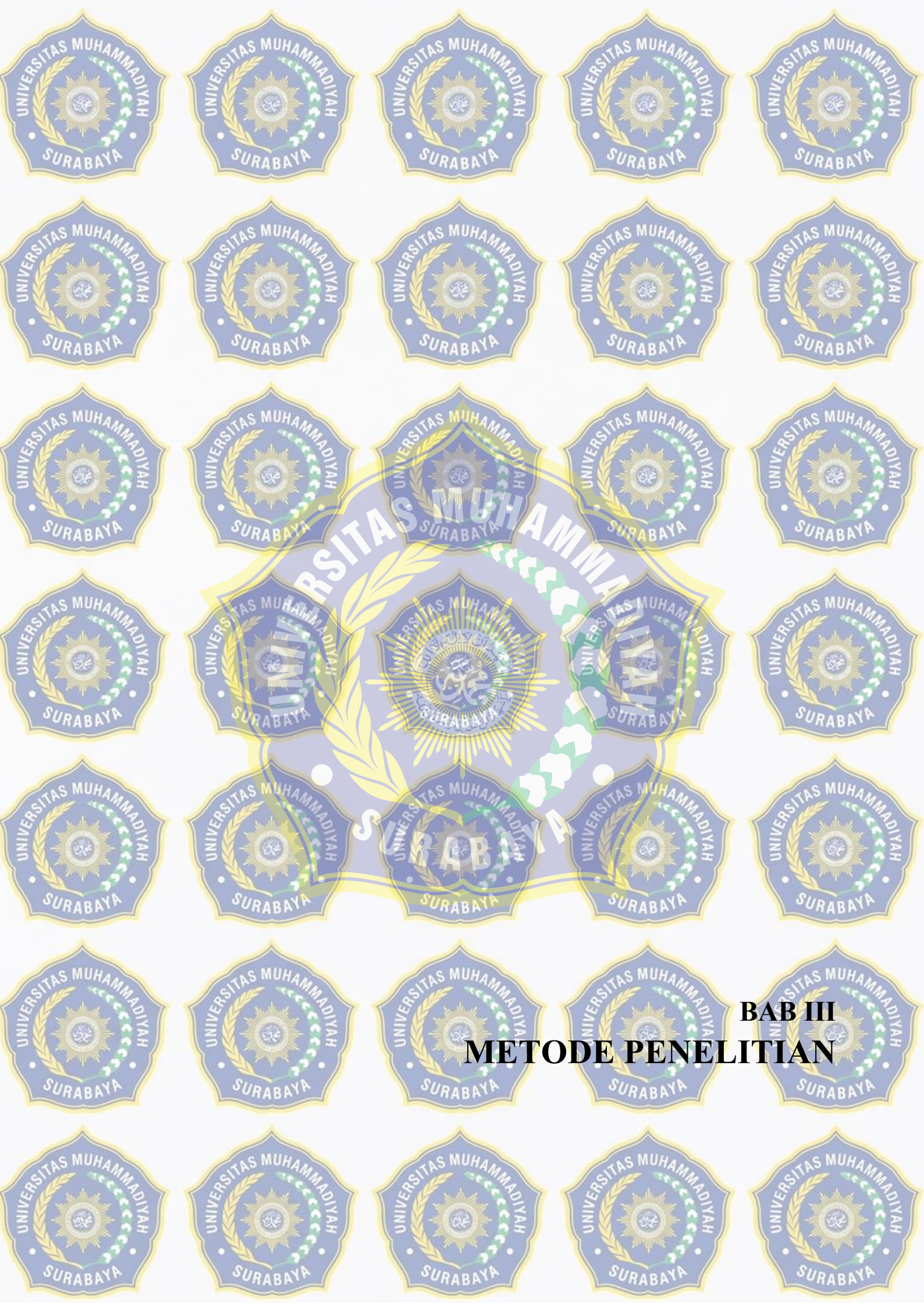




BAB III

METODE PENELITIAN

BAB III

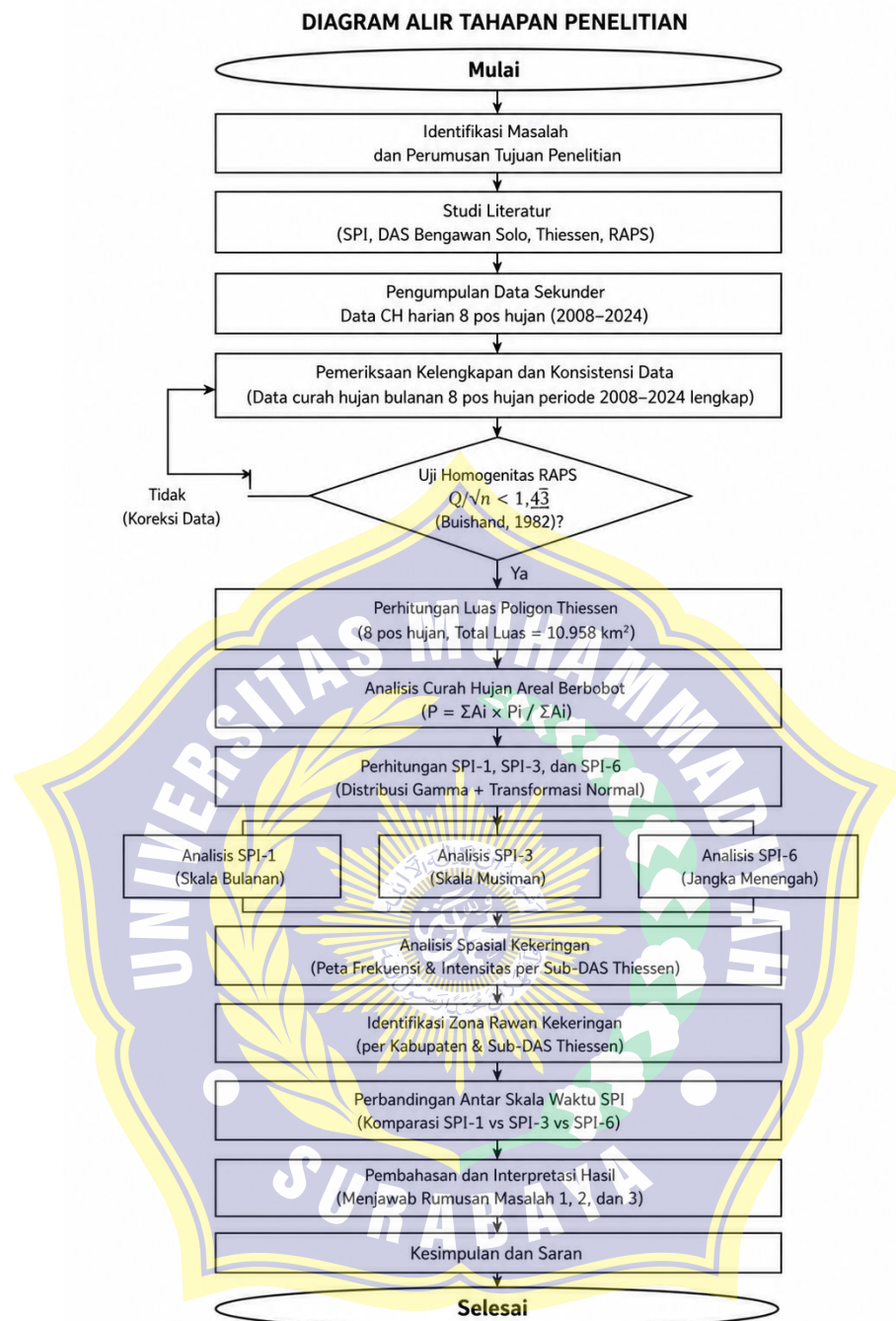
METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan kuantitatif yang bersifat deskriptif-komparatif secara spasiotemporal. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian hidroklimatologi ini bertumpu pada pengumpulan, pengolahan, dan analisis data numerik berupa deret waktu (*time series*) curah hujan historis harian yang diagregasi ke skala bulanan. Analisis ini menggunakan prinsip statistika dan probabilitas matematika untuk mendefinisikan fenomena kekeringan menjadi nilai metrik yang terstandardisasi (Ojha dkk., 2021).

