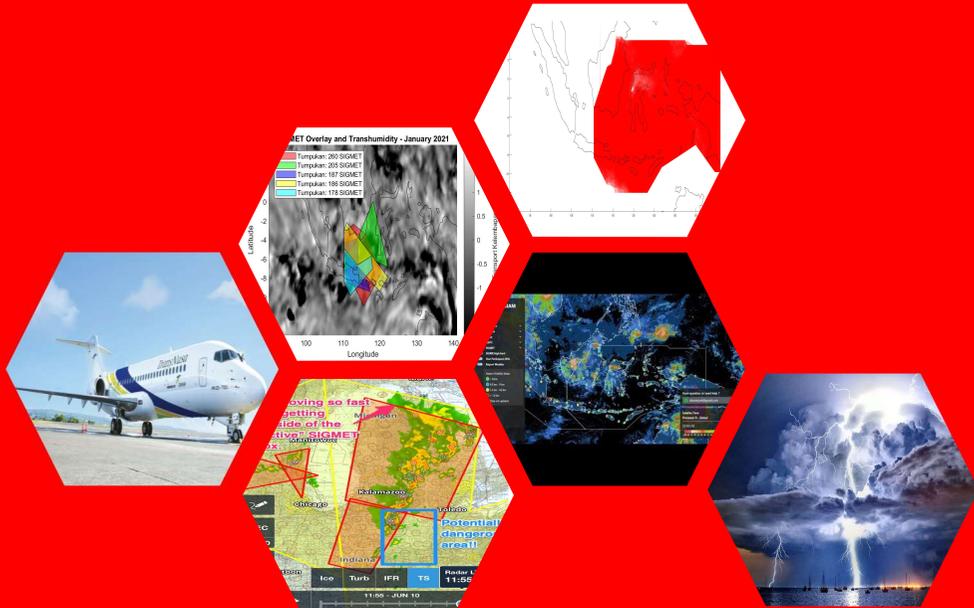


# **ANALISIS DAN VERIFIKASI SIGNIFIKAN METEOROLOGI (SIGMET) DI WILAYAH PENERBANGAN INDONESIA TIMUR PADA MUSIM HUJAN**



**MUHLIS**

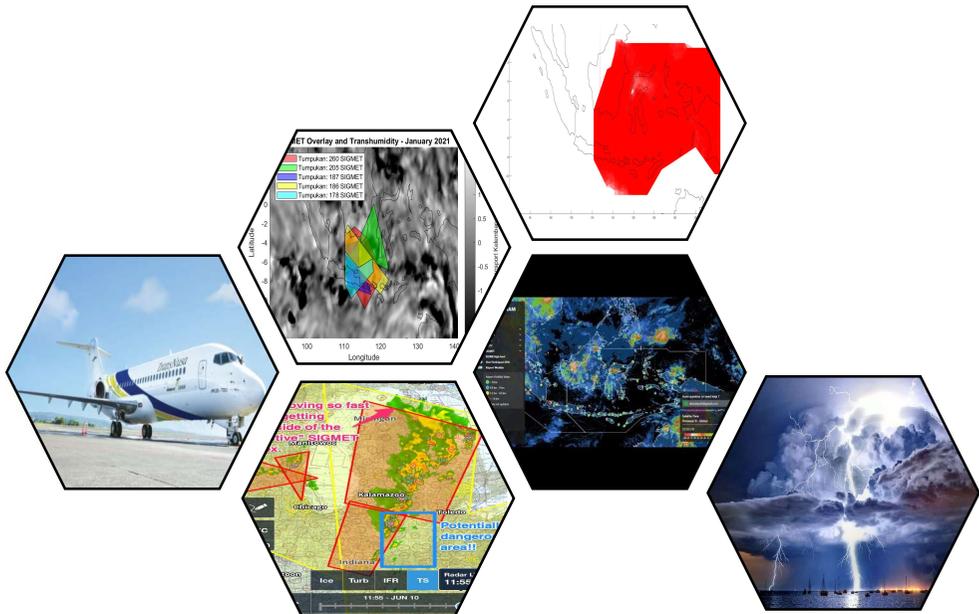
**H061211078**



**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2024**

# ANALISIS DAN VERIFIKASI SIGNIFICANT METEOROLOGI (SIGMET) DI WILAYAH PENERBANGAN INDONESIA TIMUR PADA MUSIM HUJAN



MUHLIS

H061211078



PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR

2024

**ANALISIS DAN VERIFIKASI SIGNIFIKAN METEOROLOGI (SIGMET) DI WILAYAH  
PENERBANGAN INDONESIA TIMUR PADA MUSIM HUJAN**

MUHLIS  
H061211078

Skripsi

Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Geofisika

Pada

**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR**

**2024**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**SKRIPSI**

**ANALISIS DAN VERIFIKASI SIGNIFIKAN METEOROLOGI (SIGMET) DI WILAYAH  
PENERBANGAN INDONESIA TIMUR PADA MUSIM HUJAN**

**MUHLIS**  
**H061211078**

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Xxxx pada tanggal bulan tahun dan  
dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan  
pada

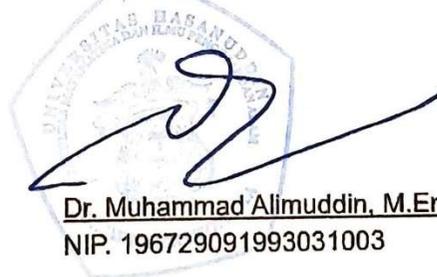
Program Studi Geofisika  
Departemen Geofisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Hasanuddin  
Makassar

Mengesahkan  
Pembimbing Tugas Akhir,



Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc.  
NIP. 196303151987101001

Mengetahui:  
Ketua Program Studi,



Dr. Muhammad Alimuddin, M.Eng.  
NIP. 196729091993031003

## PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "Analisis dan verifikasi signifikan meteorologi (SIGMET) di wilayah penerbangan Indonesia timur pada musim hujan" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 30 Januari 2025



Muhlis

NIM H061211013

## Ucapan Terima Kasih

Puji syukur yang tak terhingga saya panjatkan ke hadirat Allah Swt., atas rahmat dan rida-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini meskipun menghadapi berbagai tantangan. Setiap proses yang saya lalui bukanlah perjalanan yang mudah, namun dengan izin-Nya, semua rintangan dapat terlewati, dan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Saya menyadari bahwa karya ini masih jauh dari kesempurnaan, tetapi dengan dukungan dari berbagai pihak, insyaallah skripsi ini dapat menjadi sesuatu yang bermanfaat. Saya ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada keluarga saya, terutama kepada kedua orang tua tercinta, Ayah dan Ibu, yang telah menjadi pilar utama dalam kehidupan saya. Mereka bukan hanya memberikan dukungan finansial, tetapi lebih dari itu, mereka adalah sumber kekuatan dan doa yang tak pernah putus. Tak lupa, saya juga berterima kasih kepada kedua kakak laki-laki saya, yang dengan segala bentuk fasilitas dan dukungannya telah menciptakan lingkungan yang nyaman bagi saya dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya juga saya sampaikan kepada pembimbing saya, **Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc.**, atas bimbingan, arahan, serta ilmu yang beliau berikan dengan penuh kesabaran. Setiap masukan yang beliau sampaikan bukan hanya membangun skripsi ini, tetapi juga membentuk karakter dan pola pikir saya dalam menghadapi tantangan akademik maupun kehidupan.

