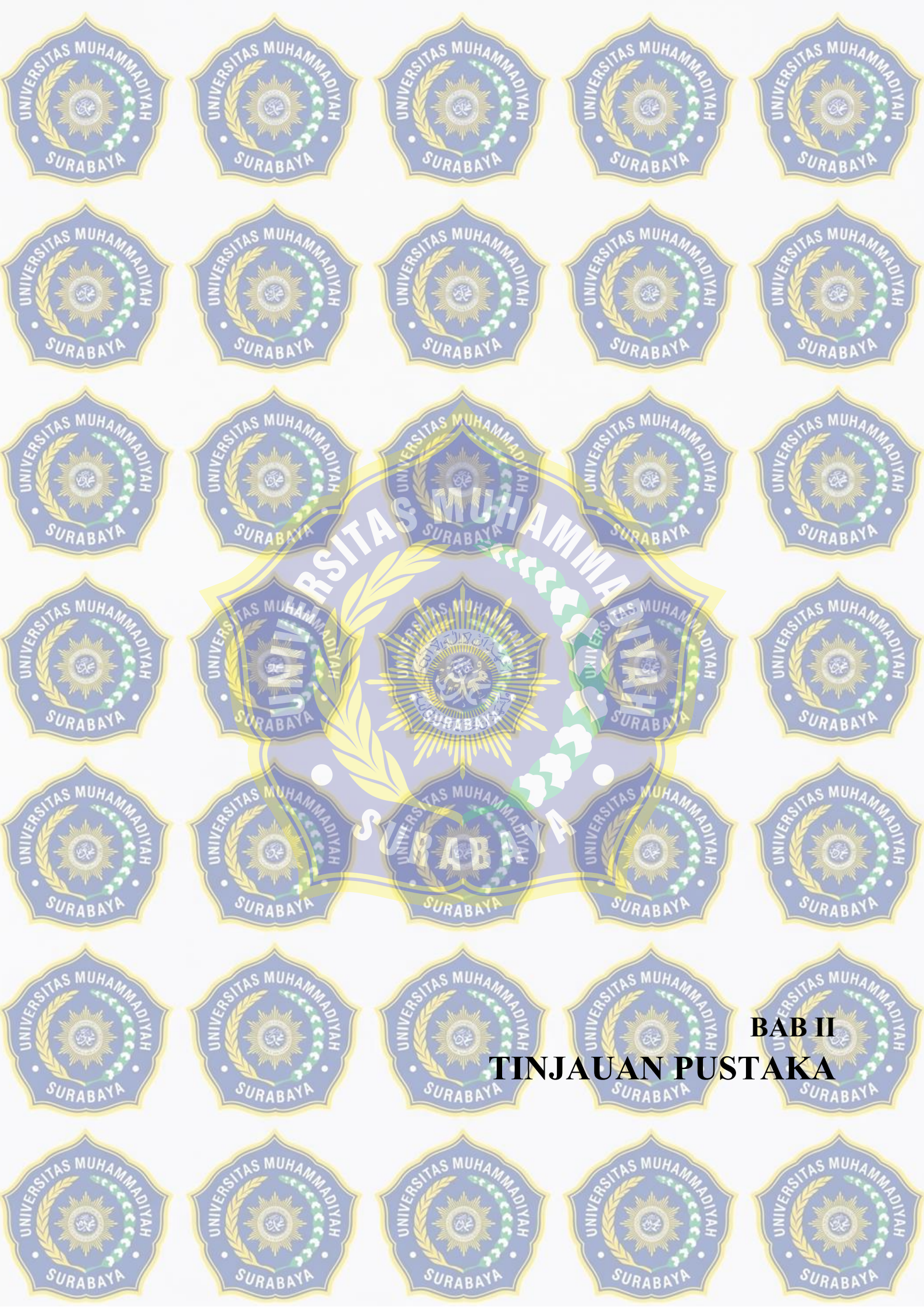




BAB II TINJAUAN PUSTAKA

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Daerah Aliran Sungai (DAS)

Air hujan yang jatuh ke permukaan bumi tidak bergerak secara acak, melainkan mengikuti sistem hidrologi yang terorganisir dalam suatu kesatuan wilayah tangkapan yang dikenal sebagai Daerah Aliran Sungai (DAS). Dalam kajian sumber daya air modern, DAS dipandang sebagai unit perencanaan yang paling ideal karena seluruh proses hidrologi, mulai dari presipitasi, infiltrasi, limpasan permukaan, hingga aliran sungai, berlangsung dalam batas-batas alami yang saling terhubung. Oleh karena itu, setiap perubahan yang terjadi pada bagian hulu akan memberikan konsekuensi terhadap kondisi hidrologi pada bagian tengah maupun hilir. Konsep keterhubungan tersebut menjadikan DAS sebagai satuan analisis yang penting dalam berbagai studi hidrologi, termasuk penelitian mengenai kekeringan meteorologis yang sangat dipengaruhi oleh distribusi curah hujan secara spasial dan temporal (Asdak, 2023).

Dalam konteks pengelolaan sumber daya air, pendekatan berbasis DAS telah menjadi paradigma utama yang diterapkan di berbagai negara karena mampu menggambarkan hubungan antara karakteristik fisik wilayah dan dinamika ketersediaan air secara lebih komprehensif. Menurut Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air, DAS merupakan suatu wilayah daratan yang menjadi satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan, serta mengalirkan air hujan menuju danau atau laut secara alami. Definisi tersebut menegaskan bahwa DAS tidak hanya dipandang sebagai wilayah geografis semata, melainkan juga sebagai sistem lingkungan yang mengintegrasikan aspek hidrologi, geomorfologi, dan penggunaan lahan dalam satu kesatuan proses yang saling mempengaruhi.

Pentingnya DAS semakin meningkat di tengah tantangan perubahan iklim global yang memicu peningkatan frekuensi kejadian hidrometeorologi ekstrem. Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023) menunjukkan bahwa perubahan pola presipitasi telah menyebabkan ketidakseimbangan distribusi air di berbagai wilayah dunia. Fenomena tersebut berdampak langsung terhadap meningkatnya kejadian kekeringan meteorologis, terutama pada kawasan hilir sungai yang secara alami sangat bergantung pada kontinuitas pasokan air dari wilayah hulu. Dalam kondisi demikian, pemahaman terhadap karakteristik DAS menjadi aspek fundamental dalam upaya identifikasi daerah rentan kekeringan dan penyusunan strategi mitigasi berbasis wilayah.

Secara hidrologis, DAS memiliki peran sebagai pengatur keseimbangan antara input dan output air. Curah hujan yang diterima suatu DAS akan mengalami berbagai proses transformasi, seperti intersepsi vegetasi, infiltrasi ke dalam tanah, evapotranspirasi, serta limpasan permukaan yang akhirnya bermuara pada jaringan sungai. Efektivitas proses tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi topografi, jenis tanah, tutupan lahan, dan karakteristik iklim setempat (Chow et al., 1988). Oleh sebab itu, DAS yang memiliki karakteristik fisik berbeda akan menunjukkan respon hidrologi yang berbeda pula terhadap kejadian curah hujan yang sama.

Dalam penelitian ini, DAS diposisikan sebagai unit spasial utama dalam analisis kekeringan meteorologis menggunakan metode *Standardized Precipitation Index* (SPI). Pendekatan tersebut dipilih karena fenomena kekeringan tidak dapat dipahami hanya berdasarkan data curah hujan pada satu titik pengamatan, melainkan harus dianalisis dalam konteks distribusi spasial wilayah tangkapan air secara menyeluruh. Dengan demikian, penggunaan DAS sebagai satuan analisis memungkinkan interpretasi yang lebih representatif terhadap variasi kondisi hidrologi yang terjadi pada wilayah penelitian.

