

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Dalam perkembangan pesat industri penerbangan, aspek keselamatan dan efisiensi operasional menjadi prioritas utama. Berdasarkan data dari 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 telah menurun, cuaca tetap menjadi salah satu penyebab utama insiden penerbangan. Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 12,33% kecelakaan pesawat di Indonesia terkait dengan faktor lingkungan, termasuk kondisi cuaca ekstrem.

Dalam konteks ini, cuaca memiliki peran penting, terutama distribusi awan konveksi. Awan konveksi muncul akibat pergerakan vertikal udara panas yang dapat menyebabkan fenomena cuaca ekstrem seperti hujan lebat, petir, dan turbulensi udara (Smith et al., 2018). Di Indonesia, terutama bagian timur, dengan iklim tropisnya, sebaran awan konveksi sangat signifikan selama masa peralihan.

Masa peralihan merupakan periode antara musim hujan dan musim kemarau, ditandai oleh fluktuasi cuaca yang tidak stabil, yang dipengaruhi oleh perubahan arah angin dan distribusi panas di sekitar khatulistiwa. Sebaran awan konveksi yang sulit diprediksi memiliki dampak serius pada operasional penerbangan, terutama dalam aspek keselamatan dan ketepatan waktu penerbangan. Turbulensi udara dan pengurangan jarak pandang akibat awan konveksi dapat mempengaruhi kualitas dan ketepatan waktu penerbangan (Hawker et al., 2021).

Kemampuan meramalkan distribusi awan konveksi menjadi krusial, terutama di wilayah Indonesia Timur yang sering mengalami sebaran awan konveksi yang signifikan. Prediksi yang akurat memberikan informasi berharga bagi operator penerbangan, memungkinkan mereka mengoptimalkan rute penerbangan dan mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan.

Sejumlah usaha telah dilakukan untuk mengembangkan model prediksi sebaran awan konveksi. Penggunaan data SIGMET (*Significant Meteorological Information*) sebagai sumber informasi cuaca penting telah memainkan peran dalam meningkatkan prediksi tentang pembentukan dan pergerakan awan konveksi. Selain itu, penggunaan data transformasi Kelembapan udara juga telah diakui sebagai faktor kunci dalam meningkatkan akurasi prediksi sebaran awan konveksi. Melalui penggabungan data SIGMET dan data transport Kelembapan, prediksi awan konveksi dapat ditingkatkan dalam hal ketepatan dan waktu (Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999).

Berbagai penelitian telah berfokus pada prediksi sebaran SIGMET di berbagai wilayah. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Craig et al. pada tahun 1999, verifikasi SIGMET dapat dilakukan dengan menggunakan metode sistem verifikasi *real-time*. Metode ini akan menghitung data dari temuan pilot dengan probabilitas kemunculan SIGMET menggunakan parameter “ya” dan “tidak”. Namun, kekurangan dari metode ini ialah wilayah cakupan prakiraan yang lebih kecil pada eksperimental menyebabkan hasil yang lebih spesifik tetapi berpotensi melewatkan area penting. Selain itu penelitian lain terkait SIGMET dilakukan oleh Khelsh dan Wharton pada tahun 1996 yang mana bahwasanya verifikasi yang didasarkan dari data real-time pilot menghasilkan data

laporan non-kejadian yang kurang konsisten dikarenakan prioritas utama pilot pada laporan kejadian. Dari kedua penelitian diatas didapatkan bahwasanya belum ada yang meramalkan sebaran SIGMET dalam cakupan luas sebagai saran lintasan dalam penerbangan. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan model prediksi yang lebih spesifik dengan mengkorelasikan data sebaran SIGMET dengan parameter cuaca seperti transport Kelembapan, suhu tropopause, suhu permukaan laut dan curah hujan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model prediksi sebaran awan konveksi di Indonesia Timur selama masa peralihan. Pendekatan gabungan antara data SIGMET dan parameter cuaca diharapkan menghasilkan prediksi yang lebih akurat dan relevan dengan kondisi setempat (Emanuel & Zivkovic-Rothman, 1999). Hasil penelitian diharapkan memberikan wawasan berharga bagi operator penerbangan untuk mengoptimalkan jalur penerbangan dan mengurangi risiko terkait sebaran awan konveksi.

