

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Virus Zika pertama kali ditemukan pada tahun 1947 di hutan Zika, Entebbe, Uganda, dan sejak itu telah menyebar ke berbagai wilayah di dunia, termasuk Afrika, Asia Tenggara, dan Amerika. Virus ini ditularkan terutama melalui gigitan nyamuk *Aedes aegypti* dan *Aedes albopictus* yang juga menjadi vektor penyakit lain seperti demam berdarah dan chikungunya. Wabah besar virus Zika mulai terjadi di Brazil pada Mei 2015, yang kemudian menyebar dengan cepat ke negara-negara Amerika lainnya. Pada Desember 2015, diperkirakan terdapat sekitar 440.000 hingga 1.300.000 kasus infeksi virus Zika di Brazil (Ade Wilan Krisna, 2016).

Selain penyebarannya yang luas, Zika juga menimbulkan dampak kesehatan yang serius, termasuk kelainan bawaan seperti mikrosefali pada bayi dan sindrom Guillain-Barre pada orang dewasa (Musso dkk., 2019). Gejala infeksi virus Zika umumnya ringan dan sering tidak spesifik, seperti demam, ruam, nyeri sendi, dan konjungtivitis, sehingga banyak kasus yang tidak terdeteksi. Masa inkubasi virus ini diperkirakan sekitar 3-14 hari, dan hanya sekitar 20-25% orang yang terinfeksi menunjukkan gejala klinis (Ade Wilan Krisna, 2016). Hal ini menyebabkan tantangan dalam pengendalian dan pelacakan penyebaran virus secara efektif. Menurut *Pan American Health Organization* (PAHO), meluasnya penyebaran virus Zika sangat berkaitan dengan kondisi lingkungan yang memungkinkan populasi nyamuk pembawa virus berkembang secara optimal (PAHO, 2016).

Penyebaran virus Zika sangat terkait dengan perubahan iklim, khususnya faktor-faktor seperti suhu, curah hujan, dan kelembapan relatif. Virus Zika ditularkan terutama oleh nyamuk *Aedes aegypti* & *Aedes albopictus*, yang aktivitas dan kelangsungan hidupnya sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim. Kelembapan relatif yang tinggi meningkatkan tingkat menetasnya telur nyamuk dan memperpanjang masa hidup nyamuk dewasa, sehingga meningkatkan potensi penyebaran virus Zika. Sebaliknya, kelembapan rendah dapat menurunkan masa hidup nyamuk dan mengurangi penyebaran virus. Selain itu, perubahan iklim seperti fenomena El Niño juga berkontribusi pada peningkatan suhu dan kelembapan yang mendukung penyebaran nyamuk vektor ini, sehingga memperluas wilayah dan musim penularan Zika (Asad & Carpenter, 2018).



Penggunaan model prediktif yang didasarkan pada informasi iklim dan cuaca penting dalam upaya mitigasi serta sebagai bagian dari sistem lap penyebaran penyakit menular. Pendekatan ini memungkinkan nbuat kebijakan untuk mengidentifikasi keterkaitan antara faktor-nlah kasus Zika yang tercatat. Dengan memanfaatkan data dari lembaga internasional seperti NASA dan NOAA, serta an data epidemiologis dari sistem pemantauan nasional, model

tersebut dapat menyajikan proyeksi penyebaran virus Zika secara geografis dan berdasarkan waktu. Hal ini juga diperkuat oleh temuan penelitian yang dilakukan oleh (Siraj dkk., 2018) menunjukkan bahwa penyebaran virus Zika tidak terjadi secara acak, melainkan membentuk pola distribusi yang teratur dalam ruang dan waktu, yang dapat diperkirakan berdasarkan variabel lingkungan seperti suhu udara, dan curah hujan. Untuk mengevaluasi keterkaitan antar variabel tersebut, salah satu metode analisis yang diterapkan adalah regresi linier berganda.

Brazil tercatat sebagai negara dengan jumlah kasus Zika tertinggi di kawasan Amerika Selatan. Kondisi ini menjadikan negara tersebut sebagai wilayah yang paling representatif untuk dijadikan lokasi dalam pengembangan model prediksi penyebaran Zika. Penelitian oleh (Netto dkk., 2017) menunjukkan Brazil mencatat angka kasus Zika tertinggi di antara negara-negara Amerika Selatan, dengan tingkat infeksi yang mencapai lebih dari 60% di wilayah Salvador. Variasi geografis dan karakteristik iklim di kawasan tersebut memberikan peluang untuk melakukan analisis komprehensif terhadap pengaruh faktor iklim, baik skala lokal maupun regional, terhadap pola penyebaran Zika. Selain itu, tersedianya data yang cukup lengkap serta sistem pelaporan yang relatif konsisten menjadikan Brazil sebagai lokasi yang sesuai untuk pengembangan model prediksi berbasis iklim. Keakuratan model dapat diukur melalui teknik validasi silang serta indikator performa seperti nilai koefisien determinasi (R^2) dan *Relative Absolute Error* (RAE), sehingga hasil prediksi yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar dalam perumusan kebijakan kesehatan masyarakat.

Oleh karena itu, latar belakang penelitian ini menekankan urgensi integrasi antara data iklim, teknologi penginderaan jauh, dan pendekatan prediktif dalam upaya memahami serta mengantisipasi penyebaran penyakit yang ditularkan oleh vektor seperti virus Zika. Penggunaan model prediksi berbasis kondisi iklim dan cuaca tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga memiliki manfaat praktis dalam memperkuat sistem kesehatan dalam menghadapi risiko penyakit menular yang dipengaruhi oleh dinamika perubahan iklim. Mengingat kondisi iklim tropis Indonesia yang serupa dengan Brazil, serta adanya laporan kasus sporadis infeksi virus Zika di beberapa wilayah Indonesia seperti Jawa Tengah, Lombok, Jakarta, Bali, dan Jambi, model ini dapat digunakan untuk memprediksi kasus epidemi virus Zika di Indonesia apabila data kasus Zika di Indonesia sudah lengkap dan terintegrasi.

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ini adalah sebagai berikut :

pengaruh variabel iklim, cuaca, dan riwayat kasus terhadap jumlah virus di Brazil.

kan performa model prediksi sebelum dan sesudah dilakukan data untuk menilai pengaruh skala variabel terhadap akurasi

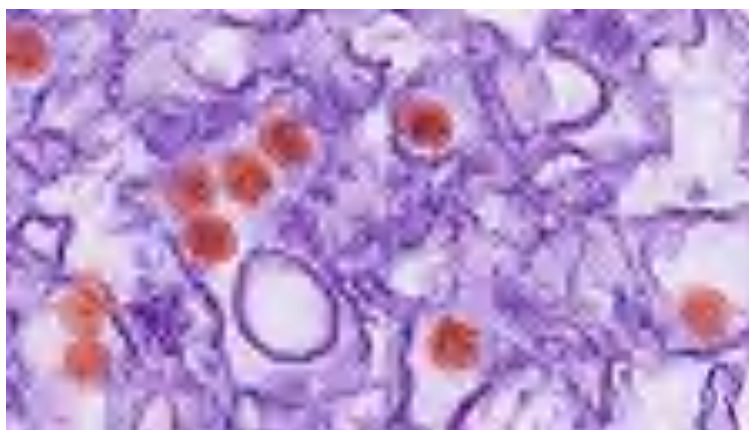
1.2.2 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam memberikan pemahaman yang lebih dalam mengenai pengaruh faktor iklim terhadap penyebaran virus Zika, serta sebagai dasar pengambilan kebijakan dalam upaya mitigasi dan pencegahan wabah di masa depan.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Zika Virus

