



TESIS - RE185401

**PENYUSUNAN STRATEGI PENGENDALIAN KUALITAS AIR
WADUK DENGAN PENDEKATAN SISTEM DINAMIS
(STUDI KASUS: WADUK SUTAMI)**

SYADZADHIYA QOTHRUNADA ZAKIYAYASIN NISA
NRP. 03211650012010

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. NIEKE KARNANINGROEM, M.Sc

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



TESIS - RE185401

**PENYUSUNAN STRATEGI PENGENDALIAN KUALITAS AIR
WADUK DENGAN PENDEKATAN SISTEM DINAMIS
(STUDI KASUS: WADUK SUTAMI)**

SYADZADHIYA QOTHRUNADA ZAKIYAYASIN NISA
NRP. 03211650012010

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. NIEKE KARNANINGROEM, M.Sc

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019



THESIS - RE185401

**STRATEGIES ARRANGING OF RESERVOIR WATER
QUALITY CONTROL WITH SYSTEM DYNAMICS
APPROACH
(CASE STUDY: SUTAMI RESERVOIR)**

SYADZADHIYA QOTHRUNADA ZAKIYAYASIN NISA
NRP. 03211650012010

SUPERVISOR
Prof. Dr. Ir. NIEKE KARNANINGROEM, M.Sc

MAGISTER PROGRAM
DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
FACULTY OF CIVIL, ENVIRONMENTAL AND GEO ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2019

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :

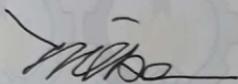
Syadzadhiya Qothrunada Zakiyayasin Nisa

NRP. 03211650012010

Tanggal Ujian : 10 Januari 2019

Periode Wisuda : Maret 2019

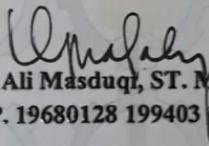
Disetujui oleh:



Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc

NIP. 19550128 198503 2 001

(Pembimbing)



Dr. Ali Masduqi, ST., MT.

NIP. 19680128 199403 1 003

(Penguji)



Alia Damayanti, ST., MT., Ph.D

NIP. 19770209 200312 2 001

(Penguji)



Ipung Fitri Purwanti, ST., MT., Ph.D

NIP. 19711114 200312 2 001

(Penguji)



Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dekan

I. D. A. Warmadewanthi, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 19750212 199903 2 001

**Penyusunan Strategi Pengendalian Kualitas Air Waduk dengan Pendekatan
Sistem Dinamis
(Studi Kasus: Waduk Sutami)**

Nama Mahasiswa : Syadzadhiya Qothrunada Zakiyayasin Nisa
NRP : 03211650012010
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc.

ABSTRAK

Kondisi perairan Waduk Sutami tercemar akibat bahan organik, dan tingkat pencemaran yaitu sedang hingga parah. Bahan organik yang masuk ke perairan akan terdekomposisi dan menyebabkan penurunan oksigen terlarut (DO). Peningkatan unsur hara dalam perairan yang berasal dari bahan organik dapat menyebabkan *algae bloom*. Sehingga tujuan dari penelitian ini yaitu membuat strategi pengendalian kualitas air waduk dengan pendekatan sistem dinamis.

Aspek teknis dari penelitian ini yaitu mensimulasikan model dinamika DO dengan parameter pencemaran BOD, COD, *Ammonia*, dan *Phosphate* menggunakan *software* Vensim PLE. Aspek lingkungan yang dibahas yaitu sumber pencemar dari permukiman, pertanian, dan keramba jaring apung (KJA), dan selanjutnya menjadi faktor dalam simulasi skenario pada model. Strategi dibuat berdasarkan simulasi skenario pada model dan analisa kelembagaan dengan metode *Interpretative Structural Modelling* (ISM).

Model sistem dinamis perubahan kualitas air Waduk Sutami dapat disimulasikan berdasarkan sub model sumber pencemar dan sub model kualitas air. Sub model sumber pencemar yaitu sub model permukiman, pertanian, dan perikanan KJA, sedangkan sub model kualitas air yaitu sub model DO, BOD, COD, ammonia, dan fosfat. Strategi pengendalian kualitas air Waduk Sutami antara lain pemasangan double net pada KJA, pembatasan total luas lahan KJA di waduk maksimal 15 ha, pembangunan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) komunal di permukiman, serta berkoordinasi aktif dengan Dinas Lingkungan Hidup, Dinas Perikanan, BBWS Brantas, dan Kelompok petani ikan KJA.

Katakunci: kualitas air, model, sistem dinamis, strategi pengendalian, waduk

Halaman ini sengaja dikosongkan

**Strategies Arranging of Reservoir Water Quality Control with
System Dynamics Approach
(Case Study: Sutami Reservoir)**

Name of Student : Syadzadhiya Qothrunada Zakiyayasin Nisa
NRP : 03211650012010
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc.

ABSTRACT

The condition of Sutami Reservoir was polluted by organic matter, and the pollution level was moderate to severe. Organic matter in the water will be decomposed and will cause the depletion of dissolved oxygen (DO). Increased nutrients in the water that come from organic matter can cause the algae bloom. The purpose of this study was to make strategies for controlling the reservoir water quality with system dynamics approach.

The technical aspect of this study was to simulate DO dynamics models with BOD, COD, Ammonia, and Phosphate pollution parameters using Vensim PLE software. The environmental aspects discussed were pollutant sources from settlements, agriculture, and floating net cages, and then became factors in scenario simulations on the model. The strategies were based on scenarios simulation on the model and institutional analysis using the Interpretative Structural Modeling (ISM) method.