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis sebaran SIGMET pada musim peralihan
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

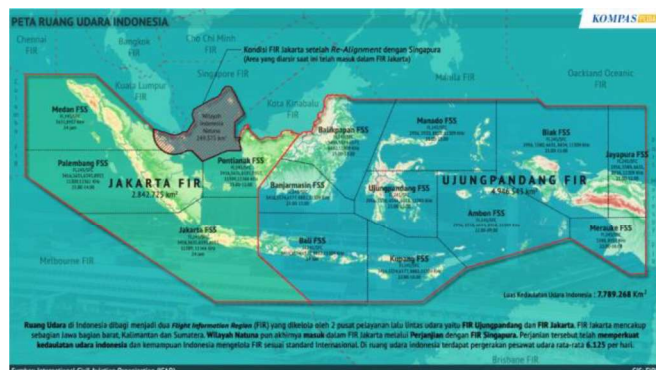
Industri penerbangan memiliki peran yang vital dalam ekonomi global, termasuk di Indonesia. Pertumbuhan pesat jumlah penumpang dan kargo telah menjadikan industri ini sebagai penghubung utama dalam perdagangan dan konektivitas internasional. Namun, dalam konteks ini, cuaca dan kondisi atmosfer memiliki dampak krusial pada operasional dan keselamatan penerbangan. Perubahan cuaca yang tak terduga bisa berdampak signifikan pada jadwal penerbangan, efisiensi operasional maskapai, dan juga keselamatan penumpang serta kru pesawat (IATA, 2019).



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

Kondisi cuaca memainkan peranan penting dalam berbagai aspek industri penerbangan, seperti navigasi udara, penerbangan, manajemen bandara, dan pemeliharaan pesawat. Gangguan cuaca seperti badai, turbulensi, kabut tebal, dan hujan deras mampu menyebabkan keterlambatan penerbangan, pembatalan, bahkan risiko kecelakaan. Dengan demikian, kajian mendalam tentang kondisi cuaca saat ini dan prediksi cuaca yang akurat menjadi sangat penting untuk pengambilan keputusan yang tepat di dalam industri ini (Kulesa, 2003).

Di Indonesia Timur, wilayah tropis dengan topografi yang beragam, cuaca memiliki variasi yang signifikan terutama selama musim peralihan. Transisi antara musim kemarau dan musim hujan membawa perubahan cuaca yang signifikan. Pergantian arah angin muson di musim peralihan bisa membawa kelembapan dan pembentukan awan konvektif yang dapat mempengaruhi operasional penerbangan. Oleh karena itu, pemahaman yang baik mengenai perubahan cuaca yang terjadi selama musim peralihan menjadi kunci dalam perencanaan operasional penerbangan di wilayah ini (BMKG, 2020).



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

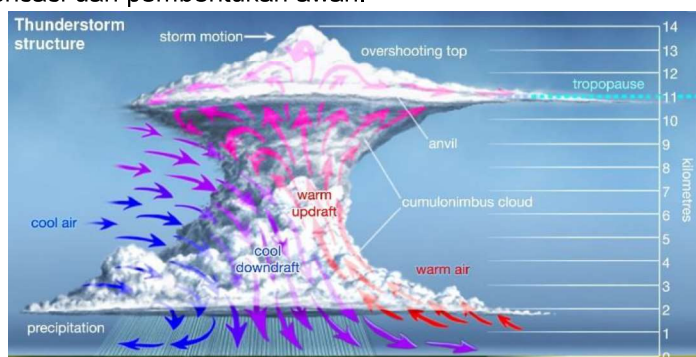
Pada tahap perencanaan penerbangan, prediksi cuaca berperan penting dalam menentukan rute penerbangan yang aman dan efisien. Maskapai penerbangan dan petugas navigasi udara menggunakan data cuaca terbaru dan model prediksi cuaca untuk menghindari cuaca ekstrem dan mengoptimalkan rute penerbangan. Cuaca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