Virus Zika adalah arbovirus yang termasuk dalam genus *Flavivirus*, yang ditularkan terutama melalui gigitan nyamuk *Aedes aegypti* dan *Aedes albopictus* sebagai vektor utama. **Gambar 1** menunjukkan tampilan mikroskop elektron berwarna dari partikel Flavivirus, yang ditandai dengan bentuk bulat berwarna merah. Flavivirus adalah virus yang memiliki envelope, RNA untai tunggal, *positive sense*, *open reading frame* (ORF) tunggal, protein struktural (*capsid*, *membrane*, *envelope*) dan protein non struktural (NS1, NS2A, NS2B, NS3, NS4A, NS4B, dan NS5) (Damayanti et al., 2021). Penularan virus ini bersifat anthroponotik, yaitu dari manusia ke nyamuk dan kembali ke manusia, meskipun ada juga laporan penularan non-vektor seperti melalui hubungan seksual dan dari ibu ke janin selama kehamilan (Asad & Carpenter, 2018).



Gambar 1. Zika Virus
(<https://www.cdc.gov/zika/geo/index.html>)

Virus Zika (ZIKV) pertama kali berhasil diidentifikasi pada bulan April 1947 dari sampel darah monyet Rhesus 766 yang berasal dari wilayah Uganda, Afrika, dalam rangka penelitian terhadap demam kuning yang saat itu menjadi fokus utama para " berasal dari bahasa Luganda bagian dari rumpun bahasa Bantu kawasan yang dipenuhi semak belukar atau vegetasi lebat. Pada emukan, belum terdapat laporan mengenai infeksi virus ini pada s selanjutnya dilakukan pada 12 Juni 1948 dari spesimen nyamuk j ditangkap sekitar 300 meter dari lokasi isolasi awal (Zanluca dkk., manusia pertama kali ditemukan melalui penelitian serologi pada



tahun 1952 di Uganda dan Republik Persatuan Tanzania. Kemudian, virus ini kembali diisolasi dari sampel manusia di Nigeria pada tahun 1968, yang mengindikasikan penyebaran yang terbatas di kawasan Afrika. Baru pada 2007, virus ini menyebabkan wabah besar yang tercatat di Pulau Yap, Mikronesia

Sebagai negara terbesar di Amerika Selatan, Brazil memiliki wilayah yang sangat luas dan beragam, dengan kondisi iklim dan topografi yang mendukung keberadaan *Aedes aegypti* & *Aedes albopictus*, nyamuk yang menjadi vektor utama penyebaran demam berdarah, Zika, dan chikungunya. Nyamuk ini dapat ditemukan di berbagai ketinggian, termasuk di daerah pegunungan di bagian tengah Brazil, yang menunjukkan kemampuan vektor tersebut untuk beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan (Portilla Cabrera & Selvaraj, 2020; Ruiz-López dkk., 2016).

Penyebaran *Aedes aegypti* yang meluas di Brazil tercermin dari tingginya angka kejadian penyakit yang dibawanya. Demam berdarah telah menjadi endemik selama lebih dari dua dekade, dengan ratusan ribu kasus yang terjadi setiap tahunnya. Zika pertama kali terdeteksi di Brazil pada tahun 2015 dan berkembang menjadi wabah besar pada tahun 2016, dengan perkiraan jumlah kasus antara 56.159 hingga 273.904. Sementara itu, chikungunya mulai dilaporkan sejak 2014, dengan jumlah kasus yang juga cukup signifikan (PAHO, 2025).

Tabel 1. Wilayah Amerika Selatan yang berisiko terkena ZIKV

Negara/Wilayah	Klasifikasi Risiko Geografis ZIKV	Jumlah Kasus
Argentina	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	1.932
Bolivia	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	7.358
Brazil	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	567.613
Colombia	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	111.891
Ecuador	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	5.244
Guyana	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	34
Paraguay	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	2.449
Peru	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	10.716
Suriname	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	3554
Uruguay	Diketahui memiliki nyamuk yang menularkan Zika, namun belum ada kasus ZIKV yang dilaporkan	0
Venezuela	Penularan ZIKV saat ini atau di masa lalu	62.093
Chile	Tidak diketahui adanya nyamuk yang menularkan ZIKV	0



Gejala Zika Virus

Gejala yang sering dikaitkan dengan infeksi virus Zika adalah demam yang ringan, disertai dengan ruam makulopapular, nyeri sendi (artralgia), atau tidak mengeluarkan nanah. Selain itu, gejala lain yang sering terjadi adalah nyeri otot (mialgia) dan sakit kepala. Secara umum, penyakit ini bersifat ringan dan gejalanya biasanya berlangsung antara beberapa hari hingga satu minggu.

minggu. Sekitar 80% individu yang terinfeksi virus Zika tidak menunjukkan gejala atau mengalami infeksi tanpa gejala. Masa inkubasi penyakit yang disebabkan oleh virus Zika biasanya berlangsung antara 3 hingga 14 hari (CDC, 2025).

Kasus yang memerlukan perawatan intensif di rumah sakit tergolong jarang, dan tingkat kematian sangat rendah, yakni kurang dari 1%. Meski demikian, sindrom Guillain-Barré dapat berkembang setelah seseorang terinfeksi virus Zika. Dalam beberapa kasus yang sangat langka, infeksi ini juga dapat menyebabkan kondisi serius seperti ensefalopati, meningoensefalitis, mielitis, uveitis, dan trombositopenia berat (CDC, 2025).

Infeksi virus Zika selama masa kehamilan dapat menyebabkan infeksi kongenital yang mengarah pada kelainan lahir serius pada otak dan mata, seperti mikrosefali parah, kalsifikasi intrakranial, atrofi serebral atau kortikal, gangguan korioritina, dan kerusakan pada saraf optik. Penularan virus Zika pada kehamilan bisa terjadi meskipun ibu tidak mengalami gejala. Bayi yang terinfeksi secara kongenital mungkin terlihat normal pada saat kelahiran, namun dapat menunjukkan temuan abnormal pada pemeriksaan neuroimaging atau mengalami efek klinis seperti gangguan penglihatan yang hanya terdeteksi setelah lahir. Janin dan bayi dari ibu yang terinfeksi virus Zika selama kehamilan perlu menjalani evaluasi untuk mendeteksi kemungkinan infeksi kongenital yang dapat menimbulkan kelainan neurologis dan gangguan penglihatan (CDC, 2025).

Karena penularan perinatal (saat persalinan) dari ibu ke bayi juga dimungkinkan, penyakit virus Zika perlu dipertimbangkan pada bayi:

1. yang menunjukkan satu atau lebih gejala berikut dalam dua minggu pertama kehidupan: demam, ruam, konjungtivitis, atau nyeri sendi, dan
2. yang ibunya berpotensi terpapar virus Zika sekitar dua minggu sebelum persalinan.