The dynamic system model in water quality of Sutami Reservoir could be simulated from sub-models of pollutant sources and sub-models of water quality. Sub-models of pollutant source were settlements, agriculture, and floating net cages sub-models, while sub-models of water quality were DO, BOD, COD, ammonia and phosphate sub-models. Strategies for water quality control of Sutami Reservoir were the installation of double net at floating net cages, limitation of total floating net cages land area in a maximum of 15 ha, construction of communal wastewater treatment plants (WWTPs) in settlements, and coordinating with the Environmental Office, Fishery Office, BBWS Brantas, and fish farmer groups actively.

Keywords: control strategies, model, reservoir, system dynamics, water quality

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, berkah, dan hidayah-Nya sehingga Tesis ini dapat terselesaikan. Tesis **“Penyusunan Strategi Pengendalian Kualitas Air Waduk dengan Pendekatan Sistem Dinamis (Studi Kasus: Waduk Sutami)”** ini dibuat dalam rangka memenuhi salah satu prasyarat kelulusan program magister Teknik Lingkungan ITS. Dalam penulisan laporan ini, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu penulis antara lain:

1. Dosen Pembimbing Tesis, Prof. Dr. Ir. Nieke Karnaningroem, M.Sc., terima kasih atas ilmu, nasehat, arahan dan kesabarannya dalam membimbing penulis.
2. Dosen Pengarah Tesis, Prof. Dr. Ir. Sarwoko Mangkoedihardjo, M. ScEs, Dr. Ir. Ali Masduqi, MT., Alia Damayanti, ST., MT., PhD., dan Ir. Agus Slamet, M.Sc., terimakasih atas saran dan arahannya untuk penulis.
3. Dosen Wali, Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, MT., terimakasih atas saran-saran yang telah diberikan kepada penulis dalam menempuh perkuliahan.
4. PJT 1 dan instansi-instansi pemerintah Kabupaten Malang yang telah memberikan data terkait penelitian ini.

Rasa hormat dan terimakasih juga kepada kedua orang tua penulis yang selalu memberi doa dan motivasi dalam pengerjaan tesis ini. Penulis ucapkan terimakasih juga kepada Mas Malkan, Ragil, Mbak Lintang, Mbak Hilda, dan teman-teman Magister Teknik Lingkungan yang senantiasa saling membantu dalam proses pengerjaan tesis. Penulis berharap semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembacanya.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Ekosistem Perairan Waduk	7
2.1.1 Stratifikasi Waduk	7
2.1.2 Pembagian Zona Biologis Waduk	8
2.1.3 Produktivitas Waduk	9
2.2 Oksigen Terlarut (<i>Dissolved Oxygen/DO</i>) Perairan Waduk	10
2.2.1 Sumber Oksigen Terlarut	13
2.2.2 Pemanfaatan oksigen terlarut	14
2.3 Sumber Pencemaran Waduk	16
2.3.1 Keramba Jaring Apung (KJA)	16
2.3.2 Permukiman	17
2.3.3 Pertanian	17
2.4 Pengendalian Kualitas Air Waduk	18
2.4.1 Jumlah penduduk	18
2.4.2 Penggunaan Lahan	18
2.4.3 Kebiasaan Sehari-hari	19
2.5 Pendekatan Sistem	19
2.6 Sistem Dinamis	20
2.6.1 <i>Causal Loops Diagram</i>	21
2.6.2 <i>Stock dan Flow</i>	23
2.7 Vensim	24
2.8 Kelembagaan	25
2.9 <i>Interpretative Structural Modeling</i>	25
2.10 Penelitian Terdahulu	28
BAB 3 METODE PENELITIAN	31
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.2 Kerangka Penelitian	31
3.3 Bahan dan Alat Penelitian	31
3.3.1 Bahan penelitian	31
3.3.2 Alat penelitian	31
3.4 Pengumpulan Data	31
3.4.1 Jenis Data	31