Ketepatan dan akurasi prediksi cuaca memainkan peran besar dalam keberhasilan operasional dan keselamatan industri penerbangan. Penggunaan teknologi canggih seperti pemantauan satelit, radar cuaca, dan model numerik cuaca telah meningkatkan kualitas prediksi cuaca. Namun, tantangan masih ada dalam memprediksi fenomena cuaca lokal yang dapat berubah secara cepat. Oleh karena itu, kerja sama antara maskapai, pemerintah, dan lembaga meteorologi sangatlah penting untuk mengoptimalkan manajemen cuaca dalam industri penerbangan (Ferretti, 2020).

1.3.2 Awan Konveksi dan Dampaknya pada Penerbangan

Awan konveksi, yang terbentuk melalui pergerakan vertikal udara panas, memiliki dampak signifikan pada operasional penerbangan. Karakteristik dan dampak awan konveksi dapat dipahami melalui penelitian yang telah dilakukan.

Awan konveksi seringkali memiliki struktur vertikal yang dramatis, dengan pertumbuhan ke atas yang mencolok. Houze Jr. (2014) menjelaskan dalam karyanya tentang dinamika awan bahwa awan konveksi merupakan lokasi terbentuknya fenomena cuaca ekstrem seperti hujan lebat, kilat, dan turbulensi udara. Proses konveksi muncul saat udara panas naik dan mendingin ketika bergerak ke atas, memicu pembentukan awan. Interaksi antara udara panas yang naik dan udara dingin yang turun menciptakan kondisi kondensasi dan pembentukan awan.



Gambar 3. Struktur vertikal awan konveksi (Sumber: Encyclopedia Britanica 2012)

Gambar 1 mengilustrasikan struktur vertikal khas dari awan konveksi. Pertumbuhan yang signifikan ke atas dari awan ini dapat mempengaruhi cuaca lokal dengan dampak yang beragam.

Awan konveksi memiliki potensi untuk menciptakan turbulensi udara yang berbahaya bagi penerbangan. Devine (2006) dalam penelitiannya menyatakan bahwa pergerakan mendadak udara di sekitar awan konveksi dapat menyebabkan getaran dan gerakan yang tidak diinginkan pada pesawat. Dampak ini terjadi ketika pesawat melintasi area dengan perubahan suhu dan tekanan udara yang drastis.

Selain itu, awan konveksi juga dapat mengurangi jarak pandang. Menurut Houze Jr. (2014), awan konveksi yang padat mampu mengganggu pandangan pilot dan mereduksi jarak pandang dengan signifikan. Dalam situasi ekstrem, awan konveksi dapat memicu petir, mengancam keselamatan penerbangan dengan merusak sistem navigasi dan peralatan elektronik pesawat. Oleh karena itu, penilaian awal terhadap area yang mengandung potensi awan konveksi menjadi penting dalam merencanakan rute penerbangan yang aman.

1.3.3 Masa Peralihan dan Karakteristik Cuaca di Indonesia Timur

Masa peralihan dari musim kemarau ke musim hujan di Indonesia Timur terjadi sekitar bulan September hingga November. Selama periode ini, terjadi perubahan signifikan dalam pola cuaca dan dinamika atmosfer. Riihimaki (2012) menjelaskan bahwa transisi ini ditandai dengan berakhirnya dominasi angin musim kemarau Australia dan pergantian arah angin menjadi barat daya. Hal ini membawa angin lembap dari Samudera Pasifik, yang mengandung uap air yang cukup untuk memicu pembentukan awan-awan konveksi yang intens. Curah hujan mulai meningkat dan memasuki puncaknya selama awal musim hujan. Selain itu, Riihimaki (2012) juga mengungkapkan bahwa perubahan ini membawa suhu lebih hangat dan kelembapan yang lebih tinggi, yang mendukung pembentukan awan dan curah hujan yang lebih besar.

