



## Rancang Bangun *Weather Vulnerability Index* sebagai Kerangka Awal *Impact-Based Forecasting* di Kabupaten Sarmi

I Putu Putra Wira Sarwa Yudha<sup>1</sup>, Noak Omlo Mayor<sup>2</sup>, Subur Ariadi<sup>3</sup>, Asep Jamaludin Malik<sup>4</sup>, Muhammad Reza Naufal<sup>5</sup>, Rudianto Oksa<sup>6</sup>, Etinus Wenda<sup>7</sup>, Saldia Aksamina Tanati<sup>8</sup>, Moch Yanuar Akmal Khawarizmi<sup>9</sup>, Lesley Cheenris Kadiwaru<sup>10</sup>

<sup>1,2,3,5,6,7,8,10</sup>Stasiun Meteorologi Kelas III Mararena-Sarmi

<sup>4</sup>Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia MKG

E-mail: [wira.sarwa.yudha26@gmail.com](mailto:wira.sarwa.yudha26@gmail.com)

### Abstrak

Transformasi layanan meteorologi menuju *Impact-Based Forecasting* (IBF) menuntut penyedia informasi cuaca untuk tidak hanya menyampaikan fenomena meteorologi, tetapi juga mengomunikasikan potensi dampaknya terhadap aktivitas masyarakat dan operasional wilayah. Tantangan utama pada stasiun meteorologi daerah adalah keterbatasan data dampak, sumber daya teknis, dan infrastruktur komputasi yang diperlukan untuk membangun sistem IBF yang kompleks. Penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka awal IBF yang operasional dan mudah diterapkan melalui pemanfaatan data observasi permukaan *Meteorological Aerodrome Report* (METAR) dan *Aviation Selected Special Weather Report* (SPECI) di Kabupaten Sarmi. Metode yang digunakan berupa pendekatan kuantitatif deskriptif dengan membangun baseline klimatologis per jam observasi, menghitung *risk score* berdasarkan kejadian awan *Cumulonimbus* dan penurunan jarak pandang, serta menyusun *Weather Vulnerability Index* (WVI) sebagai indikator kerentanan cuaca operasional. Data yang dianalisis mencakup seluruh laporan METAR dan SPECI Stasiun Meteorologi Mararena-Sarmi selama tahun 2025. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kabupaten Sarmi memiliki nilai WVI sebesar 8,3 yang termasuk kategori sedang, dengan November sebagai bulan berisiko tertinggi dan pukul 14 UTC sebagai periode operasional paling rentan terhadap cuaca signifikan. Kerangka yang dikembangkan mampu menerjemahkan data observasi meteorologi menjadi informasi risiko yang lebih kontekstual dan dapat mendukung pengambilan keputusan dalam implementasi awal IBF di wilayah dengan keterbatasan sumber daya.

**Kata kunci:** *Impact-Based Forecasting*, kerentanan cuaca, METAR/SPECI, risiko cuaca operasional, *Weather Vulnerability Index*.

### LATAR BELAKANG

Transformasi sistem peringatan dini dari sekadar informasi berbasis fenomena meteorologi menuju *Impact-Based Forecasting* merupakan kebutuhan mendesak bagi lembaga meteorologi global untuk meminimalkan dampak bencana cuaca (Potter et al., 2025). Secara umum, *Impact-Based Forecasting and Warning Services* telah menjadi paradigma utama yang dipromosikan oleh World Meteorological Organization untuk meningkatkan efektivitas peringatan dini (Potter et al., 2025). Transformasi ini menuntut National Meteorological and Hydrological Services untuk bergeser dari sekadar penyampaian informasi mengenai besaran fenomena meteorologi menuju pemahaman mendalam tentang konsekuensi yang mungkin terjadi di masyarakat atau sektor terdampak (Bianco et al., 2026; Terti et al., 2022, p. 7). Implementasi IBFWS ini secara konsisten terbukti lebih selaras dengan cara audiens publik menginterpretasikan hubungan antara peringatan cuaca dan dampaknya, sehingga dapat meningkatkan pemahaman masyarakat serta memperkuat niat untuk mengambil tindakan perlindungan (Nkiaka et al., 2020, p. 3). Meskipun demikian, pengembangan sistem ini masih menghadapi tantangan operasional yang signifikan di tingkat global, terutama terkait kebutuhan akan data yang lebih kontekstual, metode verifikasi yang objektif, dan kolaborasi lintas sektor yang intensif (Kaltenberger et al., 2020, p. 36; Mühlhofer et al., 2025).

Dalam konteks operasional stasiun meteorologi, data observasi permukaan seperti Meteorological Aerodrome Reports dan Aviation Selected Special Weather Report memegang peranan krusial sebagai sumber data primer untuk memantau kondisi cuaca *real-time* (Anaman et al., 2017, p. 47; Gültepe, 2023, p. 4). Parameter seperti visibilitas (*visibility*) dan kehadiran awan *Cumulonimbus* merupakan elemen vital yang sering kali menjadi parameter kritis dalam menilai risiko terhadap aktivitas penerbangan maupun operasional wilayah lainnya (Gültepe, 2023, p. 4; Vogt et al., 2024, p. 4891). Akurasi dan kualitas dari pelaporan METAR/SPECI tidak hanya penting untuk keselamatan penerbangan, tetapi juga berfungsi sebagai ground truth dalam mengkalibrasi dan memvalidasi sistem penilaian risiko berbasis cuaca (Novotný et al., 2021; Vogt et al., 2024, p. 4891). Pemanfaatan parameter-parameter ini secara sistematis memungkinkan stasiun meteorologi untuk mendeteksi perubahan cuaca signifikan secara tepat waktu, yang merupakan prasyarat mutlak bagi keberhasilan operasional sistem peringatan berbasis dampak (Anaman et al., 2017, p. 47).