3.4.2	Sumber Data	34
3.5	Pengolahan Data	34
3.5.1	Identifikasi Kualitas Air	34
3.5.2	Artikulasi masalah dan penentuan batas model.....	36
3.5.3	<i>Causal loop</i>	36
3.5.4	Strukturisasi dan Formulasi model.....	37
3.6	Analisis Model	48
3.6.1	Validasi dan Kalibrasi	48
3.6.2	Uji Sensitivitas.....	48
3.6.3	Simulasi Skenario	49
3.7	Analisis Kelembagaan.....	49
3.7.1	Identifikasi Elemen.....	49
3.7.2	<i>Structural Self Matrix</i> (SSM)	49
3.7.3	RM (Reachability Matrix)	50
3.7.4	Membentuk Digraph.....	50
BAB 4	DESKRIPSI DAERAH PENELITIAN	53
4.1	Geografis	53
4.2	Gambaran Umum Sumber Aliran Waduk Sutami	53
4.3	Permukiman	54
4.4	Pertanian.....	55
4.5	Perikanan.....	56
BAB 5	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	57
5.1	Status Mutu Air Waduk Sutami	57
5.2	Deskripsi Model	58
5.2.1	Struktur Model.....	58
5.2.2	Formulasi Model	63
5.2.3	Hasil Validasi Model	65
5.2.4	Hasil Kalibrasi model	69
5.2.5	Hasil Uji Sensitivitas	70
5.3	Simulasi Skenario	71
5.4	Alternatif Strategi.....	76
5.4.1	Strategi Berdasarkan Simulasi Skenario pada Model.....	76
5.4.2	Strategi Berdasarkan Analisa Kelembagaan.....	77
BAB 6	KESIMPULAN DAN SARAN	81
6.1	Kesimpulan	81
6.2	Saran.....	81
	DAFTAR PUSTAKA	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Kriteria waduk berdasarkan status trofik	10
Tabel 2.2	Dampak DO terhadap badan air.....	11
Tabel 2.3	Komposisi beban pencemaran limbah domestik	17
Tabel 2.4	'Tools' dasar pada Vensim	24
Tabel 2.5	Daftar penelitian terdahulu	28
Tabel 3.1	<i>Scoring</i> metode STORET	35
Tabel 3.2	Faktor Emisi (FE) perhitungan beban pencemaran limbah domestik.	39
Tabel 3.3	Faktor Emisi (FE) perhitungan beban pencemaran pertanian	41
Tabel 3.4	Formulasi dinamika DO	47
Tabel 4.1	Jumlah penduduk sekitar Waduk Sutami tahun 2017.....	55
Tabel 4.2	Luas lahan pertanian sekitar Waduk Sutami tahun 2017.....	55
Tabel 5.1	Perhitungan STORET	57
Tabel 5.2	Formulasi model dalam program dinamis	64
Tabel 5.3	Perbandingan simulasi jumlah penduduk dengan data aktual	65
Tabel 5.4	Perbandingan simulasi luas lahan pertanian dengan data aktual	66
Tabel 5.5	Perbandingan simulasi luas KJA dengan data aktual	67
Tabel 5.6	Kontanta terkalibrasi.....	70
Tabel 5.7	Peringkat signifikansi variabel eksogen terhadap output model	71
Tabel 5.8	Variabel peubah dalam simulasi skenario	72
Tabel 5.9	Skenario dan kombinasi kondisi variabel	73
Tabel 5.10	Lembaga yang terlibat dalam pengelolaan Waduk Sutami	80

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Stratifikasi perairan waduk	7
Gambar 2.2	Pembagian zona biologis waduk.....	8
Gambar 2.3	Dinamika DO	12
Gambar 2.4	<i>Causal loops diagram</i>	22
Gambar 2.5	<i>Feedback loops</i>	23
Gambar 2.6	<i>Stock dan flow</i>	23
Gambar 3.1	Kerangka Penelitian	33
Gambar 3.2	<i>Causal loop</i> penelitian.....	37
Gambar 3.3	Pendekatan <i>Control-volume</i> perairan waduk Sutami	37
Gambar 3.4	Sub model beban pencemaran permukiman	39
Gambar 3.5	Sub model beban pencemaran pertanian.....	40
Gambar 3.6	Sub model beban pencemaran KJA	41
Gambar 3.7	Sub model BOD	43
Gambar 3.8	Sub model COD	43
Gambar 3.9	Sub model ammonia.....	44
Gambar 3.10	Sub model fosfat.....	45
Gambar 3.11	Struktur sub model DO.....	46
Gambar 3.12	<i>Structural Self Matrix</i>	49
Gambar 3.13	<i>Reachability Matrix</i>	50
Gambar 3.14	Digraph ISM.....	51
Gambar 4.1	Batas-batas Waduk Sutami.....	53
Gambar 4.2	Waduk Sutami	54
Gambar 5.1	Perbandingan output model dan data aktual; (a) data aktual; (b) hasil simulasi	69
Gambar 5.2	Nilai BOD perairan Waduk Sutami dari simulasi skenario	75
Gambar 5.3	Skor STORET Waduk Sutami berdasarkan simulasi skenario	76
Gambar 5.4	Perbandingan beban pencemaran di Waduk Sutami untuk simulasi tanpa skenario dan dengan skenario terbaik	77
Gambar 5.5	Diagram hierarki dari sub elemen Lembaga.....	80
Gambar 5.6	<i>Digraph ISM</i>	81

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran I	Identifikasi kualitas air Waduk Sutami tahun 2017	89
Lampiran II	Running program Vensim PLE	91
Lampiran III	Dokumen input formulasi model dalam program Vensim.....	93
Lampiran IV	Validasi output model terhadap data aktual Waduk Sutami tahun 2016 - 2017	99
Lampiran V	Uji Sensitivitas	103
Lampiran VI	Simulasi kualitas air Waduk Sutami	107
Lampiran VII	Identifikasi kualitas air dari simulasi skenario.....	111
Lampiran VIII	Analisis kelembagaan dengan ISM.....	113
Lampiran IX	Dokumentasi	115

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manusia telah membuat danau-danau buatan, yang juga disebut sebagai waduk, bendungan atau *reservoir*. Waduk menjadi tampungan aliran air dalam jumlah besar, sebagai penyedia bahan pangan, dan dapat digunakan sebagai tempat rekreasi untuk kepentingan masyarakat. Waduk dijadikan sumber mata pencaharian untuk sebagian masyarakat penghuni wilayah tepian waduk. Waduk juga merupakan habitat bagi beragam jenis flora dan fauna. Peruntukan-peruntukan tersebut menjadikan waduk sebagai ekosistem yang kondisinya dapat berubah secara dinamis akibat lingkungan sekitar (Forum Danau Indonesia, 2004).