2.1.1 Pengertian DAS

Daerah Aliran Sungai (DAS) secara umum didefinisikan sebagai suatu wilayah yang dibatasi oleh punggung-punggung topografi dimana seluruh air hujan yang jatuh di dalamnya akan terkumpul dan dialirkan menuju satu titik keluaran yang sama melalui sistem jaringan sungai. Definisi ini telah lama menjadi dasar dalam ilmu hidrologi karena menggambarkan hubungan alami antara proses atmosfer, permukaan tanah, dan aliran air dalam satu sistem yang terintegrasi (Asdak, 2023).

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 37 Tahun 2012 tentang Pengelolaan DAS, DAS merupakan wilayah daratan yang menjadi satu kesatuan dengan sungai dan anak sungainya yang berfungsi menampung, menyimpan, serta mengalirkan air yang berasal dari curah hujan menuju danau atau laut secara alami. Definisi tersebut menunjukkan bahwa DAS memiliki fungsi ekologis yang sangat penting dalam menjaga keberlanjutan siklus hidrologi serta menjamin ketersediaan sumber daya air bagi berbagai sektor kehidupan.

Dari sudut pandang hidrologi, DAS dapat dipahami sebagai suatu sistem terbuka yang menerima masukan berupa curah hujan dan menghasilkan keluaran berupa aliran sungai, evapotranspirasi, maupun infiltrasi. Seluruh komponen tersebut saling berinteraksi membentuk keseimbangan air yang menentukan kondisi hidrologi suatu wilayah. Apabila salah satu komponen mengalami perubahan signifikan, seperti penurunan curah hujan yang berkepanjangan, maka keseimbangan sistem akan terganggu dan berpotensi menimbulkan fenomena kekeringan (Subramanya, 2017).

Karakteristik DAS sangat dipengaruhi oleh faktor fisik wilayah, meliputi luas DAS, bentuk DAS, kemiringan lereng, jenis tanah, tutupan lahan, dan jaringan sungai. Faktor-faktor tersebut menentukan kecepatan respon DAS terhadap kejadian hujan maupun periode kering. DAS dengan dominasi lahan terbangun dan kapasitas infiltrasi rendah cenderung menghasilkan limpasan yang lebih besar, sedangkan DAS dengan vegetasi yang baik memiliki kemampuan penyimpanan air yang lebih tinggi sehingga lebih tahan terhadap defisit curah hujan (Bruijnzeel, 2004).

Dalam konteks penelitian kekeringan, DAS menjadi satuan analisis yang relevan karena mampu menggambarkan distribusi spasial curah hujan dan ketersediaan air secara lebih representatif. Oleh sebab itu, berbagai penelitian mengenai indeks kekeringan, termasuk *Standardized Precipitation Index* (SPI), umumnya menggunakan pendekatan DAS sebagai basis analisis guna memperoleh gambaran kondisi hidrologi yang lebih akurat dan komprehensif.

2.1.2 DAS Bengawan Solo

DAS Bengawan Solo merupakan salah satu wilayah sungai strategis nasional yang memiliki peranan penting dalam sistem sumber daya air Pulau Jawa. Dengan luas mencapai sekitar 16.100 km² dan panjang sungai utama sekitar 548 km, Bengawan Solo tercatat sebagai sungai terpanjang di Pulau Jawa (BBWS Bengawan Solo, 2022). Wilayah DAS ini membentang dari Pegunungan Sewu dan kawasan vulkanik Jawa Tengah bagian selatan hingga bermuara di Laut Jawa melalui Kabupaten Gresik dan Tuban.

Besarnya cakupan wilayah DAS Bengawan Solo menyebabkan sungai ini melintasi berbagai karakteristik fisiografi yang sangat beragam. Pada bagian hulu, wilayah didominasi oleh topografi bergelombang hingga berbukit dengan intensitas hujan relatif tinggi. Sementara itu, pada bagian hilir, morfologi wilayah berubah menjadi dataran aluvial yang relatif landai dengan dominasi aktivitas pertanian dan permukiman. Perbedaan karakteristik tersebut menghasilkan variasi respon hidrologi yang signifikan antara satu bagian DAS dengan bagian lainnya.

Selain berfungsi sebagai sumber air irigasi, Bengawan Solo juga mendukung kebutuhan air baku domestik, industri, perikanan, dan berbagai aktivitas ekonomi masyarakat. Oleh karena itu, gangguan terhadap ketersediaan air di DAS ini akan memberikan dampak yang luas terhadap ketahanan pangan maupun ketahanan air regional. Kondisi tersebut menjadikan DAS Bengawan Solo sebagai salah satu prioritas nasional dalam pengelolaan sumber daya air dan mitigasi bencana hidrometeorologi.

Secara hidrologis, DAS Bengawan Solo terbagi menjadi wilayah hulu, tengah, dan hilir. Bagian hulu terletak pada kawasan Wonogiri, Karanganyar, dan sekitarnya yang berfungsi sebagai daerah tangkapan hujan utama. Wilayah ini memiliki elevasi relatif tinggi serta kapasitas infiltrasi yang lebih besar dibandingkan wilayah hilir. Keberadaan Waduk Gajah Mungkur pada bagian hulu juga memainkan peran penting dalam pengaturan debit aliran sepanjang tahun.

Sebaliknya, wilayah hilir mencakup Kabupaten Bojonegoro, Lamongan, Tuban, dan Blora. Kawasan ini merupakan daerah penerima aliran dari seluruh sistem DAS Bengawan Solo sehingga sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrologi yang terjadi pada bagian hulu maupun tengah. Ketika curah hujan menurun secara signifikan dalam periode panjang, pasokan air yang mencapai wilayah hilir turut mengalami penurunan sehingga meningkatkan potensi terjadinya defisit ketersediaan air akibat variasi curah hujan dan kondisi hidrologis wilayah.

Wilayah hilir DAS Bengawan Solo didominasi oleh dataran rendah aluvial dengan kemiringan lereng yang relatif landai. Kondisi geomorfologi tersebut menyebabkan proses drainase alami berlangsung lambat dan sangat bergantung pada kontinuitas pasokan air dari bagian hulu DAS. Berdasarkan penelitian Zhu et al. (2023), dataran aluvial di kawasan pesisir memiliki tingkat evapotranspirasi yang relatif tinggi sehingga lebih rentan mengalami defisit lengas tanah ketika curah hujan berada di bawah kondisi normal.

Karakteristik lain yang menonjol adalah dominasi penggunaan lahan pertanian yang sangat bergantung pada ketersediaan air irigasi. Ketika terjadi penurunan curah hujan dalam jangka panjang, sektor pertanian menjadi sektor pertama yang merasakan dampaknya melalui penurunan produktivitas hingga kejadian gagal panen. Fenomena tersebut telah berulang kali

terjadi pada wilayah Bojonegoro dan Lamongan selama periode musim kemarau ekstrem dalam satu dekade terakhir.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa wilayah hilir DAS Bengawan Solo memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan iklim dan variabilitas curah hujan. Oleh karena itu, kawasan ini menjadi lokasi yang relevan untuk penelitian pemetaan kekeringan meteorologis menggunakan metode SPI sebagai dasar penyusunan strategi mitigasi yang lebih efektif.