Sifat deskriptif dalam penelitian ini bertujuan memetakan, menguraikan, dan menginterpretasikan tingkat intensitas, durasi, dan sebaran spasial kekeringan meteorologis di wilayah kajian. Adapun sifat komparatif diterapkan untuk membandingkan tingkat sensitivitas fluktuasi defisit presipitasi pada berbagai jendela skala waktu akumulasi yang berbeda, yakni observasi 1-Bulan (SPI-1), 3-Bulan (SPI-3), dan 6-Bulan (SPI-6) (Darmawan dkk., 2018). SPI-1 merespons fluktuasi kelembapan tanah lapisan atas jangka pendek, SPI-3 merepresentasikan defisit kelembapan untuk siklus musim tanam agrikultur, dan SPI-6 mendeteksi tren penyusutan cadangan air permukaan menengah (WMO, 2012).

Metode komputasi utama yang digunakan adalah *Standardized Precipitation Index* (SPI). SPI secara resmi direkomendasikan oleh *World Meteorological Organization* (WMO) sebagai indeks utama untuk mengukur kekeringan meteorologis karena fleksibilitasnya (Hayes dkk., 2011). Keunggulannya terletak pada kesederhanaan variabel masukan yang murni mensyaratkan presipitasi bulanan, tanpa menuntut pelibatan parameter iklim kompleks seperti suhu atau evapotranspirasi (McKee dkk., 1993). Untuk menghasilkan luaran visual, model SPI ini dipadukan dengan *Geographic Information System* (GIS) menggunakan metode interpolasi *Poligon Thiessen* untuk memetakan batas sebaran anomali kekeringan dari titik stasiun menjadi skala wilayah.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Tahapan Analisis Penelitian

3.2 Populasi dan Sampel

3.2.1 Populasi Penelitian

Populasi dalam penelitian ini didefinisikan sebagai keseluruhan data curah hujan meteorologis yang terekam oleh seluruh jaringan pos penakar curah hujan yang beroperasi di dalam cakupan *catchment area* Hilir DAS Bengawan Solo sejak instrumen didirikan hingga periode penelitian dilaksanakan (Triatmodjo, 2008).

3.2.2 Sampel dan Teknik Sampling

Teknik pengambilan sampel yang diterapkan adalah *Purposive Sampling*, guna memastikan stasiun terpilih memenuhi kriteria relevansi kualitas data. Kriteria penyaringan meliputi: (1) Posisi stasiun berada pada zona hilir dan transisi aliran menuju hilir DAS Bengawan Solo; (2) Stasiun berstatus aktif di bawah otoritas resmi Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo; dan (3) Memiliki ketersediaan dokumen log data harian yang dapat diakses.

Berdasarkan kriteria tersebut, diperoleh sampel 8 pos stasiun hujan (Tabel 3.1).

Tabel 3. 1 Rincian Lokasi Geografis 8 Pos Curah Hujan Wilayah Hilir DAS Bengawan Solo

No	Nama Pos	Lokasi Administratif	Koordinat Bujur (T)	Koordinat Lintang (S)	Tahun Berdiri
1	Nglirip	Kec. Singgahan, Kab. Tuban	587519.1150	9229770.4860	1975
2	Karangbinangun	Kec. Karangbinangun, Kab. Lamongan	662003.6791	9223296.4970	1980
3	Doplang	Kec. Jati, Kab. Blora	532006.0000	9205940.0000	1975
4	Bojonegoro	Kec. Kapas, Kab. Bojonegoro	599104.5103	9207212.0040	1975
5	Waduk Gondang	Kec. Sugio, Kab. Lamongan	640425.5497	9203826.5800	1975
6	Sembung	Kec. Sukorame, Kab. Lamongan	618910.4279	9188971.8440	1989
7	Padangan	Kec. Padangan, Kab. Bojonegoro	567387.3161	9207910.8490	1975
8	Lamongan	Kec. Lamongan, Kab. Lamongan	656541.2199	9212680.9560	1975

Sumber: Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo

Selain lokasi spasial, penelitian ini menginventarisasi ketersediaan durasi data historis (Tabel 3.2).