Saya juga mengucapkan terima kasih kepada para penguji, **Dr. Muh Hamzah S, S.Si., MT.**, dan **Bapak Andika, S.Si., M.Si.**, atas kritik, saran, serta wawasan yang sangat berharga dalam penyempurnaan tugas akhir ini. Ujian dan diskusi bersama mereka telah memperluas cara pandang saya dalam melihat suatu permasalahan secara lebih mendalam dan sistematis.

Tak lupa, penghargaan setinggi-tingginya saya sampaikan kepada staf tata usaha, **Pak Putra dan Pak Anto**, yang dengan kesabaran dan ketulusannya telah membantu dalam proses administrasi, sehingga seminar dan ujian skripsi ini dapat berjalan dengan lancar.

Akhir kata, saya berharap skripsi ini dapat menjadi sumbangsih kecil bagi ilmu pengetahuan dan bermanfaat bagi siapa saja yang membutuhkannya. Semoga Allah Swt. membalas segala kebaikan yang telah diberikan oleh semua pihak yang telah membantu saya dalam perjalanan ini.

Penulis,  
  
Muhhs

## ABSTRAK

**MUHLIS. Analisis dan verifikasi signifikan meteorologi (SIGMET) di wilayah penerbangan Indonesia timur pada musim Hujan** (dibimbing oleh Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc).

**Latar belakang.** Distribusi awan konveksi yang signifikan, khususnya selama musim Hujan di wilayah Indonesia Timur, memiliki dampak besar terhadap keselamatan dan efisiensi operasional penerbangan. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi Significant Meteorological Information (SIGMET) dan memverifikasi model prediksi SIGMET dengan menggabungkan parameter meteorologi seperti transport Kelembapan, suhu permukaan laut (SST), suhu tropopause, dan curah hujan. **Metode.** Metode penelitian yang digunakan ialah overlap dengan melihat distribusi sebaran awan dan transport kelembaban. Data sekunder yang digunakan mencakup periode Hujan 2019 sampai 2022 tepatnya bulan Desember, Januari, dan February **Hasil.** Transport kelembapan terbukti sebagai faktor dominan yang memengaruhi distribusi SIGMET selama musim hujan, dengan nilai p-value 0,0116 pada model tanpa AIC dan 0,0508 pada model dengan AIC. Model dengan AIC memiliki nilai R-squared 0,671, sementara model tanpa AIC mencapai 0,487, menunjukkan bahwa meskipun lebih sederhana, keduanya dapat menjelaskan variasi distribusi SIGMET secara efektif. **Kesimpulan.** Penelitian ini menghasilkan model prediksi yang dapat membantu operator penerbangan dalam menentukan rute yang lebih aman dan efisien, serta berkontribusi pada pengembangan sistem peringatan dini cuaca ekstrem oleh lembaga meteorologi. Temuan ini tidak hanya relevan untuk keselamatan penerbangan, tetapi juga memberikan wawasan baru dalam studi meteorologi tropis di wilayah Indonesia Timur.

**Kata Kunci:** *SIGMET, awan konveksi, musim hujan, keselamatan penerbangan*

## ABSTRACT

MUHLIS. **Analysis and Verification of Significant Meteorological Information (SIGMET) in the Eastern Indonesia Flight Region During the Rainy Season** (supervised by Prof. Dr. Halmar Halide, M.Sc.).

**Background:** The distribution of significant convective clouds, particularly during the rainy season in Eastern Indonesia, has a major impact on flight safety and operational efficiency. **Objective:** This study aims to analyze the distribution of Significant Meteorological Information (SIGMET) and validate a SIGMET prediction model by incorporating meteorological parameters such as moisture transport, sea surface temperature (SST), tropopause temperature, and rainfall. **Method:** The research method used is overlap by examining the distribution of clouds and humidity transport. The secondary data used includes the rainy season period from 2019 to 2022, specifically in December, January, and February. **Results:** Moisture transport has proven to be the dominant factor influencing SIGMET distribution during the rainy season, with a p-value of 0.0116 in the model without AIC and 0.0508 in the model with AIC. The AIC model has an R-squared value of 0.671, while the model without AIC reaches 0.487, indicating that both models effectively explain the variation in SIGMET distribution, despite the simpler model. **Conclusion:** This study results in a prediction model that can assist flight operators in determining safer and more efficient flight routes, as well as contribute to the development of early warning systems for extreme weather by meteorological agencies. These findings are not only relevant to flight safety but also offer new insights into tropical meteorology studies in Eastern Indonesia.

**Keywords:** SIGMET, convective clouds, rainy season, aviation safety.

## DAFTAR ISI

<b>SKRIPSI</b> .....	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI</b> .....	<b>v</b>
<b>UCAPAN TERIMAKASIH</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan dan Manfaat .....	2
1.2.1 Tujuan .....	2
1.2.2 Manfaat .....	2
1.3 Landasan Teori.....	2
1.3.1 Industri Penerbangan dan Peran Cuaca .....	2
1.3.2 Awan Konveksi dan Dampaknya pada Penerbangan .....	4
1.3.3 Masa Peralihan dan Karakteristik Cuaca di Indonesia Timur.....	5
1.3.4 Model Prediksi Awan Konveksi dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi.....	5
1.3.5 Data Signifikan Meteorology (SIGMET) .....	6
1.3.6 Transport Kelembapan (Transport Humidity) .....	6
1.3.7 Suhu Tropopause dan Permukaan Laut.....	7
1.3.8 Curah Hujan .....	8
1.3.9 Tumpang Tindih (Overlap).....	9
<b>BAB II METODE PENELITIAN</b> .....	<b>11</b>
2.1 Data Penelitian .....	11
2.2 Prosedur Pengolahan Data.....	11
2.2.1 Intersect SIGMET .....	11
2.2.2 Memvisualisasi Data.....	11
2.2.3 Melakukan Overlay Data Hasil dengan 4 Faktor Cuaca .....	12
2.2.4 Korelasi Stepwise .....	12
2.3 Bagan Pikir .....	13
<b>BAB III HASIL</b> .....	<b>14</b>
3.1 Hasil .....	14
<b>BAB IV PEMBAHASAN</b> .....	<b>16</b>
4.1 Data Penelitian .....	16
4.2 Hasil Pengolahan Data SIGMET .....	16
<b>BAB V KESIMPULAN</b> .....	<b>19</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>20</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>23</b>

