running seasons and all three Indonesian time zones, while the recovered band correlation ranges from 0.55 in the western and central zones (WIB and WITA) to 0.61 in the eastern zone (WIT). The recovery is confined to the GPM era, in which the retrieval resolves the diurnal cycle, so the full-record correlation against BMKG blends this era with the earlier, timing-imprecise era. The window dependence dissolves under monthly aggregation, where the correlation is near 0.80 regardless of window, placing the daily ceiling in the timing of the day-by-day pairing rather than in the rainfall the product captures.

This date-label matching is a single-stage pre-processing change outside the correction pipeline, recoverable from the daily archive alone, and is identified as the most operationally actionable next step. The corrected product is suitable as delivered for applications that depend on the daily distribution, the regime the re-aggregation leaves unchanged.

The pipeline is released as an open, configuration-driven implementation, and its reproducibility is demonstrated by re-executing the headline results on free cloud infrastructure. The correction, verification, validation and visualisation sequence over the Bali subdomain (9×14 grid at 0.1° , 80 land pixels, all 36 dekadal windows of the 2001 to 2025 record) completes in 72.1 minutes on a standard Google Colab Central Processing Unit runtime.

Keywords: daily satellite precipitation, gauge validation, hybrid bias correction, IMERG, reproducibility

RINGKASAN

BENNY ISTANTO. Kerangka Koreksi Bias Hibrida untuk Presipitasi Satelit Harian. Dibimbing oleh RIZALDI BOER dan I PUTU SANTIKAYASA.

Produk presipitasi satelit harian menjadi landasan bagi peringatan dini banjir, pemantauan kekeringan, dan analisis neraca air; namun, *Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement Late Run* (IMERG-L) mengandung bias sistematis di Benua Maritim Indonesia. Penelitian ini mengevaluasi *pipeline* koreksi bias hibrida empat tahap: *Linear Scaling* (LS), *Empirical Quantile Mapping* (EQM) berbasis distribusi Gamma, penyesuaian nilai ekstrem (ekor distribusi) dengan *Generalized Pareto Distribution* (GPD), dan penyempurnaan berbasis *Convolutional Neural Network* (CNN) yang mempertimbangkan kerapatan stasiun, sebuah arsitektur *Deep Learning* (DL), disingkat LSEQM+DL. *Pipeline* diterapkan pada IMERG-L di Indonesia untuk periode 2001 hingga 2025, dan divalidasi untuk periode 2001 hingga 2021 terhadap 172 stasiun Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang tidak digunakan dalam sampel koreksi.

Terhadap jaringan stasiun independen BMKG tersebut, tiga dari empat pilar verifikasi menunjukkan hasil yang semakin mendekati nilai observasi penakar hujan: bias relatif turun dari $-11,4\%$ (LS) menjadi $-0,6\%$ (LSEQM+DL), rasio simpangan baku bergerak dari 0,71 menuju 1,00, nilai- p Kolmogorov-Smirnov naik dari 0,01% menjadi 19,1%, serta rasio persentil ke-95 dan ke-99 bergeser dari 0,74 dan 0,71 menuju 1,05 dan 1,01. Hasil deteksi kejadian menunjukkan adanya *trade-off* yang dirancang dalam sistem: *pipeline* penuh mendeteksi lebih sedikit kejadian hujan ringan (pada dan di bawah 10 mm/hari) dibandingkan dengan tahap *Linear Scaling*, namun mencapai tingkat keberhasilan deteksi yang lebih tinggi pada setiap ambang batas mulai 20 mm/hari ke atas. Terdapat peningkatan *Critical Success Index* sebesar 45% pada ambang 50 mm/hari (0,091 berbanding 0,062). Titik silang ini berimpit dengan ambang hujan sangat lebat 20 mm/hari yang baku secara internasional, yaitu rentang yang menjadi dasar pengambilan keputusan kebencanaan banjir dan kekeringan.

Namun, terdapat satu metrik diagnostik yang nyaris tidak berubah. Diukur per piksel terhadap target kalibrasi CPC-UNI, korelasi Pearson antara nilai harian yang berpasangan tetap berada di sekitar 0,35 pada ketiga tahap terkoreksi. Nilai ini juga bertahan dalam rentang yang sempit $[0,332; 0,348]$ untuk seluruh lima belas konfigurasi uji sensitivitas Bali (bobot pencampuran, ambang GPD, dan saturasi kerapatan stasiun), yang ketiganya belum dioptimalkan secara formal. Hal ini sesuai dengan prediksi perilaku koreksi bias berbasis distribusi marginal: karena koreksi tidak membalik urutan peringkat data, korelasi harian tetap melekat pada ketepatan waktu *retrieval* dari data satelit, terlepas dari keahlian metode koreksinya.

