



Analisis Arah dan Kecepatan Angin Permukaan untuk Operasional Penerbangan di Bandara Internasional Zainuddin Abdul Madjid

Analysis of Surface Wind Direction and Speed for Aviation Operations at Zainuddin Abdul Madjid International Airport

Topan Satria Primadi*, Anggi Dewita, Nur Siti Zulaichah, Aprilia Mustika Dewi

Stasiun Meteorologi Kelas II Zainuddin Abdul Madjid, Jl. Mandalika – Penujak, Praya, Lombok Tengah, Nusa Tenggara Barat, 83572

*Email: satria.primadi@bmkg.go.id

Naskah Masuk: 11 Maret 2025 | Naskah Diterima: 17 April 2025 | Naskah Terbit: 30 Juni 2025

Abstrak. Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid (BIZAM) merupakan bandara yang terletak di Pulau Lombok dan melayani operasional penerbangan baik rute internasional maupun domestik. Dalam kegiatan operasional penerbangan, pengaruh angin terbagi dalam tiga kategori, yaitu *headwind*, *tailwind*, dan *crosswind*. Namun, yang umumnya membahayakan bagi penerbangan adalah *tailwind* dan *crosswind* yang memiliki kecepatan signifikan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pola arah dan kecepatan angin permukaan di BIZAM guna mengidentifikasi potensi risiko penerbangan terkait fenomena *tailwind* dan *crosswind* serta memberikan rekomendasi mitigasi yang tepat. Salah satu metode yang paling umum digunakan untuk menganalisis arah dan kecepatan angin adalah menggunakan diagram *windrose* dan metode statistik. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data arah dan kecepatan angin permukaan selama 10 tahun (2014 – 2023) yang diperoleh dari pengamatan sinoptik Stasiun Meteorologi Kelas II Zainuddin Abdul Madjid. Berdasarkan hasil dan pembahasan yang didapatkan, pola angin di wilayah BIZAM dipengaruhi oleh pergerakan angin monsun dengan kecepatan angin tertinggi dapat melampaui ≥ 21.58 knot. Terdapat pergeseran temporal di mana angin baratan dominan tidak hanya pada Desember hingga Februari, tetapi diperpanjang hingga bulan Maret. Sebaliknya, dominasi angin dari sektor tenggara mulai terbentuk lebih awal, yaitu sejak April, dan bertahan hingga Desember. Jumlah terbanyak kejadian *crosswind* dengan kecepatan >13 knot terpantau ada di bulan Desember dengan persentase sebesar 0.15%. Sementara itu, dengan asumsi pesawat terbang menuju arah runway 31, maka pada bulan Januari, Februari, Maret, dan Desember, pilot direkomendasikan untuk menggunakan runway 31 karena nilai persentase *tailwind* pada bulan – bulan tersebut lebih kecil dibandingkan nilai persentase *headwind*. Peristiwa *crosswind* dan *tailwind* berpotensi membahayakan pesawat, sehingga pilot dan operator penerbangan diimbau untuk mewaspadai penerbangan di bulan – bulan tersebut.

Kata Kunci: Angin permukaan, Penerbangan, *Windrose*, *Headwind*, *Tailwind*, *Crosswind*

Abstract. Zainuddin Abdul Madjid International Airport (BIZAM), located on Lombok Island, serves both international and domestic flight operations. In aviation, wind effects are categorized as *headwind*, *tailwind*, and *crosswind*. However, *tailwind* and *crosswind* with significant speeds are generally considered hazardous to flights. This research aims to analyze surface wind direction and speed patterns at BIZAM to identify potential flight risks associated with *tailwind* and *crosswind* phenomena and provide appropriate mitigation recommendations. The study employed *windrose* diagrams and statistical methods, using 10 years of surface wind direction and speed data (2014 – 2023) obtained from synoptic observations at the Class II Zainuddin

Abdul Madjid Meteorological Station. Findings indicate that wind patterns in the BIZAM area are influenced by monsoon wind movements, with peak wind speeds exceeding ≥ 21.58 knots. A significant temporal shift in wind dominance was observed: westerly winds (from the west to southwest sector) are now dominant not only from December to February but also extend into March. Conversely, the dominance of winds from the southeast sector begins earlier, in April, and persists until December, reflecting the Australian Monsoon's earlier onset and longer duration than usual. The highest incidence of crosswind events with speeds >13 knots was recorded in December, accounting for 0.15%. Assuming aircraft are landing on Runway 31, pilots are recommended to use this runway in January, February, March, and December, as the percentage of tailwind during these months is lower than the percentage of headwind. Given the potential hazards posed by crosswind and tailwind events, pilots and flight operators are advised to exercise caution when flying during these months.

