



DISERTASI

**MODEL PENGELOLAAN BERKELANJUTAN
KETERSEDIAAN AIR DI WADUK GEMBONG
DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM**

**Kartono
NIM 30000117510004**

**PROGRAM DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2021**

**MODEL PENGELOLAAN BERKELANJUTAN
KETERSEDIAAN AIR DI WADUK GEMBONG
DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM**

Disertasi

**Untuk memperoleh gelar Doktor dalam Ilmu Lingkungan
pada Universitas Diponegoro**



**Untuk dipertahankan di hadapan
Dekan Sekolah Pascasarjana dan Tim Penguji
pada Ujian Tertutup Disertasi
Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro
pada tanggal Lima Belas bulan Desember tahun 2021 pukul 13.00 WIB**

SEKOLAH PASCASARJANA

Oleh

**Kartono
NIM 30000117510004
Lahir di Pati**

HALAMAN PENGESAHAN

MODEL PENGELOLAAN BERKELANJUTAN KETERSEDIAAN AIR DI WADUK GEMBONG DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM

Oleh
Kartono
NIM 30000117510004

Telah diuji dan dinyatakan lulus ujian pada tanggal 15 bulan Desember tahun 2021
oleh tim penguji Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan,
Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro

Telah disetujui oleh.

Promotor

Ko Promotor



Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA
NIP 196112281986031004



Prof. Dr. Ir. Suripin, M. Eng
NIP 196004271987031001

Dekan Sekolah Pascasarjana
Universitas Diponegoro



Dr. R. B. Sularto, S.H., M.Hum
NIP 196701011991031005

Ketua Program Studi
Doktor Ilmu Lingkungan
Sekolah Pascasarjana
Universitas Diponegoro



Dr. Budi Warsito, S.Si., M.Si
NIP 197508241999031003

HALAMAN PERSETUJUAN

MODEL PENGELOLAAN BERKELANJUTAN KETERSEDIAAN AIR DI WADUK GEMBONG DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM

Oleh
Kartono
NIM 30000117510004

Telah disetujui oleh
Pimpinan Sidang

Prof.Dr. Hadiyanto, S.T.,M.Sc.,IPU
(Ketua Sidang/ Penguji)



Dr. Budi Warsito, S.Si., M.Si
(Sekretaris Sidang/ Penguji/Prodi Doktor Ilmu Lingkungan)

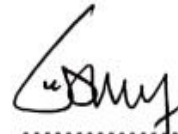


Anggota Tim Penguji

Dr.Ari Dina Permana Citra, SKM., M.Kes
(Penguji Eksternal/Universitas Widya Husada Semarang)



Prof.Dr. Widowati, S.Si, M.Si
(Penguji 1/ Fakultas Sains dan Matematika UNDIP)



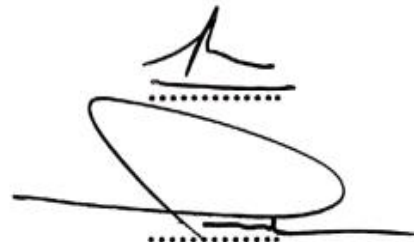
Dr.rer.nat. Thomas Triadi Putranto.,S.T., M.Eng
(Penguji 2/ Fakultas Teknik UNDIP)



Prof.Dr.Ir.Suripin, M.Eng
(Ko Promotor/ Fakultas Teknik UNDIP)



Prof.Dr.Ir. Purwanto, DEA
(Promotor/ Fakultas Teknik UNDIP)



Kupersembahkan Disertasi ini kepada ytc:

1. Bapak Kamdi dan Ibu Suka
2. Almarhum Bapak Soerasmin dan Almarhumah Ibu Djumiati
3. Dwi Endang Sujati, S.Th, M.Hum
4. Keluarga Intan Kurnia Putri, S.Si, M.Sc; Ibrahim, S.Si, M.T dan Elisabeth Meira.
5. Berlian Adi Putera, S.Pt , dan Safira Widya Christy



Kata-kata Mutiara:

1. Bisa, kalau mau belajar (Purwanto, 2017)
2. Belajar Sepanjang Hayat

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kartono

NIM : 30000117510004

Mahasiswa : Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
Pascasarjana Universitas Diponegoro

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Disertasi yang berjudul **“Model Pengelolaan Berkelanjutan Ketersediaan Air di Waduk Gembong dalam Upaya Mitigasi Perubahan Iklim”** adalah karya ilmiah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (Doktor) di perguruan tinggi manapun.
2. Disertasi ini adalah murni ide, rumusan dan hasil penelitian saya serta dilakukan tanpa bantuan orang lain, kecuali Tim Promotor dan narasumber.
3. Disertasi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan judul aslinya serta dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidak benaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah saya peroleh, dan sanksi lain sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Diponegoro.

Semarang, 15 Desember 2021

Yang Membuat Pernyataan



Kartono

KATA PENGANTAR

Segala puji dan hormat bagi Tuhan Yang Maha Kasih, yang telah memperkenankan penulis menyelesaikan semua proses dalam penelitian untuk disertasi ini. **MODEL PENGELOLAAN BERKELANJUTAN KETERSEDIAAN AIR DI WADUK GEMBONG DALAM UPAYA MITIGASI PERUBAHAN IKLIM** dipilih sebagai judul disertasi ini, mengingat betapa pentingnya ketersediaan air bagi kehidupan dan merupakan kebutuhan dasar bagi makhluk hidup. Waduk Gembong merupakan salah satu waduk di Kabupaten Pati Jawa Tengah Indonesia dengan keindahan alam sekitarnya yang mempesona dan infrastrukturnya yang terawat baik, namun berbagai tekanan lingkungan mengancamnya.

Oleh karena itu, penelitian untuk disertasi ini difokuskan pada aspek ekologi dan implikasinya dari dampak perubahan iklim pada ketersediaan air di waduk (volume air). Penelitian dari perspektif lingkungan ini untuk memperkaya penelitian-penelitian dari segi kualitas airnya dan aspek hidrologis waduk beserta infrastrukturnya. Dinamika ketersediaan air di Waduk Gembong tidak dapat terhindar dari dampak perubahan iklim dan kegiatan antropogenik dalam pemanfaatan lahan di kawasan waduk dikaji melalui pemodelan Matematika dan Statistika berbasis data empiris. Karakteristik curah hujan lokal sebagai implikasi meterologis dari perubahan iklim mempengaruhi dinamika pertumbuhan volume air waduk dan pelepasannya untuk suplesi irigasi pertanian, sehingga potensi bencana hidrometeorologi lokal urgen dikaji agar dapat dirumuskan strategi mitigas dan adaptasinya.

Pertumbuhan jumlah penduduk selalu diikuti dengan tuntutan sosial-ekonominya, sehingga mendorong kegiatan antropogenik penggunaan lahan. Alih guna lahan yang semata-mata hanya didasarkan pada kepentingan ekonomi dapat mengganggu ketahanan tanah dan mendegradasi lingkungannya. Alih guna lahan berkorelasi dengan pertumbuhan jumlah penduduk, dan berkontribusi menghasilkan emisi gas rumah kaca yang memicu perubahan iklim.

Partisipasi masyarakat dalam menjaga kelestarian ketersediaan airnya sangat dibutuhkan, yang biasanya merupakan perwujudan dari persepsinya. Ada tiga kelompok masyarakat yang berada di lingkaran ekosistem Waduk Gembong yaitu masyarakat petani (masyarakat yang menerima manfaat langsung adanya waduk), masyarakat sekitar waduk yang tidak menerima manfaat langsung adanya waduk, dan otoritas waduk yang mewakili pemerintah. Perbedaan kepentingan dari ketiga komunitas ini dapat memicu konflik kepentingan, yang pada akhirnya berdampak pada kelestarian air di waduk. Resolusi konflik kepentingan perlu dirumuskan agar dapat menjaga keseimbangan segitiga tiga kepentingan masyarakat berdasarkan prinsip-prinsip Tujuan Pembangunan Berkelanjutan.

SEKOLAH PASCASARJANA

Perubahan iklim yang dipicu oleh pemanasan global merupakan fenomena multidimensi membawa dampak pada berbagai sektor pembangunan, yang penanganannya perlu dukungan semua pihak. Sektor ketahanan pangan paling terdampak karena produk pangan dihasilkan oleh pertanian yang sangat rentan terhadap perubahan iklim. Perubahan pola curah hujan dan iklim ekstrim merupakan fenomena dominan yang disebabkan oleh perubahan iklim. Ketika

curah hujan tinggi berpotensi kelimpahan air yang memicu banjir, demikian juga ketika curah hujan kecil berpotensi kekeringan, yang keduanya dapat menyebabkan kegagalan panen. Pengelolaan sumber daya air yang tepat berperan penting dalam mitigasi pemanasan global.