2.1.3 Lokasi Studi

Selain faktor geomorfologi, wilayah hilir DAS Bengawan Solo juga memiliki ketergantungan yang sangat tinggi terhadap sektor pertanian berbasis irigasi. Sebagian besar lahan di Kabupaten Bojonegoro, Lamongan, dan Tuban dimanfaatkan sebagai kawasan pertanian pangan yang membutuhkan suplai air relatif stabil sepanjang musim tanam. Ketika curah hujan mengalami anomali negatif dalam periode tertentu, ketersediaan air permukaan maupun cadangan lengas tanah akan menurun secara signifikan sehingga mempengaruhi produktivitas lahan pertanian. Kondisi tersebut menjadikan wilayah hilir sebagai salah satu kawasan dengan tingkat sensitivitas tertinggi terhadap variabilitas iklim musiman, terutama selama periode *El Niño* yang sering memicu kemarau lebih panjang dibandingkan kondisi normal (Aldrian dkk., 2021).

Dari perspektif hidrologi wilayah, kawasan hilir juga berfungsi sebagai titik akumulasi akhir dari seluruh proses yang berlangsung pada bagian hulu dan tengah DAS Bengawan Solo. Meskipun secara teoritis wilayah hilir menerima kontribusi aliran dari daerah tangkapan yang luas, ketersediaan air di kawasan ini tetap sangat dipengaruhi oleh distribusi curah hujan spasial yang terjadi pada keseluruhan sistem DAS. Penurunan intensitas hujan yang berlangsung secara regional akan mengurangi debit sungai, menurunkan pasokan irigasi, serta memperbesar peluang terjadinya defisit air pada berbagai sektor penggunaan lahan. Oleh karena itu, karakteristik hidrologi hilir Bengawan Solo dianggap mampu merepresentasikan dampak kumulatif dari fenomena kekeringan meteorologis yang berkembang pada skala DAS secara menyeluruh (Tallaksen dan Van Lanen, 2004).

Berdasarkan pertimbangan tersebut, Wilayah Hilir DAS Bengawan Solo dipandang sebagai lokasi yang relevan untuk penerapan metode *Standardized Precipitation Index* (SPI) dalam mengidentifikasi tingkat kekeringan meteorologis. Analisis pada kawasan ini diharapkan mampu memberikan gambaran spasial mengenai distribusi tingkat kekeringan berdasarkan variasi curah hujan jangka panjang, sekaligus mengungkap area-area yang memiliki tingkat kekeringan meteorologis paling tinggi terhadap terjadinya defisit air. Informasi tersebut menjadi penting sebagai dasar penyusunan strategi mitigasi dan pengelolaan sumber daya air yang lebih adaptif, khususnya bagi instansi pengelola wilayah sungai dan pemerintah daerah dalam menghadapi peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrem di masa mendatang (WMO, 2012).

2.2 Curah Hujan dan Kekeringan Meteorologis

Ketersediaan air dalam suatu wilayah hidrologi pada dasarnya sangat ditentukan oleh dinamika

curah hujan sebagai variabel input utama dalam siklus hidrologi. Dalam konteks sistem Daerah Aliran Sungai (DAS), curah hujan tidak hanya berfungsi sebagai sumber utama air permukaan, tetapi juga menjadi pengendali utama terhadap seluruh proses hidrologis yang terjadi di dalamnya, termasuk infiltrasi, limpasan permukaan, serta pengisian air tanah. Oleh karena itu, perubahan kecil dalam pola curah hujan dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap keseimbangan neraca air suatu wilayah. Menurut Chow et al. (1988), curah hujan merupakan variabel hidrologi yang paling fundamental karena bersifat tidak terkontrol namun memiliki pengaruh langsung terhadap seluruh komponen aliran dalam suatu DAS.

Seiring dengan perkembangan ilmu hidrologi modern, curah hujan tidak lagi hanya dipahami sebagai fenomena meteorologis semata, tetapi juga sebagai indikator utama dalam analisis variabilitas iklim dan risiko bencana hidrometeorologi. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023) menyatakan bahwa perubahan pola curah hujan global telah menunjukkan kecenderungan yang semakin tidak stabil, ditandai dengan meningkatnya intensitas hujan ekstrem di satu sisi dan periode kering yang lebih panjang di sisi lain. Ketidakseimbangan ini secara langsung berdampak pada meningkatnya tingkat kekeringan meteorologis, terutama pada wilayah-wilayah yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap sistem air permukaan seperti DAS Bengawan Solo.

2.2.1 Curah Hujan

Curah hujan secara hidrologis didefinisikan sebagai jumlah air yang jatuh ke permukaan bumi dalam bentuk cair maupun padat yang berasal dari proses kondensasi uap air di atmosfer. Parameter ini umumnya dinyatakan dalam satuan milimeter (mm) dan menjadi komponen utama dalam perhitungan neraca air suatu wilayah. Menurut Subramanya (2017), curah hujan merupakan input utama dalam sistem hidrologi yang akan mengalami berbagai proses transformasi sebelum menjadi aliran permukaan, air tanah, maupun evapotranspirasi.

Dalam siklus hidrologi, curah hujan memiliki peran yang sangat penting sebagai penggerak utama seluruh proses aliran air. Ketika hujan jatuh ke permukaan tanah, sebagian air akan mengalami intersepsi oleh vegetasi, sebagian lainnya meresap ke dalam tanah melalui proses infiltrasi, dan sisanya mengalir sebagai limpasan permukaan menuju jaringan sungai. Proses ini sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik wilayah seperti jenis tanah, kemiringan lereng, serta tutupan lahan (Chow et al., 1988). Dengan demikian, curah hujan tidak dapat dipisahkan dari kondisi spasial suatu wilayah karena respon hidrologi yang dihasilkan akan berbeda pada setiap karakteristik DAS.

Selain sebagai komponen input utama, curah hujan juga berfungsi sebagai indikator utama dalam analisis variabilitas iklim. Dalam konteks perubahan iklim global, fluktuasi curah hujan menjadi salah satu parameter yang paling sensitif terhadap perubahan kondisi atmosfer. Berdasarkan laporan IPCC (2023), peningkatan suhu global telah mengubah pola sirkulasi atmosfer yang berdampak pada distribusi curah hujan yang semakin tidak merata secara spasial maupun temporal. Kondisi ini menyebabkan beberapa wilayah mengalami kelebihan air dalam bentuk banjir, sementara wilayah lainnya mengalami defisit air yang berkepanjangan.

Dalam kajian kekeringan meteorologis, data curah hujan menjadi satu-satunya variabel utama yang digunakan untuk mengukur tingkat penyimpangan kondisi normal iklim. Oleh

karena itu, akurasi dan kontinuitas data curah hujan menjadi faktor yang sangat menentukan dalam keberhasilan analisis indeks kekeringan seperti *Standardized Precipitation Index* (SPI). Tanpa data curah hujan yang representatif, analisis kekeringan tidak dapat mencerminkan kondisi hidrologi sebenarnya di lapangan (WMO, 2012).

2.2.2 Kekeringan Meteorologis

Kekeringan meteorologis merupakan salah satu bentuk kekeringan yang paling awal terjadi dalam sistem hidrologi dan ditandai dengan adanya penurunan curah hujan secara signifikan di bawah kondisi normal dalam periode waktu tertentu. Berbeda dengan jenis kekeringan lainnya seperti kekeringan hidrologis atau agronomis, kekeringan meteorologis lebih berfokus pada anomali atmosfer yang menyebabkan berkurangnya input air ke dalam sistem DAS. Menurut Wilhite dan Glantz (1985), kekeringan meteorologis merupakan kondisi awal dari rangkaian proses kekeringan yang dapat berkembang menjadi dampak yang lebih luas apabila berlangsung dalam jangka waktu panjang.

