

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lestariikan air, selamatkan kehidupan. Pernyataan ini menjadi dasar pemikiran dan motivasi penelitian ini dilaksanakan. Aspek perlindungan dan pelestarian waduk dalam upaya konservasi sumber daya air pada waduk seperti yang diamanatkan oleh Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan (Republik Indonesia, 2015) dikaji dari perspektif lingkungan. Perlindungan dan pelestarian waduk yang dimaksudkan oleh peraturan tersebut adalah untuk menjaga agar terpelihara keberadaan, keberlanjutan serta menjaga fungsi waduk terhadap kerusakan atau gangguan yang disebabkan, baik oleh daya alam maupun kegiatan manusia.

Air merupakan prasyarat bagi semua kehidupan (Jorgensen, 2016) dan kebutuhan dasar hidup bagi umat manusia yang tertuang dalam UU RI nomor 17 Tahun 2019 tentang Sumber Daya Air (Republik Indonesia, 2019) dan ketersediaanya semakin tidak seimbang dengan kebutuhan air, lebih-lebih dibutuhkan untuk sanitasi di masa pandemic Covid-19 (FAO, 2020; WHO, 2020). Ketidakpastian perubahan iklim mempengaruhi kuantitasnya (volume air), sehingga dinamika ketersediaanya urgen dikaji dalam upaya menilai potensi terjadinya

bencana hidrometeorologi (Chen et al., 2019). Perubahan pola curah hujan merupakan salah satu indikator terjadinya perubahan iklim (Adibroto et al., 2011).

Ketersediaan air dibutuhkan dalam pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) (*Sustainable Development Goals* (SDGs)), yang salah satunya untuk mendukung pertanian berkelanjutan (Republik Indonesia, 2017). Isu pengelolaan sumber daya air merupakan isu strategis dalam rangka ketahanan air termuat dalam SDGs (UNEP, 2017). Pelibatan masyarakat atau orang-orang lokal adalah baik dalam pengelolaan lingkungan berkelanjutan (Barrow, 2006). UU RI Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PPLH) mengamanatkan bahwa semua pemangku kepentingan perlu melakukan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup secara sungguh-sungguh dan konsisten untuk memelihara kelangsungan daya dukung dan tampungannya (Republik Indonesia, 2009)

Ketersediaan air di waduk merupakan masalah ekohidrologi serius, dan berdampak langsung pada sektor pertanian di daerah tropis seiring adanya perubahan iklim (Berg et al., 2013). Produksi agrikultur masih bergantung pada ketersediaan air merupakan salah satu tantangan utama di seluruh dunia (Saccon, 2018), yang berdampak pada pembangunan sektor sosial dan ekonomi (Giulani et al., 2016). Perubahan iklim menyebabkan perubahan yang besar terhadap penggunaan lahan pertanian (Schonhart et al., 2016; Presley et al., 2017). Alam maupun kegiatan manusia (*anthropogenic*) berkontribusi menghasilkan emisi GRK yang menyebabkan perubahan iklim. Emisi CO₂ maupun non CO₂ mengalami peningkatan (Adibroto et al., 2011). Pengkajian ketersediaan air global menunjukkan bahwa

banyak negara dihadapkan dengan kelangkaan air sebagai masalah kritis bagi pembangunan sosial-ekonomi masyarakat (Kotir et al., 2016).

Kekeringan merupakan fenomena hidrologi waduk yang bervariasi, sehingga prediksi *inflow* ke waduk diperlukan untuk menilai ketidakpastian ketersediaan air di masa mendatang (Lopes-Nicolas et al., 2017). Pulau Jawa termasuk dalam kategori kerawanan air di musim kemarau (Direktur Jenderal Sumber Daya Air, 2018) sebagai indikator terjadinya perubahan iklim. Waduk didefinisikan sebagai wadah buatan yang terbentuk karena dibangunnya bendungan, yang tujuan pengelolaannya untuk meningkatkan kemanfaatan fungsi sumber daya air, pengawetan air, pengendalian daya rusak air, dan fungsi pengamanan tampungan sedimen. Pengelolaannya yang dimaksud dalam PP No.37 Tahun 2010 tentang Bendungan adalah untuk meningkatkan kemanfaatan fungsi sumber daya air, penyimpanan dan pengendalian air serta fungsi pengamanan daya tampungan sedimennya (Republik Indonesia, 2010).

