

PREDIKSI CUACA EKSTREM BERBASIS SARIMAX DAN ANALISIS NERACA AIR SEBAGAI DASAR STRATEGI MITIGASI BANJIR SERTA ADAPTASI PERUBAHAN IKLIM DI KABUPATEN SUMBAWA

Romi Aprianto^{1*}, Ieke Wulan Ayu², Syarif Fitriyanto³, M Anugerah Puji Sakti⁴, Edrial⁵

¹³ Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Samawa, Sumbawa Besar, Indonesia

² Fakultas Pertanian, Universitas Samawa, Sumbawa Besar, Indonesia

⁴ Fakultas Hukum, Universitas Samawa, Sumbawa Besar, Indonesia

⁵ Fakultas Ilmu Sosial dan Politik, Universitas Samawa, Sumbawa Besar, Indonesia

Penulis Korespondensi: romiaprianto.sumbawa@gmail.com

Article Info	Abstrak
Article History <i>Received: 19 April 2026</i> <i>Revised: 21 April 2026</i> <i>Published: 30 Juni 2026</i>	Perubahan iklim telah memperbesar risiko banjir musiman dan kekeringan di Kabupaten Sumbawa. Penelitian ini bertujuan mengintegrasikan prediksi curah hujan, analisis neraca air wilayah, dan kajian sosial untuk merumuskan strategi mitigasi–adaptasi berbasis bukti di lima desa rawan banjir Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, yaitu Desa Mapin Rea, Labuhan Burung, Kelurahan Brang Bara, Desa Batu Bangka, dan Desa Empang Bawa. Penelitian dilaksanakan dari bulan April hingga Juli 2025. Populasi penelitian adalah seluruh masyarakat terdampak banjir dan pemangku kepentingan lokal di kelima desa tersebut, dengan sampel sebanyak 150 responden (30 responden per desa) yang dipilih secara purposive dan accidental sampling. Metode yang digunakan adalah pendekatan mixed methods dengan desain Sequential Explanatory: (i) pemodelan SARIMAX dengan variabel eksternal SOI dan SST menggunakan data curah hujan historis 1995–2024 dari BMKG untuk meramalkan curah hujan bulanan; (ii) perhitungan neraca air Thornthwaite-Mather melalui CROPWAT 8.0 serta simulasi skenario iklim (+2°C, +10% hujan) untuk tahun 2024, 2054, dan 2084 menggunakan data iklim dari NOAA, Australian BoM, dan BPDAS NTB; dan (iii) analisis persepsi masyarakat menggunakan kuesioner terstruktur yang diinterpretasi melalui model Miles & Huberman dan disintesis ke dalam kerangka SWOT kuantitatif berbasis penilaian expert judgment. Hasil menunjukkan model SARIMAX (1,0,1)(1,1,1) memiliki akurasi tinggi (MAE 38,45 mm; RMSE 55,23 mm) dan layak diintegrasikan ke sistem peringatan dini daerah. Neraca air di lima desa mencatat surplus singkat Januari–Maret, diikuti defisit delapan bulan sebesar 817,47 mm; simulasi mengindikasikan defisit tetap membesar meskipun curah hujan meningkat akibat lonjakan evapotranspirasi. Survei menunjukkan pola adaptasi masyarakat relatif tinggi namun mitigasi kelembagaan masih lemah di beberapa desa. Sintesis SWOT memposisikan strategi daerah pada kuadran progresif, menekankan pemanfaatan teknologi prediktif dan konservasi surplus air untuk menutup kelemahan infrastruktur dan pengetahuan. Integrasi temuan klimatologis, hidrologis, dan sosial ini memberikan kerangka komprehensif untuk menurunkan frekuensi serta dampak banjir sekaligus mengurangi kerentanan kekeringan di Sumbawa.
Keywords SARIMAX; Neraca Air Wilayah; Perubahan Iklim; Banjir; Sumbawa;	

PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan tantangan global yang berdampak signifikan terhadap kehidupan manusia dan lingkungan. Perubahan ini ditandai oleh pergeseran pola unsur-unsur iklim dalam jangka panjang, melampaui kondisi normal historis, dan dipicu oleh aktivitas manusia secara langsung maupun tidak langsung (Kabir et al., 2023; Adamo et al., 2021; Shivanna, 2022; Chen et al., 2023). Salah satu konsekuensi nyata dari pemanasan global adalah krisis sumber daya air yang disebabkan oleh peningkatan emisi gas rumah kaca akibat aktivitas

industri dan penggunaan bahan bakar fosil (Ficklin et al., 2022; Rosa & Sangiorgio, 2025). Dampaknya mencakup curah hujan ekstrem, percepatan erosi, perubahan pola aliran permukaan, kekeringan, serta peningkatan kejadian banjir dan longsor (Rezvani et al., 2023; Du et al., 2024; Shi et al., 2024).

Banjir menjadi salah satu bencana hidrometeorologi utama yang melanda berbagai wilayah Indonesia, termasuk Kabupaten Sumbawa, yang memiliki tingkat kerawanan bencana sedang berdasarkan IRBI 2024 (BNPB, 2025). Sejak tahun 2004 hingga 2025, wilayah ini mengalami peningkatan signifikan dalam jumlah dan dampak kejadian banjir, dengan distribusi luas di dataran rendah dan pesisir (BPBD Provinsi NTB, 2025). Data historis menunjukkan frekuensi banjir bandang dan banjir tahunan yang terus meningkat, dengan dampak serius terhadap infrastruktur, lahan pertanian, dan kehidupan masyarakat. Fenomena cuaca ekstrem seperti El Niño dan La Niña turut memperburuk kondisi suhu dan curah hujan yang bersifat fluktuatif dan cenderung meningkat (Sun et al., 2019; You et al., 2021; Pagli et al., 2025).

Kabupaten Sumbawa Propinsi Nusa Tenggara Barat, termasuk salah satu daerah rawan bencana di Indonesia dengan kategori tinggi. Indeks Rawan Bencana Indonesia (IRBI) tahun 2024, menunjukkan bahwa Kabupaten Sumbawa secara nasional dengan skor 128,58 (kategori sedang) dan urutan ke tiga di Propinsi Nusa Tenggara Barat dalam hal tingkat kerawanan bencana alam maupun non alam (BNPB, 2025), dengan kejadian cuaca ekstrim merupakan bencana yang tertinggi terjadi di Kabupaten Sumbawa yaitu 429 kejadian untuk cuaca ekstrim. *United Nations International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR) (2019) menjelaskan bahwa peningkatan suhu ekstrim menjadi faktor semakin meningkatnya bencana hidrometeorologi di dunia. Suhu udara yang ekstrim, arah angin yang berubah drastis, kondisi cuaca yang tidak stabil dengan curah hujan yang tidak menentu merupakan dampak perubahan iklim (Kabir et al., 2023; Bolan et al., 2023; Yuan et al., 2024). Peningkatan cuaca ekstrim mempengaruhi kejadian banjir terhadap intensitas, frekuensi, durasi dan dampak. Selama tahun 2019 sampai dengan awal tahun 2021, terdapat peningkatan jumlah kejadian bencana banjir dari 2 kali kejadian pada tahun 2019 menjadi 4 kali kejadian, dengan peningkatan 6 kali kejadian terhadap banjir bandang pada awal tahun 2021 (BPBD Provinsi NTB, 2025), dan kejadian banjir hingga banjir bandang meningkat dalam kurun 2021-2025. Teknologi prediksi cuaca kini memiliki peran vital dalam mitigasi bencana. Model seperti SARIMAX (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables*) terbukti efektif dalam memprediksi pola curah hujan musiman di wilayah tropis yang memiliki fluktuasi tinggi (Raj et al., 2024; Elshewey et al., 2023). Dibandingkan metode konvensional, pendekatan ini mampu memanfaatkan faktor eksogen seperti suhu dan kelembapan, menghasilkan prediksi yang lebih akurat untuk peringatan dini banjir. Penerapan teknologi berbasis AI semakin memperkuat akurasi dan respons prediktif terhadap perubahan cuaca dinamis (Vaidya et al., 2021). Selain prediksi iklim, kajian neraca air wilayah memberikan perspektif penting terhadap ketersediaan dan ketahanan sumber daya air, terutama dalam menghadapi skenario perubahan iklim. Simulasi perubahan suhu dan curah hujan menunjukkan penurunan periode surplus air dan peningkatan

defisit, yang berdampak pada sektor pertanian dan potensi kekeringan (Ayu et al., 2018; Kirono et al., 2016; Guo et al., 2014). Integrasi antara prediksi curah hujan dan analisis neraca air menjadi fondasi perencanaan mitigasi risiko banjir yang berkelanjutan. Dalam kerangka kebijakan adaptif, sinergi antara mitigasi bencana dan adaptasi perubahan iklim penting untuk meningkatkan ketahanan wilayah terhadap ancaman iklim. Pendekatan ini mendorong pembangunan berkelanjutan melalui peningkatan kesiapsiagaan masyarakat, melibatkan pemangku kepentingan lintas sektor, dan penyusunan strategi berbasis data (Pabelando, 2024).