Karakteristik utama dari kekeringan meteorologis adalah sifatnya yang relatif cepat terjadi namun sulit diprediksi secara presisi. Hal ini disebabkan oleh tingginya variabilitas atmosfer yang dipengaruhi oleh berbagai faktor global seperti *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), *Indian Ocean Dipole* (IOD), serta perubahan suhu permukaan laut. Kondisi tersebut menyebabkan distribusi curah hujan menjadi tidak stabil dan sulit diprediksi dalam skala waktu jangka panjang (Dai, 2011). Akibatnya, wilayah yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap curah hujan akan lebih rentan terhadap perubahan kondisi atmosfer yang ekstrem.

Dalam analisis hidrologi modern, kekeringan meteorologis umumnya diukur menggunakan indeks statistik berbasis deviasi curah hujan terhadap nilai rata-rata jangka panjang. Salah satu metode yang paling banyak digunakan secara global adalah *Standardized Precipitation Index* (SPI) yang dikembangkan oleh McKee et al. (1993). Metode ini memungkinkan identifikasi tingkat kekeringan dalam berbagai skala waktu, mulai dari satu bulan hingga beberapa tahun, sehingga dapat digunakan untuk menganalisis dampak kekeringan jangka pendek maupun jangka panjang.

Kekeringan meteorologis memiliki dampak yang sangat luas karena menjadi pemicu awal terganggunya seluruh sistem hidrologi dalam suatu DAS. Ketika curah hujan berada di bawah normal dalam waktu yang lama, maka cadangan air tanah akan menurun, debit sungai berkurang, dan ketersediaan air permukaan menjadi terbatas. Kondisi ini kemudian akan berkembang menjadi kekeringan hidrologis dan berdampak langsung terhadap sektor pertanian, ketersediaan air bersih, serta stabilitas ekonomi masyarakat (Tallaksen & Van Lanen, 2004).

2.2.3 Dampak Kekeringan pada DAS Bengawan Solo Hilir

Wilayah hilir DAS Bengawan Solo merupakan salah satu kawasan yang paling terdampak oleh fenomena kekeringan meteorologis di Pulau Jawa. Kondisi ini tidak terlepas dari karakteristik wilayah yang didominasi oleh dataran rendah aluvial dengan ketergantungan tinggi terhadap sistem irigasi berbasis sungai utama. Ketika terjadi penurunan curah hujan dalam periode tertentu, dampaknya akan langsung dirasakan oleh sektor pertanian yang menjadi tulang punggung ekonomi masyarakat di wilayah Bojonegoro, Tuban, dan Lamongan.

Sektor pertanian di wilayah hilir sangat bergantung pada ketersediaan air irigasi, terutama untuk tanaman padi yang membutuhkan suplai air relatif stabil sepanjang musim tanam. Menurut data Kementerian Pertanian (2022), penurunan indeks curah hujan pada musim kemarau panjang sering kali menyebabkan penurunan luas tanam dan peningkatan risiko gagal panen (puso). Kondisi ini menunjukkan bahwa kekeringan meteorologis tidak hanya berdampak pada aspek hidrologi, tetapi juga secara langsung mempengaruhi ketahanan pangan regional.

Dalam sistem irigasi Bengawan Solo, Bendung Colo memiliki peran strategis sebagai pengatur utama distribusi air ke wilayah Jawa Tengah bagian timur dan Jawa Timur bagian barat. Ketika debit Sungai Bengawan Solo menurun akibat kekeringan meteorologis, maka kapasitas distribusi air melalui Bendung Colo juga akan mengalami penurunan signifikan. Hal ini berdampak pada terganggunya suplai air ke jaringan irigasi sekunder dan tersier yang menopang lahan pertanian di wilayah hilir (BBWS Bengawan Solo, 2022).

Selain itu, Waduk Gajah Mungkur yang berada di wilayah hulu juga memiliki peran penting dalam pengaturan debit Sungai Bengawan Solo. Waduk ini berfungsi sebagai penyangga utama aliran air pada musim hujan dan penyedia cadangan air pada musim kemarau. Namun, dalam kondisi kekeringan meteorologis yang berkepanjangan, kapasitas tampungan waduk dapat mengalami penurunan sehingga tidak mampu lagi memenuhi kebutuhan air secara optimal di wilayah hilir. Kondisi ini memperkuat fakta bahwa ketahanan air di hilir sangat bergantung pada keseimbangan hidrologi di seluruh sistem DAS (Asdak, 2023).

Dampak kekeringan di hilir Bengawan Solo juga meluas pada sektor domestik, terutama dalam pemenuhan kebutuhan air bersih masyarakat. Ketika debit sungai menurun, banyak desa di wilayah Bojonegoro dan Lamongan mengalami krisis air bersih yang mengharuskan adanya distribusi bantuan air dari pemerintah daerah. Situasi ini menunjukkan bahwa kekeringan meteorologis telah berkembang menjadi permasalahan sosial-ekonomi yang kompleks, bukan hanya sekadar fenomena alam (BPBD Jawa Timur, 2023).

Dengan demikian, dapat dipahami bahwa kekeringan meteorologis di DAS Bengawan Solo Hilir merupakan hasil interaksi kompleks antara variabilitas iklim, karakteristik fisik wilayah, serta sistem pengelolaan sumber daya air. Kondisi ini menegaskan pentingnya pendekatan analitis berbasis data jangka panjang seperti SPI dalam mengidentifikasi pola kekeringan secara lebih presisi dan berkelanjutan.

2.3 Standardized Precipitation Index (SPI)

Dalam kajian hidrologi, kebutuhan akan indikator yang mampu menggambarkan kondisi kekeringan secara objektif, konsisten, dan dapat dibandingkan antar wilayah menjadi semakin penting seiring meningkatnya variabilitas iklim global. Salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan dalam dekade terakhir adalah *Standardized Precipitation Index* (SPI), yang diperkenalkan sebagai metode statistik untuk mengukur anomali curah hujan terhadap kondisi normal jangka panjang. SPI menjadi salah satu instrumen utama dalam analisis kekeringan meteorologis karena kemampuannya dalam merepresentasikan tingkat penyimpangan curah hujan secara standar tanpa dipengaruhi oleh karakteristik fisik wilayah tertentu (McKee et al.,

1993).

Dalam konteks global, SPI telah direkomendasikan oleh *World Meteorological Organization* (WMO) sebagai indikator utama dalam sistem monitoring kekeringan karena kesederhanaan konsepnya namun tetap memiliki ketelitian statistik yang tinggi. Berbeda dengan indeks kekeringan lain yang membutuhkan banyak parameter hidrologi tambahan, SPI hanya bergantung pada data curah hujan jangka panjang yang kemudian diolah secara statistik untuk menghasilkan nilai indeks yang dapat menggambarkan kondisi basah maupun kering dalam suatu wilayah. Hal ini menjadikan SPI sangat fleksibel untuk diterapkan pada berbagai skala wilayah, termasuk DAS dengan karakteristik kompleks seperti Bengawan Solo (WMO, 2012).

Keunggulan utama SPI terletak pada kemampuannya dalam mengubah data curah hujan yang bersifat acak dan tidak terdistribusi normal menjadi bentuk distribusi standar normal (z-score), sehingga memungkinkan interpretasi kondisi kekeringan secara universal. Dengan demikian, nilai SPI tidak hanya merepresentasikan jumlah curah hujan, tetapi juga tingkat deviasi terhadap kondisi klimatologis normal yang telah dihitung dalam periode tertentu. Kondisi ini menjadikan SPI sebagai alat analisis yang sangat efektif dalam mendeteksi awal terjadinya kekeringan meteorologis sebelum dampaknya berkembang menjadi kekeringan hidrologis maupun agronomis (Guttman, 1999).