Keywords: Surface wind, Aviation, Windrose, Headwind, Tailwind, Crosswind

Pendahuluan

Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid (BIZAM) merupakan salah satu bandara Internasional di Indonesia yang melayani penerbangan domestik dan internasional. Bandara ini terletak di Pulau Lombok yang iklimnya dipengaruhi oleh angin monsun Asia dan Australia ^[1]. Monsun Asia (angin baratan) yang berlangsung pada bulan Desember hingga Februari (DJF), pancaroba pertama pada Maret hingga Mei, Monsun Australia (angin timuran) pada Juni hingga Agustus (JJA), dan pancaroba kedua pada September hingga November. Monsun Asia biasanya mengandung lebih banyak uap air dibandingkan dengan monsun Australia yang mengakibatkan perbedaan massa jenis dan berat udara ^[2]. Monsun Australia umumnya membawa kecepatan angin yang lebih tinggi ke sebagian besar perairan Indonesia selama musim timur (JJA), sementara monsun Asia juga dapat meningkatkan kecepatan angin, terutama di wilayah barat Indonesia, selama musim barat (DJF). Musim peralihan cenderung menunjukkan kecepatan angin yang lebih rendah atau bervariasi karena adanya transisi antara kedua sistem monsun ^[3].

Kondisi cuaca menjadi penyebab utama penundaan penerbangan, sehingga berkontribusi pada gangguan signifikan dalam jadwal penerbangan. Peristiwa cuaca ekstrem seperti angin kencang, hujan lebat, badai salju, dan jarak pandang rendah dapat sangat memengaruhi operasional penerbangan dengan mengurangi kapasitas bandara, menunda keberangkatan, dan memperpanjang waktu yang dibutuhkan untuk prosedur pendaratan ^[4]. Gangguan pada operasional penerbangan dapat mengakibatkan kerugian waktu dan ekonomi bagi berbagai pemangku kepentingan, seperti penumpang, maskapai penerbangan, dan bandara. Estimasi kerugian bervariasi tergantung pada perspektif dan daya dukung masing – masing pemangku kepentingan ^[5].

Berdasarkan data dari Federal Aviation Administration, Dalam kegiatan operasional penerbangan, terdapat tiga fase penting yang perlu diperhatikan yaitu lepas landas (*take off*), jelajah (*cruising*), dan pendaratan (*landing*) ^[6]. Komponen arah dan kecepatan angin menjadi penting dalam ketiga fase tersebut terutama saat pesawat dalam fase *take off* dan *landing*. Data historis menunjukkan bahwa pada kedua fase tersebut tercatat banyak kejadian yang berpengaruh pada kelancaran operasional pesawat seperti delay hingga gagal *take off/landing* ^[7].

Pada saat *take off* dan *landing*, ada tiga kategori angin yang dapat mempengaruhi performa pesawat yaitu *crosswind*, *headwind*, dan *tailwind*. *Crosswind* terjadi saat angin bertiup dari arah samping yang relatif terhadap arah penerbangan pesawat. Saat menghadapi *crosswind*, ada dorongan lateral pada badan pesawat sehingga pilot mendapat tantangan untuk menjaga pesawat agar tetap di jalur. Fenomena ini juga dapat menyebabkan turbulensi yang mempengaruhi stabilitas pesawat dan kenyamanan penumpang ^[8]. Dalam ICAO Annex 14, *crosswind* yang terjadi pada landasan dengan panjang >1500 meter



dikategorikan berpengaruh terhadap operasional penerbangan bila kecepatan *crosswind* mencapai 20 knot. Meskipun demikian, jika koefisien gesek longitudinal tidak mencukupi dikarenakan pengereman pada landasan pacu buruk, maka angin dengan kecepatan 13 knot sudah mampu mempengaruhi operasional pesawat baik saat *take off* maupun *landing* ^[9].