Penelitian ini dilakukan untuk menjawab kebutuhan integrasi pendekatan teknologi prediktif (SARIMAX), kajian hidrologis (Neraca Air Wilayah), dan analisis sosial ekonomi dalam merumuskan strategi mitigasi dan adaptasi di Kabupaten Sumbawa. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap kebijakan berbasis bukti yang memperkuat ketahanan daerah terhadap risiko bencana di era perubahan iklim.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Mixed Methods dengan desain Sequential Explanatory. Dalam desain ini, pengumpulan dan analisis data kuantitatif dilakukan terlebih dahulu sebagai prioritas utama, mencakup pemodelan prediksi curah hujan (SARIMAX), analisis neraca air wilayah (Thornthwaite-Mather/CROPWAT 8.0), dan analisis statistik deskriptif data kuesioner persepsi masyarakat. Tahap kedua adalah pengumpulan dan analisis data kualitatif yang berfungsi untuk menjelaskan, memperdalam, dan menginterpretasi hasil kuantitatif yang diperoleh pada tahap pertama, menggunakan model analisis interaktif Miles & Huberman (reduksi data, penyajian data, penarikan kesimpulan). Tahap ketiga adalah sintesis temuan kuantitatif dan kualitatif ke dalam kerangka SWOT kuantitatif untuk merumuskan strategi mitigasi–adaptasi yang komprehensif. Desain Sequential Explanatory dipilih karena kompleksitas persoalan perubahan iklim dan mitigasi banjir membutuhkan data numerik yang kuat terlebih dahulu sebagai landasan, sebelum diinterpretasi secara mendalam melalui perspektif sosial-ekologis masyarakat setempat. Pendekatan ini mengintegrasikan tiga komponen utama analisis: (1) prediksi hidrometeorologi berbasis machine learning (SARIMAX), (2) simulasi hidrologis neraca air wilayah, serta (3) eksplorasi sosial melalui analisis persepsi masyarakat terdampak.

Penelitian dilaksanakan di lima desa/kelurahan di Kabupaten Sumbawa yang dipilih menggunakan teknik purposive sampling berbasis multi-kriteria. Kriteria pemilihan lokasi mencakup: (1) tingkat kerentanan banjir, dipilih berdasarkan data kejadian banjir historis BPBD Provinsi NTB (2019–2025) dan peta Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) 2024 yang menunjukkan Kabupaten Sumbawa pada skor 128,58 (kategori sedang, urutan ke-3 di NTB); (2) keterwakilan tipologi wilayah, mencakup desa hulu (Mapin Rea/Alas Barat), tengah/perkotaan (Kelurahan Brang Bara/Sumbawa), dataran rendah (Batu Bangka/Moyo Hilir), dan pesisir (Labuhan Burung/Buer dan Empang Bawa/Empang), sehingga gradien hidrologis dari hulu ke hilir terwakili secara komprehensif; dan (3) aksesibilitas dan kesiapan masyarakat untuk

berpartisipasi dalam pengambilan data primer. Kelima lokasi ini adalah: Desa Mapin Rea (Kecamatan Alas Barat), Desa Labuhan Burung (Kecamatan Buer), Kelurahan Brang Bara (Kecamatan Sumbawa), Desa Batu Bangka (Kecamatan Moyo Hilir), dan Desa Empang Bawa (Kecamatan Empang). Kegiatan lapangan berlangsung dari April hingga Juli 2025. Data yang digunakan terdiri dari:

1. **Data primer**, diperoleh melalui wawancara mendalam, observasi lapangan, dan kuisioner kepada masyarakat terdampak banjir serta pemangku kepentingan lokal.
2. **Data sekunder**, meliputi: data curah hujan dan indeks SOI (1995–2024) dari BMKG, peta penggunaan lahan, data jenis tanah dan iklim dari instansi seperti NOAA, Australian BoM, BPDAS NTB, dan BPS.

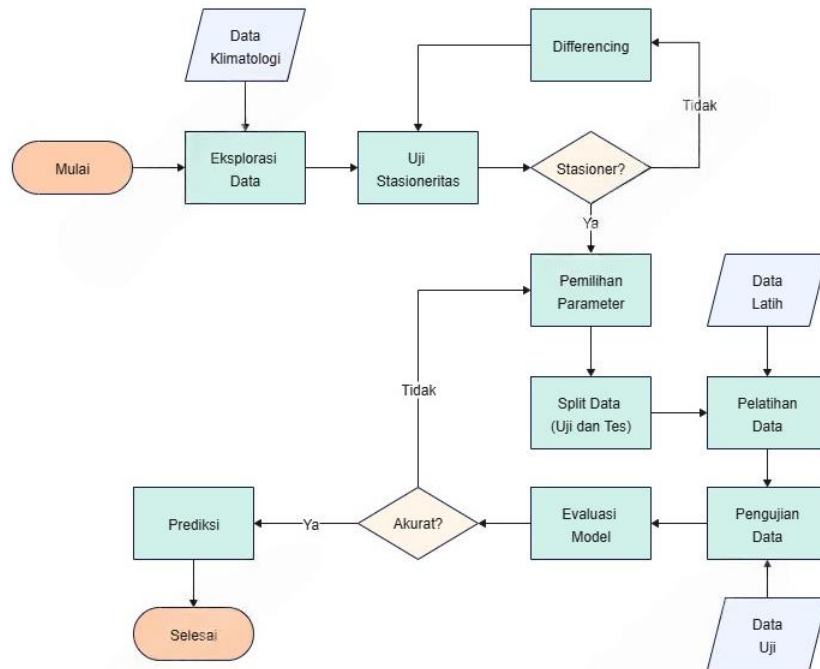
Teknik pengumpulan data meliputi observasi langsung terhadap kondisi sosial dan fisik, wawancara mendalam dengan masyarakat dan aparat desa, serta kuisioner terstruktur untuk mengukur persepsi terhadap dampak dan respons terhadap perubahan iklim. Studi pustaka digunakan untuk memperkuat landasan konseptual. Penentuan responden dilakukan secara purposive dan accidental sampling. Total keseluruhan sampel dalam penelitian ini berjumlah 150 responden yang tersebar merata di lima desa lokasi penelitian (30 responden per desa). Kriteria responden adalah individu terdampak banjir, bersedia diwawancarai, dan mampu memberikan informasi substantif. Informan kunci dipilih berdasarkan pengalaman langsung terhadap bencana dan keterlibatan dalam mitigasi lokal.