Salah satu waduk di Indonesia yaitu waduk Sutami. Waduk Sutami terletak di Desa Karangates, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang. Waduk Sutami merupakan waduk terbesar di Jawa Timur sebagai tampungan aliran DAS Brantas Hulu (Irianto dkk., 2010). Waduk Sutami memiliki area genangan rata-rata sebesar 790 ha, kedalaman maksimum 31 m, ketinggian permukaan 297 m, dan dapat menampung air hingga 343.000.000 m³. Waduk ini dibangun pada tahun 1975-1977 dan menjadi waduk nasional kedua yang dibangun oleh Departemen Pekerjaan Umum. Waduk Sutami saat ini difungsikan untuk pengendalian banjir, irigasi, perikanan air tawar, dan memproduksi tenaga listrik sekitar 488 juta kwh per tahun (Juantari dkk., 2013; Pemerintah Kabupaten Malang, 2017).

Pemanfaatan waduk secara berkelanjutan sering menghadapi masalah. Dampak yang ditimbulkan oleh pemanfaatan waduk secara kurang bertanggungjawab dapat dilihat pada kualitas airnya (Forum Danau Indonesia, 2004). Kondisi perairan Waduk Sutami tercemar mulai dari bagian hulu sampai di hilir. Tingkat pencemaran yang terjadi yaitu sedang hingga parah. Status trofik Waduk Sutami adalah eutrofik hingga hipereutrofik yang terjadi pada bagian hilir dan tengah waduk (Irianto dkk., 2010; Juantari dkk., 2013).

Pada dasarnya, alam memiliki kemampuan untuk mengatasi masalah pencemaran dengan pemurnian alami (*self purification*). Akan tetapi pemurnian alami hanya bisa terjadi pada kondisi pencemaran tertentu. Tingkat pencemaran

yang melebihi daya tampung akan lambat untuk terjadi pemurnian alami. Kondisi perairan Waduk Sutami yang tercemar menunjukkan bahwa banyak bahan organik yang masuk melebihi daya tampung beban pencemaran waduk. Bahan organik tersebut terdapat kandungan unsur hara yang menjadi sumber nutrisi mikroorganisme. Dampak yang dapat terjadi akibat banyaknya bahan organik yang masuk ke perairan adalah adanya potensi kondisi marak alga atau *algae bloom*. Semakin banyak bahan organik yang masuk ke perairan maka proses dekomposisi juga meningkat. Proses-proses yang terjadi akan saling berkaitan dengan konsumsi oksigen terlarut (*dissolved oxygen/DO*) di perairan waduk (Prasad dkk., 2010; Xu dan Xu, 2016).

Kualitas air menjadi masalah mendasar yang menyangkut pemanfaatan air waduk untuk menunjang kehidupan masyarakat sekitar. Waduk Sutami diperuntukkan sebagai air baku oleh pemerintah setempat, namun air waduk belum dapat digunakan sebagai air baku dalam sistem penyediaan air minum (Pemerintah Kabupaten Malang, 2017). Pengukuran parameter air waduk menunjukkan bahwa kualitas air belum memenuhi baku mutu. Kualitas air waduk dapat dilihat berdasarkan parameter DO, BOD, COD, ammonia, dan fosfat. Berdasarkan pemantauan kualitas perairan Waduk Sutami tiap bulan oleh Perusahaan Umum Jasa Tirta (PJT) 1, beberapa nilai DO, BOD dan COD Waduk Sutami tidak memenuhi baku mutu untuk perairan kelas II. Parameter DO yang tidak memenuhi baku mutu 4 mg/L pada tahun 2014 sebanyak 1 data, tahun 2015 sebanyak 1 data, dan tahun 2016 sebanyak 4 data. Parameter BOD yang tidak memenuhi baku mutu 3 mg/L pada tahun 2014 sebanyak 8 data, tahun 2015 sebanyak 10 data, tahun 2016 sebanyak 12 data, dan tahun 2017 sebanyak 12 data. Parameter COD yang tidak memenuhi baku mutu 25 mg/L pada tahun 2017 sebanyak 1 data. Sedangkan ammonia dan fosfat perairan Waduk Sutami masih memenuhi baku mutu pada tahun 2014 – 2017.

Pengendalian kualitas air Waduk Sutami dibutuhkan sebagai tindakan pengelolaan sumber daya air secara berkelanjutan dan meningkatkan kualitas air baku air minum. Pengendalian tersebut memerlukan keputusan yang tepat dalam merancang kebijakan. Konsep sistem dinamik yang berlandaskan pada interaksi antar komponen melalui pemahaman yang menyeluruh, merupakan suatu alternatif

pendekatan dalam mengambil keputusan. Sistem dinamik mengasumsikan bahwa perilaku sistem disebabkan oleh struktur sistem itu sendiri. Sistem dinamis memungkinkan pengguna mengidentifikasi perubahan sistem yang diperlukan untuk mencapai perilaku yang diinginkan (Pruyt, 2013).