Kategori kedua adalah *headwind* yang berupa hembusan angin dari arah depan, berlawanan arah dengan arah penerbangan pesawat ^[8]. Saat pesawat mendapatkan *headwind*, kecepatan relatifnya terhadap tanah cenderung melambat yang memberikan keuntungan saat pesawat lepas landas atau saat melakukan pendaratan. Fenomena *headwind* membantu pesawat mencapai kecepatan angkat sehingga memperpendek jarak yang diperlukan untuk terbang ^[10]. Sementara saat mendarat, *headwind* bekerja untuk memperlambat pesawat sehingga meningkatkan kontrol dan stabilitas pesawat selama proses pendaratan ^[8]. *Headwind* juga dapat menyebabkan penurunan laju pendaratan (*landing rate*), yang pada gilirannya memengaruhi kapasitas operasional bandara serta prediktabilitas operasi. Selain itu, peningkatan waktu penerbangan yang diakibatkan oleh penurunan kecepatan di darat (*ground speed*) dalam kondisi *headwind* juga berdampak pada konsumsi bahan bakar dan tingkat polusi lingkungan ^[11].

Kategori ketiga adalah *tailwind*, di mana angin berhembus searah dengan arah penerbangan pesawat⁸. Pengoperasian dari *runway* masih dapat dilakukan jika *tailwind* yang terjadi memiliki kecepatan antara 5 – 10 knot, namun *tailwind* yang lebih kuat akan memerlukan penyesuaian dari pilot dari operator penerbangan ^[12]. *Tailwind* dapat membantu pesawat dengan meningkatkan kecepatan relatif pesawat terhadap tanah sehingga pesawat dapat mengurangi waktu perjalanan dan meningkatkan efisiensi bahan bakar, namun *tailwind* dengan kecepatan lebih dari 10 knot dapat memberikan kerugian saat pesawat lepas landas atau saat mendarat. Ketika mendapat dorongan dari *tailwind*, pesawat yang akan melakukan *take off* membutuhkan *runway* yang lebih panjang untuk mengakomodasi dorongan tersebut, sementara jika *tailwind* saat *landing*, kontrol pilot terhadap pesawat menjadi berkurang karena adanya energi dorongan yang mempercepat laju pesawat ^[13].

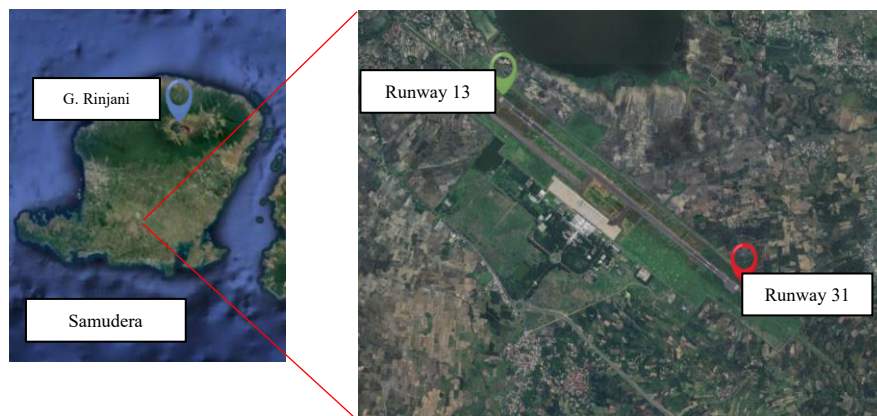
Perubahan *headwind* dan *tailwind* yang berfluktuasi dengan cepat dapat mengakibatkan geser angin horizontal (*horizontal windshear*) yang tinggi, yang berpotensi menimbulkan bahaya keselamatan bagi pesawat ^[14]. Dalam operasional pesawat, kemungkinan terpicunya peringatan *windshear* atau terjadinya turbulensi dapat dinilai secara tidak langsung dengan berfokus pada perubahan *headwind* dan mengungkapkannya melalui distribusi probabilitas ^[15]. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika bertugas sebagai penyedia jasa layanan informasi meteorologi penerbangan yang memberikan informasi meteorologi penerbangan untuk mendukung keselamatan operasional penerbangan. Stasiun Meteorologi Zainuddin Abdul Madjid (Stamet ZAM) memiliki kewajiban untuk memberikan data meteorologi kepada operator penerbangan dan stakeholder penerbangan di lingkungan BIZAM.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis pola arah dan kecepatan angin di BIZAM untuk efisiensi dan keselamatan penerbangan. Hasil tulisan ini adalah informasi pola arah dan kecepatan angin permukaan serta informasi klimatologis *tailwind* dan *crosswind* di BIZAM yang dapat dimanfaatkan oleh operator penerbangan untuk membuat perencanaan penerbangan demi menjamin efisiensi serta keselamatan penerbangan.

