

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Penelusuran pustaka difokuskan pada isu-isu lingkungan yang terkait dengan ketersediaan air waduk yang terdampak oleh perubahan iklim dan kegiatan manusia, beserta pengelolaan berkelanjutan. Kajian dari perspektif lingkungan ini dibatasi pada implikasi ekologis dari dinamika volume air waduk. Faktor alam yang direpresentasikan oleh curah hujan maupun kegiatan manusia dan persepsinya mempengaruhi eksistensi ketersediaan air di waduk. Curah hujan berkorelasi dengan volume air waduk, yang akan dimanfaatkan oleh petani sebagai air irigasi pertanian. Kelestarian ketersediaan air di waduk tidak terhindarkan dari dinamika penggunaan lahan di daerah aliran sungai seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk. Persepsi masyarakat, baik yang menerima manfaat langsung adanya waduk maupun yang tidak, dapat menentukan kegiatannya dengan beragam kepentingan. Oleh karena itu, review artikel ilmiah untuk mendasari penelitian ini mencakup:

2.1 Curah hujan sebagai parameter perubahan iklim

Negara-negara berkembang diprediksi terdampak secara terus-menerus oleh variabilitas perubahan cuaca ekstrim (IPPC, 2007). Volatilitas curah hujan yang terjadi merupakan sebagian dampak dari perubahan iklim. Dampak lainnya adalah penurunan tanah dan banjir (Suripin et al., 2017). Ketidakpastian iklim menyebabkan curah hujan yang berfluktuatif dengan pola yang tidak menentu dan dalam selang waktu tertentu, yang dapat bersifat ekstrim (Sunusi et al., 2017). Perubahan pola curah

hujan dan iklim ekstrim dapat menyebabkan banjir atau kekeringan, dan sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang paling terdampak (Adibroto et al., 2011)

Curah hujan sebagai parameter lingkungan sering digunakan untuk melacak tingkat dan variabilitas perubahan iklim, yang berdampak pada ketersediaan air di masa mendatang (IPCC, 2007). Ketersediaan air, baik kuantitas maupun kualitasnya merupakan isu strategis dalam rangka ketahanan air, yang tertuang sebagai Sasaran nomor 6 dalam pencapaian TPB (UNEP, 2017). Perubahan iklim jangka panjang terkait dengan perubahan pola dan intensitas curah hujan berpotensi meningkatkan frekwensi terjadinya kekeringan atau banjir. Analisis tren berdasarkan data historis curah hujan diperlukan untuk mendeteksi tren variabel iklim (Asfaw et al., 2018), dan pada umumnya berpola gelombang periodik sinusoidal (Mahmood et al., 2019).

Perubahan pola curah hujan secara ekstrim, yakni curah hujan tinggi dengan durasi waktu pendek merupakan salah satu indikator terjadinya perubahan iklim. Perubahan iklim dengan perubahan yang bergejolak (volatile) diantara kelimpahan air dan kelangkaan air mempersulit pengelolaan ketersediaan airnya (Kuhn et al., 2016). Volatilitas curah hujan menunjukkan besar kecilnya fluktuasi data curah hujan, yaitu besar kecilnya deviasi terhadap rerata curah hujan perlu diamati dengan baik (Malinowski et al., 2018).

Potensi bencana hidrometeorologi bergantung pada volume curah hujan, intensitas dan durasi turunnya hujan. Kondisi perubahan iklim tidak hanya berdampak pada besar kecilnya volume air tetapi juga pada frekwensi dan luasnya banjir (Szewranski et al., 2015). Terjadinya banjir bandang atau tanah longsor sering

diawali dengan perubahan ekstrim intensitas curah hujan rendah ke tinggi dalam jangka waktu singkat, yang meningkatkan aliran sungai (Malinowski et al., 2018).

Ketika daya tampung waduk sudah terlampaui dan terjadi perubahan intensitas curah hujan yang tinggi maka air akan melimpah melalui spillway. Banjir bandang dapat terjadi ketika volume air limbah yang besar dan sungai atau drainase outletnya tidak mampu menampung volume air tersebut. Banjir bandang atau tanah longsor sering terjadi secara mendadak, sehingga menimbulkan banyak kerugian.