Model sistem dinamis pengelolaan perairan waduk ataupun danau telah banyak dikembangkan. Model sistem dinamis kualitas air dapat dibuat berdasarkan dinamika DO (Wei-Bing dkk.,2001). Peningkatan DO perairan dapat terjadi akibat dari proses reaerasi dan fotosintesis. Di sisi lain, penurunan DO juga dapat terjadi melalui deoksigenasi, nitrifikasi, dan respirasi (Kaur dkk., 2007; Mwegoha dkk., 2010; Prasad dkk., 2014). Akan tetapi, model dinamis tersebut tidak memperhitungkan beban pencemaran yang masuk dari lingkungan sekitar danau, seperti kegiatan masyarakat sekitar dan budidaya perikanan pada perairan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini akan menggunakan pendekatan model sistem dinamis dalam pembuatan skenario pengendalian kualitas air Waduk Sutami. Aspek yang dibahas pada penelitian ini yaitu aspek teknis, lingkungan, dan kelembagaan. Aspek teknis yang diterapkan pada penelitian ini yaitu dinamika DO perairan yang dipengaruhi oleh penambahan oksigen dari proses reaerasi dan fotosintesis, serta pengurangan oksigen untuk dekomposisi, nitrifikasi, dan respirasi. Sedangkan proses-proses tersebut juga akan dipengaruhi oleh parameter pencemaran antara lain BOD, COD, Ammonia, dan Fosfat. Pada penelitian ini tidak memodelkan mekanisme pemurnian alami.

Variabel aspek lingkungan yang dipertimbangkan yaitu dari kegiatan permukiman penduduk dalam menghasilkan limbah domestik, penggunaan pestisida dari kegiatan pertanian, dan pemberian pakan ikan pada kegiatan budidaya perikanan keramba jaring apung (KJA). Kegiatan-kegiatan tersebut menghasilkan limbah yang mengandung polutan dan mempengaruhi kualitas perairan waduk. Variabel aspek lingkungan akan diubah pada model sistem untuk mencapai skenario yang tepat. Strategi pengendalian dapat dibuat melalui skenario yang disimulasikan pada model.

Aspek kelembagaan yang dibahas yaitu kepentingan lembaga selain pengelola Waduk Sutami yang secara langsung maupun tidak langsung berperan dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami. Analisa kelembagaan dilakukan

dengan pendekatan *Interpretative Structural Modelling* (ISM). Secara garis besar teknik ISM dibagi menjadi dua bagian, yaitu klasifikasi elemen dan penyusunan hirarki. Data yang diperlukan pada ISM merupakan pendapat pakar, dalam hal ini yaitu pengelola Waduk Sutami.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini didasarkan atas kebutuhan berikut:

1. Simulasi model sistem dinamis perubahan kualitas air Waduk Sutami.
2. Strategi pengendalian kualitas air Waduk Sutami.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mensimulasikan model sistem dinamis perubahan kualitas air Waduk Sutami.
2. Menyusun strategi pengendalian kualitas air Waduk Sutami.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu sebagai rekomendasi strategi kebijakan dalam pengendalian kualitas air waduk.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini antara lain :

- a. Lokasi penelitian adalah Waduk Sutami.
- b. Penelitian mencakup aspek teknis, lingkungan, dan kelembagaan
 - Aspek teknis meliputi kontrol DO perairan waduk yang disimulasikan dengan pendekatan model sistem dinamis. Proses yang mempengaruhi DO perairan antara lain reaerasi, fotosintesis, deoksigenasi, nitrifikasi, dan respirasi. Proses-proses tersebut dapat menghubungkan parameter DO dengan BOD, COD, Ammonia, dan Fosfat.
 - Aspek lingkungan meliputi kegiatan pemukiman dan pertanian di sekitar Waduk Sutami serta budidaya ikan keramba jaring apung

(KJA) di Waduk Sutami, dimana aspek tersebut menjadi faktor dalam pembuatan skenario.

- Aspek kelembagaan meliputi analisa lembaga yang berperan penting dengan pendekatan *Interpretative Structural Modelling* (ISM).
- c. Simulasi model tidak dilakukan untuk kuantitas air dan laju pemurnian alami.
 - d. Batasan ruang penelitian mencakup kegiatan pemukiman penduduk dan pertanian (sawah dan bukan sawah) di sekitar Waduk Sutami, serta budidaya ikan menggunakan keramba jaring apung (KJA).
 - e. Data yang digunakan dalam penelitian merupakan data primer dan sekunder dari pihak dan instansi terkait.

Halaman ini sengaja dikosongkan

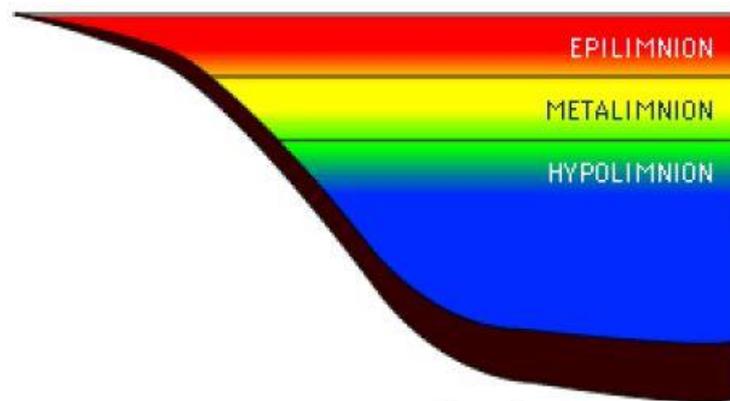
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Ekosistem Perairan Waduk

2.1.1 Stratifikasi Waduk

Cahaya matahari mampu meningkatkan suhu air permukaan waduk. Panas dari matahari dapat diteruskan hingga bawah perairan waduk melalui pengadukan. Pengadukan perairan waduk dihasilkan oleh angin, kapal, dan tenaga lainnya. Akan tetapi pengadukan ini hanya terjadi hingga kedalaman yang terbatas dari permukaan air waduk (Hairston Jr. dan Fussmann, 2002). Stratifikasi waduk dapat dilihat pada Gambar 2.1.

