

BAB I PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Dengan pesatnya perkembangan industri penerbangan, keselamatan dan efisiensi operasional menjadi perhatian utama. Berdasarkan data Aviation Safety Network (ASN), Indonesia telah mencatat 451 kecelakaan pesawat sejak tahun 1931 hingga 2023, dengan total korban jiwa mencapai 3.277 orang. Meskipun secara umum jumlah kecelakaan fatal menurun, cuaca masih menjadi salah satu penyebab utama insiden penerbangan. Sebuah studi mengungkapkan bahwa sekitar 12,33% kecelakaan pesawat di Indonesia dipengaruhi oleh faktor lingkungan, termasuk cuaca ekstrem.

Dalam hal ini, faktor cuaca, khususnya distribusi awan konveksi, memegang peran yang signifikan. Awan konveksi terbentuk akibat pergerakan vertikal udara panas yang dapat memicu kondisi cuaca ekstrem, seperti hujan deras, petir, dan turbulensi (Smith et al., 2007). Di Indonesia, terutama di wilayah timur dengan iklim tropisnya, distribusi awan konveksi sangat menonjol selama musim kemarau.

Musim kemarau ditandai dengan minimnya curah hujan atau bahkan ketiadaan hujan dalam periode tertentu, yang seringkali dipengaruhi oleh sistem tekanan tinggi yang menghambat terbentuknya awan hujan. Selama musim ini, kelembaban udara berkurang secara signifikan, meningkatkan suhu permukaan dan mempercepat penguapan air. Akibatnya, kekeringan sering terjadi, yang berdampak pada berbagai sektor, terutama pertanian dan ketersediaan air. Kekurangan air yang berkepanjangan dapat mengganggu produksi pangan, meningkatkan risiko kebakaran hutan, serta memicu krisis air bersih (Jones, 2019).

Kemampuan memprediksi distribusi awan konveksi menjadi sangat penting, khususnya di wilayah Indonesia Timur yang kerap mengalami distribusi awan konveksi yang intens. Prediksi yang akurat menyediakan informasi yang berharga bagi operator penerbangan, memungkinkan mereka untuk mengoptimalkan rute penerbangan dan mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan.

Beberapa upaya telah dilakukan untuk mengembangkan model prediksi distribusi awan konveksi. Penggunaan data SIGMET (*Significant Meteorological Information*) sebagai sumber informasi cuaca yang penting telah berkontribusi dalam meningkatkan pemahaman mengenai pembentukan dan pergerakan awan konveksi. Selain itu, penggunaan data transformasi kelembaban udara juga telah diakui sebagai faktor penting dalam meningkatkan akurasi prediksi distribusi awan konveksi. Dengan menggabungkan data SIGMET dan transformasi kelembaban, akurasi prediksi awan konveksi dapat meningkat baik dari segi ketepatan maupun waktu (Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk memprediksi sebaran SIGMET di berbagai wilayah. Hartsough et al. (1999) mengusulkan metode verifikasi SIGMET menggunakan sistem verifikasi real-time. Metode ini menghitung data laporan pilot dengan probabilitas kemunculan SIGMET menggunakan parameter "ya" dan "tidak." Namun, kekurangan dari metode ini adalah cakupan prakiraan yang lebih kecil dalam eksperimen, menghasilkan hasil yang lebih spesifik tetapi berisiko melewatkan area penting. Penelitian lainnya oleh Kelsch dan Wharton (1996) menunjukkan bahwa verifikasi berdasarkan data real-time dari laporan pilot sering menghasilkan data non-kejadian

yang kurang konsisten, karena pilot lebih memprioritaskan laporan kejadian. Dari kedua penelitian tersebut, disimpulkan bahwa belum ada pendekatan yang mampu memprediksi sebaran SIGMET dengan cakupan luas untuk memberikan saran lintasan penerbangan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan model prediksi yang lebih spesifik dengan mengkorelasikan data sebaran SIGMET dengan parameter cuaca, seperti transportasi kelembapan, suhu tropopause, suhu permukaan laut, dan curah hujan.

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

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis sebaran SIGMET pada musim kemarau
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 kemarau. 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

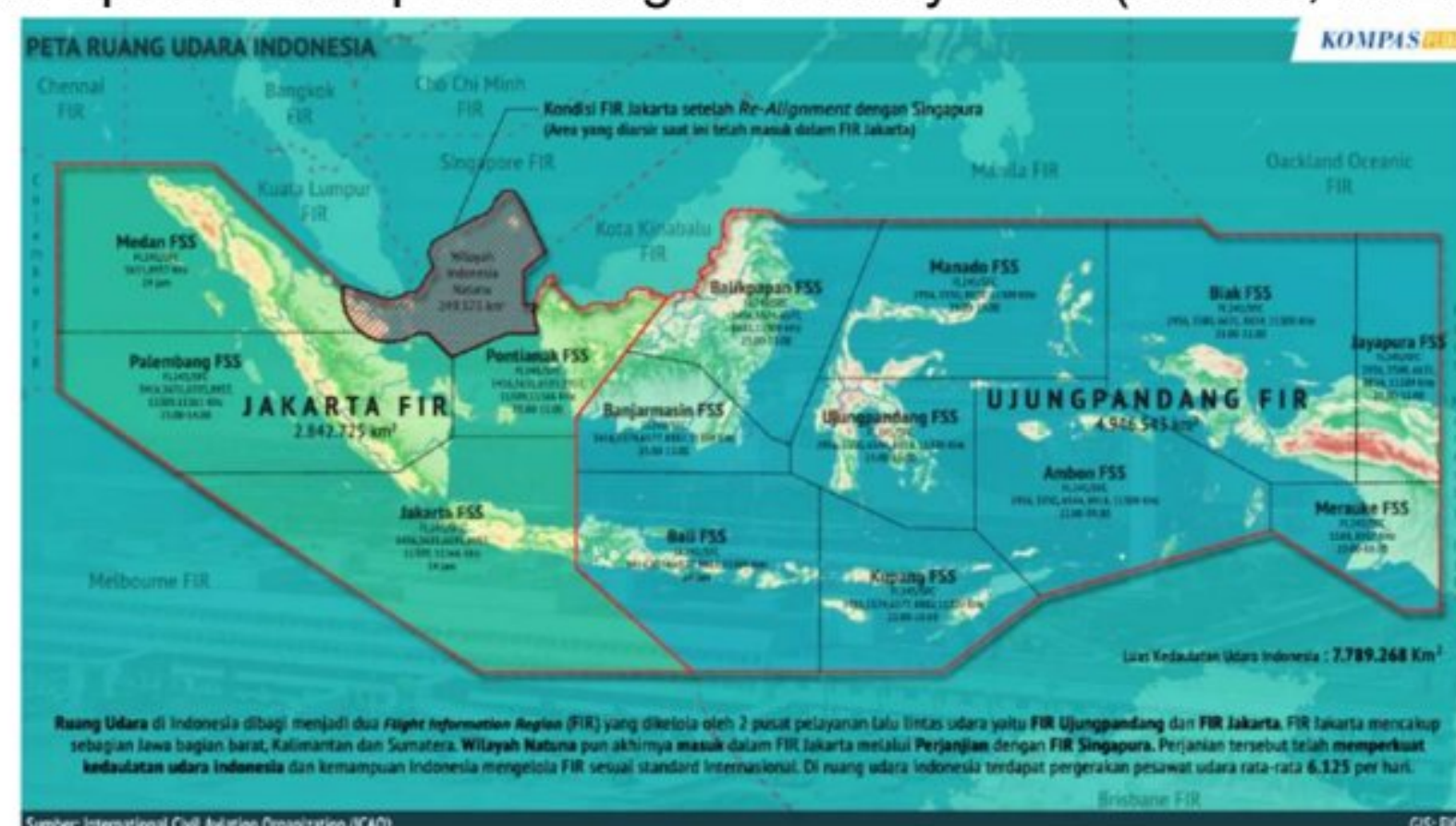
Industri penerbangan memiliki peran penting dalam ekonomi global, termasuk di Indonesia, karena pertumbuhan pesat jumlah penumpang dan kargo menjadikan sektor ini penghubung utama dalam perdagangan dan konektivitas internasional. Meski demikian, cuaca dan kondisi atmosfer memainkan peran krusial dalam operasi dan keselamatan penerbangan. Perubahan cuaca yang mendadak dapat berdampak signifikan pada jadwal penerbangan, efisiensi operasional maskapai, serta keselamatan penumpang dan awak pesawat (IATA, 2019).