Perubahan ekstrim intensitas curah hujan dari tinggi ke rendah dalam durasi waktu yang cukup lama mengawali terjadinya bencana kekeringan. Kelangkaan air berdampak pada semua aspek kehidupan dan perekonomian (Uttaruk et al., 2017; Lopez-Nicolas et al., 2017). Perubahan iklim dapat terjadi pada suatu daerah lokal atau spesifik maupun global, yang berpotensi merubah siklus hidrologi dan ketersediaan air di waduk (Salami et al., 2015), frekwensi dan luasnya banjir (Szewranski et al., 2015), dan juga mempersulit penyusunan pola operasi waduk (Ehsani et al., 2017). Pola operasi waduk di Indonesia didasarkan pada hasil prakiraan curah hujan tertuang dalam PP nomor 37 tahun 2010 tentang bendungan (Republik Indonesia, 2010), sehingga pemahaman terhadap karakteristik (volatilitas dan tren) dan pola curah hujan lokal (Aydin et al., 2019) sangat diperlukan. dalam penyusunannya.

Analisis volatilitas curah hujan didasarkan pada perhitungan nilai koefisien variasi, indeks anomaly persipitasi terstandar (SPAI), dan indeks konsentrasi presipitasi PCI (Radzka,2014), sedangkan trennya dianalisis dengan uji Mann-

Kendall dan slope Sen (Mondal et al., 2012; Gasiorek et al., 2015; Asfaw et al., 2018; Zhang et al., 2019). SPAI dapat digunakan untuk menampilkan analisis kuantitatif terkait perubahan curah hujan dan mengidentifikasi potensi banjir atau kekeringan (Nury et al., 2016), dimana curah hujannya bersifat musiman dan periodik dalam konteks iklim yang didominasi monsoon (Chanda et al., 2015), seperti iklim di Indonesia. PCI merupakan fitur penting dalam perencanaan pengelolaan sumber daya air, prediksi atau berfungsi sebagai alat peringatan untuk potensi bencana hidrometeorologi (Ezenwaji et al., 2016). Kekeringan merupakan fenomena hidrologi waduk yang bervariasi, dengan ketidakpastian ketersediaan air di masa mendatang (Lopes-Nicolas et al., 2017),

Data runtun waktu hidro-meteorologi jangka panjang dapat digunakan untuk memprediksi variabilitas iklim jangka panjang. Metode ARIMA-Box Jenkins merupakan salah satu metode prediksi yang sering diterapkan untuk prediksi data runtun waktu curah hujan (Asadi et al., 2013; Farajzadeh et al., 2014). Unsur-unsur dasar dari seluruh skemanya untuk analisis deret runtun waktu meliputi pengenalan dan penentuan jenis-jenis model yang dapat dikembangkan untuk sekumpulan data deret berkala. Pendekatan Box-Jenkins untuk penerapan dalam model ARIMA meliputi identifikasi penaksiran, pengujian, dan penerapan (Makridakis et al., 1999). Model SARIMA merupakan model pengembangan dari model ARIMA untuk prediksi deret runtun waktu musiman dalam periode jangka pendek (Tseng et al., 2002).

2.2 Curah hujan mempengaruhi dinamika ketersediaan air waduk

Air hujan merupakan sumber air yang menentukan ketersediaan air waduk tadah hujan. Curah hujan yang tinggi dapat menyebabkan air melimpah melalui *spillway*. Model kesetimbangan air digunakan tidak hanya untuk menjelaskan kondisi hidrologis masa lalu tetapi juga dapat untuk memprediksi perilaku hidrologis dalam kondisi yang berubah. di masa mendatang (Szporak-Wasilewska et al., 2015). Prinsip-prinsip keseimbangan input-ouput (Araujo et al., 2006; Pandey et el., 2011; UNESCO, 2012; Fowe et al., 2015, Ali et al., 2017), atau konsep aliran stok (Alifujiang et al., 2017) digunakan untuk mengembangkan model dinamika ketersediaan air dari perspektif implikasi hidrologis. Perkembangan model Matematika untuk menjelaskannya antara lain: model SWAT (Soil and Water Assessment Tool)(Desta et al., 2017b; Ayivi et al., 2018; Hallauz et al., 2018; Anand and Oinam, 2019), model sistem dinamika neraca air (Bonacci et al., 2008; Pandey et al., 2011; Xi et a.l, 2013; Szporak-Wasilewska et al., 2015; Fowe et al., 2015; Mereu et al., 2016; Tinoco et al., 2016; Ghose et al.,2018), persamaan Muskingum (Pemali-Juana River Region Center, 2015b), dan kombinasi SWAT dan MUSLE (Djebau et al., 2018).

