

Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin untuk Deteksi Crosswind di Bandara Radin Inten II Menggunakan Metode Windrose

Damil Amidayantik¹, Joko Triloka^{*2}, Suci Mutiara³

^{1,2,3}Fakultas Ilmu Komputer, Institut Informatika dan Bisnis Darmajaya, Jl. Z.A. Pagar Alam No.93, Kota Bandar Lampung, 35141, Indonesia

E-mail: amidayantik.2321210017p@mail.darmajaya.ac.id, joko.triloka@darmajaya.ac.id, sucimutiara@darmajaya.ac.id

Abstract — Aviation safety is strongly influenced by wind direction and wind speed, particularly during critical phases of flight such as take-off and landing. One of the most challenging wind conditions for airport operations is crosswind, which occurs when the wind blows perpendicular to the runway direction and can reduce aircraft controllability. Therefore, a comprehensive understanding of wind characteristics around an airport is essential to support safe and efficient flight operations. This study analyzes the distribution of wind direction and wind speed at Radin Inten II Airport using the windrose method as the primary analytical approach, supported by histogram and heatmap visualizations. The dataset consists of historical wind observations collected hourly by the Meteorology, Climatology, and Geophysics Agency (BMKG) Lampung over a ten-year period from 2014 to 2023. The data were processed to identify dominant wind directions, wind speed variability, and periods with a higher potential for crosswind conditions that may disrupt airport operations. The results indicate that the dominant wind direction at Radin Inten II Airport generally originates from the northwest, with prevailing wind speeds ranging between 2 and 6 knots, reflecting relatively stable wind conditions. However, several periods exhibit higher wind speeds that may increase the risk of crosswind occurrences. Further analysis reveals specific months with an increased frequency of crosswind events approaching critical operational thresholds, which require greater attention from airport operators. The findings of this study provide practical recommendations for airport management in determining appropriate runway usage, enhancing situational awareness during high-risk periods, and developing mitigation strategies such as flight schedule adjustments and runway infrastructure improvements. In addition, this research is expected to serve as a reference for other airports with similar wind characteristics in improving aviation safety and operational efficiency.

Key word — crosswind; windrose; wind speed; wind direction; flight safety.

Abstrak — Keselamatan penerbangan sangat dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin, terutama pada fase kritis lepas landas dan pendaratan. Salah satu kondisi cuaca yang berpotensi mengganggu operasi penerbangan adalah crosswind, yaitu angin yang bertiup tegak lurus terhadap arah landasan pacu dan dapat mengurangi kendali pesawat. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik arah dan kecepatan angin di sekitar bandara menjadi aspek penting dalam mendukung keselamatan dan efisiensi operasional penerbangan. Penelitian ini menganalisis distribusi arah dan kecepatan angin di Bandara Radin Inten II menggunakan metode windrose sebagai pendekatan utama, yang didukung oleh visualisasi histogram dan heatmap. Data yang digunakan merupakan data angin historis hasil pengamatan rutin BMKG Lampung selama sepuluh tahun, yaitu periode 2014–2023, dengan interval pengamatan setiap jam. Data tersebut dianalisis untuk mengidentifikasi arah angin dominan, variasi kecepatan angin, serta periode-periode yang berpotensi menimbulkan crosswind yang dapat memengaruhi operasional penerbangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa arah angin dominan di Bandara Radin Inten II umumnya berasal dari sektor barat laut dengan kecepatan berkisar antara 2–6 knot, yang mencerminkan kondisi angin relatif stabil. Meskipun demikian, pada periode tertentu ditemukan kejadian angin dengan kecepatan lebih tinggi yang berpotensi menimbulkan risiko crosswind. Analisis lebih lanjut mengungkap adanya bulan-bulan tertentu dengan peningkatan frekuensi angin silang yang mendekati ambang batas keselamatan penerbangan. Temuan penelitian ini memberikan rekomendasi praktis bagi pengelola bandara dalam menentukan penggunaan runway yang lebih sesuai, meningkatkan kewaspadaan pada periode berisiko, serta merancang strategi mitigasi seperti penyesuaian jadwal penerbangan dan perbaikan infrastruktur landasan pacu. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi bandara lain dengan karakteristik angin serupa dalam upaya meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional penerbangan.

Kata kunci — crosswind; windrose; kecepatan angin; arah angin; keselamatan penerbangan.

I. Pendahuluan

Bandara Radin Inten II di Provinsi Lampung merupakan gerbang utama mobilitas udara di wilayah selatan Sumatera, di mana keselamatan dan efisiensi penerbangan sangat bergantung pada kondisi cuaca, terutama parameter arah dan kecepatan angin. Crosswind (angin silang) yang berhembus tegak lurus landasan pacu dapat mengancam keselamatan operasi penerbangan, sehingga deteksi dini kondisi ini penting untuk meminimalkan risiko kecelakaan dan gangguan operasional. Fenomena crosswind bukanlah ancaman teoritis belaka, sebagaimana dibuktikan oleh sejumlah insiden nyata: pada 2015, pesawat Garuda Indonesia Boeing 737-800 tergelincir di Bandara Hasanuddin Makassar akibat crosswind [1]. Pada tahun 2012, Sriwijaya Air mengalami insiden serupa di Bandara Supadio Pontianak yang mengakibatkan penutupan bandara selama 6,5 jam [2]. Serta kasus Lion Air di awal 2024 yang terpaksa return to base akibat crosswind 12 knot di rute Medan-Aceh [3].

Untuk memitigasi risiko tersebut, metode windrose menjadi alat krusial dalam analisis distribusi arah dan kecepatan angin. Windrose merepresentasikan data angin secara grafis dengan menampilkan frekuensi, arah dominan, dan potensi crosswind dalam periode tertentu. Penelitian [4] membuktikan bahwa visualisasi windrose efektif mengidentifikasi pola angin berisiko, sementara [5], [6] menekankan kegunaannya dalam perencanaan infrastruktur bandara dan optimasi rute penerbangan. Lebih lanjut, [7] menyatakan bahwa metode ini mampu memprediksi musim atau waktu rentan crosswind, menjadikannya relevan untuk analisis di Bandara Radin Inten II.