Nyeri sendi (artralgia) pada bayi dan anak-anak kecil sering kali sulit dikenali. Gejala yang muncul dapat berupa tangisan atau rewel, kesulitan atau penolakan untuk menggerakkan bagian tubuh tertentu, rasa sakit saat bagian tubuh tersebut disentuh, atau saat dilakukan gerakan aktif maupun pasif pada sendi yang terpengaruh (CDC, 2025).

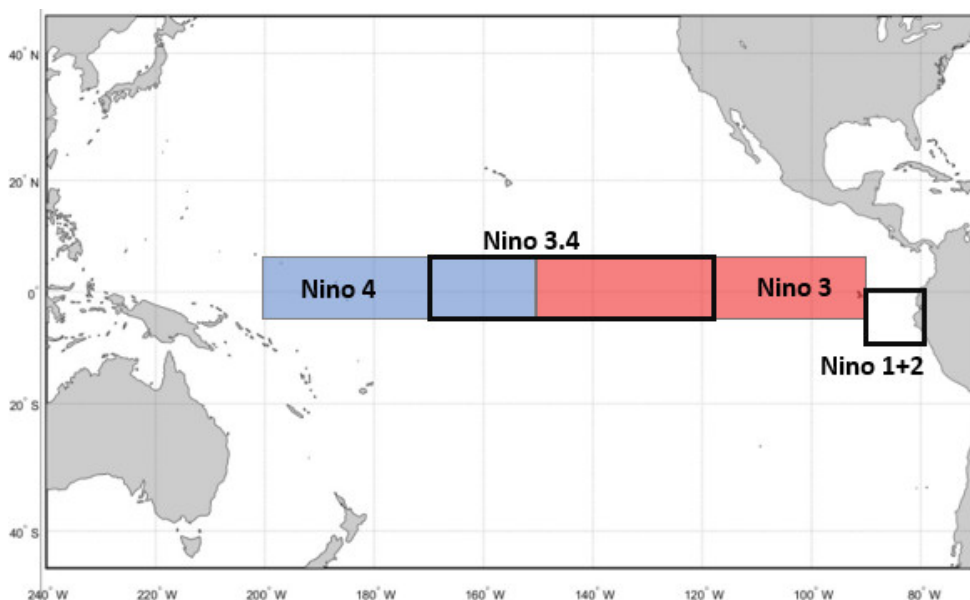
1.3.2 Variabel Cuaca

1.3.2.1 ENSO (NINO 3.4)

El Niño, Southern Oscillation (ENSO) adalah fenomena iklim yang rumit yang terjadi di Pasifik dan mempengaruhi pola cuaca di seluruh dunia. Ketika terjadi pemanasan di wilayah ini, fenomena tersebut disebut El Niño, sedangkan ketika pendinginan terjadi, fenomena tersebut dikenal sebagai La Niña. (Wang dkk., 2025). Gambar 1.1 menunjukkan pembagian wilayah indeks Niño di Samudra Pasifik yang memantau fenomena El Niño dan La Niña. Terdapat empat wilayah indeks Niño, yaitu Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4, dan Niño 4, yang masing-masing



merepresentasikan area berbeda di sepanjang ekuator. Wilayah Niño 3.4 (terletak di antara Niño 3 dan Niño 4) sering digunakan sebagai indikator utama dalam menentukan keberadaan dan kekuatan El Niño/La Niña karena merupakan zona transisi yang sensitif terhadap perubahan suhu permukaan laut.



Gambar 2. Region Pengukuran SST
(<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/sst>)

Peristiwa El Niño dan La Niña biasanya diukur menggunakan Indeks Niño 3.4, yang merupakan indeks paling umum digunakan. Nilai ambang batas dari indeks Niño 3.4 dibagi menjadi beberapa kategori berdasarkan anomali suhu muka laut, yaitu lemah (0,5 - 0,9), moderat (1,0 - 1,4), kuat (1,5 - 1,9), dan sangat kuat ($\geq 2,0$). Menurut Badan Meteorologi dan Geofisika, kategori moderat terletak pada kisaran 1,0 hingga 2, sedangkan kategori kuat berada pada kisaran lebih dari 2 (Abdullah, 2021). Indeks Niño 3.4 dibuat dari data HadISST 1°, dengan rata-rata berbobot luas dari anomali suhu permukaan laut (SST) di wilayah tengah-timur Pasifik ekuatorial (170°W–120°W; 5°S–5°N; NOAA/ESRL) (Nigam & Sengupta, 2021).

Ketika nilai indeks ini menunjukkan angka positif, fenomena yang terjadi adalah El Niño, yaitu pemanasan suhu permukaan laut yang dapat menyebabkan peningkatan curah hujan dan banjir di beberapa daerah, seperti di Amerika Selatan. Sebaliknya, nilai negatif pada indeks ini mengindikasikan La Niña, yang merupakan pendinginan suhu yang sering dikaitkan dengan kekeringan. Perubahan cuaca yang disebabkan oleh fenomena ini tidak hanya mempengaruhi suhu, curah hujan, dan angin, tetapi juga memberikan dampak besar pada sektor pertanian, sumber daya alam, kesehatan manusia, seperti mempengaruhi penyebaran penyakit yang dibawa oleh vektor (Nicolay & Nicolay, 2017).



Hubungan antara virus Zika dengan outbreak pada 2015-2016 yang dipengaruhi oleh fenomena El Niño dapat dijelaskan melalui faktor lingkungan yang memengaruhi penyebaran virus tersebut. El Niño menyebabkan perubahan iklim yang berdampak pada peningkatan populasi nyamuk *Aedes aegypti* & *Aedes albopictus*, vektor utama penularan Zika. Selain itu, pada periode tersebut terjadi pelemahan medan magnet bumi, khususnya di wilayah *South Atlantic Anomaly* (SAA), yang memungkinkan peningkatan intensitas sinar kosmik di atmosfer. Kombinasi dari pelemahan medan magnet dan peningkatan sinar kosmik ini diduga menyebabkan mutasi atau rekombinasi virus Zika, sehingga memicu wabah besar yang terjadi di Amerika pada 2015-2016. Pelemahan medan magnet juga meningkatkan reproduksi dan kepadatan nyamuk, mempercepat penyebaran virus (Qu & Chandra Wickramasinghe, 2018).

1.3.2.2 Presipitasi

Presipitasi adalah proses kondensasi uap air yang kemudian turun ke permukaan bumi dalam berbagai bentuk selama siklus hidrologi, seperti hujan, salju, embun, dan hujan es (Suyono Sosrodarsono & Kensaku Takeda, 1980). Pola presipitasi menentukan terbentuknya genangan air yang menjadi tempat berkembang biak nyamuk, sehingga berperan dalam penyebaran penyakit vektor seperti virus Zika. Presipitasi juga berperan dalam menciptakan dan memelihara habitat larva nyamuk karena tahap larva dan pupa nyamuk sepenuhnya bergantung pada keberadaan air yang tergenang (Asad & Carpenter, 2018).