**DAFTAR TABEL**

## DAFTAR GAMBAR

No Urut		Halaman
1.	Rute penerbangan internasional dan domestik Indonesia (sumber: Pusat Informasi Aeronautika-Airnav Indonesia 2020-2024).....	3
2.	Wilayah penerbangan Indonesia Timur (sumber: Kompaspedia 2024).....	3
3.	Struktur vertikal awan konveksi (Sumber: Climate4Life 2020).....	4
4.	Visualisasi data SIGMET.....	6
5.	Visualisasi transport kelembapan.....	7
6.	Visualisasi metode <i>overlaps</i> (Sumber: Mathworks).....	9
7.	Bagan alir.....	13
8.	Overlay data SIGMET dengan transport Kelembapan untuk periode peralihan dari musim hujan ke kemarau pada bulan April tahun (a) 2019, (b) 2020, (c) 2021, (d) 2022 dan visualisasi transport Kelembapan pada bulan September tahun (e) 2019, (f) 2020, (g) 2021, (h) 2022.....	14
9.	(a) Nilai R-square data SIGMET dengan transport Kelembapan, suhu tropopause, suhu permukaan laut dan curah hujan dengan AIC (b) Nilai R-square data SIGMET dengan transport kelembapan, suhu tropopause, suhu permukaan laut dan curah hujan tanpa AIC.....	15

**DAFTAR LAMPIRAN**

Nomor urut		Halaman
1.	Code pengolahan data SIGMET	23
2.	Hasil visualisasi data SIGMET dan transport Kelembapan	30
3.	Hasil stepwise	34
4.	Daftar Isitilah, Singkatan dan Lambang	35
5.	Daftar Riwayat Hidup	37

## **BAB I PENDAHULUAN UMUM**

### **1.1 Latar Belakang**

Dalam perkembangan pesat industri penerbangan, perhatian utama diberikan pada keselamatan dan efisiensi operasional. Menurut data dari Aviation Safety Network (ASN), Indonesia telah mencatat 451 insiden kecelakaan pesawat sejak tahun 1931 hingga 2023, dengan total korban jiwa mencapai 3.277 orang. Meski jumlah kecelakaan fatal secara keseluruhan menunjukkan tren penurunan, cuaca tetap menjadi salah satu faktor utama penyebab insiden penerbangan. Sebuah penelitian mengungkapkan bahwa sekitar 12,33% kecelakaan pesawat di Indonesia dipengaruhi oleh faktor lingkungan, termasuk cuaca ekstrem.

Musim hujan adalah periode dengan intensitas curah hujan yang tinggi dan terjadi secara konsisten selama periode waktu tertentu, dipengaruhi oleh monsun yang membawa kelembaban dari laut. Pada masa ini, kelembaban udara yang tinggi mendorong terbentuknya awan cumulonimbus yang sering menyebabkan hujan lebat, badai petir, dan kilat. Kondisi cuaca seperti ini menimbulkan tantangan operasional di berbagai sektor, terutama transportasi dan pertanian. Hujan lebat yang terus-menerus dapat memicu banjir, yang berdampak pada penundaan dan gangguan di jalur transportasi darat dan udara, serta merusak lahan pertanian (Smith et al., 2020).

Kemampuan untuk meramalkan sebaran awan konveksi menjadi sangat penting, khususnya di wilayah Indonesia Timur yang kerap mengalami sebaran awan konveksi yang signifikan. Prediksi yang akurat menyediakan informasi vital bagi operator penerbangan, memungkinkan optimalisasi rute penerbangan serta tindakan pencegahan yang diperlukan.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengembangkan model prediksi sebaran awan konveksi. Data SIGMET (*Significant Meteorological Information*) telah menjadi sumber informasi cuaca yang penting dalam meningkatkan pemahaman tentang pembentukan dan pergerakan awan konveksi. Selain itu, penggunaan data transformasi kelembaban udara juga diakui sebagai faktor kunci untuk meningkatkan akurasi prediksi awan konveksi. Melalui penggabungan data SIGMET dan transformasi kelembaban, prediksi awan konveksi dapat ditingkatkan dalam hal ketepatan dan waktu (Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999).

Berbagai studi telah meneliti prediksi sebaran SIGMET di berbagai wilayah. Craig et al. (1999) memperkenalkan metode verifikasi SIGMET menggunakan sistem verifikasi real-time. Pendekatan ini memanfaatkan laporan pilot untuk menghitung probabilitas kemunculan SIGMET berdasarkan parameter "ya" dan "tidak." Namun, kelemahan metode ini adalah cakupan prakiraan yang terbatas dalam eksperimen, yang menghasilkan hasil yang lebih spesifik tetapi berpotensi mengabaikan area penting. Sementara itu, penelitian oleh Khelsh dan Wharton (1996) menemukan bahwa verifikasi berbasis laporan real-time dari pilot sering kali menghasilkan data non-kejadian yang kurang konsisten, karena fokus utama pilot adalah pada laporan kejadian. Berdasarkan kedua studi tersebut, hingga saat ini belum ada metode yang mampu memprediksi sebaran SIGMET secara luas untuk mendukung rute penerbangan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk mengembangkan model prediksi yang lebih akurat

dengan menghubungkan sebaran SIGMET dengan parameter cuaca seperti transportasi kelembapan, suhu tropopause, suhu permukaan laut, dan curah hujan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model prediksi sebaran awan konveksi di Indonesia Timur selama masa hujan. Pendekatan yang menggabungkan data SIGMET dan transformasi kelembapan diharapkan dapat menghasilkan prediksi yang lebih akurat dan sesuai dengan kondisi setempat (Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999). Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang berharga bagi operator penerbangan untuk mengoptimalkan jalur penerbangan dan mengurangi risiko terkait dengan sebaran awan konveksi.

## **1.2 Tujuan dan Manfaat**

### **1.2.1 Tujuan**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis sebaran SIGMET pada Musim hujan
2. Memverifikasi model sebaran SIGMET

### **1.2.2 Manfaat**

Adapun Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Bagi Industri Penerbangan

Penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi industri penerbangan dengan meningkatkan akurasi prediksi sebaran awan konveksi di wilayah Indonesia Timur, terutama saat musim peralihan. Hasil prediksi yang lebih tepat akan membantu operator penerbangan dalam menentukan rute yang lebih aman dan mengurangi risiko yang diakibatkan oleh cuaca ekstrem seperti turbulensi dan petir, sehingga meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional.

2. Bagi Lembaga Meteorologi

Penelitian ini dapat membantu lembaga meteorologi dalam mengembangkan model prediksi cuaca yang lebih spesifik untuk kondisi iklim di Indonesia Timur. Data dari penelitian ini bisa menjadi acuan untuk pengembangan sistem peringatan dini terkait cuaca ekstrem, yang akan berguna dalam mitigasi bencana dan pengelolaan risiko di wilayah tersebut.

3. Bagi Peneliti dan Akademisi

Penelitian ini berkontribusi terhadap perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang meteorologi dan iklim tropis. Model prediksi yang dihasilkan serta analisis tentang pengaruh faktor geografis terhadap pembentukan awan konveksi dapat menjadi referensi penting bagi peneliti dan akademisi dalam penelitian lanjutan.