Kesetimbangan air Waduk Gembong dikaji oleh BBWS Pemali-Juana berdasarkan persamaan Muskingum. Ada 8 komponen utama yang dilibatkan dalam persamaan tersebut, yaitu air yang masuk ke dalam waduk, air yang keluar dari outlet waduk, evaporasi, kebutuhan air baku, kebutuhan air gelontor, tampungan awal, tampungan akhir, dan perubahan tampungan. Model Mock adalah model

pengalihragaman hujan menjadi aliran permukaan yang digunakan untuk menghitung debit inflow-nya (BBWS Pemali Juana, 2015a,b; Arsyad, 2017).

Kecepatan waduk mencapai volume air daya dukungnya bergantung pada tingkat pertumbuhan volume air intrinsiknya. Tingkat pertumbuhan instrinsik suatu populasi berperan penting sebagai parameter ekologis (Cortes, 2016), yang menunjukkan kecepatan kurva fungsi pertumbuhan mencapai daya dukung K (Tsoularis, 2001; Miskinis et al., 2017), atau menunjukkan kemampuan intrinsik suatu populasi untuk bertumbuh (Shi et al., 2013; Cortes, 2016), atau merupakan tingkat infeksi dalam fenomena epidemik (Bastita, 2020; Torrealba-Rodriguez et al., 2020).

Daya dukung lingkungan mempengaruhi dinamika pertumbuhannya (Jorgensen, 1994; Kribs-Zaleta, 2004; Chong et al., 2005; Peleg et al., 2007; Pinol et al., 2011; Al-Saffar et al., 2017). Daya dukung lingkungan adalah kepadatan populasi maksimal yang dapat dicapai suatu populasi tanpa adanya efek yang mengganggu ketersediaan sumber dayanya (Ross et al., 2005; Rogovchenko et al., 2009; Melica et al., 2014; Han et al., 2015; Jin et al., 2018; Brilhante et al., 2019).

Perkembangan penerapan dari model pertumbuhan populasi yang bergantung pada daya dukung lingkungannya, antara lain sebagai model dinamika pertumbuhan suatu organisme atau peningkatan biomassa dengan sumber daya habitat yang terbatas (Chong et al., 2005; Peleg et al., 2007; Al-Saffar et al., 2017), model dinamika pertumbuhan populasi homogen (tunggal) pada suatu sistem biologi (Melica et al., 2014; Jin et al., 2018), model dinamika vegetasi (Han et al., 2015), model ekologi (Miskinis et al., 2017), model epidemik dan yang terkini adalah untuk

pandemic COVID-19 (Batista, 2020; Torrealba-Rodriguez et al., 2020). Dinamika pertumbuhan populasi sering digambarkan oleh model logistik *generalized* (Tsoularis, 2001), dengan persamaannya berbentuk

$$\frac{dV}{dt} = rV^\alpha \left[1 - \left(\frac{V}{K} \right)^\beta \right]^\gamma \quad (2.1)$$

Dimana α, β, γ adalah bilangan real positif, V adalah ukuran populasi, K adalah daya dukung lingkungan, r adalah tingkat pertumbuhan populasi intrinsic (hari^{-1}), dan t adalah waktu (hari).

Model Verhulst, Richard, dan Gompertz, adalah model dinamik yang dimodifikasi dari Persamaan 2.1, yang dibedakan berdasarkan karakteristik titik infleksi kurva pertumbuhannya (Tsoularis, 2001). Sifat kurva pertumbuhan logistik adalah populasi berukuran kecil bertumbuh secara monoton, dan pada titik infleksinya, selanjutnya mendekat secara asimptotik kepada suatu nilai konstan yang besar (Thornley et al., 2004; Idlango et al., 2017). Kurva fungsi pertumbuhannya berbentuk S atau sigmoid (Bradley, 2000; Miranda et al., 2010; Jin et al., 2018; Brillhante et al., 2019).