Metode Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian kuantitatif deskriptif yang bertujuan untuk mendeskripsikan dan menganalisis karakteristik suatu fenomena dengan menggunakan data numerik. Lokasi yang diambil dalam penelitian ini adalah Bandara Internasional Zainuddin Abdul Madjid (BIZAM), Kabupaten Lombok Tengah, Lombok. Terletak ± 16 kilometer di utara Samudera Hindia dan ± 40 kilometer dari Gunung Rinjani, bandara ini memiliki runway sepanjang 3.300 meter dengan arah runway 13 – 31 ^[16].





Gambar 1. Peta Lokasi dan runway Bandara Zainuddin Abdul Madjid di Pulau Lombok (Google Maps, 2025) ^[17]

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data arah dan kecepatan angin permukaan dari pengamatan sinoptik tiap jam di Stasiun Meteorologi Kelas II Zainuddin Abdul Madjid periode 2014 – 2023. Pengukuran angin permukaan di bandara umumnya dilakukan dengan anemometer untuk mendapatkan data arah dan kecepatan angin. Untuk analisis data jangka panjang, aplikasi WRPLOT (*Wind Rose Plots For Meteorological Data*) akan digunakan untuk menghasilkan windrose bulanan yang berisi infografis arah angin bulanan serta kecepatan angin rata – rata. Aplikasi ini dapat memvisualisasikan pola arah dan kecepatan angin selama periode waktu tertentu dalam bentuk diagram sehingga mempermudah analisis dibandingkan data mentah dalam bentuk tabel. Diagram ini berbentuk lingkaran yang terbagi menjadi sektor – sektor arah mata angin. Panjang sektor menunjukkan frekuensi kejadian angin dari arah tersebut, sementara warna atau pola dapat mengindikasikan kategori kecepatan angin ^[18,19]. Untuk penghitungan crosswind dan tailwind, runway acuan yang digunakan adalah runway 31. Untuk mengantisipasi kemungkinan terburuk, meskipun panjang landasan pacu BIZAM mencapai 3.300 meter penelitian ini menggunakan 13 knot sebagai ambang batas kecepatan crosswind dan 10 knot sebagai ambang batas kecepatan tailwind. Data diolah menggunakan algoritma penentuan komponen angin dengan memasukkan data arah landasan pacu serta arah dan kecepatan angin ke microsoft excel. Rumus yang digunakan adalah rumus dari Aerodrome Meteorological Observation and Forecast Study Group ^[20].

$$\text{Tailwind (Wh): } u = ff \cos(WD - RW) \quad (1)$$

$$\text{Crosswind (Wc): } v = ff \sin(WD - RW) \quad (2)$$

Keterangan:

u = kecepatan Tailwind /Headwind (Wh) (knot), Nilai (–) untuk headwind, nilai (+) untuk tailwind

v = kecepatan Crosswind (Wc) (knot), Nilai (–) untuk angin dari kanan, nilai (+) untuk angin dari kiri