Transisi dari musim hujan ke musim kemarau di Indonesia Timur berlangsung sekitar bulan April hingga Mei. Pada periode ini, terjadi pergeseran arah angin dari timur laut ke barat laut. Suhu dan kelembapan udara turun secara signifikan karena pengaruh angin musim kemarau Australia yang kering dan dingin. Riihimaki (2012) mengungkapkan bahwa selama transisi ini, pembentukan awan konveksi menurun secara drastis dan cuaca cenderung menjadi lebih cerah dan kering. Curah hujan menurun drastis dan suhu udara yang lebih rendah memicu penguapan yang lebih cepat. Namun, pergeseran ini juga dapat mengakibatkan potensi kekeringan dan kurangnya pasokan air, yang memiliki dampak pada pertanian dan pasokan air bersih.

Dampak dari dua jenis peralihan cuaca di Indonesia Timur memiliki sifat dan kecenderungan yang berbeda. Peralihan dari musim kemarau ke musim hujan cenderung membawa dampak yang lebih berat pada penerbangan. Pembentukan awan konveksi yang intens selama masa ini dapat menghasilkan fenomena cuaca ekstrem seperti hujan lebat dan kilat. Hal ini meningkatkan risiko turbulensi udara dan mengganggu operasional penerbangan. Di sisi lain, peralihan dari musim hujan ke musim kemarau memiliki dampak yang lebih ringan pada penerbangan. Meskipun cuaca menjadi lebih cerah dan kering, perubahan arah angin dapat menyebabkan tantangan seperti peningkatan kecepatan angin lintang, yang dapat memengaruhi manuver pesawat dan operasional penerbangan.

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

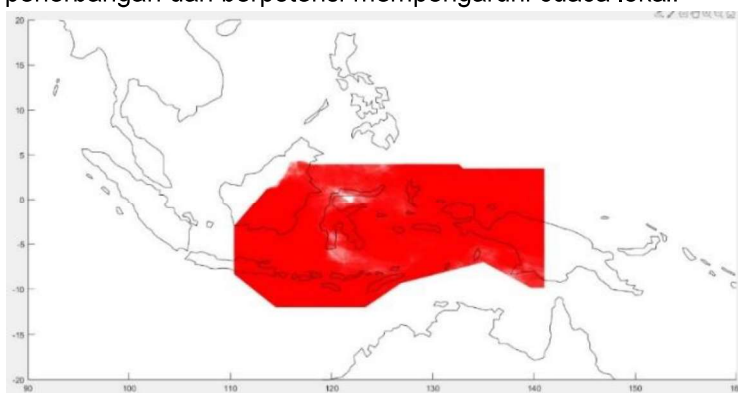
perkembangan awan konveksi. Penggunaan model tersebut memungkinkan prediksi yang lebih akurat mengenai pola pembentukan awan konveksi, termasuk di wilayah yang kompleks seperti Indonesia Timur.

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 faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukannya 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.

1.3.5 Data Significant Meteorological (SIGMET)

Data SIGMET (*Significant Meteorological Information*) adalah sumber informasi penting dalam memahami dan memprediksi fenomena cuaca ekstrem, termasuk pembentukan awan konveksi. Menurut penelitian yang disajikan oleh Leung et al. (2020), data SIGMET merupakan laporan cuaca yang dikeluarkan oleh otoritas penerbangan untuk memberikan informasi tentang fenomena cuaca signifikan seperti turbulensi, badai, dan awan konveksi. Data ini dihasilkan dari berbagai sumber termasuk laporan pilot dan observasi darat. Dalam konteks prediksi awan konveksi, data SIGMET membantu dalam memahami perkembangan awan konveksi yang mungkin mengganggu operasional penerbangan dan berpotensi mempengaruhi cuaca lokal.