2.3.1 Pengertian SPI

Standardized Precipitation Index (SPI) merupakan indeks statistik yang digunakan untuk mengukur tingkat anomali curah hujan dalam suatu wilayah terhadap kondisi rata-rata jangka panjangnya. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh McKee et al. (1993) sebagai upaya untuk menciptakan indikator kekeringan yang dapat diaplikasikan secara universal pada berbagai kondisi iklim tanpa bergantung pada variabel hidrologi tambahan. SPI dirancang untuk memberikan representasi kuantitatif terhadap kondisi basah dan kering berdasarkan deviasi curah hujan dari nilai normal yang telah ditentukan.

Menurut McKee et al. (1993), SPI dihitung berdasarkan distribusi probabilitas curah hujan yang kemudian ditransformasikan ke dalam distribusi normal standar dengan nilai rata-rata nol dan standar deviasi satu. Dengan pendekatan ini, nilai SPI positif menunjukkan kondisi lebih basah dari normal, sedangkan nilai negatif menunjukkan kondisi lebih kering dari normal. Semakin kecil nilai SPI, semakin parah tingkat kekeringan yang terjadi dalam suatu periode tertentu.

Dalam perkembangannya, SPI telah digunakan secara luas dalam berbagai studi hidrologi dan klimatologi karena kemampuannya dalam mengidentifikasi kekeringan pada berbagai skala waktu. Vicente-Serrano et al. (2010) menyatakan bahwa SPI merupakan salah satu indeks kekeringan paling fleksibel karena hanya memerlukan data curah hujan, namun tetap mampu memberikan informasi yang kuat mengenai kondisi kelembaban atmosfer. Oleh karena itu, SPI menjadi standar global dalam analisis kekeringan meteorologis di berbagai wilayah dunia.

Keberadaan SPI dalam kajian hidrologi modern tidak hanya berfungsi sebagai alat ukur, tetapi juga sebagai sistem peringatan dini terhadap potensi kekeringan. Dengan memanfaatkan

data historis curah hujan jangka panjang, SPI mampu memberikan gambaran tren perubahan kondisi iklim yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan pengelolaan sumber daya air secara lebih adaptif dan berkelanjutan (WMO, 2012).

2.3.2 Prinsip Dasar Perhitungan SPI

Secara matematis, perhitungan *Standardized Precipitation Index* (SPI) didasarkan pada pendekatan statistik yang memanfaatkan distribusi probabilitas curah hujan, khususnya distribusi Gamma, untuk merepresentasikan karakteristik data curah hujan yang umumnya bersifat skewed atau tidak simetris. Distribusi Gamma dipilih karena mampu menggambarkan karakteristik data curah hujan yang bernilai positif dan memiliki sebaran yang tidak normal (Thom, 1958).

Fungsi probabilitas dari distribusi Gamma dinyatakan sebagai berikut:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0 \quad \text{..... (2.1)}$$

di mana:

- x = curah hujan,
- α = parameter bentuk (shape parameter),
- β = parameter skala (scale parameter),
- $\Gamma(\alpha)$ = fungsi gamma.

Parameter α dan β diperoleh melalui metode estimasi statistik. Dalam penelitian ini, estimasi parameter dilakukan menggunakan *Method of Moments* (MoM) berdasarkan nilai rata-rata dan varians data curah hujan historis. Setelah parameter distribusi diperoleh, probabilitas kumulatif curah hujan dihitung menggunakan distribusi Gamma, kemudian ditransformasikan ke dalam distribusi normal standar untuk memperoleh nilai SPI.

Transformasi ini dilakukan agar nilai curah hujan yang awalnya mengikuti distribusi Gamma dapat diubah menjadi nilai SPI yang mengikuti distribusi normal dengan mean nol dan standar deviasi satu. Proses transformasi ini sangat penting karena memungkinkan perbandingan kondisi kekeringan antar wilayah dan antar waktu secara konsisten (Guttman, 1999).

Dengan pendekatan ini, SPI tidak hanya menjadi indikator statistik, tetapi juga representasi dari tingkat deviasi hidrologis suatu wilayah terhadap kondisi normalnya. Oleh karena itu, metode ini dianggap lebih unggul dibandingkan pendekatan sederhana berbasis persentil karena memiliki dasar probabilistik yang lebih kuat dan stabil secara matematis (Mishra & Singh, 2010).

2.3.3 Skala Waktu SPI

Salah satu keunggulan utama *Standardized Precipitation Index* (SPI) adalah fleksibilitasnya dalam digunakan pada berbagai skala waktu, yang memungkinkan analisis kekeringan

dilakukan secara multi-dimensi. 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.

$$X_t = P_t \quad \text{..... (2.2)}$$

di mana:

X_t = curah hujan terakumulasi pada bulan ke- t

P_t = curah hujan bulan ke- t

Skala ini umumnya digunakan untuk mengidentifikasi kekeringan meteorologis yang bersifat sangat cepat dan responsif terhadap perubahan atmosfer. SPI-1 sangat berguna dalam pemantauan kondisi cuaca terkini dan sering digunakan sebagai indikator awal dalam sistem peringatan dini kekeringan (WMO, 2012).

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

$$X_t = P_t + P_{t-1} + P_{t-2} \quad \text{..... (2.3)}$$

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

Skala ini sangat relevan dalam analisis dampak kekeringan terhadap sektor pertanian, terutama tanaman semusim yang sangat bergantung pada ketersediaan air dalam periode tanam tertentu. Pada skala ini, dampak kekeringan mulai terlihat lebih jelas pada penurunan kelembaban tanah dan produktivitas lahan (Vicente-Serrano et al., 2010).

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

$$X_t = P_t + P_{t-1} + P_{t-2} + P_{t-3} + P_{t-4} + P_{t-5} \quad \text{..... (2.4)}$$

Skala ini sering digunakan untuk menggambarkan kondisi defisit curah hujan jangka menengah yang berkaitan dengan kemungkinan tekanan terhadap sistem hidrologi. Dengan demikian, SPI-6 memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kondisi ketersediaan air dalam sistem DAS (Mishra & Singh, 2010).

Ketiga skala waktu tersebut memberikan fleksibilitas analisis yang sangat penting

dalam memahami dinamika kekeringan secara menyeluruh, mulai dari skala atmosfer hingga dampaknya terhadap sistem hidrologi dan sosial-ekonomi masyarakat.

2.3.4 Klasifikasi Kekeringan SPI

Interpretasi nilai *Standardized Precipitation Index* (SPI) dilakukan berdasarkan klasifikasi numerik yang menggambarkan tingkat kondisi basah hingga kekeringan ekstrem dalam suatu wilayah. Klasifikasi ini memungkinkan hasil analisis SPI diterjemahkan ke dalam bentuk yang lebih mudah dipahami oleh pemangku kebijakan maupun peneliti.

Secara umum, nilai SPI berkisar dari positif hingga negatif, di mana nilai positif menunjukkan kondisi lebih basah dari normal, sedangkan nilai negatif menunjukkan kondisi lebih kering dari normal. Semakin kecil nilai SPI, semakin tinggi tingkat keparahan kekeringan yang terjadi.

Berikut klasifikasi SPI yang umum digunakan dalam kajian hidrologi (McKee et al., 1993; WMO, 2012):

Tabel 2. 1 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>)

Klasifikasi ini menjadi dasar penting dalam interpretasi spasial maupun temporal kondisi kekeringan, terutama dalam studi berbasis DAS seperti Bengawan Solo. Dengan adanya klasifikasi ini, hasil perhitungan SPI tidak hanya bersifat numerik, tetapi juga dapat diterjemahkan menjadi informasi kondisi yang relevan untuk mitigasi bencana dan pengambilan keputusan.