Ketersediaan air di waduk tidak dapat terhindar dari pengaruh perubahan iklim dan kegiatan manusia di kawasan waduk, sehingga dampak yang diakibatkannya harus dipertimbangkan dalam pengelolaan berkelanjutan. Pemahaman tentang dampaknya pada dinamika ketersediaan air waduk merupakan pengetahuan dasar yang penting dalam pengelolaan ketersediaan air waduk berkelanjutan.

Dampak perubahan iklim pada variabilitas atau volatilitas curah hujan, pola hidrologi waduk, kondisi infrastruktur waduk, serta kegiatan dan perilaku manusia di DAS merupakan parameter lingkungan yang perlu diperhatikan dalam mitigasi

potensi bencana hidrometeorologi. Daya tampung waduk dalam penyimpanan air hujan menjadi masalah yang sangat krusial dalam pengelolaannya. Kecepatan waduk mencapai volume air daya dukungnya merupakan informasi penting dalam pengelolaan waduk berkelanjutan.

Dinamika ketersediaan air waduk rentan terhadap ketidakpastian cuaca dan daya tampung waduk (*carrying capacity*). Pemodelan dinamika pertumbuhan volume air sangat diperlukan agar dapat menganalisis dinamikanya berdasarkan tingkat pertumbuhan intrinsik sebagai parameter ekologisnya (Cortes, 2016). Indikator hidrologi yang mengarah pada kelimpahan atau kelangkaan air merupakan data ekologi dalam pemodelan dinamikanya untuk tujuan peringatan dini (Editorial, 2015; Forni et al., 2016), dan untuk prediksi (Mushar et al., 2019)

Ketika volume air waduk lebih kecil dari daya tampung waduk maka berpotensi kelangkaan air di musim kemarau, namun jika melebihi daya tampung waduk maka berpotensi banjir di musim penghujan. Keputusan untuk melepaskan seberapa besar volume air waduk untuk suplesi irigasi dan berapa lama durasinya sangat kritis bagi pengelola waduk, terutama pada saat ketersediaan air waduk semakin menyusut. Pola operasi waduk di Indonesia didasarkan pada hasil prakiraan curah hujan tertuang dalam PP 37 tahun 2010 tentang Bendungan (Republik Indonesia, 2010).

Kecepatan suatu waduk mencapai volume air daya dukungnya di musim pengisian, dan *dead storage* di musim pelepasan air untuk suplesi irigasi merupakan informasi ekologis yang diperlukan dalam pengelolaan waduk berkelanjutan. Permasalahan dalam implementasi pengelolaan waduk pada umumnya muncul

karena ketiadaan pengelolaan di DAS yang memadai dan regulasi pengelolaan air yang masih lemah (UNEP, 1992). Daerah Aliran Sungai (DAS) menurut PP Nomor 37 tahun 2012 tentang Pengelolaan DAS (Republik Indonesia, 2012) adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan.

Kegiatan *anthropogenic* di kawasan sekitar waduk tidak dapat diabaikan pengaruhnya terhadap ketersediaan air waduk. Kegiatan manusia dalam alih guna lahan di DAS maupun daerah tangkapan air, walaupun secara ekonomi berpotensi meningkatkan kesejahteraan masyarakat namun patut diduga secara ekologis berpotensi mendegradasi lingkungan waduk dan berpotensi menghasilkan emisi GRK (Adibroto et al., 2011). Material sedimen memiliki dampak yang signifikan terhadap fungsi ekosistem waduk secara keseluruhan. Suatu model konseptual dibangun untuk simulasi dari sistem pengelolaan waduk yang terintegrasi bertujuan untuk mengurangi potensi kerawanan kelimpahan atau kelangkaan air yang diakibatkan oleh perubahan iklim dan faktor kerusakan lingkungan oleh kegiatan manusia. Kerusakan hutan dan ekspansi pertanian di kawasan hulu dituding menjadi penyebab utama peningkatan sedimentasi. Kegiatan antropogenik berbasis pada sumber daya alam menentukan komposisi sedimen (Ghandour et al., 2014; Desta et al., 2017).