Kajian secara komprehensif dalam penelitian ini didasarkan pada pertanyaan-pertanyaan penelitian tentang karakteristik curah hujan lokal, dinamika pertumbuhan volume air di waduk pada saat pengisian maupun pelepasannya untuk suplesi irigasi, dinamika penggunaan lahan seiring dengan pertumbuhan penduduk, serta persepsi masyarakat yang diwujudkan dalam berbagai bentuk partisipasinya. Pemodelan Matematika dan Statistika berbasis data empiris yang diterapkan untuk menganalisis potensi bencana hidrometeorologi lokal ini merupakan metodologi baru dalam memahami ketersediaan air di waduk dari perspektif lingkungan, yang dapat diadopsi untuk diterapkan pada waduk lain yang disesuaikan dengan data empirisnya. Model pengelolaan waduk berkelanjutan dari perspektif Ilmu Lingkungan yang berhasil dikonstruksi berdasarkan penelitian untuk disertasi ini menjadi pelengkap model pengelolaan waduk eksisting dalam upaya mitigasi dan adaptasi dampak perubahan iklim.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada yth:

1. Bapak Prof. Dr. Yos Johan Utama, S.H., M.Hum (Rektor Universitas Diponegoro Semarang) yang telah memberikan ijin belajar di Program Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP dan membebaskan biaya pendidikannya.

2. Bapak Dr. R.B Sularto, S.H., M.Hum (Dekan Sekolah Pascasarjana UNDIP) yang telah memberikan kesempatan belajar di Sekolah Pascasarjana UNDIP dan mengizinkan penelitian lapangan.
3. Ibu Prof. Dr.Widowati, S.Si, M.Si (Dekan Fakultas Sains dan Matematika) yang selalu memotivasi dan mengizinkan penulis untuk belajar di Program Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP, serta mengizinkan penggunaan Laboratorium Komputasi Departemen Matematika Fakultas Sains dan Matematika UNDIP, dan memberikan dukungan dana penelitian.
4. Ibu Dr. Hartuti Purnaweni, MPA dan Bapak Dr.Ing.Sudarno, M.Sc yang telah memberikan kesempatan belajar di Program Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP.
5. Bapak Dr.Budi Warsito, S.Si.,M.Si sebagai Ketua Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP yang telah membina selama pembelajaran berlangsung.
6. Bapak dan Ibu Dosen di Program Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP yang telah memberikan berbagai ilmu pengetahuan dan mengantarkan penulis untuk dapat mengembangkan dan menerapkannya untuk kebaikan lingkungan hidup.
7. Bapak Prof.Dr.Ir. Purwanto, DEA sebagai Promotor dan Bapak Prof.Dr.Ir.Suripin,M.Eng sebagai KoPromotor yang telah memotivasi dan membimbing tanpa mengenal jenuh, agar penulis dapat menyelesaikan semua tahapan proses penelitian ini dengan baik dan lancar.

8. Tim Penguji (Bapak Prof.Dr.Hadiyanto, S.T., M.Sc.,IPU, Bapak Dr.Budi Warsito, S.Si., M.Si., Ibu Dr. Ari Dina Permana Citra, S.KM., M.Kes., Ibu Prof.Dr.Widowati, S.Si., M.Si., Bapak Dr.rer.nat. Thomas Triadi Putranto, S.T., M.Eng., Bapak Prof.Dr.Ir. Suripin, M.Eng., Bapak Prof.Dr.Ir. Purwanto, DEA.) yang telah mengkoreksi dan memberi saran-saran perbaikan Disertasi.
9. Ibu Prof. Dra. Indah Susilowati, M.Sc, Ph.D yang memovitasi agar penulis melanjutkan studi di Program Doktor Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang.
10. Bapak atau Ibu Tenaga Kependidikan di Program Doktor Ilmu Lingkungan maupun di Sekolah Pascasarjana yang telah memberikan pelayanan administratif dan kerjasamanya.
11. Ketua Departemen Matematika FSM UNDIP beserta teman sejawat atas kerjasamanya, sehingga penulis dapat menjalankan tugas pokok dan fungsi sebagai dosen secara paralel dengan menjalankan ijin belajar.
12. Laboran di Laboratorium Komputasi Departemen Matematika FSM UNDIP, atas kerjasamanya dalam menyiapkan komputer dan perlengkapannya.
13. Kepala BAPPEDA Kabupaten Pati dan jajaran instansi terkait yaitu Dinas Pertanian Kabupaten Pati, Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang Kabupaten Pati, Kecamatan Gembong, Kepala Desa Gembong, Kepala Desa Pohgading, yang telah mengizinkan penelitian lapangan dan menyediakan data-data yang diperlukan dalam penelitian, baik melalui wawancara, kuisioner maupun berbentuk dokumen.

14. Kepala BPS Kabupaten Pati yang telah menyediakan data, yang dipublikasikan melalui websitenya.
15. Kepala BBWS Pemali Juana yang telah memberikan izin penelitian lapangan dan menyediakan data penelitian yang berbentuk dokumen.
16. Kepala BP DAS yang telah menyediakan data penelitian yang berbentuk dokumen.
17. Pengelola Waduk Gembong dan Operator Lapangan yang telah membantu pengambilan data, dan pendampingan dalam survei lapangan.
18. Ketua Kelompok Masyarakat Peduli Waduk Gembong dan Perkumpulan Petani Pengguna Airnya, yang telah meluangkan banyak waktu untuk diskusi dan penyediaan data penelitian.
19. Rekan-rekan mahasiswa Program Doktor Ilmu Lingkungan UNDIP atas kerjasamanya dan dukungannya.

Atas semua kebaikan yang Bapak/ Ibu/ Sdr berikan kepada penulis, semoga mendapat balasan yang setimpal dari Tuhan Yang Maha Kasih. Pada kesempatan ini juga, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada yang tercinta Dwi Endang Sujati, S.Th, M.Hum, Intan Kurnia Putri, S.Si, M.Sc, Ibrahim, S.Si, M.T, Elisabeth Meira, Berlian Adi Putera, S.Pt, dan Safira Widya Christy, atas segala pengorbanan dan perhatiannya dalam mendukung penulis menyelesaikan studi S3 ini. Terima kasih atas pengertiannya dan kupersembahkan disertasi ini untuk kalian semua.

Terima kasih kepada Sdr Azmi dan Sdr Reza Dwi Fitriani, yang telah membantu dalam pengolahan data dan komputasi statistik. Terima kasih kepada

semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu, atas segala bantuannya. Akhirnya, semoga disertasi sebagai dokumen saintifik ini dapat bermanfaat dalam perencanaan pengelolaan waduk berkelanjutan, dan pengembangan ilmu lingkungan. Penulis memohon maaf atas ketidaksempurnaan disertasi ini, dan semoga dapat diperbaiki dalam penelitian lain di masa mendatang.

Semarang, 15 Desember 2021



Kartono

SEKOLAH PASCASARJANA

DAFTAR ISI

Halaman Sampul	i
Halaman Judul	ii
Halaman Pengesahan	iii
Halaman Persetujuan	iv
Halaman Persembahan dan Kata-kata Mutiara	v
Halaman Pernyataan Orisinalitas	vi
Kata Pengantar	vii
Daftar Isi	xiv
Daftar Gambar/ Bagan	xvii
Daftar Tabel	xix
Daftar Lampiran	xxiii
Daftar Singkatan	xxiv
Glosari	xxvi
Abstrak	xxxI
Abstract	xxxii
Graphical Abstract	xxxiii
Ringkasan	xxxiv
Summary	xl
Biodata Singkat Penulis	xlvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	10

1.3 Orisinalitas	11
1.4 Tujuan Penelitian	17
1.5 Urgensi dan Manfaat Penelitian	18
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	21
2.1 Curah Hujan sebagai Parameter Perubahan Iklim.	21
2.2 Curah Hujan Mempengaruhi Dinamika Ketersediaan Air Waduk	25
2.3 Skenario Pelepasan Volume Air Waduk	28
2.4 Kegiatan Pemanfaatan Lahan di Kawasan Waduk	29
2.5 Persepsi dan Partisipasi Masyarakat pada Upaya Mitigasi Perubahan Iklim	31
BAB III KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP DAN HIPOTESA	34
3.1 Kerangka Teori	34
3.2 Kerangka Konsep	36
3.3 Hipotesa	39
BAB IV METODE PENELITIAN	40
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian	40
4.2 Desain Penelitian	41
4.3 Populasi dan Sampel	54
4.4 Variabel Penelitian	55
4.5 Materi Penelitian	56
4.6 Teknik Pengumpulan Data	57
4.7 Alur Penelitian	57

4.8 Pengolahan Data	60
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	61
5.1 Karakteristik Curah Hujan Lokal dan Peramalannya	61
5.2 Dinamika Pertumbuhan Volume Air Waduk	86
5.3 Dinamika Pelepasan Volume Air untuk Suplesi Irigasi	106
5.4 Dinamika Penggunaan Lahan di Kawasan Waduk Gembong	119
5.5 Persepsi dan Partisipasi Masyarakat	141
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	178
6.1 Kesimpulan	178
6.2 Saran	180
DAFTAR PUSTAKA	182
LAMPIRAN	209
Lampiran 1 Izin Penelitian	210
Lampiran 2 Kuisisioner Penelitian	214
Lampiran 3 Peta Lokasi Penelitian	220
Lampiran 4 Peta Alih Guna Lahan	222
Lampiran 5 Rangkuman Hasil Wawancara	223
Lampiran 6 Foto Kegiatan	230
Lampiran 7 Luaran Penelitian	237

