

**UJI AKURASI MODEL WRF BERDASARKAN DATA GFS DAN ERA5
DENGAN TEKNIK ENSEMBLE DALAM PREDIKSI
CURAH HUJAN DI ITERA**

SKRIPSI

Andreas Boni Baik Simamora

121290057



**PROGRAM STUDI SAINS ATMOSFER DAN KEPLANETAN
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA
LAMPUNG SELATAN**

2025

**UJI AKURASI MODEL WRF BERDASARKAN DATA GFS DAN ERA5
DENGAN TEKNIK ENSEMBLE DALAM PREDIKSI
CURAH HUJAN DI ITERA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

Andreas Boni Baik Simamora

121290057



**PROGRAM STUDI SAINS ATMOSFER DAN KEPLANETAN
FAKULTAS SAINS
INSTITUT TEKNOLOGI SUMATERA
LAMPUNG SELATAN**

2025

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir Sarjana dengan judul "Uji Akurasi Model WRF Berdasarkan Data GFS dan ERA5 dengan Teknik *Ensemble* dalam Prediksi Curah Hujan di ITERA" adalah benar dibuat oleh saya sendiri dan belum pernah dibuat dan diserahkan sebelumnya, baik sebagian ataupun seluruhnya, baik oleh saya sendiri ataupun orang lain, baik di Institut Teknologi Sumatera maupun di institusi pendidikan lainnya.

Lampung Selatan, 23 Agustus 2025

Penulis

Andreas Boni Baik Simamora
NIM. 121290057

Diperiksa dan disetujui oleh,

Pembimbing I

Pembimbing II

Alvin Pratama, S.Si., M.T.
NIP 199309212022031005

Ridlo Wahyudi Wibowo, S.Si., M.Si., M.Sc.
NIP 199007252022031002

Disahkan oleh,
Koordinator Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan
Fakultas Sains
Institut Teknologi Sumatera

Hendra Agus Prastyo, S.Si., M.Si.
NIP 199408182022031013

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah karya saya sendiri dan semua sumber baik yang dikutip
maupun yang dirujuk telah saya nyatakan benar.**

Nama : Andreas Boni Baik Simamora

NIM : 121290057

Tanda tangan :

Tanggal : 23 Agustus 2025

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Institut Teknologi Sumatera, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andreas Boni Baik Simamora
NIM : 121290057
Program Studi : Sains Atmosfer dan Keplanetan
Fakultas : Sains
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-Exclusive Royalty Free Right*) kepada Institut Teknologi Sumatera atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Uji Akurasi Model WRF Berdasarkan Data GFS dan ERA5 dengan Teknik *Ensemble* dalam Prediksi Curah Hujan di ITERA

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Institut Teknologi Sumatera berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Lampung Selatan
Pada tanggal : 23 Agustus 2025

Yang menyatakan (Andreas Boni Baik Simamora)

ABSTRAK

Uji Akurasi Model WRF Berdasarkan Data GFS dan ERA5 dengan Teknik *Ensemble* dalam Prediksi Curah Hujan di ITERA

Andreas Boni Baik Simamora (121290057)

Pembimbing I: Alvin Pratama, S.Si., M.T.

Pembimbing II: Ridlo Wahyudi Wibowo, S.Si., M.Si., M.Sc.

Curah hujan merupakan elemen kunci dinamika atmosfer yang memengaruhi kehidupan sosial-ekonomi, khususnya di wilayah tropis yang rawan bencana hidrometeorologi. Prediksi curah hujan diperlukan, namun model cuaca global beresolusi kasar sehingga kurang sesuai untuk kajian lokal. Permasalahan ini diatasi dengan teknik downscaling menggunakan WRF, yang akurasinya sangat dipengaruhi pemilihan data masukan. Data awal dan batas atmosfer yang tidak tepat dapat menimbulkan deviasi besar terhadap observasi, terutama di wilayah tropis dengan dinamika konvektif kompleks. Penelitian ini mengevaluasi performa WRF dalam memprediksi curah hujan di ITERA dengan membandingkan dua data masukan global yaitu GFS-FNL dan ERA5. Sepuluh kombinasi skema parameterisasi fisis digunakan, dan dua metode koreksi bias yaitu Linear Scaling (LS) dan Quantile Mapping (QM). LS lebih unggul dengan korelasi rata-rata 0,365 (WRF-GFS) dan 0,399 (WRF-ERA5) serta RMSE 25,95 mm dan 25,10 mm. Model terbaik berdasarkan RMSE digunakan untuk membangun tiga ensemble yaitu rata-rata sederhana, berbobot korelasi-RMSE (Ensemble 2), dan berbobot POD-FAR (Ensemble 3). Model tunggal terbaik adalah WRF-ERA5 Member 9 ($r = 0,91$; RMSE = 21,23 mm), sedangkan CSI tertinggi (0,60) dicapai Ensemble 3 WRF-ERA5. Uji ROC menunjukkan AUC 0,660–0,676 (kategori sedang). WRF-GFS lebih optimal untuk hujan ringan (<10 mm), sedangkan WRF-ERA5 unggul pada intensitas sedang-tinggi (>10 mm). Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa pendekatan ensemble dan koreksi bias meningkatkan keandalan prediksi WRF di wilayah tropis. Kombinasi parameterisasi mikrofisik WSM6 dan konveksi Kain-Fritsch konsisten memberikan hasil terbaik. Pendekatan ini juga dapat diterapkan pada kajian prediksi hidrometeorologi di wilayah lain, terutama yang memiliki karakteristik hujan konvektif serupa. Perbedaan respons model terhadap jenis data masukan menunjukkan pentingnya pemilihan data awal yang sesuai dengan karakteristik wilayah. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan pengembangan prediksi curah hujan berbasis WRF di daerah tropis lainnya.

Kata kunci: WRF, Curah Hujan, Koreksi Bias, Ensemble, Model Cuaca Global

ABSTRACT

Accuracy Evaluation of the WRF Model Based on GFS and ERA5 Data Using The Ensemble Technique for Rainfall Prediction at ITERA

Andreas Boni Baik Simamora (121290057)

Advisor I : Alvin Pratama, S.Si., M.T.

Advisor II: Ridlo Wahyudi Wibowo, S.Si., M.Si., M.Sc.

Rainfall is a key element of atmospheric dynamics that influences socio-economic conditions, especially in tropical regions that are prone to hydrometeorological disasters. Rainfall prediction is essential, but global weather models have coarse resolution so they are less suitable for local studies. This limitation can be solved by using downscaling techniques with the Weather Research and Forecasting (WRF) model, whose accuracy is strongly affected by the selection of input data. Inappropriate initial and boundary conditions can cause large deviations from observations, particularly in tropical regions with complex convective dynamics. This study evaluates the performance of the WRF model in predicting rainfall in the ITERA area by comparing two global input data, GFS FNL and ERA5. Ten combinations of physical parameterization schemes were used, and two bias correction methods, Linear Scaling (LS) and Quantile Mapping (QM), were applied. LS performed better, with an average correlation of 0.365 for WRF GFS and 0.399 for WRF ERA5, and RMSE values of 25.95 mm and 25.10 mm. The best models based on RMSE were used to build three ensemble models, namely simple average, correlation RMSE weighted (Ensemble 2), and POD FAR weighted (Ensemble 3). The best single model was WRF ERA5 Member 9 with r 0.91 and RMSE 21.23 mm, while the highest CSI 0.60 was obtained by Ensemble 3 WRF ERA5. ROC test showed AUC values between 0.660 and 0.676, which is in the moderate category. WRF GFS was better for light rainfall less than 10 mm, while WRF ERA5 was better for moderate to high rainfall more than 10 mm. The results indicate that ensemble and bias correction approaches improve the reliability of WRF rainfall prediction in tropical regions. The combination of WSM6 micro-physics and Kain Fritsch convection schemes consistently gave the best results and is recommended for further research in Lampung and surrounding areas. The different responses of the models to the type of input data show the importance of selecting initial and boundary data that match the regional characteristics. This study can be used as a reference for developing WRF based rainfall prediction in other tropical regions.

Keywords : WRF, Rainfall, Bias Correction, Ensemble, Global Numerical Weather Prediction Model.

MOTTO

Imagine and Improve.

HALAMAN PERSEMPAHAN

*Teruntuk Ayahku yang telah beristirahat,
dan ibuku yang telah mengusahakan segalanya
di Pematangsiantar, kotaku tercinta.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas kasih karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini dibuat untuk menyelesaikan pendidikan jenjang sarjana pada Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sumatera. Penyusunan skripsi ini banyak mendapat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak sehingga dalam kesempatan ini, dengan penuh kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus, atas hikmat, kekuatan, dan berkat-Nya yang tak berkesudahan. Penulis sadar bisa mencapai titik saat ini tidak terlepas dari kasih karunia serta belas kasih-Nya kepada penulis.
2. Ayah yang telah beristirahat, yang semasa hidupnya sungguh-sungguh menyayangi dan memotivasi penulis agar tumbuh menjadi pribadi yang lebih baik dari dirinya sendiri. Penulis percaya bahwa ayah selalu berada disekitar penulis untuk selalu mendampingi selama masa studi hingga penulisan naskah skripsi ini selesai.
3. Ibu tercinta, yang menjadi dasar semangat penulis selama masa studi hingga penulisan naskah ini selesai. Penulis sadar bahwa ucapan terimakasih semata tidak akan sebanding dengan apa yang telah dilakukan dan diusahakan oleh ibu hingga penulis bisa sampai pada titik sekarang ini. Penulis akan selamanya berterimakasih pada Yang Maha Kuasa karena telah dikaruniai ibu sekuat dan setangguh ibu yang penulis miliki saat ini.
4. Bapak Alvin Pratama, S.Si., M.T. selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing penulis sejak awal penyusunan skripsi ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih atas berbagai kesempatan yang telah diberikan di luar kegiatan akademik, seperti keterlibatan dalam penelitian, proyek, dan kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Pengalaman tersebut menjadi ilmu yang sangat berharga dan akan dimanfaatkan sebaik-baiknya oleh penulis.
5. Bapak Ridlo Wahyudi Wibowo, S.Si., M.Si., M.Sc. selaku dosen pembimbing II selama masa Tugas Akhir. Penulis menyampaikan terima kasih kepada bapak Ridlo atas dedikasi, bimbingan, hingga waktu yang telah dikerahkan pada penulis hingga naskah skripsi ini dapat mencapai versi yang lebih baiknya lagi.
6. Dosen pengujii penulis selama masa Tugas Akhir berlangsung, yaitu Ibu Wirid Birastri, S.Si., M.Si. dan Bapak M. Isnaenda Ikhsan, S.Si., M.Si.. Penulis berterima kasih karena telah dipertemukan dengan kedua dosen pengujii ini karena telah memberikan arahan sebaik-baiknya sehingga penulisan naskah skripsi ini

dapat menjadi lebih baik lagi.

7. Dosen Wali penulis selama masa perkuliahan, Bapak Alka Budi Wahidin, S.Si., M.Si. yang telah melakukan peran walinya terhadap penulis dengan sebaik-baiknya. Penulis akan selalu berterima kasih karena telah dipertemukan dengan dosen wali seperti pak Alka.
 8. Saudara-saudara penulis, mulai dari kakak Sarah Simamora, S.Pd. yang selalu memotivasi penulis melalui kata-katanya yang bijaksana, dan adik-adik penulis, yaitu Yordan Simamora yang membantu banyak hal selama masa perkuliahan penulis, Brusly Simamora dan Dini Angelita Simamora yang merupakan dua anak terakhir di keluarga penulis yang keduanya selalu menjadi penghibur dan penyemangat bagi penulis selama masa studi.
 9. Sahabat jauh yang mengambil peran layaknya saudara, Diaz Narwastu Pardede. Satu-satunya teman yang berada di samping penulis saat penulis menyentuh titik terendah hidupnya. Penulis ingin menyampaikan terima kasih dan semoga persahabatan ini dapat hidup terus selamanya.
 10. Teman-teman yang pernah terlibat selama masa studi penulis, mulai dari teman bertukar pikiran, teman dalam menikmati waktu luang, teman dalam proses akademik, hingga teman yang menyangkut hal asmara. Penulis berterimakasih atas warna yang dihadirkan oleh teman-teman semasa perkuliahan penulis.
 11. Saudara yang selama perkuliahan turut serta menyambangi kehidupan penulis dalam hal akademik hingga non-akademik; Alekson Purba, Elisabeth Hutahaean, dan Mesianna Oktavia Simanjuntak. Tiga orang yang merangkul penulis, terkhususnya selama berlayar di Program Studi. Sifat murni penulis yang cenderung tertutup berhasil dirangkul oleh ketiga orang ini, yang pada dasarnya sudah dianggap sebagai saudara sendiri oleh penulis.
- Penulis menyadari bahwa penyusunan Skripsi ini jauh dari sempurna. Akhir kata penulis mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kekeliruan di dalam penulisan skripsi ini.

Lampung Selatan, 23 Agustus 2025

Andreas Boni Baik Simamora

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	1
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMPAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Curah Hujan	5
2.2 Prediksi Cuaca Numerik (<i>Numerical Weather Prediction</i>)	5
2.3 Model WRF (<i>Weather Research Forecasting</i>)	8
2.4 Parameterisasi WRF	9
2.5 Model Cuaca Global	12
2.5.1 ECMWF (<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>)	12
2.5.2 GFS (<i>Global Forecast System</i>)	13

III METODE PENELITIAN	14
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	14
3.2 Data Penelitian	16
3.3 Tahapan Penelitian	17
3.3.1 Pengumpulan Data	17
3.3.2 Konfigurasi Model WRF	17
3.3.3 Koreksi Bias	18
3.3.4 Teknik <i>Ensemble</i>	20
3.3.5 Uji Verifikasi Model Berdasarkan Intensitas Hujan	22
3.3.6 Uji Verifikasi Model Berdasarkan Kejadian Hujan	24
3.3.7 ROC (<i>Receiver Operating Characteristic Curve</i>)	25
3.4 Diagram Alir	27
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Hasil Koreksi Bias	28
4.2 Verifikasi Intensitas Hujan Model Terhadap Observasi	30
4.2.1 Model WRF-ERA5	30
4.2.2 Model WRF-GFS	33
4.3 Verifikasi Kejadian Hujan Model Terhadap Observasi	34
4.4 ROC (<i>Receiver Operating Characteristic</i>)	36
V KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tahapan umum Model WRF	9
Gambar 3.1	Topografi dan Titik Stasiun Cuaca Provinsi Lampung	14
Gambar 3.2	Akumulasi Curah Hujan Bulanan Di ITERA	15
Gambar 3.3	Akumulasi Curah Hujan Harian (Januari 2020) Di ITERA . .	15
Gambar 3.4	Domain Model Penelitian	17
Gambar 3.5	Contoh Diagram Taylor	24
Gambar 3.6	Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 4.1	Nilai Korelasi Setelah Bias Koreksi (a) WRF-ERA5 (b) WRF-GFS	28
Gambar 4.2	Nilai RMSE Setelah Bias Koreksi (a) WRF-ERA5 (b) WRF-GFS	29
Gambar 4.3	Diagram Taylor Uji Verifikasi Model WRF-ERA5	31
Gambar 4.4	Diagram Taylor Uji Verifikasi Model WRF-GFS	33
Gambar 4.5	Uji Kejadian Hujan (<i>Hit, Miss, False Alarm</i>) (a) WRF-ERA5 (b) WRF-GFS	35
Gambar 4.6	Grafik ROC Model-model <i>ensemble</i> (a)WRF-ERA5 (b) WRF-GFS	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi Curah Hujan menurut BMKG [8]	5
Tabel 3.1	Skema Parameterisasi Model Penelitian	18
Tabel 3.2	Kategori Hubungan Variabel Berdasarkan Koefisien Korelasi)	23
Tabel 3.3	Tabel kontingensi	24
Tabel 4.1	Nilai rata-rata korelasi dan RMSE antar metode koreksi bias .	30
Tabel 4.2	Model Tunggal WRF-ERA5 Terbaik Berdasarkan Nilai RMSE	31
Tabel 4.3	Bobot k model-model terbaik pada WRF-ERA5	32
Tabel 4.4	Model Tunggal WRF-GFS Terbaik Berdasarkan Nilai RMSE	34
Tabel 4.5	Bobot k model-model terbaik pada WRF-GFS	34
Tabel 4.6	Bobot l model-model terbaik pada WRF-GFS dan WRF-ECMWF	36