Penelitian lain tentang penggunaan metode windrose dalam analisis pola angin telah dilakukan di berbagai bandara, seperti Bandara Sultan Mahmud Badaruddin II Palembang [11], [12], Bandara Internasional Kualanamu [13], [14] dan Bandara Soekarno-Hatta [4], [15]. Windrose terbukti efektif dalam mengidentifikasi periode dan arah angin yang berpotensi menyebabkan crosswind, serta memberikan rekomendasi untuk meningkatkan keselamatan penerbangan dan perencanaan infrastruktur. Di Bandara Internasional Adisutjipto, penelitian [16] menunjukkan bahwa windrose dapat mengidentifikasi waktu kritis gangguan angin, sementara di Bandara Internasional Juanda, metode ini digunakan untuk memahami pola angin musiman [17].

Arah angin memainkan peran penting dalam operasional penerbangan, terutama saat lepas landas dan mendarat. Menurut [18], pemantauan arah angin yang akurat membantu menentukan waktu dan arah operasi yang optimal, sementara [19] menekankan bahwa data arah angin dapat mengurangi turbulensi dan meningkatkan keselamatan. Penelitian [20] juga menunjukkan bahwa analisis arah angin penting dalam perencanaan landasan pacu untuk meminimalkan dampak angin yang tidak diinginkan.

Kecepatan angin memengaruhi kestabilan pesawat, performa operasional, dan perencanaan bandara. Penelitian [21] mengungkapkan bahwa kecepatan angin tinggi dapat memengaruhi kenyamanan penumpang dan kontrol pesawat, sementara [22] menekankan pentingnya data kecepatan angin dalam merancang landasan pacu. Teknologi canggih untuk memantau kecepatan angin, seperti yang dijelaskan [23], memungkinkan perencanaan yang lebih baik dan mitigasi risiko. Crosswind merupakan ancaman serius bagi keselamatan penerbangan, terutama saat lepas landas dan mendarat. Penelitian lainnya oleh [24] menunjukkan bahwa crosswind dapat mengurangi kontrol pesawat, sementara [25] menekankan pentingnya teknologi pemantauan untuk memberikan peringatan dini. [26] meneliti dampak crosswind pada desain landasan pacu, menyoroti perlunya pertimbangan angin silang dalam perencanaan infrastruktur. Batas kecepatan crosswind bervariasi tergantung jenis pesawat, dengan pesawat komersial besar (seperti Boeing 737, Airbus A320) memiliki batas 25-35 knot, sementara pesawat kecil lebih rentan pada 10-15 knot [27] - [29].

Histogram dan metode visualisasi seperti KDE (Kernel Density Estimate) berguna dalam menganalisis distribusi kecepatan dan arah angin. Menurut [30], histogram membantu mengidentifikasi periode kritis dengan kecepatan angin tinggi, sementara [31] - [33] menyoroti bahwa KDE dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam tentang distribusi angin. Analisis histogram untuk waktu tertentu memungkinkan identifikasi pola angin yang spesifik pada periode tertentu, seperti musim atau waktu hari [34], [35].

Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi arah dan kecepatan angin di Bandara Radin Inten II menggunakan windrose, dengan fokus pada deteksi crosswind. Melalui data historis dan visualisasi windrose, studi ini mengidentifikasi pola angin serta membandingkannya dengan standar keselamatan penerbangan untuk menyusun rekomendasi mitigasi bagi pengelola bandara. Kontribusi penelitian mencakup peningkatan keselamatan operasional bandara dan referensi bagi bandara lain yang menghadapi tantangan serupa, sejalan dengan temuan [8] tentang urgensi pemahaman karakteristik angin. Selain itu, sebagaimana dijelaskan [9], [10] penerapan windrose dapat memperkuat manajemen risiko cuaca, menjadikan analisis ini langkah proaktif dalam menghadapi ancaman crosswind.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode Pengumpulan Data

Data dikumpulkan setiap jam dari pukul 07.00 WIB (00 UTC) hingga 06.00 WIB (23 UTC) keesokan harinya. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data arah dan kecepatan angin diperoleh dari pengamatan rutin setiap jam oleh BMKG Lampung selama sepuluh tahun (2014–2023).

Dengan rentang data ini, memberikan gambaran rinci tentang variasi angin sepanjang hari dan musim. Secara keseluruhan, jumlah data yang digunakan sebanyak 87.648 data, yang terdiri dari 43.824 data arah angin dan 43.824 data kecepatan angin. Setiap record data memiliki beberapa parameter atau atribut, yaitu kode stasiun, tahun, bulan, tanggal, jam pengamatan, arah angin (derajat), dan kecepatan angin (knot).

Jumlah data yang besar dan konsisten memungkinkan analisis akurat terhadap variasi angin, termasuk perubahan musiman dan tren jangka panjang, sehingga memberikan gambaran komprehensif tentang dinamika angin di Bandara Radin Inten II Lampung.

Lokasi penelitian difokuskan pada area BMKG Lampung dan Bandara Radin Inten II Lampung, dipilih karena pentingnya data angin untuk keselamatan penerbangan, mengingat bandara ini merupakan pintu gerbang utama di Lampung dengan intensitas penerbangan tinggi.

B. Data Penelitian

Dari pengumpulan data, menghasilkan total 87.648 data (43.824 untuk arah angin dan 43.824 untuk kecepatan angin). Data ini mencakup berbagai kondisi cuaca, mulai dari angin tenang hingga angin kencang yang berpotensi mengganggu operasional penerbangan. Contoh sampel data yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sampel Data Arah dan Kecepatan Angin Tahun 2014-2023

Kode Stasiun	Tahun	Bulan	Tgl	Jam (UTC)	Arah (°)	Kecepatan (Knot)
96295	2014	1	1	0	280	3
96295	2014	1	1	1	320	4
96295	2014	1	1	2	280	4
96295	2014	1	1	3	320	11
96295	2014	1	1	4	280	4
96295	2014	1	1	5	330	7
96295	2014	1	1	6	310	5
96295	2014	1	1	7	300	4
96295	2014	1	1	8	320	4
96295	2014	1	1	9	130	4