Efek yang berbeda dan terpisah berlaku pada perbandingan terhadap jaringan independen BMKG, yang total hariannya ditutup pada pengamatan pagi dan diberi label tanggal satu hari lebih lambat daripada arsip satelit dan CPC-UNI yang bertanggal UTC. Satelit dapat diselaraskan dengan label tersebut melalui dua cara: menggeser tanggal arsip harian sebesar satu hari, atau mengagregasi ulang sum-

ber setengah-jam ke interval -23 jam. Keduanya menaikkan korelasi gabungan pada era GPM (2015 hingga 2021) dari $r = 0,20$ menjadi $r = 0,57$, dengan median per-stasiun sebesar 0,56. Arsip harian saja sudah memulihkan hampir seluruh peningkatan tersebut, sehingga sumber setengah-jam tidak diperlukan. Korelasi kalibrasi CPC-UNI tidak memiliki pergeseran semacam itu dan tidak membaik oleh penyelarasan ini. Koreksi bias itu sendiri juga tidak memperbaiki ketepatan waktu harian setelah label diselaraskan, sehingga batas yang tersisa terletak pada ketepatan waktu *retrieval* mentah, bukan semata pada penanggalan.

Pergeseran -23 jam yang sama ini merupakan nilai optimal untuk seluruh dua belas musim bergulir tiga-bulanan dan ketiga zona waktu Indonesia, sementara besar korelasi yang berhasil dipulihkan bervariasi dari 0,55 di zona barat dan tengah (WIB dan WITA) hingga 0,61 di zona timur (WIT). Pemulihan ini hanya terbatas pada era GPM, ketika *retrieval* sudah mampu merekam siklus diurnal; oleh karena itu korelasi terhadap BMKG pada keseluruhan periode data sebenarnya merupakan campuran antara era ini dengan era awal yang ketepatan waktunya masih rendah. Ketergantungan terhadap rentang waktu ini hilang pada agregasi bulanan, di mana korelasi mencapai sekitar 0,80 tanpa memandang batasan pengamatan tersebut, sehingga mengonfirmasi bahwa batas korelasi harian sesungguhnya terletak pada pencocokan waktu dari hari ke hari, bukan pada volume curah hujan yang ditangkap oleh produk.

Pencocokan label tanggal ini merupakan satu langkah praproses tunggal di luar *pipeline* koreksi, yang dapat dipulihkan dari arsip harian saja, dan diidentifikasi sebagai langkah lanjutan yang paling dapat ditindaklanjuti secara operasional. Dengan demikian, produk terkoreksi yang dihasilkan sudah sesuai untuk berbagai aplikasi yang bergantung pada distribusi harian, yaitu ranah yang tidak terpengaruh oleh agregasi ulang tersebut.

Pipeline ini dirilis sebagai implementasi terbuka berbasis konfigurasi yang reproduktibilitasnya didemonstrasikan dengan menjalankan ulang hasil utama pada infrastruktur komputasi awan gratis. Tahapan koreksi, verifikasi, validasi, dan visualisasi untuk *subdomain* Bali (9×14 grid pada resolusi $0,1^\circ$, 80 piksel yang berada di daratan, seluruh 36 periode dasarian dari tahun 2001 hingga 2025) berhasil diselesaikan dalam 72,1 menit pada *runtime Central Processing Unit* standar di Google Colab.

Kata kunci: IMERG, koreksi bias hibrida, presipitasi satelit harian, reproduktibilitas, validasi stasiun penakar hujan



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.

© Copyright by IPB, 2026
Copyright protected by Law

It is prohibited to quote part or entire report without mentioning or citing the source. The citation is only for the purposes of education, research, writing scientific papers, compiling reports, writing critiques, reviewing a problem, or public dissemination, and the citation does not inflict harm to IPB.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

Perpustakaan IPB University

A HYBRID BIAS CORRECTION FRAMEWORK FOR DAILY SATELLITE PRECIPITATION

BENNY ISTANTO

Thesis

submitted to the Applied Climatology Study Program
in fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Science

**APPLIED CLIMATOLOGY STUDY PROGRAM
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES
BOGOR AGRICULTURAL UNIVERSITY
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.