DAFTAR SINGKATAN

A

API	Application Programming Interface
AR	Autoregression
ARW	Advanced Research WRF
AUC	Area Under Curve
AWS	Automatic Weather Station

B

B-M-J	Betts-Miller Janjic
BMKG	Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
BNPB	Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BT	Bujur Timur

C

CAPE	Convective Available Potential Energy
CDF	Cumulative Distribution Function
CDS	Climate Data Store
CFS	Climate Forecast System
CSI	Critical Success Index

E

ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Prediction
ERA5	ECWMF Reanalysis 5

F

FAR	False Alarm Ratio
FBI	Frequency Bias Index
FNL	Final Analysis
FPR	False Positive Rate

G

GDAS	Global Data Assimilation System
GFS	Global Forecast System
GRIB2	General Regularly-Distributed Information in Binary-Form V2

I

IFS	Integrated Forecast System
ITERA	Institut Teknologi Sumatera

K

K-F	Kain Fritsch
-----	--------------

L

LS	Linear Scaling
----	----------------

M

MAE	Mean Absolute Error
MKG	Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
MM5	Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
MYJ	Mellor-Yamada-Janjic
MYNN	Mellor–Yamada–Nakanishi–Niino

N

NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers For Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOAH	Land Surface Model (Noah Land Surface Model)
NWP	Numerical Weather Prediction

O

OSF	Open Science Framework
-----	------------------------

P

PBL	Planetary Boundary Layer
POD	Probability of Detection
POFD	Probability of False Detection

Q

QM	Quantile Mapping
QNSE	Quasi-Normal Scale Elimination

R

RMSE	Root Mean Square Error
ROC	Receiver Operating Characteristic
RRTM	Rapid Radiative Transfer Model

T

TPR	True Positive Rate
TS	Threat Score

U

UPT	Unit Pelaksana Teknis
UTC	Coordinated Universal Time

W

WIB	Waktu Indonesia Barat
WPS	WRF Preprocessing System
WRF	Weather Research Forecast
WSM	WRF Single-Moment (3-5-6)-Class Microphysics

Y

YSU	Yonsei University Scheme
-----	--------------------------

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Curah hujan merupakan salah satu parameter cuaca yang sering memicu terjadinya bencana khususnya bencana hidrometeorologi seperti banjir, jika terjadi dalam intensitas yang tinggi. Intensitas curah hujan adalah tinggi air yang terukur ketika jatuh diatas permukaan tanah pada kurun waktu jam atau hari [1]. Berdasarkan data BNPB tahun 2020, seluas 3781,12 hektar atau 20,58% luas Kota Bandar Lampung memiliki risiko bencana banjir yang tinggi. Kelurahan Rajabasa Jaya yang memiliki luas sebesar 190,20 hektar menjadi daerah yang memiliki risiko terjadi banjir paling tinggi di Kota Bandar Lampung [2].

Dalam upaya mengurangi dampak dari bencana hidrometeorologi yang umumnya disebabkan oleh curah hujan, informasi mengenai prakiraan cuaca menjadi salah satu hal yang dibutuhkan, terkhususnya pada kota Bandar Lampung yang merupakan lokasi Institut Teknologi Sumatera berada. Prakiraan cuaca sendiri merupakan suatu usaha dalam memperkirakan keadaan atmosfer bumi pada masa yang akan datang di wilayah tertentu. Namun, wilayah Indonesia yang merupakan lokasi kota Bandar Lampung berada, memiliki karakteristik cuaca yang kompleks akibat pengaruh interaksi topografi, atmosfer, dan kondisi laut yang sangat dinamis. Oleh sebab itu, model prediksi WRF digunakan karena memungkinkan pengguna untuk memilih skema parameterisasi yang dianggap paling cocok untuk tiap daerah [3].

Beberapa studi telah mengevaluasi kemampuan WRF dalam mensimulasikan parameter meteorologi selama peristiwa cuaca ekstrem. Misalnya, penelitian oleh Kumar dkk. (2023) menunjukkan bahwa WRF mampu memprediksi parameter cuaca penting dengan akurasi yang lebih baik melalui *downscaling* produk *numerical weather prediction* regional ke resolusi 1 km. Simulasi dengan resolusi 1 km menggunakan skema MYNN menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8 dan *root mean square error* (RMSE) sebesar 3,32 °C, sedangkan pada resolusi 4 km, nilai R^2 menurun menjadi 0,77 dan RMSE meningkat menjadi 3,49 °C. Performa menurun lebih signifikan pada skema YSU, di mana R^2 hanya mencapai 0,53 dan RMSE meningkat hingga 5,98 °C di resolusi 4 km [4].

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk mengevaluasi performa model WRF dalam melakukan prediksi curah hujan di ITERA dengan membandingkan dua produk data masukan sebagai *initial condition* pada model. Penggunaan dua data masukan

pada model ditujukan untuk melihat data masukan yang paling baik, terkhusus untuk parameter curah hujan di area ITERA. Dengan menggabungkan beberapa simulasi dengan variasi skema parameterisasi fisik, teknik *ensemble* akan diterapkan dalam membangun model baru yang diharapkan dapat mengurangi rentang ketidakpastian (*uncertainty range*) dan meningkatkan keandalan prediksi.

Penelitian terdahulu terkait penggunaan *ensemble* untuk hasil luaran model WRF pernah dilakukan oleh Gallus dkk. (2013) yang menunjukkan bahwa penggunaan *ensemble* dalam WRF dapat meningkatkan akurasi prediksi kecepatan angin pada ketinggian turbin angin. *Ensemble* final penelitian oleh Gallus ini menggabungkan skema PBL YSU, Pleim, dan MYJ dengan inisialisasi waktu yang bervariasi menghasilkan MAE (Mean Absolute Error) terendah sebesar 1,52 m/s setelah koreksi bias, dibandingkan dengan MAE 1,67 m/s sebelum koreksi [5]

1.2 Rumusan Masalah

Tingkat akurasi model WRF (*Weather Research and Forecasting*) yang pada dasarnya bergantung pada konfigurasi parameterisasi fisis menimbulkan ketidakpastian hasil [5]. Salah satu pendekatan yang banyak diterapkan untuk meningkatkan akurasi prediksi adalah teknik *Ensemble*, yang menggabungkan berbagai simulasi untuk mengurangi ketidakpastian hasil.

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian tugas akhir ini:

1. Bagaimana performa model WRF dalam memprediksi curah hujan di ITERA berdasarkan data masukan GFS dan ERA5 serta variasi konfigurasi skema parameterisasi fisik?
2. Parameterisasi apa yang paling menonjol jika dijalankan pada dua data masukan yang berbeda?
3. Metode koreksi bias apa yang paling efektif dalam meningkatkan akurasi model WRF sebelum dibangun model ensemble?
4. Sejauh mana penerapan teknik ensemble dapat meningkatkan akurasi prediksi curah hujan model WRF di ITERA?
5. Bagaimana kecenderungan antara WRF-GFS dengan WRF-ERA5 yang bisa disimpulkan dari hasil pengujian?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yang juga menjadi dasar dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis performa model WRF dalam memprediksi curah hujan di wilayah ITERA, berdasarkan variasi konfigurasi parameterisasi fisis dan perbandingan dua jenis data masukan.
2. Mengidentifikasi opsi parameterisasi fisis yang paling menonjol ketika diajukan pada masing-masing jenis data masukan, untuk mengetahui skema yang paling sesuai digunakan pada wilayah studi.
3. Mengevaluasi efektivitas metode koreksi bias dan teknik *ensemble* dalam meningkatkan kesesuaian model terhadap data observasi.
4. Menganalisis kecenderungan karakteristik hasil prediksi antara model WRF berbasis GFS dan model WRF berbasis ERA5, berdasarkan hasil pengujian statistik dan verifikasi kejadian hujan.

1.4 Batasan Masalah

Setiap masalah dan penelitian yang diangkat selalu memiliki batasan. Ada batasan, asumsi, atau kriteria yang menjadi pembatas atas masalah yang diangkat dalam penelitian TA, sehingga arah penelitian dapat fokus. Batasan ini perlu dituliskan secara tegas, dan dapat saja memuat lebih dari satu.

Adapun ruang lingkup dalam penelitian tugas akhir ini antara lain:

1. Model yang digunakan dalam penelitian ini hanya menggunakan model WRF dengan berbagai skema parameterisasi fisis serta penerapan 3 teknik *ensemble*.
2. Metode koreksi bias yang akan dibandingkan dan diterapkan adalah *Linear Scaling* dan *Quantile Mapping*.
3. Periode simulasi model akan difokuskan pada 22 – 27 Januari 2025.
4. Data kondisi awal sebagai masukan model akan menggunakan dua data, yaitu data GFS-FNL dan ERA5 dengan langkah waktu per 6 jam.
5. Data observasi yang digunakan untuk validasi model akan diambil dari AWS BMKG yang berada di Taman Alat Institut Teknologi Sumatera.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif bagi kemajuan pengetahuan dalam segala studi yang berkaitan.

Manfaat yang diharapkan dapat diberikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah pemahaman tentang kemampuan model WRF berdasarkan dua data masukan berbeda dalam memprediksi curah hujan.
2. Memberi pengetahuan tentang hasil akurasi model setelah teknik *ensemble* di terapkan, karena metode ini dapat digunakan untuk berbagai model prediksi selain WRF.
3. Dapat dijadikan bahan pertimbangan untuk penulis lain apabila ingin melakukan penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Skripsi ini tersusun atas beberapa bab, yaitu:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, batasan, tujuan, manfaat, keaslian penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan teori-teori dan penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan dan dasar dalam penelitian.

BAB III : METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian meliputi langkah kerja, pertanyaan penelitian, alat dan bahan, serta tahapan dan alur penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan hasil penelitian dan pembahasannya.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini ditulis kesimpulan akhir dari penelitian dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

LAMPIRAN

Bagian lampiran berisikan data mentah, kode, grafik-grafik yang mendukung hasil tetapi tidak dicantumkan di Bab III dan Bab IV.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Curah Hujan

Curah hujan mengacu pada jumlah air yang mencapai permukaan bumi dalam bentuk cair seperti hujan atau dalam bentuk padat seperti salju dan hujan es, yang diukur dalam satuan milimeter (mm). Proses terjadinya dimulai ketika udara yang mengandung uap air naik ke atmosfer, mendingin, dan mencapai kondisi jenuh [6]. Kondensasi uap air membentuk tetesan kecil yang bergabung menjadi tetesan lebih besar. Saat tetesan tersebut cukup berat untuk melawan gaya apung udara, mereka jatuh ke permukaan bumi sebagai hujan [7].

Curah hujan diklasifikasikan berdasarkan intensitasnya untuk mempermudah analisis dan interpretasi data meteorologi. Menurut Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), curah hujan dikelompokkan ke dalam beberapa kategori berdasarkan jumlah presipitasi yang terjadi dalam satu periode waktu tertentu. Klasifikasi curah hujan menurut BMKG dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Klasifikasi Curah Hujan menurut BMKG [8]

Klasifikasi Hujan	Curah Hujan per jam	Curah Hujan per hari
Sangat Ringan	< 1 mm	< 5 mm
Ringan	1–5 mm	5–20 mm
Sedang	5–10 mm	21–50 mm
Lebat	10–20 mm	51–100 mm
Sangat Lebat	> 20 mm	> 100 mm

Curah hujan yang berlebihan dapat menimbulkan bencana seperti banjir dan tanah longsor, sementara curah hujan yang terlalu sedikit dapat menyebabkan kekeringan. Oleh karena itu, penting halnya untuk memperoleh data curah hujan yang akurat dalam memahami pola curah hujan yang dapat dimanfaatkan sebagai informasi dalam berbagai bidang seperti prediksi kondisi cuaca ekstrem, serta pengelolaan sumber daya air [9].

2.2 Prediksi Cuaca Numerik (*Numerical Weather Prediction*)

NWP (*Numerical Weather Prediction*) merupakan kumpulan dari sistem persamaan matematis yang digunakan untuk menggambarkan sifat-sifat fisis dan proses-proses

yang ada di atmosfer. Aspek yang memengaruhi model cuaca numerik terdiri dari hukum fisika berupa persamaan prognostik (fungsi waktu), kondisi awal dan batas (*initial value and boundary condition*), sistem koordinat, resolusi model, serta parameterisasi [10]. Melalui proses ini, NWP dapat memberikan prediksi tentang berbagai parameter meteorologi, seperti suhu, kelembapan, tekanan, dan kecepatan angin [11]. Berikut persamaan-persamaan pengatur dasar untuk membangun model NWP dalam upaya merepresentasikan dinamika atmosfer:

A. Persamaan Momentum

Persamaan momentum menggambarkan dinamika pergerakan angin di atmosfer, baik secara horizontal maupun vertikal. Dasar dari persamaan ini adalah hukum kedua Newton yang menyatakan bahwa percepatan suatu massa dihasilkan oleh gaya yang bekerja padanya.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + fv - g \frac{\partial z}{\partial x} + Fx \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - fu - g \frac{\partial z}{\partial y} + Fy \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + Fz \quad (2.3)$$

B. Persamaan Energi Termodinamika

Persamaan energi termodinamika mempertimbangkan pengaruh dari proses diabatik dan adiabatik. Proses diabatik terjadi ketika permukaan Bumi menyerap radiasi Matahari dan memancarkan kembali dalam bentuk panas sensible. Panas ini menghangatkan udara di sekitar permukaan, tetapi tidak menyebabkan perpindahan udara secara vertikal. Sementara itu, proses adiabatik berlangsung ketika permukaan Bumi memanaskan udara melalui pelepasan panas latent akibat radiasi Matahari. Panas latent ini menyebabkan massa udara menjadi lebih ringan, sehingga memungkinkan pergerakan vertikal naik atau turun, serta memungkinkan perubahan fase dari uap air yang terbawa [12].

$$\frac{dT}{dt} = -\vec{V} \cdot \nabla T + (\gamma - \gamma_0)w + \frac{1}{C_p} \frac{dQ}{dt} \quad (2.4)$$

C. Persamaan Kekekalan Massa

Persamaan kekekalan massa menggambarkan prinsip dasar bahwa massa udara tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan selama proses pergerakan fluida berlangsung. Artinya, perubahan massa udara dalam suatu volume tertentu hanya

dapat terjadi akibat adanya aliran masuk atau keluar dari volume tersebut.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.5)$$

D. Persamaan Kontinuitas Uap Air

Persamaan kontinuitas uap air menjelaskan bagaimana kandungan uap air dalam atmosfer berubah akibat proses transportasi atau hilangnya kelembapan. Uap air dianggap sebagai kuantitas yang ikut bergerak bersama aliran udara dan jumlahnya dapat berubah karena adveksi horizontal maupun vertikal, serta akibat adanya penguapan atau kondensasi.

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla q = S_q \quad (2.6)$$

E. Persamaan Gas Ideal

Persamaan gas ideal merupakan hubungan fundamental antara tekanan, suhu, dan densitas dalam gas ideal, termasuk udara di atmosfer. Persamaan ini digunakan untuk menghubungkan variabel termodinamik seperti suhu dan tekanan dengan parameter dinamika seperti densitas, yang sangat penting dalam menyelesaikan sistem persamaan primitif. Meski atmosfer bukan gas ideal sempurna, pendekatan ini cukup akurat untuk sebagian besar kondisi atmosferik, terutama di troposfer [12].

$$p = \rho RT \quad (2.7)$$

Kelima persamaan diatas dikenal sebagai persamaan pengatur dasar yang disusun secara matematis untuk dapat merepresentasikan dinamika yang terjadi di atmosfer. Kelima persamaan ini menjadi landasan utama dalam membangun model numerik yang mampu mensimulasikan atmosfer secara spasial dan temporal.