C. Metode Analisis Data

Data arah dan kecepatan angin diklasifikasikan berdasarkan bulan selama sepuluh tahun untuk mengidentifikasi pola musiman dan bulan-bulan berisiko tinggi terhadap angin kencang atau crosswind, kemudian dianalisis menggunakan aplikasi WRPLOT untuk membuat overlay Windrose yang

diintegrasikan dengan Google Earth guna memberikan konteks geografis dan mengidentifikasi area rentan. Selain itu, data dianalisis dengan teknik visualisasi statistik seperti Histogram, KDE (Kernel Density Estimate), Box Plot, Pair Plot, dan Heatmap untuk mengeksplorasi distribusi frekuensi, outlier, hubungan antar-variabel, serta intensitas angin, yang disusun secara kronologis dari bulan Januari hingga Desember guna mengidentifikasi bulan-bulan berisiko tinggi dan relatif aman, sehingga memberikan panduan kritis bagi pengelola bandara dan operator penerbangan dalam meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional di Bandara Radin Inten II Lampung. Gambar 1 menunjukkan pseudocode yang digunakan untuk menganalisis data arah dan kecepatan angin dalam penelitian ini.

Metode windrose merupakan teknik visualisasi meteorologi yang digunakan untuk menggambarkan distribusi frekuensi arah dan kecepatan angin dalam bentuk diagram radial. Melalui visualisasi ini, arah angin dominan, variasi kecepatan, serta potensi terjadinya crosswind dapat diidentifikasi secara jelas dalam satu representasi grafis. Metode windrose dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya menyajikan karakteristik arah dan kecepatan angin secara simultan, sehingga sangat relevan untuk analisis keselamatan penerbangan, khususnya dalam mengevaluasi kesesuaian orientasi landasan pacu dan mendeteksi kondisi angin silang yang berisiko terhadap operasi lepas landas dan pendaratan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Januari

Arah angin dominan di Bandara Radin Inten II pada bulan Januari berasal dari Barat Laut (315°) dan Utara Barat Laut (337°). Runway 14 lebih efektif untuk take-off karena angin dari arah ini memberikan tailwind, sementara Runway 32 cocok untuk landing dengan headwind yang membantu mengurangi kecepatan pesawat. Crosswind terjadi sekitar 150 kali dengan kecepatan 4-6 knot, yang masih aman untuk operasi penerbangan. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, menunjukkan kondisi angin yang tenang dan stabil. Gambar 2 menunjukkan visualisasi windrose dan grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Januari (2014-2023) menggunakan Histogram KDE.

```

IMPORT libraries:
pandas as pd
matplotlib.pyplot as plt
seaborn as sns
numpy as np
google.colab import files

UPLOAD data file:
uploaded = files.upload()

READ data from CSV file:
data= pd.read_csv('jaman=1_14_23.csv')

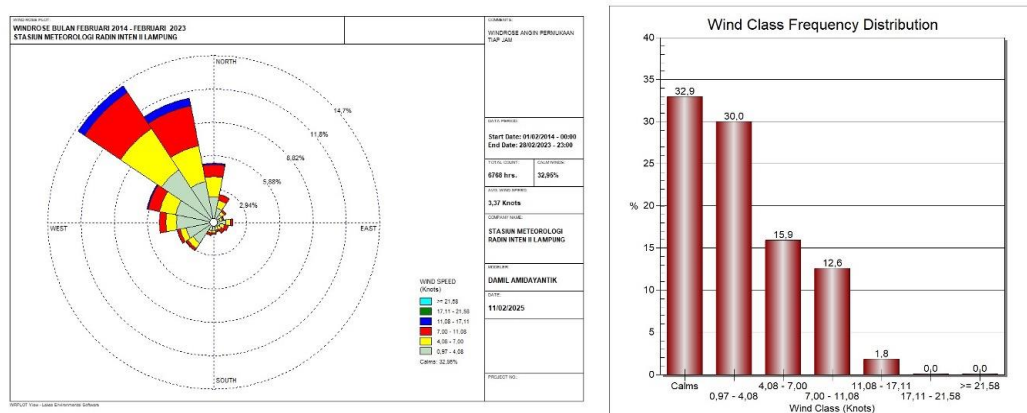
CLEAN data:
REMOVE rows with missing values:
data = data.dropna()
RENAME columns for clarity:
data.rename(columns={'tanggal': 'day',
'bulan': 'month', 'tahun': 'year', 'jam':
'hour'}, inplace=True)
CONVERT date and time columns to a datetime
object:
data['datetime'] =
pd.to_datetime(data[['year', 'month', 'day',
'hour']])
SET 'datetime' as the index:
data.set_index('datetime', inplace=True)
FILTER data for CAUA (direction 0 and speed 0):
data_cala = data[(data['arah'] == 0) AND
(data['kecepatan'] == 0)]
FILTER data for Non-CAUA (direction != 0 or speed
!= 0):
data_non_cala = data[(data['arah'] != 0) OR
(data['kecepatan'] != 0)]
ANALYZE wind speed for Non-CAUA data:
kecepatan_summary_non_cala =
data_non_cala['kecepatan'].describe()
PRINT "Summary Statistik Kecepatan Angin
(Non-CAUA).":
PRINT kecepatan_summary_non_cala
SET color palette for visualization:
sns.set_palette("viridis")

VISUALIZE the histogram of wind speed for Non-
CAUA data:
CREATE a figure with specified size:
plt.figure(figsize=(12, 7))
PLOT the histogram with KDE:
sns.histplot(data_non_cala['kecepatan'],
bins=20, kde=True, color='teal')
SET the title and labels:
plt.title('Distribusi Kecepatan Angin
(Non-CAUA)', fontsize=16)
plt.xlabel('Kecepatan Angin (Knot)',
fontsize=14)
plt.ylabel('Frekuensi', fontsize=14)
ADD grid:
plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
DISPLAY the plot:
plt.show()

```

Gambar 1. Proses Analisis Menggunakan Histogram KDE

Gambar 1 menggambarkan alur pengolahan data arah dan kecepatan angin yang dimulai dari pemuatan dan pembersihan data hingga tahap visualisasi. Histogram dan KDE digunakan untuk menampilkan sebaran kecepatan angin secara lebih jelas, sehingga pola distribusi dan kecenderungan data dapat diamati sebelum dianalisis lebih lanjut. Alur ini memastikan proses analisis dilakukan secara sistematis dan konsisten.