ff = kecepatan angin (knot),

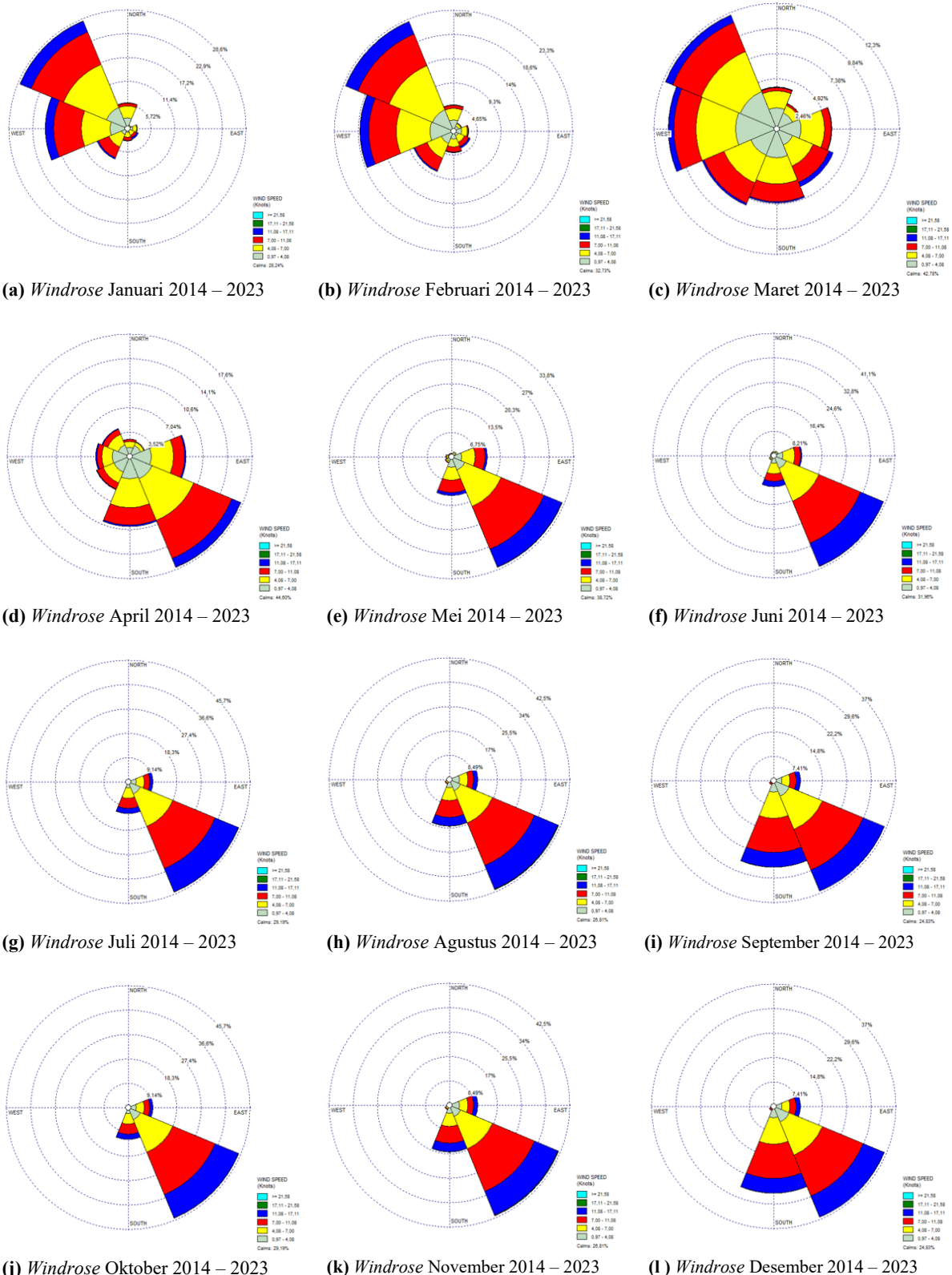
RW = arah landasan pacu (runway),

WD = arah angin.

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan analisis data windrose bulanan (Gambar 1) dari Stamet ZAM, periode 2014 – 2023, pola sirkulasi angin musiman di Pulau Lombok menunjukkan keterkaitan dengan dinamika angin monsun regional meskipun terlihat ada pergeseran dalam waktunya. Hasil analisis data angin permukaan di Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid (BIZAM) menunjukkan adanya pergeseran temporal dalam dominasi arah angin dibandingkan dengan pola umum tersebut. Di wilayah BIZAM, angin baratan (dari sektor barat hingga barat daya) tercatat dominan tidak hanya pada bulan Desember hingga Februari, tetapi diperpanjang hingga bulan Maret. Sebaliknya, dominasi angin dari sektor

tenggara mulai terbentuk sejak April dan bertahan hingga Desember, mencerminkan pengaruh Monsun Australia yang muncul lebih awal dan bertahan lebih lama dari biasanya.