Model NWP pada umumnya memiliki keterbatasan, seperti ketidakpastian dalam prediksi jangka panjang, yang dapat disebabkan oleh kesalahan dalam data input atau dalam proses perhitungan model [13]. Penerapan algoritma NWP ini membutuhkan alat komputasi yang cukup kuat. Inilah alasan mengapa kemajuan dalam prediksi cuaca numerik mengikuti perkembangan pesat komputer elektronik sejak komputer mulai muncul pada akhir perang dunia kedua [14].

Penelitian terdahulu oleh Muttaqin (2011) mengenai potensi pemanfaatan keluaran model NWP (Numerical Weather Prediction) untuk prediksi cuaca jangka pendek di beberapa kota di Indonesia seperti Pontianak, Pekanbaru, Semarang, Surabaya, dan Palu. Hasilnya menunjukkan bahwa keluaran model NWP dapat meningkatkan akur-

rasi prediksi cuaca jangka pendek, terutama untuk parameter suhu udara permukaan (T_0) dan titik embun permukaan (DPO). Hal ini dibuktikan oleh penurunan nilai RMSE sebesar 86,5% di Kota Palu dan MAE (*Mean Absolute Error*) sebesar 99,0% di Kota Surabaya [15].

Penelitian lainnya oleh Pambreja dkk. (2012) mengenai penerapan teknik klasifikasi untuk menginterpretasi keluaran model NWP dalam memprediksi hujan lebat mendadak (*cloudburst*) berbasis data ECMWF. Hasilnya menunjukkan bahwa teknik klasterisasi efektif dalam mengidentifikasi pola-pola yang berkaitan dengan kejadian hujan, seperti temperatur pada ketinggian 400 hPa, 500 hPa, dan 700 hPa untuk dua *timestep* dengan perubahan sekitar 3°C pada masing-masing *timestep* di tiap ketinggian [16].

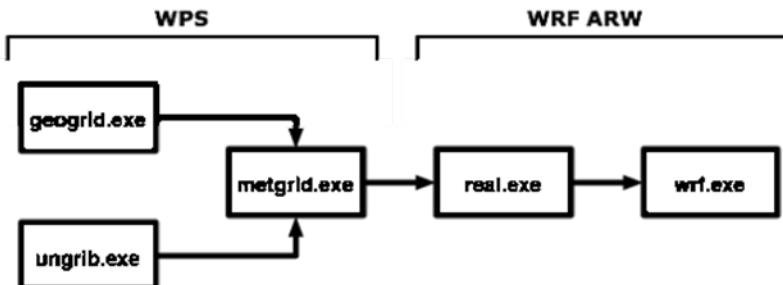
2.3 Model WRF (*Weather Research Forecasting*)

Model WRF (*Weather Research and Forecasting*) merupakan model generasi lanjutan sistem simulasi cuaca numerik skala meso yang didesain untuk melayani simulasi operasional dan kebutuhan peneliti atmosfer [17]. Dalam penggunaanya digunakan pendekatan terhadap proses fisis yaitu parameterisasi, hal ini sangat mempengaruhi WRF dalam menentukan hasil dari simulasi cuaca sebuah model numerik. Ada beberapa jenis parameterisasi seperti radiasi, *surface layer*, PBL (*Planetary Boundary Layer*), *cumulus*, dan *microphysics*.

Secara garis besar, WRF meliputi 3 tahapan dalam proses pengolahannya, yaitu tahap WPS (*WRF Preprocessing System*) yang merupakan tahapan awal untuk mempersiapkan data masukan yang diperlukan sebelum model WRF dijalankan. WPS mengubah data atmosfer dan geografi menjadi format yang dapat digunakan oleh model WRF. Langkah umum dalam WPS yaitu proses yang bernama *geogrid* untuk menghasilkan data geografis seperti topografi. Setelah itu akan berlanjut ke proses yang bernama *ungrib* untuk membaca data *initial condition* atau data masukan yang kemudian diubah formatnya agar bisa dibaca oleh model. Proses selanjutnya bernama *metgrid* untuk menggabungkan dan menginterpolasi data *geogrid* dan *ungrib* sesuai dengan aturan grid yang telah ditetapkan pengguna [18].

Selanjutnya merupakan tahap ARW untuk melakukan konfigurasi yang berisi pengaturan model, seperti skema fisis (parameterisasi) atmosfer, resolusi grid, domain simulasi, waktu simulasi, dan parameter lainnya. Pada tahapan ini, WRF akan menghasilkan output yang berisikan variabel meteorologi yang telah disimulasikan menggunakan konfigurasi yang telah diatur di ARW. Selanjutnya adalah tahapan *Post-processing* yang merupakan tahapan visualisasi dan evaluasi hasil.

Tahapan umum model WRF dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Tahapan umum Model WRF

Penelitian terdahulu yang melakukan pengujian terhadap model WRF di kawasan Lampung pernah dilakukan oleh Ginting (2022) yang menguji 5 *member* dengan 1 *member ensemble* yang dibangun dengan skema rata-rata atau *mean*. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa model dengan 5 *member* dan 1 *member ensemble* secara keseluruhan kurang sensitif dalam mendeteksi kejadian hujan karena memiliki nilai POD dan TS yang mendekati 0, berbanding terbalik dengan nilai FAR yang mendekati 1. Sampel model yang dibuat (*WSM3, Betts-Miller-Janjic, RRTM, Dudhia, YSU*) tidak sensitif mendeteksi atau memprediksi awan konvektif yang berpotensi menghasilkan hujan dengan intensitas tinggi [2].

2.4 Parameterisasi WRF

Setiap tempat atau wilayah memiliki karakteristik iklim dan cuaca yang berbeda-beda. Pemilihan parameterisasi yang tepat perlu dilakukan sehingga mampu memberikan hasil luaran model yang maksimal. Persamaan cuaca numerik tidak menyelesaikan fenomena atmosfer pada skala yang lebih detail, sehingga proses-proses kompleks tersebut perlu diparameterisasikan. Parameterisasi didefinisikan sebagai metode untuk mengaproksimasi *bulk effects* (efek rata-rata di tiap grid model) dari proses fisis yang terlalu kecil, terlalu singkat, terlalu kompleks, dan apabila direpresentasikan secara eksplisit akan memakan biaya yang tinggi.

Ada beberapa jenis parameterisasi seperti *radiasi*, *surface layer*, PBL (*Planetary Boundary Layer*), *cumulus*, dan *microphysics* [19]. Berikut penjelasan mengenai masing-masing parameterisasi yang ada di dalam model WRF.

A. Parameterisasi Mikrofisis

Parameterisasi *mikrofisis* memainkan peran penting dalam konveksi awan dan panas latent. *Mikrofisis* secara eksplisit melibatkan proses presipitasi, uap air, dan awan [10]. Parameterisasi *mikrofisis* memiliki beberapa skema di dalamnya, di

antaranya skema Kessler, Lin, WSM5, New Thompson, dan lainnya.

B. Parameterisasi Kumulus

Parameterisasi *kumulus* digunakan dalam menggambarkan pergerakan awan serta proses konvektif. Parameterisasi ini dapat digunakan untuk mendapatkan prediksi hujan yang lebih akurat [20]. Beberapa skema parameterisasi *kumulus* di antaranya ialah Grell 3D, Old Kain-Fritsch, BMJ, GD Ensemble, Tiedtke, dan sebagainya.

C. Parameterisasi Radiasi

Parameterisasi *radiasi* merupakan komponen penting dalam model cuaca numerik karena radiasi memengaruhi keseimbangan energi di atmosfer. Menurut Stensrud, parameterisasi *radiasi* bertujuan untuk merepresentasikan interaksi energi elektromagnetik dengan atmosfer secara efisien, sehingga dapat diterapkan pada model numerik yang memiliki keterbatasan sumber daya komputasi [11]. Hasil simulasi menggunakan parameterisasi *radiasi* menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap pola distribusi suhu dan kelembapan atmosfer, yang kemudian memengaruhi pola angin dan presipitasi [21].

D. Parameterisasi Lapisan Batas Atmosfer

Parameterisasi *Lapisan Batas Atmosfer* atau disebut juga *PBL (Planetary Boundary Layer)* digunakan dalam menggambarkan transportasi *eddies* di atmosfer [18]. Parameterisasi ini mempertimbangkan faktor kelembapan, suhu, topografi, turbulensi, dan sebagainya. Contoh skema dari parameterisasi PBL ialah skema YSU, MYJ, NCEP *Global Forecast System Scheme*, QNSE, dan lainnya.

Keempat parameterisasi ini akan dikombinasikan untuk menghasilkan 1 *member* dan akan diubah dan dijalankan berulang hingga menghasilkan 10 *member* dengan parameterisasi yang berbeda-beda.

Penelitian terkait pengujian skema parameterisasi WRF pernah dilakukan oleh Ikranegara dkk. (2023) yang menguji performa dari skema parameterisasi di wilayah Bandara Soekarno Hatta. Uji parameterisasi dilakukan pada tanggal 6 April 2019, dengan menguji beberapa kombinasi skema parameterisasi dalam bentuk empat skema yang termasuk di dalamnya parameterisasi cumulus, konvektif, dan PBL. Hasil uji parameterisasi menunjukkan bahwa kombinasi skema parameterisasi mikrofisis WSM6, lapisan batas YSU, dan cumulus Grell-Devenyi 3D merupakan kombinasi yang terbaik dalam memprediksi beberapa parameter seperti angin dan suhu permukaan. Secara visual, skema ini mampu menunjukkan tutupan awan konvektif yang menyerupai dengan hasil interpretasi radar cuaca Tangerang [22].

Penelitian lainnya oleh Fadianika (2015) menggunakan tiga skema paramete-

risasi kumulus yang berbeda (Kain-Fritsch, Betts-Miller Janjic, dan Grell-Devenyi) untuk memprediksi kejadian hujan di wilayah Jawa Timur. Beberapa parameterisasi yang diterapkan dalam studi tersebut meliputi parameterisasi mikrofisis Kessler, parameterisasi radiasi gelombang panjang RRTM, parameterisasi radiasi gelombang pendek Dudhia, parameterisasi lapisan permukaan MM5, parameterisasi lapisan permukaan NOAH land surface model, serta parameterisasi PBL YSU. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa kombinasi parameter dengan skema kumulus Grell-Devenyi (GD) adalah yang paling sensitif dalam memperkirakan kejadian hujan di sebagian wilayah Jawa Timur, Betts-Miller Janjic lebih sesuai untuk Pulau Bawean yang juga berada di Jawa Timur, serta Kain-Fritsch yang cocok untuk Kabupaten Tuban, Panarukan, dan Banyuwangi. Uji verifikasi metrik yang dilakukan seperti nilai ETS (*Equitable Threat Score*) berada di angka 0,2 yang menunjukkan model cenderung kurang akurat untuk kejadian hujan secara spesifik, serta nilai FBI (*Frequency Bias Index*) dengan nilai rata-rata 0,6 yang menunjukkan model lebih cenderung *underestimate* meski prediksi cukup mendekati observasi [23].

Penelitian lainnya oleh Putra (2018) yang mengevaluasi parameterisasi kumulus untuk simulasi kondisi udara di lapisan atas pada wilayah Surabaya dan Kupang. Parameterisasi yang diuji adalah Kain-Fritsch dan Betts-Miller Janjic. Hasil menunjukkan bahwa korelasi kedua parameterisasi terhadap data observasi sangat baik, yang mencapai 0,99 untuk variabel temperatur dan titik embun. Namun, untuk kelembaban relatif, Betts-Miller Janjic lebih unggul untuk di wilayah Surabaya dan Kupang dengan korelasi 0,77 yang lebih besar jika dibandingkan dengan Kain-Fritsch yang hanya 0,65. Sementara itu, untuk variabel kecepatan angin, Kain-Fritsch unggul di wilayah Surabaya dengan nilai korelasi 0,81, sedangkan Betts-Miller Janjic unggul di wilayah Kupang dengan korelasi 0,84 [24].

Penelitian berkaitan lainnya oleh Arbain dkk. (2013) yang menguji parameterisasi kumulus Modified-Tiedtke dan mikrofisis Morrison untuk memodelkan atmosfer saat kejadian banjir di Jakarta pada 17 Januari 2013. Simulasi yang dilakukan pada 16–17 Januari dibandingkan dengan data observasi GsMaP dengan kesimpulan bahwa performa terbaik model teramat pada *timestep* 16-19, yaitu pukul 09.00-12.00 WIB, dengan nilai CSI (*Critical Success Index*) mencapai 0,32 dan POD (*Probability of Detection*) yang mencapai 0,82. Namun, pada *timestep* 7-9 (pukul 00.00-02.00 WIB), secara spasial model cenderung *underestimate*, khususnya pada domain yang diatur di Pulau Jawa. Hal serupa juga terjadi pada *timestep* 19-21 (pukul 12.00-14.00 WIB), di mana konfigurasi Modified-Tiedtke dan Morrison sangat *underestimate* jika dibandingkan dengan data observasi yang menunjukkan hujan hingga 30 mm di

area sekitar Jawa Timur. Analisis secara *time series* juga menunjukkan bahwa model cukup *underestimate* secara umum pada seluruh rentang waktu, dengan puncaknya terjadi pada 17 Januari pukul 02.00-04.00 WIB yang justru *overestimate* [25].

2.5 Model Cuaca Global

Model cuaca global adalah simulasi keadaan atmosfer dalam skala global. Model cuaca global bekerja dengan membagi bumi kedalam kotak-kotak kecil (*grid*) untuk mempermudah perhitungan prediksi pada perubahan variabel atmosfer dalam tiap waktu secara fisis dan matematis [26]. Model cuaca global ini dapat dijadikan data kondisi awal untuk model prediksi berbasis *downscaling* seperti model WRF yang digunakan pada penelitian ini. Model cuaca global yang disediakan oleh berbagai lembaga, seperti GFS yang disediakan oleh NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) dan ERA5 yang disediakan oleh ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), berperan penting dalam memengaruhi hasil simulasi model *downscaling* seperti WRF karena data dari model global tersebut digunakan sebagai kondisi awal (*initial condition*) dan batas (*boundary condition*) dalam pemodelan. Kualitas dan resolusi data awal ini sangat menentukan akurasi keluaran WRF, terutama dalam menangkap dinamika atmosfer di wilayah yang dijadikan objek *downscale*.

Pada penelitian ini, dua model cuaca global yakni GFS dan ERA5 akan dibandingkan sebagai data kondisi awal pada model WRF. Berikut penjelasan mengenai masing-masing model cuaca global yang akan digunakan.

2.5.1 ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*)

ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) merupakan pusat prediksi cuaca numerik internasional yang berbasis di Eropa dan dikelola secara kolktif oleh beberapa negara anggota. Lembaga ini menyediakan berbagai produk model numerik berkualitas tinggi untuk prediksi cuaca menengah hingga jangka panjang. Model utama yang dikembangkan oleh ECMWF dikenal sebagai IFS (*Integrated Forecasting System*) dan digunakan secara luas di berbagai negara karena akurasinya yang tinggi, terutama dalam prakiraan cuaca menengah [27].

ECMWF menyediakan beberapa jenis data seperti ERA5 yang merupakan data reanalisis dengan resolusi temporal dan spasial tinggi, serta data prediksi operasional yang diperbarui secara berkala. Data ECMWF tersedia dalam berbagai resolusi temporal seperti data per jam, per 3 jam, hingga harian, tergantung jenis produk. Resolusi spasial dari model ini juga beragam, mulai dari $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, hingga resolusi yang lebih tinggi tergantung pada tipe data dan akses pengguna. Beberapa data

ECMWF dapat diakses secara gratis, khususnya reanalisis, sementara data operasional penuh biasanya membutuhkan akses berlangganan atau keanggotaan institusional.