Kegiatan pembangunan yang menggunakan lahan di sekitar waduk seiring pertumbuhan populasi penduduk, misalkan untuk pemukiman, pertanian dan peternakan, industrialisasi, maupun penggundulan hutan di daerah aliran sungai berkontribusi mempercepat sedimentasi waduk (Kua et al., 2008; Schiefer et al., 2013; Liu et al., 2016; Simon et al., 2017; Gorska, 2017) dan meningkatkan emisi gas rumah kaca (Adibroto et al., 2011). Restorasi sungai dengan mengadaptasi sistem hidrologi-manusia dan perubahan iklim dapat diterapkan dalam menjaga eksistensinya (Momblanch et al., 2016; Lobanova et al., 2017). Respon masyarakat terhadap perubahan iklim yang berdampak pada ketersediaan air waduk dipengaruhi oleh persepsinya, yang dapat berpengaruh menentukan tingkat partisipasinya dalam melestarikan ketersediaan air waduk. Model pengelolaan berkelanjutan sumber daya air waduk perlu memperhatikan respon masyarakat sekitar waduk.

Waduk Gembong seperti tampak pada Gambar 1.1, merupakan salah satu waduk buatan di Kabupaten Pati, yang dibangun pada tahun 1930-1933 oleh Pemerintah Kolonial Belanda. Fungsi utamanya sebagai pengendali banjir dan penyedia air irigasi seluas 4.606 ha lahan pertanian. Sungai Sentul, Jering, Lampeyan dan Wuni yang hulunya berlokasi di lereng Gunung Muria merupakan DAS yang *inflow* ke Waduk Gembong. Secara teknis, tipe bendungan Gembong ini adalah urugan tanah homogen yang dibangun dengan tanggul yang terdiri dari material tanah dan batu dengan system *flushing* (pembilasan) (BBWS Pemali Juana, 2015a). Peta administratif wilayah Kecamatan Gembong disajikan di Lampiran 3.



Gambar 1.1 Bendungan Gembong (Desember 2019)

Sedimen yang terperangkap di tampungan waduk bersama sampah yang menumpuk di saat hujan deras setiap tahun menyebabkan berkurangnya kapasitas tampung waduk. Rata-rata pertambahan sedimen sampai dengan tahun 2014 sebesar 23.890 m³/tahun sehingga pengurangan sedimen dilakukan (BBWS Pemali Juana, 2015b). Faktor penyebab sedimentasi waduk ini, antara lain: perusakan hutan, eksploitasi lahan berlebihan, perusakan sabuk hijau, penanaman tanaman di area pasang surut waduk dan kurangnya kepedulian masyarakat di sekitar waduk (Dinas PSDA Propinsi Jawa Tengah, 2007)

Rencana pengembangan Kecamatan Gembong yang topografi sebagian besar wilayahnya pada 500-1000 dpl sebagai kawasan agropolitan tertuang dalam RTRW Kabupaten Pati 2010-2030 (Kabupaten Pati, 2011). Kawasan agropolitan menurut UU No.26 tahun 2007 tentang Penataan Ruang didefinisikan sebagai kawasan yang terdiri dari satu atau lebih pusat kegiatan pada wilayah pedesaan sebagai sistem

produksi pertanian dan pengelolaan sumber daya alam tertentu yang ditunjukkan oleh adanya keterkaitan fungsional dan hierarki keruangan satuan sistem permukiman dan sistem agribisnis (Republik Indonesia, 2007). Kegiatan konversi lahan hutan menjadi lahan non hutan merupakan salah satu kegiatan manusia dalam pemanfaatan lahan. Konversi lahan yang melampaui daya dukung memicu tingkat erosi yang tinggi, yang materialnya dapat terbawa aliran air permukaan *inflow* ke waduk. Material ini terperangkap pada dasar waduk menjadi sedimentasi, yang secara bertahap mengurangi daya tampung waduk.

Pengelolaan berkelanjutan Waduk Gembong tidak secara eksplisit disebutkan dalam Rencana Strategis Kecamatan Gembong tahun 2017-2022 (Kabupaten Pati, 2017), walaupun ketersediaan airnya sangat diperlukan untuk suplesi air irigasi lahan pertanian seluas 4.606 ha. Pengelolaan berkelanjutan sumber daya air waduk untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat menurut UU Nomor 32 Tahun 2009 tentang PPLH (Republik Indonesia, 2009) perlu dilakukan. Ketersediaan air Waduk Gembong yang tidak seimbang dengan luasan lahan pertanian yang diairi, sehingga pengelolaan suplesi air Waduk Gembong menggunakan metode pengaliran air secara *intermetten* di petak-petak tersier (BBWS Pemali Juana, 2015b). Masyarakat sekitar waduk termotivasi untuk menggembalakan ternaknya di kawasan waduk yang kering ketika volume air Waduk Gembong mencapai volume air *dead storage*,

Tipe Bendungan Gembong adalah urugan tanah homogen dengan tanggul yang terdiri dari material tanah dan batu dengan data teknis pada Tabel 1.1. Waduk Gembong termasuk waduk yang wajib diaudit menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI No 3 tahun 2013 tentang Audit Lingkungan sesuai dengan

tipenya (Kementerian LHK, 2013). Kegiatan pemeriksaan pada aspek proses hidrologis (BBWS Pemali Juana, 2015a) yang meliputi infrastruktur dan instrumentasi bangunan bendungan berdasarkan buku pedoman konstruksi dan bangunan tentang instrumentasi tubuh bendungan tipe urugan dan tanggul (Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, 2004).