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

Cuaca memengaruhi berbagai aspek dalam industri penerbangan, termasuk navigasi, manajemen bandara, dan pemeliharaan pesawat. Gangguan cuaca seperti badai, turbulensi, kabut tebal, dan hujan deras dapat menyebabkan keterlambatan, pembatalan, hingga risiko kecelakaan. Oleh sebab itu, pemahaman mendalam tentang kondisi cuaca terkini dan prediksi cuaca yang akurat sangat penting untuk pengambilan keputusan yang tepat dalam industri ini (Kulesa, 2003).

Di kawasan Indonesia Timur yang memiliki iklim tropis dan topografi beragam, cuaca bervariasi terutama selama musim kemarau. Pergantian antara musim kemarau dan musim hujan membawa perubahan cuaca yang signifikan. Di musim kemarau, perubahan angin muson dapat membawa kelembapan dan memicu pembentukan awan konvektif yang berpotensi mempengaruhi operasional penerbangan. Pemahaman mendalam tentang perubahan cuaca pada musim kemarau menjadi sangat penting untuk perencanaan operasional penerbangan di wilayah ini (BMKG, 2020).



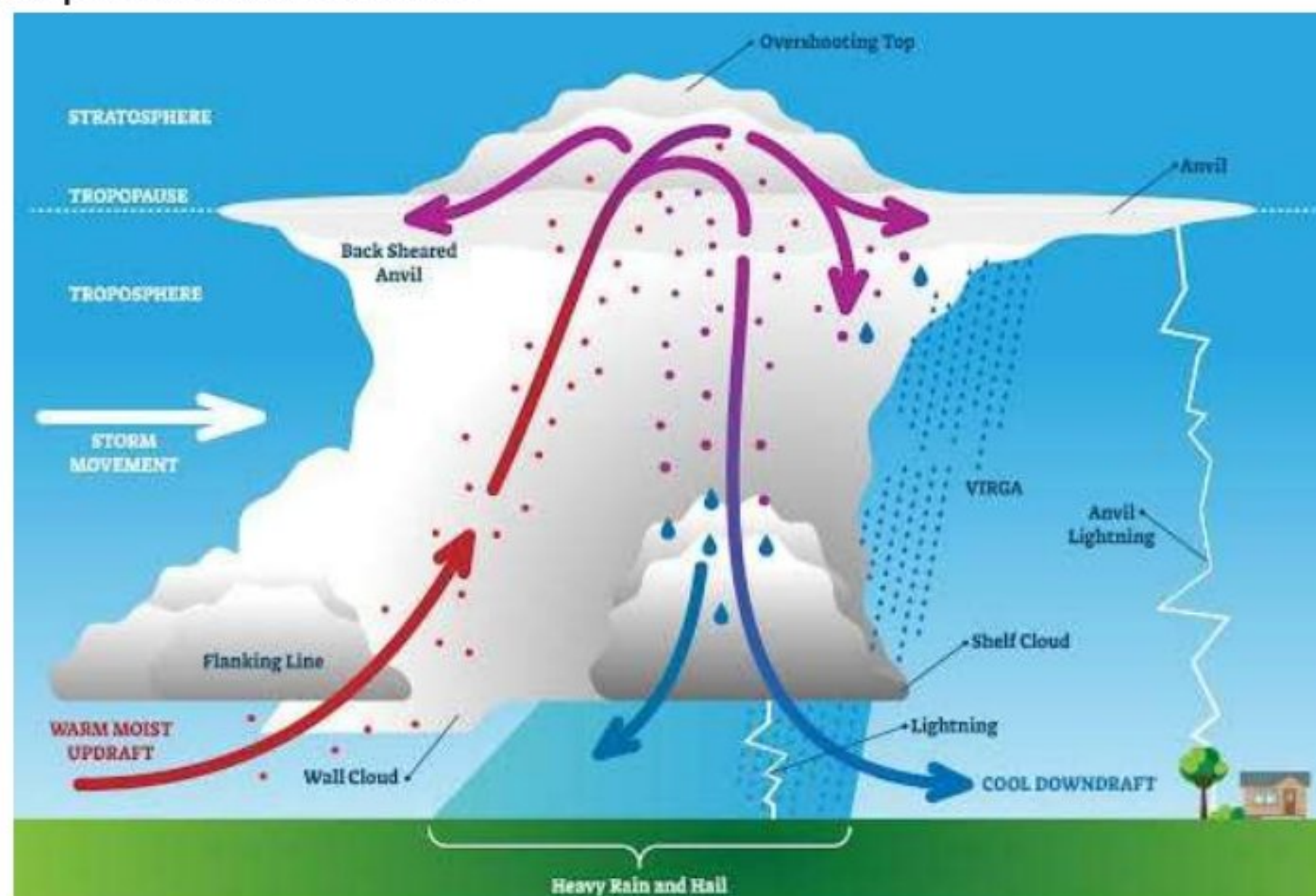
Gambar 2. Wilayah penerbangan Indonesia Timur (sumber: Kompaspedia 2024)