2.5.2 GFS (*Global Forecast System*)

GFS adalah model prediksi cuaca numerik global yang dikembangkan dan disediakan oleh *National Centers for Environmental Prediction* yang berada di bawah NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Amerika Serikat. Model ini digunakan secara luas oleh berbagai lembaga meteorologi di seluruh dunia karena menyediakan data secara gratis dan terus diperbarui.

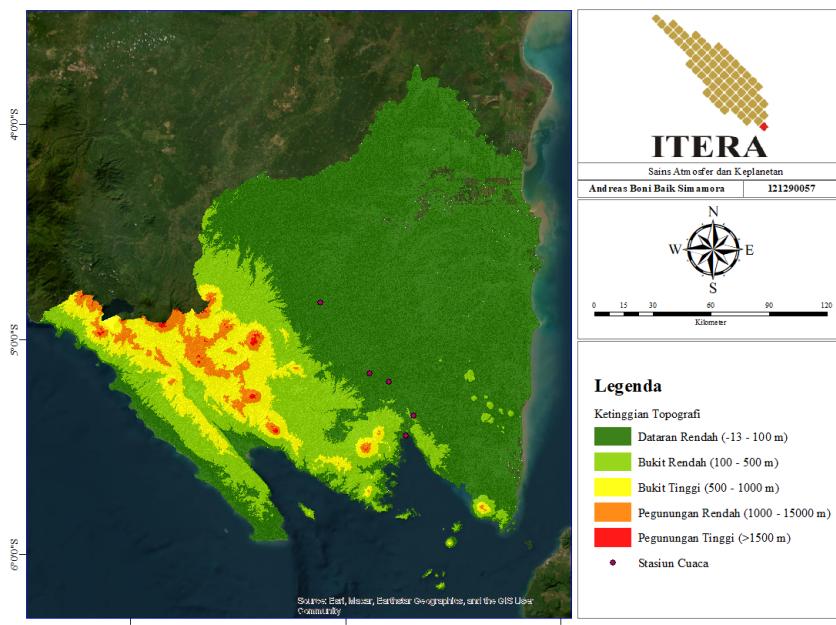
GFS memiliki produk yang bervariasi seperti FNL yang merupakan analisis akhir (*Final Analysis*), GDAS yang merupakan data yang telah diasimilasi, ataupun GFS *Forecast Data* [28]. Resolusi yang tersedia juga bervariasi seperti data per 3 jam hingga data per 6 jam. Resolusi spasial model GFS juga cukup beragam mulai dari $0,1^\circ \times 0,1^\circ$, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, ataupun $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan menguji curah hujan yang dihasilkan oleh model simulasi dengan data curah hujan AWS yang berada di Taman Alat UPT MKG ITERA. Institut Teknologi Sumatera terletak di Lampung Selatan, Indonesia dengan koordinat $5^{\circ}22'33''$ LS $105^{\circ}12'46''$ BT. Lokasi ini memiliki ketinggian elevasi sekitar 60 meter di atas permukaan laut dengan luas lahan sekitar 258 hektar [29]. Peta provinsi Lampung dapat dilihat pada Gambar 3.1

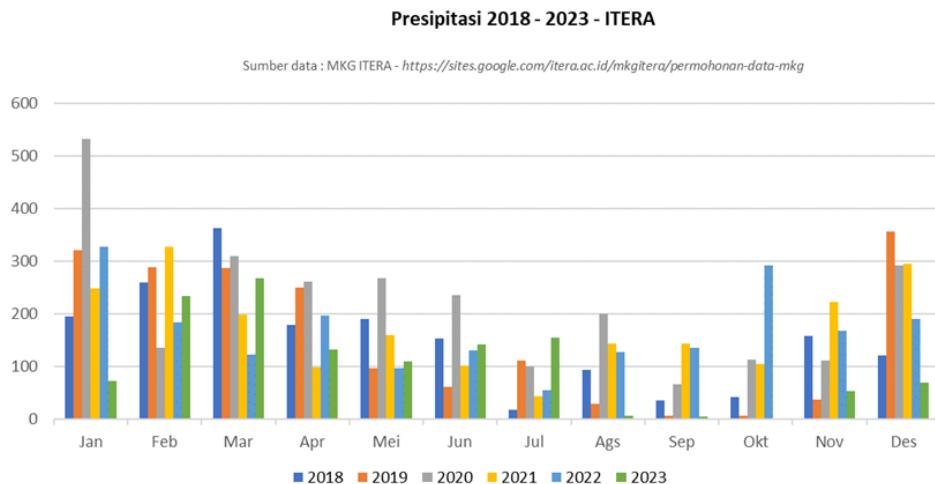


Gambar 3.1 Topografi dan Titik Stasiun Cuaca Provinsi Lampung

Pemilihan rentang waktu dalam penelitian tugas akhir ini tidak didasarkan pada suatu kejadian spesifik seperti *natural disasters* yang sering menjadi sorotan media, melainkan ditentukan berdasarkan pengamatan terhadap variasi curah hujan yang berbeda secara berturut. Langkah awal adalah mengidentifikasi bulan-bulan di setiap tahunnya yang memiliki nilai kategori tertentu seperti tertinggi, terendah, dan sebagainya. Setelah langkah ini, data harian akan dianalisis untuk menemukan rentang hari yang relevan untuk menjadi interval waktu simulasi model.

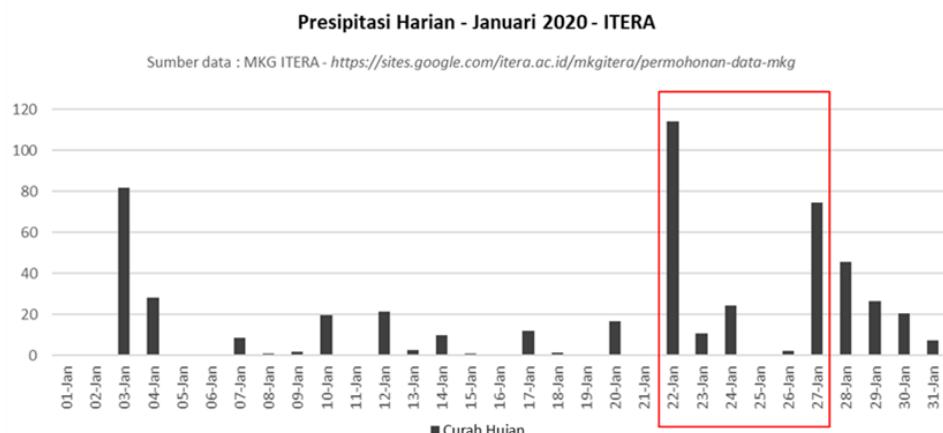
Berdasarkan data bulanan yang dapat dilihat pada Gambar 3.2, dapat dijelaskan

bahwa Januari 2020 merupakan bulan yang memiliki akumulasi curah hujan paling tinggi dari seluruh bulan setiap tahunnya dari 2018 – 2023 dengan curah hujan >500 mm.



Gambar 3.2 Akumulasi Curah Hujan Bulanan Di ITERA

Setelah mengidentifikasi data curah hujan harian di Januari 2020, rentang tanggal terpilih adalah 22-27 Januari yang memiliki seluruh klasifikasi curah hujan, yakni klasifikasi sangat lebat (22 Januari), klasifikasi lebat (27 Januari), klasifikasi sedang (24 Januari), klasifikasi ringan (23 dan 26 Januari), dan klasifikasi sangat ringan (25 Januari). Grafik curah hujan harian pada bulan Januari 2020 dapat dilihat pada 3.3.



Gambar 3.3 Akumulasi Curah Hujan Harian (Januari 2020) Di ITERA

3.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data parameter curah hujan selama rentang waktu simulasi. Data tersebut terdiri dari empat kategori utama, yaitu data observasi yang diperoleh dari AWS ITERA dan dua data simulasi yang dihasilkan dari model WRF dengan menggunakan *input-an* dari data GFS (*Global Forecasting System*) dan ERA5 (*ECMWF Reanalysis 5*). Adapun detail produk data yang digunakan pada penelitian ini, antara lain:

1. Data observasi berupa data pengamatan AWS ITERA. Data observasi ini tersedia dalam langkah waktu tiap 10 menit untuk setiap harinya dengan format waktu UTC (*Universal Time Coordinated*)
2. Data model cuaca global GFS, varian produk FNL (*Final Analysis*) dalam langkah waktu tiap 6 jam dengan resolusi spasial $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ [30]. Format data yang diatur dalam permintaan adalah .GRIB2. Data ini akan menjadi data kondisi awal untuk model WRF.

Data ini diakses melalui tautan <https://rda.ucar.edu/datasets/d083002/>.

3. Data model cuaca global ECMWF, varian produk ERA5 (*ECMWF Reanalysis 5*) dalam langkah waktu tiap 6 jam dengan resolusi spasial $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ [31]. Format data yang diatur dalam permintaan adalah .GRIB2. Data ini terdiri dari dua file berbeda agar bisa dimasukkan kedalam model WRF yakni data permukaan dan data tiap level tekanan. Data ini juga akan menjadi data kondisi awal untuk model WRF. Data ini diakses melalui CDS (*Climate Data Store*) menggunakan API resmi dari Copernicus, yaitu cdsapi.

Pengujian tingkat akurasi data GFS sebagai data masukan di model WRF pernah dilakukan pada penelitian yang dilakukan oleh Ariyanti dkk (2020) yang menguji keakuratan data GFS dengan menggunakan model WRF-ARW dalam memodelkan siklon tropis Flamboyan. Model WRF-ARW dengan data masukan GFS dapat memprediksi posisi siklon tropis dengan ketepatan yang cukup baik. *Mean Absolute Error* posisi siklon dalam jangka waktu 72 jam pertama adalah sekitar 100-150 km. Model WRF-ARW dengan data GFS juga berhasil memprediksi kecepatan angin siklon, dengan perbedaan rata-rata sebesar 5-10 m/s dibandingkan dengan data pengamatan. Meskipun terdapat perbedaan dalam intensitas angin yang lebih rendah pada model, WRF-ARW masih menunjukkan kecocokan yang cukup baik dalam menggambarkan pola umum [32].

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan umum penelitian tugas akhir ini terdiri dari beberapa langkah dengan langkah teknis yang terlaksana didalamnya. Berikut tahapan penelitian yang akan dilakukan.

3.3.1 Pengumpulan Data

Data yang telah diuraikan pada bab sebelumnya akan dikumpulkan untuk selanjutnya dilakukan pengolahan dan simulasi. Data observasi diperoleh dengan permintaan terlebih dahulu dari penulis kepada UPT MKG ITERA sebagai pihak yang mengelola AWS ITERA. Data model cuaca global sebagai kondisi awal model, serta data berbasis satelit sebagai pembanding non-kuantitatif model diperoleh sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya.

3.3.2 Konfigurasi Model WRF

Konfigurasi model meliputi tahap seperti pembuatan *domain* hingga penetapan skema parameterisasi untuk setiap *member*.

Domain Model Domain dibuat menggunakan proyeksi *mercator* dengan *domain* sarang yang memiliki resolusi 3 km. *Domain* sarang ini berada di dalam *domain* induk yang memiliki resolusi spasial 9 km. Rasio grid induk dengan sarang adalah 3:1 dengan interval waktu 6 jam untuk masukan maupun luaran mulai 22-27 Januari 2020. Domain dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Domain Model Penelitian

Running Model Pada tahapan ini, simulasi model akan dijalankan sebanyak 10 kali masing-masing untuk setiap data masukan untuk menghasilkan 10 *member* masing-

masing, dengan kombinasi skema parameterisasi yang berbeda-beda. Setelah model berhasil disimulasikan, selanjutnya diterapkan metode *Ensemble* seperti yang telah dijabarkan pada Bab 2. Kombinasi skema parameterisasi yang hendak digunakan pada penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Variabel lainnya yang seharusnya ada pada tabel yaitu radiasi gelombang panjang, radiasi gelombang pendek, serta lapisan batas tidak dimasukkan ke dalam tabel dengan tujuan efisiensi penggunaan tabel. Parameter-parameter tersebut diatur dengan aturan *default* untuk seluruh *member* dengan menggunakan parameterisasi opsi nomor 1 yang merupakan opsi paling umum pada masing-masing parameter yaitu *Dudhia Scheme* untuk gelombang pendek, RRTM untuk gelombang panjang, dan YSU untuk lapisan batas [18].

Tabel 3.1 Skema Parameterisasi Model Penelitian

Member	Parameterisasi		Referensi
	Cumulus	Microphysics	
1	-	WSM 6	(M. Djakaria, 2019)
2	-	Goddard	(S. Kendzierski, 2024)
3	-	Thompson	(M. Djakaria, 2019)
4	Tiedtke	WSM 6	(D. Nuryanto, 2020)
5	K-F	WSM 3	(E. Perawiska, 2018)
6	B-M-J	Lin Purdue	(H. Chawla, 2018)
7	K-F	Eta Ferrier	(H. Chawla, 2018)
8	Modified-Tiedtke	Morrison	(D. Syaifullah, 2013)
9	B-M-J	WSM 6	(S. Chinta, 2020)
10	Grell-3D	Goddard	(M. ElTahan, 2017)

3.3.3 Koreksi Bias

Model-model tunggal hasil luaran WRF akan dikoreksi untuk memperbaiki penyimpangan sistematis antara hasil simulasi dan data observasi. Koreksi bias ini penting dilakukan mengingat model numerik cuaca seperti WRF sering kali menunjukkan bias tetap yang berasal dari kesalahan inisialisasi, formulasi fisik, maupun resolusi spasial yang terbatas [33].

Dalam penelitian ini, digunakan dua pendekatan koreksi bias yang, yaitu *Linear Scaling* dan *Quantile Mapping*. *Linear Scaling* bekerja dengan menyesuaikan rata-rata antara data model dan data observasi pada periode kalibrasi. Sementara itu, *Quantile Mapping* memperbaiki distribusi kumulatif model agar menyerupai distribusi

observasi dengan mengatur nilai-nilai kuantilnya [34].

A. Linear Scaling

Linear Scaling (LS) adalah metode koreksi bias berbasis statistik yang bekerja dengan menyesuaikan skala antara keluaran model dan data observasi. Teknik ini dilakukan dengan menghitung rasio atau selisih antara nilai rata-rata model dan observasi pada periode kalibrasi, lalu menerapkannya untuk mengoreksi nilai-nilai prediksi model. Persamaan umum *Linear Scaling* dapat dilihat pada Persamaan 3.1.

$$X_{\text{corr}} = X_{\text{mod}} \cdot \frac{\mu_{\text{obs}}}{\mu_{\text{mod}}} \quad (3.1)$$

Keterangan:

X_{corr} = Nilai model setelah koreksi.

X_{mod} = Nilai model sebelum koreksi.

μ_{obs} = Rata-rata observasi.

μ_{mod} = Rata-rata model.

B. Quantile Mapping

Quantile Mapping (QM) adalah metode koreksi bias yang memperbaiki keseluruhan bentuk distribusi data model agar menyerupai distribusi data observasi. Metode ini bekerja dengan memetakan nilai prediksi model ke fungsi distribusi kumulatif (CDF) milik model, kemudian mentransformasikannya ke nilai pada distribusi observasi melalui fungsi *inverse CDF*. Persamaan umum *Quantile Mapping* dapat dilihat pada Persamaan 3.2.

$$X_{\text{corr}} = F_{\text{obs}}^{-1}(F_{\text{mod}}(X_{\text{mod}})) \quad (3.2)$$

Keterangan:

X_{corr} = Nilai setelah koreksi.

X_{mod} = Nilai model sebelum koreksi.

F_{mod} = Fungsi distribusi kumulatif (CDF) dari data model.

F_{obs}^{-1} = Fungsi *inverse CDF* dari data observasi.