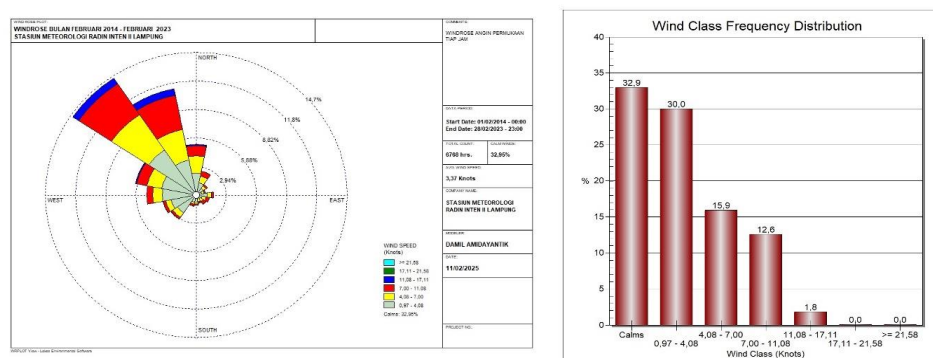
Gambar 2. Windrose dan Grafik Bulan Januari (2014-2023)

Gambar 2 menunjukkan karakteristik arah dan kecepatan angin pada bulan Januari melalui diagram windrose dan grafik distribusi kelas kecepatan angin. Windrose menampilkan arah angin dominan

beserta frekuensi kejadiannya, sedangkan grafik kecepatan angin memperlihatkan dominasi angin berkecepatan rendah hingga sedang. Visualisasi ini membantu memahami kondisi angin Januari yang relatif stabil untuk mendukung rekomendasi penggunaan runway.

B. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Februari

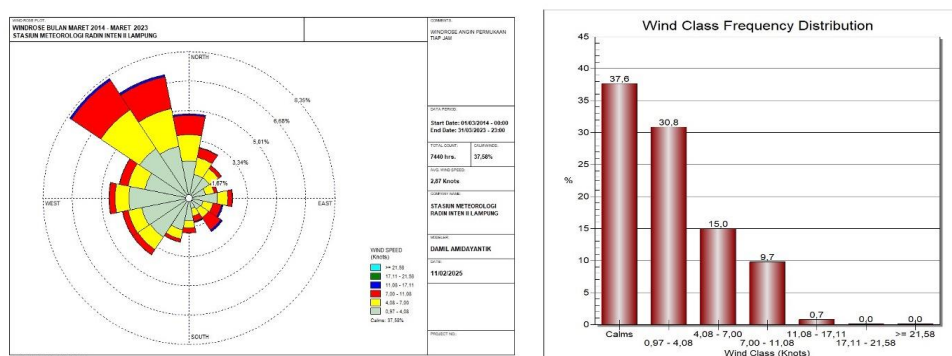
Angin dominan pada bulan Februari berasal dari Barat Laut (315°). Runway 14 ideal untuk take-off diberikan penjl dengan tailwind, sementara Runway 32 lebih cocok untuk landing dengan headwind. Crosswind terjadi dengan kecepatan 4-6 knot, yang masih dalam batas aman. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, menunjukkan kondisi angin yang relatif tenang. Gambar 3 menunjukkan visualisasi windrose dan grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Februari (2014-2023) menggunakan Histogram KDE. Kondisi headwind saat pendaratan menguntungkan karena membantu mengurangi kecepatan relatif pesawat terhadap landasan, sehingga meningkatkan kontrol pesawat, memperpendek jarak pendaratan, dan menurunkan risiko runway excursion. Sebaliknya, pada fase take-off, arah angin yang sejajar landasan memberikan gaya tambahan yang mendukung performa akselerasi pesawat, sehingga lepas landas dapat dilakukan secara lebih stabil dan aman.



Gambar 3. Windrose dan Grafik Bulan Februari (2014-2023)

C. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Maret

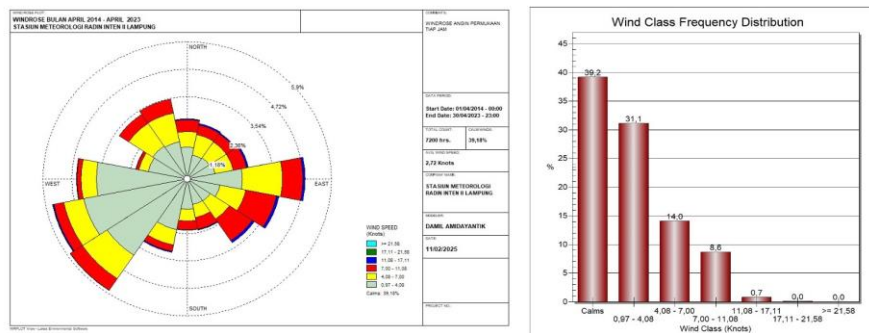
Angin dominan pada bulan Maret berasal dari Barat hingga Barat Laut (270° - 315°). Runway 14 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 32 untuk landing. Crosswind dengan kecepatan rendah hingga sedang masih dalam batas aman. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-5 knot, menunjukkan kondisi angin yang stabil. Gambar 4 menunjukkan visualisasi dan grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Maret (2014-2023).



Gambar 4. Windrose dan Grafik Bulan Maret (2014-2023)

D. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan April

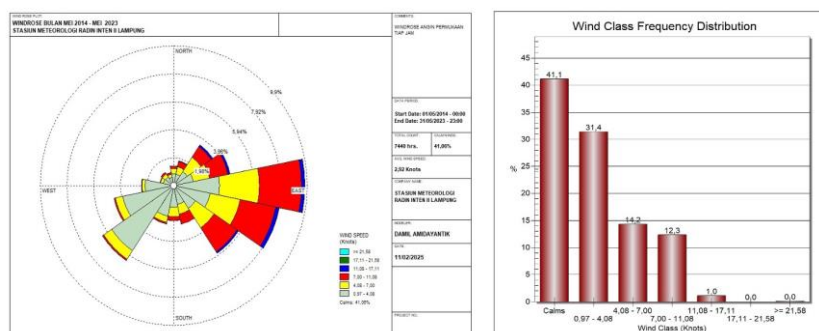
Angin dominan pada bulan April berasal dari Barat Daya (225°) dan Barat (270°), menciptakan kondisi crosswind yang signifikan. Rekomendasi Runway harus didasarkan pada pengamatan real-time. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-5 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 5 menunjukkan visualisasi dan grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan April (2014-2023).