Dalam perencanaan penerbangan, prediksi cuaca berperan penting dalam menentukan rute yang aman dan efisien. Maskapai dan pengelola navigasi udara memanfaatkan data cuaca terbaru dan model prediksi cuaca untuk menghindari kondisi ekstrem dan mengoptimalkan rute penerbangan. Cuaca juga memengaruhi keputusan manajemen bandara, seperti pengaturan jadwal, operasi landasan pacu, dan layanan terminal penumpang (ACI, 2018).

Akurasi prediksi cuaca sangat memengaruhi keberhasilan operasional dan keselamatan penerbangan. Teknologi canggih seperti pemantauan satelit, radar cuaca, dan model numerik cuaca telah meningkatkan kualitas prediksi. Meski begitu, prediksi fenomena cuaca lokal yang cepat berubah tetap menantang. Oleh karena itu, kerja sama antara maskapai, pemerintah, dan lembaga meteorologi sangat penting untuk mengoptimalkan manajemen cuaca dalam industri penerbangan (Ferretti, 2020).

1.3.2 Awan Konveksi dan Dampaknya pada Penerbangan

Awan konveksi, yang terbentuk akibat pergerakan vertikal udara panas, memiliki pengaruh yang signifikan terhadap operasional penerbangan. Karakteristik serta dampak awan ini dapat dipahami melalui berbagai penelitian yang telah dilakukan. Awan konveksi biasanya memiliki struktur vertikal yang dramatis, ditandai dengan pertumbuhan ke atas yang mencolok. Menurut Houze Jr. (2014), dalam karyanya mengenai dinamika awan, fenomena ini menjadi lokasi munculnya cuaca ekstrem seperti hujan lebat, kilat, dan turbulensi udara. Proses konveksi terjadi ketika udara panas naik dan mendingin saat bergerak ke atas, yang kemudian memicu pembentukan awan. Interaksi antara udara panas yang naik dan udara dingin yang turun menciptakan kondisi kondensasi yang penting untuk pembentukan awan.



Gambar 3. Struktur vertikal awan konveksi (Sumber: RMetS 2023)

Pertumbuhan yang signifikan ke atas dari awan ini dapat berdampak pada cuaca lokal dengan berbagai konsekuensi. Awan konveksi memiliki kemampuan untuk menimbulkan turbulensi udara yang dapat membahayakan penerbangan. Devine et al. (2006) dalam penelitiannya menyatakan bahwa pergerakan mendadak udara di sekitar awan konveksi dapat menyebabkan getaran dan pergerakan yang tidak diinginkan pada

pesawat. Dampak ini sering terjadi saat pesawat melintasi area dengan perubahan suhu dan tekanan udara yang ekstrem.

Lebih lanjut, awan konveksi juga dapat mengurangi jarak pandang. Houze Jr. (2014) mencatat bahwa awan konveksi yang padat dapat mengganggu visibilitas pilot dan secara signifikan mengurangi jarak pandang. Dalam kondisi yang sangat ekstrem, awan konveksi dapat memicu petir, yang mengancam keselamatan penerbangan dengan potensi kerusakan pada sistem navigasi dan peralatan elektronik pesawat. Oleh karena itu, penilaian awal terhadap area yang berpotensi memiliki awan konveksi sangat penting dalam merencanakan rute penerbangan yang aman.

1.3.3 Masa Kemarau dan Karakteristik Cuaca di Indonesia Timur

Musim kemarau di Indonesia Timur umumnya berlangsung dari bulan Mei hingga September. Selama periode ini, kondisi cuaca dan dinamika atmosfer mengalami perubahan yang signifikan. Menurut Riihimaki, Mcfarlane, & Comstock. (2012), musim kemarau ditandai dengan dominasi angin musim kemarau dari Australia, yang membawa udara kering dan dingin ke wilayah tersebut. Hal ini mengakibatkan penurunan curah hujan yang drastis, dengan banyak daerah mengalami kondisi yang sangat kering dan cerah. Suhu udara selama musim ini cenderung meningkat, menyebabkan peningkatan penguapan dan berkurangnya kelembapan tanah.

Selama musim kemarau, pembentukan awan konveksi juga menurun secara signifikan. Riihimaki et al. (2012) menjelaskan bahwa dengan berkurangnya kelembapan dan adanya angin kering, cuaca menjadi lebih stabil, yang mengakibatkan langit yang lebih cerah. Meskipun demikian, suhu yang lebih tinggi dapat menyebabkan kekeringan di beberapa daerah, yang berpotensi mempengaruhi sektor pertanian dan ketersediaan air bersih.

Dampak dari musim kemarau terhadap kondisi sosial dan ekonomi di Indonesia Timur cukup besar. Penurunan curah hujan dan kekeringan yang berkepanjangan dapat berdampak pada produksi pertanian, menyebabkan penurunan hasil panen, dan meningkatkan risiko kebakaran hutan. Selain itu, dengan kondisi cuaca yang lebih stabil, penerbangan cenderung mengalami dampak yang lebih ringan dibandingkan dengan peralihan dari musim kemarau ke musim hujan, meskipun suhu yang lebih tinggi bisa memengaruhi performa pesawat. Oleh karena itu, memahami dinamika musim kemarau sangat penting untuk perencanaan pertanian dan pengelolaan sumber daya air di wilayah ini.