DAFTAR GAMBAR/ BAGAN

Gambar 1.1	Waduk Gembong (Desember 2019)	7
Gambar 3.1	Skema hidrologi Waduk Gembong secara teori	36
Gambar 3.2	Skema pengelolaan berkelanjutan	38
Gambar 4.1	Kondisi Alami Waduk Gembong	40
Gambar 4.2	Diagram alir pemodelan ARIMA/SARIMA	47
Gambar 4.3	Alur penelitian	56
Gambar 5.1	Grafik curah hujan harian	62
Gambar 5.2	Akumulasi curah hujan tahunan (mm) periode 2007-2019	63
Gambar 5.3	Grafik belum stasioneritas terhadap varian	68
Gambar 5.4	Grafik dari Data tertransformasi	69
Gambar 5.5	Grafik AFC data transformasi	71
Gambar 5.6	Grafik ACF data differencing	72
Gambar 5.7	Grafik PACF data differencing	72
Gambar 5.8	Grafik belum stasioner dalam varian	77
Gambar 5.9	Grafik data yang ditransformasi	77
Gambar 5.10	Grafik ACF bulan basah	79
Gambar 5.11	Grafik PACF bulan basah	79
Gambar 5.12	Kurva pertumbuhan volume air	88
Gambar 5.13	Kurva satu siklus pengisian 2014, pelepasan 2015	91
Gambar 5.14	Kurva data riil 2020 vs data model	99

Gambar 5.15	Kalibrasi model dengan menggunakan data tahun 2020	100
Gambar 5.16	Kurva ketersediaan volume air harian saat pelepasan	108
Gambar 5.17	Kurva data riil 2019 dan data dari model	114
Gambar 5.18	Kurva ketersediaan air di waduk	118
Gambar 5.19	Peta Wilayah Kecamatan Gembong	120
Gambar 5.20	Kurva pertumbuhan jumlah penduduk	122
Gambar 5.21	Kurva pertumbuhan jumlah penduduk dan peramalannya	125
Gambar 5.22	Grafik luasan lahan	127
Gambar 5.23	Plot Model Spline	133
Gambar 5.24	Plot prediksi luas lahan hutan rakyat.	135
Gambar 5.25	The triangle of interests CFG model	173
Gambar 5.26	Model pengelolaan waduk berkelanjutan	176

SEKOLAH PASCASARJANA

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Data eksisting karakteristik morfologi Bendungan Gembong	9
Tabel 1.2	Jejak penelitian yang selain untuk Waduk Gembong	12
Tabel 1.3	Penelitian BBWS Pemali Juana 2014 dan 2015	14
Tabel 1.4	Original Penelitian	15
Tabel 1.5	Kebaruan dalam Penelitian Disertasi	16
Tabel 1.6	Temuan dari penelitian	18
Tabel 4.1	Identifikasi variabel dalam tujuan penelitian 1	45
Tabel 4.2	Identifikasi variabel dalam tujuan penelitian 2	48
Tabel 4.3	Identifikasi variabel dalam tujuan penelitian 4	51
Tabel 4.4	Identifikasi variabel dalam tujuan penelitian 5	53
Tabel 4.5	Kategori Penilaian	54
Tabel 4.6	Matriks definisi operasional variabel	55
Tabel 4.7	Jenis data dan metode pengambilannya	56
Tabel 5.1	Statistik Deskriptif Data Curah Hujan Harian (mm)	61
Tabel 5.2	Rata-rata curah hujan tiap bulan	63
Tabel 5.3	MK-test Curah Hujan Harian (mm) tahun 2007-2018	65
Tabel 5.4	Klasifikasi keparahan kekeringan meteorologis	66
Tabel 5.5	PCI tahunan periode 2007-2018 untuk Waduk Gembong	67
Tabel 5.6	Klasifikasi PCI*	67
Tabel 5.7	Hasil uji-t dan p-value	70
Tabel 5.8	Signifikansi Parameter	73

Tabel 5.9 Hasil Uji Asumsi White-noise	74
Tabel 5.10 Hasil perhitungan MSE	74
Tabel 5.11 Validasi dan Peramalan rata-rata curah hujan	76
Tabel 5.12 Uji hipotesa	78
Tabel 5.13 Hasil Uji Signifikansi Parameter	80
Tabel 5.14 Hasil Uji Ljung Box-Pierce	82
Tabel 5.15 Nilai R^2	83
Tabel 5.16 Validasi dan Peramalan	83
Tabel 5.17 Koefisien korelasi pada setiap tahun pengisian	89
Tabel 5.18 Volume air limbah (m^3)	92
Tabel 5.19 Model Pertumbuhan dan Tingkat Pertumbuhan Intrinsiknya	97
Tabel 5.20 Estimasi parameter r ($hari^{-1}$) setiap musim pengisian	98
Tabel 5.21 MAPE untuk setiap musim pengisian (%)	98
Tabel 5.22 Prediksi nilai r	101
Tabel 5.23 Estimasi Parameter k	112
Tabel 5.24 Nilai MAPE (%)	113
Tabel 5.25 Ilustrasi perhitungan volume air suplesi	115
Tabel 5.26 Jumlah Penduduk Kecamatan Gembong 2005-2019	121
Tabel 5.27 Hasil pengolahan data	123
Tabel 5.28 Perbandingan nilai MAPE	124
Tabel 5.29 Hasil peramalan jumlah penduduk	124
Tabel 5.30 Luasan penggunaan lahan 2005-2019	126
Tabel 5.31 Data jumlah penduduk dan luas lahan hutan rakyat	128

Tabel 5.32	Nilai GCV untuk satu titik knot	129
Tabel 5.33	Nilai GCV untuk dua titik knot	129
Tabel 5.34	Nilai GCV untuk tiga titik knot	130
Tabel 5.35	Nilai GCV Minimum pada Jumlah Titik Knot	130
Tabel 5.36	Estimasi Parameter Model Spline Truncated Terbaik	132
Tabel 5.37	Prediksi Y berdasarkan X prediksi	134
Tabel 5.38	Hasil prediksi dari X dan Y	134
Tabel 5.39	Stok C untuk setiap jenis tutupan lahan tahun 2009, 2014, 2019	139
Tabel 5.40	Nilai jawaban masyarakat sekitar waduk	147
Tabel 5.41	Indeks Likert dari jawaban masyarakat sekitar waduk	148
Tabel 5.42	Nilai r hitung dan sig dari pertanyaan persepsi masyarakat	149
Tabel 5.43	Nilai r hitung dan sig dari pertanyaan partisipasi masyarakat	149
Tabel 5.44	Reliabilitas persepsi masyarakat	150
Tabel 5.45	Reliabilitas jika ada item pertanyaan yang dihapus	150
Tabel 5.46	Reliabilitas pernyataan partisipasi masyarakat	151
Tabel 5.47	Reliabilitas jika ada item pertanyaan	151
Tabel 5.48	Uji normalitas data	152
Tabel 5.49	Hasil uji korelasi	153
Tabel 5.50	Nilai jawaban masyarakat petani	155
Tabel 5.51	Indeks Likert jawaban masyarakat petani	155
Tabel 5.52	Nilai r hitung dan sig dari pertanyaan persepsi petani	156
Tabel 5.53	Nilai r hitung dan sig pertanyaan partisipasi petani	156

Tabel 5.54	Reliabilitas persepsi petani	157
Tabel 5.55	Reliabilitas jika ada item pertanyaan yang dihapus	158
Tabel 5.56	Reliabilitas pernyataan partisipasi petani	158
Tabel 5.57	Reliabilitas jika ada item yang dihapus	159
Tabel 5.58	Uji normalitas data	160
Tabel 5.59	Hasil uji korelasi	161
Tabel 5.60	Jawaban responden tentang kegiatan mitigasi	165
Tabel 5.61	Nilai jawaban kuisioner tentang adaptasi	169
Tabel 5.62	Hasil Uji Korelasi	170



SEKOLAH PASCASARJANA

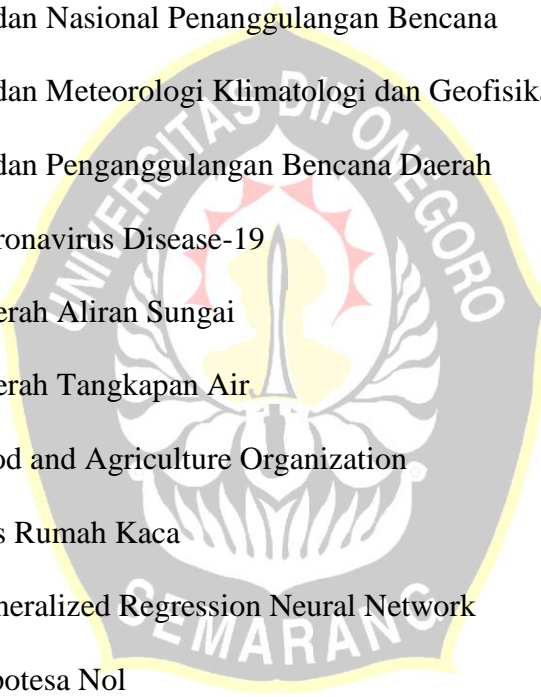
DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Izin Penelitian	210-213
Lampiran 2	Kuisisioner Penelitian	214-219
Lampiran 3	Peta Lokasi Penelitian	220-221
Lampiran 4	Alih Guna Lahan	222
Lampiran 5	Rangkuman hasil wawancara	223-229
Lampiran 5	Foto Kegiatan	230-236
Lampiran 6	Luaran Penelitian	237-238