Namun, implementasi IBFWS pada stasiun meteorologi daerah seperti Kabupaten Sarmi yang terletak di pelosok Papua memiliki keterbatasan pada data maupun sumber daya teknis sering. Tantangan tersebut mencakup kurangnya ketersediaan basis data dampak, keterbatasan tenaga ahli untuk melakukan pemodelan risiko yang kompleks, serta sulitnya mengintegrasikan berbagai data sektoral secara *real-time* (Kaltenberger et al., 2020, p. 36; Mühlhofer & Willemse, 2024). Kesenjangan penelitian saat ini masih terfokus pada sistem yang memerlukan infrastruktur komputasi tinggi atau integrasi data yang masif, sehingga kurang praktis untuk diadopsi pada tingkat operasional stasiun meteorologi dengan keterbatasan sumber daya (Gudoshava et al., 2024, p. 12; Mühlhofer & Willemse, 2024). Hal ini menyebabkan belum adanya kerangka kerja yang sederhana namun terukur untuk menerjemahkan data observasi meteorologi dasar menjadi penilaian kerentanan cuaca lokal yang dapat langsung mendukung pengambilan keputusan (Bianco et al., 2026; Nkiaka et al., 2020, p. 3).

Sebagai solusi atas kesenjangan tersebut, konsep *Weather Vulnerability Index* hadir sebagai indikator kerentanan cuaca operasional yang praktis (Romero-Martín, et al., 2024). Indeks ini berfungsi untuk mengagregasi parameter meteorologi esensial menjadi sebuah metrik tunggal yang merepresentasikan tingkat paparan dan kerentanan suatu wilayah terhadap bahaya cuaca tertentu (Bao et al., 2015; Szagri et al., 2023). Penggunaan indeks kerentanan, yang telah umum diterapkan dalam berbagai studi adaptasi iklim dan kesehatan, memiliki keunggulan dalam menyederhanakan data yang kompleks menjadi informasi yang dapat dioperasionalkan tanpa memerlukan prosedur komputasi yang berat (Bao, Li, & Yu, 2015). WVI memberikan landasan objektif bagi pengambil keputusan untuk memprioritaskan tindakan mitigasi dan menetapkan ambang batas peringatan yang lebih kontekstual berdasarkan tingkat risiko yang diidentifikasi secara lokal (Szagri et al., 2023).

Kabupaten Sarmi dipilih sebagai wilayah studi karena posisinya sebagai salah satu daerah di Papua dengan karakteristik geografis yang unik dan kerentanan terhadap variabilitas cuaca yang dapat mengganggu konektivitas serta operasional aktivitas masyarakat. Sebagai wilayah yang masih berkembang, kebutuhan akan sistem peringatan dini yang kontekstual sangat mendesak untuk mengurangi risiko dampak bencana meteorologi (Potter et al., 2025). Stasiun Meteorologi Mararena-Sarmi, dengan akses data METAR/SPECI-nya, memiliki potensi besar untuk menjadi pusat layanan informasi berbasis dampak di tingkat lokal, asalkan didukung dengan metode yang sesuai dengan kapasitas sumber daya yang tersedia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan *Weather Vulnerability Index* berbasis data observasi permukaan sebagai kerangka awal operasionalisasi IBF di Kabupaten Sarmi. Novelty dari penelitian ini terletak pada pengembangan metode indeks kerentanan cuaca yang sederhana, operasional, dan berbasis data observasi permukaan METAR/SPECI, tanpa bergantung pada kompleksitas komputasi yang



tidak diperlukan di stasiun meteorologi daerah. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam menyediakan kerangka peringatan dini yang lebih kontekstual, berbasis risiko, dan aplikatif bagi layanan meteorologi di daerah dengan keterbatasan sumber daya.

## KAJIAN TEORITIS

### ***Impact-Based Forecasting* dalam Layanan Meteorologi**

*Impact-Based Forecasting and Warning Services* merepresentasikan pergeseran paradigma fundamental dalam layanan meteorologi global, dari sekadar penyampaian informasi mengenai besaran fenomena meteorologi (*hazard*) menuju pemahaman mendalam tentang konsekuensi yang mungkin terjadi di masyarakat atau sektor terdampak (Bianco et al., 2026; Terti et al., 2022, p. 7). Konsep ini didorong oleh tuntutan *World Meteorological Organization* agar peringatan cuaca menjadi lebih bermakna dan aplikatif guna mengurangi dampak dari peristiwa cuaca ekstrem (Potter et al., 2025). Dalam paradigma ini, fokus layanan tidak lagi hanya terbatas pada deskripsi fenomena fisik, melainkan pada estimasi dampak sektoral dan lokasi spesifik yang dapat mendukung pengambilan keputusan mitigasi (Terti et al., 2022, p. 7).

Implementasi IBFWS secara konsisten terbukti lebih selaras dengan cara audiens publik menginterpretasikan hubungan antara peringatan cuaca dan dampaknya, sehingga dapat meningkatkan pemahaman masyarakat serta memperkuat niat untuk mengambil tindakan perlindungan (Nkiaka et al., 2020, p. 3). Namun, transisi menuju layanan berbasis dampak ini menghadapi tantangan operasional yang signifikan di tingkat nasional, terutama terkait kebutuhan akan data dampak yang komprehensif, metode verifikasi yang objektif, serta kebutuhan kolaborasi lintas sektor yang intensif (Kaltenberger et al., 2020, p. 36; Mühlhofer et al., 2025). Banyak layanan meteorologi nasional yang saat ini masih mendasarkan peringatan mereka pada penilaian subyektif oleh ahli meteorologi, sehingga pengembangan IBFWS memerlukan keterlibatan aktif antara penyedia data cuaca dengan pihak pengelola risiko atau pemangku kepentingan di lapangan (Kaltenberger et al., 2020, p. 36; Terti et al., 2022, p. 7).

### **Kerentanan Cuaca dan Penilaian Risiko Meteorologi**

Kerentanan dalam konteks meteorologi didefinisikan sebagai kecenderungan suatu sistem atau populasi untuk mengalami dampak negatif akibat paparan fenomena cuaca ekstrem, yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik geografis dan elemen yang terpapar (Romero-Martín, et al., 2024). Penilaian risiko meteorologi tidak dapat dipisahkan dari analisis kerentanan, di mana risiko merupakan fungsi dari bahaya (*hazard*), paparan (*exposure*), dan kerentanan itu sendiri (Romero-Martín et al., 2024, p. 3252). Memahami kerentanan menjadi krusial karena sering kali dua wilayah dengan tingkat bahaya cuaca yang sama dapat mengalami konsekuensi yang berbeda drastis akibat perbedaan tingkat kerentanan masyarakatnya.