Gambar 5. Windrose dan Grafik Bulan April (2014-2023)

E. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Mei

Angin dominan pada bulan Mei berasal dari Barat Daya hingga Barat (225° - 270°), menciptakan crosswind yang signifikan. Runway 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 6 menunjukkan visualisasi dan grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Mei (2014-2023).



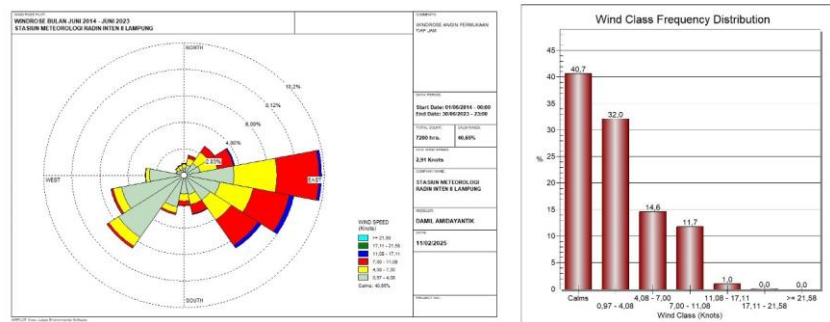
Gambar 6. Windrose dan Grafik Bulan Mei (2014-2023)

F. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Juni

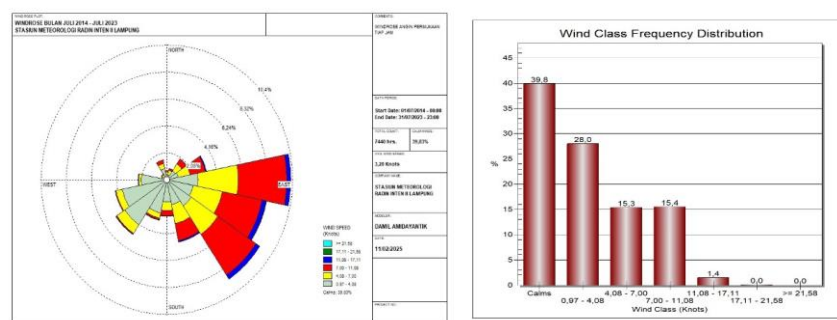
Angin dominan pada bulan Juni berasal dari Barat Daya hingga Tenggara, menciptakan crosswind yang signifikan. Runway 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 7 memvisualisasikan windrose serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Juni (2014-2023) menggunakan Histogram KDE.

G. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Juli

Angin dominan pada bulan Juli berasal dari Barat Daya (225°) dan Timur Laut (45°), menciptakan crosswind yang signifikan. Runway 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-5 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 8 memvisualisasikan windrose serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Juli (2014-2023) menggunakan Histogram KDE.



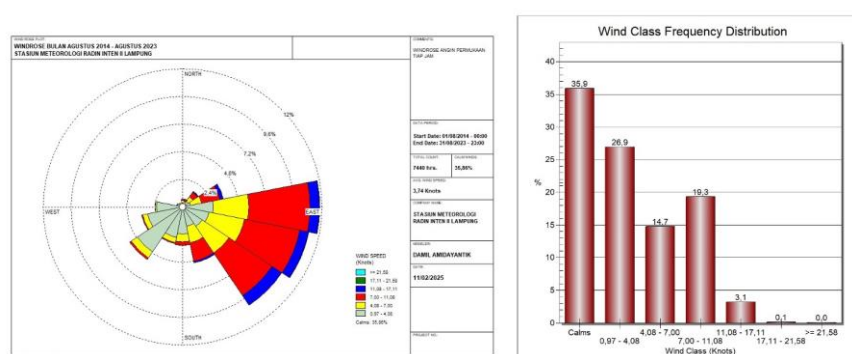
Gambar 7. Windrose dan Grafik Bulan Juni (2014-2023)



Gambar 8. Windrose dan Grafik Bulan Juli (2014-2023)

H. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Agustus

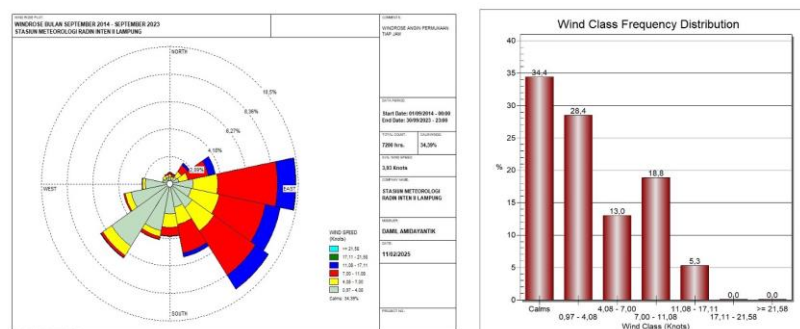
Angin dominan pada bulan Agustus berasal dari Tenggara hingga Barat Daya, menciptakan crosswind yang signifikan. Runway 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 9 memvisualisasikan windrose serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Agustus (2014-2023) menggunakan Histogram KDE.