## **1.3 Landasan Teori**

### **1.3.1 Industri Penerbangan dan Peran Cuaca**

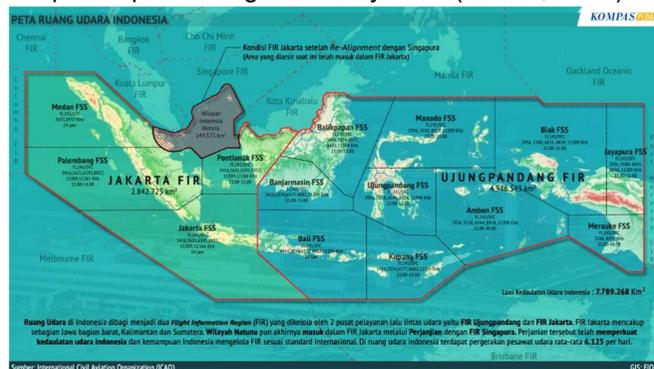
Industri penerbangan memiliki peran yang sangat penting dalam perekonomian global, termasuk di Indonesia. Pertumbuhan pesat jumlah penumpang dan kargo telah menjadikan industri ini sebagai tulang punggung perdagangan serta konektivitas internasional. Namun, dalam menjalankan perannya, kondisi cuaca dan atmosfer memberikan dampak signifikan terhadap operasi dan keselamatan penerbangan. Perubahan cuaca yang tidak terduga dapat memengaruhi jadwal penerbangan, efisiensi operasional maskapai, serta keselamatan penumpang dan kru pesawat (IATA, 2019).



**Gambar 1.** Rute penerbangan internasional dan domestik Indonesia (sumber: Pusat Informasi Aeronautika-Airnav Indonesia 2020-2024)

Cuaca memainkan peran krusial dalam berbagai aspek industri penerbangan, seperti navigasi udara, penerbangan, manajemen bandara, dan pemeliharaan pesawat. Gangguan cuaca seperti badai, turbulensi, kabut tebal, dan hujan lebat dapat menyebabkan keterlambatan, pembatalan penerbangan, bahkan meningkatkan risiko kecelakaan. Oleh sebab itu, pemahaman mendalam mengenai kondisi cuaca terkini dan prediksi cuaca yang akurat menjadi faktor kunci dalam pengambilan keputusan yang tepat di industri penerbangan (Kulesa, 2003).

Di Indonesia Timur, wilayah dengan iklim tropis dan topografi beragam, cuaca menunjukkan variasi yang signifikan, terutama selama musim hujan. Transisi dari musim kemarau ke musim hujan membawa perubahan besar pada kondisi cuaca. Pergeseran angin muson pada musim hujan sering kali membawa kelembapan dan pembentukan awan konveksi, yang dapat mempengaruhi operasi penerbangan. Oleh karena itu, pemahaman yang baik mengenai perubahan cuaca selama musim hujan sangat penting dalam perencanaan operasi penerbangan di wilayah ini (BMKG, 2020).



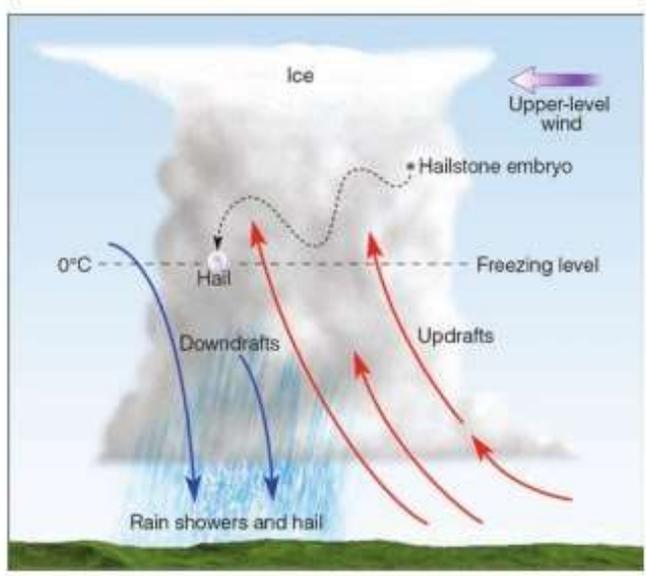
**Gambar 2.** Wilayah penerbangan Indonesia Timur (sumber: Kompaspedia 2024)

Pada tahap perencanaan penerbangan, prediksi cuaca berperan penting dalam menentukan rute yang aman dan efisien. Maskapai penerbangan dan petugas navigasi udara memanfaatkan data cuaca terkini serta model prediksi cuaca untuk menghindari kondisi cuaca ekstrem dan mengoptimalkan rute penerbangan. Cuaca juga berdampak pada keputusan manajemen bandara terkait jadwal penerbangan, operasi landasan pacu, dan layanan penumpang di terminal (ACI, 2018).

Ketepatan dan akurasi dalam prediksi cuaca sangat berperan dalam keberhasilan operasi dan keselamatan penerbangan. Penggunaan teknologi canggih seperti pemantauan satelit, radar cuaca, dan model cuaca numerik telah meningkatkan kualitas prediksi cuaca. Meski demikian, tantangan masih ada dalam memprediksi fenomena cuaca lokal yang berubah dengan cepat. Oleh karena itu, kolaborasi antara maskapai, pemerintah, dan lembaga meteorologi sangat penting untuk mengoptimalkan manajemen cuaca di industri penerbangan (Ferretti, 2020).

### 1.3.2 Awan Konveksi dan Dampaknya pada Penerbangan

Awan konveksi, yang terbentuk melalui pergerakan vertikal udara panas, memiliki pengaruh besar terhadap operasional penerbangan. Penelitian telah membantu menjelaskan karakteristik dan dampak dari awan ini. Awan konveksi sering kali memiliki struktur vertikal yang mencolok dengan pertumbuhan ke atas yang signifikan. Houze Jr. (2014) dalam karyanya mengenai dinamika awan menjelaskan bahwa awan konveksi merupakan tempat terbentuknya berbagai fenomena cuaca ekstrem seperti hujan deras, kilat, dan turbulensi udara. Proses konveksi terjadi ketika udara panas naik dan mengalami pendinginan saat bergerak ke atas, yang kemudian memicu terbentuknya awan. Interaksi antara udara panas yang naik dan udara dingin yang turun menciptakan kondisi kondensasi yang menyebabkan pembentukan awan.



**Gambar 3.** Struktur vertikal awan konveksi (Sumber: Climate4Life 2020)

Awan konveksi sering kali memiliki potensi untuk menyebabkan turbulensi udara yang berbahaya bagi penerbangan. Devine (2006) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa pergerakan tiba-tiba udara di sekitar awan konveksi dapat memicu getaran serta gerakan yang tidak diinginkan pada pesawat. Dampak ini terjadi ketika pesawat melintas di area yang mengalami perubahan suhu dan tekanan udara secara drastis.