Informasi mengenai kerentanan memberikan landasan bagi pengambil keputusan untuk memprioritaskan tindakan adaptasi dan menetapkan ambang batas peringatan yang lebih kontekstual (Szagri et al., 2023). Dalam literatur adaptasi iklim, penilaian kerentanan sering kali digunakan untuk memetakan populasi yang paling berisiko, sehingga sumber daya mitigasi dapat dialokasikan secara tepat sasaran. Integrasi pemahaman kerentanan ke dalam sistem peringatan dini memungkinkan layanan meteorologi untuk bergerak melampaui pelaporan berbasis ambang batas fisik semata, menuju pendekatan yang mempertimbangkan daya lenting masyarakat terhadap gangguan cuaca (Szagri et al., 2023).

### **Pemanfaatan Data Observasi Permukaan dalam Analisis Operasional**

Dalam operasional stasiun meteorologi, data observasi permukaan memegang peranan krusial sebagai sumber data primer untuk memantau kondisi cuaca *real-time* (Anaman et al., 2017, p. 47; Gültepe, 2023, p. 4). *Meteorological Aerodrome Reports* dan *Aviation Selected Special Weather Report* adalah instrumen standar yang memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi cuaca di sekitar area operasional (Anaman et al., 2017, p. 47). Parameter seperti visibilitas (*visibility*) dan kehadiran awan *Cumulonimbus* merupakan elemen vital yang menjadi parameter kritis dalam menilai risiko terhadap aktivitas penerbangan maupun operasional wilayah lainnya (Gültepe, 2023, p. 4; Vogt et al., 2024, p. 4891).

Akurasi dan kualitas dari pelaporan METAR/SPECI tidak hanya penting untuk keselamatan penerbangan, tetapi juga berfungsi sebagai *ground truth* atau data dasar dalam mengkalibrasi dan memvalidasi sistem penilaian risiko berbasis cuaca di tingkat lokal (Novotný et al., 2021; Vogt et al., 2024, p. 4891). Pemanfaatan parameter-parameter ini secara sistematis memungkinkan stasiun meteorologi untuk mendeteksi perubahan cuaca signifikan secara tepat waktu, yang merupakan prasyarat mutlak bagi keberhasilan operasional sistem peringatan berbasis dampak (Anaman et al., 2017, p. 47). Tanpa data observasi permukaan yang akurat, sulit bagi penyedia layanan meteorologi untuk melakukan penilaian risiko yang relevan dengan kondisi lapangan yang spesifik (Novotný et al., 2021).

### ***Weather Vulnerability Index* sebagai Kerangka Awal *Impact-Based Forecasting***

*Weather Vulnerability Index* hadir sebagai solusi praktis untuk mengoperasionalkan penilaian risiko di wilayah dengan keterbatasan sumber daya teknis (Romero-Martín, et al., 2024). Indeks ini berfungsi untuk mengagregasi berbagai parameter meteorologi esensial menjadi sebuah metrik tunggal yang merepresentasikan tingkat paparan dan kerentanan suatu wilayah terhadap bahaya cuaca tertentu (Bao et al., 2015; Szagri et al., 2023). Penggunaan indeks kerentanan, yang telah umum diterapkan dalam berbagai studi adaptasi iklim dan kesehatan, memiliki keunggulan dalam menyederhanakan data yang kompleks menjadi informasi yang dapat dioperasionalkan tanpa memerlukan prosedur komputasi yang berat (Bao, Li, & Yu, 2015).

Pendekatan berbasis indeks memberikan landasan objektif bagi pengambil keputusan untuk menetapkan ambang batas peringatan yang lebih kontekstual berdasarkan tingkat risiko yang diidentifikasi secara lokal (Szagri et al., 2023). Bagi stasiun meteorologi di wilayah seperti Kabupaten Sarmi, yang menghadapi tantangan berupa kurangnya basis data dampak dan keterbatasan tenaga ahli untuk pemodelan risiko yang kompleks, WVI menawarkan mekanisme yang operasional dan terukur (Mühlhofer & Willemse, 2024). Penelitian ini memosisikan WVI bukan sebagai pengganti sistem peringatan yang ada, melainkan sebagai kerangka awal yang pragmatis untuk menerjemahkan data observasi meteorologi dasar menjadi penilaian kerentanan cuaca lokal yang dapat langsung mendukung pengambilan keputusan (Bianco et al., 2026; Nkiaka et al., 2020, p. 3).

Penelitian ini secara mendasar berupaya menjawab kesenjangan di mana banyak kerangka kerja IBF saat ini masih terfokus pada infrastruktur komputasi tinggi atau integrasi data masif yang kurang praktis diadopsi di tingkat stasiun meteorologi daerah dengan keterbatasan sumber daya (Gudoshava et al., 2024, p. 12; Mühlhofer & Willemse, 2024). Penggunaan *Weather Vulnerability Index* dipilih karena metodenya yang efisien dalam mengagregasi data observasi permukaan (seperti METAR/SPECI) menjadi indikator yang operasional dan mudah dipahami, tanpa memerlukan prosedur komputasi yang berat. Dengan demikian, penelitian ini menjembatani hubungan antara data observasi permukaan yang tersedia dengan kebutuhan akan penilaian kerentanan yang praktis, sehingga menciptakan alur operasional peringatan dini yang lebih kontekstual, berbasis risiko, dan aplikatif bagi layanan meteorologi di daerah.



## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk mengonstruksi kerangka awal Impact-Based Forecasting di tingkat stasiun meteorologi melalui pengembangan *Weather Vulnerability Index*. Pendekatan ini dipilih untuk mengubah data observasi permukaan yang bersifat kontinu menjadi informasi risiko yang operasional, kontekstual, dan mudah diinterpretasikan oleh pemangku kepentingan (Terti, Anquetin, & Ruin, 2022).

### Desain Penelitian

Desain penelitian berfokus pada analisis klimatologi operasional berbasis data observasi permukaan in situ. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam menyarikan pola-pola cuaca signifikan yang berdampak langsung pada operasional lokal, tanpa memerlukan kompleksitas komputasi model prediksi numerik atau kecerdasan buatan (Bianco et al., 2026; Mühlhofer & Willemse, 2024). Fokus utama adalah pada pemanfaatan data historis untuk membentuk profil kerentanan yang mencerminkan realitas lapangan di Stasiun Meteorologi Mararena-Sarmi.