Pengelolaan ketersediaan air waduk secara berkelanjutan dalam upaya pelestarian kemanfaatan dan perlindungan sumber daya airnya perlu dilakukan, mengingat Waduk Gembong sudah berusia cukup tua seusia Situ Gintung Banten yang pernah mengalami kerusakan tanggul sehingga menyebabkan tragedi bencana banjir bandang (Hazrumy, 2009). Waduk berusia semakin tua rentan terhadap bencana hidrometeorologi.

Tabel 1.1 Data eksisting karakteristik morfologi Bendungan Gembong

Parameter	Nilai	Satuan
Bendungan		
Tinggi di atas dasar sungai	36	m
Tinggi di atas galian	38	m
Panjang	365	m
Lebar puncak	6	m
Elevasi puncak	+210	m
Volume timbunan	310.000	m ³
Waduk		
Volume waduk	9.500.000	m ³
Tinggi muka air banjir	+208,75	m
Tinggi muka air normal	+207	m
Tinggi muka air minimum	+184.4	m
Manfaat irigasi	4.606	ha

Sumber: BBWS Pemali-Juana (2015b)

Kajian dari perspektif Ilmu Lingkungan diperlukan untuk melengkapi kajian dari aspek hidrologi dan infrastrukturnya dalam penyusunan strategi mitigasi terhadap potensi bencana hidrometeorologi lokal di Waduk Gembong, mengingat usia waduk yang semakin tua. Kajian pendahuluan mengkonfirmasi bahwa

ketersediaan air di Waduk Gembong rentan terhadap perubahan iklim dan tekanan lingkungan yang dipicu oleh kegiatan antropogenik dalam penggunaan lahan (Kartono et al., 2018). Oleh karena itu, penelitian disertasi ini difokuskan pada implikasi ekologis dari perubahan iklim dan kegiatan antropogenik penggunaan lahan dalam upaya perlindungan dan pelestarian ketersediaan air Waduk Gembong dari perspektif lingkungan, dengan mengkaji:

1. Karakteristik curah hujan lokal, yang meliputi volatilitas, tren dan pola, serta prediksi curah hujan lokal.
2. Dinamika pertumbuhan volume air di waduk pada musim pengisian, dengan memperhatikan tingkat pertumbuhan intrinsik volume air sebagai parameter ekologi.
3. Dinamika pelepasan air waduk untuk suplesi air irigasi, dengan memperhatikan parameter tingkat penyusutan intrinsik volume air, untuk menggambarkan kecepatan waduk mencapai kematiannya (*dead storage*).
4. Dinamika penggunaan lahan di Kecamatan Gembong seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduknya dan pengaruhnya terhadap perubahan stok karbon.
5. Persepsi dan pengalaman keterlibatan (partisipasi) masyarakat lokal terhadap perlindungan dan pelestarian ketersediaan air di Waduk Gembong.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian untuk disertasi ini dilaksanakan dengan judul “Model pengelolaan berkelanjutan ketersediaan air di Waduk Gembong dalam upaya mitigasi perubahan

iklim”, untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan penelitian:

1. Bagaimana karakteristik curah hujan lokal di kawasan Waduk Gembong dan prediksinya?
2. Bagaimana model dinamika pertumbuhan volume air pada saat pengisian waduk untuk menganalisis implikasi ekologis dari tingkat pertumbuhan intrinsik volume air di waduk dalam mencapai volume air saturasinya?
3. Bagaimana model dinamika penyusutan volume air pada musim pelepasan volume air untuk menganalisis implikasi ekologis dari tingkat penyusutan intrinsik volume air menuju *dead storage*?
4. Bagaimana implikasi ekologis dinamika penggunaan lahan di Kecamatan Gembong seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduknya dan pengaruhnya terhadap perubahan stok karbon?
5. Bagaimana persepsi masyarakat terhadap pengelolaan waduk berkelanjutan dan partisipasinya dalam aksi lokal mitigasi perubahan iklim pada ketersediaan air waduk?