SEKOLAH PASCASARJANA

DAFTAR SINGKATAN



ANN	: Artificial Neural Network
AR	: Auto Regressive
ARIMA	: Auto Regressive Integrated Moving Average
BBWS	: Balai Besar Wilayah Sungai
BNPB	: Badan Nasional Penanggulangan Bencana
BMKG	: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika
BPBD	: Badan Penganggulangan Bencana Daerah
COVID-19	: Coronavirus Disease-19
DAS	: Daerah Aliran Sungai
DTA	: Daerah Tangkapan Air
FAO	: Food and Agriculture Organization
GRK	: Gas Rumah Kaca
GRNN	: Generalized Regression Neural Network
Ho	: Hipotesa Nol
H1	: Hipotesa alternative
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
IP3A	: Induk Perkumpulan Petani Pemakai Air
MAPE	: Mean Absolute Percentage Error
MASE	: Mean Absolute Scaled Error
MK-test	: Mann-Kendal test
MUSLE	: Modified Universal Sediment Loss Equation
P3A	: Perkumpulan Petani Pemakai Air

PCI	: Precipitation Concentration Index
PERHIMPI	: Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia
PP	: Peraturan Pemerintah
PPLH	: Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup
RPJM	: Rencana Pembangunan Jangka Menengah
RTRW	: Rencana Tata Ruang Wilayah
SARIMA	: Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average
SDGs	: Sustainable Development Goals
SPAI	: Standardized Precipitation Anomaly Index
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNEP	: United Nations Environment Programme
UU RI	: Undang-Undang Republik Indonesia
TPB	: Tujuan Pembangunan Berkelanjutan
WHO	: World Health Organization

SEKOLAH PASCASARJANA

GLOSARI

- Adaptasi : Upaya yang dilakukan untuk meningkatkan kemampuan Perubahan Iklim dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan iklim, termasuk keragaman iklim dan kejadian ekstrim sehingga potensi kerusakan akibat perubahan iklim berkurang, peluang yang ditimbulkan oleh perubahan iklim dapat dimanfaatkan, dan konsekuensi yang timbul akibat perubahan iklim dapat diatasi (Republik Indonesia, 2021)
- Aksi Adaptasi : Tindakan menyesuaikan diri untuk mengantisipasi Perubahan Iklim pengaruh buruk iklim nyata, dengan cara membangun strategi antisipasi dan memanfaatkan peluang-peluang yang menguntungkan (Republik Indonesia, 2021)
- Aksi Mitigasi : Kegiatan yang dapat mengurangi Emisi GRK, Perubahan Iklim meningkatkan serapan karbon dan/ atau penyimpanan / penguatan cadangan karbon (Republik Indonesia, 2021).
- Banjir : Proses alami di mana air muncul dari saluran alirannya untuk menutupi sebagian dataran tanah atau merendam tanah yang biasanya kering dengan air yang banyak (Botkin et al., 2003).
- Bencana : Bencana yang dampaknya dipicu oleh kondisi cuaca dan hidrometeorologi iklim dengan berbagai parameternya.

- Berkelanjutan : Sebuah konsep pengelolaan yang muncul dalam ilmu lingkungan, sehubungan dengan sumber daya, yakni pengelolaan sumber daya yang bertujuan untuk memastikan bahwa generasi mendatang akan memiliki kesempatan untuk menggunakan sumber daya secara adil dan akan mewarisi lingkungan yang berkualitas (Botkin et al., 2003)
- Dampak Lingkungan : Efek dari beberapa tindakan terhadap lingkungan, terutama tindakan yang dilakukan oleh manusia (Botkin et al., 2003).
- Daya dukung : Kelimpahan maksimum suatu populasi atau spesies yang dapat dipertahankan oleh suatu habitat atau ekosistem untuk mempertahankan kelimpahan tersebut di masa depan (Botkin et al., 2003)
- Data aktivitas : Besaran kuantitatif kegiatan aktivitas manusia yang dapat melepaskan dan/ menyerap GRK (Republik Indonesia, 2021).
- Deforestasi : Memanen pohon untuk tujuan komersial dan lainnya, atau membakar hutan untuk mengubah lahan menjadi tujuan pertanian (Botkin et al., 2003)
- Dinamika populasi : Studi tentang perubahan ukuran populasi dan penyebab perubahan ini (Botkin et al., 2003).

- Ekologi : Ilmu yang mempelajari hubungan antara makhluk hidup dan lingkungannya (Botkin et al., 2003)
- Ekosistem : Tataan unsur lingkungan hidup yang merupakan kesatuan utuh menyeluruh dan saling mempengaruhi dalam membentuk keseimbangan, stabilitas dan produk lingkungan hidup (Republik Indonesia, 2021)
- Emisi GRK : Lepasnya GRK ke atmosfer pada suatu daerah tertentu dalam jangka waktu tertentu (Republik Indonesia, 2021).
- Faktor Emisi GRK : Besaran Emisi GRK yang dilepaskan ke atmosfer per satuan aktivitas tertentu (Republik Indonesia, 2021)
- Gas Rumah Kaca (GRK) : Gas yang terkandung dalam atmosfer, baik alami maupun antropogenik, yang menyerap dan memancarkan kembali radiasi inframerah (Republik Indonesia, 2021)
- Hidrologi : Studi tentang air permukaan dan bawah permukaan (Botkin et al., 2003)
- Hipotesis : Penjelasan yang dituangkan dengan cara yang bisa diuji dan dapat dibantah (Botkin et al., 2003)
- Iklim : Representasi atau karakteristik kondisi atmosfer di tempat tertentu di Bumi. Iklim mengacu pada kondisi rata-rata dalam periode yang lama (Botkin et al., 2003).
- Kurva pertumbuhan logistik : Kurva pertumbuhan berbentuk S yang dihasilkan oleh persamaan pertumbuhan logistic (Botkin et al., 2003).

- Mitigasi : Usaha pengendalian untuk mengurangi risiko akibat Perubahan Iklim
- Perubahan Iklim : perubahan iklim melalui kegiatan yang dapat menurunkan emisi atau meningkatkan penyerapan GRK : dan penyimpanan/ penguatan cadangan karbon dari berbagai sumber emisi (Republik Indonesia, 2021)
- Pemanasan global : Peningkatan suhu global rata-rata dari atmosfer di dekat permukaan bumi yang disebabkan oleh alam atau manusia (Botkin et al., 2003)
- Persamaan logistik : Persamaan tersebut menghasilkan kurva pertumbuhan logistik, yaitu laju pertumbuhan $\frac{dN}{dt} = rN[(K - N) / N]$, di mana r adalah laju peningkatan intrinsik, K adalah daya dukung, dan N adalah ukuran populasi (Botkin et al., 2003).
- Perubahan Iklim : Perubahan suhu rata-rata tahunan dan aspek iklim lainnya selama periode waktu mulai dari dekade hingga ratusan tahun hingga beberapa juta tahun (Botkin et al., 2003)
- Pertumbuhan eksponensial : Pertumbuhan dengan laju kenaikan adalah persentase konstan dari ukuran saat ini, yaitu, pertumbuhan terjadi pada laju konstan per periode waktu (Botkin et al., 2003)
- Populasi : Sekelompok individu dari spesies yang sama yang hidup di daerah yang sama (Botkin et al., 2003)

Tingkat pertumbuhan : Kenaikan bersih dalam beberapa faktor per satuan waktu. Dalam ekologi, pertumbuhan populasi kadang-kadang diukur sebagai peningkatan jumlah individu atau biomassa per satuan waktu dan kadang-kadang sebagai persentase peningkatan jumlah atau biomassa per satuan waktu (Botkin et al., 2003)

TPB : Dokumen yang memuat tujuan dan sasaran global tahun 2016 sampai tahun 2030, yang bertujuan untuk menjaga peningkatan kesejahteraan ekonomi masyarakat secara berkesinambungan, menjaga keberlanjutan kehidupan social masyarakat, menjaga kualitas lingkungan hidup serta pembanguna yang inklusif dan terlaksananya tata kelola yang mampu menjaga peningkatan kualitas kehidupan dari satu generasi ke generasi berikutnya (Republik Indonesia, 2017)