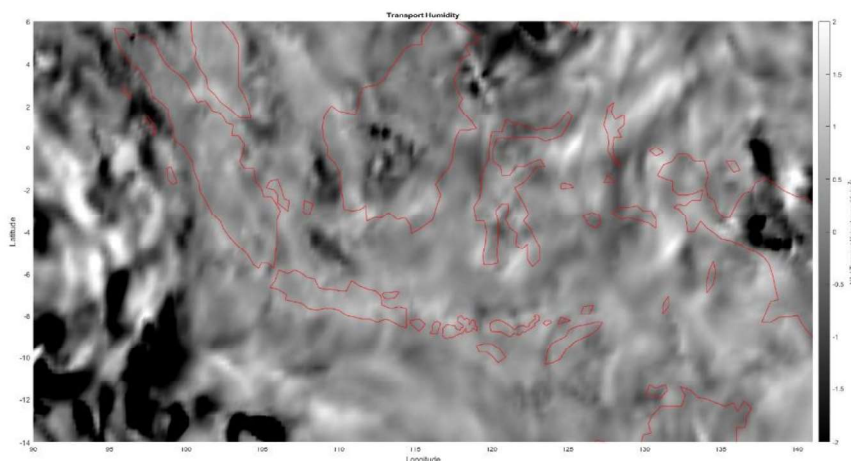


Gambar 4. Visualisasi data SIGMET

1.3.6 Transport Kelembapan (*Transport Humidity*)

Kelembapan udara adalah faktor kunci dalam pembentukan awan konveksi. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Tazzarek et al. (2021), transformasi Kelembapan telah diidentifikasi sebagai indikator potensial dalam memprediksi pembentukan awan

konveksi. Transformasi ini melibatkan pengolahan data Kelembapan udara yang diperoleh dari sumber seperti satelit atau pengukuran di permukaan. Dalam konteks Indonesia Timur, yang memiliki sumber daya Kelembapan yang melimpah, transformasi Kelembapan menjadi lebih penting. Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan Kelembapan di berbagai lapisan atmosfer dapat membantu memahami pergerakan vertikal udara dan pembentukan awan konveksi.



Gambar 5. Visualisasi transport kelembapan

Penerapan data SIGMET dan transformasi Kelembapan memiliki implikasi penting dalam prediksi cuaca dan keselamatan penerbangan. Penelitian yang dilakukan oleh Stone et al. (2020) menyoroti bahwa integrasi data SIGMET dalam model prediksi cuaca dapat meningkatkan akurasi dalam memprediksi lokasi dan intensitas fenomena cuaca ekstrem, termasuk pembentukan awan konveksi. Di sisi lain, transformasi Kelembapan dapat memberikan gambaran yang lebih mendalam tentang kondisi atmosfer yang mendukung pembentukan awan konveksi. Kombinasi informasi dari kedua sumber ini memiliki potensi untuk memberikan pandangan yang lebih lengkap dan akurat tentang perkembangan awan konveksi, yang sangat berharga dalam operasional penerbangan dan manajemen risiko cuaca.

1.3.7 Suhu Tropopause dan Permukaan Laut

Suhu tropopause dan suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature/SST*) memiliki peran krusial dalam mengendalikan dinamika atmosfer, terutama dalam pembentukan dan sebaran awan konveksi. Suhu tropopause, khususnya di lapisan tengah dan atas, menentukan kestabilan atmosfer melalui gradien suhu vertikal. Ketika udara hangat di permukaan naik dan bertemu dengan udara yang lebih dingin di lapisan atas, ketidakstabilan atmosfer dapat meningkat, mendorong pembentukan awan konveksi. Penelitian menunjukkan bahwa pemanasan global meningkatkan suhu tropopause bagian atas, yang berpotensi memperkuat aktivitas konvektif. Gradien suhu yang lebih curam antara permukaan dan lapisan atas tropopause menjadi pendorong utama dalam proses ini.