Selain itu, awan konveksi juga berpotensi mengurangi jarak pandang. Houze Jr. (2014) menjelaskan bahwa awan konveksi yang padat mampu secara signifikan mengganggu pandangan pilot dan menurunkan jarak pandang. Dalam situasi ekstrem, awan konveksi bahkan dapat memicu petir, yang membahayakan keselamatan

penerbangan dengan merusak sistem navigasi dan peralatan elektronik pesawat. Oleh sebab itu, penilaian awal terhadap area dengan potensi awan konveksi sangat penting dalam merencanakan rute penerbangan yang aman.

### **1.3.3 Masa Hujan dan Karakteristik Cuaca di Indonesia Timur**

Musim hujan di Indonesia Timur umumnya berlangsung dari November hingga Maret, dengan puncak curah hujan terjadi sekitar bulan Desember hingga Februari. Pada periode ini, angin monsun barat mulai mendominasi, membawa massa udara lembap dari Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Riihimaki (2012) menjelaskan bahwa massa udara ini sangat kaya akan uap air, yang menjadi bahan utama pembentukan awan konveksi besar yang menghasilkan hujan lebat. Curah hujan pada musim hujan di wilayah ini sangat intens, terutama di daerah pesisir dan dataran rendah, yang kadang-kadang menyebabkan banjir di wilayah rentan.

Selama musim hujan, suhu udara cenderung tetap hangat meskipun sering turun sedikit saat hujan berlangsung. Kelembapan udara meningkat secara signifikan, mencapai lebih dari 80%, yang berkontribusi pada kondisi yang terasa lebih lembap. Riihimaki (2012) juga mencatat bahwa selama musim hujan, kondisi atmosfer lebih tidak stabil karena adanya pertemuan angin dari berbagai arah, yang dapat memicu badai petir dan hujan deras secara tiba-tiba. Fenomena ini sering terjadi di wilayah pegunungan dan pesisir.

Salah satu dampak utama dari musim hujan di Indonesia Timur adalah pada sektor pertanian dan perikanan. Curah hujan yang tinggi sangat penting untuk mendukung pertanian, terutama bagi petani yang bergantung pada air hujan untuk irigasi sawah. Namun, hujan yang terlalu lebat juga dapat menyebabkan tanah longsor di daerah perbukitan dan banjir di wilayah yang lebih rendah. Sektor perikanan juga terpengaruh karena angin kencang dan gelombang tinggi yang sering terjadi selama musim hujan, membatasi kegiatan melaut bagi nelayan.

Selain itu, musim hujan membawa dampak pada kesehatan masyarakat, terutama dengan peningkatan risiko penyakit yang ditularkan melalui air seperti diare dan demam berdarah. Riihimaki (2012) menunjukkan bahwa lingkungan yang basah dan genangan air yang sering muncul selama musim hujan menciptakan kondisi yang ideal untuk berkembangnya nyamuk penyebab penyakit demam berdarah. Oleh karena itu, musim hujan sering kali menuntut peningkatan kewaspadaan dalam hal kesehatan lingkungan dan sanitasi.

Dampak cuaca selama musim hujan juga berpengaruh pada sektor transportasi, baik darat, laut, maupun udara. Curah hujan yang tinggi dan jarak pandang yang terbatas sering kali menyebabkan penundaan penerbangan dan peningkatan risiko kecelakaan di jalan raya karena jalan licin. Di sektor transportasi laut, gelombang tinggi yang sering muncul selama musim hujan juga menghambat pelayaran dan distribusi logistik antar pulau.

Dengan demikian, musim hujan di Indonesia Timur tidak hanya membawa curah hujan yang tinggi tetapi juga memengaruhi berbagai sektor kehidupan, mulai dari pertanian, kesehatan, hingga transportasi, yang menuntut adaptasi masyarakat terhadap perubahan iklim dan cuaca.

### **1.3.4 Model Prediksi Awan Konveksi dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi**

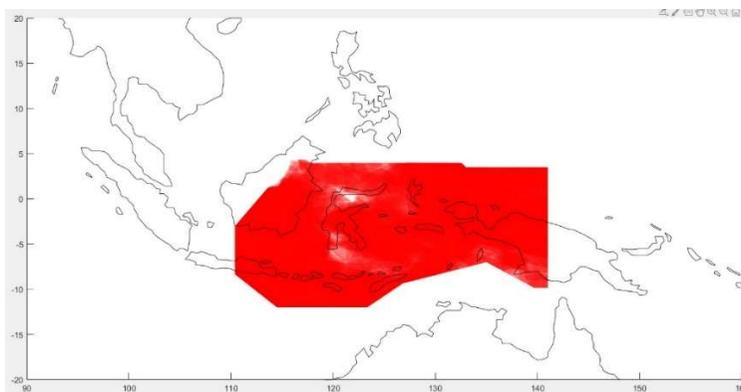
Model prediksi awan konveksi memainkan peran penting dalam upaya memahami dan memprediksi pembentukan serta evolusi awan konveksi, termasuk dampaknya terhadap cuaca lokal dan global. Menurut tinjauan literatur yang dilakukan oleh Prein et al. (2020), model numerik seperti model atmosfer dan model iklim telah diimplementasikan untuk mensimulasikan dinamika awan konveksi pada berbagai skala. Model ini memanfaatkan variabel seperti suhu, kelembapan, tekanan, serta arah angin untuk menggambarkan pergerakan vertikal udara yang menyebabkan pembentukan dan perkembangan awan konveksi. Penggunaan model tersebut memungkinkan prediksi yang lebih akurat mengenai pola pembentukan awan konveksi, termasuk di wilayah yang kompleks seperti Indonesia Timur.

Pembentukan awan konveksi sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor atmosferik, oseanografis, dan geografis. Desbiolles et al. (2021) menemukan beberapa faktor utama yang berperan dalam pembentukan awan konveksi, termasuk suhu permukaan laut, kelembapan udara, adveksi udara, dan topografi. Di Indonesia Timur, suhu permukaan laut yang tinggi menyediakan energi termal yang signifikan untuk mendukung proses konveksi. Kelembapan udara yang melimpah di atas lautan tropis berfungsi sebagai sumber uap air yang mendukung pertumbuhan awan. Selain itu, adveksi udara, yang mengatur pergerakan massa udara secara horizontal, juga berperan dalam menggerakkan udara vertikal yang memicu pembentukan awan konveksi.

Pengembangan model prediksi awan konveksi serta pemahaman mengenai faktor-faktor yang mempengaruhinya berdampak besar pada prediksi cuaca dan operasional penerbangan. Penelitian oleh Sun et al. (2022) menekankan bahwa model numerik berkontribusi secara signifikan dalam meningkatkan akurasi prediksi cuaca terkait pembentukan awan konveksi. Prediksi yang lebih tepat mengenai waktu, lokasi, dan intensitas pembentukan awan konveksi dapat memberikan informasi penting bagi para pemangku kepentingan dalam perencanaan dan pengelolaan operasional penerbangan. Selain itu, pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor pembentukan awan konveksi berpotensi meningkatkan keselamatan penerbangan dengan memberikan panduan yang lebih efektif dalam menghindari kondisi cuaca yang berbahaya.