Hasil dari kedua metode koreksi bias ini akan dinilai kemampuannya berdasarkan korelasi dan RMSE terhadap data observasi. Sebagai langkah seleksi, hanya satu metode koreksi bias yang memberikan hasil paling optimal, yaitu yang menghasilkan rata-rata RMSE terendah dan korelasi tertinggi, yang akan digunakan sebagai input dalam pembuatan model *ensemble*. Melalui koreksi ini, model-model tunggal yang telah terkoreksi diharapkan memiliki distribusi yang lebih representatif terhadap kondisi aktual, sehingga kualitas akhir dari model *ensemble* pun turut meningkat.

3.3.4 Teknik *Ensemble*

Teknik *Ensemble* merupakan salah satu pendekatan dalam pemodelan numerik cuaca yang bertujuan untuk meningkatkan akurasi prediksi dengan menggabungkan hasil dari beberapa simulasi model [35]. Hasil prediksi dari masing-masing anggota model kemudian digabungkan untuk memperoleh hasil yang lebih representatif dan mengurangi ketidakpastian [36].

Namun, metode ini memiliki beberapa kekurangan, termasuk kebutuhan komputasi yang lebih besar karena harus menjalankan beberapa simulasi model secara bersamaan. Kondisi tersebut dapat membebani sumber daya komputasi dan meningkatkan waktu yang diperlukan untuk menghasilkan hasil prediksi [37].

A. Skema *Ensemble* 1

Skema untuk membangun Ensemble 1 yaitu pendekatan yang melakukan rata-rata dari setiap model yang disimulasikan. Persamaan untuk membangun *ensemble mean* dapat dilihat pada Persamaan 3.3.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3.3)$$

Keterangan:

\bar{X} = *Ensemble Mean*.

N = Jumlah *member*.

X_i = Nilai *member* ke- i .

B. Skema *Ensemble* 2

Skema untuk membangun model *ensemble* 2 yaitu pendekatan yang menggunakan nilai RMSE dan korelasi antar model dan observasi [38]. Persamaan untuk membangun *ensemble* 2 dapat dilihat pada Persamaan 3.4.

$$Y2_{ens} = k_1 y_1 + k_2 y_2 + k_3 y_3 + \dots + k_n y_n \quad (3.4)$$

Keterangan:

$Y2_{ens}$ = Nilai model *ensemble* 2.

y_n = Nilai curah hujan *member* ke- n .

$k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n = 1$.

k diperoleh melalui Persamaan 3.5.

$$k_n = \frac{C_n + E_n}{2} \quad (3.5)$$

Nilai C_n merupakan bobot berbasis korelasi antara model ke- n dengan observasi. Sedangkan nilai E_n merupakan bobot berbasis RMSE antara model ke- n dengan observasi. C_n dan E_n diperoleh melalui Persamaan 3.6 dan 3.7.

$$C_n = \frac{R_n}{\sum R} \quad (3.6)$$

$$E_n = \frac{S - RMSE_n}{(n - 1)S} \quad (3.7)$$

Keterangan:

R_n = Koefisien korelasi antara *member* ke- n dengan observasi.

$\sum R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$.

$S = RMSE_1 + RMSE_2 + RMSE_3 + \dots + RMSE_n$

$C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n = 1$.

$E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n = 1$.

C. Skema *Ensemble* 3

Skema untuk membangun *Ensemble* 3 yaitu dengan pendekatan yang menggunakan nilai POD (*Probability Of Detection*) dan FAR (*False Alarm Ratio*) antara model dengan observasi. POD dan FAR merupakan verifikasi metrik antara model dengan observasi yang persamaannya dapat dilihat pada persamaan 3.14 dan 3.15. Persamaan untuk membangun *ensemble* 3 dapat dilihat pada Persamaan 3.8.

$$Y3_{ens} = l_1 y_1 + l_2 y_2 + l_3 y_3 + \dots + l_n y_n \quad (3.8)$$

Keterangan:

$Y3_{ens}$ = Nilai model *ensemble* 3.

y_n = Nilai curah hujan *member* ke- n .

$l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n = 1$.

l diperoleh melalui persamaan 3.9.

$$l_n = \frac{P_n + F_n}{2} \quad (3.9)$$

Nilai P_n merupakan bobot berbasis POD antara model ke- n dengan observasi. Sedangkan nilai F_n merupakan bobot berbasis FAR antara model ke- n dengan observasi. P_n dan F_n diperoleh melalui Persamaan 3.10 dan 3.11.

$$P_n = \frac{POD_n}{\sum POD} \quad (3.10)$$

$$F_n = \frac{T - FAR_n}{(n-1)T} \quad (3.11)$$

Keterangan:

$$\sum POD = POD_1 + POD_2 + POD_3 + \dots + POD_n.$$

$$T = FAR_1 + FAR_2 + FAR_3 + \dots + FAR_n.$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = 1.$$

$$F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n = 1$$

Penelitian terkait penggunaan teknik *ensemble* dilakukan oleh Sofiati dan Nurlatifah (2019) yang mengevaluasi kemampuan teknik *ensemble* dalam memprediksi hujan di Cilacap dan Denpasar menggunakan data model WRF-ARW pada periode 1–20 Juli dan 1–20 Februari 2016. Teknik *ensemble* yang digunakan melibatkan tiga metode, yaitu *ensemble* berbobot berdasarkan RMSE dan korelasi, berbobot berdasarkan POD/FAR, dan *ensemble mean* sederhana. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baik model tunggal maupun teknik ensemble cenderung *underestimate* pada intensitas hujan yang diamati, terutama untuk hujan lebat. Namun, model mampu memprediksi kondisi kering dengan cukup baik, dengan tingkat akurasi mencapai 80%. ROC curve yang digunakan untuk evaluasi menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara ketiga metode *ensemble* tersebut. Dengan kata lain, metode *ensemble* berbobot tidak memberikan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan *ensemble mean* sederhana dalam memprediksi curah hujan di wilayah studi [38].

3.3.5 Uji Verifikasi Model Berdasarkan Intensitas Hujan

Uji verifikasi ini akan menghasilkan koefisien korelasi dan nilai RMSE yang akan digunakan sebagai pembobot dalam membangun model *ensemble* 2.

A. Korelasi Pearson

Korelasi Pearson mengukur kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel. Nilai koefisien korelasi Pearson berkisar antara -1 hingga 1. Dalam verifikasi data, korelasi Pearson digunakan untuk menilai sejauh mana perubahan dalam satu variabel berkaitan dengan perubahan dalam variabel lain [39].

Persamaan untuk korelasi pearson dapat dilihat pada Persamaan 3.12.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.12)$$

Keterangan:

x_i, y_i = Nilai data observasi (x), model (y).

\bar{x}, \bar{y} = Nilai rata-rata observasi (x), model (y).

Menurut Sugiyono (2010) pada buku yang berjudul *Metode Penelitian Pendidikan : Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D* menjelaskan klasifikasi berdasarkan nilai korelasi yang dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Kategori Hubungan Variabel Berdasarkan Koefisien Korelasi)

Interval Koefisien	Kategori Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,000	Sangat Kuat

B. Root Mean Square Error

RMSE merupakan perhitungan sederhana untuk mengukur kesalahan rata-rata sesuai dengan kuadrat kesalahan. RMSE ini tidak menunjukkan arah penyimpangannya. RMSE memiliki rentang nilai dari nol hingga tak hingga, dengan nilai sempurna adalah nol. Hasil model WRF-ARW dapat dikatakan sensitif jika memiliki nilai RMSE yang kecil terhadap data pengamatan.

$$RMSE = \left(\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

Keterangan:

n = Jumlah data.

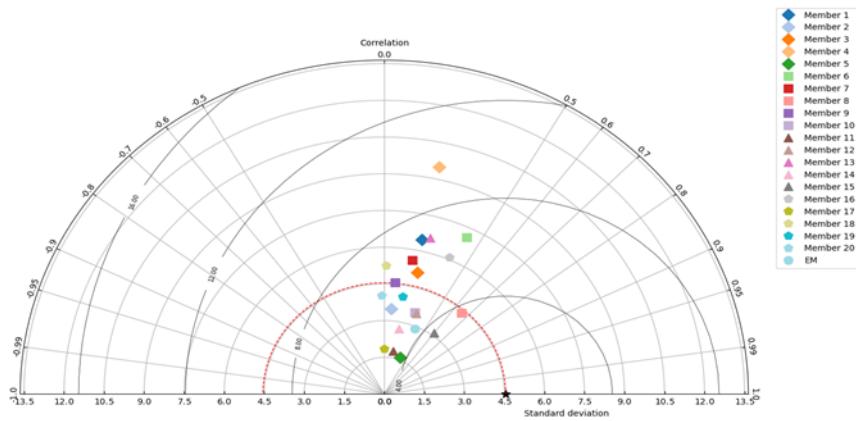
y_i = Data observasi.

\hat{y}_i = Data model.

Hasil dari uji verifikasi intensitas hujan akan disajikan dalam bentuk diagram Taylor. Diagram Taylor sendiri merupakan metode grafis untuk mengevaluasi performa model numerik dengan membandingkan hasil model terhadap data referensi. Grafik ini menampilkan beberapa metrik statistik sekaligus, seperti korelasi, standar deviasi, dan *root mean square error* (RMSE).

Pada Tabel Taylor, sumbu radial menunjukkan besar standar deviasi dari data model maupun observasi. Jarak dari titik nol (pusat) ke suatu titik mewakili nilai standar deviasi. Sementara itu, sudut dari titik terhadap sumbu horizontal menunjukkan nilai korelasi, di mana sudut 0° berarti korelasi sempurna (nilai 1), dan makin besar sudutnya berarti korelasinya semakin rendah. Selain itu, jarak antar titik di dalam grafik juga dapat menunjukkan besarnya RMSE antara model dan data observasi [40].

Contoh diagram Taylor dapat dilihat pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Contoh Diagram Taylor

3.3.6 Uji Verifikasi Model Berdasarkan Kejadian Hujan

Uji verifikasi ini merupakan uji matrik kategori terhadap model untuk mengevaluasi seberapa baik model-model tunggal memberi informasi hujan yang benar terjadi pada observasi, hujan yang tidak benar terjadi pada observasi, ataupun informasi tidak hujan yang sebenarnya terjadi pada observasi. Pada verifikasi ini, hujan dianggap terjadi jika terjadi dengan nilai $\geq 0,1$. Uji verifikasi ini akan menghasilkan nilai-nilai seperti FAR dan POD yang menjadi pembobot dalam membangun model *ensemble* 3.

Matrik kategori dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 3.3 Tabel kontingensi

		Observasi Hujan	Observasi Tidak Hujan
Model Hujan	Hit	False Alarm	
Model Tidak Hujan	Miss	Correct Negative	

Berdasarkan data dari Tabel 4.5, dilakukan perhitungan POD dan FAR dan juga CSI (*Critical Success Index*).

A. POD (*Probability Of Detection*)

POD adalah ukuran yang digunakan untuk menilai kemampuan model dalam memprediksi kejadian yang benar terjadi. Semakin tinggi nilai POD, semakin baik model dalam memprediksi kejadian yang benar-benar terjadi di observasi.

Rentang nilai POD adalah antara 0 hingga 1.

$$POD = \frac{\text{Hit}}{(\text{Hit} + \text{Miss})} \quad (3.14)$$

B. FAR (*False Alarm Ratio*)

FAR memberikan gambaran tentang seberapa sering model salah prediksi (prediksi hujan, tetapi sebenarnya cerah). Semakin rendah nilai FAR, semakin baik model menghindari *False Alarm*. Nilai FAR berada di antara 0 hingga 1.

$$FAR = \frac{\text{False Alarm}}{(\text{False Alarm} + \text{Hit})} \quad (3.15)$$

C. CSI (*Critical Success Index*)

CSI memberikan gambaran yang lebih luas daripada sekedar POD dan FAR. POD yang hanya mengukur kemampuan model dalam memprediksi kejadian yang benar-benar terjadi, tidak memberikan kita informasi tentang seberapa sering model membuat *false alarm*. Sebaliknya, FAR yang hanya memberikan gambaran tentang seberapa model memprediksi hujan yang sebenarnya tidak terjadi, tidak memberikan kita informasi tentang seberapa baik model dalam memprediksi kejadian yang benar terjadi [41].

$$CSI = \frac{\text{Hit}}{\text{Hit} + \text{False Alarm} + \text{Miss}} \quad (3.16)$$

3.3.7 ROC (*Receiver Operating Characteristic Curve*)

ROC merupakan suatu metode evaluasi yang digunakan untuk melihat kemampuan model prediksi secara klasifikasi biner antara dua kondisi. Pada penelitian ini, klasifikasi biner dua kondisi yang dimaksud adalah kejadian hujan dan tidak hujan. Data observasi digunakan sebagai *ground truth*, yang sebelumnya telah dikonversi menjadi bentuk biner. Ambang batas sebagai pembentuk biner *ground truth* pada ROC dalam penelitian ini adalah >1 mm. Sedangkan ambang batas untuk membentuk biner pada model adalah nilai-nilai yang ada pada model itu sendiri. Jadi, model akan diuji binernya terhadap biner *ground truth* pada berbagai ambang batas.

Pada tahap ini, model *ensemble* yang dibangun akan dilakukan evaluasi untuk melihat performa model *ensemble* dengan pendekatan probabilistik [42]. Kurva ROC dapat dinilai berdasarkan bentuk lengkungan kurva yang terbentuk dari dua parameter. Parameter pertama adalah TPR (*True Positive Rate*) yang pada dasarnya sama dengan POD (*Probability Of Detection*).

$$True\ Positive\ Rate = POD = \frac{\text{Hit}}{(\text{Hit} + \text{Miss})} \quad (3.17)$$

Parameter kedua adalah FPR (*False Positive Rate*) yang digunakan untuk mengukur proporsi kesalahan prediksi oleh model dari kejadian *threshold* yang seharusnya berada diluar *threshold*.

$$False\ Positive\ Rate = POFD = \frac{\text{False\ Alarm}}{(\text{False\ Alarm} + \text{Correct\ Negative})} \quad (3.18)$$

Untuk menentukan ambang batas ideal dalam uji performa model, dapat dilihat dari titik-titik pada kurva atau dengan menghitung selisih antara TPR dan FPR. Nilai yang lebih besar menunjukkan model yang lebih baik pada ambang tersebut. Pendekatan ini sesuai dengan konsep *Youden's Index*, ukuran statistik yang diperkenalkan W. Youden pada 1950 untuk mengevaluasi performa tes diagnostik [43].