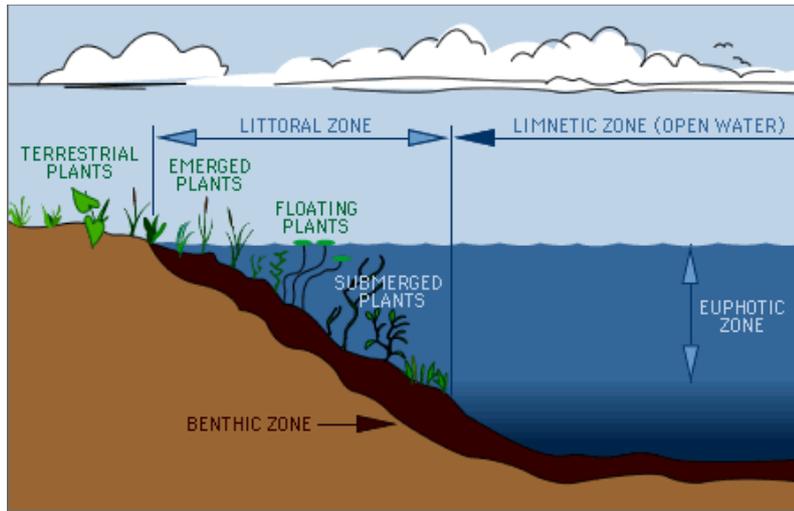


Gambar 2.1 Stratifikasi perairan waduk
(Sumber: Horne dan Goldman, 1994)

Bagian atas permukaan air waduk yang sering terjadi pengadukan dan suhunya hangat disebut epilimnion. Banyaknya pengadukan yang terjadi, membuat lapisan epilimnion dalam kondisi aerobik. Sedangkan bagian dasar waduk tidak terkena sinar matahari dan disebut hypolimnion. Lapisan hypolimnion ini suhunya dingin dan tidak ada pengadukan, hal ini membuat kondisinya rendah oksigen bahkan bisa menjadi anaerobic atau anoxic. Terdapat lapisan metalimnion di antara epilimnion dan hypolimnion, yang memiliki zona dimana suhu dan densitasnya berubah seiring kedalamannya. Zona tersebut dinamakan termoklin. Perubahan suhu pada zona ini lebih dari 1°C per meter kedalaman (Davis dan Masten, 2004).

2.1.2 Pembagian Zona Biologis Waduk

Waduk terdiri dari beberapa zona aktivitas biologis yang berbeda-beda. Pembagian zona biasanya dipengaruhi oleh ketersediaan cahaya dan oksigen. Zona biologis ini dapat dilihat pada Gambar 2.2, terdiri dari zona eufotik, limnetik, litoral, dan bentik (Davis dan Masten, 2004).



Gambar 2.2 Pembagian zona biologis waduk
(Sumber: Davis dan Masten, 2004)

a. Zona limnetic

Zona ini merupakan permukaan perairan waduk yang terbuka, dimana fotosintesis biasanya terjadi. Organisme yang banyak berada di zona ini yaitu organisme melayang (plankton) dan organisme yang bebas bergerak. Pada zona ini golongan produser berasal dari kelompok *algae*. Konsumen tingkat pertama yaitu kelompok zooplankton, sedangkan konsumen tingkat kedua dan seterusnya yaitu kelompok insekta dan ikan.

b. Zona eufotik

Bagian atas waduk dimana cahaya matahari masih dapat menembus perairan disebut zona eufotik. Kedalaman zona eufotik ditentukan oleh penetrasi cahaya matahari. Batas kedalaman zona eufotik adalah dimana cahaya matahari yang masuk intensitasnya $> 0,5 - 1 \%$ dari permukaan. Batas ini ditentukan karena *algae* dan *macrophytes* dapat beraktivitas dengan baik pada intensitas tersebut. Zona di bawah eufotik disebut zona profundal.

c. Zona litoral

Bagian waduk yang dangkal dan dekat dengan tepi waduk disebut zona litoral. Ciri-ciri zona ini adalah cahaya matahari masih dapat menembus perairan hingga sedimen sehingga tumbuhan air (*macrophytes*) masih dapat hidup. Luas zona litoral dipengaruhi kemiringan dasar waduk dan kedalaman zona eufotik. Hal ini karena zona litoral tidak mungkin lebih dalam dari zona eufotik.

d. Zona benthik

Sedimen dasar waduk merupakan zona benthik. Organisme perairan yang mati akan mengendap di dasar waduk dan didekomposisi oleh jamur dan bakteri di zona benthik. Selain jamur dan bakteri, juga terdapat cacing, insekta air, kelompok moluska (*molluscs*), dan krustasea (*crustaceans*).