1.3 Originalitas SEKOLAH PASCASARJANA

Resume hasil pengamatan pendahuluan di lapangan, dan wawancara mendalam dengan fihak-fihak yang berkompeten terkonfirmasi bahwa telah dilakukannya pemeriksaan lengkap pada aspek hidrologis (BBWS Pemali Juana, 2014) dan secara teknis dan infrastruktur bangunan beserta kelengkapannya (BBWS Pemali Juana, 2015a). Penelitian untuk disertasi ini dari perspektif lingkungan difokuskan pada aspek ekologis dan social dengan obyek penelitian meliputi karakteristik curah hujan

lokal, dinamika pertumbuhan volume air pada saat pengisian maupun pelepasan untuk suplesi air irigasi, dinamika penggunaan lahan di kawasan waduk Gembong seiring pertumbuhan penduduk, serta persepsi dan partisipasi masyarakat lokal dalam upaya pelestarian waduk.

Pengembangan penerapan dari permodelan Matematika dan Statistika disesuaikan dengan karakteristik obyek penelitiannya, sehingga didapatkan pendekatan permodelan yang baru secara empirik maupun analitik. Jejak penelitian yang terkait dengan fokus kajian dalam penelitian untuk disertasi ini, yang terkait dengan pengelolaan waduk selain Waduk Gembong disajikan pada Tabel 1.2, sedangkan Tabel 1.3 menyajikan jejak penelitian untuk Waduk Gembong.

Tabel 1.2 Jejak penelitian yang selain untuk Waduk Gembong

Fokus kajian	Model/ Metode	Penulis
Karakteristik curah hujan	<ul style="list-style-type: none"> • Volatilitas curah hujan (nilai koefisien variasi, indeks anomaly persipitasi terstandar (SPAI), dan indeks konsentrasi presipitasi (PCI)). • Tren berdasarkan uji Mann-Kendall dan slope Sen • Prediksi <ol style="list-style-type: none"> 1. ARIMA / SARIMA 2. Jaringan Syaraf Tiruan (JST) 	Mondal et al., 2012; Gasiorek et al., 2015; Nury et al., 2016 Ezenwaji et al., 2016; Asfaw et al., 2018; Zhang et al., 2018; Aydin et al., 2019; Mahmood et al., 2019 1. Makridakis et al., 1983; Tseng et al., 2002; Asadi et al., 2013) 2. Farahzadeh et al, 2014
Dinamika Volume Air di Waduk	<ol style="list-style-type: none"> 1. NN 2. SWAT 3. MUSLE 4. Model dinamik neraca air 5. Sistem dinamik berdasarkan aliran stock 6. Persamaan Muskingum dan MOCK 7. STELLA 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ondimu dan Murase, 2007 2. Desta et al., 2017;; Ayivi et al., 2018; Hallauz et al., 2018, 3. Djebau et al., 2018. 4. Bonacci et al., 2008; Pandey et al., 2011; Xi et al., 2013; Szporak-Wasilewska et al., 2015;

Tabel 1.2 lanjutan

Fokus kajian	Model/ Metode	Penulis
	8. Optimisasi dengan metode pemrograman linier atau dinamis.	Fowe et al., 2015; Mereu et al., 2016; Tinoco et al., 2016:
	9. Model Ekonometrik	Kotir et al., 2016; Ali et al., 2017; Ghose et al., 2018
	10. Model AquaCrop	5. Alifujiang et al., 2017 6. BBWS Pemali-Juana, 2015; Arsyad, 2017). 7. Mereu et al., 2015 8. Lin dan Rutten, 2016. 9. Lopez-Nicolas et al., 2017 10. Saccon, 2018
Dinamika Penggunaan Lahan	1. Model <ul style="list-style-type: none"> • Rantai Markov dan kombinasinya dengan Cellular automata, • Jaringan syaraf tiruan, Regresi logistic, • GIS 	1. Tajbakhsh et al., 2018; Afed Ullah et al., 2018 2. Tanika dan Lusiana, 2017.
Persepsi dan partisipasi masyarakat	2. Model GenRiver 1. Pelibatan masyarakat lokal 2. Mitigasi dan adaptasi pada potensi bencana hidrometeorologi	1. Barrow, 2006; Nguyen et al., 2016; Hitayezu et al., 2017; Li et al., 2017; Chen et al. ; 2018; Hazo et al., 2019 2. Udmale et al., 2014; Oselebe et al., 2016; Li et al., 2017; Shaffril et al., 2017; Pradhan et al., 2017; Rai et al., 2018; Bodoque et al., 2019