Nilai J berkisar 0 hingga 1, dimana nilai 1 menunjukkan performa tes diagnostik yang sempurna tanpa adanya kesalahan klasifikasi. Dalam ROC, ambang batas yang memiliki indeks J yang tertinggi dapat diartikan sebagai ambang batas yang paling optimal pada model tersebut. Dalam ROC, indeks J dapat dirumuskan sebagai:

$$J = \text{True Positive Rate} - \text{False Positive Rate} \quad (3.19)$$

Untuk menilai kinerja model secara keseluruhan, ROC dapat dievaluasi secara kuantitatif melalui AUC (*Area Under Curve*) yang mengukur luas area di bawah kurva ROC. Area ini dibandingkan dengan garis diagonal yang mewakili model tanpa kemampuan khusus (*no skill*). Jika kurva ROC berada di bawah garis diagonal, maka AUC akan lebih kecil dari 0,5, yang menunjukkan kinerja model lebih buruk atau setara dengan tebakan acak [41]. Nilai AUC dapat dihitung secara numerik menggunakan metode trapezoid melalui persamaan 3.20.

$$AUC = \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i) \cdot \frac{y_{i+1} + y_i}{2} \quad (3.20)$$

Keterangan:

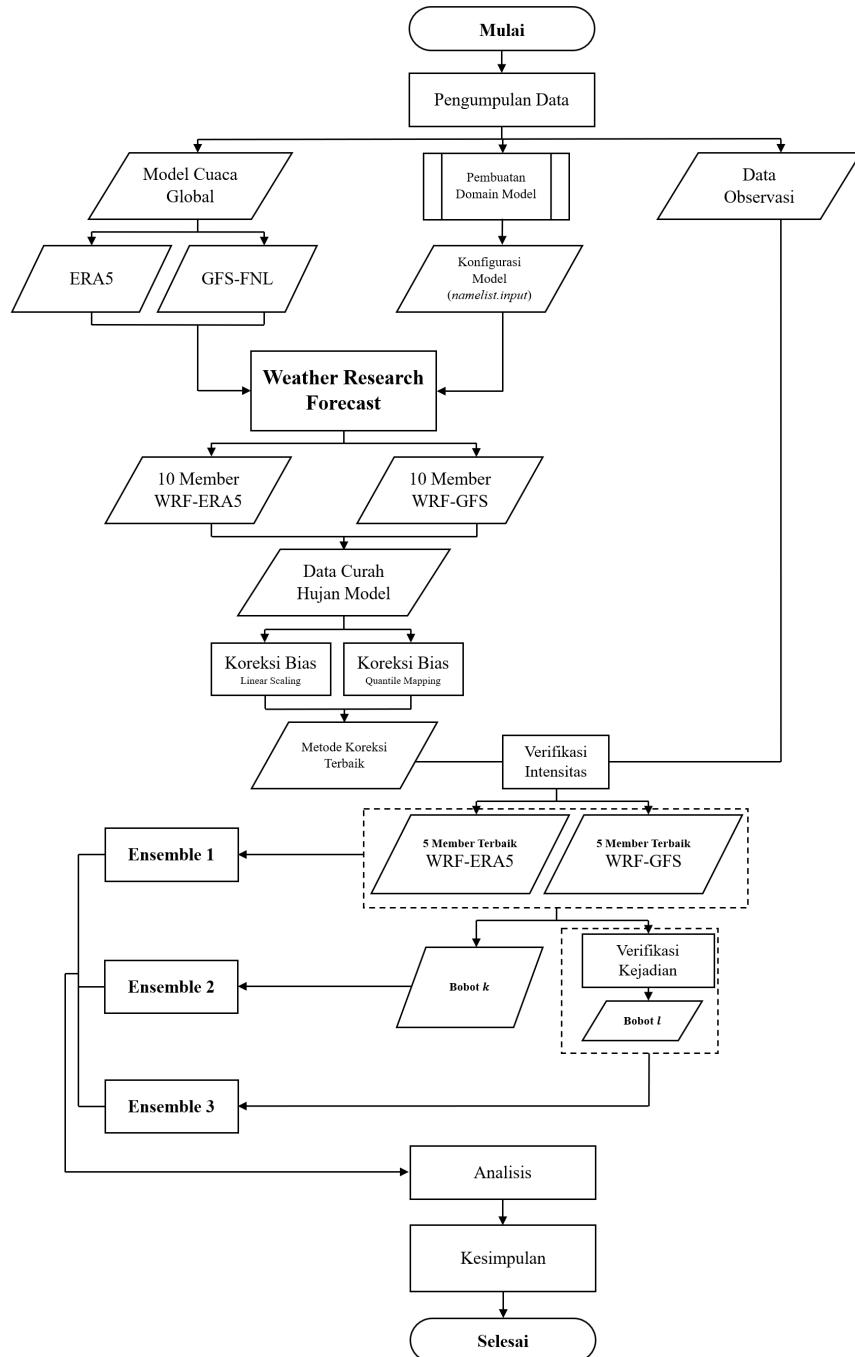
x_i = Nilai *False Positive Rate* (FPR) pada titik ke- i

y_i = Nilai *True Positive Rate* (TPR) pada titik ke- i

n = Jumlah titik *threshold* pada kurva ROC

3.4 Diagram Alir

Berikut metodologi dalam bentuk diagram alir yang merupakan gambaran proses yang akan dilakukan pada penelitian tugas akhir ini.



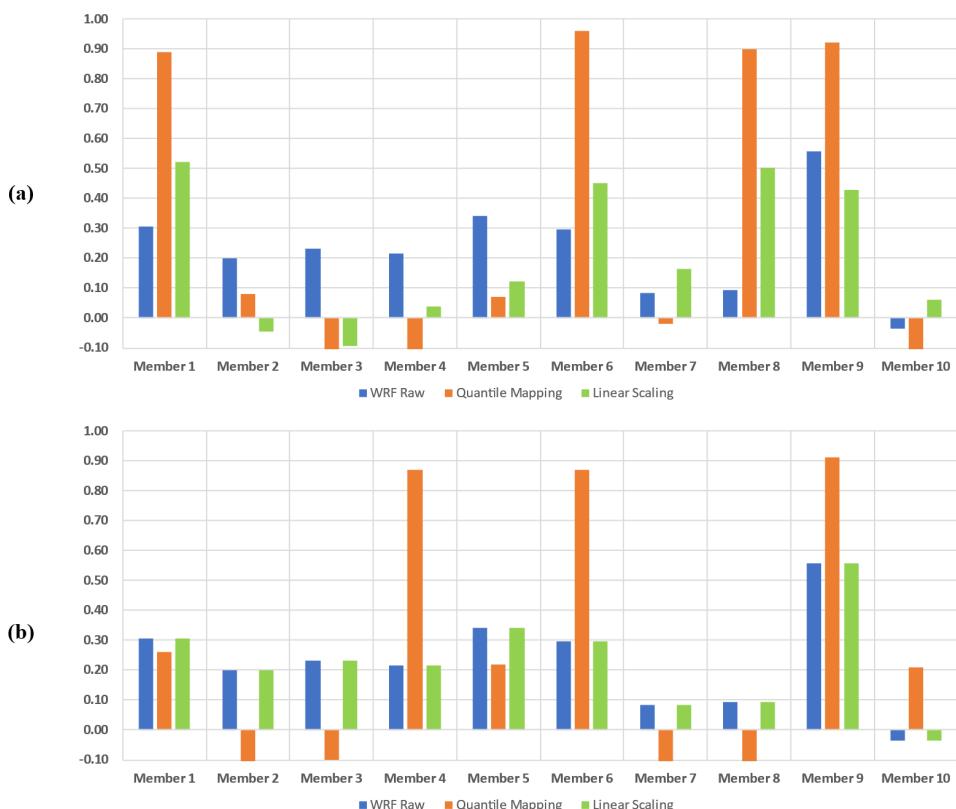
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Koreksi Bias

Kedua metode *bias correction* yang telah dibahas pada bab sebelumnya akan diimplementasikan dan dibandingkan guna menentukan metode yang paling optimal. Perbandingan dilakukan dengan meninjau nilai korelasi dan RMSE yang dihasilkan masing-masing metode koreksi. Nilai korelasi antara model mentah, metode *Quantile Mapping* dan *Linear Scaling* dapat dilihat pada Gambar 4.1.

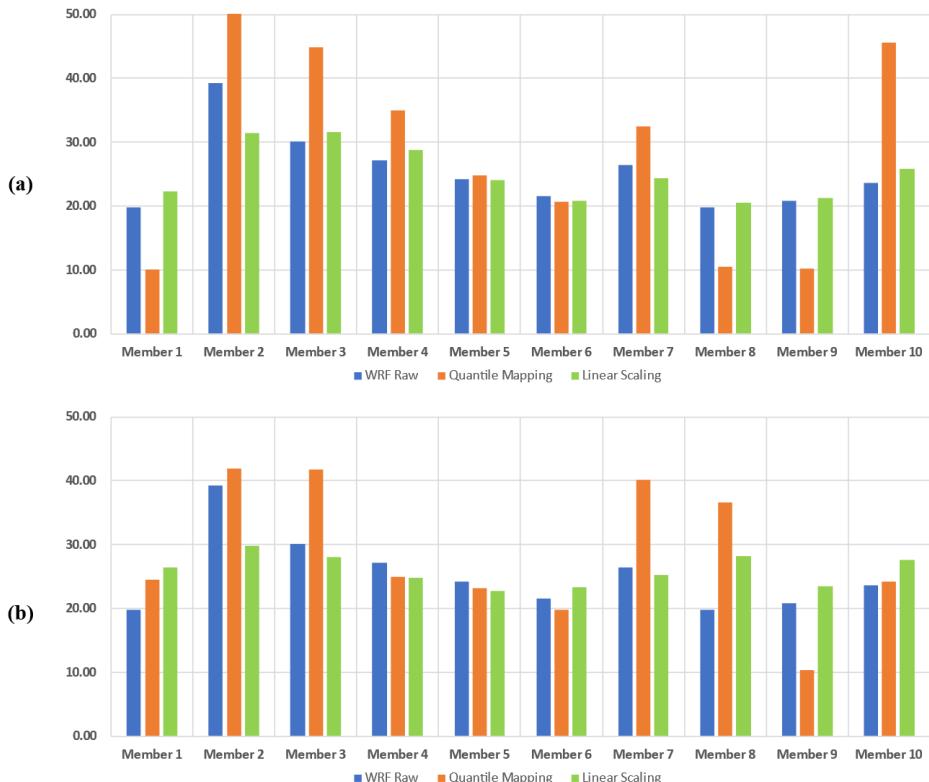


Gambar 4.1 Nilai Korelasi Setelah Bias Koreksi (a) WRF-ERA5 (b) WRF-GFS

Berdasarkan Gambar 4.1 (a), dapat dilihat bahwa nilai korelasi model dapat ditingkatkan dengan metode koreksi bias. Namun, pada beberapa model tunggal seperti member 1, 2, 3, dan lainnya, nilai korelasi model mentah justru turun pada metode *Quantile Mapping*. Berbeda dengan *Linear Scaling* yang konsisten cenderung menyamai nilai korelasi model mentah pada model-model tunggal. Pada Gambar 4.1 (b), kedua metode koreksi berhasil meningkatkan nilai korelasi model-model tunggal,

walaupun pada beberapa model tunggal, nilai korelasi justru turun atau hanya sekedar menyerupai.

Parameter selanjutnya yang perlu ditinjau adalah RMSE sebelum dan sesudah dilakukan koreksi bias. Nilai RMSE antar model mentah, metode *Quantile Mapping* dan *Linear Scaling* dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Nilai RMSE Setelah Bias Koreksi (a) WRF-ERA5 (b) WRF-GFS

Berdasarkan nilai-nilai RMSE pada Gambar 4.2, dapat disimpulkan bahwa metode *Linear Scaling* lebih baik jika dibandingkan dengan *Quantile Mapping*. Hal ini dibuktikan pada beberapa model tunggal yang dimana QM justru menaikkan nilai RMSE model tunggal. *Linear Scaling* cenderung lebih terkontrol dan mampu memberi RMSE yang lebih kecil daripada QM yang member RMSE cukup tinggi dan bahkan melebih RMSE model mentah.

Berikut merupakan nilai korelasi dan RMSE yang dirata-ratakan antara kedua metode koreksi bias. Nilai kedua parameter dirata-ratakan dengan tujuan untuk meninjau metode yang terbaik diantara keduanya, untuk kemudian digunakan pada tahap pembuatan model *Ensemble*. Nilai rata-rata r dan RMSE dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai rata-rata korelasi dan RMSE antar metode koreksi bias

Metode Bias Koreksi	r	RMSE
Linear Scaling	WRF-GFS	0.23
	WRF-ERA5	0.21
Quantile Mapping	WRF-GFS	0.27
	WRF-ERA5	0.31

Berdasarkan nilai rata-rata koefisien RMSE yang pada dasarnya ditetapkan sebagai acuan unggulnya sebuah metode, dapat dinyatakan bahwa metode *Linear Scaling* merupakan metode bias koreksi yang terbaik pada penelitian ini. Metode ini berhasil memperoleh rata-rata RMSE yang lebih kecil daripada *Quantile Mapping*. Namun, untuk koefisien korelasi dari 10 member, *Quantile Mapping* masih lebih konsisten jika dibandingkan dengan *Linear Scaling*. Keunggulan RMSE ini konsisten pada kedua data inisial WRF-GFS dan WRF-ERA5, sama halnya dengan *Quantile Mapping* yang unggul atas korelasi yang juga konsisten untuk kedua data WRF-GFS dan WRF-ERA5. Dengan demikian, model dari hasil koreksi bias *Linear Scaling* akan digunakan selanjutnya untuk membangun model *Ensemble*.

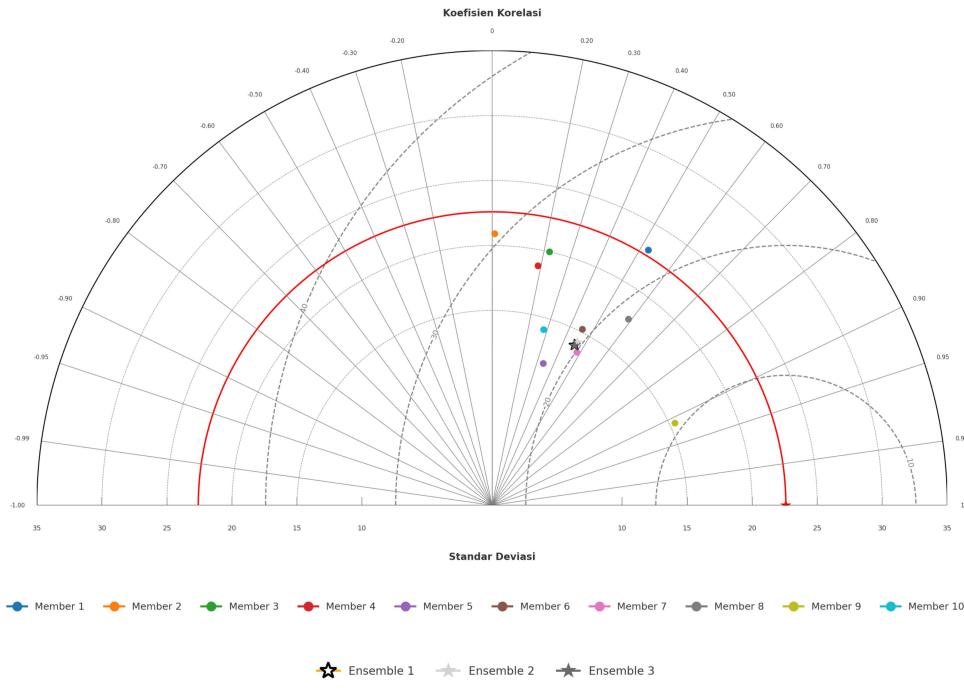
4.2 Verifikasi Intensitas Hujan Model Terhadap Observasi

Model WRF dijalankan sebanyak 10 kali untuk masing-masing data kondisi awal yang pada akhirnya menghasilkan total 20 model tunggal. Pada sub-bab ini, verifikasi akan dilakukan dengan memperhitungkan intensitas yang terdeteksi pada setiap model terhadap intensitas hujan yang terjadi pada data observasi menggunakan metode statistika seperti korelasi dan RMSE. Model-model tunggal akan dipilih atau diseleksi untuk kemudian digunakan menjadi pembobot bagi model *ensemble*.

Seleksi model tunggal dilakukan dengan memilih model-model tunggal dengan nilai $\text{RMSE} < \text{rata-rata RMSE keseluruhan}$. Koefisien korelasi dan RMSE yang dihasilkan kemudian dijadikan sebagai penyusun nilai bobot untuk *ensemble* 2 yang dapat dilihat pada Persamaan 3.4.

4.2.1 Model WRF-ERA5

Data kondisi awal dari ERA5 terdiri atas data permukaan dan data per level tekanan yang digabungkan pada proses WPS (*WRF Preprocessing System*) sebelum dijalankan pada model WRF. Data mentah kemudian dikoreksi bias menggunakan metode *Linear Scaling*. Hasil verifikasi 10 model tunggal WRF-ERA5 beserta *Ensemble* 2 dan *Ensemble* 3 ditampilkan pada Diagram Taylor (Gambar 4.3).



Gambar 4.3 Diagram Taylor Uji Verifikasi Model WRF-ERA5

Melalui diagram Taylor, dapat dilihat sebaran model berdasarkan nilai korelasi dan standar deviasi yang dimiliki tiap-tiap member terhadap data observasi. Model-model *ensemble* yang dibangun dengan model-model terbaik berada di rentang korelasi 0,40 hingga 0,50. Hal ini menandakan bahwa model *ensemble* tidak terlalu jauh berbeda satu sama lain. Terlihat pada diagram Member 9 yang paling baik dengan korelasi melebihi 0,90.