### Lokasi dan Periode Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Stasiun Meteorologi Mararena-Sarmi, Kabupaten Sarmi, Papua. Wilayah ini dipilih karena keterbatasan basis data dampak yang terdokumentasi secara sistematis, menjadikannya model yang ideal untuk pengujian WVI sebagai kerangka kerja pragmatis. Data yang dianalisis mencakup seluruh periode operasional tahunan, yaitu dari 1 Januari hingga 31 Desember 2025.

### Data dan Teknik Pengumpulan Data

Data primer yang digunakan adalah laporan cuaca rutin (*Meteorological Aerodrome Reports - METAR*) dan laporan cuaca khusus (*Aviation Selected Special Weather Report - SPECI*) tahun 2025 yang terdokumentasi di Stasiun Meteorologi Mararena-Sarmi. Laporan-laporan ini merupakan sumber data ground truth yang sangat andal untuk memantau kondisi cuaca *real-time* di area operasional (Anaman et al., 2017, p. 47; Vogt et al., 2024, p. 4891). Parameter kunci yang diekstraksi dari data ini adalah:

- a. Kejadian awan *Cumulonimbus* (CB).
- b. *Visibility* (jarak pandang).
- c. Waktu observasi.
- d. Frekuensi kejadian per bulan dan per jam.

### Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data dilakukan secara sistematis untuk memastikan integritas dan kualitas *output* analisis:

- a. *Import Data*: Mengonsolidasi seluruh laporan METAR dan SPECI tahun 2025 ke dalam basis data terstruktur.
- b. Pembersihan dan Validasi: Melakukan pemeriksaan kualitas data (*quality control*) untuk mengidentifikasi dan menangani data yang hilang (*missing data*) atau anomali observasi agar tidak mengganggu akurasi perhitungan.
- c. Identifikasi Parameter: Mengklasifikasikan data observasi ke dalam kategori:
  - 1) Kejadian awan CB (ya/tidak).
  - 2) *Low Visibility*: Jarak pandang < 5.000 meter.
  - 3) *Very Low Visibility*: Jarak pandang < 1.000 meter.

### **Agregasi dan Pembentukan *Weather Vulnerability Index***

Menghitung total frekuensi kejadian per bulan dan per jam pengamatan untuk membentuk profil klimatologis operasional. Kemudian, konstruksi *Weather Vulnerability Index* (WVI) didasarkan pada agregasi parameter yang memiliki dampak signifikan terhadap operasional.

#### **1. Model *Risk Score* Bulanan**

*Risk Score* dihitung untuk mengukur tingkat paparan bahaya cuaca bulanan dengan formula berikut:

$$\text{Risk Score} = \frac{(\text{CB}_{\text{count}} \times 1,5) + (\text{LowVis}_{\text{count}} \times 2,0)}{\text{Total Observasi}} \times 100$$

Keterangan:

$\text{CB}_{\text{count}}$  : Jumlah kejadian awan *Cumulonimbus* dalam satu bulan

$\text{LowVis}_{\text{count}}$  : Jumlah kejadian *Low Visibility* dalam satu bulan

Total Observasi : Total frekuensi data pengamatan dalam satu bulan.

$\text{CB}_{\text{count}}$  diberi bobot 1,5 karena merepresentasikan potensi cuaca konvektif signifikan. Adapun  $\text{LowVis}_{\text{count}}$  diberi bobot 2,0 karena berdampak langsung terhadap operasional transportasi dan aktivitas lapangan.

#### **2. Model *Weather Vulnerability Index***

WVI disusun untuk memberikan gambaran tingkat kerentanan komposit dengan formula berikut:

$$\text{WVI} = (\text{CB}_{\text{rate}} \times 0,4) + (\text{LowVis}_{\text{rate}} \times 0,4) + (\text{VeryLowVis}_{\text{rate}} \times 0,2)$$

Keterangan variabel:

$\text{CB}_{\text{rate}}$  : Persentase frekuensi observasi dengan awan CB.

$\text{LowVis}_{\text{rate}}$  : Persentase frekuensi observasi dengan jarak pandang < 5.000 meter.

$\text{VeryLowVis}_{\text{rate}}$  : Persentase frekuensi observasi dengan jarak pandang < 1.000 meter.

Kategori WVI ditetapkan sebagai berikut: Rendah (< 8), Sedang (8-15), dan Tinggi (>15).

### **Analisis Data**

Tahapan Analisis data dilakukan secara deskriptif untuk:

- Menentukan profil kerentanan cuaca tahunan secara keseluruhan.
- Mengidentifikasi bulan-bulan dengan risiko tertinggi untuk mendukung perencanaan mitigasi.
- Memetakan jam operasional paling berisiko guna meningkatkan kewaspadaan petugas stasiun.
- Menghasilkan *baseline* informasi sebagai kerangka awal sistem peringatan dini berbasis dampak yang lebih kontekstual.



## Kerangka Penelitian

Alur kerja penelitian ini dijabarkan berikut:



## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakteristik Data Penelitian

Data observasi yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari laporan cuaca rutin (METAR) dan laporan cuaca khusus (SPECI) Stasiun Meteorologi Mararena-Sarmi selama periode 1 Januari hingga 31 Desember 2025. Seluruh data telah melalui proses validasi dan pembersihan data untuk memastikan konsistensi serta kelengkapan informasi yang digunakan dalam analisis. Data yang berhasil diproses mencakup parameter-parameter meteorologi yang memiliki pengaruh langsung terhadap kondisi cuaca operasional, khususnya kejadian awan cumulonimbus (CB) dan visibility.

#### 1. Distribusi Data Observasi

Sebaran data observasi menunjukkan cakupan yang merata sepanjang tahun pengamatan sehingga mampu merepresentasikan karakteristik cuaca operasional Kabupaten Sarmi secara komprehensif. Integrasi antara laporan METAR dan SPECI memungkinkan identifikasi kejadian cuaca signifikan secara lebih detail dibandingkan hanya menggunakan observasi rutin. Data tersebut menjadi dasar dalam pembentukan profil kerentanan cuaca dan perhitungan indeks yang dikembangkan dalam penelitian ini.

#### 2. Karakteristik Cuaca Operasional

Analisis terhadap data observasi menunjukkan bahwa kondisi cuaca operasional di Kabupaten Sarmi dipengaruhi oleh aktivitas konvektif dan variasi jarak pandang yang terjadi sepanjang tahun. Kedua parameter tersebut merupakan faktor utama yang

digunakan dalam pembentukan *Weather Vulnerability Index* karena memiliki keterkaitan langsung dengan gangguan operasional di lapangan.