Dalam konteks penelitian ini, klasifikasi SPI digunakan untuk memetakan tingkat kekeringan meteorologis di wilayah hilir DAS Bengawan Solo, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai distribusi spasial risiko kekeringan berdasarkan variasi curah hujan jangka panjang. Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan informasi yang lebih aplikatif bagi pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan.

2.4 Pengolahan Data Curah Hujan

Dalam kajian hidrologi berbasis data deret waktu, kualitas hasil analisis sangat ditentukan oleh kualitas data input yang digunakan. Curah hujan sebagai variabel utama dalam analisis

kekeringan meteorologis memiliki karakteristik yang sangat dinamis, tidak teratur, serta rentan terhadap ketidaklengkapan data akibat gangguan pengukuran di lapangan. Oleh karena itu, sebelum digunakan dalam analisis lebih lanjut seperti perhitungan *Standardized Precipitation Index* (SPI), data curah hujan terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan kelengkapan data, pengujian kualitas, dan homogenitas data untuk memastikan konsistensi deret waktu yang digunakan. Menurut Helsel dan Hirsch (2002), data hidrologi yang tidak lengkap dan tidak homogen dapat menyebabkan bias signifikan dalam interpretasi statistik dan menghasilkan kesimpulan yang tidak representatif terhadap kondisi sebenarnya di lapangan.

Dalam konteks analisis kekeringan pada DAS, pengolahan data curah hujan menjadi tahapan krusial karena kesalahan kecil dalam data historis dapat berdampak pada distorsi hasil indeks kekeringan. Hal ini menjadi semakin penting pada wilayah dengan kompleksitas hidrologi tinggi seperti DAS Bengawan Solo, di mana variasi spasial curah hujan sangat dipengaruhi oleh faktor topografi, iklim lokal, dan pola atmosfer regional. Oleh sebab itu, diperlukan metode pengolahan data yang tidak hanya bersifat matematis, tetapi juga mampu mempertahankan karakteristik statistik asli dari data curah hujan tersebut (WMO, 2008).

2.4.1 Data Curah Hujan dalam Analisis SPI

Data curah hujan merupakan komponen utama dalam perhitungan *Standardized Precipitation Index* (SPI). Oleh karena itu, data yang digunakan harus memiliki kualitas yang baik, tersusun secara kontinu, serta mewakili kondisi hidrologi wilayah penelitian. Menurut WMO (2012), penggunaan data curah hujan yang lengkap dan konsisten akan menghasilkan distribusi probabilitas yang lebih representatif sehingga nilai SPI yang diperoleh lebih akurat.

Pada penelitian ini digunakan data curah hujan bulanan dari delapan pos hujan periode 2008–2024 yang memiliki rekaman lengkap sehingga tidak diperlukan proses pengisian data hilang (*missing data imputation*). Dengan demikian, seluruh analisis SPI dilakukan menggunakan data observasi tanpa proses estimasi maupun interpolasi.

2.4.2 Uji Homogenitas Data (RAPS)

Sebelum data curah hujan digunakan dalam analisis *Standardized Precipitation Index* (SPI), perlu dilakukan pengujian homogenitas untuk memastikan bahwa deret waktu data memiliki karakteristik yang konsisten selama periode pengamatan. Uji homogenitas bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam analisis tidak mengalami perubahan sistematis akibat faktor non-klimatologis, seperti perubahan lokasi stasiun, penggantian alat ukur, maupun perubahan lingkungan di sekitar stasiun hujan. Data yang tidak homogen dapat menyebabkan bias dalam analisis tren iklim dan kekeringan sehingga hasil yang diperoleh menjadi kurang representatif (Peterson et al., 1998).

Salah satu metode yang umum digunakan untuk menguji homogenitas data curah hujan adalah *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS). Metode ini digunakan untuk mendeteksi adanya perubahan struktural dalam deret waktu data hidrologi dengan cara menganalisis deviasi kumulatif dari nilai rata-rata data. RAPS bekerja dengan membandingkan akumulasi deviasi terhadap standar deviasi data sehingga dapat mengidentifikasi titik perubahan (*breakpoint*) dalam seri data curah hujan. Secara matematis, prosedur perhitungan metode RAPS dinyatakan

sebagai berikut:

Langkah 1: Simpangan kumulatif Y_k

$$Y_k = \sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad \text{..... (2.5)}$$

Dengan:

Y_k = simpangan kumulatif hingga pengamatan ke- k ;

X_i = data curah hujan pada pengamatan ke- i ;

$\bar{X}$ = rata-rata data curah hujan; dan

N = jumlah data pengamatan.

Langkah 2: Standar deviasi D_y

$$D_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{..... (2.6)}$$

Langkah 3: Statistik S_k^{**} dan Q

$$S_k^{**} = \frac{Y_k}{D_y}; \quad Q = \max |S_k^{**}| \quad \text{..... (2.7)}$$

$$R = \max(S_k^{**}) - \min(S_k^{**}) \quad \text{..... (2.8)}$$

Nilai statistik $Q/\sqrt{n}$ dan $R/\sqrt{n}$ kemudian dibandingkan dengan nilai kritis (*critical value*) menurut Buishand (1982) pada taraf signifikansi 5%. Data dinyatakan homogen apabila nilai statistik yang diperoleh lebih kecil daripada nilai kritis yang sesuai dengan jumlah data pengamatan.

Menurut Wijngaard et al. (2003), metode RAPS sangat efektif dalam mendeteksi ketidakhomogenan pada data iklim jangka panjang karena mampu mengidentifikasi perubahan kecil yang tidak dapat terdeteksi melalui analisis statistik sederhana. Dalam konteks hidrologi DAS, uji homogenitas menjadi sangat penting karena perubahan kecil pada data curah hujan dapat berdampak besar terhadap hasil analisis kekeringan berbasis SPI.

Lebih lanjut, *World Meteorological Organization* (WMO, 2008) menekankan bahwa homogenitas data merupakan salah satu syarat utama dalam analisis iklim jangka panjang, khususnya untuk studi yang berkaitan dengan perubahan iklim dan variabilitas hidrologi. Oleh karena itu, penerapan uji RAPS dalam penelitian ini bertujuan untuk memastikan bahwa data curah hujan yang digunakan benar-benar merepresentasikan kondisi atmosfer alami tanpa adanya bias akibat faktor non-meteorologis.

Dengan demikian, pengujian homogenitas menggunakan metode *Rescaled Adjusted Partial Sums* (RAPS) merupakan tahapan penting dalam pengendalian kualitas data curah hujan sebelum digunakan dalam perhitungan *Standardized Precipitation Index* (SPI). Melalui pengujian ini dapat dipastikan bahwa data yang dianalisis memiliki karakteristik yang konsisten sehingga hasil analisis kekeringan meteorologis menjadi lebih andal.

2.5 Metode Poligon Thiessen

Dalam analisis hidrologi berbasis wilayah tangkapan air, salah satu tantangan utama yang sering dihadapi adalah bagaimana merepresentasikan curah hujan titik (point rainfall) menjadi curah hujan areal (areal rainfall) yang mampu menggambarkan kondisi spasial secara lebih realistis. Hal ini menjadi penting karena curah hujan tidak terjadi secara merata di seluruh permukaan DAS, melainkan memiliki variasi spasial yang dipengaruhi oleh faktor topografi, jarak dari sumber uap air, serta dinamika atmosfer lokal. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode interpolasi yang mampu mengubah data titik menjadi representasi wilayah yang lebih representatif. Salah satu metode yang paling umum digunakan dalam hidrologi klasik adalah metode Poligon Thiessen (Thiessen Polygon Method) (Chow et al., 1988).