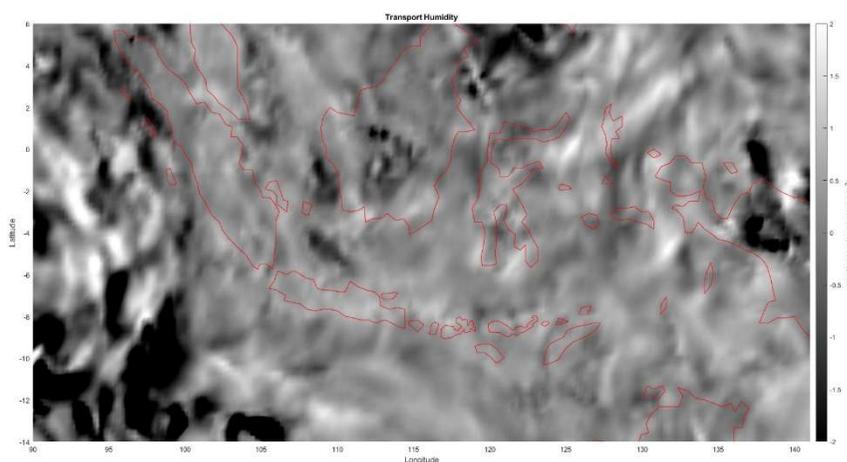
### **1.3.5 Data SIGMET dan Transformasi Kelembaban**

Data SIGMET (*Significant Meteorological Information*) adalah sumber kunci dalam menganalisis dan memprediksi fenomena cuaca ekstrem, termasuk pembentukan awan konveksi. Berdasarkan studi yang disampaikan oleh Leung et al. (2020), data SIGMET mencakup laporan cuaca yang disusun oleh otoritas penerbangan untuk menyediakan informasi terkait fenomena cuaca penting, seperti turbulensi, badai, dan awan konveksi. Data ini dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk laporan dari pilot serta observasi dari darat. Dalam hal prediksi awan konveksi, data SIGMET memfasilitasi pemahaman mengenai perkembangan awan konveksi yang dapat memengaruhi operasional penerbangan dan berpotensi berdampak pada cuaca lokal.



**Gambar 4.** Visualisasi data SIGMET

Kelembapan udara merupakan faktor utama dalam pembentukan awan konveksi. Menurut penelitian Tazzarek et al. (2021), transformasi kelembapan telah diidentifikasi sebagai indikator penting dalam prediksi awan konveksi. Proses transformasi ini melibatkan pengolahan data kelembapan yang diperoleh dari satelit atau pengukuran permukaan. Di wilayah Indonesia Timur, yang memiliki kelembapan udara tinggi, transformasi kelembapan menjadi semakin krusial. Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan tingkat kelembapan di berbagai lapisan atmosfer dapat mempermudah pemahaman tentang pergerakan vertikal udara dan pembentukan awan konveksi.



**Gambar 5.** Visualisasi transportasi kelembapan

Penerapan data SIGMET bersama transformasi kelembapan memiliki dampak signifikan terhadap prediksi cuaca dan keselamatan penerbangan. Stone et al. (2020) mencatat bahwa integrasi data SIGMET ke dalam model prediksi cuaca dapat meningkatkan akurasi dalam memperkirakan lokasi serta intensitas fenomena cuaca ekstrem, termasuk pembentukan awan konveksi. Di sisi lain, transformasi kelembapan memungkinkan pemahaman yang lebih rinci tentang kondisi atmosfer yang mendukung pembentukan awan konveksi. Gabungan informasi dari kedua sumber ini memberikan perspektif yang lebih komprehensif dan akurat mengenai perkembangan awan konveksi, yang sangat bernilai untuk operasional penerbangan dan mitigasi risiko cuaca.

### **I.3.7 Suhu Tropopause dan Suhu Permukaan Laut**

Suhu tropopause dan suhu permukaan laut (Sea Surface Temperature/SST) memainkan peran penting dalam mengatur dinamika atmosfer, terutama dalam pembentukan dan distribusi awan konveksi. Suhu tropopause, khususnya di lapisan tengah dan atas, memengaruhi kestabilan atmosfer melalui gradien suhu vertikal. Ketika udara hangat dari permukaan bergerak naik dan bertemu dengan udara dingin di lapisan atas, ketidakstabilan atmosfer meningkat, memicu pembentukan awan konveksi. Penelitian menunjukkan bahwa pemanasan global meningkatkan suhu tropopause bagian atas, yang dapat memperkuat aktivitas konvektif. Gradien suhu vertikal yang semakin curam menjadi faktor utama yang mendorong proses ini.

Suhu permukaan laut juga memainkan peran kunci, terutama dalam proses penguapan dan pelepasan energi laten ke atmosfer, yang menjadi pemicu awan konveksi. Kawasan dengan SST tinggi, seperti zona konvergensi antartropis (Intertropical Convergence Zone/ITCZ), menjadi pusat aktivitas konvektif akibat tingginya tingkat penguapan. Fenomena El Niño–Southern Oscillation (ENSO) juga memengaruhi variasi SST, yang secara signifikan mengubah pola distribusi awan konveksi. Selama El Niño, peningkatan suhu di Pasifik Tengah menyebabkan pergeseran aktivitas awan konveksi ke arah timur, sedangkan La Niña memperkuat aktivitas tersebut di wilayah Pasifik Barat (Okumura, 2019).

Interaksi antara suhu tropopause dan SST menciptakan kondisi yang mendukung pembentukan awan konveksi melalui peningkatan ketidakstabilan konvektif. SST yang tinggi meningkatkan penguapan, memungkinkan uap air mencapai tropopause dan mengalami kondensasi jika lapisan atas cukup dingin. Proses ini meningkatkan kemungkinan terjadinya awan konveksi dan curah hujan lebat di wilayah tropis. Studi Zhang et al. (2019) menunjukkan bahwa intensitas awan konveksi cenderung meningkat seiring kenaikan SST, terutama di area dengan gradien suhu vertikal yang tajam.

Dalam konteks penerbangan, peningkatan suhu global dapat memperkuat hubungan ini, tidak hanya meningkatkan SST tetapi juga mengubah pola distribusi awan konveksi, termasuk pergeseran ke arah kutub. Studi Lau dan Wu (2023) menyebutkan bahwa perubahan ini dapat memengaruhi pola curah hujan global secara signifikan, dengan dampak besar terhadap keberlanjutan sumber daya air dan cuaca ekstrem. Oleh karena itu, suhu tropopause dan SST menjadi faktor penting dalam pembentukan serta distribusi awan konveksi.