Gambar 9. Windrose dan Grafik Bulan Agustus (2014-2023)

I. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan September

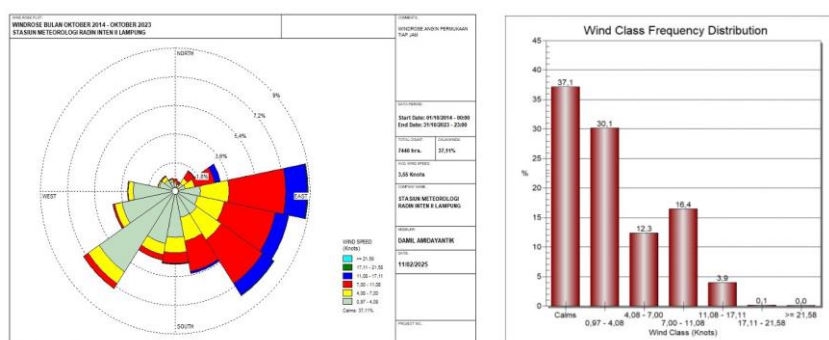
Angin dominan pada bulan September berasal dari Barat Daya (225°) dan Tenggara (135°), menciptakan crosswind yang signifikan. Runway 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 10 memvisualisasikan windrose serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan September (2014-2023) menggunakan Histogram KDE



Gambar 10. Windrose dan Grafik Bulan September (2014-2023)

J. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Oktober

Angin dominan pada bulan Oktober berasal dari Barat Daya (225°) dan Timur Laut (45°), menciptakan crosswind yang signifikan. Runway 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 11 menunjukkan windrose serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Oktober (2014-2023) menggunakan Histogram KDE.



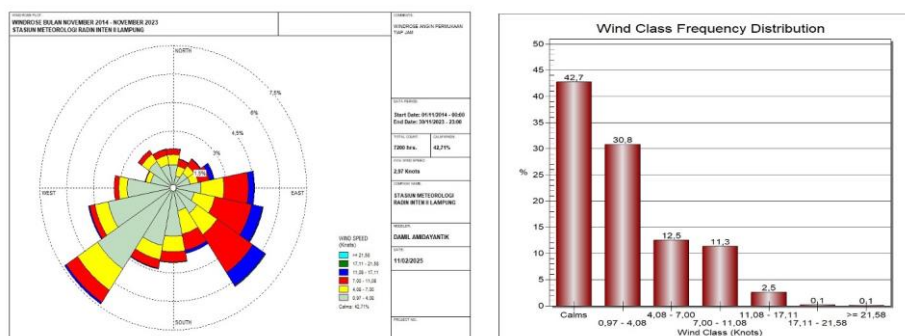
Gambar 11. Windrose dan Grafik Bulan Oktober (2014-2023)

K. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan November

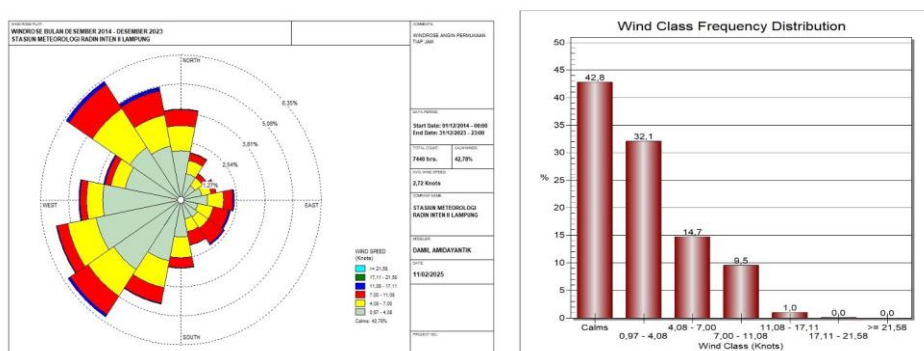
Angin dominan pada bulan November berasal dari Barat Daya hingga Barat, menciptakan crosswind yang signifikan. Rekomendasi runway harus didasarkan pada pengamatan real-time. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 12 menunjukkan windrose serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan November (2014-2023) menggunakan Histogram KDE.

L. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Desember

Angin dominan pada bulan Desember berasal dari Barat Daya (225°) dan Timur Laut (45°), menciptakan crosswind yang signifikan. Runway 14 direkomendasikan untuk take-off, sementara Runway 32 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 13 menunjukkan grafik windrose serta histogram KDE distribusi arah dan kecepatan angin bulan Desember (2014-2023).



Gambar 12. Windrose dan Grafik Bulan November (2014-2023)



Gambar 13. Windrose dan Grafik Bulan Desember (2014-2023)

M. Frekuensi Kecepatan Angin Bulanan Periode Tahun 2014-2023

Persentase kecepatan angin <10 knot tertinggi terjadi pada bulan April (97.67%), sedangkan terendah pada September (88.67%). Kecepatan angin ≥ 10 knot tertinggi terjadi pada September (11.33%) dan terendah pada April (2.33%). Kecepatan angin maksimum tertinggi mencapai 60 knot pada Februari, sementara terendah 17 knot pada Januari. Tabel 2. menunjukkan akumulasi bulanan frekuensi kecepatan angin dari tahun 2014 hingga tahun 2023.

Tabel 2. Akumulasi Bulanan Frekuensi Kecepatan Angin (2014-2023)

No	Bulan	Kecepatan Angin < 10 Knot	Kecepatan Angin ≥ 10 Knot	Jumlah	Nilai Maksimal (knot)	Frekuensi Kemunculan (kali)
1	Januari	95.31	4.69	100	17	2
2	Februari	94.53	5.47	100	60	1
3	Maret	97.58	2.42	100	22	1
4	April	97.67	2.33	100	18	1
5	Mei	96.51	3.49	100	26	1
6	Juni	96.68	3.32	100	18	1
7	Juli	94.96	5.04	100	19	1
8	Agustus	91.12	8.88	100	22	1
9	September	88.67	11.33	100	23	1

10	Oktober	91.10	8.90	100	36	1
11	November	94.50	5.50	100	30	1
12	Desember	97.26	2.74	100	20	1

N. Rekomendasi Penggunaan Runway untuk Take-off dan Landing

Rekomendasi penggunaan runway untuk take-off dan landing disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan analisis arah angin dominan, rekomendasi penggunaan runway untuk take-off dan landing disesuaikan setiap bulannya. Pada bulan Januari hingga Maret, Runway 14 direkomendasikan untuk take-off dan Runway 32 untuk landing. Pada bulan Mei hingga Oktober, rekomendasi berubah menjadi Runway 32 untuk take-off dan Runway 14 untuk landing. Bulan April dan November memerlukan observasi real-time karena kondisi angin yang dinamis dan crosswind yang dominan