Metode Analisis Data

1. Prediksi Cuaca Ekstrem (Model SARIMAX)

Model SARIMAX (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables*) dipilih karena kemampuannya menangkap pola musiman (*seasonality*) dan komponen tren data curah hujan, sekaligus mengakomodasi variabel eksogen yang secara teoritis mempengaruhi curah hujan di Indonesia bagian timur. Dua variabel eksogen yang digunakan adalah: (1) SOI (*Southern Oscillation Index*), indeks yang mencerminkan intensitas fenomena El Niño/La Niña, dipilih karena bukti empiris korelasinya dengan curah hujan di NTB (Kirono et al., 2016); dan (2) SST (*Sea Surface Temperature*) kawasan Laut Banda dan Samudra Hindia, dipilih karena suhu permukaan laut merupakan driver utama penguapan dan pembentukan awan hujan di wilayah kepulauan Indonesia. Data curah hujan historis bulanan 1995–2024 (360 data points) diperoleh dari stasiun BMKG Sumbawa, sementara data SOI dan SST diperoleh dari NOAA dan Australian Bureau of Meteorology (BoM). Data 1995–2023 digunakan sebagai data latih (*training set*) dan data 2024 sebagai data uji (*testing set*) untuk validasi akurasi model. Pemilihan parameter model terbaik SARIMAX (p,d,q)(P,D,Q)[s] dilakukan secara sistematis menggunakan kriteria AIC (*Akaike Information Criterion*) dan BIC (*Bayesian Information Criterion*) dengan prinsip parsimoni, model dengan nilai AIC dan BIC terkecil dipilih sebagai model optimal. Akurasi model

dievaluasi menggunakan MAE (*Mean Absolute Error*) dan RMSE (*Root Mean Squared Error*) pada data uji 2024.



Gambar 1. Diagram alir Metode SARIMAX

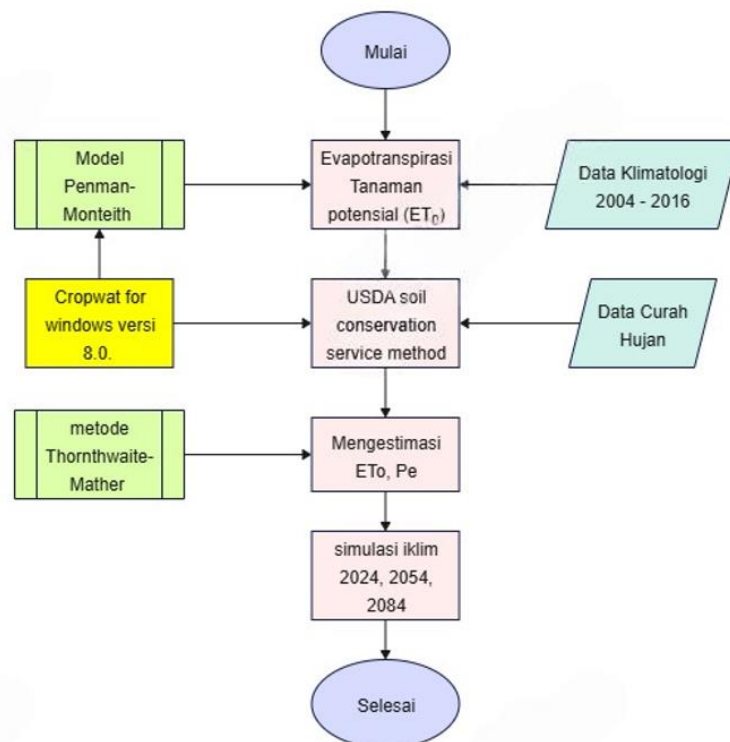
Analisis prediktif dilakukan menggunakan model SARIMAX untuk meramalkan curah hujan bulanan. Variabel utama adalah curah hujan historis dan eksogen SOI dan SST. Langkah analisis ditunjukkan pada Gambar 1. Tahapannya meliputi eksplorasi pola musiman dan fluktuasi data, uji stasioneritas dan differencing, penentuan parameter melalui kurva ACF/PACF, pembagian data menjadi data latih dan data uji, pelatihan model pada data 1995–2023; pengujian pada 2024, evaluasi akurasi menggunakan MAE dan RMSE, peramalan curah hujan 2025.

2. Analisis Neraca Air dan Simulasi Perubahan Iklim

Metode Thornthwaite-Mather dipilih untuk perhitungan neraca air karena kesesuaiannya dengan kondisi data yang tersedia di wilayah tropis semi-arid seperti Sumbawa, di mana data iklim lengkap (suhu, curah hujan, radiasi surya) tidak selalu tersedia di semua stasiun. Metode ini hanya memerlukan data suhu dan curah hujan bulanan, yang lebih mudah diakses dari BMKG setempat dibandingkan metode neraca air yang lebih kompleks. Evapotranspirasi potensial (ET_0) dihitung menggunakan metode Penman-Monteith (FAO-56) yang merupakan standar internasional FAO untuk estimasi kebutuhan air tanaman (ET_c). Perangkat lunak CROPWAT 8.0 digunakan untuk otomatisasi perhitungan ET_0 dan simulasi neraca air karena memiliki antarmuka yang terstandarisasi

dan telah divalidasi FAO. Skenario simulasi perubahan iklim mengacu pada proyeksi IPCC AR6: peningkatan suhu +2°C (skenario moderat RCP 4.5) dan peningkatan curah hujan +10% pada tahun 2054 dan 2084, dengan asumsi peningkatan evapotranspirasi 10% (2054) dan 20% (2084) seiring kenaikan suhu.

Neraca air dihitung menggunakan metode Thornthwaite-Mather dan software CROPWAT 8.0. Data ET_0 diperoleh dengan metode Penman-Monteith (FAO 56). Simulasi skenario iklim dilakukan untuk tahun 2024, 2054, dan 2084 dengan variasi suhu dan curah hujan. Estimasi lengas tanah dianalisis terhadap evapotranspirasi aktual dan kebutuhan air tanaman (ET_c). Tahapannya ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir neraca air

3. Analisis Persepsi Masyarakat dan Strategi Mitigasi-Adaptasi

Data persepsi masyarakat dikumpulkan melalui dua instrumen yang saling melengkapi: (1) kuesioner terstruktur berskala Likert 1–5 yang mengukur empat dimensi persepsi (kesiapsiagaan, dampak banjir, strategi adaptasi, dan kapasitas mitigasi) yang diberikan kepada 150 responden (30 per desa); dan (2) wawancara mendalam semi-terstruktur (in-depth interview) kepada 15 informan kunci yang dipilih berdasarkan keterlibatan langsung dalam pengelolaan bencana di desa masing-masing (aparatur desa, tokoh masyarakat, dan anggota kelompok tani/nelayan terdampak banjir).

Data kuantitatif kuesioner dianalisis secara statistik deskriptif (rata-rata, persentase, kategori skor). Data kualitatif wawancara dianalisis menggunakan model interaktif Miles

& Huberman melalui tiga tahap: (a) reduksi data — pemilihan dan penyederhanaan data mentah dari transkrip wawancara; (b) penyajian data — penyusunan matriks tematik per desa berdasarkan empat dimensi persepsi; dan (c) penarikan kesimpulan/verifikasi — pemaknaan pola temuan secara keseluruhan. Analisis tidak menggunakan open coding atau axial coding ala Grounded Theory, melainkan menggunakan analisis tematik deskriptif yang sesuai dengan tujuan eksplorasi persepsi, bukan teori baru.