Sementara itu, suhu permukaan laut juga memainkan peran penting dalam proses penguapan dan pelepasan energi laten ke atmosfer, yang menjadi pemicu utama

awan konveksi. Kawasan dengan SST tinggi, seperti zona konvergensi antartropis (Intertropical Convergence Zone/ITCZ), menjadi pusat utama aktivitas konvektif karena tingginya tingkat penguapan. Variasi SST juga dipengaruhi oleh fenomena El Niño–Southern Oscillation (ENSO), yang mengubah pola distribusi awan konveksi secara signifikan. Selama fase El Niño, pemanasan SST di wilayah Pasifik Tengah menggeser sebaran awan konveksi ke arah timur, sebagaimana dijelaskan dalam penelitian Okumura (2019) variasi ini menunjukkan bahwa perubahan SST tidak hanya memengaruhi 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. Ketika SST tinggi memicu penguapan yang lebih besar, uap air yang naik ke tropopause dapat mengalami kondensasi, terutama jika suhu lapisan atas tropopause relatif dingin. Proses ini meningkatkan kemungkinan pembentukan awan konveksi dan curah hujan intensif di wilayah tropis. Studi Zhang et al. (2019) menunjukkan bahwa intensitas awan konveksi cenderung meningkat seiring kenaikan SST, terutama di kawasan dengan gradien suhu vertikal yang curam. Hal ini menunjukkan adanya hubungan langsung antara suhu lautan dan atmosfer dengan dinamika atmosfer yang lebih luas.

Dalam konteks penerbangan, peningkatan suhu global berpotensi memperkuat hubungan ini. Pemanasan global tidak hanya meningkatkan SST tetapi juga menyebabkan perubahan pola sebaran awan konveksi, termasuk pergeseran geografis ke arah kutub. Studi Lau dan Wu (2023) menyoroti bahwa dampak ini dapat mengubah pola curah hujan global secara signifikan, dengan konsekuensi penting bagi keberlanjutan sumber daya air dan pola cuaca ekstrem. Oleh karena itu, suhu tropopause dan SST menjadi salah satu faktor penting dalam pembentukan serta sebaran awan konveksi.

1.3.8 Curah Hujan

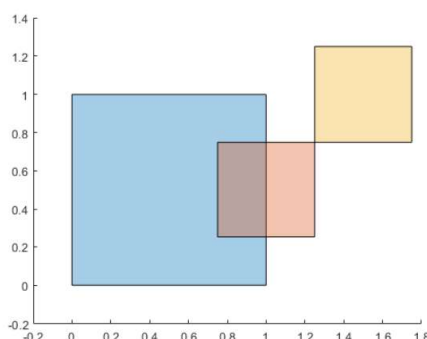
Curah hujan memiliki hubungan erat dengan jumlah dan sebaran awan konvektif, yang memainkan peran penting dalam dinamika atmosfer, terutama di wilayah tropis. Sebagai hasil dari proses konveksi, curah hujan yang intens sering kali mencerminkan aktivitas konveksi yang kuat di atmosfer. Awan konvektif seperti cumulonimbus (Cb) menjadi penghasil utama curah hujan intensif, sekaligus berkontribusi pada fenomena cuaca ekstrem seperti badai petir dan angin kencang. Sebaran awan konvektif sangat bergantung pada pola curah hujan, yang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti suhu permukaan laut (SST), gradien suhu vertikal di tropopause, dan kondisi atmosfer global. Misalnya, selama fenomena El Niño, pola curah hujan berubah, menyebabkan pergeseran konsentrasi awan konvektif ke wilayah Pasifik Tengah, sedangkan La Niña memperkuat awan konvektif di Pasifik Barat (Okumura, 2019). Selain itu, topografi daratan seperti pegunungan juga memengaruhi distribusi awan konvektif melalui mekanisme konveksi lokal.