1.3.4 Model Prediksi Awan Konveksi dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi

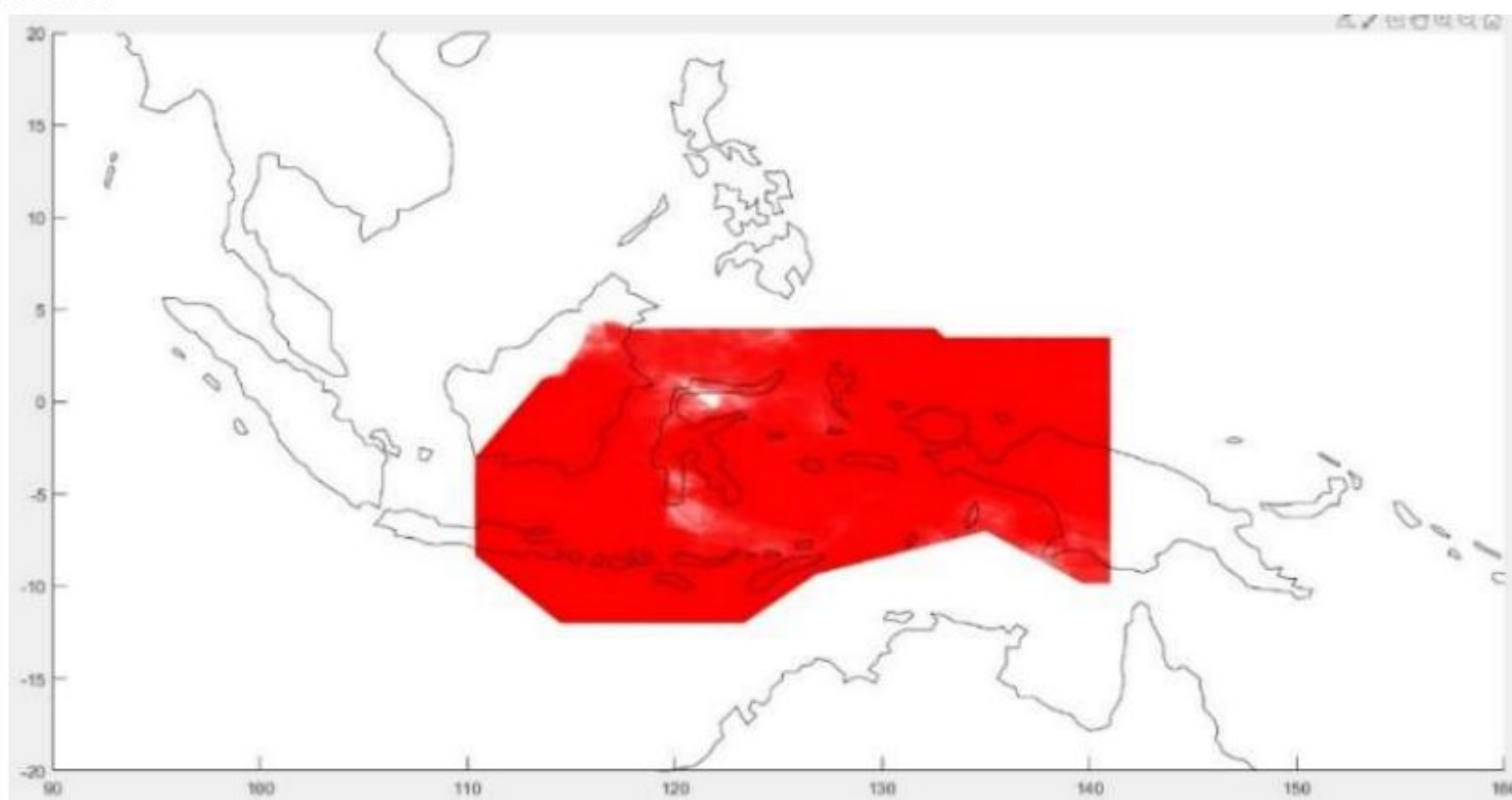
Model prediksi awan konveksi memiliki peranan penting dalam usaha untuk memahami serta meramalkan pembentukan dan evolusi awan konveksi serta dampaknya terhadap cuaca lokal dan global. Tinjauan literatur yang dilakukan oleh Prein et al. (2020) mengungkapkan bahwa model numerik, seperti model atmosfer dan model iklim, telah diadopsi untuk mensimulasikan dinamika awan konveksi dalam berbagai skala. Model ini mencakup berbagai variabel seperti suhu, kelembapan, tekanan, dan arah angin untuk merepresentasikan gerakan vertikal udara yang memicu pembentukan dan perkembangan awan konveksi. Penggunaan model ini telah memungkinkan peneliti untuk memprediksi pola terbentuknya awan konveksi dengan lebih akurat, termasuk di wilayah kompleks seperti Indonesia Timur.

Pembentukan awan konveksi adalah fenomena yang sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor atmosfer, oseanografi, dan geografis. Penelitian yang diterbitkan oleh Desbiolles et al. (2021) mengidentifikasi beberapa faktor utama yang berkontribusi pada pembentukan awan konveksi, termasuk suhu permukaan laut, kelembapan udara, adveksi udara, dan topografi. Di wilayah Indonesia Timur, suhu permukaan laut yang tinggi membentuk reservoir energi termal yang penting untuk mendorong proses konveksi. Kelembapan udara yang melimpah, terutama di atas lautan tropis, memberikan sumber uap air yang diperlukan untuk pertumbuhan awan. Adveksi udara, yang mengatur pergerakan massa udara horizontal, juga berperan dalam mengatur vertikalnya udara yang dapat memicu pembentukan awan konveksi.

Pengembangan model prediksi awan konveksi dan pemahaman faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan awan tersebut membawa dampak yang signifikan terhadap prediksi cuaca dan operasional penerbangan. Hasil penelitian oleh Sun et al. (2022) menyoroti bahwa model numerik berperan penting dalam meningkatkan akurasi prediksi cuaca yang berkaitan dengan pembentukan awan konveksi. Prediksi yang lebih akurat tentang waktu, lokasi, dan intensitas pembentukan awan konveksi dapat memberikan informasi yang sangat berharga bagi pihak terkait dalam merencanakan dan mengelola operasional penerbangan. Selain itu, pemahaman yang lebih dalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan awan konveksi membawa potensi untuk meningkatkan keselamatan penerbangan dengan memberikan panduan yang lebih baik dalam menghindari kondisi cuaca yang tidak aman.