Selanjutnya, analisis SWOT kuantitatif dilakukan untuk merumuskan strategi adaptif. SWOT dalam penelitian ini berbasis gabungan dua sumber: (1) penilaian expert judgment dari 5 pemangku kepentingan (perwakilan BPBD, Dinas Pertanian, Dinas PU, akademisi, dan tokoh masyarakat) yang memberikan bobot dan skor pada setiap faktor internal dan eksternal; dan (2) triangulasi dengan temuan survei masyarakat dan data kuantitatif klimatologis-hidrologis. Posisi strategi ditentukan berdasarkan selisih skor faktor internal (S–W) dan eksternal (O–T) yang diplot pada diagram kuadran SWOT.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

1. Prediksi Curah Hujan dengan SARIMAX

Evaluasi data awal (tidak ada missing value, pola musiman konsisten) menegaskan bahwa data yang digunakan dalam model SARIMAX memenuhi kriteria yang dibutuhkan untuk menghasilkan prediksi yang efektif khususnya untuk mitigasi risiko banjir di Kabupaten Sumbawa. Hasil Uji Augmented Dickey-Fuller (ADF) pada variabel Curah Hujan (IRR) memberikan hasil ADF Statistic: -3,532094 dan p-value: 0,0072 < 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa data curah hujan (IRR) bersifat stasioner pada tingkat signifikansi 5%, sehingga data ini tidak memerlukan proses differencing. Berdasarkan evaluasi model menggunakan AIC (Akaike Information Criterion) dan BIC (Bayesian Information Criterion), parameter yang dipilih adalah **SARIMAX (1,0,1) (1,1,1)** [12] dengan nilai **AIC: 3833.89** dan **BIC: 3860.86**. Model ini merupakan model terbaik dibandingkan dengan kandidat lainnya karena nilai AIC dan BIC yang lebih rendah menunjukkan performa model yang lebih baik dan efisien dalam menjelaskan data. Hasil evaluasi metrik model SARIMAX pada data latih dan data uji diperoleh error MAE **38,45** dan RMSE **55,23**, artinya model SARIMAX memiliki akurasi yang cukup baik untuk memprediksi curah hujan bulanan. Hasil prediksi curah hujan bulanan dengan metode SARIMAX ditunjukkan pada tabel 1.

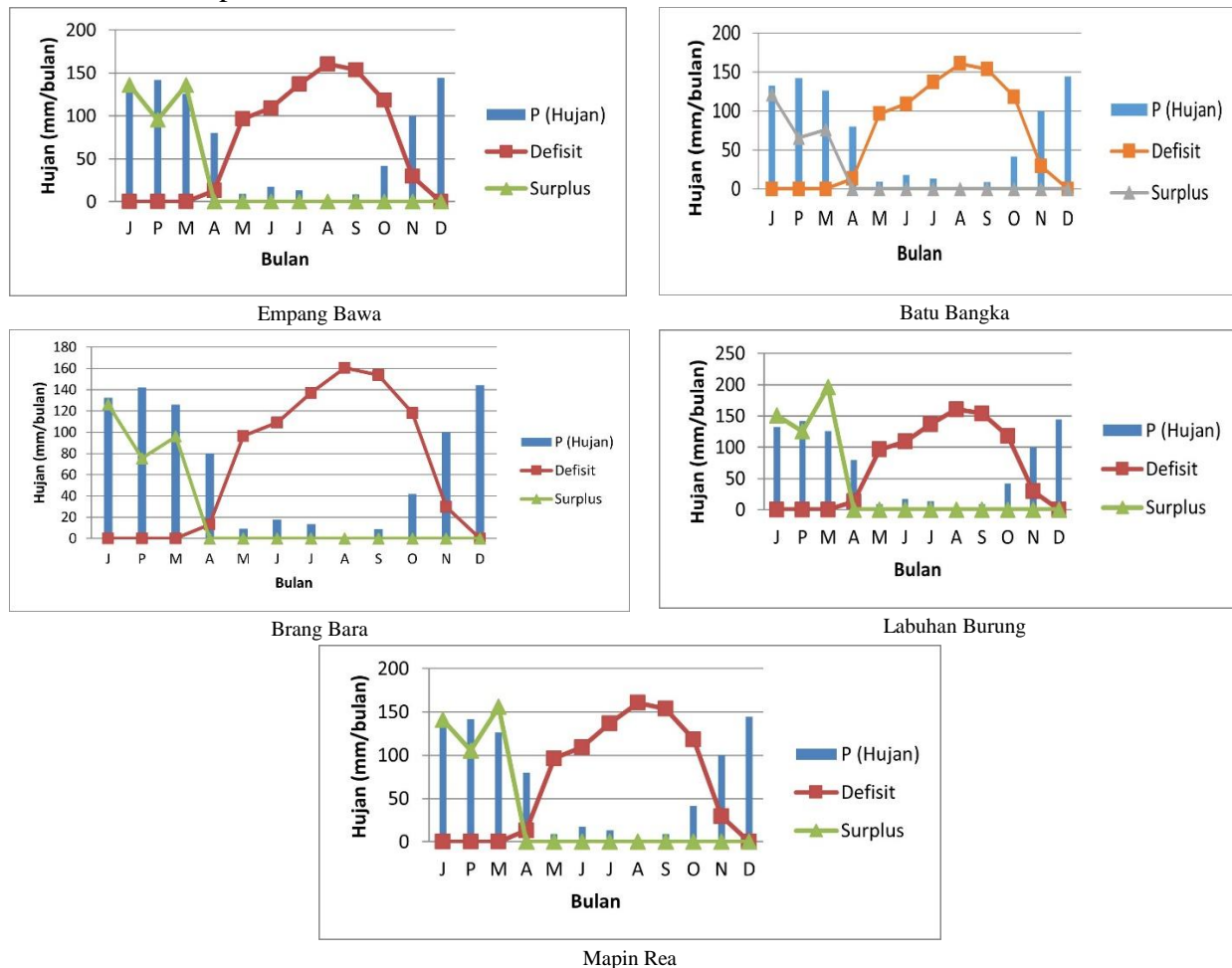
Tabel 1. Hasil prediksinya curah hujan dengan SARIMAX

Tanggal	Prediksi Curah Hujan (mm)	Batas Bawah Interval (mm)	Batas Atas Interval (mm)
Jan-25	248,92	138,5	359,33
Feb-25	251,09	140,58	361,59
Mar-25	186,04	75,45	296,64
Apr-25	120,52	9,85	231,19
May-25	55,03	0	165,77
Jun-25	31,61	0	142,42
Jul-25	24,54	0	135,41

Aug-25	11,33	0	122,26
Sep-25	25,1	0	136,07
Oct-25	49,6	0	160,62
Nov-25	141,68	30,62	252,74
Dec-25	232,32	121,22	343,43

2. Neraca Air Wilayah

Analisis neraca air wilayah dilakukan menggunakan metode Thornthwaite-Mather dan simulasi perangkat lunak CROPWAT 8.0, dengan data curah hujan dan evapotranspirasi selama tahun 3 tahun terakhir. Gambar 3 menunjukkan hasil perhitungan neraca air wilayah di 5 desa lokasi penelitian.



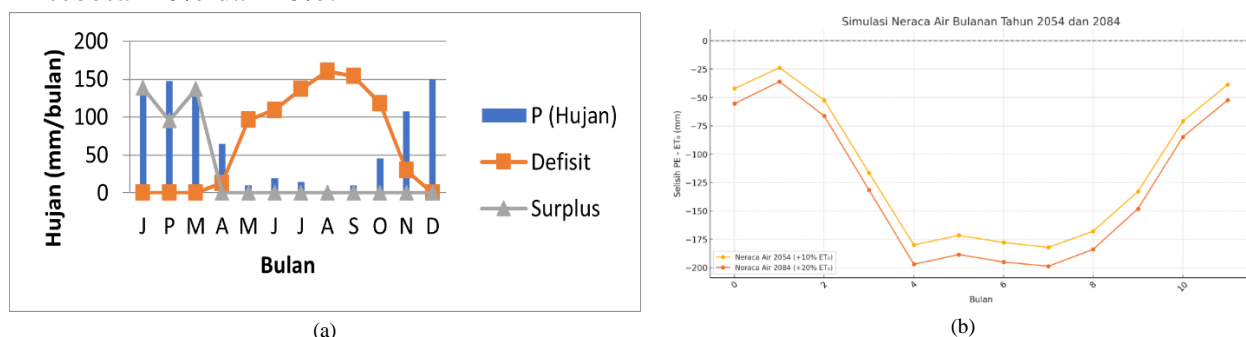
Gambar 3. Perhitungan neraca air wilayah di 5 desa lokasi penelitian