Tabel 3. 2 Ketersediaan Data Runtun Waktu Observasional (Tahun 2008–2024)

No	Nama Pos Stasiun	Rentang Data Observasi	Panjang Periode Tersedia
1	Nglirip	2008–2024	17 Tahun
2	Karangbinangun	2008–2024	17 Tahun
3	Doplang	2008–2024	17 Tahun

Tabel 3. 3 Ketersediaan Data Runtun Waktu Observasional (Tahun 2008–2024) (lanjutan)

No	Nama Pos Stasiun	Rentang Data Observasi	Panjang Periode Tersedia
4	Bojonegoro	2008–2024	17 Tahun
5	Waduk Gondang	2008–2024	17 Tahun
6	Sembung	2008–2024	17 Tahun
7	Padangan	2008–2024	17 Tahun
8	Lamongan	2008–2024	17 Tahun

Sumber: Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo

3.3 Variabel Penelitian dan Definisi Operasional

3.3.1 Variabel Penelitian

Pola relasional dalam penelitian ini memfokuskan arsitektur operasionalnya pada hubungan searah deterministik yang mengikat dua variabel:

1. **Data Input:** Curah hujan bulanan dari 8 pos hujan wilayah Hilir DAS Bengawan Solo.
2. **Parameter Analisis:** Standardized Precipitation Index (SPI) pada skala SPI-1, SPI-3, dan SPI-6.

3.3.2 Definisi Operasional

Definisi operasional menyajikan penjabaran parameter agar variabel dapat diukur secara eksak. Rinciannya disajikan dalam Tabel 3.3.

Tabel 3. 4 Matriks Definisi Operasional Variabel Penelitian

Variabel	Definisi Konseptual	Definisi Operasional	Indikator	Skala
Curah Hujan Bulanan (Presipitasi Titik)	Total kedalaman air yang jatuh pada suatu lokasi selama periode tertentu, tanpa reduksi infiltrasi atau evapotranspirasi.	Akumulasi curah hujan harian dari sensor alat penakar manual/otomatis selama satu bulan penuh.	Ketinggian air bulanan terekam.	Rasio (mm)
Curah Hujan Areal Wilayah	Estimasi volume curah hujan yang terdistribusi merata menutupi luas daerah tangkapan sungai.	Pengolahan rata-rata ukur tertimbang (<i>weighted average</i>) curah hujan stasiun dikalikan rasio luas <i>Poligon Thiessen</i> menggunakan QGIS.	Nilai curah hujan ekuivalen untuk seluruh kawasan.	Rasio (mm)

Tabel 3. 5 Matriks Definisi Operasional Variabel Penelitian (lanjutan)

Variabel	Definisi Konseptual	Definisi Operasional	Indikator	Skala
Indeks Kekeringan Meteorologis	Kondisi anomali deplesi pasokan presipitasi di bawah keseimbangan normal iklim pada kurun waktu tertentu.	Derajat penyimpangan probabilitas historis curah hujan terhadap ekuilibrium distribusi normal baku (<i>Gaussian</i>).	Matriks nilai <i>Z-Score</i> SPI komputasional (SPI-1, 3, 6).	Interval
Tingkat Keparahan Bencana	Klasifikasi tingkat ancaman bahaya dan dampak kerusakan akibat defisit iklim.	Pengelompokan nilai metrik SPI ke dalam terminologi mitigasi yang ditetapkan <i>World Meteorological Organization</i> (WMO).	Kategori ordinal (Normal, Kering Sedang, Ekstrem, dll).	Ordinal

Sumber: Analisis penulis, 2026

3.4 Teknik Pengumpulan Data

Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa rekaman primer pengamatan lapangan. Pangkalan data diakuisisi dari arsip Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo, meliputi tabulasi curah hujan harian dan koordinat spasial periode 2008 hingga 2024.