#### a) Distribusi Kejadian Cumulonimbus

Kejadian awan cumulonimbus menunjukkan pola musiman yang bervariasi sepanjang tahun pengamatan. Frekuensi kejadian yang lebih tinggi mengindikasikan peningkatan aktivitas konvektif yang berpotensi menimbulkan hujan lebat, angin kencang, maupun fenomena cuaca signifikan lainnya. Kondisi ini menjadi salah satu indikator penting dalam penilaian tingkat kerentanan cuaca operasional.

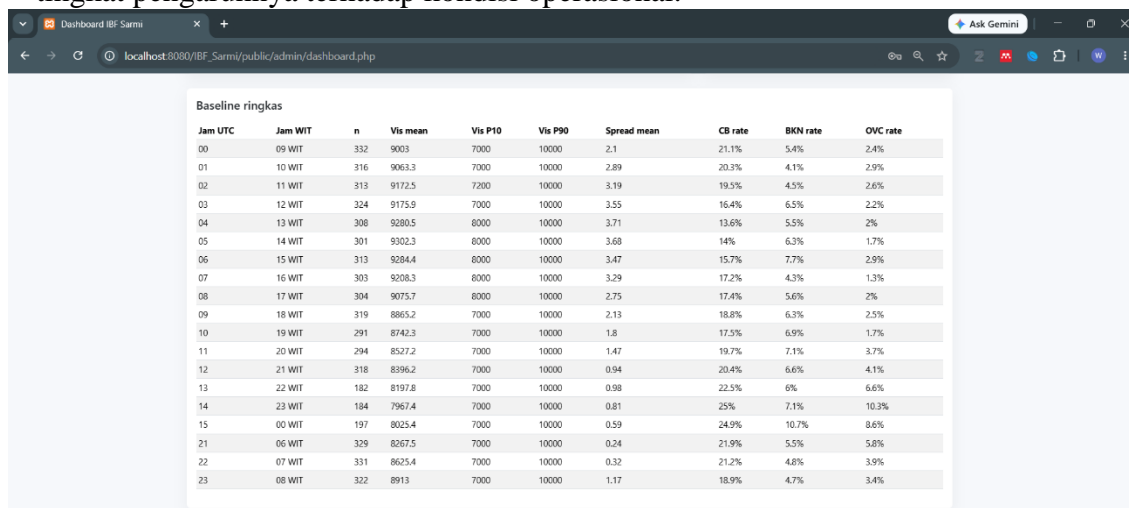
#### b) Distribusi Visibility Rendah

Kejadian visibility rendah teridentifikasi pada beberapa periode pengamatan dan memberikan kontribusi terhadap peningkatan risiko operasional. Visibility rendah berpotensi mengurangi efektivitas aktivitas transportasi dan pelayanan meteorologi sehingga menjadi salah satu parameter utama dalam perhitungan indeks kerentanan cuaca.

### Analisis *Weather Vulnerability Index*

#### 1. Pembentukan *Weather Vulnerability Index*

*Weather Vulnerability Index* (WVI) dikembangkan sebagai indikator kuantitatif yang mampu merepresentasikan tingkat kerentanan cuaca berdasarkan data observasi permukaan. Indeks ini dibangun melalui integrasi parameter kejadian awan cumulonimbus, visibility rendah, dan visibility sangat rendah yang diberi bobot sesuai tingkat pengaruhnya terhadap kondisi operasional.



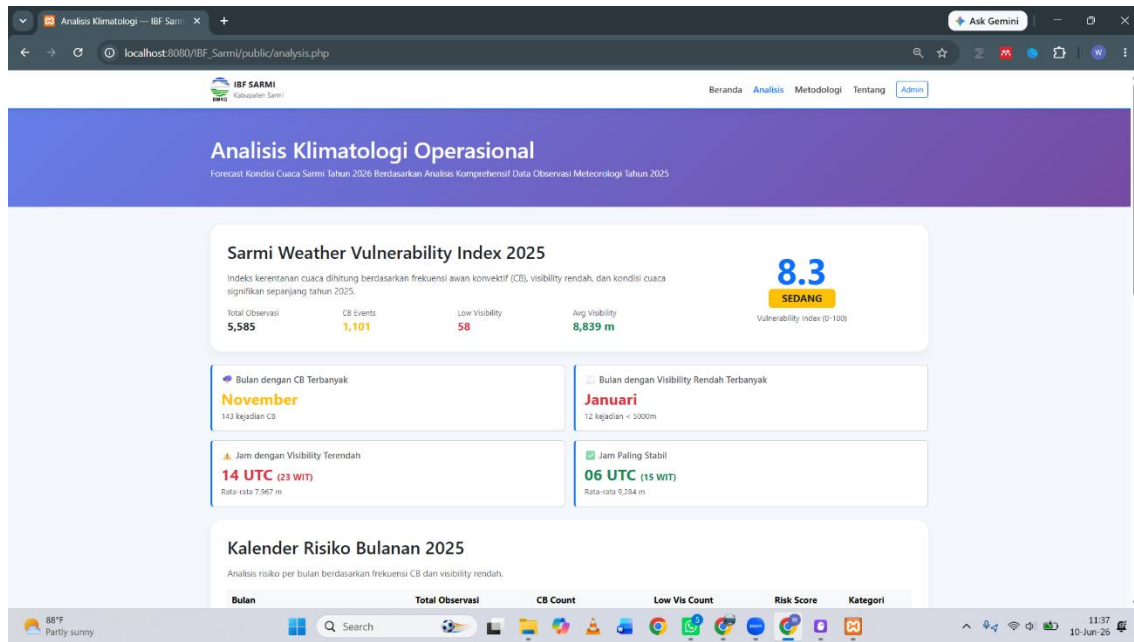
Jam UTC	Jam WIT	n	Vis mean	Vis P10	Vis P90	Spread mean	CB rate	BKN rate	OVC rate
00	09 WIT	332	9003	7000	10000	2.1	21.1%	5.4%	2.4%
01	10 WIT	316	9063.3	7000	10000	2.89	20.3%	4.1%	2.9%
02	11 WIT	313	9172.5	7200	10000	3.19	19.5%	4.5%	2.6%
03	12 WIT	324	9175.9	7000	10000	3.55	16.4%	6.5%	2.2%
04	13 WIT	308	9280.5	8000	10000	3.71	13.6%	5.5%	2%
05	14 WIT	301	9302.3	8000	10000	3.68	14%	6.3%	1.7%
06	15 WIT	313	9284.4	8000	10000	3.47	15.7%	7.7%	2.9%
07	16 WIT	303	9208.3	8000	10000	3.29	17.2%	4.3%	1.3%
08	17 WIT	304	9075.7	8000	10000	2.75	17.4%	5.6%	2%
09	18 WIT	319	8865.2	7000	10000	2.13	18.8%	6.3%	2.5%
10	19 WIT	291	8742.3	7000	10000	1.8	17.5%	6.9%	1.7%
11	20 WIT	294	8527.2	7000	10000	1.47	19.7%	7.1%	3.7%
12	21 WIT	318	8396.2	7000	10000	0.94	20.4%	6.6%	4.1%
13	22 WIT	182	8197.6	7000	10000	0.98	22.5%	6%	6.6%
14	23 WIT	184	7967.4	7000	10000	0.81	25%	7.1%	10.3%
15	00 WIT	197	8025.4	7000	10000	0.59	24.9%	10.7%	8.6%
21	06 WIT	329	8267.5	7000	10000	0.24	21.9%	5.5%	5.8%
22	07 WIT	331	8625.4	7000	10000	0.32	21.2%	4.8%	3.9%
23	08 WIT	322	8913	7000	10000	1.17	18.9%	4.7%	3.4%