Tinjauan neraca air wilayah di lima desa/kelurahan menunjukkan pola umum yang konsisten, yaitu defisit air berlangsung selama delapan bulan (April–November) dengan jumlah yang identik di seluruh lokasi, yaitu 817,47 mm. Hal ini mencerminkan dominasi musim kemarau panjang dan kebutuhan evapotranspirasi yang tinggi secara merata di seluruh wilayah studi. Namun demikian, terdapat perbedaan mencolok dalam besarnya surplus air selama tiga bulan musim hujan (Januari–Maret), yang mengindikasikan perbedaan kapasitas wilayah dalam

menangkap dan menyimpan air hujan. Desa Batu Bangka mencatat surplus terendah (262,5 mm), menunjukkan bahwa sebagian besar curah hujan awal tahun langsung menjadi limpasan dan tidak tersimpan, sejalan dengan karakter tanah berpasir dan posisi lintasan banjir kiriman. Kelurahan Brang Bara dan Desa Empang Bawa mencatat surplus menengah, masing-masing sebesar 297,5 mm dan 367,5 mm, namun tetap menghadapi risiko banjir lokal karena keterbatasan ruang terbuka dan infrastruktur drainase. Di sisi lain, Desa Labuhan Burung mencatat surplus tertinggi (472,4 mm), namun berada di wilayah pesisir yang rawan genangan dan pasang tinggi, sehingga surplus ini berpotensi menjadi ancaman banjir pesisir. Sementara itu, Desa Mapin Rea yang terletak di wilayah hulu mencatat surplus tinggi (402,5 mm), namun tantangan utamanya adalah limpasan cepat karena kemiringan lahan dan minimnya retensi air, yang dapat menyebabkan banjir di hilir. Kelima desa mengalami ketimpangan neraca air musiman yang signifikan: kelebihan air dalam waktu singkat (3 bulan) berpotensi menjadi bencana jika tidak dikelola, dan kekurangan air yang panjang (8 bulan) mengganggu keberlanjutan pertanian dan pasokan air domestik. Surplus air yang terlihat dalam tabel bukan mencerminkan kelebihan yang aman, tetapi menjadi indikator kerentanan terhadap banjir dan ketidakefisienan sistem konservasi air.

3. Simulasi Perubahan Iklim

Simulasi perubahan iklim dilakukan untuk menilai respons neraca air wilayah terhadap dua skenario utama: peningkatan suhu udara (T) sebesar 2°C dan peningkatan curah hujan sebesar 10%. Simulasi ini diaplikasikan untuk tahun 2024 (skenario jangka pendek) serta diperluas ke tahun 2054 dan 2084 (skenario jangka panjang) dengan asumsi peningkatan evapotranspirasi sebesar 10% dan 20%.



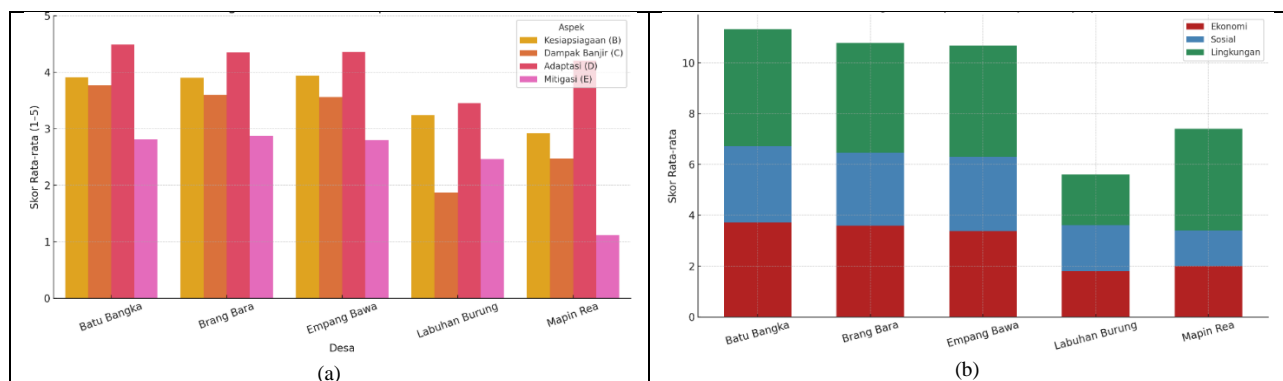
Gambar 4. Simulasi perubahan iklim di Kabupaten Sumbawa

Gambar 4(a) menunjukkan kenaikan puncak hujan di awal tahun hanya sedikit mengangkat garis surplus (batang hijau), sedangkan garis defisit (oranye) yang mendominasi April–November nyaris tak terpengaruh. Perpindahan puncak surplus tetap berada pada triwulan pertama, sementara bulan transisi “fluktuatif” di Mei dan Oktober menipis. Pola ini menegaskan bahwa peningkatan suhu tidak saja menggeser, tetapi juga memendekkan masa surplus—artinya, ketersediaan kelembapan tanah semakin sempit di kedua masa transisi, memperbesar risiko kekeringan segera setelah musim hujan mereda. Gambar 4(b)

menunjukkan skenario simulasi perubahan iklim di 2054 dan 2084 menunjukkan bahwa meskipun curah hujan dapat meningkat secara nominal, peningkatan suhu dan evapotranspirasi akan tetap memperbesar defisit neraca air wilayah. Dengan kata lain, risiko kekeringan jangka panjang tetap tinggi bahkan di tengah tren hujan yang meningkat. Dalam jangka pendek (2024), risiko banjir musiman juga tetap muncul akibat lonjakan surplus singkat di awal tahun. Sementara dalam jangka panjang (2054–2084), ancaman kekeringan sistemik lebih mendominasi.

4. Persepsi masyarakat terhadap bencana banjir

Analisis deskriptif dilakukan untuk mengetahui persepsi masyarakat dalam 4 aspek, yaitu kesiapsiagaan, dampak banjir, adaptasi, dan mitigasi. Gambar 5 adalah hasil analisis deskriptif persepsi masyarakat.



Gambar 5. Hasil analisis deskriptif persepsi masyarakat terhadap banjir

Gambar 5(a) menunjukkan bahwa kesiapsiagaan masyarakat terhadap banjir relatif tinggi di Desa Empang Bawa (3,94), Batu Bangka (3,91), dan Brang Bara (3,90), mencerminkan pemahaman yang baik terhadap penyebab banjir, tanda bahaya, dan rute evakuasi. Sebaliknya, kesiapsiagaan masih rendah di Mapin Rea (2,92) dan Labuhan Burung (3,24), menandakan perlunya edukasi risiko dan latihan darurat yang lebih intensif. Persepsi terhadap dampak banjir tertinggi ditemukan di Batu Bangka (3,77) dan Brang Bara (3,60), sedangkan Labuhan Burung mencatat skor terendah (1,87), yang dapat mencerminkan persepsi risiko yang rendah atau ketidaktahuan terhadap potensi ancaman banjir. Dalam hal strategi adaptasi, seluruh desa mencatat skor tinggi ($\geq 3,45$), dengan Batu Bangka kembali unggul (4,49), menandakan kekuatan komunitas dalam menghadapi perubahan iklim melalui partisipasi aktif dan penggunaan informasi cuaca. Namun, aspek mitigasi masih menjadi kelemahan utama; tidak ada desa yang mencatat skor di atas 3, bahkan Mapin Rea hanya memperoleh skor 1,12, mencerminkan minimnya mekanisme kelembagaan seperti dana darurat atau program pascabencana. Brang Bara mencatat nilai tertinggi untuk mitigasi (2,87), tetapi masih belum mencerminkan sistem yang mapan.