Ketika konstanta r merupakan parameter yang nilainya tidak pasti atau kondisi awalnya acak, maka Persamaan 2.1 dinamakan Persamaan Diferensial Acak (PDA), dan ketika ada efek *noise* yang mempengaruhinya maka Persamaan 2.1 dinamakan Persamaan Diferensial Stokastik (PDS) (Bhatnagar et al., 2011). Derau putih (*white noise*) secara teoritis adalah turunan terhadap waktu dari gerak Brown (Oskendal, 1992) digunakan sebagai sebuah idealisasi matematis dari fenomena-fenomena yang mengandung fluktuasi yang mendadak dan *volatile* besar.

2.3 Skenario Pelepasan Volume Air Waduk

Salah satu isu penting dari manajemen sumber daya air waduk adalah pengelolaan waduk berkelanjutan untuk suplesi air irigasi pertanian. Pola operasi waduk didasarkan pada hasil prakiraan curah hujan tertuang dalam PP no.37 tahun 2010 tentang Bendungan (Republik Indonesia, 2010). Pengelolaan suplesi air waduk Gembong direncanakan menggunakan metode pengaliran kontinyu dengan perhitungan faktor-K, namun realisasinya menggunakan metode pengaliran air secara intermetten di petak-petak tersier. Metode intermetten terpaksa dilakukan mengingat ketersediaan air di waduk tidak seimbang dengan luasan lahan yang diairi (BBWS Pemali Juana, 2015b). Hukum Newton untuk pendinginan dinyatakan oleh Persamaan 2.2 (Ortega et al., 2018).

$$\frac{dT(t)}{dt} = -k(T(t) - T_m), k > 0, T(0) = T_0 \quad (2.2)$$

Dimana T_0 adalah temperature awal pada $t = 0$, T_m adalah temperature medianya yang dipandang konstan, dan k adalah koefisien pendinginan (tingkat penyusutan temperatur intrinsic).

Persamaan diferensial linier orde pertama ini mempunyai solusi yang dinyatakan oleh Persamaan 2.3

$$T(t) = T_m + (T_0 - T_m)e^{-kt} \quad (2.3)$$

Kurva solusi dari persamaan (2.3) menggambarkan temperature benda menyusut menuju sama dengan temperature medianya untuk jangka waktu lama. Persamaan 2.2 telah diterapkan antara lain pada ilmu fisika seperti ilmu material, super konduktivitas, fisika atmosfer (Ortega, 2018), juga di lini industri (Herrera-Sanchez et al., 2019), sebagai model dinamika inflasi jangka panjang (Todorovic et al., 2018),

sebagai model dinamika untuk memperkirakan waktu kematian korban kriminalitas (BioMath, 2005), model matematika untuk proses difusi pasif dan fenomena secangkir kopi panas (Kartono, 2012).

2.4 Kegiatan Pemanfaatan Lahan di Kawasan Waduk

Keterhubungan antara curah hujan yang merepresentasikan kondisi iklim, air, tanah, dan penggunaan lahan menjadi dasar pemodelan hidrodinamika sedimentasi (Jajarmizadeh et al., 2012; Norzilah et al., 2016). Kesesuaian pemanfaatan lahan dan pengelolannya memainkan peran penting dalam dinamika necara air di waduk (Nugroho et al., 2013) dan kondisi sub DASnya (Wahyuningrum et al., 2018). Kegiatan antropogenik dan alam mengendalikan komposisi sedimen yang menentukan daya tampung waduk (Ghandour et al., 2014; Desta et al., 2017a). Alih fungsi lahan melalui pengundulan hutan dalam memperluas lahan untuk pemukiman dan kegiatan produksi pertanian lainnya, berpengaruh terhadap peningkatan lahan kritis dan mengurangi daerah resapan air, serta berpotensi menyebabkan tanah longsor maupun erosi (Brooks et al., 2016; Armenteras et al., 2017), dan meningkatkan emisi gas rumah kaca seperti CO₂ (Adibroto et al., 2011). Luas kawasan hutan yang harus dipertahankan minimal 30% dari luas DAS menurut UU nomor.14 tahun 1999 tentang Kehutanan (Republik Indonesia, 1999). Hutan, perkebunan dan lahan *agroforestry* merupakan penyimpan karbon yang terpenting (Agus et al., 2013)