Gambar 1. Kerangka Pembentukan *Weather Vulnerability Index*

Komponen penyusun indeks terdiri atas *CB Rate*, *Low Visibility Rate*, dan *Very Low Visibility Rate*. Ketiga parameter tersebut dipilih karena memiliki hubungan langsung terhadap tingkat risiko cuaca yang dihadapi pengguna layanan meteorologi. Melalui proses pembobotan, setiap parameter memberikan kontribusi terhadap nilai akhir indeks sehingga mampu menghasilkan ukuran kerentanan yang lebih representatif.

#### 2. Interpretasi Tingkat Kerentanan Cuaca

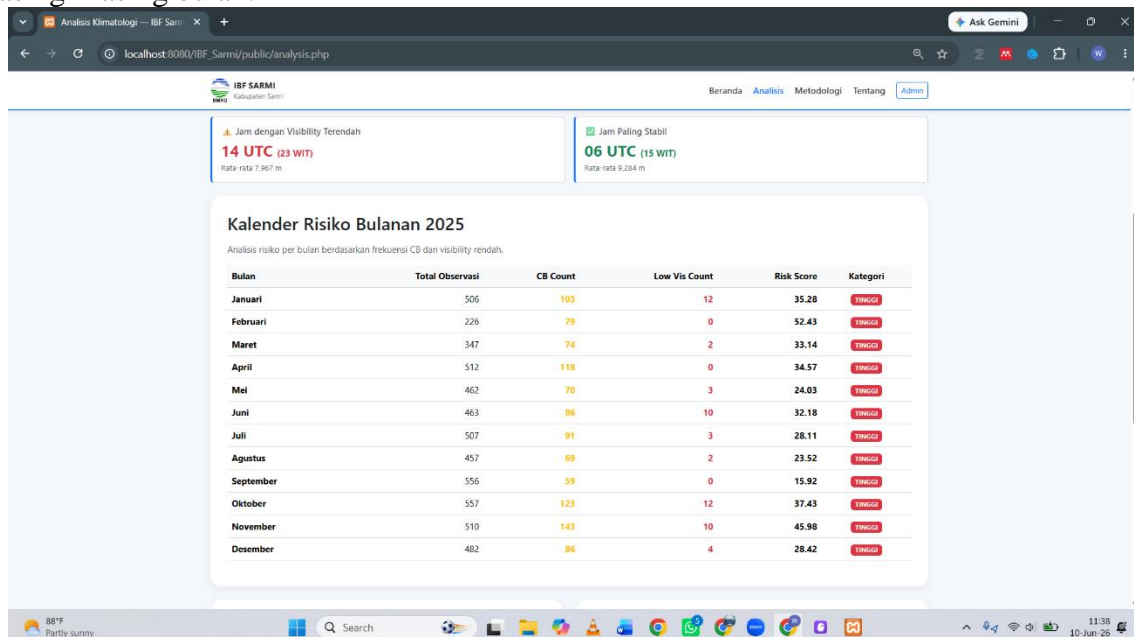
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *Weather Vulnerability Index* Kabupaten Sarmi berada pada kategori sedang dengan nilai indeks sebesar 8,3. Nilai tersebut menunjukkan bahwa wilayah penelitian memiliki tingkat kerentanan cuaca yang memerlukan perhatian operasional, khususnya pada periode tertentu yang ditandai oleh peningkatan aktivitas konvektif maupun penurunan jarak pandang.



**Gambar 2. Weather Vulnerability Index Kabupaten Sarmi Tahun 2025**

Kategori kerentanan digunakan untuk memudahkan interpretasi hasil analisis. Kategori rendah menunjukkan kondisi cuaca yang relatif stabil, kategori sedang menunjukkan perlunya peningkatan kewaspadaan operasional, sedangkan kategori tinggi menunjukkan potensi gangguan cuaca yang memerlukan perhatian khusus dalam pengambilan keputusan.

Analisis *risk score* bulanan dilakukan untuk mengidentifikasi variasi tingkat risiko cuaca sepanjang tahun 2025. Perhitungan *risk score* mempertimbangkan frekuensi kejadian awan *cumulonimbus* dan *visibility* rendah yang dinormalisasi terhadap jumlah observasi pada masing-masing bulan.