Gambar 1. Hasil Pengolahan Data Angin Sinoptik Tiap Jam di Stasiun Meteorologi Zainuddin Abdul Madjid

Jika ditinjau dari kecepatan angin, pada periode Januari – Maret distribusi kecepatan angin umumnya berada pada kategori rendah hingga sedang yang diwakili oleh chart warna kuning – merah (sekitar 4.08 – 11.08 knot). Memasuki periode pancaroba pertama (April – Mei), kecepatan angin menunjukkan peningkatan bertahap. Hal ini terlihat dari meningkatnya proporsi angin dengan kecepatan sedang (11.08 – 17.10 knot), yang ditunjukkan oleh bagian berwarna biru pada diagram. Pada periode musim kemarau (Juni hingga September), pengaruh Monsun Australia menjadi dominan. dengan distribusi kecepatan angin yang lebih mendominasi pada kategori sedang hingga tinggi (7.00 – 21.58 knot), sebagaimana terlihat dari proporsi warna merah dan biru pada diagram windrose. Kecepatan yang meningkat ini terjadi karena angin dari Australia umumnya kering dan tidak membawa banyak uap air. Memasuki pancaroba kedua (Oktober – November), distribusi kecepatan angin kembali menurun ke kategori sedang.

Kecepatan angin maksimum pada periode November hingga Februari tercatat berada dalam kisaran 17.11 – 21.58 knot. Sementara itu, selama periode Maret hingga Oktober, kecepatan angin tercatat dapat melebihi 21.58 knot, dengan intensitas tertinggi terjadi pada bulan Juni dan Agustus. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengaruh Monsun Australia di wilayah BIZAM tidak hanya mengalami perluasan periode secara temporal, tetapi juga disertai dengan peningkatan intensitas kecepatan angin, khususnya pada puncak musim kemarau. Temuan dari penelitian ini didukung oleh penelitian dari Farid dan As'ari (2014) yang mengungkapkan bahwa pada saat musim kemarau, semakin besar kecepatan angin komponen positif (selatan/ Benua Australia) maka semakin kecil kelembapan udara di lapisan permukaan ^[21]. Artinya bahwa saat (puncak) musim kemarau sedang berlangsung, kondisi permukaan lebih kering dan menyebabkan aliran massa udara dari Benua Australia yang juga kering membuat aliran massa udara yang melewati wilayah Barat Indonesia semakin ringan, kondisi tersebut yang membuat aliran massa udara/angin dapat memiliki kecepatan yang tinggi, terlebih terjadinya perbedaan tekanan udara antara Belahan Bumi Utara dan Selatan yang cukup tinggi.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Statistik Persentase Kejadian Crosswind, Headwind dan Tailwind

Bulan	Jumlah Data	Persentase Crosswind >13 knot	Persentase Headwind >10 knot	Persentase Tailwind >10 knot
Januari	7440	0.11%	4.48%	0.56%
Februari	6768	0.04%	4.02%	0.40%
Maret	7440	0.05%	1.17%	0.59%
April	7200	0.04%	0.24%	1.99%
Mei	7440	0.04%	0.07%	6.88%
Juni	7200	0.06%	0.03%	11.04%
Juli	7440	0.01%	0.00%	12.73%
Agustus	7440	0.07%	0.00%	12.77%
September	7200	0.03%	0.06%	9.69%
Oktober	7440	0.11%	0.03%	5.20%
November	7200	0.14%	0.22%	2.26%
Desember	7440	0.15%	2.37%	0.55%

Berdasarkan data pada Tabel 2, periode Oktober hingga Desember dan Januari berturut – turut memiliki nilai Persentase Crosswind >13 knot ($C > 13$) yang cukup tinggi dengan nilai >0.1% dengan nilai persentase $C > 13$ tertinggi terdapat pada bulan Desember dengan nilai 0.15%. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut apakah banyaknya *crosswind* yang tercatat pada bulan-bulan tersebut merupakan efek yang ditimbulkan oleh awan konvektif atau merupakan pengaruh dari faktor lain.

Untuk analisis *headwind* dan *tailwind*, karena yang dijadikan acuan adalah *runway* 31, maka persentase *tailwind* pada Tabel 2 dapat diasumsikan sebagai *headwind* pada *runway* 13, dan sebaliknya, *headwind* di *runway* 31 merupakan *tailwind* di *runway* 13. Pada bulan Januari, Februari, Maret, dan Desember, pilot direkomendasikan untuk menggunakan *runway* 31 karena nilai persentase *tailwind* pada bulan-bulan tersebut lebih kecil dibandingkan nilai persentase *headwind*. Sementara untuk bulan April, Mei, Juni,



Juli, Agustus, September, Oktober November nilai tailwind pada runway 31 lebih besar dibandingkan nilai persentase headwind. Peristiwa tailwind di runway 31 paling sering terjadi pada bulan Agustus dengan besar persentase mencapai 12.77%.