Faktor pemicu sedimentasi antara lain oleh eutrikikasi (Dumitran et al., 2017, Kuo et al., 2008), budidaya perikanan (Aida et al., 2016), adanya aliran sedimen yang

dibawa oleh aliran sungai atau erosi sepanjang badan sungai akibat alih fungsi lahan (Shukla et al., 2017; Schiefer et al., 2013; Fox et al., 2016; Kumar et al., 2015; Alighalehbabakhani et al., 2017), dan distribusi logam berat (Dai et al., 2007; Al-Nur et al., 2017).

Indonesia perlu memenuhi produksi pangan sesuai dengan RPJM, namun perubahan iklim berdampak besar terhadap perubahan pemanfaatan lahan pertanian (Sechonhart et al., 2016; Presley et al., 2017). Alih fungsi lahan dan dampaknya merupakan faktor penting dalam dinamika neraca air dan keberlanjutannya (Nugroho et al., 2013; Sun et al., 2016; Karlsson et al., 2016), yang valuasinya dengan memperhatikan aspek ekologi, sosial, dan ekonomi (Molina, 2016). Peningkatan jumlah penduduk beserta tuntutan secara ekonomi dan sosial mempengaruhi pemanfaatan lahan, sehingga model pengelolaan berkelanjutan danau seharusnya dikembangkan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara proteksi lingkungan, pertumbuhan ekonomi dan kebutuhan sosial masyarakat (Oming et al., 2000).

Ekosistem hutan dan pedesaan berperan lebih besar dalam implementasi tujuan pembangunan berkelanjutan di banyak negara, sehingga kegiatan manusia dalam pemanfaatan lahan perlu diatur agar dampak negatif terhadap lingkungan dapat diminimalkan (Paulikas et al., 2013; Cotter et al., 2014). Hutan merupakan bagian tak terpisahkan dari keseluruhan kehidupan dan sebagai kontributor utama GRK (Adibroto et al., 2011). Peningkatan jumlah penduduk tidak hanya mempercepat deforestasi dan budidaya padang rumput sebagai ladang

pengembalaan ternak, namun juga menghasilkan kerusakan lingkungan seperti degradasi lahan (Wang et al., 2015).

2.5 Persepsi dan Partisipasi Masyarakat pada Upaya Mitigasi Perubahan Iklim.

Persepsi masyarakat terhadap eksistensi sumber daya air yang terdampak oleh perubahan iklim merupakan faktor penting dalam penyusunan rencana aksi lokal mitigasi dan adaptasinya. Persepsi masyarakat bergantung pada riwayat pengalaman dan pengetahuannya tentang perubahan iklim. Antara persepsi dengan pengetahuan adalah saling membentuk. Persepsi tidak hanya membentuk pengetahuan tetapi pengetahuan juga membentuk persepsi (Nguyen et al., 2016), dan persepsi menimbulkan sikap yang muncul dalam kesadaran (Sarwono, 2018), yang bisa rumit dan terus berubah sesuai dengan perubahan lingkungan dan kebijakannya (Li et al., 2017).

Sikap dapat diukur dengan teknik pengukuran sikap, salah satu teknik tersebut dikenal dengan teknik Skala Sikap, yang dikembangkan oleh Likert pada tahun 1957. Skala ini terdiri dari 5-7 pilihan jawaban (dari jawaban sangat tidak setuju sampai jawaban sangat setuju), yang berisi sejumlah pertanyaan tentang obyek tertentu. Makin tinggi skornya makin positif sikapnya, begitu juga sebaliknya. Sikap dapat berpengaruh pada perilaku dan perilaku juga dapat membentuk sikap. Relasi antara sikap dan perilaku dapat dikaji dengan analisis korelasinya (Sarwono, 2018). Jenis data ordinal dianalisis dengan korelasi Spearman (Nazir, 2003).