External, Non-Supervisory Panel of Examiners in Master's Thesis Exam:

Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.

Thesis title: A Hybrid Bias Correction Framework for Daily Satellite Precipitation

Name: Benny Istanto

Student ID: G2501222008

Approved by

Supervisor 1:
Prof. Dr. Ir. Rizaldi Boer, MS.



Supervisor 2:
Dr. I Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc.

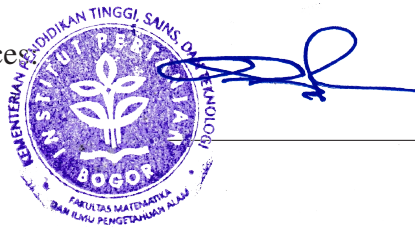


Acknowledged by

Head of Study Program:
Dr. I Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc.
Staff ID. 19790224 200501 1 002



Dean, Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.
Staff ID. 19780723 200701 1 001



Examination date: 20 July 2026

Completion date: _____



@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

ACKNOWLEDGEMENTS

Alhamdulillah, this thesis has been completed.

This thesis grew out of a simple question about the reach of bias correction on a daily satellite precipitation field. Answering it became a study of what statistical correction can and cannot do, together with a small open-source pipeline that anyone can re-run. I hope both the finding and the code prove useful to others working on satellite precipitation, and that they make a modest contribution to science.

I am grateful to Bogor Agricultural University, and to the Applied Climatology Study Program of the Department of Geophysics and Meteorology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, for the education and the opportunity to carry out this work. My deepest thanks go to my supervisors, Prof. Dr. Ir. Rizaldi Boer, MS. and Dr. I Putu Santikayasa, S.Si., M.Sc., for their guidance, patience, and insight throughout this research. I also thank Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom., who served as external examiner. The constructive feedback of all three examiners sharpened the argument and improved the way this study is told. Furthermore, I extend my gratitude to all unnamed individuals who provided direct or indirect assistance throughout the course of this study.

Finally, my heartfelt thanks to my wife Kiki Kartikasari, and daughter Wijanging Ngelmu Dyatmika, for their constant support and patience.

Bogor, July 2026

Benny Istanto



@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

TABLE OF CONTENTS

LIST OF TABLES	xix
LIST OF FIGURES	xix
LIST OF APPENDICES	xx
I INTRODUCTION	1
1.1 Background	1
1.2 Problem Statement	2
1.3 Objectives and Benefits	3
1.4 Scope, Limitations, and Constraint	3
1.5 Contributions	4
1.6 Hypotheses	4
1.7 Thesis Structure	5
II LITERATURE REVIEW	7
2.1 Satellite-derived Daily Precipitation	7
2.2 Bias Dimensions and Verification	10
2.3 Bias Correction Method Families	12
2.4 Theoretical Bounds on Marginal Correction	16
2.5 Maritime Continent Precipitation Context	17
2.6 Reproducible Computational Notebook Workflows in Climate and Earth Observation Analytics	19
III METHODS	21
3.1 Time, Place, and Tools	22
3.2 Study Area and Data	22
3.3 Four-Stage Hybrid Pipeline (LSEQM+DL)	27
3.4 Station-Density-Aware Blending	37
3.5 Validation Framework	40
3.6 Verification Metric Catalogue	41
3.7 Window-Offset Timing Diagnostic	45
3.8 Reproducible Implementation Design	46
IV RESULTS	49
4.1 Agreement Among the Three Datasets	49
4.2 Stage-wise Headline Skill	52
4.3 Stage-wise Attribution	55
4.4 Threshold-Dependent Detection	58
4.5 Pearson Correlation Across Stages	60
4.6 Temporal Alignment and the Optimal Aggregation Window	62
4.7 Spatial Skill Distribution	64
4.8 Per-Station Taylor Diagram Analysis	66
4.9 Temporal Stability Across Dekads	67
4.10 Sensitivity Analyses	69
4.11 Reproducibility Evaluation	71

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.