Sebagai contoh, penurunan curah hujan diperkirakan dapat mengurangi jumlah nyamuk *Aedes*, terutama *Ae. albopictus* di Brazil, serta *Aedes aegypti* di daerah Cekungan Amazon, termasuk Brazil. (Ryan dkk., 2018). Penelitian eksperimental oleh (Alto & Juliano, 2001) mengungkapkan bahwa fluktuasi curah hujan dan suhu sangat berpengaruh terhadap produksi nyamuk dewasa. Jika air di habitat larva mengering sepenuhnya, angka kematian telur dan larva meningkat drastis, sehingga menghambat perkembangan nyamuk hingga dewasa. Sebaliknya, curah hujan yang stabil atau sedikit berubah menciptakan kondisi optimal bagi siklus hidup nyamuk. Meskipun telur nyamuk dapat bertahan dalam kondisi kering selama berbulan-bulan, keberhasilan menetas dan perkembangan larva sangat dipengaruhi oleh adanya air yang cukup akibat presipitasi (Asad & Carpenter, 2018).

Peningkatan curah hujan yang disebabkan oleh fenomena El Niño di wilayah Amerika Selatan dapat menciptakan kondisi lingkungan yang lembap dan basah, yang sangat mendukung pertumbuhan nyamuk *Aedes aegypti* dan *Aedes albopictus*. Kondisi ini menciptakan banyak lokasi potensial untuk berkembang biak sementara, seperti genangan air yang mempercepat peningkatan jumlah populasi nyamuk. (Ryan dkk., 2018). Perubahan iklim global, termasuk perubahan pola presipitasi, berpengaruh terhadap distribusi geografis dan pola musiman dari risiko penyebaran virus Zika oleh nyamuk *Aedes*. Berdasarkan proyeksi model iklim di masa depan, kondisi yang sebelumnya mendukung penyebaran virus sepanjang tahun panas atau kering bagi *Aedes albopictus*, meskipun tetap cocok untuk *Aedes aegypti* yang lebih tahan terhadap suhu tinggi. Oleh karena itu, perubahan



intensitas presipitasi baik penurunan maupun peningkatan memainkan peran penting dalam menentukan risiko dan penyebaran virus Zika secara global.

1.3.2.3 Suhu

Suhu berkaitan dengan pengaruh suhu lingkungan terhadap kehidupan dan perilaku organisme, termasuk nyamuk vektor penyakit seperti *Aedes aegypti* & *Aedes albopictus*. Nyamuk adalah hewan berdarah dingin yang sangat bergantung pada suhu eksternal untuk mengatur metabolisme dan siklus hidupnya (Asad & Carpenter, 2018). Suhu (*temperature*) merupakan ukuran rata-rata energi kinetik yang dihasilkan dari pergerakan molekul-molekul. Di banyak negara, suhu dalam meteorologi diukur menggunakan satuan derajat Celcius, yang dilambangkan dengan °C. Namun, untuk keperluan meteorologi, satuan derajat Fahrenheit dengan lambang °F masih digunakan oleh beberapa meteorolog (Akhmad Fadholi, 2013).

Menurut Barry & Chorley (2009), dijelaskan bahwa suhu minimum dan maksimum harian dipengaruhi oleh keseimbangan antara radiasi matahari yang diterima oleh permukaan bumi dan yang dipantulkan kembali ke atmosfer. Suhu minimum umumnya tercatat sebelum matahari terbit, sebagai akibat dari pelepasan energi ke atmosfer sepanjang malam, sementara suhu maksimum terjadi pada siang atau sore hari ketika pemanasan akibat sinar matahari mencapai titik tertingginya. Secara ringkas, suhu minimum adalah nilai temperatur terendah yang tercatat dalam periode tertentu, sedangkan suhu maksimum merujuk pada nilai temperatur tertinggi yang tercapai dalam rentang waktu yang sama.

Suhu memainkan peran penting dalam dinamika penyebaran virus Zika. Peningkatan suhu diperkirakan dapat mengurangi populasi nyamuk *Aedes*, khususnya *Aedes albopictus* di berbagai daerah di Brazil, serta *Aedes aegypti* di wilayah Cekungan Amazon, yang meliputi Brazil. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Alto & Juliano (2001) serta Ryan dkk. (2018), yang menyatakan bahwa peningkatan suhu berkontribusi terhadap penurunan populasi nyamuk *Aedes* di berbagai wilayah, terutama pada spesies tertentu yang memiliki toleransi suhu lebih rendah.

1.3.2.4 Kelembapan Relatif

Kelembapan relatif udara (RH) adalah rasio antara tekanan uap air yang terdapat di atmosfer dengan tekanan uap air jenuh pada suhu yang sama, dan dinyatakan dalam satuan persen (%RH). Parameter ini berperan penting dalam proses analisis serta prediksi cuaca karena berkaitan langsung dengan perubahan fase air di atmosfer. Pengukuran RH dilakukan di berbagai lapisan atmosfer, termasuk di permukaan, guna an yang lebih komprehensif mengenai kondisi cuaca (Ananda dkk.,



Optimized using
trial version
www.balesio.com

relatif berhubungan dengan virus Zika melalui pengaruhnya terhadap kelangsungan hidup nyamuk *Aedes aegypti* & *Aedes albopictus*, terutama penyebaran virus Zika. Nyamuk ini tidak dapat bertahan pada kelembapan relatif di bawah 42%. Kelembapan relatif yang tinggi

meningkatkan tingkat penetasannya telur nyamuk dan memperpanjang masa hidup nyamuk dewasa, sehingga meningkatkan potensi penyebaran virus Zika. Sebaliknya, kelembapan rendah menurunkan masa hidup nyamuk dewasa dan menurunkan tingkat penetasan telur nyamuk tersebut (Asad & Carpenter, 2018). Virus Zika telah tersebar di 86 wilayah di berbagai penjuru dunia. Penyebaran dan perkembangan arbovirus dipengaruhi oleh berbagai faktor yang bersifat beragam, termasuk aspek demografis, kondisi iklim, serta karakteristik lingkungan setempat. Faktor iklim dan lingkungan lokal memiliki peran krusial dalam menentukan dinamika penyebaran arbovirus. Unsur-unsur seperti tingkat pencahayaan, curah hujan, kelembapan udara, dan suhu secara langsung memengaruhi siklus hidup nyamuk, mulai dari penetasan telur hingga umur hidup serta kemampuan penyebarannya (Lima dkk., 2022).

Kelangsungan hidup nyamuk *Aedes aegypti* & *Aedes albopictus* cenderung menurun seiring dengan penurunan kelembapan relatif di lingkungan tempat mereka hidup. Kelembapan rendah menyebabkan stres fisiologis pada nyamuk, seperti dehidrasi, yang berdampak negatif pada masa hidup mereka. Dengan demikian, kondisi kelembapan rendah dapat mengurangi populasi nyamuk secara keseluruhan karena nyamuk lebih cepat mati. Namun, meskipun masa hidup nyamuk berkurang, tingkat pengisapan darah (*blood-feeding rate*) nyamuk justru menunjukkan peningkatan dan mencapai puncaknya pada kelembapan sekitar 50%. Peningkatan aktivitas mengisap darah ini berpotensi meningkatkan peluang penularan virus Zika ke manusia, karena nyamuk yang lebih sering mengisap darah memiliki kesempatan lebih besar untuk menyebarkan virus. Fenomena ini menunjukkan bahwa kelembapan relatif tidak hanya memengaruhi aspek fisiologis nyamuk, seperti kelangsungan hidup, tetapi juga memengaruhi perilaku nyamuk yang sangat penting dalam siklus transmisi virus (Abu et al., 2024).