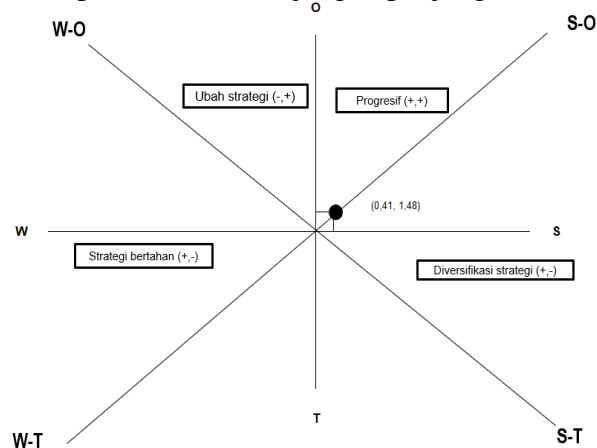
Gambar 5(b) menunjukkan bahwa secara ekonomi, Batu Bangka (3,71) dan Brang Bara (3,59) merasakan kerugian paling besar akibat rusaknya aset produktif, hilangnya pendapatan, dan mahal biaya pemulihan, kemungkinan karena tingginya aktivitas ekonomi rumah tangga

yang rentan terhadap banjir. Sebaliknya, Labuhan Burung (1,80) dan Mapin Rea (2,00) menunjukkan persepsi rendah terhadap dampak ekonomi, baik karena minimnya eksposur ekonomi maupun kurangnya kesadaran akan kerugian finansial yang terjadi. Pada aspek sosial, seluruh desa mencatat skor di bawah 3, menunjukkan bahwa gangguan sosial akibat banjir belum dianggap signifikan. Namun, Batu Bangka (3,01) dan Empang Bawa (2,94) menunjukkan gejala adanya tekanan sosial ringan seperti stres dan terganggunya aktivitas masyarakat, sedangkan Mapin Rea (1,40) menunjukkan ketahanan sosial atau kurangnya perhatian pada aspek ini. Sementara itu, dampak lingkungan dinilai paling tinggi di antara tiga dimensi. Batu Bangka (4,60) dan Empang Bawa (4,37) menunjukkan kesadaran tinggi terhadap pencemaran, genangan, dan kerusakan ekosistem akibat banjir. Bahkan Mapin Rea, yang mencatat skor ekonomi dan sosial rendah, menunjukkan skor tinggi (4,00) dalam dimensi lingkungan, menandakan bahwa kerusakan alam akibat banjir sangat dirasakan. Hanya Labuhan Burung yang mencatat persepsi dampak lingkungan rendah (2,00), memperkuat indikasi keterbatasan persepsi masyarakat terhadap ancaman ekologis. Berdasarkan analisis deskripsi di atas, dilakukan analisis Miles dan Huberman, diperoleh hasil sebagai berikut (Tabel 2):

Tabel 2. Kesimpulan analisis Miles dan Huberman

Kategori Tematik	Desa dengan Pola Ekstrem
Adaptasi Tinggi, Mitigasi Lemah	Mapin Rea, Batu Bangka, Empang Bawa
Dampak Sosial & Ekonomi Rendah	Labuhan Burung, Mapin Rea
Keseimbangan Respons	Brang Bara
Mitigasi Paling Lemah	Mapin Rea
Lingkungan Sangat Terdampak	Batu Bangka, Empang Bawa

Analisis SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) juga dilakukan untuk merumuskan strategi adaptasi dan mitigasi berbasis kekuatan internal dan tantangan eksternal yang dihadapi masyarakat tiap desa. Hasil analisis SWOT menunjukkan bahwa posisi strategi mitigasi bencana dan adaptasi iklim Kabupaten Sumbawa (Gambar 6) berada di kuadran optimal yakni progresif, artinya kuat secara internal (kapasitas adaptif masyarakat tinggi) dan banyak peluang eksternal (dukungan pemerintah, teknologi prediksi, dan CSR). Oleh karena itu, pendekatan progresif berbasis komunitas dan teknologi menjadi pilihan terbaik untuk menghadapi risiko banjir dan perubahan iklim jangka panjang.



Gambar 6. Posisi strategi mitigasi bencana dan adaptasi iklim Sumbawa

Pembahasan

Hasil penelitian ini menggambarkan tantangan multidimensi dalam mitigasi banjir dan adaptasi iklim di Sumbawa. Pertama, model prediksi cuaca berbasis SARIMAX terbukti efektif dalam memproyeksikan pola curah hujan bulanan yang berpotensi memicu banjir. Model ini berhasil menangkap fluktuasi musiman curah hujan dengan akurasi yang cukup baik (Mean Absolute Error ~38,5 mm dan Root Mean Squared Error ~55,2 mm pada data uji 2024). Temuan ini menunjukkan keunggulan SARIMAX dalam memprediksi variabilitas hujan dengan memasukkan variabel iklim eksternal. Kemampuan ini sangat berguna untuk mitigasi banjir di Sumbawa, di mana anomali iklim seperti La Niña kerap memicu hujan di atas normal. Prediksi SARIMAX tahun 2025 yang dihasilkan penelitian ini memberikan gambaran periode-periode curah hujan tinggi yang patut diwaspadai, sehingga dapat diintegrasikan ke dalam sistem peringatan dini daerah. Hal ini sejalan dengan pendapat Vaidya et al. (2021) bahwa prediksi cuaca yang lebih akurat memungkinkan tindakan antisipatif lebih awal, mengurangi potensi kerugian akibat bencana. BPBD setempat diharapkan memanfaatkan output model ini untuk mengeluarkan peringatan dini dan menyusun rencana siaga yang proaktif.

Dinamika neraca air wilayah di lima desa sampel mengungkap ketidakseimbangan air yang mencolok antara musim hujan dan kemarau. Pola umum yang teridentifikasi adalah surplus air pada triwulan pertama (sekitar Januari–Maret) dan defisit air panjang sepanjang sisa tahun. Pola neraca air kelima desa ini mempertegas masalah klasik iklim monsun di NTB: curah hujan terfokus di musim penghujan singkat, diikuti kekeringan panjang. Fenomena ini sejalan dengan temuan Ayu et al. (2018) dan Kirono et al. (2016) bahwa musim hujan lebih pendek dapat mengurangi ketersediaan air dan meningkatkan risiko kekeringan pada musim kemarau. Di sisi lain, saat musim hujan singkat tiba, intensitas tinggi menimbulkan surplus air mendadak yang memicu banjir jika infrastruktur tampungan tak memadai. Dampak perubahan iklim diproyeksikan akan memperparah ketimpangan ini, peningkatan suhu global cenderung meningkatkan evapotranspirasi dan menggeser pola hujan, sehingga periode defisit makin panjang dan surplus makin intens namun singkat. Implikasinya, tanpa intervensi, Sumbawa akan menghadapi *water imbalance* yang kian tajam: ancaman banjir saat musim basah dan krisis air bersih saat musim kering secara bergantian.

Dari aspek **persepsi masyarakat dan respons**, penelitian ini menemukan adanya ketimpangan tingkat pemahaman dan kesiapsiagaan antarlokasi. Secara umum, masyarakat Sumbawa menyadari banjir sebagai ancaman, namun tingkat pemahaman detail dan aksi antisipatif bervariasi. Beberapa indikator survei menunjukkan hal positif: di salah satu wilayah, skor pengetahuan menghadapi banjir mencapai 3,90 (dari 5) dan skor adaptasi 4,35, yang berarti mayoritas responden di sana sudah paham langkah menghadapi banjir (mengenali tanda bahaya, jalur evakuasi) dan telah melakukan tindakan penyesuaian tertentu terhadap iklim. Akan tetapi, di wilayah lain ditemukan persepsi dampak banjir yang relatif rendah – responden menilai kerugian ekonomi dan sosial akibat banjir “tidak seberapa”. Hal ini bisa ditafsirkan dua arah: mungkin karena faktanya kerusakan yang dialami mereka memang minim, atau bisa jadi karena

masyarakat belum menyadari secara penuh dampak jangka panjang banjir terhadap ekonomi dan sosial. Gejala underestimasi risiko ini mengindikasikan perlunya edukasi lebih lanjut, agar masyarakat menginternalisasi bahwa banjir dapat membawa kerugian tersembunyi (gagal panen, penyakit, kerusakan infrastruktur lokal) meskipun tidak selalu terlihat langsung. Oleh sebab itu, upaya peningkatan kapasitas harus memperhatikan ketimpangan ini. Penguatan pendidikan kebencanaan, melibatkan tokoh lokal, dan peningkatan akses informasi di desa-desa rawan perlu diutamakan agar kesenjangan persepsi dan respons antarkomunitas tidak semakin lebar.