SEKOLAH PASCASARJANA

ABSTRAK

Manfaat strategis Waduk Gembong di Kabupaten Pati Indonesia sebagai pengendali banjir maupun pendukung ketahanan pangan juga terancam adanya perubahan iklim dan kegiatan *anthropogenic* dalam penggunaan lahan. Implikasi ekologis dari dinamika ketersediaan airnya urgen dianalisis sebagai bagian dari upaya pengelolaan waduk berkelanjutan dalam mitigasi perubahan iklim. Penelitian ini bertujuan menganalisis fenomena ini dari perspektif lingkungan dengan menggunakan pendekatan permodelan Matematika dan Statistika berbasis data. Hasil penelitian yang didasarkan pada data curah hujan harian lokal, volume air waduk harian, luas kelas lahan dan jumlah penduduk tahunan di Kecamatan Gembong, jawaban kuisioner dan wawancara menunjukkan bahwa (1) pola curah hujan lokal tidak mengikuti tren monotonik menurut uji Mann-Kendall, sedangkan akumulasinya tiap tahun diprediksi meningkat menurut model SARIMA dan ARIMA, (2) ketersediaan air waduk yang dipengaruhi oleh curah hujan berpotensi kelimpahan air setelah waduk mencapai fase saturasi menurut model dinamika pertumbuhan logistik Richards, (3) durasi pelepasannya untuk air suplesi lebih lama daripada operasional *existing* menurut model penyusutan Newton, sehingga model pertumbuhan dan pelepasan dapat menyusun model ketersediaan air di waduk (4) dinamika penggunaan lahan hutan rakyat yang dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah penduduk diprediksi menyusut menurut model regresi *spline* dan berdampak pada pengurangan stok karbon, sedangkan (5) kesempatan berpartisipasi masyarakat pada perlindungan dan pengelolaan waduk perlu ditingkatkan menurut skala Likert. Berdasarkan analisis implikasi ekologisnya dapat disimpulkan bahwa kelimpahan air berpotensi terjadi yang dapat memicu bencana hidrometeorologi lokal, sehingga penanaman pohon yang berkemampuan melindungi ketahanan tanah dan penyerapan karbon lebih diutamakan sebagai aksi mitigasinya, diikuti dengan adaptasi pemilihan jenis tanaman dan pola tanamnya oleh petani.

Kata-kata kunci: Curah hujan, Hidrometeorologi, Implikasi ekologis, Pengelolaan berkelanjutan, Penggunaan lahan

SEKOLAH PASCASARJANA

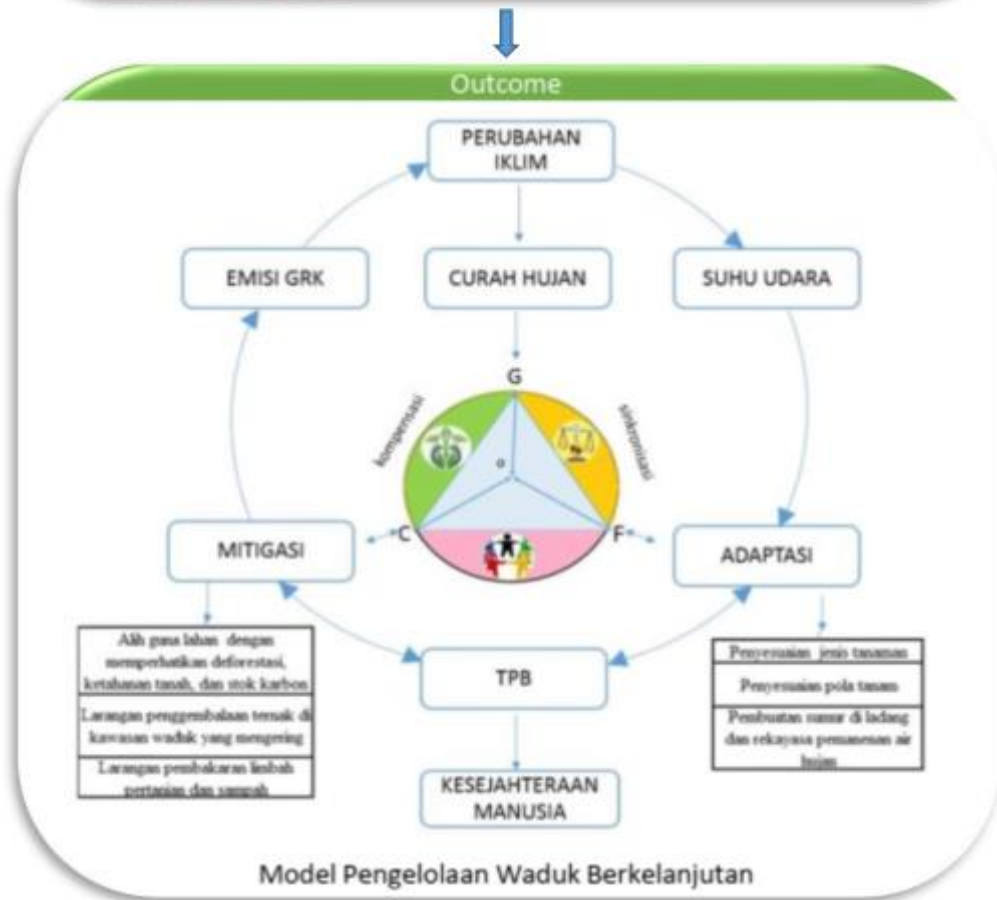
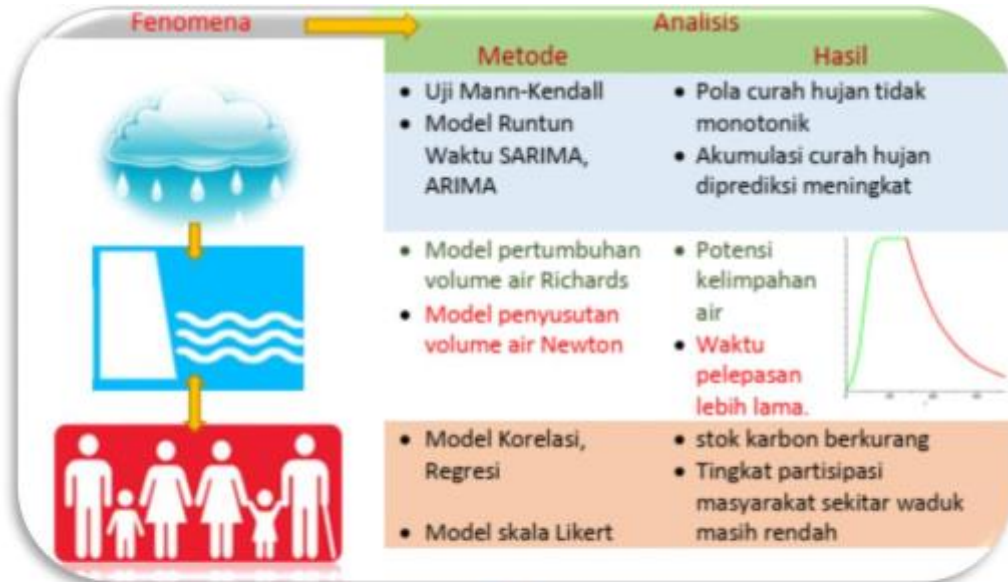
ABSTRACT

The strategic benefits of the Gembong Reservoir in Pati Regency, Indonesia as flood control and support for food security are also threatened by climate change and anthropogenic activities in land use. The ecological implications of the dynamics of water availability are urgently analyzed as part of sustainable reservoir management efforts in mitigating climate change. This study aims to analyze this phenomenon from an environmental perspective by using a data-based mathematical and statistical modeling approach. The results of the study based on local daily rainfall data, daily reservoir water volume, land class area and annual population in Gembong District, answers to questionnaires and interviews indicate that (1) local rainfall patterns do not follow a monotonic trend according to the Mann-Kendall test, while the accumulation is predicted to increase every year according to the SARIMA and ARIMA models, (2) the availability of reservoir water which is influenced by rainfall has the potential to be abundant after the reservoir reaches the saturation phase according to Richards' logistic growth dynamics model, (3) the duration of the release for supplementary water is longer than the existing operation according to the Newton shrinkage model, so that the growth and release model can construct a model of water availability in the reservoir, (4) the dynamics of community forest land use which is influenced by population growth is predicted to shrink according to the spline regression model and have an impact on reducing carbon stocks, while (5) opportunities for community participation in reservoir protection and management need to be increased according to the Likert scale. Based on the analysis of its ecological implications, it can be concluded that an abundance of water has the potential to trigger local hydrometeorological disasters, so that the planting of trees that are capable of protecting soil resilience and carbon sequestration is prioritized as a mitigation action, followed by adaptation of the selection of plant species and cropping patterns by farmers.

Keywords: Ecological implications, Hydrometeorology, Land use, Rainfall, Sustainable management.