Tabel 3. Rekomendasi Penggunaan Runway

Bulan	Rekomendasi Runway untuk Take Off	Rekomendasi Runway Untuk Landing	Crosswind
Januari	Runway 14	Runway 32	Tidak Dominan
Februari	Runway 14	Runway 32	Tidak Dominan
Maret	Runway 14	Runway 32	Tidak Dominan
April	By Realtime Observation	By Realtime Observation	Dominan
Mei	Runway 32	Runway 14	Dominan
Juni	Runway 32	Runway 14	Dominan
Juli	Runway 32	Runway 14	Dominan
Agustus	Runway 32	Runway 14	Dominan
September	Runway 32	Runway 14	Dominan
Oktober	Runway 32	Runway 14	Dominan
November	By Realtime Observation	By Realtime Observation	Dominan
Desember	Runway 14	Runway 32	Dominan

Penelitian ini memiliki beberapa keunggulan, di antaranya penggunaan data angin historis dengan rentang waktu yang panjang, yaitu sepuluh tahun, sehingga mampu menggambarkan pola arah dan kecepatan angin secara lebih representatif dan stabil. Selain itu, penerapan metode windrose yang dikombinasikan dengan visualisasi statistik pendukung memungkinkan identifikasi arah angin dominan dan periode berisiko crosswind secara jelas dan mudah diinterpretasikan, khususnya untuk kebutuhan operasional penerbangan. Meskipun demikian, penelitian ini juga memiliki keterbatasan. Analisis yang dilakukan masih bersifat deskriptif dan belum melibatkan pengujian kuantitatif lanjutan atau pemodelan prediktif untuk memperkirakan kejadian crosswind di masa mendatang. Selain itu, penelitian ini hanya menggunakan data permukaan dari satu stasiun pengamatan, sehingga belum sepenuhnya mempertimbangkan pengaruh variabilitas spasial dan faktor meteorologis lain seperti tekanan udara dan kelembapan. Keterbatasan ini membuka peluang bagi penelitian selanjutnya untuk mengembangkan metode analisis yang lebih komprehensif, misalnya dengan integrasi data multi-stasiun atau pendekatan berbasis pemodelan dan kecerdasan buatan.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan analisis distribusi arah dan kecepatan angin di Bandara Radin Inten II Lampung menggunakan metode windrose, dapat disimpulkan bahwa arah angin dominan bervariasi sepanjang tahun, dengan potensi crosswind signifikan pada periode tertentu, terutama di musim hujan. Hasil menunjukkan bahwa crosswind sering terjadi pada bulan-bulan seperti September dan Oktober, dengan kecepatan angin yang lebih seimbang antara <10 knot dan ≥ 10 knot, mencapai maksimal 23 knot dan 36 knot. Hal ini menandakan peningkatan frekuensi angin berkecepatan tinggi selama fase pancaroba atau peralihan angin monsun. Metode windrose terbukti efektif dalam mengidentifikasi pola angin dominan dan periode berisiko crosswind. Visualisasi yang dihasilkan memudahkan manajemen

bandara dalam mengambil keputusan terkait penggunaan runway dan strategi mitigasi risiko, terutama dalam menghadapi kondisi angin yang dapat memengaruhi keselamatan penerbangan. Pemantauan rutin dan penggunaan metode ini sangat penting untuk mengurangi risiko operasional. Penilaian terhadap penggunaan metode windrose dalam penelitian ini dilakukan dengan meninjau keteraturan pola arah dan kecepatan angin yang muncul dari rangkaian data sepuluh tahun pengamatan. Diagram windrose yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan arah angin dominan yang konsisten pada periode tertentu serta mampu menyoroti bulan-bulan dengan peningkatan kejadian angin berkecepatan relatif tinggi. Kemampuan metode ini dalam mengaitkan pola visual angin dengan kebutuhan operasional penerbangan menjadi dasar penarikan simpulan bahwa windrose layak digunakan sebagai alat analisis untuk mengidentifikasi potensi risiko crosswind di Bandara Radin Inten II.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. News, "Pesawat Garuda Indonesia Tergelincir : Mendarat saat Hujan Lebat, Pesawat Keluar dari Landasan," 2015. <https://news.solopos.com/pesawat-garuda-indonesia-tergelincir-mendarat-saat-hujan-lebat-pesawat-keluar-dari-landasan-610460> (accessed Jul. 16, 2024).
- [2] DEPHUB, "Pesawat Sriwijaya Air Tergelincir di Bandara Supadio," 2012. <https://portal.dephub.go.id/post/read/pesawat-sriwijaya-air-tergelincir-di-bandara-supadio-13081> (accessed Jul. 16, 2024).
- [3] Antaranews, "Lion Air mendarat selamat di Aceh setelah RTB akibat cuaca buruk," 2024. <https://www.antaranews.com/berita/3904254/lion-air-mendarat-selamat-di-aceh-setelah-rtb-akibat-cuaca-buruk> (accessed Jul. 16, 2024).
- [4] W. Sardjono, Zulkarnain, H. Kusnoputranto, T. E. B. Soesilo, D. N. Utama, and J. Sudirwan, "Study of runway crosswind and tailwind potential for airport sustainability: A study of Soekarno Hatta airport, Cengkareng, Indonesia," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 729, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/729/1/012012.
- [5] P. Abichandani, D. Lobo, G. Ford, D. Bucci, and M. Kam, "Wind Measurement and Simulation Techniques in Multi-Rotor Small Unmanned Aerial Vehicles," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 54910–54927, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977693.
- [6] D. W. Hoffman, "Advisory Circular 150/5300-13, Airport Design, Wind Analysis".
- [7] B. Christine and A. Royce, "Seasonal Weather Patterns," no. February, pp. 20–26, 2019.
- [8] A. Khattak, J. Zhang, P. W. Chan, and F. Chen, "Assessment of Wind Shear Severity in Airport Runway Vicinity using Interpretable TabNet approach and Doppler LiDAR Data," *Appl. Artif. Intell.*, vol. 38, no. 1, 2024, doi: 10.1080/08839514.2024.2302227.
- [9] T. Dwi Pratica and A. Fauzan, "Analysis of Surface Wind Patterns at Juwata Tarakan Airport for The Period of 2014-2020," pp. 14–19, 2021, [Online]. Available: <http://digital.library.ump.ac.id/view/divisions/BookChapterISTED/2021.html>
- [10] S. Oktavia, Syafriani, L. Dwiridal, and N. Y. Sudiar, "Analysis of Surface Wind Speed at Minangkabau International Airport for the period 2011-2020 using the Windrose Method," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2582, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2582/1/012006.
- [11] R. S. Yousnaidi et al., "Assessing Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Signal Quality for Airplane Departure Using Random Forest Algorithm," *Mechatronics Intell. Transp. Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 64–71, 2023, doi: 10.56578/mits020202.
- [12] A. R. Utami, "Evaluasi Azimuth Landasan Bandar Udara Internasional Husein Sastranegara Dengan Metode Wind Rose," *Pros. Semin. Intelekt. Muda*, vol. 1, no. 2, pp. 106–111, 2020, doi: 10.25105/psia.v1i2.6580.
- [13] P. Kurniawati, "No Titleالابتنزازوني الالكتروني جرائم على تنغذى جرائم," *Univ. Nusantara. PGRI Kediri*, vol. 01, pp. 1–7, 2017.