Berdasarkan temuan klimatologis, hidrologis, dan sosial-budaya di atas, penelitian ini menyusun **strategi mitigasi banjir dan adaptasi iklim berbasis analisis SWOT** yang terintegrasi. Analisis SWOT mengidentifikasi faktor internal (kekuatan dan kelemahan) serta eksternal (peluang dan ancaman) yang memengaruhi upaya pengurangan risiko banjir Sumbawa. Beberapa kekuatan internal yang dapat dijadikan modal misalnya: adanya modal sosial dan kearifan lokal di komunitas (gotong royong, pengalaman tradisional mengelola air), serta dukungan pemerintah daerah yang mulai bergerak dalam pengurangan risiko bencana. Kelemahannya antara lain: infrastruktur pengendali banjir masih terbatas, kapasitas data dan teknologi peringatan dini lokal minim, serta kesenjangan pengetahuan masyarakat. Dari sisi eksternal, peluang yang ada mencakup perkembangan teknologi prediksi (AI, satelit), dukungan program pemerintah pusat dan donor untuk adaptasi iklim, serta momentum kebijakan (misal pengarusutamaan Pengurangan Risiko Bencana dalam RPJMD). Sementara ancaman eksternal terutama datang dari perubahan iklim (curah hujan kian ekstrem, kenaikan muka air laut), degradasi lingkungan (deforestasi hulu, alih lahan di sempadan sungai/pesisir), dan pertumbuhan penduduk yang meningkatkan ekspansi permukiman ke area rentan. Memadukan semua faktor ini, strategi dirumuskan dengan pendekatan *agresif* dan *komprehensif*: memanfaatkan kekuatan dan peluang semaksimal mungkin sambil membenahi kelemahan untuk menghadapi ancaman.

Strategi utama yang dihasilkan antara lain: (1) Penguatan sistem peringatan dini dan data cuaca. Pemerintah daerah perlu mengintegrasikan model SARIMAX ke dalam sistem peringatan dini banjir. Misalnya, dashboard prediksi curah hujan bulanan dengan variabel iklim (SOI, SST) dapat dibuat untuk BPBD, sehingga sinyal anomali cuaca bisa terdeteksi lebih dini. Peringatan dini berbasis sains ini kemudian disebarluaskan secara cepat ke masyarakat (melalui SMS blast, radio komunitas, dan media sosial desa). Upaya ini menjawab kelemahan saat ini berupa keterlambatan info cuaca ekstrem, dan memanfaatkan peluang teknologi yang tersedia. Pendekatan serupa telah direkomendasikan UNISDR (2019) dan terbukti efektif menekan dampak bencana bila diiringi respons cepat (Raj et al., 2024). (2) Pengelolaan neraca air berbasis musiman. Mengatasi ketimpangan surplus-defisit air membutuhkan strategi tata air terpadu. Pada musim hujan, surplus air mesti ditampung agar dapat dimanfaatkan di musim kering. Langkah konkret meliputi pembangunan infrastruktur konservasi air seperti embung, waduk skala kecil, kanal banjir, serta sumur resapan di tiap desa. Sebagai contoh, limpasan besar di Mapin Rea dapat direduksi dengan kolam penahan di hulu sehingga tidak langsung menerjang hilir, dan airnya bisa disimpan untuk irigasi musim kering. Demikian pula, drainase perkotaan Brang Bara

perlu dilengkapi taman resapan dan kolam retensi untuk menahan genangan sementara. Pendekatan *harvest and storage* ini selain mengurangi risiko banjir saat puncak hujan, juga meningkatkan cadangan air tawar saat musim kemarau. (3) Adaptasi infrastruktur fisik. Investasi pada infrastruktur tahan banjir perlu diprioritaskan. Misalnya, pembangunan tanggul atau penguatan bantaran sungai di daerah rawan (Empang Bawa, Labuhan Burung) untuk mencegah luapan sungai dan banjir rob. Peninggian jalan atau jembatan vital di titik banjir bandang juga diperlukan agar akses tidak terputus saat bencana (sesuai data BPBD Sumbawa mengenai jembatan putus di Labuhan Badas 2022). Di kawasan perkotaan seperti Brang Bara, perbaikan sistem drainase (pelebaran selokan, pemasangan pompa jika perlu) dan penerapan *green infrastructure* akan mengurangi genangan cepat. Selain itu, standar bangunan harus diperbarui: rumah di daerah langganan banjir dianjurkan berfondasi tinggi atau panggung, fasilitas umum penting dilengkapi tanggul kecil atau sistem drainase mandiri. (4) Pemberdayaan dan peningkatan kapasitas masyarakat. Karena masyarakat adalah garda terdepan saat banjir, kapasitas mereka harus ditingkatkan. Program pendidikan kebencanaan perlu diperluas: penyuluhan rutin di tiap desa mengenai tanda-tanda banjir, perubahan iklim lokal, dan tindakan penyelamatan diri. Simulasi evakuasi dan pelatihan pertolongan pertama sebaiknya dijadwalkan terutama di desa dengan kesiapsiagaan rendah seperti Mapin Rea. Pembentukan *Desa Tangguh Bencana* atau tim siaga banjir berbasis masyarakat akan membantu koordinasi saat darurat. Selain itu, mekanisme pendanaan darurat di tingkat komunitas (kas gotong royong) dan jalur komunikasi internal (misal grup WhatsApp tanggap bencana) dapat mempercepat respons ketika banjir terjadi. Peningkatan kapasitas lunak ini menjawab kelemahan berupa rendahnya kapasitas mitigasi kelembagaan lokal. (5) Penataan ruang dan ekosistem berbasis risiko. Pemanfaatan lahan di Sumbawa harus disesuaikan dengan peta risiko banjir yang telah diidentifikasi. Artinya, hindari pembangunan permukiman baru di dataran banjir dan sempadan sungai tanpa perlindungan memadai. Lahan basah alami, hutan mangrove di pesisir Labuhan Burung, serta vegetasi hulu di Mapin Rea yang masih ada harus dilindungi atau direhabilitasi untuk menjaga fungsi penyangga alami banjir. Regulasi tata ruang perlu menegakkan zonasi ketat: lahan kritis di hulu direboisasi, kawasan rawan banjir dijadikan area terbuka atau tanggul alami, dan izin pembangunan dilengkapi syarat drainase dan resapan. Strategi ini memerlukan penegakan kebijakan (mitigasi non-struktural) yang bersinergi dengan upaya teknis.

Semua strategi di atas saling melengkapi dalam kerangka peningkatan ketangguhan wilayah Sumbawa. Pendekatan yang diambil mengintegrasikan langkah struktural dan non-struktural sesuai best practice internasional. Diharapkan, upaya komprehensif ini dapat mengurangi risiko banjir secara signifikan di masa depan. Indikator keberhasilannya dapat dilihat dari berkurangnya frekuensi dan dampak banjir yang dilaporkan, meningkatnya kesiapsiagaan masyarakat (misal skor kesiapsiagaan >4), serta terbangunnya infrastruktur dan tata kelola lingkungan yang tahan iklim. Penelitian ini menegaskan bahwa mitigasi banjir dan adaptasi perubahan iklim di Sumbawa harus dilakukan secara terpadu untuk menghasilkan ketangguhan yang berkelanjutan menghadapi ancaman hidrometeorologi yang kian meningkat.