2.1.3 Produktivitas Waduk

Produktivitas waduk merupakan suatu ukuran waduk dalam kemampuannya mendukung kehidupan organisme perairan. Produktivitas ini biasanya diukur dari pertumbuhan alga yang dapat didukung oleh ketersediaan nutrisi. Semakin tinggi produktivitas waduk maka konsentrasi biomassa yang ada di dalamnya juga semakin besar. Namun terkadang hal ini tidak diinginkan, karena dapat menghasilkan permasalahan bau perairan, rendahnya oksigen terlarut terutama pada malam hari, pertumbuhan *macrophytes* yang berlebihan, dan kekeruhan air. Produktivitas memegang peranan penting dalam menentukan kualitas air, oleh sebab itu terdapat klasifikasi waduk berdasarkan produktivitasnya (Davis dan Masten, 2004). Klasifikasi waduk berdasarkan produktivitasnya di Indonesia telah ditetapkan oleh pemerintah menjadi klasifikasi status trofik waduk dan memiliki kriteria masing-masing. Kriteria tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1. Klasifikasi perairan berdasarkan produktivitasnya antara lain (Davis dan Masten, 2004):

a. Oligotrofik

Waduk oligotrofik memiliki tingkatan produktivitas yang rendah karena ketersediaan nutrisi terbatas untuk mendukung pertumbuhan alga. Hasilnya, perairan menjadi cukup jernih bahkan dasar waduk memungkinkan untuk dapat

terlihat. Pada jenis waduk ini, zona eufotik dapat terbentuk hingga dasar waduk.

b. Mesotrofik

Pada waduk mesotrofik terjadi penipisan oksigen terlarut.

c. Eutrofik

Waduk eutrofik memiliki produktivitas yang tinggi, hal ini karena ketersediaan nutrisi yang melimpah. Banyaknya alga membuat waduk jenis ini keruh. Ketika alga mati, mereka akan didekomposisi oleh organisme di dasar waduk. Semakin banyak proses dekomposisi yang terjadi, oksigen terlarut di lapisan hipolimnion akan semakin tipis dan bahkan bisa menjadi kondisi anaerobik.

d. Hipereutrofik

Waduk jenis ini memiliki tingkat produktivitas yang sangat tinggi dan terjadi *algae blooms* pada tingkat besar. Kondisi ini biasanya terjadi pada waduk yang dangkal dan banyak kandungan organik. Waduk jenis ini memiliki kejernihan air sangat rendah, tinggi kandungan fosfor dan klorofil-a. Kandungan oksigen yang sangat rendah pada waduk ini dapat mematikan ikan dan jenis organisme lain.

Tabel 2.1 Kriteria waduk berdasarkan status trofik

Status Trofik	Kadar Rata-rata Total N (µg/l)	Kadar Rata-rata Total-P (µg/l)	Kadar Rata-rata Klorofil-a (µg/l)	Kecerahan rata-rata (m)
Oligotrof	≤ 650	< 10	< 2,0	≥ 10
Mesotrof	≤ 750	< 30	< 5,0	≥ 4
Eutrof	≤ 1900	< 100	< 15	≥ 2,5
Hipereutrof	> 1900	≥ 100	≥ 200	< 2,5

Sumber: Kementerian Lingkungan Hidup, 2009

2.2 Oksigen Terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*) Perairan Waduk

Oksigen terlarut merupakan elemen paling penting dalam sistem kehidupan di perairan, karena berperan pada proses kimia dan biologis ekosistem (Xu dan Xu, 2016). Dalam kondisi aerobik, oksigen mengoksidasi bahan organik dan anorganik dengan hasil akhir berupa nutrisi yang secara tidak langsung dapat membantu kesuburan perairan. Dalam kondisi anaerobik, oksigen akan mereduksi senyawa-

senyawa kimia menjadi bentuk yang lebih sederhana dalam bentuk nutrisi dan gas. Proses oksidasi dan reduksi ini menunjukkan bahwa oksigen terlarut sangat penting untuk membantu mengurangi beban pencemaran pada perairan secara alami maupun secara perlakuan aerobik yang ditujukan untuk memurnikan air buangan industri dan rumah tangga. DO perairan juga mempengaruhi organisme, salah satunya jika kadar oksigen terlarut menurun maka kemampuannya untuk hidup normal dalam lingkungan perairan juga menurun (Environmental Protection Agency, 2001).

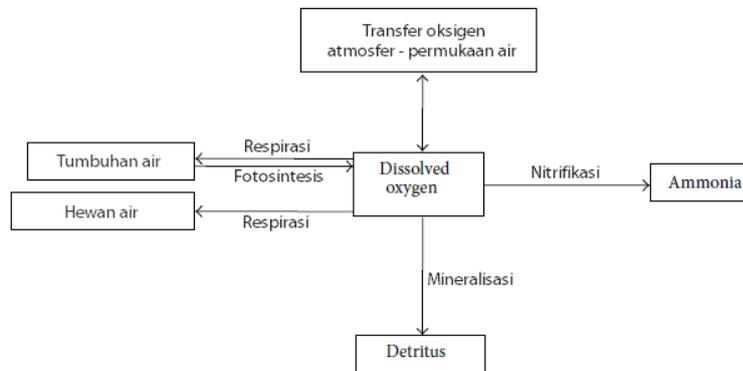
Oksigen terlarut di perairan waduk berasal dari udara dan fotosintesis organisme yang hidup di waduk. Pergantian oksigen dari udara berjalan lambat. Menurut Vigil (2003), kepekatan oksigen terlarut dalam air bergantung kepada; (1) suhu, (2) kehadiran tanaman fotosintesis, (3) tingkat penetrasi cahaya, (4) tingkat kekeruhan aliran air, dan (5) jumlah bahan organik yang diuraikan air. Kandungan oksigen terlarut pada badan air bervariasi terhadap waktu dan dipengaruhi oleh berbagai faktor fisik, biologis, dan kimia seperti pH, temperatur, tekanan atmosfer, dan salinitas (Mwegoha dkk., 2010). Dampak kandungan DO terhadap ekosistem ditunjukkan oleh Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Dampak DO terhadap badan air