1.3.5 Data SIGMET (Significant Meteorological Information)

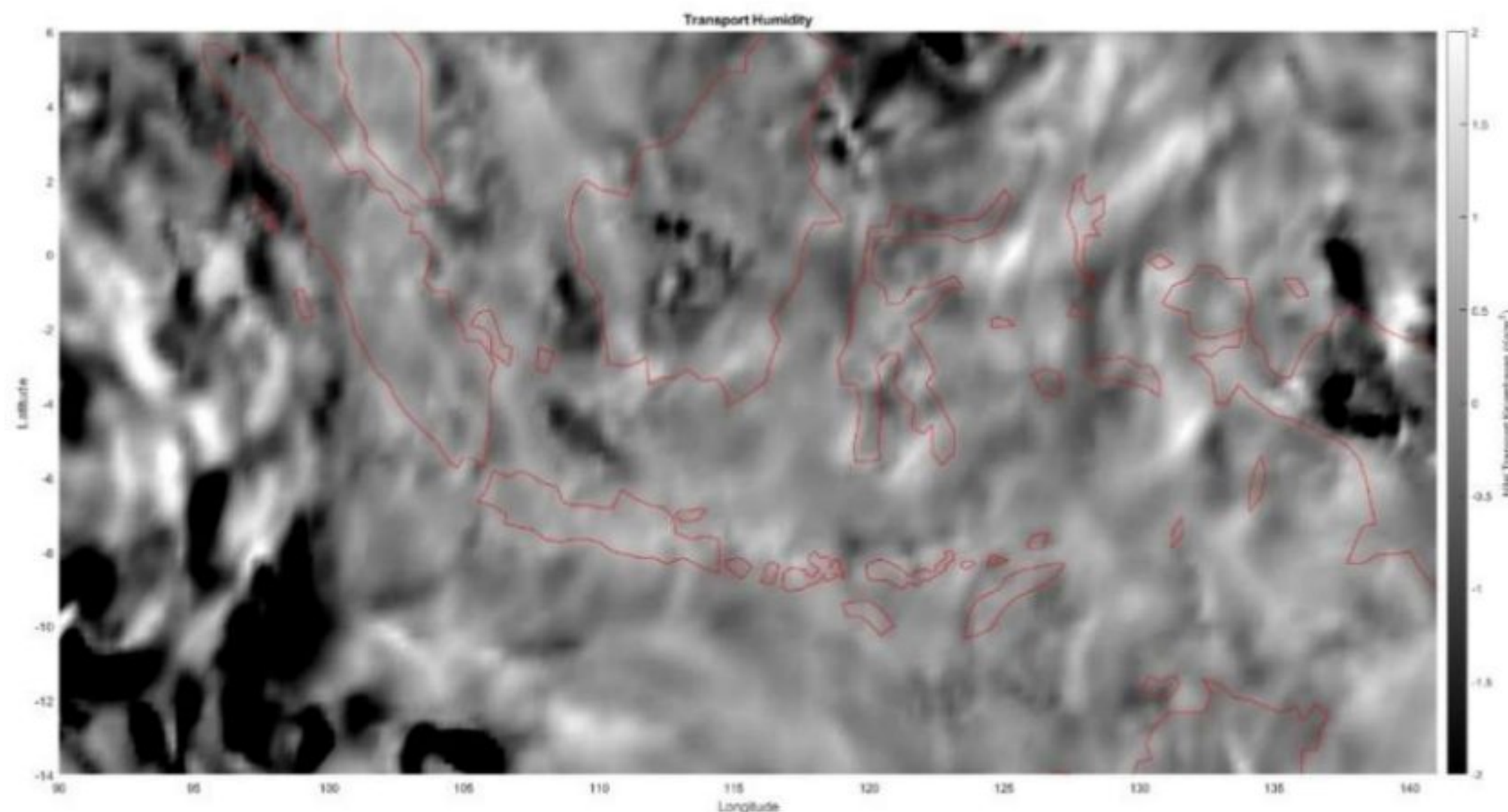
Data SIGMET (Significant Meteorological Information) adalah sumber penting untuk memahami dan memprediksi fenomena cuaca ekstrem, termasuk awan konveksi. Berdasarkan penelitian Leung et al. (2020), SIGMET memberikan laporan cuaca yang diterbitkan oleh otoritas penerbangan dan berisi informasi mengenai fenomena cuaca signifikan, seperti turbulensi, badai, serta awan konveksi. Data ini dikumpulkan dari beragam sumber, termasuk laporan pilot dan observasi darat. Dalam konteks prediksi awan konveksi, data SIGMET memainkan peran penting dalam memantau perkembangan awan konveksi yang dapat memengaruhi operasi penerbangan dan cuaca lokal.



Gambar 4. Visualisasi data SIGMET

1.3.6 Transport Kelembaban (Transport Humidity)

Kelembapan udara merupakan faktor esensial dalam pembentukan awan konveksi. Penelitian oleh Tazarek et al. (2021) menunjukkan bahwa transformasi kelembapan bisa menjadi indikator penting dalam memprediksi awan konveksi. Proses ini melibatkan analisis data kelembapan yang dikumpulkan dari satelit atau pengukuran permukaan. Di Indonesia Timur, yang memiliki kelembapan tinggi, transformasi kelembapan berperan semakin penting. Penelitian ini menemukan bahwa perubahan kelembapan di berbagai lapisan atmosfer dapat membantu menjelaskan pergerakan udara vertikal dan pembentukan awan konveksi.