-
- [14] E. Veronika, I. Manurung, S. Humaidi, and Y. Darmawan, "Analysis of Strong Wind Characteristics Using Doppler Weather Radar over Kualanamu Airport Indonesia," vol. 8, no. 1, pp. 6–11, 2024.
- [15] S. Fauziyah, R. Susanti, and F. Nurjihad, "Risk assessment for occupational health and safety of Soekarno-Hatta international airport accessibility project through HIRARC method," IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 700, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1755-1315/700/1/012048.
- [16] F. Fatkhuroyan and B. Wijayanto, "Identifikasi Angin Silang (Cross Wind) di Sekitar New Yogyakarta International Airport Memakai Plot Wind Rose," Pros. SNFA (Seminar Nas. Fis. dan Apl., vol. 5, pp. 67–77, 2020, doi: 10.20961/prosidingsnfa.v5i0.46595.
- [17] M. A. Hidayat, "Studi Dispersi Emisi Nox Pesawat Komersil Dari Sumber Garis (Line Source) Di Bandar Udara Internasional Juanda," no. X, 2017.
- [18] M. Schultz, S. Lorenz, R. Schmitz, and L. Delgado, "Weather Impact on Airport Performance," Aerospace, vol. 5, no. 4, pp. 1–19, 2018, doi: 10.3390/aerospace5040109.
- [19] J. Wickham et al., "EPA Public Access," Adv. Ecol. Res., vol. 60, pp. 1–24, 2019, doi: 10.1016/j.cacint.2021.100066.Submit.
- [20] H. Gao, Y. Xie, C. Yuan, X. He, and T. Niu, "Prediction of Aircraft Arrival Runway Occupancy Time Based on Machine Learning," Int. J. Comput. Intell. Syst., vol. 16, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1007/s44196-023-00333-3.
- [21] A. O. Connor and D. Kearney, "Evaluate the effect of turbulence on aircraft during landing and take-off phases," Int. J. Aviat. Aeronaut. Aerosp., vol. 5, no. 4, 2018, doi: 10.15394/ijaaa.2018.1284.
- [22] F. Wang et al., "Impacts of Flight Operations on the Risk of Runway Excursions," Appl. Sci., vol. 14, no. 3, 2024, doi: 10.3390/app14030975.
- [23] [N. Ribeiro, J. Tay, W. Ng, S. Birolini, D. Prediction, and P. Analytics, "Delay Predictive Analytics for Airport Capacity Management," 2023.
- [24] G. W. H. Van Es, P. J. Van Der Geest, and T. M. H. Nieuwpoort, "Safety aspects of aircraft operations in crosswind," 2001.
- [25] I. Roychoudhury et al., Real-Time Monitoring and Prediction of Airspace Safety (NASA/TM-2015-218928), no. December. 2015.
- [26] R. Unkelbach, T. Dautermann, C. Gonzaga-Lopez, and M. U. de Haag, "Design and Testing of a Vertically Guided High-Precision Approach into Salzburg Airport," J. Air Transp., vol. 32, no. 2, pp. 47–55, 2024, doi: 10.2514/1.D0363.
- [27] J. Gooden, "Engine ingestion as a result of crosswind during take-offs from water contaminated runways," Nlr-Tp-2013-201, no. January 2012, 2013.
- [28] H. Némethová and J. Vagner, "The Impact of the Wind Component on the Aircraft Fuel Consumption and Pricing," Acta Avion. J., vol. XXV, no. 2, pp. 63–70, 2023, doi: 10.35116/aa.2023.0016.
- [29] M. S. Airport, "CORDOVA MERLE K. MASTER PLAN UPDATE," no. September, 2023.
- [30] N. Penov and G. Guerova, "Sofia Airport Visibility Estimation with Two Machine-Learning Techniques," Remote Sens., vol. 15, no. 19, pp. 1–17, 2023, doi: 10.3390/rs15194799.
- [31] A. A. Conference, "Wind Analysis for Airport Planning".
- [32] H. Xia et al., "Windshear Detection in Rain Using a 30 km Radius Coherent Doppler Wind Lidar at Mega Airport in Plateau," Remote Sens., vol. 16, no. 5, pp. 1–13, 2024, doi: 10.3390/rs16050924.
- [33] S. Le Clainche, E. Ferrer, S. Gibson, E. Cross, A. Parente, and R. Vinuesa, "Improving aircraft performance using machine learning: A review," Aerosp. Sci. Technol., vol. 138, p. 108354, 2023, doi: 10.1016/j.ast.2023.108354.
- [34] F. P. Martinez-García, A. Contreras-De-villar, and J. J. Muñoz-Perez, "Review of wind models at a local scale: Advantages and disadvantages," J. Mar. Sci. Eng., vol. 9, no. 3, 2021, doi: 10.3390/jmse9030318.
-

- [35] R. Bellasio, "Analysis of wind data for airport runway design," *J. Airl. Airpt. Manag.*, vol. 4, no. 2, 2014, doi: 10.3926/jairm.26.