SEKOLAH PASCASARJANA

GRAPHICAL ABSTRACT



RINGKASAN

Waduk Gembong di Kecamatan Gembong, Kabupaten Pati, Indonesia sebagai lokasi penelitian. Tekanan lingkungan dalam pengelolaan berkelanjutan Waduk Gembong sebagai waduk tadah hujan semakin besar seiring dengan perubahan iklim dan kegiatan antropogenik pemanfaatan lahan di kawasan waduk. Dampak perubahan iklim pada ketersediaan air di waduk memicu masalah ekohidrologi. Kajian dari aspek hidrologis dan infrastruktur waduk beserta perawatannya telah dilakukan secara berkala oleh Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana, sehingga penelitian dari perspektif lingkungan untuk disertasi ini difokuskan pada aspek ekologis dan implikasinya. Kajian secara komprehensif urgen dilakukan mengingat usia waduk yang semakin tua. Indikator-indikator ekologis sebagai obyek penelitian ini adalah karakteristik curah hujan lokal, dinamika pertumbuhan volume air pada waktu pengisian, dinamika pelepasan volume air untuk suplesi irigasi, kegiatan antropogenik dalam penggunaan lahan, serta persepsi dan partisipasi masyarakat dalam perlindungan dan pengelolaan sumber daya air waduk. Penelitian non intervensi ini dilaksanakan untuk menjawab permasalahan lingkungan sebagai dasar dari perumusan strategi mitigasi dan adaptasi dampak perubahan iklim pada ketersediaan air waduk. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah menemukan karakteristik curah hujan lokal dan prediksinya, mengembangkan model dinamika pertumbuhan volume air di waduk dan pelepasan volume air untuk suplesi irigasi, serta dampak dinamika alih guna lahan pada eksistensi waduk dan penyerapan karbon seiring pertumbuhan jumlah penduduk, menilai persepsi masyarakat dan partisipasinya menjaga kelestarian sumber daya air. Perumusan strategi mitigasi dan adaptasi dampak perubahan iklim pada ketersediaan air waduk dalam pengelolaan waduk berkelanjutan didasarkan pada analisis implikasi ekologisnya. Dokumen saintifik yang dihasilkan oleh penelitian ini diharapkan bermanfaat sebagai bahan pertimbangan untuk merumuskan strategi mitigasi dan adaptasi dalam pengelolaan waduk berkelanjutan. Penelitian ini didukung oleh penelitian-penelitian terdahulu. Curah hujan sebagai parameter lingkungan digunakan untuk

melacak tingkat dan variabilitas perubahan iklim, yang berdampak pada ketersediaan air di masa mendatang (IPPC, 2007). Ketidakpastian iklim dapat menyebabkan curah hujan yang berfluktuatif dengan pola yang tidak menentu dan dalam selang waktu tertentu dapat bersifat ekstrim (Sunusi et al., 2017; Asfaw et al., 2018), namun dapat juga berpola gelombang periodik sinusoidal (Mahmood et al., 2019). Trennya dianalisis dengan uji Mann-Kendall (Mondal et al., 2012; Gasiorek et al., 2015; Asfaw et al., 2018; Zhang et al., 2018). Penyusunan rencana operasi waduk mempertimbangkan karakteristik curah hujan lokal (Aydin et al., 2019) dan prediksinya berdasarkan model runtun waktu (Asadi et al., 2013; Farajzadeh et al., 2014), serta perilaku hidrologisnya dalam kondisi yang berubah di masa mendatang (Szporak-Wasilewska et al., 2015). Kajian-kajian tentang neraca air melalui model-model dinamika ketersediaan air di waduk, yang dikembangkan berdasarkan prinsip kesetimbangannya. Dinamika volume air inflow-outflow dijelaskan, antara lain melalui pendekatan model SWAT (Desta et al., 2017b; Ayivi et al., 2018; Hallauz et al., 2018), model sistem dinamika neraca air (Bonacci et al., 2008; Pandey et al., 2011; Xi et al., 2013; Daniela et al., 2014; Szporak-Wasilewska et al., 2015; Fowe et al., 2015; Mereu et al., 2016; Tinoco et al., 2016; Ghose et al., 2018), aliran stock (Alifujiang et al., 2017), bahkan kombinasi SWAT dan MUSLE (Djebau et al., 2018), dan pengalokasian suplesi air irigasi secara *intermetten* berdasarkan model MOCK dan persamaan Muskingum (BBWS Pemali Juana, 2015b). 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 pengelolaannya memainkan peran penting dalam dinamika neraca 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 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 sosial-ekonominya mempengaruhi kegiatan pemanfaatan lahan, sehingga model pengelolaan berkelanjutan danau seharusnya dikembangkan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara proteksi lingkungan hidup, pertumbuhan ekonomi dan kebutuhan sosial masyarakat (Oming et al., 2000). Persepsi masyarakat terhadap eksistensi sumber daya air yang terdampak oleh perubahan iklim merupakan faktor penting dalam perumusan rencana aksi lokal mitigasi dan adaptasinya. 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). Pemodelan Matematika dan Statistika secara analitik maupun empiric berbasis data berperan utama sebagai bagian dalam metodologi penelitian ini melalui tahapan verifikasi, estimasi parameter, dan validasi model. Data primer tentang persepsi masyarakat dan partisipasinya diperoleh melalui wawancara mendalam dan kuisioner. Responden dan sumber data berasal dari Perangkat Kecamatan Gembong, Perangkat Desa Gembong, Pohgading, dan Sitaluhur mewakili desa-desa di kawasan hulu waduk, Kelompok masyarakat peduli waduk Gembong, Kelompok Petani Pengguna Air Irigasi, Pengelola waduk di lokasi dan kantor BBWS Pemali-Juana, BAPEDA Kabupaten Pati beserta dinas terkait, yakni DPUTR, Dinas Pertanian, dan Dinas Lingkungan Hidup. Data sekunder berupa data curah hujan harian lokal dan tinggi muka air waduk Gembong harian periode 2007-2020 berasal dari dokumen catatan harian Pengelola Waduk Gembong, data monografi Kecamatan Gembong periode 2005-2020 dari dokumen Kabupaten Pati dalam Angka 2005-2019 yang dipublikasi oleh BPS Kabupaten Pati, data DAS berasal dari BP-DAS Semarang. Pengolahan data dengan menggunakan software komputasi Matematika dan Statistika untuk analisis deskriptif dan inferensial, baik secara analitik maupun empiris. Hipotesis statistik diuji berdasarkan uji Statistika, sedangkan hipotesis analitik diuji berdasarkan mekanisme pemodelan Matematika. Obyek penelitian meliputi: (1). Karakteristik curah hujan lokal diidentifikasi dengan menggunakan koefisien variasi, nilai volatilitas, PCI (*Precipitation Concentration Index*), dan

analisis tren dengan Uji Mann-Kendall dan prediksinya menggunakan model runtun waktu ARIMA untuk bulan basah dan SARIMA untuk bulan basah dan kering, (2). Dinamika pertumbuhan volume air pada musim pengisian dianalisis berdasarkan tingkat pertumbuhan intrinsiknya menurut model pertumbuhan logistic *generalized*, (3) Dinamika pelepasan volume air irigasi dianalisis berdasarkan tingkat penyusutan intrinsic menurut model Newton tentang pendinginan yang dimodifikasi, (4). Dinamika pertumbuhan jumlah penduduk dimodelkan dengan model *double exponential smoothing* dan pengaruhnya terhadap dinamika alih guna lahan dianalisis berdasarkan model regresi *spline truncated*, (5). Persepsi masyarakat dan partisipasinya terhadap kelesatrian ketersediaan air waduk dianalisis menurut skala Likert dan korelasi Kendall's Tau, dan segitiga kepentingan tiga kompartemen C(Community), F(Farmer), G(Goverment). Analisis implikasi ekologisnya difokuskan untuk menilai potensi bencana hidrometeorologi lokal dan perumusan strategi mitigasi dan adaptasi dampak perubahan iklim terhadap ketersediaan air di waduk. Hasil penelitian ini adalah (1). Karakteristik curah hujan lokal adalah volatilitas curah hujan dengan perubahan yang tidak regular dalam variabilitas yang tinggi, kekeringan meteorologis dalam kategori sedang (moderate), tren curah hujan berfluktuatif dan tidak mengikuti pola tren monotonik tetapi konsentrasi curah hujannya tinggi. Peramalan dengan model ARIMA untuk bulan basah menunjukkan bahwa diprediksi peningkatan akumulasi curah hujan sebesar 17%, sedangkan dengan model SARIMA menunjukkan bahwa akumulasi total curah hujan musiman tidak terjadi perubahan yang menyolok pada dua tahun mendatang. (2) Model Richards $\beta=2$ merupakan model yang mempunyai konsistensi MAPE lebih kecil daripada model Verhulst, Gompertz, dan Malthus modifikasi. Model pertumbuhan Richards $\beta=2$ dengan $r = 0.063/\text{hari}$ merupakan model yang baik untuk menjelaskan dinamika pertumbuhan volume air di Waduk Gembong. Analisis tingkat pertumbuhan intrinsiknya mengindikasikan potensi kelimpahan air pada saat pengisian waduk di musim hujan. Potensi kehilangan air hujan yang melimpah melalui *spillway* terjadi pada setiap masa pengisian. (3) Model yang dimodifikasi dari model Newton untuk pendinginan dengan $k = 0.01064$ (1/hari)