Hasil penelitian pada aspek hidrologis dan infrastruktur yang telah dilakukan di Waduk Gembong oleh BBWS Pemali Juana pada tahun 2014 dan 2015 disajikan oleh Tabel 1.3. Tabel 1.4 menjelaskan orisinalitas penelitian untuk disertasi, walaupun obyek penelitiannya sama tetapi metodologi penelitian yang digunakan

adalah berbeda dengan metodologi pada Tabel 1.2 dan Tabel 1.3. Metodologi penelitian pada Tabel 1.4 melalui pendekatan pemodelan Matematika dan Statistika berbasis data.

Tabel 1.3 Penelitian BBWS Pemali Juana 2014 dan 2015

Fokus Kajian	Tujuan	Metodologi	Hasil
Analisa hidrologi	Menganalisa data hujan, debit banjir rancangan, debit andalan dan kebutuhan air dari daerah irigasi Gembong untuk dipakai sebagai dasar analisis dalam pekerjaan detail desain.	<ul style="list-style-type: none"> • Pengalihragaman hujan menjadi aliran berdasar model MOCK 	Debit andalan DAS Gembong
Neraca Air	Menghitung <i>inflow</i> dan <i>outflow</i> .	<ul style="list-style-type: none"> • Model aliran masuk dan keluar waduk dikembangkan berdasar keseimbangan air menurut Muskingum. • Metode Gama, FSR Jawa-Sumatera, Nakayasu, Snyder Alexsejev, Rasional untuk menghitung debit banjir rancangan. 	Volume air <i>inflow</i> rancangan dan <i>outflow</i>
Alokasi Air	Menentukan besaran pelepasan volume air waduk untuk suplesi irigasi	Simulasi dengan 3 skenario faktor K dan <i>intermetten</i>	Aturan operasional pelepasan air suplesi secara <i>intermetten</i> ,

Tabel 1.4 Orisinalitas Penelitian

Fokus Kajian	Tujuan	Metodologi	Hasil
Curah Hujan	Menganalisis karakteristik curah hujan lokal dan prediksinya, dikaitkan dengan potensi bencana hidrometeorologi	<ul style="list-style-type: none"> • Karakteristik curah hujan dianalisis menurut statistika deskriptif dan inferensia. • Mann-Kendall test untuk uji trend curah hujan • Prediksi curah hujan menggunakan model ARIMA bulan basah. • Prediksi curah hujan musiman dengan model SARIMA 	<ul style="list-style-type: none"> • Volatilitas • Klasifikasi kekeringan meteorologis • Trend • Model ARIMA bulan basah • Model SARIMA
Dinamika Pertumbuhan volume air	Menganalisis laju pertumbuhan volume air pada saat pengisian waduk.	Dinamika volume air pada saat pengisian waduk dengan mengembangkan penerapan model pertumbuhan logistic generalized, yang dimodifikasi menjadi model Verhulst, Richards, Gompertz, serta Mathus modified.	Model Richards dengan $\beta=2$ sebagai model yang baik untuk menjelaskan dinamika pertumbuhan volume air pada saat pengisian di musim hujan.
Dinamika Pelepasan volume air untuk suplesi irigasi	Menganalisis laju penyusutan volume air pada saat pelepasannya untuk suplesi irigasi, sehingga waduk mencapai <i>dead storagenya</i> .	Dinamika pelepasan air waduk dengan mengembangkan penerapan model Newton tentang pendinginan.	Model dinamika pelepasan volume air untuk suplesi irigasi dan kecepatan waduk mencapai <i>dead storage</i> .
Dinamika Penggunaan Lahan di kawasan waduk.	Menganalisis dinamika penggunaan lahan di kawasan waduk seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk.	<ul style="list-style-type: none"> • Model <i>eksponential smoothing</i> untuk memodelkan dinamika pertumbuhan jumlah penduduk • Model regresi <i>spline</i> antara jumlah penduduk 	<ul style="list-style-type: none"> • Prediksi jumlah penduduk berdasarkan model <i>eksponential smoothing</i> • Prediksi perubahan luasan lahan hutan rakyat

