

ANALISIS DISTRIBUSI ARAH DAN KECEPATAN ANGIN UNTUK DETEKSI CROSSWIND DI BANDARA RADIN INTEN II MENGUNAKAN METODE WINDROSE

Damil Amidayantik¹, Joko Triloka², Suci Mutiara³

¹Fakultas Ilmu Komputer, Informatics & Business Institute Darmajaya

Jl. ZA. Pagar Alam No. 93, Bandar Lampung - Indonesia 35142

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

ABSTRACT

Aviation safety is greatly influenced by wind direction and speed, especially during takeoff and landing. This study analyzes the wind direction and speed distribution at Radin Inten II Airport using the Windrose, histogram, and heatmap methods to detect potential crosswinds that disrupt flight operations. Historical wind data (2014–2023) shows that the dominant wind direction comes from the northwest with a speed of 2–6 knots, although there are strong wind events that have the potential to be dangerous. Crosswind analysis reveals certain periods with crosswind speeds reaching critical thresholds. These findings provide practical recommendations for airport managers to identify risky wind times and directions and to design mitigation strategies such as adjusting flight schedules or improving runway infrastructure. This study could be used as a reference to other airports in enhancing flight safety and operational efficiency.

Keywords—; *Crosswind, windrose, wind speed, wind direction, flight safety*

ABSTRAK

Keselamatan penerbangan sangat dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin, terutama saat lepas landas dan mendarat. Penelitian ini menganalisis distribusi arah dan kecepatan angin di Bandara Radin Inten II menggunakan metode windrose, histogram, dan heatmap untuk mendeteksi potensi crosswind yang mengganggu operasional penerbangan. Data angin historis (2014–2023) menunjukkan arah angin dominan berasal dari barat laut dengan kecepatan 2–6 knot, meskipun terdapat kejadian angin kencang yang berpotensi membahayakan. Analisis crosswind mengungkap periode tertentu dengan kecepatan angin silang mencapai ambang batas kritis. Temuan ini memberikan rekomendasi praktis bagi pengelola bandara untuk mengidentifikasi waktu dan arah angin berisiko, serta merancang strategi mitigasi seperti penyesuaian jadwal penerbangan atau perbaikan infrastruktur landasan pacu. Studi ini dapat menjadi referensi bagi bandara lain dalam 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

2.1. 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. 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.

2.2. 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	Arah	Kecepatan
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