Hubungan antara curah hujan dan awan konvektif ini memiliki dampak signifikan terhadap keselamatan penerbangan. Awan konvektif yang menghasilkan curah hujan intens sering kali menciptakan kondisi cuaca ekstrem, seperti turbulensi, petir, dan *microburst*, yang berpotensi membahayakan pesawat selama pendakian, pendaratan, atau bahkan dalam penerbangan level. Hujan deras yang dihasilkan juga dapat menyebabkan pengurangan jarak pandang dan genangan air di landasan pacu,

meningkatkan risiko tergelincir (*hydroplaning*). Penelitian Tanui (2022) menunjukkan bahwa curah hujan intensif yang dikaitkan dengan awan konvektif adalah salah satu faktor utama dalam gangguan operasi penerbangan. Selain itu, curah hujan yang tinggi sering kali meningkatkan ketidakstabilan atmosfer melalui pelepasan energi laten, yang dapat memicu pembentukan awan konvektif tambahan, menciptakan siklus konveksi yang semakin intensif (Finney et al, 2020).

1.3.9 Metode Tumpang Tindih (*Overlap*)

Indikator overlap dapat menghasilkan output dalam bentuk skalar, vektor, matriks, atau larik multidimensi. Jika dua argumen *polyshape* dimasukkan, perlu dipastikan agar ukuran keduanya kompatibel. Misalnya, jika dua vektor *polyshape* memiliki panjang berbeda, M dan N, salah satunya harus berupa vektor baris dan lainnya vektor kolom agar orientasi sesuai. Matriks TF akan memiliki ukuran M-by-N atau N-by-M, bergantung pada orientasi masing-masing vektor input. Apabila hanya satu vektor *polyshape* dengan panjang N yang digunakan, maka TF akan berbentuk N-by-N.



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

Fenomena overlapping, atau tumpang tindih awan konveksi, merujuk pada interaksi antara dua atau lebih sistem awan konveksi dalam jarak relatif dekat. Interaksi ini dapat menciptakan efek sinergis yang berdampak signifikan pada cuaca lokal. Menurut penelitian Schoebel et al. (2018), overlapping awan konveksi dapat memicu cuaca ekstrem, seperti hujan deras, angin kencang, dan petir yang intens. Dalam kondisi tumpang tindih yang ekstrem, dapat terbentuk awan kumulonimbus super sel yang berpotensi memicu bencana cuaca.

Overlapping awan konveksi memiliki potensi memperburuk kondisi cuaca lokal. Studi Oreopoulos & Khairoutdinov (2003) menunjukkan bahwa interaksi antara dua sistem awan konveksi dapat meningkatkan curah hujan dan intensitas petir. Dampak ini berpengaruh besar terutama pada wilayah yang rentan terhadap banjir dan longsor. Di Indonesia Timur, yang sering mengalami curah hujan tinggi selama musim peralihan.

Overlapping memiliki implikasi penting dalam prediksi cuaca dan keselamatan penerbangan. Menurut Mkhathshwa et al. (2021), prediksi fenomena overlapping memerlukan model yang lebih kompleks untuk menganalisis interaksi antar sistem awan konveksi. Penggunaan data SIGMET dan analisis transformasi Kelembapan dapat mendukung pengkategorian jumlah SIGMET di suatu wilayah. Dalam penerbangan, informasi mengenai overlapping awan konveksi dapat membantu maskapai menghindari rute yang berpotensi menghadapi cuaca ekstrem dan risiko turbulensi 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 Kelembapan 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 kelembapan dari ERA5
2. Memvisualisasikan data
Membuat visualisasi data suhu permukaan laut, suhu tropopause, curah hujan, dan transport Kelembapan.
3. Transport Kelembapan Menggunakan Rumus
Transport Kelembapan dapat dihitung dengan rumus yang digunakan oleh, (Webster dan Fasullo, 2003):

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

Keterangan:

Bq : Tansport uap air rata-rata

V : Vektor kecepatan angin horizontal pada ketinggian (z)

q : Kelembapan 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 Kelembapan) dengan cara menumpuk (*overlay*) informasi SIGMET pada lapisan transport Kelembapan 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 Kelembapan.

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).