Tabel 1.4 Lanjutan

Fokus Kajian	Tujuan	Metodologi	Hasil
Persepsi dan Partisipasi masyarakat	Menilai persepsi dan pengalaman keterlibatan masyarakat dalam berpartisipasi melestarikan air waduk dan upaya mitigasinya.	<p>dan luasan lahan hutan rakyat, digunakan untuk memprediksi alih guna lahan hutan rakyat.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Observasi lapangan • Kuisisioner • Wawancara • Validitas dan reliabilitas data • Analisis data dengan menggunakan metode Likert dan korelasi non parametrik 	<p>berdasarkan model regresi <i>spline</i>.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tingkat persepsi dan partisipasi masyarakat, beserta korelasinya • <i>The triangular model of the balance of interests CFG</i> • Resolusi konflik • Strategi mitigasi dan adaptasi lokal

Pengembangan penerapan model-model Matematika dan Statistika pada dinamika ketersediaan air di waduk dari perspektif lingkungan, dan strategi resolusi konflik kepentingan sebagai kebaruan dalam penelitian ini disajikan oleh Tabel 1.5.

Tabel 1.5 Kebaruan dalam Penelitian Disertasi

Nomor	Deskripsi Kebaruan
1	Karakteristik curah hujan lokal
2	Permodelan dinamika pertumbuhan volume air waduk melalui pendekatan model pertumbuhan populasi logistik secara analitik dan empirik berbasis data.
3	Permodelan dinamika pelepasan volume air untuk suplesi irigasi melalui pendekatan model pendinginan Newton secara analitik dan empirik berbasis data.
4	Permodelan dinamika ketersediaan air waduk satu siklus (pengisian-pelepasan)
5	Permodelan dinamika pertumbuhan jumlah penduduk Kecamatan Gembong dengan model <i>double exponential smoothing</i>
6	Permodelan regresi <i>spline truncated</i> luas lahan hutan rakyat yang dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah penduduk.
7	Strategi resolusi konflik kepentingan dari tiga kompartemen CFG (masyarakat (<i>Community</i>), petani (<i>Farmer</i>), otoritas waduk (<i>Government</i>)) dalam pengelolaan Waduk Gembong berkelanjutan melalui skema kompensasi dan sinkronisasi

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan Umum:

Menganalisis karakteristik dan prediksi curah hujan lokal, dinamika ketersediaan air waduk pada saat pengisian dan pelepasan untuk suplesi air irigasi, dinamika penggunaan lahan di Kecamatan Gembong seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduknya, persepsi masyarakat dan partisipasinya dalam upaya penyusunan strategi mitigasi perubahan iklim terhadap ketersediaan air waduk.

Tujuan Khusus:

1. Menganalisis karakteristik curah hujan lokal dan prediksinya.
2. Mengembangkan model dinamika pertumbuhan volume air pada saat pengisian air waduk menuju fase saturasinya untuk menganalisis implikasi ekologis dari tingkat pertumbuhan intrinsik volume air.
3. Mengembangkan model dinamika penyusutan volume air pada musim pelepasan volume air untuk menganalisis implikasi ekologis dari tingkat penyusutan intrinsik volume air untuk suplesi air irigasi menuju *dead storage*.
4. Menganalisis implikasi ekologis dari dinamika penggunaan lahan di Kecamatan Gembong seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduknya dan pengaruhnya pada stok karbon.
5. Menilai persepsi masyarakat dan pengalaman partisipasinya pada pelestarian waduk dalam upaya mitigasi perubahan iklim.

Tabel 1.6 menyajikan temuan-temuan dalam pelaksanaan penelitian yang dipertimbangkan dalam perumusan strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim dalam pengelolaan waduk berkelanjutan.