Penelitian sebelumnya oleh (Sultana & Tuno, 2021) menunjukkan bahwa tingginya kelembapan relatif (RH) memiliki hubungan positif dengan meningkatnya deteksi ZIKV pada larva *Aedes albopictus*, karena kondisi yang lembap mendukung kelangsungan hidup telur dan larva. Pada RH sekitar 47–52%, *Aedes albopictus* memiliki tingkat fertilitas dan ketahanan hidup yang lebih tinggi dibandingkan spesies lain seperti *Aedes aegypti*. Secara keseluruhan, kelembapan relatif berperan penting dalam memengaruhi siklus hidup nyamuk dan mendukung penyebaran virus Zika.

Penelitian oleh (Arruda Pedrosa de Almeida Costa dkk., 2010) menunjukkan bahwa kelembapan memiliki peran penting dalam memengaruhi produksi telur *Aedes aegypti* & *Aedes albopictus*, dengan tingkat oviposisi tertinggi terjadi pada suhu rendah (25 °C) dan kelembapan tinggi (80%). Sebaliknya, kombinasi suhu tinggi (35 °C) dan kelembapan rendah (60%) menyebabkan penurunan signifikan dalam jumlah telur, serta terhadap kelangsungan hidup nyamuk dewasa dan keberhasilan reproduksi. Temuan ini mengindikasikan bahwa berkurangnya populasi *A. aegypti* di daerah yang kering tidak hanya dipicu oleh penurunan habitat, tetapi juga oleh kondisi lingkungan yang kurang mendukung secara fisiologis. Suhu yang lebih tinggi dan kelembapan tinggi mendorong aktivitas reproduksi, sedangkan



kelembapan di bawah 80% cenderung menurunkan kemampuan reproduksi nyamuk betina.

1.3.2.5 Radiasi Matahari

Radiasi Matahari merupakan indikator yang mengukur jumlah total energi matahari yang mencapai permukaan Bumi dalam rentang gelombang pendek antara 0,3 hingga 3,0 mikrometer. SWDR meliputi radiasi langsung dari matahari serta radiasi tersebar dari atmosfer, tanpa memperhitungkan kondisi cuaca seperti cerah atau mendung. Parameter ini sangat penting dalam mengamati tingkat radiasi di permukaan Bumi dan dapat dimanfaatkan untuk memperkirakan suhu permukaan serta tingkat kelembapan udara (Yu dkk., 2021)

Yu dan rekan-rekannya (2021) menyatakan bahwa pemantauan radiasi matahari menggunakan satelit seperti MODIS dan Himawari-8 mampu memberikan informasi yang akurat mengenai intensitas radiasi matahari di permukaan Bumi. Radiasi matahari memainkan peran penting dalam mengamati perubahan iklim dan dampaknya terhadap lingkungan, termasuk persebaran penyakit yang ditularkan oleh nyamuk. Dalam kaitannya dengan penyebaran penyakit, peningkatan radiasi matahari yang terekam melalui SWDR dapat memengaruhi kondisi suhu dan kelembapan lingkungan. Faktor-faktor ini berdampak langsung pada siklus hidup nyamuk vektor, seperti *Aedes aegypti*, yang merupakan pembawa virus Zika. Meningkatnya radiasi dapat menyebabkan suhu dan kelembapan naik, menciptakan lingkungan yang mendukung bagi pertumbuhan populasi nyamuk serta mempercepat proses inkubasi virus dalam tubuhnya, sehingga memperbesar potensi penularan penyakit (Alton dkk., 2023).

Radiasi matahari berperan penting dalam memengaruhi aktivitas sinar kosmik yang mencapai permukaan bumi. Saat aktivitas matahari menurun, seperti pada periode minimum matahari, medan magnet bumi melemah sehingga lebih banyak sinar kosmik dari luar angkasa dapat menembus atmosfer bumi. Peningkatan intensitas sinar kosmik ini dapat menyebabkan mutasi genetik pada virus, termasuk virus Zika, yang berpotensi meningkatkan virulensi atau kemampuan penyebarannya.

Penurunan aktivitas matahari yang terjadi sekitar tahun 2014-2015 bertepatan dengan melemahnya medan magnet bumi, khususnya di wilayah South Atlantic Anomaly (SAA). Kondisi ini memungkinkan lebih banyak partikel bermuatan dan sinar kosmik mencapai atmosfer bagian bawah, yang dapat memicu mutasi atau rekombinasi virus Zika. Mutasi ini diduga menjadi salah satu faktor yang menyebabkan wabah Zika besar di Amerika pada 2015-2016.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

radiasi matahari dan medan magnet bumi juga memengaruhi populasi vektor utama penularan virus Zika. Pelemahan medan magnet akan menurunkan kemampuan reproduksi dan kepadatan nyamuk, sehingga mempercepat penyebaran demam Zika, perubahan radiasi matahari secara tidak langsung meningkatkan risiko wabah Zika melalui efeknya pada vektor nyamuk (Amasinghe, 2018).

Lebih lanjut, penelitian dari Alton dkk. (2023) mengungkapkan bahwa peningkatan paparan radiasi matahari juga bisa meningkatkan kerentanan terhadap infeksi, termasuk infeksi virus dengue yang ditularkan oleh nyamuk *Aedes aegypti*. Walaupun penelitian tersebut fokus pada dengue, hasilnya sangat relevan untuk virus Zika karena keduanya disebarkan oleh vektor yang sama. Dengan demikian, perubahan intensitas radiasi yang dipantau melalui radiasi matahari dan meningkatnya paparan radiasi matahari akibat perubahan iklim dapat menciptakan kondisi lingkungan yang lebih menguntungkan bagi perkembangan nyamuk *Aedes aegypti*, mempercepat daur hidupnya, dan meningkatkan risiko penyebaran virus Zika.

1.3.3 Metode *Multiple Linear Regression*

Multiple Linear Regression merupakan pengembangan dari model regresi linier sederhana. Jika pada model regresi linier sederhana hanya terdiri dari satu variabel bebas dan satu variabel terikat, maka pada regresi linier berganda jumlah variabel bebasnya lebih dari satu dan satu variabel terikat. Dengan bertambahnya variabel variabel bebas maka bentuk umum dari persamaan regresi linier berganda yang mencakup dua atau lebih variabel bebas adalah sebagai berikut:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

Apabila menggunakan data sampel, maka dapat menggunakan model estimasi dari Persamaan (1) adalah sebagai berikut:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + e \quad (2)$$

Berdasarkan Persamaan (2) maka bentuk matriks dari model regresi linier berganda dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Atau dapat ditulis dengan $Y = X\beta + e$, dengan (Ningsih & Dukalang, 2019):