3.4.1 Persiapan Data Curah Hujan

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data curah hujan bulanan dari delapan pos hujan di wilayah penelitian dengan periode pengamatan tahun 2008–2024. Seluruh data telah memiliki rekaman yang lengkap sehingga tidak diperlukan proses pengisian data hilang (*missing data imputation*) maupun ekstrapolasi data stasiun baru.

Tahap persiapan data meliputi pemeriksaan kelengkapan data, penyusunan data dalam format deret waktu bulanan, serta penyesuaian format agar dapat digunakan pada proses perhitungan *Standardized Precipitation Index* (SPI). Data yang telah memenuhi persyaratan tersebut selanjutnya digunakan sebagai data masukan pada tahap analisis SPI.

3.4.2 Pengujian Homogenitas Data (*Rescaled Adjusted Partial Sums*)

Setelah data terisi penuh, langkah *quality control* wajib dilakukan untuk mendeteksi *step changes* (pergeseran nilai rerata akibat intervensi artifisial, bukan iklim alamiah) melalui Metode *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS) atau Uji Buishand. Nilai simpangan kumulatif (Y_k) dihitung melalui persamaan integral:

$$Y_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \quad \text{..... (3.2)}$$

Lalu, dinormalisasi dengan standar deviasi (D_y) menjadi variabel statistik terstandarisasi (S_k^{**}):

$$S_k^{**} = \frac{Y_k}{D_y} \quad \text{..... (3.3)}$$

$$D_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad \text{..... (3.4)}$$

Kestabilan homogenitas stasiun dilacak melalui puncak penyimpangan absolut maksimum (Q):

$$Q = \max_{0 \leq k \leq n} |S_k^{**}| \quad \text{..... (3.5)}$$

Data dinyatakan homogen apabila nilai $Q/\sqrt{n} < 1,43$ (Buishand, 1982; $\alpha = 0,05$).

3.4.3 Agregasi curah hujan SPI-1, SPI-3, SPI-6

Skala waktu ini merepresentasikan akumulasi curah hujan dalam periode tertentu yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi dampak kekeringan pada sistem hidrologi yang berbeda.

1. SPI-1 merupakan skala waktu jangka pendek yang merepresentasikan kondisi curah hujan dalam periode satu bulan.

$$X_t = P_t \quad \text{..... (3.6)}$$

di mana:

X_t = curah hujan terakumulasi pada bulan ke- t
 P_t = curah hujan bulan ke- t

2. SPI-3 merupakan skala waktu menengah yang mencerminkan akumulasi curah hujan selama tiga bulan.

$$X_t = P_t + P_{t-1} + P_{t-2} \quad \text{..... (3.7)}$$

di mana:

P_t = curah hujan bulan ke- t
 P_{t-1} = curah hujan satu bulan sebelumnya
 P_{t-2} = curah hujan dua bulan sebelumnya

3. SPI-6 merupakan skala waktu jangka menengah hingga panjang yang menggambarkan kondisi kelembaban tanah dan ketersediaan air permukaan secara lebih stabil.

$$X_t = P_t + P_{t-1} + P_{t-2} + P_{t-3} + P_{t-4} + P_{t-5} \quad \text{..... (3.8)}$$

3.5 Instrumen Penelitian

Instrumen utama yang digunakan dalam riset ini meliputi:

1. Jaringan 8 pos penakar hujan BBWS Bengawan Solo sebagai pemasok basis data sekunder empiris.
2. Microsoft Excel untuk rekayasa operasional matriks logaritmik algoritma SPI.
3. Perangkat lunak SIG sumber terbuka (*open-source*) **QGIS** (*Quantum GIS*) versi mutakhir untuk perancangan geospasial *Poligon Thiessen* dan produksi peta sebaran tingkat kekeringan.