Tabel 1.6 Temuan dari penelitian

Nomor	Deskripsi temuan
1	Karakteristik hujan lokal: volatilitas fluktuatif dan tidak mengikuti pola tren monotonik
2	Model dinamika pertumbuhan volume air waduk berdasarkan pendekatan model Richards $\beta=2$, yang menunjukkan terjadinya kelimpahan air setelah fase saturasi.
3	Model dinamika pelepasan volume air waduk untuk suplesi irigasi berdasarkan pendekatan model pendinginan Newton.
4	Model dinamika ketersediaan air di Waduk Gembong satu siklus (pengisian-pelepasan)
5	Model dinamika pertumbuhan jumlah penduduk berdasarkan model <i>double exponential smoothing</i> , yang memprediksi pertambahan jumlah penduduk
6	Model regresi <i>spline truncated</i> luas lahan hutan rakyat yang dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah penduduk, dan luas lahannya diprediksi berkurang.
7	Alih guna lahan menyebabkan berkurangnya stok karbon
8	Persepsi dan partisipasi masyarakat pada pelestarian waduk berkorelasi negative dan lemah.
9	<i>The triangular model of the balance of interests CFG</i>
10	Model pengelolaan berkelanjutan ketersediaan air di Waduk Gembong dalam upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim
11	Rekomendasi <ul style="list-style-type: none"> a. Pengelolaan berkelanjutan Waduk Gembong dari perspektif Ilmu Lingkungan disarankan dituangkan secara eksplisit dalam Rencana Strategis Kecamatan Gembong. b. Penanaman pohon yang berkemampuan melindungi ketahanan tanah dan penyerapan karbon lebih diutamakan. c. Resolusi konflik kepentingan melalui skema kompensasi dan sinkronisasi. d. Pelibatan masyarakat peduli waduk sebagai agen edukasi pelestarian waduk dan pemberdayaan masyarakat.

1.5 Urgensi dan Manfaat Penelitian

Beragam tekanan lingkungan pada Waduk Gembong, baik dari alam maupun kegiatan antropogenik penggunaan lahan, serta isu-isu lingkungan yang mengemuka di masyarakat, maka penelitian dari aspek ekologi ini urgen dilaksanakan dengan

mengingat usia Waduk Gembong yang semakin tua. Perubahan iklim memicu pola curah hujan yang tidak menentu (potensi kelimpahan atau kelangkaan air), sehingga kajian dari prespektif lingkungan pada dinamika pertumbuhan volume air di waduk urgen dilakukan. Adanya rencana pengembangan Kecamatan Gembong menjadi kawasan agropolitan seperti yang tertuang dalam RTRW Kabupaten Pati 2010-2030 (Kabupaten Pati, 2010) berpotensi meningkatkan tekanan lingkungan terhadap ketersediaan air di waduk, yang selama ini hanya untuk suplesi air irigasi. Penataan ruang menjadi salah satu kegiatan yang dominan dalam pengembangan kawasan berbasis pertanian ini membutuhkan ketersediaan air secara berkelanjutan. Penilaian terhadap persepsi masyarakat dan partisipasinya dalam menjaga kelestarian waduk urgen dilakukan untuk merumuskan resolusi konflik kepentingan dan strategi mitigasi perubahan iklim dalam pengelolaan waduk berkelanjutan.

Sasaran penelitian ini adalah tersusunnya dokumen saintifik dari perspektif Ilmu Lingkungan yang dapat dipertimbangkan dalam pengelolaan berkelanjutan Waduk Gembong sebagai upaya mitigasi perubahan iklim kepadanya. Secara akademik, hasil penelitian ini bermanfaat pada:

1. Ilmu Pengetahuan dan Teknologi.

Permodelan pengelolaan ketersediaan air Waduk Gembong berkelanjutan yang didasarkan pada konsep-konsep matematis ini memberikan pengayaan pengembangan dan penerapan teori Matematika dan Statistika dalam kontribusinya menyelesaikan permasalahan lingkungan yang terjadi dalam pengelolaan waduk berkelanjutan. Temuan-temuan dari penelitian dapat dimanfaatkan untuk pengembangan penerapan ilmu yang lain seperti Rekayasa

Teknologi untuk waduk dan Ilmu Pertanian untuk rekayasa jenis tanaman dan pengaturan pola tanam.

2. Penyelesaian masalah pembangunan kawasan.

Eksistensi Waduk Gembong sangat rentan terhadap rencana kegiatan pembangunan kawasan agropolitan. Hasil penelitian ini diharapkan bermanfaat sebagai bahan pertimbangan pengambilan keputusan para pemangku kepentingan dalam melaksanakan kegiatan pembangunan di kawasan waduk, agar tidak mendegradasi lingkungannya. Semakin besar tekanan lingkungan sebagai dampak dari perubahan iklim dan pertumbuhan penduduk terhadap ketersediaan air di waduk, maka pengelolaan waduk berkelanjutan membutuhkan sinergitas antara aspek hidrologis, lingkungan dan sosial ekonomi masyarakat.

3. Pengembangan institusi.

Kerjasama para pihak dalam penelitian ini menjadi masukan yang berharga dalam pengembangan institusi perguruan tinggi, yaitu Departemen Matematika Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro Semarang dalam kontribusinya berpartisipasi menyelesaikan masalah lingkungan melalui penerapan Matematika dan Statistika.