Metode Poligon Thiessen pertama kali diperkenalkan oleh Alfred H. Thiessen sebagai pendekatan geometris untuk menentukan pengaruh relatif setiap stasiun hujan terhadap suatu wilayah tertentu. Dalam perkembangannya, metode ini menjadi salah satu teknik standar dalam analisis curah hujan areal karena kesederhanaannya namun tetap memberikan hasil yang cukup representatif dalam banyak aplikasi hidrologi praktis. Menurut WMO (2008), metode ini masih digunakan secara luas dalam studi hidrologi DAS karena mampu memberikan estimasi curah hujan areal dengan tingkat akurasi yang memadai, terutama pada wilayah dengan distribusi stasiun hujan yang tidak terlalu rapat.

Dalam konteks DAS seperti Bengawan Solo, di mana kondisi topografi dan sebaran stasiun hujan tidak selalu seragam, metode Thiessen menjadi pendekatan yang relevan untuk mengatasi ketidakteraturan distribusi data spasial. Setiap stasiun hujan dianggap memiliki wilayah pengaruh tertentu yang dibentuk berdasarkan jarak terdekat antar stasiun, sehingga seluruh area DAS dapat dibagi menjadi beberapa poligon yang saling tidak tumpang tindih. Dengan demikian, setiap titik dalam suatu poligon diasumsikan memiliki pengaruh curah hujan yang sama dengan stasiun hujan yang berada di dalamnya (Singh, 1992).

2.5.1 Pengertian Thiessen

Metode Poligon Thiessen merupakan teknik geometris dalam hidrologi yang digunakan untuk mengestimasi curah hujan rata-rata areal berdasarkan distribusi stasiun hujan yang tersedia dalam suatu wilayah. Metode ini bekerja dengan prinsip pembagian wilayah berdasarkan kedekatan jarak antar stasiun hujan, di mana setiap stasiun akan memiliki area pengaruh tertentu yang dibentuk melalui garis sumbu tegak lurus antar titik stasiun yang berdekatan. Hasil dari pembagian tersebut menghasilkan poligon-polygon yang tidak saling tumpang tindih dan mencakup seluruh wilayah kajian.

Menurut Chow et al. (1988), metode Thiessen merupakan salah satu metode paling awal yang digunakan dalam analisis curah hujan areal dan masih relevan hingga saat ini karena

kesederhanaannya dalam implementasi serta tidak memerlukan data tambahan selain lokasi spasial stasiun hujan. Metode ini mengasumsikan bahwa curah hujan pada suatu titik dalam wilayah poligon dianggap sama dengan curah hujan pada stasiun yang berada di dalam poligon tersebut.

Secara konseptual, metode ini juga mencerminkan prinsip dasar dalam analisis spasial hidrologi, yaitu bahwa pengaruh suatu stasiun hujan terhadap suatu wilayah akan berkurang seiring dengan bertambahnya jarak. Oleh karena itu, pembentukan poligon dilakukan dengan mempertimbangkan jarak terdekat antar stasiun sebagai faktor utama dalam menentukan batas wilayah pengaruh masing-masing titik pengamatan (Maidment, 1993).

Dalam konteks pengelolaan DAS, metode Thiessen menjadi penting karena mampu memberikan representasi spasial curah hujan yang lebih realistis dibandingkan dengan pendekatan rata-rata aritmatika sederhana. Hal ini disebabkan karena setiap stasiun memiliki bobot pengaruh yang berbeda sesuai dengan luas wilayah poligon yang diwakilinya, sehingga hasil perhitungan curah hujan areal menjadi lebih akurat dan representatif terhadap kondisi sebenarnya di lapangan (WMO, 2008).

2.5.2 Prinsip Pembobotan Curah Hujan Areal

Prinsip utama dalam metode Poligon Thiessen adalah pembobotan berdasarkan luas pengaruh setiap stasiun hujan terhadap total wilayah kajian. Dalam pendekatan ini, setiap stasiun hujan tidak dianggap memiliki kontribusi yang sama, melainkan memiliki bobot yang berbeda tergantung pada luas poligon yang diwakilinya. Semakin luas wilayah poligon suatu stasiun, maka semakin besar pula kontribusinya terhadap nilai curah hujan rata-rata areal. Konsep ini sangat penting dalam hidrologi karena mampu mengakomodasi ketidakmerataan distribusi stasiun hujan dalam suatu DAS.

Menurut Singh (1992), pembobotan dalam metode Thiessen merupakan bentuk pendekatan spasial sederhana yang tetap mampu menghasilkan estimasi curah hujan areal yang cukup akurat, terutama pada wilayah dengan variasi topografi moderat. Prinsip ini didasarkan pada asumsi bahwa variasi curah hujan antar stasiun dapat direpresentasikan secara linier berdasarkan kedekatan geografis, sehingga pengaruh suatu stasiun akan menurun secara proporsional terhadap jaraknya dari titik analisis.

Dalam implementasinya, setiap poligon yang terbentuk akan dihitung luasnya, kemudian luas tersebut digunakan sebagai bobot dalam perhitungan curah hujan rata-rata wilayah. Dengan demikian, kontribusi setiap stasiun terhadap curah hujan areal tidak hanya bergantung pada nilai curah hujan yang tercatat, tetapi juga pada seberapa besar wilayah yang diwakili oleh stasiun tersebut. Pendekatan ini menjadikan hasil analisis lebih representatif terhadap distribusi spasial hujan dalam DAS (Chow et al., 1988).

Lebih lanjut, *World Meteorological Organization* (WMO, 2008) menegaskan bahwa metode berbasis pembobotan seperti Thiessen tetap menjadi standar dalam analisis hidrologi dasar karena keseimbangan antara kesederhanaan konsep dan akurasi hasil. Dalam konteks DAS Bengawan Solo, prinsip pembobotan ini sangat relevan mengingat sebaran stasiun hujan yang tidak merata antara wilayah hulu dan hilir, sehingga diperlukan pendekatan yang mampu mengakomodasi ketimpangan spasial tersebut secara objektif.

2.5.3 Rumus Thiessen

Secara matematis, perhitungan curah hujan areal menggunakan metode Poligon Thiessen dinyatakan sebagai penjumlahan hasil perkalian antara curah hujan pada setiap stasiun dengan bobot luas wilayah pengaruhnya. Rumus dasar metode Thiessen dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{..... (2.9)}$$

di mana:

- $\bar{P}$ = curah hujan rata-rata areal,
- P_i = curah hujan pada stasiun ke-i,
- A_i = luas poligon Thiessen pada stasiun ke-i,
- ΣA_i = total luas wilayah DAS.

Menurut Chow et al. (1988), rumus ini merupakan bentuk sederhana dari pendekatan weighted average dalam analisis hidrologi spasial, di mana setiap nilai curah hujan dikalikan dengan bobot relatifnya sebelum dijumlahkan untuk memperoleh nilai rata-rata wilayah. Bobot A_i dalam metode ini merepresentasikan proporsi pengaruh setiap stasiun terhadap total wilayah kajian.

Dalam praktiknya, perhitungan metode Thiessen dilakukan dengan terlebih dahulu membentuk poligon berdasarkan lokasi stasiun hujan menggunakan pendekatan geometri Voronoi. Setelah poligon terbentuk, luas masing-masing poligon dihitung menggunakan perangkat GIS, kemudian nilai luas tersebut digunakan sebagai bobot dalam perhitungan curah hujan areal. Proses ini memungkinkan transformasi data titik menjadi data spasial yang lebih representatif terhadap kondisi hidrologi wilayah (Maidment, 1993).