3.6 Teknik Analisis Data

Untuk memperjelas kerangka kerja operasional, proses ekstraksi dari data mentah hingga pemetaan spasial SPI divisualisasikan dalam diagram alir berikut:

3.6.1 Indeks kekeringan metode *Standardized Precipitation Index* (SPI)

Metode Indeks kekeringan SPI adalah indeks yang digunakan untuk menentukan penyimpangan curah hujan terhadap normalnya dalam satu periode yang panjang (bulanan, dua bulanan, tiga bulanan dan seterusnya). Metode SPI ini dikembangkan oleh McKee et al tahun 1993. Metode ini merupakan model untuk mengukur defisit curah hujan pada berbagai periode berdasarkan kondisi normalnya (Saidah et al., 2017).

Langkah-langkah pengerjaan metode SPI ini adalah :

1. Menghitung rata-rata :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad \text{..... (3.9)}$$

Dengan :

$\bar{x}$ = nilai rata-rata kejadian hujan
 $\sum x$ = jumlah kejadian hujan (mm)
 n = jumlah data hujan

Menghitung di Ms. Excel dengan fungsi = AVERAGE (awal : akhir)

2. Menghitung Standar Deviasi :

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{..... (3.10)}$$

Dengan :

Sd = standar deviasi

Menghitung di Ms. Excel dengan fungsi = STDEV (awal : akhir)

3. Menghitung α :

$$\alpha = \frac{\bar{x}^2}{Sd^2} \quad \text{..... (3.11)}$$

Dengan :

$\bar{x}$ = nilai rata-rata kejadian hujan (mm)

Sd = standar deviasi

4. Menghitung β :

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad \text{..... (3.12)}$$

Dengan :

$\bar{x}$ = nilai rata-rata kejadian hujan

5. Menghitung gamma distribusi :

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{(\beta^\alpha \Gamma(a))} \int_0^x t^{(a-1)} e^{-\frac{t}{\beta}} dt \quad \text{..... (3.13)}$$

Menghitung di Ms. Excel dengan fungsi = GAMMADIST (x, β , α , true)

6. Menghitung transformasi gamma distribusi :

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{H(x)^2} \right]} \quad \text{untuk } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad \text{..... (3.14)}$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1-H(x)^2} \right]} \quad \text{Untuk } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad \text{..... (3.15)}$$

Dengan :

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad \text{..... (3.16)}$$

7. Menghitung nilai SPI

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{(c_0 + c_1 t + c_2 t^2)}{(1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3)} \right) \quad \text{untuk } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad \text{..... (3.17)}$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{(c_0 + c_1 t + c_2 t^2)}{(1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3)} \right) \quad \text{untuk } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad \text{..... (3.18)}$$

Dengan :

$c_0 = 2,515517$	$d_1 = 1,432788$
$c_1 = 0,802853$	$d_2 = 0,189269$
$c_2 = 0,010328$	$d_3 = 0,001308$

Nilai-nilai positif SPI menunjukkan curah hujan lebih besar dari curah hujan rata-ratanya sedangkan nilai negatif nilai menunjukkan curah hujan kurang dari curah hujan rata-rata. Setelah SPI dinormalisasi, iklim basah dan iklim kering dapat direpresentasikan dengan cara yang sama, dan periode basah bisa juga dipantau menggunakan SPI (Nelvi & Srigutomo, 2016)

3.6.2 Ekstrapolasi Area dengan *Poligon Thiessen* (Berbasis QGIS)

Untuk mentransformasi data presipitasi titik (*point rainfall*) menjadi curah hujan kawasan (*areal precipitation*), metode *Poligon Thiessen* diaplikasikan menggunakan QGIS. Algoritma ini beroperasi melalui ekstrapolasi *Triangulasi Delaunay* untuk menghubungkan stasiun terdekat, dilanjutkan dengan memproyeksikan garis bisektor tegak lurus (*perpendicular bisectors*) yang membentuk area poligon tertutup bagi setiap stasiun. Agregasi perhitungan luasan tertimbanganya diformulasikan:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{..... (3.19)}$$

Variabel $\bar{P}$ adalah nilai curah hujan kawasan terpadu, A_i melambangkan persentase rasio area poligon stasiun i , dan P_i merupakan total hujan stasiun tersebut.