sebagai model dinamika pelepasan air Waduk Gembong. Skenario pelepasan air berdasarkan model ini menunjukkan waduk mempunyai waktu lebih lama mencapai *dead storagenya*. (4) Model *double exponential smoothing* dapat menggambarkan dinamika pertumbuhan jumlah penduduk, dan pengaruhnya terhadap perubahan luas lahan hutan rakyat dimodelkan oleh model regresi *spline truncated*. Pertambahan jumlah penduduk menyebabkan penyusutan luas lahan hutan rakyat. Pertimbangan kepentingan ekonomi lebih diutamakan dalam alih guna lahan dari tanaman lindung menjadi tanaman produktif, yang secara fungsionalnya bukan sebagai tanaman lindung. Stok karbon berkurang seiring dengan adanya alih guna lahan. (5) Persepsi masyarakat menentukan pengalaman partisipasinya dalam menjaga kelestarian air waduk. Perbedaan kepentingan antara masyarakat sekitar waduk dan petani dalam mewujudkan partisipasinya berpotensi memicu konflik horizontal. Resolusi konflik kepentingan dengan skenario kompensasi untuk masyarakat yang tidak menerima manfaat langsung adanya waduk, dan sinkronisasi adaptasi jenis tanaman untuk masyarakat petani agar dapat menjaga keseimbangan antar kepentingan sesuai prinsip-prinsip Tujuan Pembangunan Berkelanjutan. Keseimbangan antara tiga kepentingan tersebut digambarkan oleh *the triangle of interest CFG model*. Model pengelolaan berkelanjutan ketersediaan air di Waduk Gembong dikonstruksi berdasarkan analisis implikasi ekologis untuk merumuskan strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Kesimpulan berikut ini berdasarkan analisis implikasi ekologis dari parameter ekologis dan kegiatan antropogenik. Volatilitas curah hujan lokal tidak mengikuti pola trend tertentu dengan akumulasi curah hujan diprediksi meningkat. Tingkat pertumbuhan intrinsik volume air di musim pengisian mengindikasikan potensi terjadinya kelimpahan air. Tingkat penyusutan intrinsik pada saat pelepasan air irigasi mengindikasikan ketersediaan air tidak mencukupi kebutuhan irigasi pertanian. Alih guna lahan hutan rakyat menjadi kawasan terbuka (tegalan) untuk perkebunan dengan tanaman musiman berpotensi meningkatkan terjadinya erosi yang memicu sedimentasi di waduk dan berkurangnya stok karbon. Potensi konflik kepentingan antara masyarakat sekitar waduk, masyarakat petani sebagai penerima manfaat, dan pemerintah

diselesaikan melalui strategi kompensasi yang harus diberikan oleh pemerintah. Perumusan strategi mitigasi dan adaptasi disarankan mempertimbangkan (1) potensi kelimpahan air pada saat waduk dalam kondisi saturasi, sehingga perlu peningkatan daya tampung waduk melalui normalisasi waduk, (2) luasan hutan rakyat yang diprediksi menyusut seiring pertambahan jumlah penduduk perlu dicegah dengan penanaman pohon yang berkemampuan melindungi ketahanan tanah dan penyerapan karbon, (3) skenario kompensasi melalui pemberdayaan masyarakat dengan program kegiatan di luar kawasan lindung agar tidak mendegradasi lingkungan waduk, (4) pelibatan kelompok masyarakat peduli waduk sebagai agen edukasi tentang kelestarian waduk dan pemberdayaan masyarakat. Penemuan dalam penelitian ini adalah karakteristik curah hujan lokal dan model prediksinya, penerapan model Richards $\beta=2$ sebagai model pertumbuhan volume air, penerapan model Newton tentang pendinginan sebagai model pelepasan air irigasi, model *double exponential smoothing* untuk menggambarkan dinamika pertumbuhan penduduk, yang pengaruhnya terhadap dinamika alih guna lahan dianalisis berdasarkan model *regresi spline truncated*, model keseimbangan 3 kompartemen CFG (Community, Farmer, Government) berdasarkan prinsip-prinsip Tujuan Pembangunan Berkelanjutan, dan model pengelolaan berkelanjutan ketersediaan air di Waduk Gembong sebagai upaya mitigasi perubahan iklim. Kebaruan dalam penelitian adalah pendekatan holistik pengelolaan berkelanjutan ketersediaan air di Waduk Gembong dari perspektif lingkungan, yang mengintegrasikan indikator perubahan iklim dan kegiatan antropogenik penggunaan lahan, serta persepsi masyarakat dan partisipasinya sebagai bahan pertimbangan dalam penyusunan rencana aksi lokal mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Luaran dari penelitian ini adalah dokumen saintifik model pengelolaan berkelanjutan ketersediaan air di Waduk Gembong dalam upaya mitigasi perubahan iklim, dua artikel prosiding seminar internasional terindex Scopus, dua artikel terbit di jurnal internasional terindex Scopus, dan buku teks ISBN (Hak Cipta).

SUMMARY

Gembong Reservoir in Gembong District, Pati Regency, Indonesia as the research location. Environmental pressures in the sustainable management of Gembong Reservoir as a rainfed reservoir are getting bigger in line with climate change and anthropogenic activities of land use in the reservoir area. The impact of climate change on the availability of water in reservoirs triggers ecohydrological problems. Studies from the hydrological aspect and reservoir infrastructure and their maintenance have been carried out regularly by the Pemali Juana River Basin Center, so that research from an environmental perspective for this dissertation is focused on the ecological aspect and its implications. A comprehensive study is urgently carried out considering the age of the reservoir is getting older. Ecological indicators as the object of this research are the characteristics of local rainfall, the dynamics of water volume growth at the time of filling, the dynamics of releasing water volume for irrigation supplementation, anthropogenic activities in land use, as well as community perceptions and participation in the protection and management of reservoir water resources. This non-intervention research was carried out to answer environmental problems as the basis for formulating mitigation and adaptation strategies for the impact of climate change on the availability of reservoir water. Therefore, the purpose of this study is to find the characteristics of local rainfall and its predictions, develop a dynamic model of the growth of water volume in reservoirs and the release of water volume for irrigation supplementation, as well as the impact of dynamics of land use change on the existence of reservoirs and carbon sequestration along with population growth, assessing community perception and participation in preserving water resources. The formulation of mitigation and adaptation strategies for the impact of climate change on the availability of reservoir water in sustainable reservoir management is based on an analysis of its ecological implications. The scientific documents produced by this research are expected to be useful as consideration for formulating mitigation and adaptation strategies in sustainable reservoir management. This research is supported by previous studies. Rainfall as an environmental parameter

is used to track the rate and variability of climate change, which has an impact on future water availability (IPPC, 2007). Climate uncertainty can cause rainfall that fluctuates with an erratic pattern and in certain time intervals can be extreme (Sunusi et al., 2017; Asfaw et al., 2018), but can also have a sinusoidal periodic wave pattern (Mahmood et al., 2019). The trend was analyzed by the Mann-Kendall test (Mondal et al., 2012; Gasiorek et al., 2015; Asfaw et al., 2018; Zhang et al., 2018). The reservoir operation plan takes into account the characteristics of local rainfall (Aydin et al., 2019) and its predictions based on time series models (Asadi et al., 2013; Farajzadeh et al., 2014), as well as its hydrological behavior under changing conditions in the future (Szporak-Wasilewska et al., 2015). Studies on water balance through dynamic models of water availability in reservoirs, which were developed based on the principle of equilibrium. The dynamics of the inflow-outflow water volume is explained, among others through the SWAT model approach (Desta et al., 2017b; Ayivi et al., 2018; Hallauz et al., 2018), the system model of the water balance dynamics (Bonacci et al., 2008; Pandey et al., 2011; Xi et al., 2013; Daniela et al., 2014; Szporak-Wasilewska et al., 2015; Fowe et al., 2015; Mereu et al., 2016; Tinoco et al., 2016; Ghose et al., 2018), stock flows (Alifujiang et al., 2017), even a combination of SWAT and MUSLE (Djebau et al., 2018), and the allocation of intermittent irrigation water supply based on the MOCK model and the Muskingum equation (BBWS Pemali Juana, 2015b). The relationship between rainfall which represents climatic conditions, water, soil, and land use is the basis for modeling hydrodynamics of sedimentation (Jajarmizadeh et al., 2012; Norzilah et al., 2016). The suitability of land use and its management plays an important role in the dynamics of the water balance in the reservoir (Nugroho et al., 2013) and the condition of its sub-watershed (Wahyuningrum et al., 2018). Anthropogenic and natural activities control the sediment composition which determines the reservoir capacity (Ghandour et al., 2014; Desta et al., 2017a). Land conversion and its impacts are important factors in the dynamics of the water balance and its sustainability (Nugroho et al., 2013; Sun et al., 2016; Karlsson et al., 2016), whose valuation takes into account ecological, social, and economic aspects (Molina, 2016). Increasing population and its socio-economic demands