Y adalah vektor pengamatan berukuran $n \times 1$

X adalah matriks variabel bebas ukuran $n \times 1$

β adalah vektor parameter yang akan ditaksir berukuran $k \times 1$

e adalah vektor random error berukuran $n \times 1$

1.3.4 *K-Fold Cross Validation*



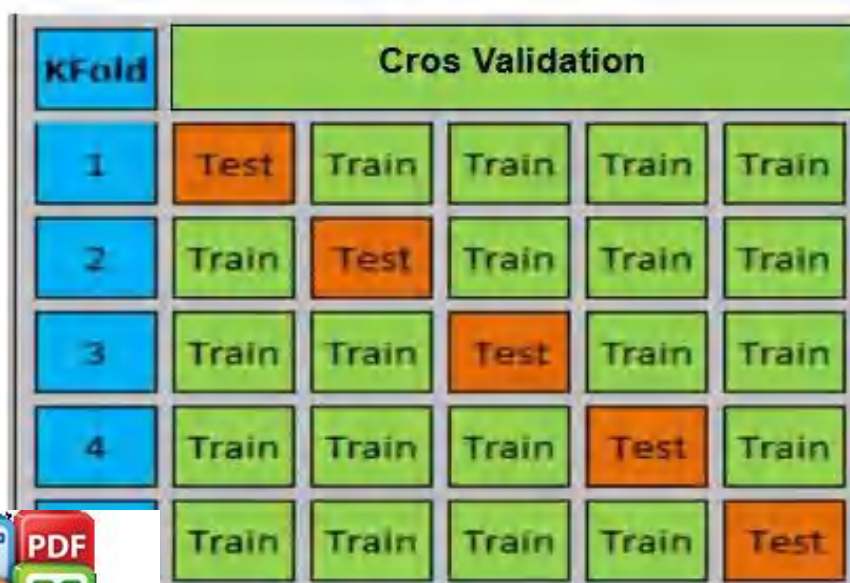
Optimized using
trial version
www.balesio.com

model bisa menggunakan metode *K-Fold Cross Validation*. *K-Fold* dipakai teknik untuk memvalidasi keakuratan sebuah model yang an data set tertentu. Data yang digunakan dalam proses disebut sebagai data latih atau training dan data yang digunakan odel disebut sebagai data testing (Davison & Hinkley 1997). *K-Fold* lah metode statistik yang digunakan untuk menilai kinerja model

yang akan dikembangkan. Teknik ini juga dianggap efektif dalam mengoptimalkan pemilihan atribut dan pengaturan parameter pada algoritma machine learning guna menghasilkan model prediktif yang lebih akurat.

Pada pendekatan metode *K-Fold Cross Validation*, data set dibagi menjadi sejumlah buah partisi secara acak. Selanjutnya, dilakukan sejumlah -kali eksperimen dengan masing-masing eksperimen menggunakan data partisi ke- sebagai data *testing* dan menggunakan sisa partisi lainnya sebagai data *training*. Eksperimen yang akan dilakukan sesuai dengan jumlah partisi yang dilakukan (Ayu Made Supartini dkk., 2017).

K-Fold Cross Validation digunakan untuk mengukur kinerja algoritma K-NN secara lebih umum dengan membagi dataset menjadi data training dan data testing. Dalam metode ini, data dibagi ke dalam k bagian atau lipatan yang sama besar. Model kemudian dilatih dan diuji sebanyak k kali, di mana pada setiap iterasi, satu bagian digunakan sebagai data *testing* dan sisanya sebagai data *training*. Proses ini dilakukan bergantian hingga setiap bagian telah digunakan sebagai data testing sekali. Hasil evaluasi dari setiap iterasi kemudian dirata-rata untuk memberikan estimasi performa model yang lebih stabil dan dapat diandalkan. Pendekatan ini sangat berguna untuk mengidentifikasi apakah model memiliki tingkat akurasi yang baik pada data yang berbeda, serta membantu menghindari permasalahan *overfitting* (model terlalu cocok dengan data latih) maupun *underfitting* (model tidak mampu menangkap pola dari data). Dengan demikian, *K-Fold Cross Validation* memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kemampuan generalisasi model K-NN terhadap data baru (Hafid, 2023).



Gambar 3. Skema *K-Fold Cross Validation*

nya, data akan dibagi menjadi 5 bagian (*fold*) dengan ukuran yang diperoleh 5 subset. Setiap iterasi akan menggunakan satu subset



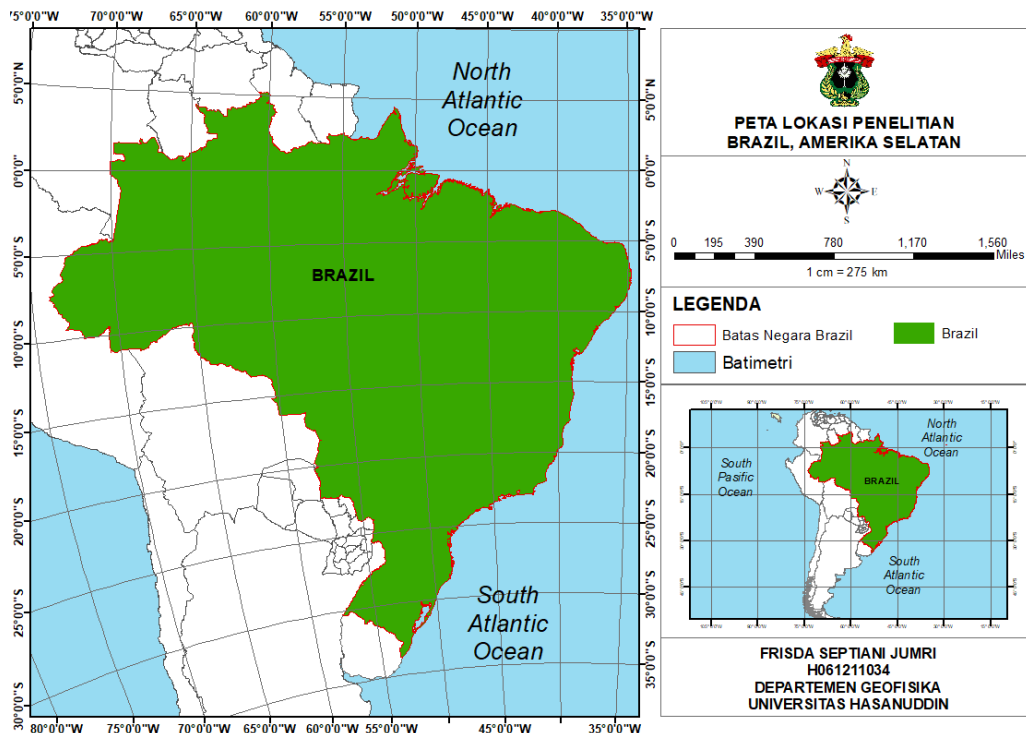
sebagai data uji, sementara sembilan subset sisanya dipakai untuk pelatihan, sebagaimana ditampilkan pada skema di **Gambar 3**. Salah satu keunggulan dari metode ini adalah kemampuannya dalam memberikan estimasi performa model yang lebih stabil dan akurat melalui rata-rata dari seluruh iterasi. Selain itu, *K-Fold Cross Validation* juga membantu menurunkan risiko empiris dibandingkan dengan metode pembagian sederhana antara data latih dan data uji. Kelebihan lainnya yaitu mengurangi kemungkinan overfitting dengan melatih serta menguji model menggunakan berbagai kombinasi data yang berbeda-beda (Wijiyanto dkk., 2024).



BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Brazil, pada koordinat 5° LU (Lintang Utara) – 34° LS (Lintang Selatan) dan 34° BB (Bujur Barat) – 74° BB (Bujur Barat). Wilayah ini meliputi seluruh negara bagian Brazil termasuk daratan dan sekitarnya.



Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Data

Data yang diolah berupa data sekunder kasus Zika dan variabel iklim/cuaca yang diperoleh dari berbagai institusi resmi berskala global seperti PAHO, WHO, BoM, NASA, dan NOAA.

1. Data Kasus Zika



Data kasus Zika yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari *Pan American Health Organization* (PAHO) di bawah *World Health Organization* (WHO) untuk wilayah Brazil selama periode 2015–2024. Data ini digunakan sebagai variabel dependen dalam penelitian untuk mengestimasi jumlah kasus di masa mendatang.

[g/data/index.php/en/mnu-topics/zika-weekly-en/](https://data/index.php/en/mnu-topics/zika-weekly-en/)

2. Data Iklim dan Cuaca

Seluruh data variabel iklim dan cuaca yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari *NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)*. Data ini mencakup:

a. Data Suhu

Data suhu permukaan diperoleh dari satelit yang dikelola oleh *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* melalui sistem pemantauan iklim global. Data ini menggambarkan temperatur mingguan yang digunakan sebagai salah satu prediktor iklim dalam model.

b. Data Kelembapan Relatif

Data kelembapan relatif mingguan dikumpulkan dari sumber yang sama dan digunakan untuk mengamati pengaruh tingkat kelembapan terhadap penyebaran kasus Zika.

c. Data Curah Hujan

Data curah hujan mingguan diperoleh dari dataset satelit dan digunakan sebagai salah satu indikator geoklimatik dalam analisis. Curah hujan tinggi berkorelasi dengan peningkatan populasi vektor nyamuk.

d. Data Radiasi Matahari

Data radiasi matahari mingguan yang digunakan merupakan data sekunder dari pengamatan satelit NASA. Radiasi ini berhubungan dengan suhu lingkungan dan aktivitas vektor.

Data tersebut tersedia dalam resolusi temporal harian hingga bulanan dan dapat diakses secara gratis melalui situs: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

3. Data *El Nino Southern Oscillation (ENSO)*

Data indeks ENSO yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari *Australian Bureau of Meteorology (BoM)* melalui situs resmi <http://www.bom.gov.au>. BoM menyediakan indeks ENSO berbasis suhu permukaan laut (*sea surface temperature/SST*) di wilayah Nino, khususnya Nino 3.4, untuk mengukur anomali iklim yang berhubungan dengan fenomena El Nino dan La Nina. Data ini digunakan untuk mengetahui pengaruh variabilitas iklim global terhadap jumlah kasus Zika di wilayah tropis.

2.3 Pengumpulan Data

Data iklim dan data kasus Zika yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber terpercaya. Variabel yang digunakan



meliputi indeks NINO 3.4, presipitasi, suhu minimum dan maksimum, kelembapan relative, kelembapan tanah permukaan serta jumlah kasus sebagai variabel independen (prediktor), dan jumlah kasus sebagai variabel dependen.

Pengumpulan data, dimulai dengan mencari dan mengumpulkan informasi dengan topik penelitian untuk memperoleh teori yang relevan

dan mendukung penelitian. Sumber referensi yang digunakan dapat berupa jurnal ilmiah, artikel penelitian, dan buku-buku yang relevan. Selanjutnya, data sekunder yang dibutuhkan diperoleh dari situs resmi lembaga penyedia data seperti NASA, BoM, serta PAHO. Data ini digunakan untuk mendukung proses pemodelan dan menganalisis hubungan antara faktor-faktor iklim dengan penyebaran kasus Zika.

2.4 Prosedur Pengolahan Data

Alur prosedur pengolahan data adalah serangkaian langkah atau tahapan yang harus dilakukan untuk mengambil, menyimpan, mengolah, dan menghasilkan informasi dari data. Berikut adalah urutan dari alur prosedur pengolahan data:

2.4.1 Input Data

1. Data Kasus Zika

Masukkan data kasus mingguan Zika (2015-2024) yang diperoleh dari sumber resmi seperti PAHO (*Pan American Health Organization*), untuk wilayah Brazil. Data ini berfungsi sebagai variabel dependen yang akan diprediksi.

2. Data Iklim dan Cuaca

Masukkan data lingkungan yang digunakan sebagai variabel prediktor mencakup suhu kelembapan relatif, presipitasi, Indeks NINO 3.4, kelembapan tanah permukaan dan radiasi matahari. Data tersebut diperoleh dari satelit dan institusi seperti NASA dan NOAA.

2.4.2 Prapemrosesan Data

1. Sinkronisasi Waktu

Pastikan semua data, baik data kasus Zika maupun prediktor iklim/cuaca, memiliki frekuensi mingguan yang sama. Data harus diselaraskan agar analisis bisa dilakukan dengan konsisten.

2. Penambahan LAG pada Kasus Zika (1, 2, 3 Minggu)

Tambahkan *lag* hanya pada variabel kasus Zika untuk mempertimbangkan efek tertunda dari kondisi sebelumnya terhadap peningkatan kasus. Misalnya, buat variabel *zika_lag1*, *zika_lag2*, dan *zika_lag3* yang menunjukkan jumlah kasus Zika pada 1, 2, dan 3 minggu yang lalu. dimana variabel prediktor iklim/cuaca tetap tidak diberi *lag*.

3. Penanganan Nilai Hilang (NaN)

Setelah penambahan *lag*, akan ada beberapa nilai kosong (NaN) pada data kasus pada minggu-minggu awal. Oleh karena itu, baris-baris dengan nilai hapus agar data bersih dan siap untuk pemodelan.



disasi pada seluruh prediktor (termasuk variabel *lag* yang baru is Zika Virus) agar berada pada skala yang sama. Standardisasi ini

penting untuk meningkatkan kinerja model *regresi* atau *algoritma machine learning*. Gunakan rumus *Z-score* sebagai berikut:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

Keterangan:

x = Nilai asli dari data yang ingin dinormalisasi

μ = Rata-rata (*mean*) dari seluruh data

σ = Simpangan baku (standar deviasi) dari data

z = Nilai hasil standardisasi (*Z-score*)

2.4.3 Pembentukan Model

Model dibentuk menggunakan data historis yang telah melalui proses prapemrosesan dan penyelarasan waktu. Tujuan utama dari model ini adalah untuk mempelajari hubungan antara variasi faktor iklim dan cuaca terhadap jumlah kasus Zika. Model yang digunakan adalah regresi linear berganda dengan intercept, yang mampu mengidentifikasi dan mengukur kontribusi masing-masing variabel prediktor terhadap variabel dependen, yaitu jumlah kasus Zika. Dalam hal ini, matriks prediktor (X) terdiri dari variabel lingkungan dan cuaca, sedangkan variabel dependen (y) adalah jumlah kasus Zika mingguan.

2.4.4 Validasi Model

1. *K-Fold Cross Validation*

Validasi dilakukan menggunakan *K-Fold Cross Validation* dengan nilai $K = 5$. Data dibagi menjadi 5 bagian, di mana pada setiap iterasi model dilatih menggunakan 4 bagian dan diuji pada 1 bagian yang tersisa. Proses ini diulang sebanyak 5 kali untuk mendapatkan rata-rata performa model secara menyeluruh.