Nilai rata-rata seluruh RMSE di WRF-ERA5 ini adalah 25.10. Member-member terbaik dengan nilai RMSE < 25.10 dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Model Tunggal WRF-ERA5 Terbaik Berdasarkan Nilai RMSE

Member	r	RMSE	Parameterisasi	
			Cumulus	Microphysics
Member 1	0.52	22.31	-	WSM 6
Member 5	0.34	24.09	Kain-Fritsch	WSM3
Member 6	0.46	20.80	Betts-Miller-Janjic	Lin Purdue
Member 7	0.48	24.32	Kain-Fritsch	Eta Ferier
Member 8	0.59	20.58	Modified-Tiedtke	Morrison
Member 9	0.91	21.23	Betts-Miller-Janjic	WSM 6

Berdasarkan member-member terbaik, dapat dilihat bahwa parameterisasi WSM 6 dan Kain-Fritsch muncul masing-masing 2 kali sebagai member terbaik. WSM6 pada member 9 bahkan memperoleh korelasi hingga 0.91 yang dapat diambil kesimpulan bahwa parameterisasi WSM6 dan Kain-Fritsch cukup cocok untuk wilayah penelitian ini.

Skema WSM 6 sendiri dijelaskan oleh Hong dan Lim (2006), memperhitungkan enam kelas hidrometeor seperti graupel yang berperan penting dalam merepresentasikan proses mikrofisika awan secara lebih realistik dalam lingkungan yang lembap dan hangat seperti di wilayah tropis [44]. Graupel merupakan bentuk presipitasi beku yang terbentuk ketika tetesan air cair pada suhu di bawah 0°C membeku di permukaan partikel salju atau es di atmosfer. Dalam wilayah tropis seperti Lampung, proses pembentukan graupel di lapisan atas awan bisa memicu atau memperkuat hujan konvektif di bawahnya [45]. Hal ini menjadi alasan kenapa WSM6 yang menghitung graupel bisa memberi simulasi curah hujan yang lebih baik.

Sedangkan Skema Kain-Fritsch dikembangkan oleh Kain dan Fritsch (1990) untuk merepresentasikan konveksi terorganisir secara parameterisasi, dengan mempertimbangkan proses naiknya udara lembap secara cepat, pelepasan latent, dan peluruhan awan. Skema ini memicu konveksi berdasarkan ketidakstabilan atmosfer dan memperhitungkan pelepasan panas latent serta proses peluruhan awan hujan, sehingga mampu menangkap perkembangan hujan konvektif dengan lebih realistik [46]. Inilah yang membuat skema KF efektif dalam mensimulasikan hujan di daerah tropis. Member-member terbaik ini selanjutnya digabung untuk membuat bobot k untuk membangun *ensemble* 2 yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

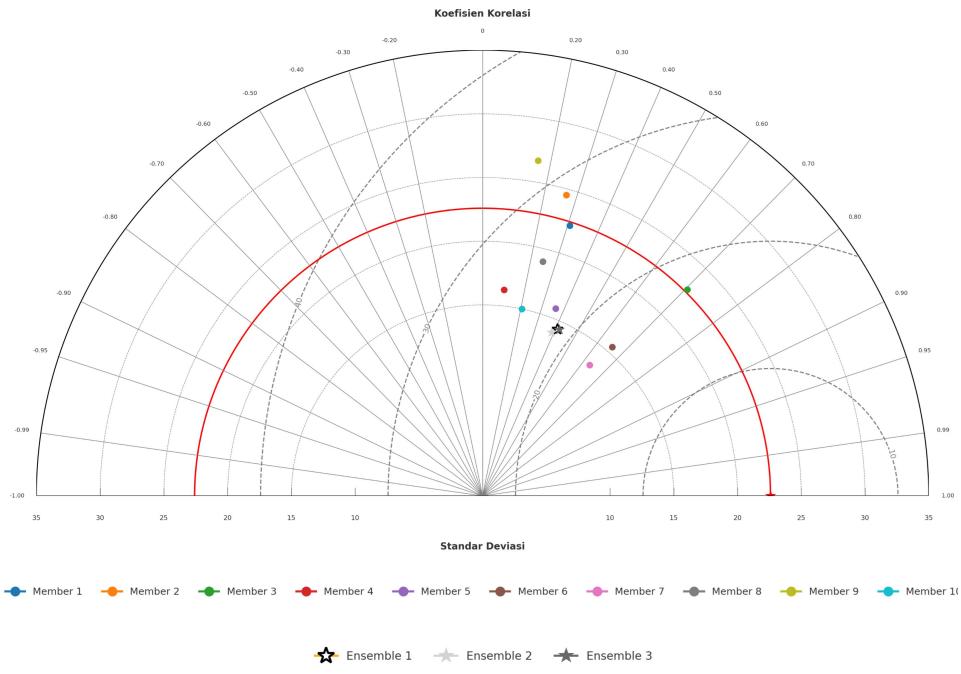
Tabel 4.3 Bobot k model-model terbaik pada WRF-ERA5

Member	Bobot k
Member 1	0.159
Member 5	0.130
Member 6	0.151
Member 7	0.152
Member 8	0.171
Member 9	0.237

Model-model *ensemble* 2 WRF-ERA5 ini telah disertakan pada verifikasi statistik yang dapat dilihat pada Gambar 4.3, serta verifikasi metrik yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a).

4.2.2 Model WRF-GFS

Berbeda seperti data ERA5, data GFS tidak terdiri atas 2 data berbeda melainkan langsung pada 1 data yang sama yang berisikan data permukaan dan data per level tekanan. Sama seperti WRF-ERA5, data luaran model mentah dilakukan bias koreksi dengan metode terpilih yaitu *Linear Scaling*. Hasil verifikasi 10 model tunggal WRF-GFS dengan *Ensemble* 2 dan *Ensemble* 3 yang telah disertakan dapat dilihat pada Diagram Taylor pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Diagram Taylor Uji Verifikasi Model WRF-GFS

Pada Gambar 4.4, dapat dilihat posisi model-model *Ensemble* yang berdekatan hingga berhimpitan. Hal ini mirip dengan yang terjadi pada WRF-ERA5 yang juga memiliki pola serupa pada model-model *Ensemblenya*. Model-model *Ensemble* pada WRF-GFS juga berada pada korelasi sekitar 0,40 yang tidak jauh berbeda dari model *Ensemble* di WRF-ERA5. Member tunggal terbaik pada WRF-GFS ini ialah member 3 dengan korelasi di sekitar 0,70 dengan standar deviasi sangat mendekati observasi dengan nilai 22,81, sedangkan observasi sebesar 22,58. Member lainnya yang mendekati nilai standar deviasi observasi ialah member 1 dengan standar deviasi 22,31.

Nilai rata-rata seluruh RMSE di WRF-GFS ini adalah 25,95. Beberapa member terbaik dengan nilai RMSE < 25,95 dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Model Tunggal WRF-GFS Terbaik Berdasarkan Nilai RMSE

Member	Korelasi (r)	RMSE	Parameterisasi	
			Cumulus	Microphysics
Member 4	0.10	24.82	Tiedtke	WSM 6
Member 5	0.36	22.72	Kain-Fritsch	WSM3
Member 6	0.66	23.28	Betts-Miller-Janjic	Lin Purdue
Member 7	0.63	25.21	Kain-Fritsch	Eta Ferier
Member 9	0.16	23.43	Betts-Miller-Janjic	WSM 6

Sama halnya yang terjadi di WRF-ERA5, parameterisasi mikrofisika WSM6 dan kumulus Kain-Fritsch kembali muncul sebagai model tunggal terbaik. Hal ini mempertegas akan kecocokan opsi parameterisasi ini dengan lokasi penelitian tugas akhir ini. Parameterisasi ini dapat disarankan pada penelitian atau simulasi yang mirip pada masa mendatang.

Member-member terbaik ini selanjutnya digabung untuk membuat bobot k untuk membangun *ensemble* 2 yang dapat dilihat pada tabel 4.5.

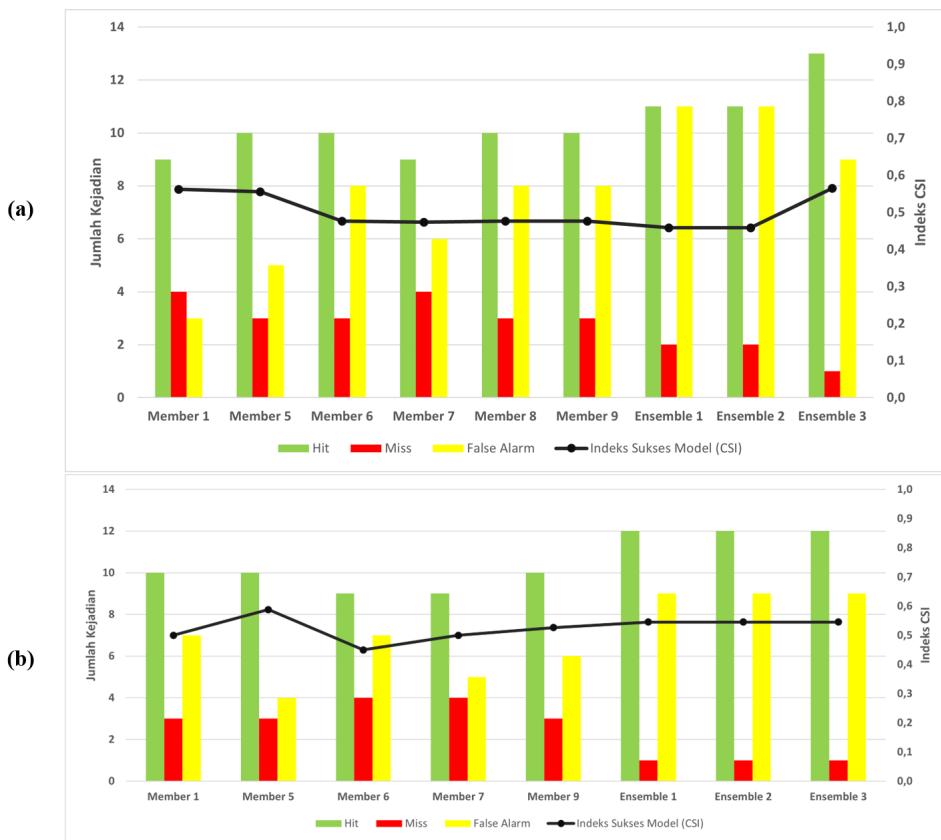
Tabel 4.5 Bobot k model-model terbaik pada WRF-GFS

Member	Bobot k
Member 1	0.120
Member 5	0.190
Member 6	0.266
Member 7	0.257
Member 9	0.167

Model-model *ensemble* 2 WRF-GFS ini telah disertakan pada verifikasi statistik yang dapat dilihat pada Gambar 4.4, serta verifikasi metrik yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a).

4.3 Verifikasi Kejadian Hujan Model Terhadap Observasi

Pada verifikasi ini, model akan diuji terkait seberapa baik model tersebut dalam mendeteksi kejadian hujan, tanpa memperhitungkan intensitas yang spesifik. Observasi dan model dianggap hujan ketika nilai berada diatas 0.1 milimeter. Hasil verifikasi kejadian hujan model WRF-ERA5 dan WRF-GFS dapat dilihat pada Gambar 4.5



Gambar 4.5 Uji Kejadian Hujan (*Hit, Miss, False Alarm*) (a) WRF-ERA5 (b) WRF-GFS

Pada WRF-ERA5 (a), CSI tertinggi terdapat pada model *Ensemble 3*, dengan nilai mendekati 0.6. Hal ini menunjukkan bahwa metode penggabungan menggunakan bobot berdasarkan FAR-POD memberikan hasil paling seimbang dalam prediksi hujan. Jika dilihat lebih dalam, model *Ensemble 3* memiliki jumlah *hit* yang sangat tinggi (> 12), sementara jumlah *miss* tetap rendah dan *false alarm*-nya tidak sebanyak model *ensemble* lainnya. Artinya, metode *ensemble* ini bukan hanya sensitif dalam mendekripsi hujan, tetapi juga cukup selektif sehingga tidak terlalu sering memberi informasi hujan yang sebenarnya tidak ada hujan. Kombinasi inilah yang menjadikan model *ensemble* ini memiliki CSI paling unggul.

Pada WRF-GFS (b), CSI tertinggi diperoleh oleh member 5, dengan nilai sedikit di atas 0.6 yang bahkan lebih tinggi dari semua metode ensemble. Artinya, dalam skenario ini, salah satu anggota individu justru bekerja lebih baik daripada hasil gabungan model. Hal ini memberi gambaran bahwa tidak ada satu pendekatan yang selalu unggul, dan perlu penyesuaian terhadap karakteristik model dasar yang digunakan.

Setelah memperoleh nilai-nilai parameter seperti *hit*, *miss*, dan *false alarm*, maka bobot l yang menjadi dasar dalam membangun model *ensemble* 3 dapat dihitung. Dari 3 parameter yang ada pada diagram, dapat dilakukan perhitungan POD dan FAR yang merupakan dasar untuk membangun bobot l . Nilai bobot l dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Bobot l model-model terbaik pada WRF-GFS dan WRF-ECMWF

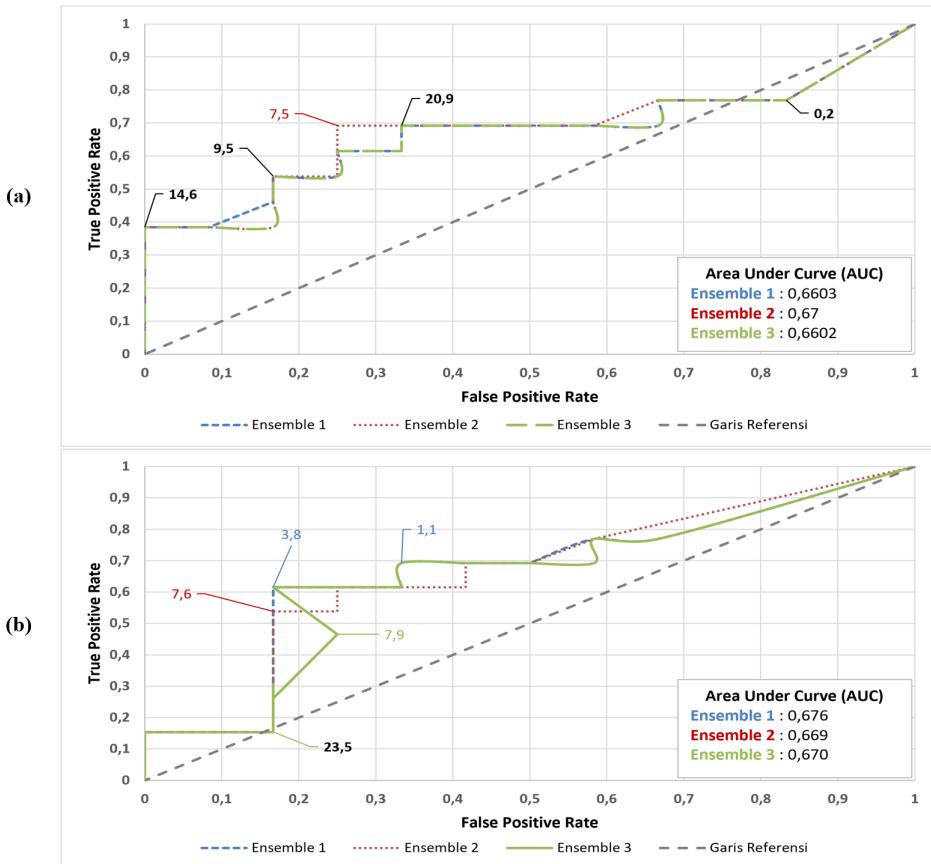
Model	Member	Bobot l
WRF-GFS	Member 1	0.202
	Member 5	0.210
	Member 6	0.189
	Member 7	0.195
	Member 9	0.204
WRF-ERA5	Member 1	0.167
	Member 5	0.172
	Member 6	0.167
	Member 7	0.160
	Member 8	0.167
	Member 9	0.167

Model-model *ensemble* 3 (WRF-GFS dan WRF-WRF-ERA5) yang dibangun dengan bobot l telah disertakan pada verifikasi statistik maupun metrik yang dapat dilihat pada bab-bab sebelumnya.