affect land use activities, so a sustainable lake management model should be developed by considering the balance between environmental protection, economic growth and social needs of the community (Oming et al., 2000). Public perception of the existence of water resources affected by climate change is an important factor in the formulation of local action plans for mitigation and adaptation. A good understanding of public opinion and various individual perceptions is needed in making effective climate change policies (Hitayezu et al., 2017), and developing alternative scenarios (Li et al., 2017). Analytical and empirical data-based mathematical and statistical modeling plays a major role as part of this research methodology through the stages of verification, parameter estimation, and model validation. Primary data on people's perceptions and participation were obtained through in-depth interviews and questionnaires. Respondents and data sources came from the Gembong District Apparatus, Gembong Village Apparatus, Pohgading, and Sitiluhur representing villages in the upstream area of the reservoir, community groups concerned with the Gembong reservoir, Irrigation Water User Farmers Group, reservoir manager at the location and the Pemali-Juana BBWS office, BAPEDA Pati Regency and related agencies, namely DPUTR, Department of Agriculture, and Department of the Environment. Secondary data in the form of local daily rainfall data and daily Gembong reservoir water level for the period 2007-2020 comes from the Gembong Reservoir Manager's diary document, the Gembong District monograph data for the 2005-2020 period from the Pati Regency document in Figures 2005-2019 published by the Regency BPS Pati, watershed data comes from BP-DAS Semarang. Processing data using mathematical and statistical computing software for descriptive and inferential analysis, both analytically and empirically. Statistical hypotheses were tested based on statistical tests, while analytical hypotheses were tested based on mathematical modeling mechanisms. The research objects include: (1). Local rainfall characteristics were identified using the coefficient of variation, volatility value, PCI (Precipitation Concentration Index), and trend analysis using the Mann-Kendall test and predictions using the ARIMA time series model for the wet month and SARIMA for the wet and dry months, (2). The dynamics of water volume growth in the filling season was

analyzed based on its intrinsic growth rate according to the generalized logistic growth model, (3) The dynamics of irrigation water volume release was analyzed based on the intrinsic shrinkage rate according to Newton's model of modified cooling, (4). The dynamics of population growth is modeled by the double exponential smoothing model, and its effect on the dynamics of land use change is analyzed based on the truncated spline regression model. Carbon stock decreases with land use change (5). Community perceptions and their participation in the sustainability of reservoir water availability were analyzed according to the Likert scale and Kendall's Tau correlation, and the three-compartment interest triangle C(Community), F(Farmer), G(Government). The analysis of its ecological implications is focused on assessing the potential for local hydrometeorological disasters and formulating mitigation and adaptation strategies for the impact of climate change on water availability in reservoirs. The results of this study are (1). The characteristics of local rainfall are the volatility of rainfall with irregular changes in high variability, meteorological drought in the moderate category, the trend of fluctuating rainfall and does not follow a monotonic trend pattern but the concentration of rainfall is high. Forecasting with the ARIMA model for wet months shows that a 17% increase in rainfall accumulation is predicted, while the SARIMA model shows that there will be no significant change in the total seasonal rainfall accumulation in the next two years. (2) The Richards =2 model is a model that has a smaller MAPE consistency than the modified Verhulst, Gompertz, and Malthus models. Richards growth model =2 with $r = 0.063/\text{day}$ is a good model to explain the dynamics of water volume growth in Gembong Reservoir. Analysis of the intrinsic growth rate indicates the potential for water abundance at the time of filling the reservoir in the rainy season. The potential for loss of abundant rainwater through the spillway occurs at each filling period. (3) Modified model from Newton's model for cooling with $k = 0.01064$ (1/day) as a model for the dynamics of water release from the Gembong Reservoir. The water release scenario based on this model shows that the reservoir has a longer time to reach its dead storage. (4) The double exponential smoothing model can describe the dynamics of population growth, and its effect on changes in community forest land area is modeled by a

truncated spline regression model. The increase in population causes the shrinkage of community forest land area. Consideration of economic interests is prioritized in the conversion of land use from protected plants to productive plants, which are functionally not as protected plants. (5) The perception of the community determines the experience of their participation in preserving reservoir water. Differences in interests between the community around the reservoir and farmers in realizing their participation have the potential to trigger horizontal conflicts. Resolution of conflicts of interest with compensation scenarios for communities who do not receive direct benefits from the existence of reservoirs, and synchronizing adaptation of plant species for farming communities in order to maintain a balance between interests according to the principles of the Sustainable Development Goals. The balance between these three interests is illustrated by the triangle of interest CFG model. The model for sustainable management of water availability in the Gembong Reservoir is constructed based on an analysis of the ecological implications to formulate climate change mitigation and adaptation strategies. The following conclusions are based on an analysis of the ecological implications of ecological parameters and anthropogenic activities. The volatility of local rainfall does not follow a certain trend pattern with rainfall accumulation predicted to increase. The intrinsic growth rate of water volume in the filling season indicates the potential for water abundance. The rate of intrinsic shrinkage at the time of irrigation water release indicates the availability of water is not sufficient for agricultural irrigation needs. The conversion of community forest land into an open area (moor) for plantations with seasonal crops has the potential to increase erosion which triggers sedimentation in reservoirs and reduces carbon stocks. Potential conflicts of interest between communities around the reservoir, farming communities as beneficiaries, and the government are resolved through a compensation strategy that must be provided by the government. The formulation of mitigation and adaptation strategies is recommended to consider (1) the potential for water abundance when the reservoir is in saturation, so that it is necessary to increase the reservoir capacity through normalization of the reservoir, (2) the area of community forest which is predicted to shrink with population growth needs to

be prevented by planting trees that are capable of protecting soil resilience and sequestering carbon, (3) compensation scenarios through community empowerment with program activities outside protected areas so as not to degrade the reservoir environment, (4) involvement of community groups who care about reservoirs as educational agents about reservoir sustainability and community empowerment. The findings in this study are the characteristics of local rainfall and its prediction model, the application of the Richards =2 model as a water volume growth model, the application of Newton's model of cooling as a model of irrigation water release, the double exponential smoothing model to describe the dynamics of population growth, which influences the dynamics of population growth. Land use change was analyzed based on the truncated spline regression model, the 3-compartment CFG (Community, Farmer, Government) balance model based on the principles of the Sustainable Development Goals, and the sustainable management model of water availability in the Gembong Reservoir as an effort to mitigate climate change. The novelty in the research is the holistic approach to sustainable management of water availability in the Gembong Reservoir from an environmental perspective, which integrates indicators of climate change and anthropogenic land use activities, as well as community perceptions and participation as consideration in the preparation of local action plans for climate change mitigation and adaptation. The output of this research is a scientific document on the model of sustainable management of water availability in the Gembong Reservoir in an effort to mitigate climate change, two articles on international seminar proceedings indexed by Scopus, two articles published in international journals indexed by Scopus, and an ISBN (Copyright) textbook.

BIODATA SINGKAT PENULIS

1	Nama	Drs. Kartono, M.Si
2	Tempat dan Tanggal Lahir	Pati, 25 Agustus 1963
3	Alamat Rumah	Perm.Tulus Harapan B13B/10 Sendangmu Tembalang, Semarang
4	Alamat Kantor	Departemen Matematika FSM UNDIP, Jl. Prof.H.Soedarto,SH,Tembalang Semarang
5	Riwayat Pendidikan	S1 Matematika, UNDIP, lulus 1988 S2 Matematika, ITB, lulus 1996
6	Penelitian (5 tahun terakhir)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengembangan Motif Ornamen Ubin Keramik, Tegel, Roster, dan Paving Blok berbasis Kristalografi untuk Meningkatkan Daya Saing Produk, 2017, 2018 2. Permodelan Matematika Dampak Perubahan Iklim pada Ketersediaan Air Waduk, 2019 3. Persepsi dan Partisipasi Masyarakat dalam Pengembangan Strategi Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim pada Ketersediaan Air Waduk, 2019. 4. Pemodelan Matematika Dampak Perubahan Iklim pada Ketersediaan Air Waduk: Estimasi Parameter, Validasi, dan Simulasi, 2020 5. Pemodelan Empiris Dinamika Pelepasan Air Waduk untuk Suplesi Irigasi, 2021
7	Pengabdian Masyarakat kepada Masyarakat	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pelatihan Pemodelan Matematika untuk Guru Matematika Se Jawa Tengah dan DI Yogyakarta, 2018 2. Perubinan Kristalografi sebagai Metode Pembelajaran Kreatif dan Inovatif Transformasi Bidang datar, 2019
8	Daftar Publikasi (5 tahun terakhir)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Potential environmental pressures on water availability in Gembong reservoir in Pati District for the development of agropolitan area , <i>J.Phys: Conf.Ser.</i>1217(2019)012061. https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1217/1/012061 2. Analysis of Local Rainfall Characteristics as a Mtigation Strategy for Hydrometeorology Disaster in Rain-fed Reservoirs Area, <i>Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal</i> 5(3):299-305 (2020). www.astesj.com. https://dx.doi.org/10.25046/aj050339 3. Reservoir water availability potential assessment using SARIMA modeling of monthly local rainfall data, <i>J.Phys: Conf.Ser.</i> 1918(2021)042045. https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1918/4/042045 4. Ecological Implication of the Dynamics of Water Volume Growth in a Reservoir, <i>Ecological Engineering & Environmental Technology</i> 2021. 22(4), 22-29 https://doi.org/10.12912/27197050/137867