Keunggulan dari metode ini terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan estimasi curah hujan areal tanpa memerlukan interpolasi kompleks seperti metode kriging atau spline. Meskipun demikian, metode Thiessen tetap memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan variasi topografi secara langsung, sehingga akurasinya dapat menurun pada wilayah dengan kondisi orografis yang sangat kompleks (WMO, 2008).

Namun demikian, dalam konteks penelitian ini yang berfokus pada analisis kekeringan berbasis SPI di DAS Bengawan Solo, metode Thiessen tetap menjadi pilihan yang relevan karena mampu memberikan representasi spasial curah hujan yang cukup stabil dalam skala DAS besar. Dengan demikian, hasil perhitungan curah hujan areal yang diperoleh dapat digunakan sebagai input yang valid dalam analisis indeks kekeringan yang lebih lanjut.

2.6 Sistem Informasi Geografis (SIG)

Dalam perkembangan ilmu kebencanaan dan hidrologi modern, kebutuhan akan sistem yang mampu mengintegrasikan data spasial dan atribut secara simultan menjadi semakin penting. Fenomena hidrologi seperti kekeringan tidak dapat dipahami hanya melalui data numerik semata, tetapi juga memerlukan representasi spasial yang mampu menggambarkan distribusi

kejadian secara keruangan. Dalam konteks inilah Sistem Informasi Geografis (SIG) menjadi instrumen analisis yang sangat penting dalam berbagai studi hidrologi, termasuk pemetaan kekeringan meteorologis berbasis indeks seperti SPI.

Sistem Informasi Geografis (SIG) secara umum didefinisikan sebagai sistem berbasis komputer yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menyajikan data yang memiliki referensi geografis atau spasial. Menurut Burrough dan McDonnell (1998), SIG merupakan teknologi yang memungkinkan integrasi antara data spasial dan data atribut sehingga menghasilkan informasi yang lebih komprehensif untuk analisis pengambilan keputusan. Dalam konteks hidrologi, SIG berfungsi sebagai alat untuk memvisualisasikan pola distribusi curah hujan, aliran sungai, hingga tingkat kekeringan dalam suatu wilayah DAS.

Lebih jauh, perkembangan SIG tidak hanya terbatas pada visualisasi peta, tetapi juga telah berkembang menjadi sistem analisis spasial yang mampu melakukan overlay, interpolasi, hingga pemodelan hidrologi berbasis raster dan vektor. Longley et al. (2015) menyatakan bahwa SIG merupakan fondasi utama dalam analisis spasial modern karena kemampuannya dalam menghubungkan data geografis dengan fenomena dunia nyata secara dinamis. Dalam studi kekeringan, SIG memungkinkan identifikasi wilayah-wilayah kritis berdasarkan distribusi nilai indeks kekeringan yang dihitung dari data curah hujan jangka panjang.

Dalam konteks DAS Bengawan Solo, penggunaan SIG menjadi sangat relevan mengingat kompleksitas spasial wilayah yang mencakup variasi topografi, penggunaan lahan, serta distribusi curah hujan yang tidak merata. Dengan SIG, seluruh variabel tersebut dapat diintegrasikan dalam satu sistem analisis spasial yang memungkinkan identifikasi zona tingkat kekeringan secara lebih presisi. Oleh karena itu, SIG tidak hanya berfungsi sebagai alat pemetaan, tetapi juga sebagai sistem pendukung keputusan dalam pengelolaan sumber daya air berbasis wilayah.

2.6.1 Pengertian SIG

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan suatu sistem berbasis komputer yang dirancang untuk menangkap, menyimpan, memanipulasi, menganalisis, dan menampilkan data yang memiliki referensi geografis. SIG memungkinkan integrasi antara data spasial (peta) dan data non-spasial (atribut), sehingga menghasilkan informasi yang lebih kompleks dan mudah diinterpretasikan dalam konteks pengambilan keputusan. Menurut Burrough dan McDonnell (1998), SIG merupakan teknologi yang tidak hanya berfungsi sebagai alat pemetaan, tetapi juga sebagai sistem analisis spasial yang mampu menghubungkan fenomena geografis dengan data kuantitatif.

Dalam perspektif hidrologi, SIG memiliki peran penting dalam memetakan berbagai fenomena yang bersifat spasial seperti distribusi curah hujan, pola aliran sungai, daerah genangan, hingga tingkat kekeringan dan banjir. Dengan kemampuan tersebut, SIG menjadi alat yang sangat penting dalam analisis Daerah Aliran Sungai (DAS) karena mampu menggambarkan hubungan antara kondisi fisik wilayah dengan variabilitas hidrologi secara lebih komprehensif (Maguire et al., 2005).

Lebih lanjut, SIG juga memungkinkan dilakukannya analisis spasial lanjutan seperti

overlay, buffering, dan interpolasi yang sangat berguna dalam studi hidrologi. Longley et al. (2015) menjelaskan bahwa SIG merupakan salah satu teknologi inti dalam geoinformatika modern yang memungkinkan transformasi data mentah menjadi informasi spasial yang memiliki nilai analitis tinggi. Dalam konteks kekeringan meteorologis, SIG digunakan untuk memetakan distribusi nilai SPI sehingga dapat diidentifikasi wilayah-wilayah yang paling rentan terhadap defisit curah hujan.

Dengan demikian, SIG dapat dipahami sebagai sistem yang tidak hanya menyimpan data geografis, tetapi juga mampu mengolah dan menganalisis data tersebut menjadi informasi spasial yang dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan, khususnya dalam bidang pengelolaan sumber daya air dan mitigasi bencana hidrometeorologi.

2.6.2 Pemanfaatan QGIS dalam Pemetaan Kekeringan

Dalam perkembangan perangkat SIG modern, QGIS menjadi salah satu perangkat lunak open-source yang paling banyak digunakan dalam analisis spasial, termasuk dalam bidang hidrologi dan pemetaan kekeringan. QGIS memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis data spasial secara lengkap mulai dari pengolahan data vektor dan raster, interpolasi, hingga visualisasi peta tematik. Menurut Graser (2016), QGIS memiliki keunggulan dalam fleksibilitas dan keterbukaan sistem yang memungkinkan integrasi dengan berbagai plugin analisis spasial yang mendukung pemodelan geospasial kompleks.

Dalam konteks pemetaan kekeringan, QGIS digunakan untuk mengolah data curah hujan yang telah dihitung menggunakan metode seperti *Standardized Precipitation Index* (SPI) dan kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta spasial. Proses ini memungkinkan identifikasi wilayah dengan tingkat kekeringan berbeda secara lebih jelas dan terstruktur. Dengan memanfaatkan fitur raster calculator dan spatial interpolation, QGIS dapat menghasilkan peta distribusi kekeringan yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan.

Dalam penelitian ini, QGIS berperan sebagai platform utama dalam visualisasi hasil analisis SPI dan pembentukan peta tingkat kekeringan di wilayah hilir DAS Bengawan Solo. Dengan pendekatan ini, hasil analisis tidak hanya disajikan dalam bentuk angka statistik, tetapi juga dalam bentuk visual spasial yang lebih mudah dipahami oleh pemangku kebijakan seperti BBWS Bengawan Solo dan BPBD. Hal ini menjadikan QGIS sebagai instrumen penting dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data spasial yang lebih akurat dan adaptif terhadap perubahan iklim.