Pembangunan landasan pacu BIZAM diduga telah mempertimbangkan kajian ilmiah mengenai arah angin. Indikasi ini terlihat dari rendahnya persentase kejadian crosswind berdasarkan perhitungan rumus (2), di mana angin silang dengan kecepatan lebih dari 13 knot pada periode 2014 – 2023 hanya terjadi sebesar 0.85% dari total data yang dianalisis.

Peristiwa crosswind dan tailwind berpotensi membahayakan pesawat, sehingga pilot dan operator penerbangan dihimbau untuk membuat rencana penerbangan berdasarkan data klimatologis angin dari stasiun meteorologi ZAM. Rencana bulanan pemakaian runway dapat menyesuaikan disusun untuk menghindari potensi terjadinya tailwind sekaligus mendapatkan keuntungan dari headwind demi meningkatkan efisiensi serta menunjang keselamatan operasional penerbangan. Meskipun demikian, yang paling utama adalah pilot serta operator penerbangan harus tetap berkoordinasi dengan petugas meteorologi di stasiun meteorologi ZAM untuk mendapatkan informasi terbaru mengenai arah dan kecepatan angin serta perubahan yang mungkin akan terjadi. Hal ini ditujukan untuk memastikan keselamatan dan efisiensi dari operasional penerbangan.

Kesimpulan

Secara keseluruhan, diagram angin dari WRPLOT menunjukkan bahwa meskipun ada pergeseran temporal dalam dominasi arah angin, dinamika musiman angin di Lombok tidak hanya ditandai oleh pola arah yang mengikuti siklus tahunan monsun Asia – Australia, tetapi juga oleh fluktuasi kecepatan angin yang konsisten meningkat selama periode Monsun Australia dan melemah pada periode Monsun Asia, mencerminkan respon langsung atmosfer lokal terhadap perubahan gradien tekanan skala regional.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada pimpinan dan rekan – rekan di lingkungan Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika khususnya di Stasiun Meteorologi Kelas II Zainuddin Abdul Madjid, Lombok yang telah memberikan dukungan kepada tim penulis untuk melakukan kajian maupun penelitian dalam proses pengembangan profesi.

Daftar Pustaka

- [1] Habib, A. H. Al, Cahyo, K. N., Firdiyanto, P. U., & Winarso, P. A. (2019). Optimalisasi Pemanfaatan Data Arah Dan Kecepatan Angin Pola Monsunal Untuk Kajian Pemetaan Potensi Energi Angin Di Wilayah Nusa Tenggara Barat. *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya)*, 3(14). <https://doi.org/10.20961/prosidingsnfa.v3i0.28502>.
- [2] Tjasyono, B.H.K. (2004). *Klimatologi*. Penerbit Institut Teknologi Bandung.
- [3] Haryanto, Y.D., Riama, N.F., Purnama, D.R., Pradita, N., Ismah, S.F., Suryo, A.W., Fadli, M., Hananto, N.D., Li, S., & Susanto, R.D. (2021). Effect of Monsoon Phenomenon on Sea Surface Temperatures in Indonesian Throughflow Region and Southeast Indian Ocean. *Journal of Southwest Jiaotong University* 56(6), 914 – 923. <https://doi.org/10.35741/issn.0258 – 2724.56.6.80>.
- [4] Zhou, Y.M.; Kundu, T.; Qin, W.; Goh, M.; Sheu, J.B. Vulnerability of the worldwide air transportation network to global catastrophes such as COVID – 19. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 154, 102469. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102469>.
- [5] Song, M., Wang, J., & Li, R. (2024). The Importance of Weather Factors in the Resilience of Airport Flight Operations Based on Kolmogorov–Arnold Networks (KANs). *Applied Sciences*, 14(19), 8938. <https://doi.org/10.3390/app14198938>.