### **I.3.8 Curah Hujan**

Curah hujan memiliki kaitan erat dengan jumlah dan distribusi awan konvektif, yang memainkan peran penting dalam dinamika atmosfer, khususnya di daerah tropis. Sebagai hasil dari proses konveksi, curah hujan lebat sering mencerminkan aktivitas konveksi yang intens. Awan konvektif, seperti cumulonimbus (Cb), merupakan sumber utama curah hujan ekstrem sekaligus memicu cuaca buruk seperti badai petir dan angin kencang. Pola distribusi awan konvektif dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk SST, gradien suhu vertikal di tropopause, dan kondisi atmosfer global. Fenomena seperti El Niño menyebabkan perubahan pola curah hujan, memindahkan konsentrasi awan konvektif ke wilayah Pasifik Tengah, sementara La Niña memperkuatnya di Pasifik Barat (Okumura, 2019). Selain itu, topografi seperti pegunungan juga memengaruhi distribusi awan melalui mekanisme konveksi lokal.

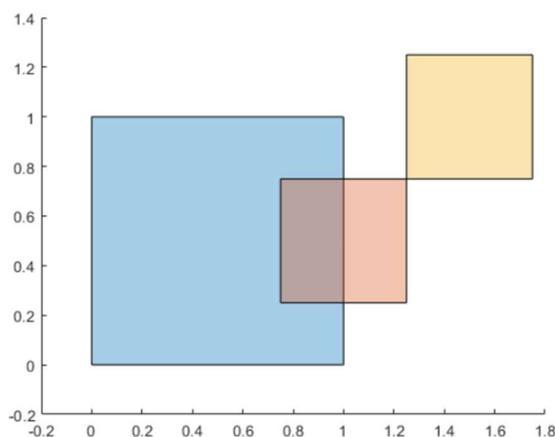
Hubungan antara curah hujan dan awan konvektif memiliki dampak signifikan pada keselamatan penerbangan. Awan konvektif yang menghasilkan curah hujan lebat sering menciptakan kondisi cuaca buruk seperti turbulensi, petir, dan microburst, yang dapat mengancam keselamatan pesawat, terutama saat lepas landas, pendaratan, atau selama penerbangan level. Hujan deras juga dapat mengurangi jarak pandang dan menyebabkan genangan di landasan pacu, meningkatkan risiko tergelincir (hydroplaning).

Penelitian Tanui (2022) mencatat bahwa curah hujan intens yang dihasilkan oleh awan konvektif merupakan salah satu faktor utama yang mengganggu operasi penerbangan. Selain itu, curah hujan tinggi meningkatkan ketidakstabilan atmosfer melalui pelepasan energi laten, yang dapat memicu pembentukan awan konvektif tambahan dan menciptakan siklus konveksi yang semakin kuat (Finney et al., 2020).

### 1.3.7 Metode Tumpang Tindih (*Overlap*)

Indikator *overlap*, hasilnya bisa berupa skalar, vektor, matriks, atau larik multidimensi. Jika dimasukkan dua argumen *polyshape*, pastikan bahwa ukuran keduanya kompatibel. Misalnya, jika dua vektor *polyshape* memiliki panjang yang berbeda, M dan N, maka pastikan mereka memiliki orientasi yang berbeda (salah satunya harus menjadi vektor baris dan yang lain harus menjadi vektor kolom). Matriks TF akan memiliki ukuran M-by-N atau N-by-M tergantung pada orientasi masing-masing vektor input.

Jika Anda hanya memasukkan satu vektor *polyshape* tunggal dengan panjang N, maka TF akan berukuran N-by-N.



**Gambar 6.** Visualisasi metode *overlaps* (Sumber: Mathworks)

Fenomena *overlapping* yang dikenal sebagai tumpang tindih awan konveksi, mengacu pada interaksi antara dua atau lebih sistem awan konveksi yang berada dalam jarak yang relatif dekat. Interaksi ini dapat menghasilkan efek sinergis yang dapat mempengaruhi cuaca lokal secara signifikan. Penelitian oleh Schoebel et al. (2018) menjelaskan bahwa fenomena *overlapping* ini dapat memicu perkembangan cuaca ekstrem seperti hujan lebat, angin kencang, dan petir yang intens. Dalam kasus *overlapping* yang ekstrem, dapat terbentuk awan kumulonimbus super sel yang berpotensi mengakibatkan bencana cuaca.

*Overlapping* awan konveksi memiliki potensi untuk memperburuk kondisi cuaca lokal. Penelitian oleh Oreopoulos & Khairoutdinov (2003) menunjukkan bahwa interaksi antara dua sistem awan konveksi dapat menghasilkan peningkatan curah hujan dan intensitas aktivitas petir. Dampak ini berdampak luas terutama pada wilayah yang sudah rentan terhadap banjir dan tanah longsor. Di wilayah Indonesia Timur, yang dikenal dengan curah hujan tinggi selama musim hujan, pemahaman tentang potensi dampak *overlapping* menjadi semakin penting dalam upaya mitigasi risiko bencana alam.

Pemahaman yang lebih baik tentang *overlapping* memiliki implikasi yang signifikan dalam prediksi cuaca dan keselamatan penerbangan. Menurut penelitian oleh Mkhathshwa et al. (2021), prediksi *overlapping* memerlukan pemodelan yang lebih kompleks untuk menganalisis interaksi antara dua atau lebih sistem awan konveksi. Integrasi data SIGMET dan analisis transformasi kelembaban juga dapat membantu dalam memahami peluang terjadinya *overlapping*. Dalam konteks penerbangan, informasi tentang *overlapping* awan konveksi dapat membantu maskapai penerbangan dalam menghindari rute yang berpotensi menghadapi kondisi cuaca ekstrem dan risiko turbulensi yang lebih tinggi.

## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1 Data Penelitian

Data merupakan data sekunder dimana variabel yang digunakan ialah suhu permukaan laut, suhu tropopause, curah hujan dan transport kelembaban sebagai variabel independen serta tutupan awan sebagai variabel dependen.

### 2.2 Prosedur Pengolahan Data

Alur prosedur pengolahan data adalah serangkaian langkah atau tahapan yang harus dilakukan untuk mengambil, menyimpan, mengolah, dan menghasilkan informasi dari data. Berikut adalah urutan dari alur prosedur pengolahan data:

#### 2.2.1 *Intersect* SIGMET

1. Data Sandi SIGMET (BMKG)  
Mulai dengan mengakses data SIGMET dari sumber yang diberikan oleh BMKG atau sumber lain yang relevan.
2. Konversi Sandi SIGMET ke Koordinat  
Konversi data SIGMET dalam format sandi menjadi data geospasial dengan menggunakan algoritma rekrusif (RE).
3. Plot Data SIGMET Menjadi *Polygon* dalam Peta  
Poligon terbentuk berdasarkan olah data di matlab yang mewakili daerah SIGMET pada peta dengan jumlah persentase terbanyak.
4. Melakukan *Intersect (Overlapping)* untuk 5 Sebaran Awan Terbanyak  
Identifikasi tiga sebaran awan SIGMET yang paling signifikan dan lakukan operasi intersect dengan data lain yang akan digabungkan.
5. Selesai  
Pada titik ini, Anda telah berhasil mengidentifikasi sebaran awan SIGMET terbanyak dan menggambar poligon di atas peta untuk analisis selanjutnya.