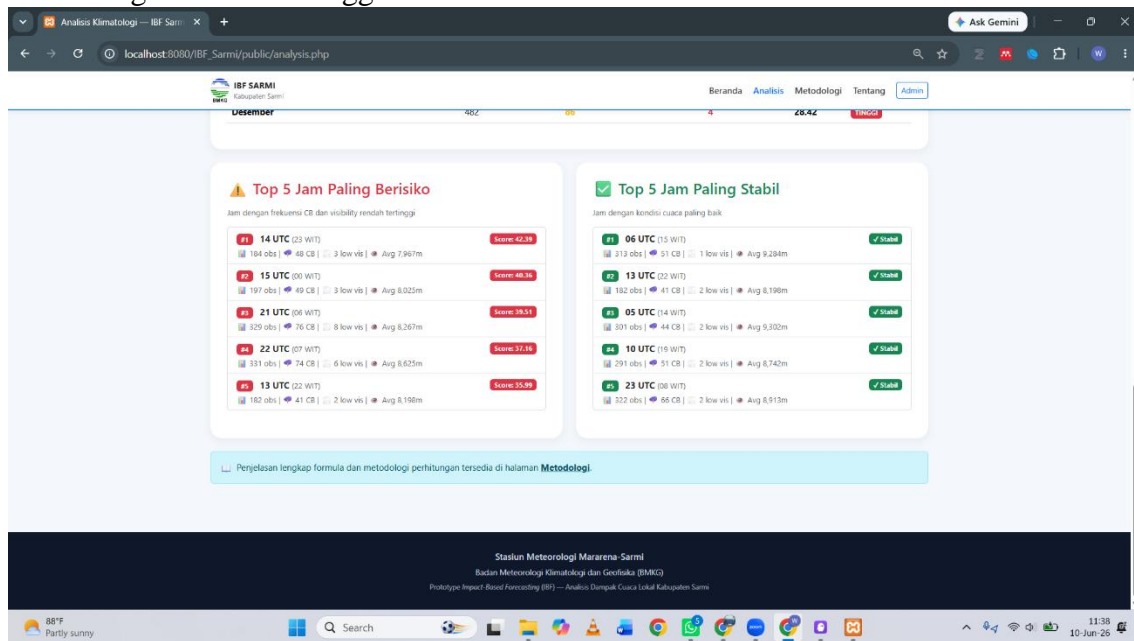
**Gambar 3. Kalender Risiko Bulanan Tahun 2025**

Hasil analisis menunjukkan bahwa November merupakan bulan dengan tingkat risiko tertinggi dengan nilai risk score sebesar 45,98. Tingginya nilai tersebut dipengaruhi oleh

frekuensi kejadian awan cumulonimbus dan visibility rendah yang lebih besar dibandingkan bulan lainnya. Kondisi ini menunjukkan adanya peningkatan aktivitas cuaca signifikan yang berpotensi mengganggu aktivitas operasional.

Bulan September menunjukkan tingkat risiko terendah dengan nilai risk score sebesar 15,92. Kondisi ini mengindikasikan frekuensi kejadian cuaca signifikan yang relatif lebih sedikit dibandingkan periode lainnya sehingga tingkat kerentanan cuaca operasional cenderung lebih rendah.

Analisis temporal dilakukan untuk mengidentifikasi jam-jam operasional yang memiliki tingkat risiko tertinggi dan terendah berdasarkan data historis tahun 2025.

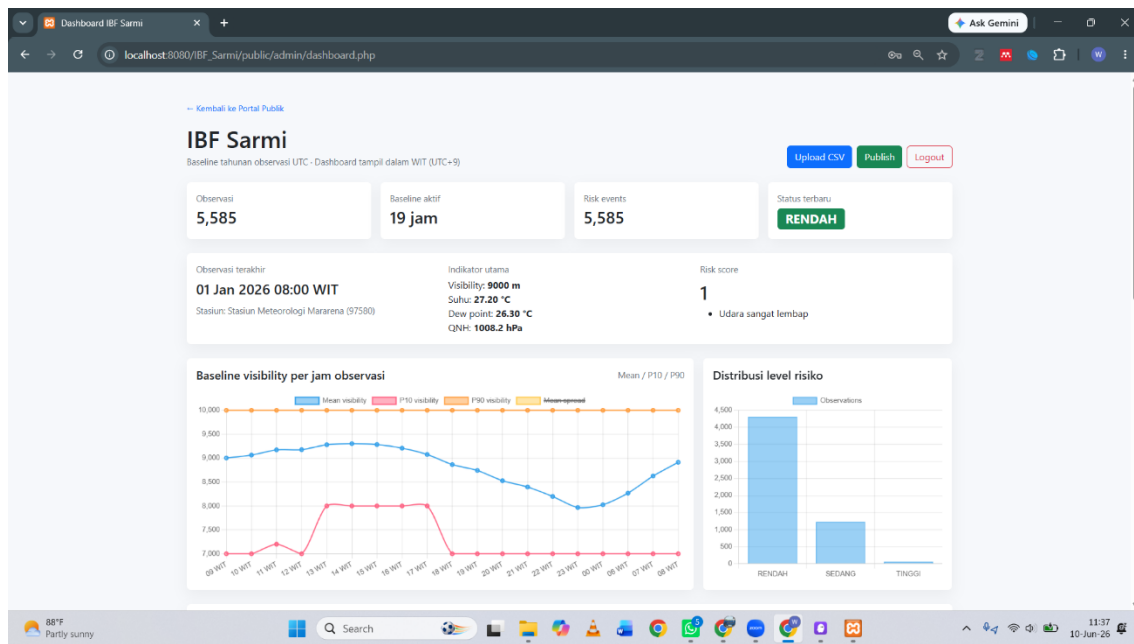


**Gambar 4. Top 5 Jam Paling Berisiko dan Top 5 Jam Paling Stabil**

Jam 14 UTC tercatat sebagai periode dengan tingkat risiko tertinggi dengan nilai risk score sebesar 42,39. Periode ini menunjukkan kecenderungan terjadinya fenomena cuaca signifikan yang lebih sering dibandingkan jam lainnya sehingga memerlukan peningkatan kewaspadaan operasional. Adapun Jam 06 UTC merupakan periode dengan kondisi paling stabil yang ditunjukkan oleh nilai visibility rata-rata tertinggi. Kondisi tersebut menunjukkan peluang terjadinya gangguan cuaca yang relatif lebih kecil dibandingkan periode lainnya.

### **Implementasi Kerangka Awal *Impact-Based Forecasting***

*Weather Vulnerability Index* yang dikembangkan dalam penelitian ini berfungsi sebagai instrumen untuk menerjemahkan data observasi meteorologi menjadi informasi kerentanan yang lebih mudah dipahami. Melalui pendekatan ini, informasi cuaca tidak hanya disajikan dalam bentuk parameter meteorologi, tetapi juga dalam bentuk indikator risiko yang dapat mendukung proses pengambilan keputusan.