3.6.3 Algoritma Evaluasi Indeks Kekeringan (SPI)

Data curah hujan areal bulanan ($\bar{P}$) diumpankan ke dalam algoritma SPI dengan tiga tahapan komputasi utama:

1. Jendela Waktu Akumulasi (*Rolling Time Scales*)

Data dikonversi menjadi pergerakan fluktuasi kumulatif bergeser untuk rentang 1 bulan (SPI-1), 3 bulan (SPI-3) untuk memantau siklus pertanian lahan, dan 6 bulan (SPI-6) guna mendeteksi menyusutnya cadangan pasokan sungai dan elevasi bendungan seperti Waduk Gondang.

2. Pencocokan Parameter Distribusi Probabilitas Gamma

Distribusi Gamma sangat representatif dan diandalkan dalam komputasi hidrologi di Indonesia karena kurva distribusinya secara alami mampu mengakomodasi sifat dasar data curah hujan yang memiliki batas bawah batas asimtotik mutlak di angka nol (tidak ada curah hujan bernilai negatif) serta memiliki karakteristik asimetris kecondongan positif (*positive skewness*).

Fungsi kepadatan probabilitas (*Probability Density Function* / PDF) Distribusi Gamma diformulasikan:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{untuk } x > 0 \quad \text{..... (3.20)}$$

Di mana α (*shape parameter*) dan β (*scale parameter*) diestimasi akurasiya menggunakan metode *Method of Moments* (MoM). Pada metode ini, parameter distribusi Gamma diperoleh berdasarkan hubungan antara momen sampel (rata-rata dan varians) dengan momen teoritis distribusi Gamma, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.8) dan (3.9).

3. Transformasi Ekuiprobabilitas ke Normal Baku (Z-Score)

Matriks probabilitas kumulatif dari rentang Gamma dipetakan secara ekuivalen untuk mengikuti fungsi distribusi normal standar (*Gaussian*), di mana rata-rata sentral (μ) sama dengan 0 dan simpangan baku (σ) adalah 1. Nilai keluaran *Z-Value* dari penyetaraan ini ditetapkan sebagai nilai akhir Indeks SPI.

3.7.3 Identifikasi Skala Bencana Berdasarkan *World Meteorological Organization* (WMO)

Nilai Z-skor SPI diidentifikasi tingkat keparahannya berdasarkan standardisasi WMO (2012).

Tabel 3. 6 Matriks Klasifikasi Keparahan Indeks SPI (WMO, 2012)

Nilai SPI	Klasifikasi Kekeringan
$\geq 2,00$	Amat Sangat Basah (<i>Extremely wet</i>)
1,50 s.d. 1,99	Sangat Basah (<i>Very wet</i>)
1,00 s.d. 1,49	Cukup Basah (<i>Moderately wet</i>)
-0,99 s.d. 0,99	Normal (<i>Near normal</i>)
-1,00 s.d. -1,49	Cukup Kering (<i>Moderately dry</i>)
-1,50 s.d. -1,99	Sangat Kering (<i>Severely dry</i>)
$\leq -2,00$	Amat Sangat Kering (<i>Extremely dry</i>)

Sumber: WMO, 2012

Kondisi kekeringan berat ($SPI \leq -1,50$) hingga ekstrem ($SPI \leq -2,00$) yang terekam pada interval SPI-3 dan SPI-6 merupakan rujukan utama yang memvalidasi tingkat risiko gagal panen agrikultur serta menyusutnya persediaan air baku di Hilir DAS Bengawan Solo.

3.8 Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan data curah hujan historis selama 17 tahun, yakni dari **1 Januari 2008 hingga 31 Desember 2024**. Rentang 17 tahun atau setara 204 bulan ini memenuhi syarat minimum panjang data SPI menurut WMO sekaligus mencakup beberapa siklus dinamika iklim global (*El Niño Southern Oscillation* / ENSO) yang menghantam Indonesia, termasuk fase kemarau ekstrem (2015, 2019, 2023) maupun curah hujan anomali basah (2010, 2020-2022) (Nikmah dkk., 2024).