2. Pengukuran Kinerja

Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik:

- *R-squared* (R^2): Mengukur seberapa baik model menjelaskan variasi jumlah kasus Zika. Nilai mendekati 1 menunjukkan model yang baik.
- *Relative Absolute Error* (RAE): Mengukur rata-rata besarnya kesalahan prediksi. Nilai yang lebih rendah menunjukkan prediksi yang lebih akurat.

2.4.5 Analisis Koefisien

Setelah proses validasi, dilakukan analisis terhadap koefisien regresi yang diperoleh dari seluruh iterasi *K-Fold*. Tujuannya adalah untuk:



liktor mana yang paling berpengaruh (dari nilai absolut koefisien).
 rking kontribusi dan persentase pengaruh dari masing-masing
 aca.

2.4.6 Evaluasi Residual

Kemudian lakukan visualisasi selisih antara prediksi dan data aktual (*residuals*). Dimana Ideal residual tersebar merata di sekitar nol menandakan model tidak bias.

2.4.7 Pengolahan Data Spasial

Pengolahan data spasial dilakukan untuk mengetahui sebaran anomali curah hujan dan angin di wilayah Brazil selama tahun 2015–2024. Data bulanan dikonversi menjadi data mingguan, kemudian dihitung nilai anomali dengan cara mengurangkan data aktual mingguan terhadap nilai klimatologi mingguan rata-rata selama 10 tahun.

Rumus anomali yang digunakan adalah:

$$\text{Anomali} = \text{Nilai Aktual} - \text{Nilai Klimatologi}$$

Hasil pengolahan divisualisasikan dalam bentuk peta spasial berwarna (biru untuk nilai positif, merah untuk nilai negatif), dilengkapi dengan vektor arah angin serta penanda lokasi kota Salvador sebagai acuan interpretasi.

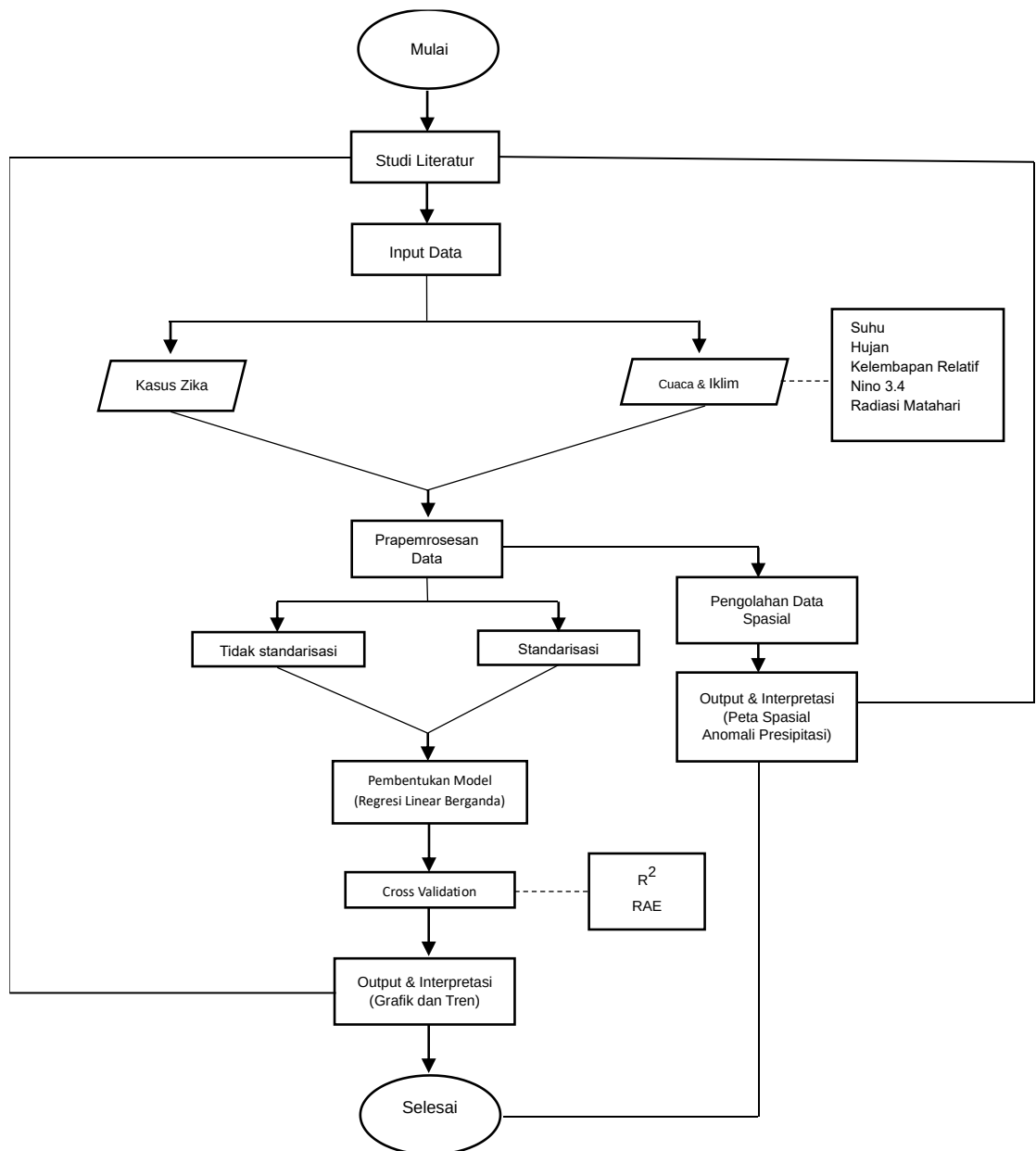
2.4.8 Interpretasi Hasil dan Output Model

Model prediktif yang dikembangkan berhasil menggambarkan hubungan antara jumlah kasus Zika dan faktor iklim/cuaca menggunakan pendekatan EGN (*Epidemiological–Geoclimatic–Numerical*). Secara epidemiologis, model mampu merepresentasikan pola lonjakan dan penurunan kasus Zika yang nyata pada tahun 2015–2024. Secara geoklimatik, ditemukan bahwa variabel lingkungan seperti kelembapan permukaan tanah, suhu, curah hujan, dan NINO 3.4 dengan lag waktu 1–3 minggu memiliki pengaruh signifikan terhadap peningkatan kasus. Secara numerik, model menunjukkan performa yang baik dengan nilai R^2 tinggi dan RAE rendah, menandakan akurasi yang layak digunakan sebagai sistem peringatan dini berbasis iklim. Output dari model ini berupa prediksi jumlah kasus Zika mingguan di masa depan, berdasarkan nilai prediktor lingkungan yang tersedia, yang kemudian dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik tren atau peta risiko wilayah terdampak.

Selain itu, didapatkan hasil berupa peta spasial anomali yang menampilkan sebaran perubahan curah hujan dan angin secara geografis di wilayah Brazil. Peta disajikan dengan skema warna biru–putih–merah untuk menunjukkan anomali negatif hingga positif, serta dilengkapi vektor angin yang menggambarkan arah dan kecepatan angin permukaan. Visualisasi ini membantu dalam mengidentifikasi pola spasial iklim yang menyimpang dari kondisi normal, terutama di sekitar wilayah penting seperti kota



2.5 Bagan Alir Penelitian



Gambar 5. Bagan Alir