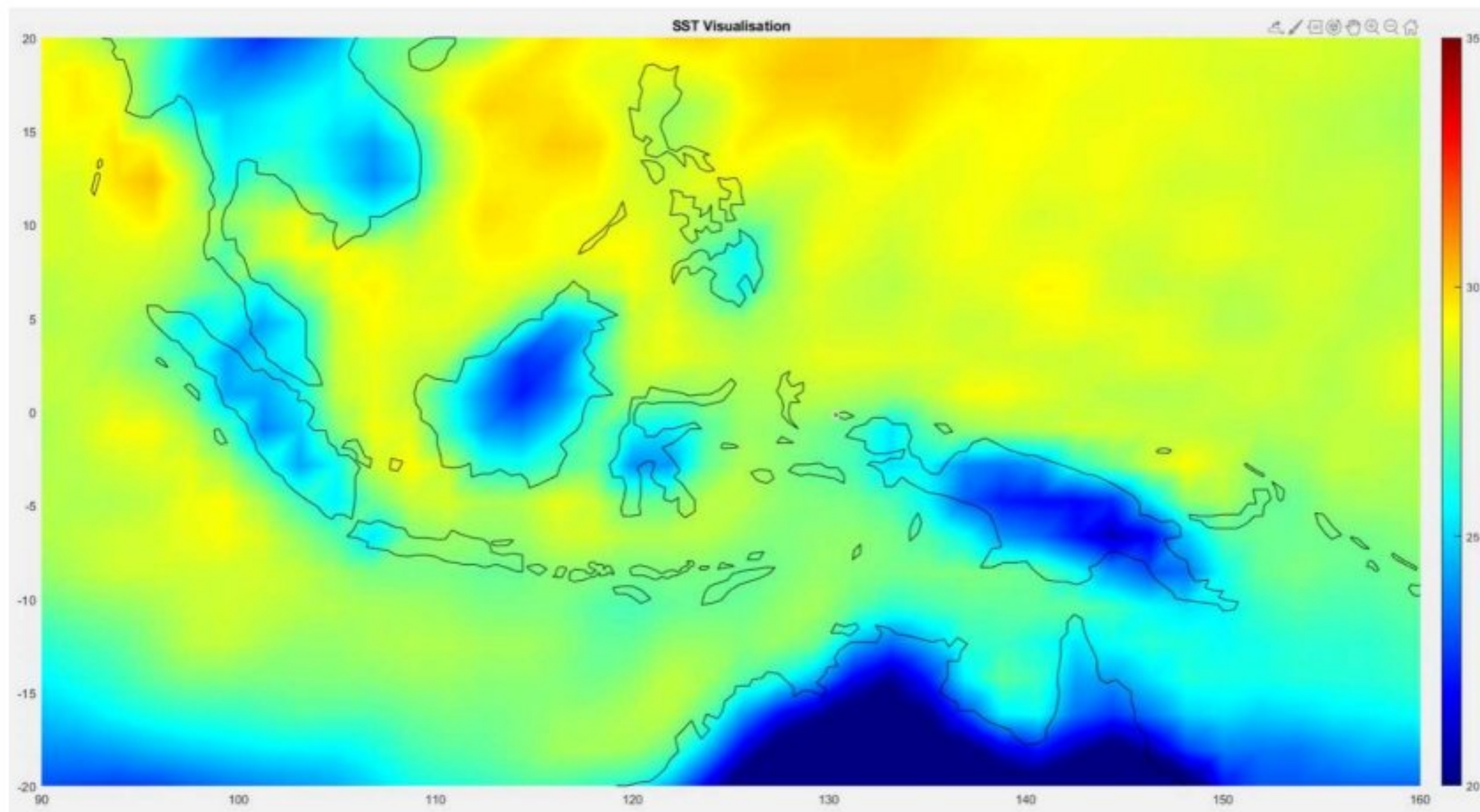


Gambar 5. Visualisasi transpor kelembapan

Integrasi data SIGMET dan transformasi kelembapan memiliki manfaat besar dalam prediksi cuaca dan keselamatan penerbangan. Stone et al. (2020) menyatakan bahwa penggunaan data SIGMET dalam model prediksi cuaca dapat meningkatkan ketepatan prediksi mengenai lokasi dan intensitas fenomena cuaca ekstrem, termasuk awan konveksi. Selain itu, transformasi kelembapan memberikan wawasan yang lebih mendalam terkait kondisi atmosfer yang mendukung pembentukan awan konveksi. Kombinasi kedua sumber informasi ini memberikan pandangan yang lebih komprehensif dan akurat tentang perkembangan awan konveksi, yang sangat berharga dalam manajemen risiko cuaca dan operasional penerbangan.

1.3.7 Suhu Tropopause dan Permukaan Laut

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



Gambar 6. Visualisasi Suhu Permukaan Laut

Suhu permukaan laut juga berperan penting dalam proses penguapan dan pelepasan energi laten ke atmosfer, yang menjadi pendorong utama pembentukan awan konveksi. Wilayah dengan SST tinggi, seperti zona konvergensi antartropis (Intertropical Convergence Zone/ITCZ), merupakan pusat aktivitas konvektif akibat tingginya tingkat penguapan. Variasi SST dipengaruhi oleh fenomena seperti El Niño–Southern Oscillation (ENSO), yang mengubah pola distribusi awan konveksi. Selama El Niño, pemanasan SST di Pasifik Tengah menggeser awan konveksi ke arah timur. Penelitian Okumura (2019) menyoroti bahwa perubahan SST memengaruhi tidak hanya proses lokal tetapi juga pola cuaca dan curah hujan global.

Interaksi antara suhu tropopause dan SST menciptakan kondisi yang mendukung pembentukan awan konveksi melalui peningkatan ketidakstabilan konvektif. SST tinggi meningkatkan penguapan, dan uap air yang naik ke tropopause mengalami kondensasi jika suhu lapisan atas lebih dingin, meningkatkan peluang pembentukan awan konveksi. Studi Sun et al. (2019) menunjukkan bahwa intensitas awan konveksi meningkat seiring kenaikan SST, terutama di wilayah dengan gradien suhu vertikal curam. Hubungan ini mencerminkan pengaruh suhu laut dan atmosfer terhadap dinamika atmosfer secara luas.

Dalam konteks penerbangan, pemanasan global dapat memperkuat hubungan ini. Suhu global yang meningkat tidak hanya memengaruhi SST tetapi juga menyebabkan perubahan pola distribusi awan konveksi, termasuk pergeseran geografis ke arah kutub. Penelitian Lau et al. (2023) menyebutkan bahwa perubahan ini dapat mengubah pola curah hujan global secara signifikan, dengan dampak penting terhadap keberlanjutan sumber daya air dan kejadian cuaca ekstrem. Oleh karena itu, suhu tropopause dan SST adalah faktor kunci dalam pembentukan dan distribusi awan konveksi.