**Gambar 5. Dashboard Analisis IBF Sarmi**

Informasi yang dihasilkan sistem memungkinkan pengguna untuk mengidentifikasi periode dengan tingkat kerentanan tertinggi dan terendah. Dengan demikian, pengambilan keputusan operasional dapat dilakukan secara lebih terarah berdasarkan tingkat risiko yang terukur.

### **Kelebihan dan Keterbatasan Sistem**

Pendekatan berbasis observasi permukaan memiliki keunggulan karena menggunakan data aktual yang diperoleh langsung dari lapangan. Selain itu, metode yang digunakan relatif sederhana sehingga dapat diterapkan pada stasiun meteorologi dengan keterbatasan sumber daya. Namun demikian, hasil analisis sangat bergantung pada kualitas dan konsistensi data observasi yang tersedia. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan melalui integrasi data dampak, validasi multi-tahun, dan penyesuaian parameter sesuai karakteristik wilayah masing-masing sehingga mendukung implementasi *Impact-Based Forecasting* secara lebih luas.

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Penelitian ini berhasil mengembangkan Weather Vulnerability Index sebagai mekanisme kuantitatif yang mampu memetakan tingkat kerentanan cuaca di Kabupaten Sarmi menggunakan data observasi permukaan METAR/SPECI tahun 2025, sekaligus menyediakan kerangka awal *Impact-Based Forecasting* yang cukup aplikatif bagi stasiun meteorologi dengan keterbatasan sumber daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa frekuensi kejadian awan *Cumulonimbus* dan penurunan jarak pandang merupakan determinan utama risiko operasional, yang memungkinkan kategorisasi tingkat kerentanan cuaca secara objektif sebagai basis informasi instruktif bagi pengambil keputusan. Meskipun pendekatan ini menawarkan efisiensi tinggi tanpa kompleksitas komputasi, terdapat keterbatasan pada ketergantungan yang signifikan terhadap konsistensi kualitas data observasi historis, sehingga pemeliharaan integritas data menjadi prasyarat mutlak bagi keberlanjutan sistem. Mengingat potensi metodologi ini untuk direplikasi pada wilayah lain, disarankan untuk mengembangkan integrasi data dampak yang lebih holistik dan validasi berkala terhadap profil kerentanan guna meningkatkan akurasi early warning berbasis risiko yang kontekstual.

## DAFTAR REFERENSI

- Anaman, K., Quaye, R., & Owusu-Brown, B. (2017). Benefits of Aviation Weather Services: A Review of International Literature. *Research in World Economy*, 8(1), 45-45. doi:10.5430/rwe.v8n1p45
- Bao, J., Li, X., & Yu, C. (2015). The Construction and Validation of the Heat Vulnerability Index, a Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(7), 7220-7234. doi:10.3390/ijerph120707220
- Bianco, M., Brown, E., Lumbroso, D., White, C., & Kolusu, S. (2026). Global evidence of operational multi-risk Impact-based Forecasting and Warning systems. doi:10.5194/egusphere-egu26-18533
- Gudoshava, M., Otieno, G., Koech, E., Misiani, H., Ongoma, J., Heinrich, C., . . . Artan, G. (2024). Advances, gaps and way forward in provision of climate services over the Greater Horn of Africa. *Frontiers in Climate*, 6. doi:10.3389/fclim.2024.1307535
- Gültepe, I. (2023). A Review on Weather Impact on Aviation Operations: Visibility, Wind, Precipitation, Icing. *Journal of Airline Operations and Aviation Management*, 2(1), 1-44. doi:10.56801/jaoam.v2i1.1
- Kaltenberger, R., Schaffhauser, A., & Staudinger, M. (2020). “What the weather will do” – results of a survey on impact-oriented and impact-based warnings in European NMHSs. *Advances in science and research*, 17, 29-38. doi:10.5194/asr-17-29-2020
- Mühlhofer, E., & Willemse, S. (2024). From local impacts to country-wide warnings: progress and challenges of developing an operational impact-warning chain. doi:10.5194/ems2024-652
- Mühlhofer, E., Kaderli, S., & Willemse, S. (2025). Should we really do impact forecasts? Strategic learnings at MeteoSwiss. doi:10.5194/ems2025-543
- Nkiaka, E., Taylor, A., Dougill, A., Antwi-Agyei, P., Adefisan, E., Ahiataku, M., . . . Toure, A. (2020). Exploring the Need for Developing Impact-Based Forecasting in West Africa. *Frontiers in Climate*, 2. doi:10.3389/fclim.2020.565500
- Novotný, J., Dejmál, K., Repal, V., Gera, M., & Sládek, D. (2021). Assessment of TAF, METAR, and SPECI Reports Based on ICAO ANNEX 3 Regulation. *Atmosphere*, 12(2), 138-138. doi:10.3390/atmos12020138
- Potter, S., Kox, T., Mills, B., Taylor, A., Robbins, J., Cerrudo, C., . . . Tupper, A. (2025). Research gaps and challenges for impact-based forecasts and warnings: Results of international workshops for High Impact Weather in 2022. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 118, 105234-105234. doi:10.1016/j.ijdr.2025.105234
- Romero-Martín, R., Leiva, I., Llasat, M., Llasat-Botija, M., Rigo, T., Valdemoro, H., . . . Jiménez, J. (2024). Mapping cumulative compound hydrometeorological and marine-induced risks on the NW Mediterranean coast. *Scientific Reports*, 14(1), 3237-3237. doi:10.1038/s41598-024-53899-z
- Sullivan, C., & Meigh, J. (2005). Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated index approach: the example of the climate vulnerability index. *Water Science & Technology*, 51(5), 69-78. doi:10.2166/wst.2005.0111
- Szagri, D., Nagy, B., & Szalay, Z. (2023). How can we predict where heatwaves will have an impact? – A literature review on heat vulnerability indexes. *Urban Climate*, 52, 101711-101711. doi:10.1016/j.uclim.2023.101711
- Terti, G., Anquetin, S., & Ruin, I. (2022). Social Impacts: Integrating dynamic social vulnerability in impact-based weather forecasting. *HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe)*. Diambil kembali dari <https://hal.science/hal-03753169>
- Vogt, F., Foresti, L., Regenass, D., Réthoré, S., Burriel, N., Bibby, M., . . . Furrer, D. (2024). ampycloud: an open-source algorithm to determine cloud base heights and sky coverage



fractions from ceilometer data. *Atmospheric measurement techniques*, 17(16), 4891-4914. doi:10.5194/amt-17-4891-2024