Implementasi strategi berbasis neraca air dan simulasi iklim membutuhkan sinergi aktif dari OPD terkait. Peran OPD tidak hanya bersifat administratif, tetapi menjadi penggerak utama dalam merealisasikan seluruh strategi yang telah dirumuskan dalam penelitian ini. Penyelenggaraan program lintas sektor berbasis data neraca air dan prediksi iklim hanya dapat terwujud bila seluruh OPD memiliki komitmen kolaboratif, alokasi anggaran memadai, dan peta jalan yang jelas menuju ketahanan iklim daerah. Sinergi ini juga penting dalam menciptakan sistem pemantauan dan evaluasi adaptasi banjir secara berkelanjutan, serta menjembatani antara hasil kajian ilmiah dan kebijakan publik yang aplikatif di tingkat lokal. Dengan memperkuat peran OPD secara struktural dan operasional, Kabupaten Sumbawa dapat bertransformasi dari wilayah yang rawan bencana menjadi kawasan yang tangguh terhadap perubahan iklim, dengan sistem mitigasi dan adaptasi yang terintegrasi dari hulu ke hilir dari laboratorium data hingga tindakan nyata di lapangan.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menjawab seluruh tujuan riset melalui pendekatan terpadu yang menggabungkan prediksi hidrometeorologi, analisis neraca air - iklim, dan kajian sosial - institusional. Model SARIMAX (1,0,1) (1,1,1) [12] yang memasukkan indeks SOI dan SST terbukti memberikan akurasi layak (MAE \approx 38 mm; RMSE \approx 55 mm), sehingga layak dijadikan fondasi sistem peringatan dini banjir Kabupaten Sumbawa. Kajian neraca air di lima desa memperlihatkan surplus singkat pada Januari - Maret yang segera bergeser ke defisit panjang delapan bulan mencapai 817 mm menandakan risiko ganda banjir dan kekeringan bila air hujan tidak ditampung secara efektif. Simulasi iklim (+2 °C suhu dan +10% curah hujan) menunjukkan bahwa peningkatan evapotranspirasi memperbesar defisit meski hujan bertambah, sehingga ketidakseimbangan air berpotensi kian ekstrem pada 2054 dan 2084. Dari sisi sosial, analisis Miles - Huberman memperlihatkan pola “adaptasi tinggi - mitigasi lemah” di beberapa desa hulu dan hilir, menegaskan perlunya penguatan kapasitas kelembagaan dan edukasi risiko. Hasil SWOT menempatkan strategi daerah pada kuadran progresif (kuat secara internal dan kaya peluang eksternal) sehingga kombinasi teknologi prediksi, konservasi surplus air (embung, sumur resapan), penguatan infrastruktur tahan banjir, serta pemberdayaan komunitas menjadi jalur aksi prioritas. Secara keseluruhan, integrasi temuan klimatologis, hidrologis, dan sosial ini menyediakan kerangka adaptasi-mitigasi yang holistik untuk menurunkan frekuensi serta dampak banjir sekaligus mengurangi kerentanan kekeringan di Kabupaten Sumbawa.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamo, N., Al-Ansari, N., & Sissakian, V. (2021). Review of Climate Change Impacts on Human Environment: Past, Present and Future Projections. *Engineering*, 13(11), 605–630. <https://doi.org/10.4236/eng.2021.1311044>
- Ayu, I. W., Sebayang, H. T., Soemarno, & Prijono, S. (2018). Assessment of rice water requirement by using CROPWAT model in Sumbawa Regency, West Nusa Tenggara, Indonesia. *Vegetos*, 31(2), 1–6. <https://doi.org/10.4172/2229-4473.1000409>

- BNPB. (2025). Indeks Risiko Bencana Indonesia. Retrieved April 13, 2025, from <https://inarisk.bnpb.go.id/irbi>
- Bolan, S., Padhye, L. P., Jasemizad, T., Govarathanan, M., Karmegam, N., Wijesekara, H., . . . Bolan, N. (2023). Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events. *The Science of the Total Environment*, 909, 168388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168388>
- BPBD Provinsi NTB. (2025). Kejadian bencana. Retrieved April 13, 2025, from <https://siaga.ntbprov.go.id/kejadian-bencana>
- Chen, X. M., Sharma, A., & Liu, H. (2023). The impact of climate change on environmental sustainability and human mortality. *Environments*, 10(10), 165. <https://doi.org/10.3390/environments10100165>
- Du, J., Zhou, L., Yu, X., Ding, Y., Zhang, Y., Wu, L., & Ao, T. (2024). Understanding precipitation concentration changes, driving factors, and responses to global warming across mainland China. *Journal of Hydrology*, 645, 132164. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132164>
- Elshehewey, A. M., Shams, M. Y., Elhady, A. M., Shohieb, S. M., Abdelhamid, A. A., Ibrahim, A., & Tarek, Z. (2023). A novel WD-SARIMAX model for temperature forecasting using Daily Delhi Climate Dataset. *Sustainability*, 15(1), 757. <https://doi.org/10.3390/su15010757>
- Ficklin, D. L., Null, S. E., Abatzoglou, J. T., Novick, K. A., & Myers, D. T. (2022). Hydrological intensification will increase the complexity of water resource management. *Earth S Future*, 10(3). <https://doi.org/10.1029/2021ef002487>
- Guo, J., Li, H., Leung, L. R., Guo, S., Liu, P., & Sivapalan, M. (2014). Links between flood frequency and annual water balance behaviors: A basis for similarity and regionalization. *Water Resources Research*, 50(2), 937–953. <https://doi.org/10.1002/2013wr014374>
- Kabir, M., Habiba, U. E., Khan, W., Shah, A., Rahim, S., De Los Rios-Escalante, P. R., . . . Shafiq, M. (2023). Climate change due to increasing concentration of carbon dioxide and its impacts on environment in 21st century; a mini review. *Journal of King Saud University - Science*, 35(5), 102693. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102693>
- Kirono, D. G., Butler, J. R., McGregor, J. L., Ripaldi, A., Katzfey, J., & Nguyen, K. (2016). Historical and future seasonal rainfall variability in Nusa Tenggara Barat Province, Indonesia: Implications for the agriculture and water sectors. *Climate Risk Management*, 12, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2015.12.002>
- Pabelando, V., Jr. (2024). Building resilient communities: integrating climate change adaptation and disaster risk management. *Pantao, International Journal of the Humanities and Social Sciences*. <https://doi.org/10.69651/pijhs030322>
- Pagli, B., Izumo, T., Cravatte, S., Hopuare, M., Martinoni-Lapierre, S., Laurent, V., . . . Auffray, S. (2025). The diverse impacts of El Niño and La Niña events over the South Pacific and in French Polynesia. *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-24-0408.1>
- Raj, T. J., Joshitha, K., Praveena, M. A., Mary, S., & Ankayarkanni, B. (2024). Advanced weather monitoring and disaster mitigation system. 2022 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI), 1–6. <https://doi.org/10.1109/accai61061.2024.10601763>

- Rezvani, R., RahimiMovaghar, M., Na, W., & Najafi, M. R. (2023). Accelerated lagged compound floods and droughts in northwest North America under 1.5 °C – 4 °C global warming levels. *Journal of Hydrology*, 624, 129906. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129906>
- Rosa, L., & Sangiorgio, M. (2025). Global water gaps under future warming levels. *Nature Communications*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56517-2>
- Shi, X., Liu, Y., Chen, J., Chen, H., Wang, Y., Lu, Z., . . . Ng, C. W. W. (2024). Escalating tropical cyclone precipitation extremes and landslide hazards in South China under Global Warming. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00654-w>
- Shivanna, K. R. (2022). Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 88(2), 160–171. <https://doi.org/10.1007/s43538-022-00073-6>
- Sun, Q., Miao, C., AghaKouchak, A., Mallakpour, I., Ji, D., & Duan, Q. (2019). Possible Increased Frequency of ENSO-Related Dry and Wet Conditions over Some Major Watersheds in a Warming Climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(4), E409–E426. <https://doi.org/10.1175/bams-d-18-0258.1>
- Vaidya, S., Virani, K., Nambiar, G., & Devadkar, K. (2021). Real-Time detection of weather-based disasters. 2021 Second International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC), 1566–1573. <https://doi.org/10.1109/icesc51422.2021.9532615>
- You, Y., Liu, J., Zhang, Y., Beck, H. E., Gu, X., & Kong, D. (2021). Impacts of El Niño–southern oscillation on global runoff: Characteristic signatures and potential mechanisms. *Hydrological Processes*, 35(10). <https://doi.org/10.1002/hyp.14367>
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., . . . Ao, X. (2024). Impacts of global climate change on Agricultural Production: A Comprehensive review. *Agronomy*, 14(7), 1360. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>