1.3.8 Curah Hujan

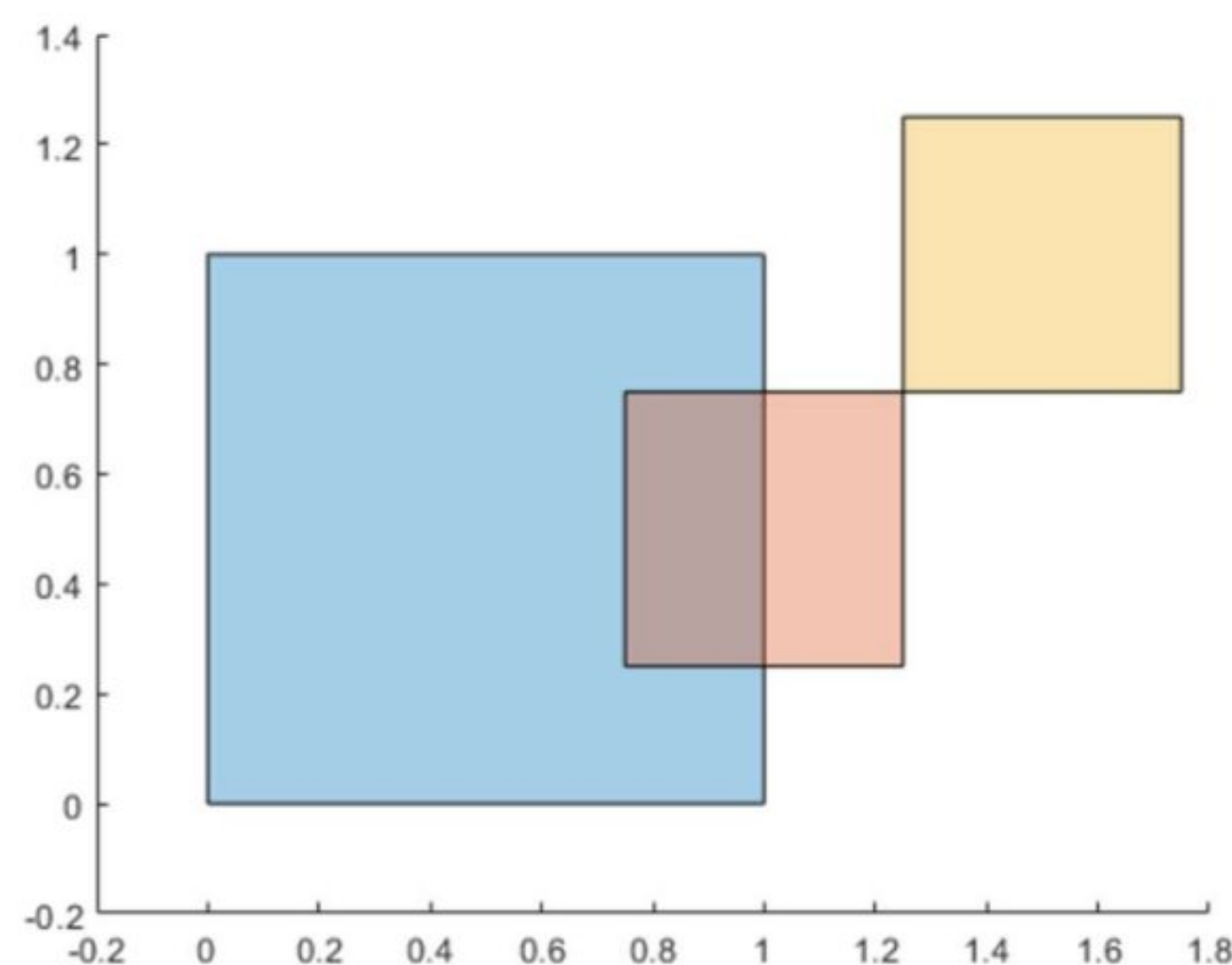
Curah hujan memiliki keterkaitan erat dengan jumlah dan distribusi awan konvektif, yang berperan penting dalam dinamika atmosfer, terutama di wilayah tropis. Sebagai hasil dari proses konveksi, curah hujan intens sering mencerminkan aktivitas konvektif yang kuat. Awan konvektif, seperti cumulonimbus (Cb), menjadi penyebab utama curah hujan lebat dan cuaca ekstrem seperti badai petir dan angin kencang. Sebaran awan

konvektif bergantung pada pola curah hujan, yang dipengaruhi oleh faktor seperti SST, gradien suhu vertikal tropopause, dan kondisi atmosfer global. Misalnya, selama El Niño, pola curah hujan bergeser ke wilayah Pasifik Tengah, sedangkan La Niña memperkuat awan konvektif di Pasifik Barat (Okumura, 2019). Selain itu, topografi seperti pegunungan juga memengaruhi distribusi awan konvektif melalui mekanisme konveksi lokal.

Hubungan antara curah hujan dan awan konvektif berdampak signifikan pada keselamatan penerbangan. Awan konvektif yang menghasilkan curah hujan lebat sering menciptakan kondisi cuaca ekstrem, seperti turbulensi, petir, dan microburst, yang berisiko bagi pesawat saat lepas landas, mendarat, atau dalam penerbangan. Hujan deras juga dapat mengurangi jarak pandang dan menyebabkan genangan di landasan pacu, meningkatkan risiko tergelincir (hydroplaning). Penelitian Tanui (2022) mengidentifikasi curah hujan intens yang terkait dengan awan konvektif sebagai salah satu faktor utama gangguan operasional penerbangan. Selain itu, curah hujan tinggi sering meningkatkan ketidakstabilan atmosfer melalui pelepasan energi laten, yang dapat memicu pembentukan awan konvektif tambahan, menciptakan siklus konveksi yang lebih intensif (Finney et al. 2020).

1.3.9 Metode Tumpang Tindih (*Overlap*)

Indikator overlap dapat berupa skalar, vektor, matriks, atau larik multidimensi. Jika dua argumen polyshape digunakan, pastikan ukuran keduanya sesuai. Sebagai contoh, ketika dua vektor polyshape memiliki panjang berbeda, M dan N, orientasi mereka harus berbeda, yaitu satu sebagai vektor baris dan satu lagi sebagai vektor kolom. Matriks TF akan memiliki ukuran M-by-N atau N-by-M sesuai dengan orientasi masing-masing vektor input. Jika hanya satu vektor polyshape tunggal dengan panjang N yang dimasukkan, maka TF akan berukuran N-by-N.



Gambar 7. Visualisasi metode *overlaps* (Sumber: Mathworks)

Fenomena overlapping, atau tumpang tindih awan konveksi, menggambarkan interaksi antara dua atau lebih sistem awan konveksi dalam jarak yang berdekatan. Interaksi ini dapat menghasilkan efek sinergis yang berdampak signifikan pada kondisi cuaca lokal. Menurut penelitian oleh Schoeberl et al. (2018), fenomena overlapping ini

dapat memicu cuaca ekstrem seperti hujan lebat, angin kencang, dan petir yang intens. Pada kasus tumpang tindih ekstrem, awan kumulonimbus super sel dapat terbentuk, yang berpotensi menyebabkan bencana cuaca.