4.4 ROC (*Receiver Operating Characteristic*)

Pada tahap ini, model *ensemble* yang telah dibangun akan diuji kemampuannya dengan cara *binary classifier*. Pada kurva ROC ini, observasi sebagai *ground truth* akan dianggap hujan jika nilai curah hujan $>0,1$ mm. Skor model akan diuji pada tiap ambang batas. Masing-masing ambang batas juga akan dilakukan perhitungan indeks J yang dapat dilihat pada Bab Lampiran C, untuk melihat ambang batas yang optimal pada model tersebut. Jika indeks J semakin mendekati 1, semakin optimal pula ambang batas pada model tersebut.

Pada plot, *marker* yang diberi label ambang batasnya adalah ambang batas dengan indeks J yang dianggap optimal yang merupakan 5 tertinggi dari seluruh nilai indeks J yang ada. Hasil analisis ROC dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik ROC Model-model *ensemble* (a)WRF-ERA5 (b) WRF-GFS

Berdasarkan Gambar 4.6 (a), dapat dilihat ketiga model *ensemble* dari WRF-ERA5 memiliki nilai AUC masing-masing berada pada kisaran 0,6603 hingga 0,67. AUC ini menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan klasifikasi yang berada pada kategori sedang. Nilai AUC ini sedikit lebih kecil jika dibanding dengan nilai AUC yang dimiliki WRF-GFS yang bisa dilihat pada Gambar 4.6 (b). Nilai AUC WRF-GFS sendiri berada di 0,669 - 0,676. Perbedaan AUC yang sangat tipis, yang menandakan kedua model bekerja lebih baik dibanding tebakan acak, namun belum sepenuhnya andal dalam memisahkan kejadian hujan dan tidak hujan.

Pada grafik, beberapa *threshold* yang ditampilkan merupakan *threshold* yang memiliki kombinasi TPR yang tinggi dan FPR yang rendah, atau dalam istilah evaluasi disebut sebagai *threshold optimal* karena nilai Indeks J (TPR - FPR) nya termasuk dalam empat tertinggi daripada nilai indeks J ambang batas yang diuji lainnya yang dapat dilihat pada Lampiran.

Pada model WRF-ERA5, nilai-nilai *threshold* seperti 14,6 mm, 9,5 mm, dan 7,5

mm relatif lebih besar jika dibandingkan dengan *threshold* pada model WRF-GFS yang optimalnya berada di 7,6 mm, 3,8 mm, 1,1 mm, dan 0,2 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa model WRF-ERA5 lebih yakin untuk menetapkan ambang yang lebih tinggi untuk menyatakan bahwa hujan akan terjadi. Hal ini dapat diartikan bahwa WRF-ERA5 memiliki kecenderungan untuk mengenali kejadian hujan yang lebih intens, sehingga lebih cocok digunakan dalam konteks prakiraan untuk hujan sedang hingga lebat. Sebaliknya, pada model WRF-GFS, *threshold* optimal justru berada pada *threshold* yang lebih kecil. Misalnya, *threshold* 1,1 mm pada *Ensemble* 1 dan 3,8 mm pada *Ensemble* 3 menunjukkan posisi strategis di bagian atas kurva, dengan TPR tinggi namun FPR tetap terjaga. Ini memperlihatkan bahwa model dengan data awal GFS memiliki kemampuan lebih baik dalam mendekripsi hujan ringan, dan bisa menjadi pilihan jika prakiraan diarahkan untuk menangkap hujan-hujan kecil hingga sedang.

Namun, tidak semua titik yang ditandai merupakan *threshold* yang baik. Beberapa *threshold* seperti 0,2 mm di WRF-ERA5 dan 23,5 mm di WRF-GFS justru berada di bawah garis referensi diagonal. Ini artinya, pada ambang batas tersebut, model menghasilkan FPR yang tinggi tetapi TPR yang rendah, atau dalam kata lain, model sering "salah menebak" dan gagal mendekripsi kejadian hujan yang nyata. Dalam pengukuran Indeks J, titik-titik ini cenderung menghasilkan nilai negatif atau sangat rendah.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil penelitian ini, didapat kesimpulan sebagai berikut:

1. WRF-GFS 9 merupakan model terbaik dalam mendeteksi curah hujan secara statistik, sedangkan WRF-GFS 8 terbaik dalam mendeteksi kejadian hujan secara metrik.
2. Parameterisasi mikrofisik WSM 6 sesuai untuk area Lampung, khususnya ITERA, dalam mendeteksi curah hujan, yang ditunjukkan dengan munculnya beberapa kali model tunggal sebagai member terbaik.
3. Dalam hal RMSE, *Linear Scaling* lebih unggul dalam koreksi bias, sedangkan pada korelasi, *Quantile Mapping* mampu meningkatkan nilai korelasi meskipun tidak konsisten. QM lebih mampu menangkap variabilitas temporal, sementara LS menghasilkan RMSE lebih rendah karena koreksi hanya pada nilai rata-rata sehingga simpangan data lebih kecil. QM mengoreksi pada semua quantile, sehingga beberapa data dapat memiliki simpangan besar, terutama pada nilai ekstrim.
4. Teknik *ensemble* cenderung berhimpit pada kurva ROC, menunjukkan perbedaan ketiga teknik relatif kecil dan memerlukan kajian lanjutan.
5. Pada pengujian threshold ROC, WRF-GFS lebih baik pada ambang $< 10 \text{ mm}$, sedangkan WRF-ERA5 lebih baik pada ambang $> 10 \text{ mm}$.

5.2 Saran

Hal-hal penting terkait pelaksanaan penelitian yang perlu diperhatikan di masa mendatang adalah

1. Pada penelitian di masa mendatang dengan lokasi penelitian yang sama, parameterisasi mikrofisik WSM 6 merupakan parameterisasi yang sebaiknya digunakan karena hal-hal yang telah dijelaskan pada bab Hasil dan Pembahasan.
2. Pada koreksi bias, variasi lain dari *Quantile Mapping* dapat digunakan seperti Metode parametrik (distribusi), non parametrik, koreksi nol dan koreksi ekstrim.
3. Penelitian serupa dapat dilakukan dengan menambah variasi parameter atmosfer seperti arah angin, CAPE, dan lain sebagainya, sehingga dapat mensimulasikan kejadian atmosfer yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Juleha, “Analisa metode intensitas hujan pada stasiun hujan rokan iv koto, ujung batu, dan tandun mewakili ketersediaan air di sungai rokan”, Undergraduate thesis, Universitas Pasir Pengaraian, 2016.
- [2] E. Ginting, “Uji sensitivitas model wrf arw dalam prediksi kejadian hujan di wilayah bandar lampung dengan menggunakan metode ensemble”, Online. Available: <https://repository.itera.ac.id/depan/submit/SB2206160062>, Undergraduate thesis, ITERA, 2022.
- [3] W. Wang dkk., *User's guide for weather research and forecast (wrf) modeling system version 2*, Online. Available: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/>, 2007.
- [4] M. Kumar, B. Kosović, H. Nayak, W. Porter, J. Randerson, dan T. Banerjee, “Evaluating the performance of wrf in simulating winds and surface meteorology during a southern california wildfire event”, *Frontiers in Earth Science*, vol. 11, hlmn. 1 305 124, 2024.
- [5] A. Deppe, W. Gallus, dan E. Takle, “A wrf ensemble for improved wind speed forecasts at turbine height”, *Weather and Forecasting*, vol. 28, no. 1, hlmn. 212–228, 2013.
- [6] E. Tarbuck dan F. Lutgens, *The Atmosphere: An Introduction To Meteorology*. Prentice Hall, 1979.
- [7] J. Wallace dan P. Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Elsevier, 2006, vol. 92.
- [8] S. Fauziah. “Kategori hujan menurut bmkg”. Accessed: Jan. 27, 2025. (2025), sumber: https://www.academia.edu/36677767/Kategori_Hujan_menurut_BMKG.
- [9] A. Pratama, H. Agiel, dan A. Oktaviana, “Evaluasi satellite precipitation product (gsmap, chirps, dan imerg) di kabupaten lampung selatan”, *Jurnal Science and Applied Technology*, vol. 6, no. 1, hlmn. 32–40, 2022.
- [10] T. Hadi, L. Satrya, M. Santriyami, M. Anugrah, D. Octarina, dan I. Junnaedhi, *Pelatihan model wrf(weather research and forecasting)*, 2011.
- [11] D. Stensrud, *Parameterization Schemes: Keys To Understanding Numerical Weather Prediction Models*. Cambridge University Press, 2007.

- [12] R. Stull, “Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science”, di dalam University of British Columbia, 2017, Bab. 20, hlmn. 667–712, University of British Columbia. sumber: https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/prmet102/Ch20-nwp-v102.pdf.
- [13] G. Fosser, E. Kendon, D. Stephenson, dan S. Tucker, “Convection-permitting models offer promise of more certain extreme rainfall projections”, *Geophysical Research Letters*, vol. 50, no. 13, e2020GL088151, 2020.
- [14] J. Coiffier, *Fundamentals Of Numerical Weather Prediction*. Cambridge University Press, 2011.
- [15] A. Muttaqin, “Utilization of nwp model outputs for short-range weather forecast”, Universitas Gadjah Mada, 2011.
- [16] K. Pabreja, “Clustering technique to interpret numerical weather prediction output products for forecast of cloudburst”, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 3, hlmn. 2996–2999, Mei 2012.
- [17] N. Hesty dan T. Hadi, “Reanalisis weather research and forecast-four dimension data assimilation (wrf-fdda) untuk meningkatkan akurasi estimasi potensi energi angin di daerah lepas pantai (studi kasus: Pantai selatan jawa barat)”, *Jurnal Sains Dirgantara*, vol. 13, no. 1, 2015.
- [18] W. Skamarock dkk., “A description of the advanced research wrf version 3”, NCAR Technical Note, tech. rep. 125, 2008, hlmn. 10–5065.
- [19] M. Djakaria, “Uji skema parameterisasi mikrofisik (wsm3, wsm6 dan thompson) dengan verifikasi radar untuk simulasi fenomena hujan es (jakarta, 22 november 2018)”, Sekolah Tinggi Meteorologi Kimatologi Dan Geofisika, 2019.
- [20] R. Mahubessy dan D. Purnama, “Uji skema parameterisasi kumulus untuk prediksi hujan penyebab banjir di kota ambon tanggal 11 juli 2021”, di dalam *Call For Paper BMKG Maluku*, OSF, Apr. 2022.
- [21] J. Dudhia, “Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 46, no. 20, hlmn. 3077–3107, 1989.
- [22] M. Ikranegara dan A. Fadlan, “Uji peforma skema parameterisasi model wrf di wilayah bandara soekarno hatta”, *Jurnal Aplikasi Meteorologi*, vol. 2, no. 1, hlmn. 22–32, 2023.

- [23] A. Fadianika dan H. Hariadi, “Uji sensitivitas skema parameterisasi cumulus untuk prediksi hujan di wilayah jawa timur”, *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, vol. 11, no. 1, hlmn. 6–14, 2015.
- [24] R. Putra dan P. Wahyudi, *Evaluating cumulus parameterization of wrf to simulate upper air condition*, 2019.
- [25] A. Arbain, M. Kudsy, dan M. Syaifullah, “Pemodelan atmosfer dengan wrf pada kejadian banjir jakarta 17 januari 2013”, *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, vol. 14, hlmn. 29–33, Juni 2013.
- [26] S. Collins, R. James, P. Ray, K. Chen, A. Lassman, dan J. Brownlee, “Grids in numerical weather and climate models”, di dalam *Climate Change and Regional/Local Responses*, InTech, Mei 2013.
- [27] ECMWF, *Ifs documentation cy47rl*, <https://www.ecmwf.int/en/publications/ifs-documentation>, diakses melalui ECMWF, 2020.
- [28] NCEP, *Gfs global forecast system [data set]*, <https://nomads.ncep.noaa.gov/>, NOAA National Operational Model Archive and Distribution System, 2015.
- [29] F. Muhammad, S. Oktariyanto, F. Maharani, dan R. Pratiwi, “Perencanaan ruang terbuka hijau dengan konsep eco-culture di kawasan kampus institut teknologi sumatera”, *Jurnal Arsitektur Desain dan Lingkungan*, vol. 4, no. 1, hlmn. 40–51, 2023.
- [30] National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce, *Ncep fnl operational model global tropospheric analyses, continuing from july 1999*, Boulder CO, 2000. sumber: <https://rda.ucar.edu/datasets/dsd083002/>.
- [31] H. Hersbach, “The era5 atmospheric reanalysis”, di dalam *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2016, NG33D–01.
- [32] R. Ariyanti, F. Sugihartati, W. Retharanita, dan P. Winarso, “Uji keakuratan data gfs menggunakan model wrf-arw pada siklon tropis flamboyan”, *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, vol. 3, no. 2, hlmn. 62–74, 2019.
- [33] C. Teutschbein dan J. Seibert, “Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods”, *Journal of Hydrology*, vol. 456, hlmn. 12–29, 2012.

- [34] L. Gudmundsson, J. Bremnes, J. Haugen, dan T. Engen-Skaugen, “Technical note: Downscaling rcm precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 9, hlmn. 3383–3390, 2012.
- [35] J. Murphy, “The impact of ensemble forecasts on predictability”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 114, no. 480, hlmn. 463–493, 1988.
- [36] Z. Toth dan E. Kalnay, “Ensemble forecasting at nmc: The generation of perturbations”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 74, no. 12, hlmn. 2317–2330, 1993.
- [37] T. Petroliagis, R. Buizza, A. Lanzinger, dan T. Palmer, “Potential use of the ecmwf ensemble prediction system in cases of extreme weather events”, *Meteorological Applications*, vol. 4, no. 1, hlmn. 69–84, 1997.
- [38] I. Sofiati dan A. Nurlatifah, “The prediction of rainfall events using wrf (weather research and forecasting) model with ensemble technique”, di dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2019, hlmn. 12 036.
- [39] P. Sedgwick, “Pearson’s correlation coefficient”, *BMJ*, vol. 345, 2012.
- [40] K. Taylor, “Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 106, no. D7, hlmn. 7183–7192, 2001.
- [41] NOAA Space Weather Prediction Center. “Forecast verification glossary”. Accessed: May 01, 2025. (2025), sumber: <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Forecast%20Verification%20Glossary.pdf>.
- [42] N. Rahma dan J. Paski, “Perbandingan teknik warm dan cold start pada model wrf-3dvar asimilasi data radar pada prediksi hujan lebat di wilayah surabaya dan sekitarnya”, *J. Sains Teknol. Modif. Cuaca*, vol. 21, no. 1, hlmn. 13–21, 2020.
- [43] J. Youden, “Index for rating diagnostic tests”, *Cancer*, vol. 3, no. 1, hlmn. 32–35, 1950.
- [44] S.-Y. Hong, “The wrf single-moment 6-class microphysics scheme (wsm6)”, *Journal of the Korean Meteorological Society*, vol. 42, hlmn. 129–151, Juni 2006.

- [45] H. Bai dan E. Abdullah, “Formation of nocturnal offshore rainfall near the west coast of sumatra: Land breeze or gravity wave?”, *Monthly Weather Review*, vol. 149, no. 3, hlmn. 715–731, 2021.
- [46] J. Kain dan J. Fritsch, “Convective parameterization for mesoscale models: The kain-fritsch scheme”, di dalam *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*, Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, hlmn. 165–170.

LAMPIRAN