- [6] Fadholi, A. (2012). Analisa Pola Angin Permukaan di Bandar Udara Depati Amir. *Statistika*, 12(1), 19–28.
- [7] Ishak, S., & Lukito, I. (2020). Analisa Pengaruh Arah Dan Kecepatan Angin Saat Take Off Dan Landing Di Bandara Adisutjipto Yogyakarta. *Sainstek (e – Journal)*, 8(2), 91–95. <https://doi.org/10.35583/js.v8i2.124>.
- [8] Prasetyo, A. (2024). Analisis Arah dan Kecepatan Angin Permukaan Menggunakan Digaram Wind Rose di Bandara Internasional Sultan Hasanuddin. *Buletin GAW Bariri (BGB)*, 5(2), 40–49.
- [9] ICAO. (2018). ICAO Annex 14 – Aerodrome Design and Operations. In Séptima edición: Vol. I (Issue July). www.icao.int.
- [10] Isnoor, K.F.N., & Aristya Firmantari, M. (2023). Analisis Persentase Komponen Angin Pada Landasan Pacu Bandara Internasional Raja Haji Fisabilillah Tanjungpinang. *Buletin Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*, 3(5), 1–9.
- [11] Jun, P.W., Heng, P.H., Lei, Z.X., & Yi, W.T. (2021). Calculation and Analysis of Aircraft Pollutant Emission Based on Time Wake Separation Mode under Coastal Airport and Headwind Conditions. *Journal of Advanced Transportation, Special Issue: Air Pollution Reduction in Transportation Based on Big Data*. <https://doi.org/10.1155/2021/3594481>.
- [12] Maslovara, A., & Mirković, B. (2021). Impact of Tailwind on Airport Capacity and Delay at Zurich Airport. *Transportation Research Procedia* 59, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.103>.
- [13] Van Es, G. W. H., & Karwal, A. K. (2001). Na Nationaal Lucht – en Ruimtevaartlaboratorium Safety aspects of tailwind operations Safety aspects of tailwind operations Safety aspects of tailwind operations Safety aspects of tailwind operations.
- [14] Wu, T.C., & Hon, K.K. (2017). Application of spectral decomposition of LIDAR – based headwind profiles in windshear detection at the Hong Kong International Airport. *Meteorologische Zeitschrift, PrePub Article*. <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0858>.
- [15] Ito, K., Ohba, H., & Mizuno, S. (2024). Low – level turbulence risk assessment and visualization using temporal rate of change of headwind of an aircraft. *Journal of Big Data*, 11(158). <https://doi.org/10.1186/s40537-024-01032-2>.
- [16] Guritno & Philia, D. (2024). Evaluasi Panjang Runway Terhadap Pesawat Rencana A380 di Bandar Udara Internasional Zainuddin Abdul Majid Lombok. *Sainstech: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi* 34(2). <https://doi.org/10.37277/stch.v34i2.2004>.
- [17] Google Maps. (2025). [Banda Udara Internasional Zainuddin Abdul Madjid]. Diperoleh pada tanggal 13 Maret 2025, dari https://www.google.com/maps/place/Lombok+International+Airport/@8.7611044,116.2667795,4381m/data=!3m1!1e3!4m6!3m5!1s0x2dcda5b526dcbf7d:0xc3c7d00a4024ad3c!8m2!3d8.776173!4d116.277044!16s%2Fm%2F0cz8dd6?entry=tu&g_ep=EgoyMDI1MDMxMC4wIKXMDSoJLDEwMjExNDUzSAFQAww%3D%3D.
- [18] Sharifi, F., & Hashemi, N. (2015). An analysis of current and future wind energy gain potential for central Iowa. *Journal of Thermal Engineering*, 1(5), 245–250. <https://doi.org/10.18186/jte.67038>.
- [19] Thé, J.L., Thé, C.L., & Johnson, M.A. (2025). WRPLOT View™: Wind and Rain Rose Plots for Meteorological Data. Lakes Environmental Software.
- [20] ICAO. (2011). Aerodrome Meteorological Observation and Forecast Study Group (AMOFSG): Ninth Meeting”. Montreal. Canada.
- [21] Mufti, F. (2014). Pengaruh Angin Dan Kelembapan Atmosfer Lapisan Atas Terhadap Lapisan Permukaan di Manado. *Jurnal MIPA*, 3(1), 58 – 63.