2.3. 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.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. 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)

```

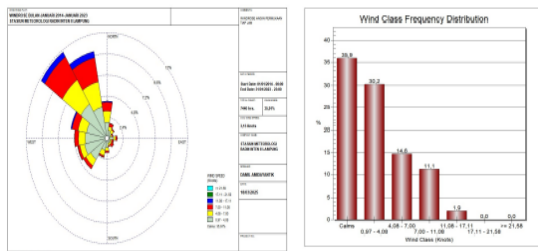
IMPORT libraries:
    pandas as pd
    matplotlib.pyplot as plt
    seaborn as sns
    numpy as np
    google.colab import files
UPLOAD data file:
    uploaded = files.upload()
READ data from CSV file:
    data = pd.read_csv('jaman=1_14_23.csv')

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

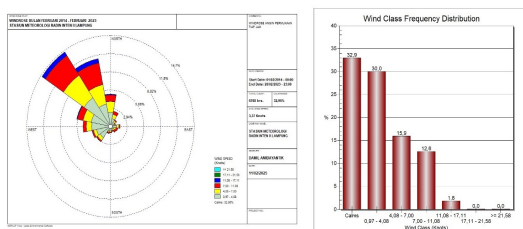


Gambar 2. Windrose dan Grafik Bulan Januari (2014-2023)

4.2. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Februari

Angin dominan pada bulan Februari berasal dari Barat Laut (315°). Runway 14 ideal untuk *take-off* 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).

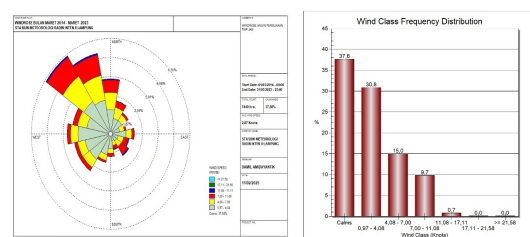


Gambar 3. Windrose dan Grafik Bulan Februari (2014-2023)

4.3. 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.

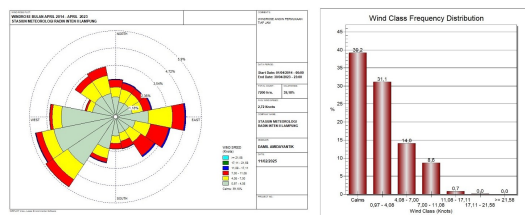
Gambar 4 menunjukkan visualisasi dan grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Maret (2014-2023).

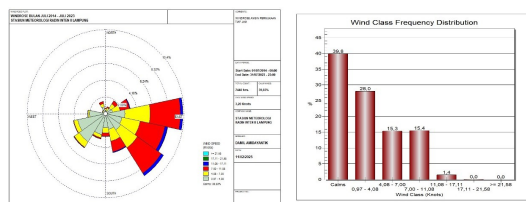


Gambar 4. Windrose dan Grafik Bulan Maret (2014-2023)

4.4. 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).

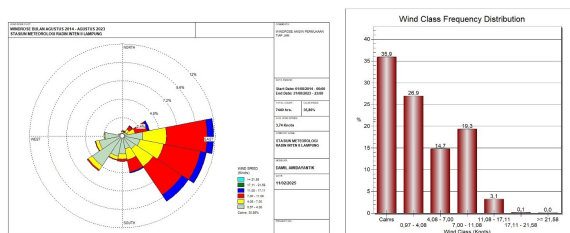




Gambar 8. Windrose dan Grafik Bulan Juli (2014-2023)

4.8. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Agustus

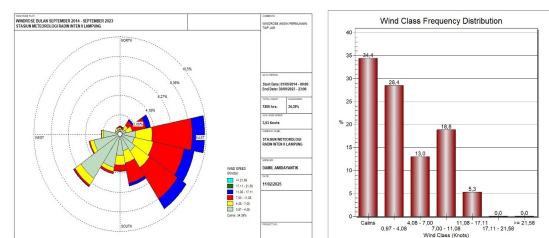
Angin dominan pada bulan Agustus berasal dari Timur (90°) hingga Barat Daya (225°), menciptakan *crosswind* yang signifikan. *Runway* 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara *Runway* 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 9 memvisualisasikan *windrose* serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan Agustus (2014-2023).



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

4.9. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan September

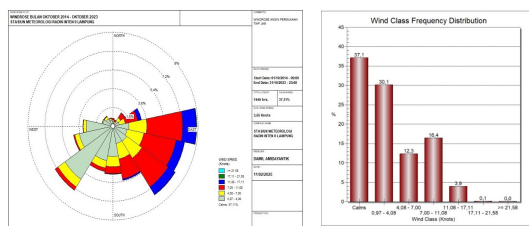
Angin dominan pada bulan September berasal dari Timur (90°) hingga Barat Daya (225°), menciptakan *crosswind* yang signifikan. *Runway* 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara *Runway* 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 10 memvisualisasikan *windrose* serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan September (2014-2023).



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

4.10. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Oktober

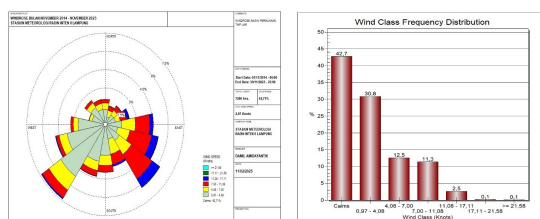
Angin dominan pada bulan Oktober berasal dari Timur Laut (45°) hingga Barat Daya (225°) dan, menciptakan *crosswind* yang signifikan. *Runway* 32 direkomendasikan untuk take-off, sementara *Runway* 14 untuk landing. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian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



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

4.11. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan November

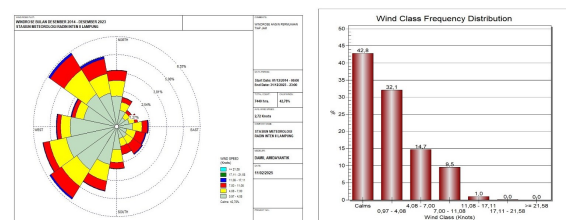
Angin dominan pada bulan November berasal dari Timur Laut (45°) hingga Barat Daya (225°), menciptakan *crosswind* yang signifikan. *Runway* 32 direkomendasikan untuk *take-off*, sementara *Runway* 14 untuk *landing*. Kecepatan angin paling sering terjadi pada rentang 2-4 knot, dengan beberapa kejadian angin kencang di atas 10 knot. Gambar 12 memvisualisasikan *windrose* serta grafik distribusi arah dan kecepatan angin bulan November (2014-2023).



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

4.12. Analisis Distribusi Arah dan Kecepatan Angin Bulan Desember

Angin dominan pada bulan Desember berasal dari Timur (90°) hingga Barat Daya (225°), 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* distribusi arah dan kecepatan angin bulan November (2014- 2023)



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

4.13. 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 $\geq$ 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

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	Runway 32	Runway 14	Dominan
Desember	Runway 14	Runway 32	Dominan

4.14. 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, Februari, Maret dan Desember, Runway 14 direkomendasikan untuk take-off dan Runway 32 untuk landing.

. Pada bulan Mei hingga November, rekomendasi berubah menjadi Runway 32 untuk take-off dan Runway 14 untuk landing. Bulan April dan memerlukan observasi real-time karena kondisi angin yang dinamis dan crosswind yang dominan.

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. Data 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.

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/BookChapter/ISTED/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] putri Kurniawati, “No Title ابتلازاز انم تتغذى على طفرة ..الكروني لا”
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.T. M. H. Nieuwpoort, “Safety aspects of aircraft operations in crosswind,” 2001.
- [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 Machine Learning,” *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1007/s44196-023-00333-3.T. M. H. Nieuwpoort, “Safety aspects of aircraft operations in crosswind,” 2001.
- [25] 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.
- [26] J. Gooden, “Engine ingestion as a result of crosswind during take-offs from water contaminated runways,” *Nlr-Tp-2013-201*, no. January 2012, 2013.
- [27] 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.
- [28] M. S. Airport, “CORDOVA MERLE K . MASTER PLAN UPDATE,” no. September, 2023.
- [29] 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.
- [30] A. A. Conference, “Wind Analysis for Airport Planning”.
- [31] 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.
- [32] 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.

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