DISCUSSION	73
5.1 Theoretical Bound on Pearson Correlation	73
5.2 Interpreting the Optimal Aggregation Window	78
5.3 Operational Implications	84
5.4 Reproducibility Implications	86
5.5 Paths Forward	89
5.6 Limitations and Constraints	92
CONCLUSION	95
6.1 Summary of Findings	95
6.2 Implications	96
6.3 Recommendations	97
REFERENCES	99
APPENDICES	107
A Glossary	108
B Data Catalogue	108
2.1 Datasets	108
2.2 BMKG validation network: 180 to 172	109
2.3 Sentinel handling	109
C Configuration Template	110
D Code and Data Availability	110
E Reproducibility Checklist	111
F Selected Per-Station Verification	112
G Spatial Atlas	114
H Supplementary Temporal-Alignment Diagnostics	118

LIST OF TABLES

2.1	Daily gridded precipitation products commonly used for tropical hydrological and operational applications	9
2.2	Strengths and weaknesses of bias correction methods considered for daily precipitation	13
4.1	Daily correlation against BMKG under two date labels	52
4.2	Stage-wise skill against 172 independent BMKG stations	53
4.3	In-sample skill against the CPC-UNI calibration target	53
4.4	Daily correlation against CPC-UNI across the domain	61
4.5	Daily versus monthly correlation under two aggregation windows	64
4.6	Bali sensitivity sweep over the three configuration parameters	70
4.7	Measured runtime of the LSEQM+DL pipeline on Google Colab	71
5.1	Convention-dependence of the daily satellite-gauge correlation	80
5.2	Application classes for corrected IMERG-L over Indonesia	85
5.3	Four paths for raising the temporal-skill ceiling beyond $r \approx 0.35$	90
F.1	Per-station Taylor statistics for the four Bali BMKG stations	113

LIST OF FIGURES

3.1	Research framework of the study	21
3.2	Study-area data coverage over Indonesia	24
3.3	Conceptual workflow of the LSEQM+DL hybrid bias correction framework	28
3.4	Execution flowchart of the LSEQM+DL pipeline	29
3.5	Bias-correction spatial disaggregation of the CPC reference parameters from 0.5 to 0.1 degree	31
3.6	Stage 4 architecture: CNN forward pass, alpha-blending, and station-density confidence mask	36
3.7	Illustrative effect of the LSEQM+DL pipeline stages applied to a synthetic 60-day daily-precipitation sample	38
3.8	Why a –23 h window aligns the satellite with the BMKG gauge day	45
3.9	Reproducible implementation architecture of the LSEQM+DL framework	48
4.1	Stage-wise skill at 172 BMKG stations for four representative metrics	55
4.2	CNN refinement footprint by year	57
4.3	Threshold-stratified verification at the 172 BMKG station locations	59
4.4	What does and does not improve under marginal bias correction	60
4.5	Spatial distribution of the CPC-UNI daily correlation	62



4.6	Window-offset correlation recovery by satellite era	63
4.7	CQI maps for the three correction stages	65
4.8	Station-level Taylor diagram of BMKG validation by season	67
4.9	Monthly temporal stability of four representative metrics across the three correction stages	68
5.1	The theoretical bound on Pearson r under marginal correction	74
5.2	Monthly Taylor diagram aggregated across the BMKG validation stations	77
5.3	The calendar-window convention conflict and its resolution	79
5.4	Gridded window offset against CPC-UNI over the full record	81
5.5	Why the window recovery is confined to the GPM era	82
5.6	Station-density confidence mask	88
E.1	The Bali reproducibility subdomain	112
F.1	Sampling stability of the per-station window correlation	114
G.1	Difference maps locating the correction residual	115
G.2	Three-day daily contrast across products	116
G.3	Per-pillar climatological metric maps across correction stages	116
G.4	Six-product comparison for 1 January 2025	117
G.5	Station-overlay maps for dekad-1-January climatology	117
G.6	CQI change and continuous quality for LSEQM+DL	118
H.1	Gridded window offset against CPC-UNI, TRMM-input era	119
H.2	Gridded window offset against CPC-UNI, GPM era	120
H.3	GPM-era window-offset correlation and seasonal stability	121
H.4	Per-station optimal window offset and correlation lift	122

LIST OF APPENDICES

Appendix A	Glossary	108
Appendix B	Data Catalogue	108
Appendix C	Configuration Template	110
Appendix D	Code and Data Availability	110
Appendix E	Reproducibility Checklist	111
Appendix F	Selected Per-Station Verification	112
Appendix G	Spatial Atlas	114
Appendix H	Supplementary Temporal-Alignment Diagnostics	118