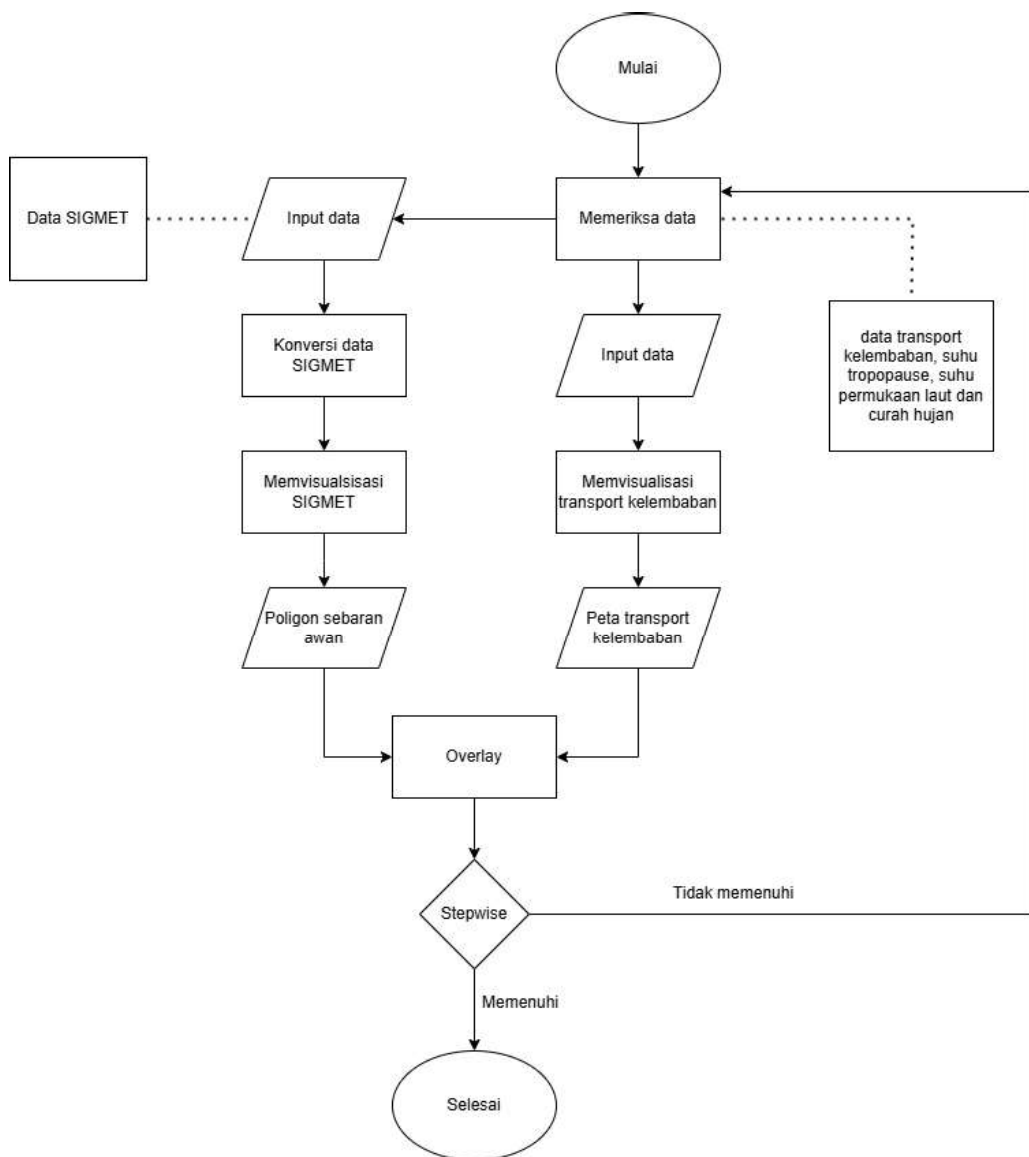
4. Lakukan Evaluasi dan Tindakan Selanjutnya

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 kelembapan 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