Pemahaman yang baik terhadap opini masyarakat dan berbagai persepsi individu diperlukan dalam pengambilan kebijakan perubahan iklim yang efektif (Hitayezu et al., 2017), dan menyusun berbagai skenario alternative (Li et al., 2017). Tingkat persepsi dengan tingkat adaptasi atau mitigasinya sering tidak sejalan. Persepsi terhadap keparahan kekeringan dengan beragam model adaptasi sangat baik, namun persiapan untuk adopsinya tidak cukup baik. Demikian juga dengan mitigasi, pemerintah telah menyiapkan langkah-langkah mitigasi, namun tingkat kepuasan diantara petani rendah (Udmale et al., 2014). Dalam penelitian yang lain, kepedulian terhadap perubahan iklim sangat tinggi, meskipun pengetahuannya rendah (Hazo et al., 2019). Masyarakat sedikit tahu tentang konsep jasa ekosistem, namun mereka mengenali manfaat lingkungan ekologi dengan baik (Chen et al., 2018)

Kerentanan terhadap kekeringan atau banjir menjadi tema pokok dalam kajian persepsi masyarakat dan tingkat kesadarannya terhadap potensi bencana hidrometeorologi tersebut dan penyusunan strategi mitigasi dan adaptasinya (Oselebe et al., 2016; Bodoque et al., 2019; Li et al., 2017; Rai et al., 2018). Adaptasi dilakukan oleh pemerintah dan petani dengan terus-menerus menyesuaikan perilaku bercocok tanam untuk mengurangi kerugian yang diakibatkan oleh kekeringan, dengan memperhatikan keseimbangan antara aspek lingkungan, masyarakat dan ekonomi (Wang et al., 2018). Partisipasi masyarakat petani dibutuhkan dalam strategi adaptasi ketahanan petani dan pendapatannya serta menciptakan lapangan kerja lokal. Keberhasilan cara ini membutuhkan partisipasi masyarakat petani (Rai et al., 2018)

Persepsi dan partisipasi masyarakat terhadap kelestarian waduk juga harus diperhatikan dalam pengelolaan waduk berkelanjutan. Pemberdayaan masyarakat sekitar Waduk Gembong dengan membentuk paguyuban peduli waduk untuk meningkatkan peran serta masyarakat dalam pelestarian waduk (Dinas PSDA Propinsi Jawa Tengah, 2007). Mitigasi terhadap bencana dilakukan karena banyaknya kerugian yang ditimbulkan oleh bencana alam yang dipicu perubahan iklim (Deputi Bidang Sumber Daya Alam & Lingkungan Hidup Bappenas, 2008).

Penyusunan rencana aksi lokal yang partisipatif dapat merujuk pada Peraturan Menteri LHK Nomor P.33/ Menlhk/ Setjen/ Kum.1/3/ 2016 tentang Penyusunan Adaptasi Perubahan Iklim (Kementerian LHK, 2016). Peraturan Daerah Kabupaten Pati Nomor.5 Tahun 2011 tentang RTRW Kabupaten Pati 2010-2030 memuat prinsip-prinsip perlindungan lingkungan terhadap sumber daya air (Kabupaten Pati, 2011), namun pengelolaan Waduk Gembong tidak disebutkan secara eksplisit pada Rencana Strategis Kecamatan Gembong 2017-2022 (Kabupaten Pati, 2017). Kegiatan mitigasi di bidang Sumber Daya Air dan Lingkungan Hidup dalam RPJMN 2010-2014 adalah reklamasi hutan di DAS prioritas, meningkatkan daya dukung DAS kritis (DPU, 2008; Murniningtyas, 2012). Keseimbangan antara eksploitasi dan konservasi dalam memanfaatkan sumber daya alam yang berwawasan lingkungan, sehingga tidak ada pemanfaatan sumber daya alam yang melampaui batas ambang kemampuan dan daya dukung yang ada merupakan prinsip dasar yang harus menjadi pijakan dalam perencanaan pembangunan (PERHIMPI, 2008).