Overlapping awan konveksi berpotensi memperparah kondisi cuaca lokal. Penelitian yang dilakukan oleh Oreopoulos & Khairoutdinov (2003) menunjukkan bahwa interaksi antara dua sistem awan konveksi dapat meningkatkan curah hujan dan intensitas petir. Dampak ini sangat relevan terutama bagi wilayah-wilayah yang sudah rentan terhadap banjir dan longsor. Di Indonesia Timur, yang mengalami curah hujan tinggi selama musim peralihan, pemahaman mengenai dampak potensial overlapping ini menjadi sangat penting dalam upaya mitigasi risiko bencana alam.

Pemahaman yang mendalam tentang overlapping memiliki implikasi penting bagi prediksi cuaca dan keselamatan penerbangan. Menurut penelitian Mkhathwa et al. (2021), prediksi fenomena overlapping memerlukan model yang lebih canggih untuk menganalisis interaksi antar sistem awan konveksi. Penggunaan data SIGMET dan analisis transformasi kelembaban dapat membantu memperkirakan kemungkinan terjadinya overlapping. Dalam konteks penerbangan, informasi mengenai overlapping awan konveksi dapat membantu maskapai menghindari rute dengan potensi 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 reksrusif (RE) pada phyton (code python dapat dilihat pada lampiran 1).
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 (code plot data sigmet dapat dilihat pada lampiran 1).
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 (code plot intersect dapat dilihat pada lampiran 1).
5. Selesai
Pada titik ini, dihasilkan identifikasi 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*) dan ERA5
Mulai dengan mengakses data NOAA yang mencakup suhu permukaan laut, suhu tropopause, curah hujan, dan transport kelembaban dari ERA5
2. Memvisualisasikan data
Membuat visualisasi data suhu permukaan laut, suhu tropopause, curah hujan, dan transport kelembaban.
3. Transport Kelembaban Menggunakan Rumus
Transport kelembaban dapat dihitung dengan rumus yang digunakan oleh, (Fasullo, J. and Webster, P.J, 2003):

$$Bq = \int_{1024}^{300} q V dz \quad (1)$$

Keterangan:

Bq : Tanspor uap air rata-rata

V : Vektor kecepatan angin horizontal pada ketinggian (z)

q : Kelembaban spesifik pada ketinggian (z)

(code untuk visualisasi dapat dilihat di lampiran 1)

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 (code *overlay* dapat dilihat pada lampiran 1).

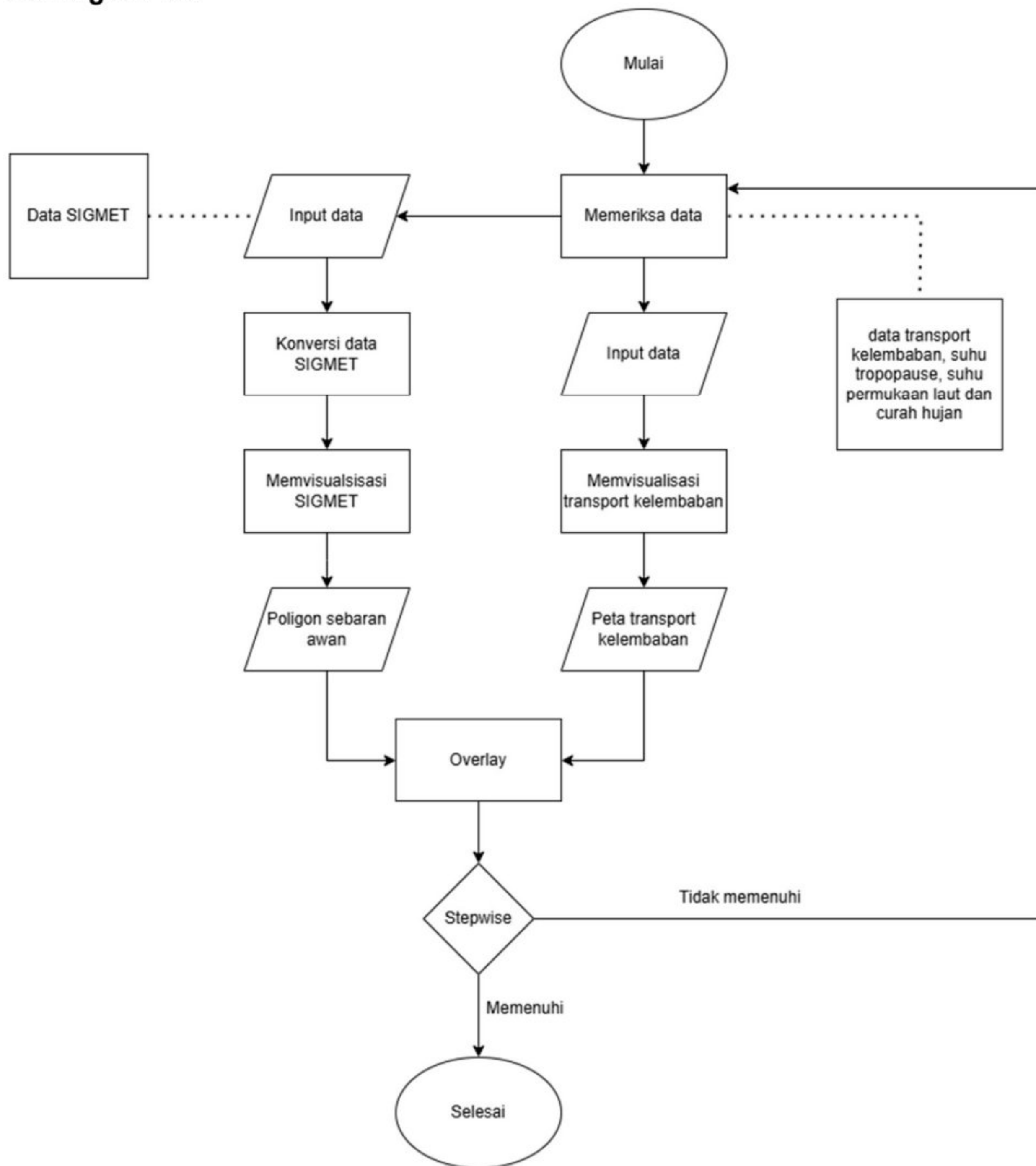
4. Lakukan Evaluasi dan Tindakan Selanjutnya

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 8. Bagan pikir