#### 2.2.2 Memvisualisasi data

1. Data NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)  
Mulai dengan mengakses data NOAA yang mencakup kelembaban spesifik, kecepatan angin (angin u dan angin v), suhu permukaan laut, suhu tropopause dan curah hujan.
2. Memvisualisasikan data  
Membuat visualisasi data suhu permukaan laut, suhu tropopause dan curah hujan.
3. Transport Kelembaban Menggunakan Rumus  
Menghitung transport kelembaban menggunakan rumus yang sesuai berdasarkan data yang miliki.

Untuk mengestimasi sumber daerah kelembaban, dapat digunakan perhitungan transportasi kelembaban dengan menggunakan persamaan (Webster dan Fasullo, 2003):

$$Bq = \int_{1024}^{300} q V dz$$

Keterangan:

Bq : Tanspor uap air rata-rata

V : Vektor kecepatan angin horizontal pada ketinggian (z)

$q$  : Kelembaban spesifik pada ketinggian ( $z$ )

4. Memvisualisasikan data Transport Kelembaban  
Membuat visualisasi grafik atau peta yang menunjukkan distribusi transport kelembaban yang telah dihitung.

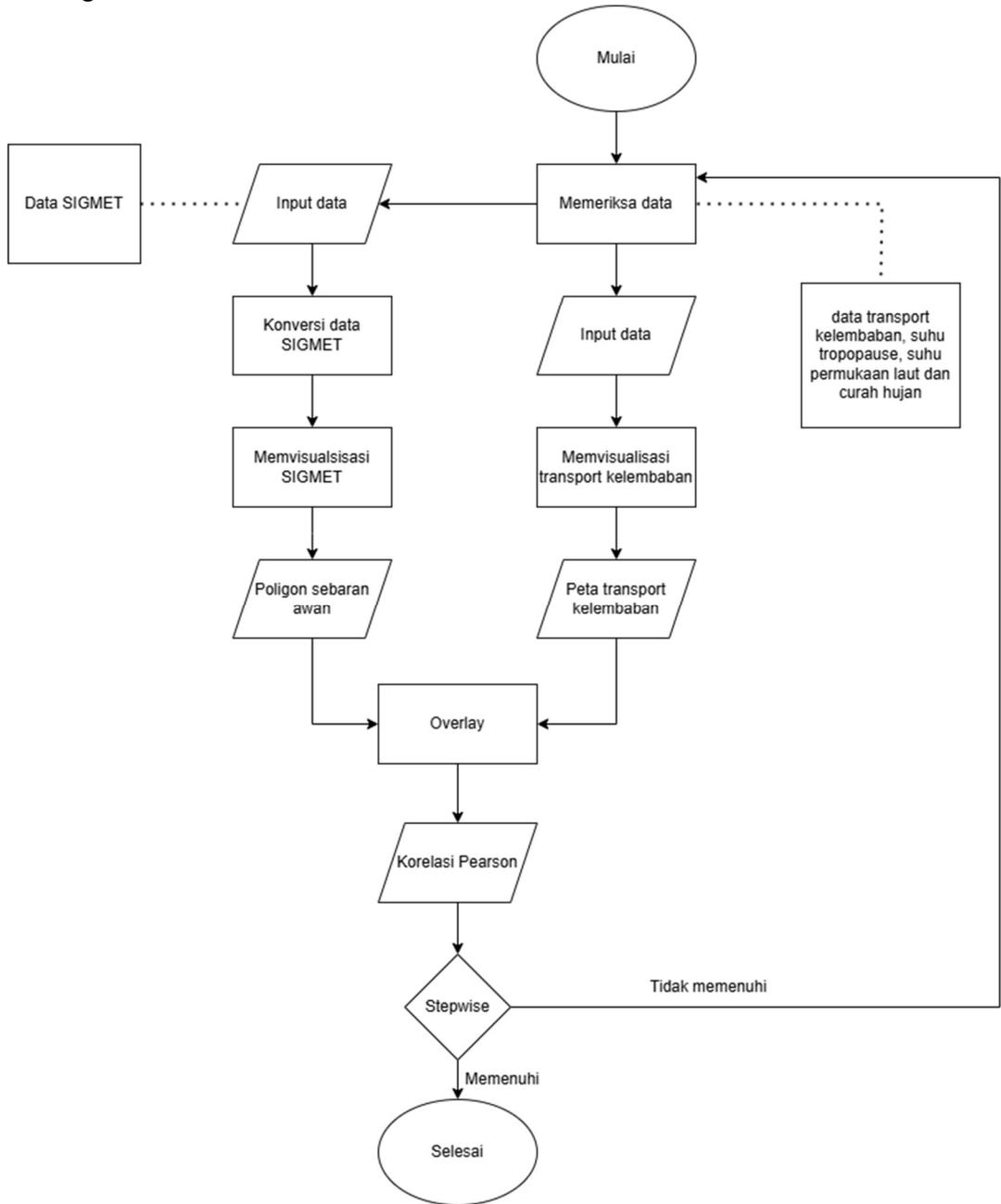
### **2.2.3 Melakukan *Overlay* Data Hasil dengan 4 Faktor Cuaca**

1. *Overlay* Data  
Gabungkan hasil dari langkah-langkah A (SIGMET) dan B (Transport Kelembaban) dengan cara menumpuk (*overlay*) informasi SIGMET pada lapisan transport kelembaban yang telah dibuat.
2. Analisis Hasil *Overlay*  
Analisis hasil *overlay* untuk mengidentifikasi potensi dampak SIGMET pada faktor-faktor lainnya seperti suhu tropopause, suhu permukaan laut, curah hujan dan transport kelembaban.
3. Visualisasi Gabungan  
Membuat visualisasi grafis atau peta yang menunjukkan bagaimana SIGMET tumpang tindih dengan faktor-faktor lainnya.
4. Lakukan Evaluasi dan Tindakan Selanjutnya  
Mengevaluasi hasil gabungan ini dan lakukan tindakan selanjutnya sesuai dengan kebutuhan seperti memberikan informasi penting kepada pengguna atau pihak yang berwenang.

### **2.2.4 Stepwise**

1. Data spasial yang berasal dari NOAA yaitu curah hujan, suhu tropopause, suhu muka laut, dan data dari transport kelembaban dari ERA5, dilakukan rata-rata spasial menggunakan perintah `permute` di matlab, dengan membatasi longitude dan latitude daerah yang diinginkan yakni wilayah penerbangan indonesia timur (skrip rata-rata spasial dapat dilihat pada lampiran).
2. Hasil dari rata-rata spasial di simpan ke dalam excel bersama dengan data sigmet.
3. Setelah melakukan korelasi, selanjutnya file excel akan dibaca pada matlab untuk melakukan stepwise (code stepwise dapat dilihat pada lampiran 1).

2.3 Bagan Pikir



Gambar 7. Bagan pikir