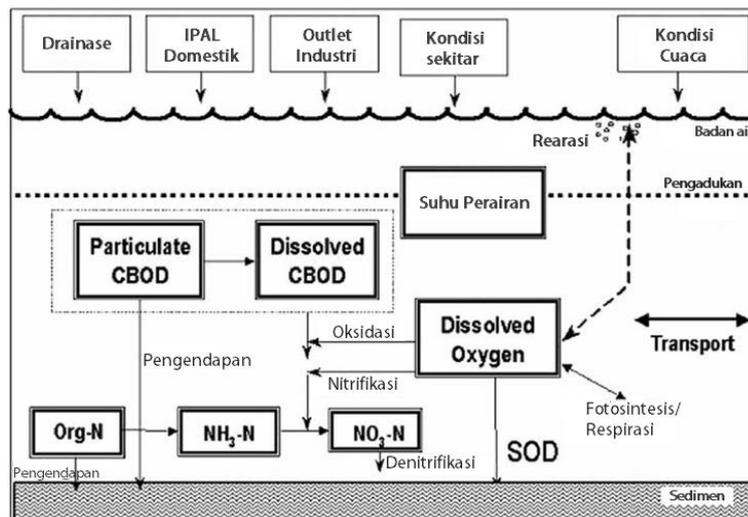
DO	Kondisi badan air
0 – 2 mg/L	Tidak cukup oksigen untuk mendukung kehidupan sebagian besar hewan
2 – 4 mg/L	Hanya sedikit jenis ikan dan serangga yang dapat bertahan
4 – 7 mg/L	Baik untuk sebagian besar jenis hewan kolam
7 – 11 mg/L	Sangat baik untuk sebagian besar ikan di air mengalir
saturasi di bawah 60%	Kualitas buruk
saturasi 60 – 79%	Dapat diterima oleh sebagian besar hewan pada air mengalir
Saturasi 80 – 125%	Sangat baik untuk sebagian besar hewan pada air mengalir
Saturasi lebih dari 125%	Terlalu tinggi

Sumber: *Cary Institute of Ecosystem Studies* (2013)

Dinamika DO di perairan sangat kompleks dan dipengaruhi oleh berbagai proses fisika, kimia, dan biologis. Mwegoha dkk. (2010) membuat model dinamika DO dengan konsep pengaruh proses reaerasi, fotosintesis, respirasi, dan biodegradasi bahan organik. Prasad dkk. (2014) menggunakan konsep dinamika DO dengan memisahkan biodegradasi senyawa organik menjadi nitrifikasi dan mineralisasi. Kaur dkk. (2007) memperhitungkan stratifikasi kedalaman danau dan pengendapan bahan organik, sehingga pada dasar perairan DO lebih rendah akibat *Sediments Oxygen Demand* (SOD). Bagan konsep dinamika DO dapat dilihat pada Gambar 2.3.



(a)



(b)

Gambar 2.3 Dinamika DO (Sumber: a) Prasad dkk. (2014); b) Kaur dkk. (2007))

2.2.1 Sumber Oksigen Terlarut

Oksigen terlarut di perairan dapat dipengaruhi dari proses fotosintesis dan proses difusi dari udara bebas. Sebagian besar oksigen (90-95%) masuk ke perairan kolam (waduk maupun danau) melalui proses fotosintesis kemudian oleh difusi dari udara, dan yang paling kecil oleh aliran air yang memasuki badan perairan. Fotosintesis memiliki peranan yang lebih penting dalam mengatur konsentrasi oksigen terlarut di perairan tergenang dibandingkan dengan proses fisika (Prasad dkk., 2014).

a. Reaerasi

Transfer oksigen dari atmosfer ke perairan dapat disebut dengan reaerasi. Laju transfer oksigen tergantung pada konsentrasi oksigen terlarut di lapisan permukaan, konsentrasi saturasi oksigen, dan koefisien reaerasi. Reaerasi juga akan bervariasi sesuai kecepatan angin. Difusi oksigen dari udara bebas terjadi ketika berlangsung kontak antara campuran gas di atmosfer dengan perairan, dengan syarat air berada dalam keadaan *undersaturated*. Oksigen bawaan yang masuk ke dalam badan perairan dapat terjadi karena adanya inflow (Venkiteswaran dkk., 2007).

Koefisien reaerasi sangat bergantung pada karakteristik fisik perairan. Tipikal koefisien reaerasi berada dalam kisaran 0,1 sampai dengan 10 hari⁻¹ atau lebih besar dan memiliki laju yang lebih besar dibandingkan dengan koefisien laju penguraian BOD (United States-Environmental Protection Agency, 1983). Persamaan kinetik reaerasi ditunjukkan oleh persamaan berikut (Prasad dkk., 2014):

$$\text{laju reaerasi} = k_a(DO_s - DO) \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan:

k_a = koefisien reaerasi (waktu⁻¹)

DO_s = konsentrasi DO jenuh (massa.volume⁻¹)

b. Fotosintesis

Laju fotosintesis di perairan sekitar 2,7 – 4,2 hari⁻¹ (Chapra, 1997). Faktor pengontrol yang mempengaruhi kecepatan proses fotosintesis dan konsentrasi oksigen terlarut di perairan adalah suhu, cahaya, konsentrasi

nutrien, spesies dari fitoplankton yang hidup di perairan, kelimpahan plankton, turbulensi, dan faktor lainnya. Pada lapisan permukaan hingga perairan kolam, konsentrasi oksigen terlarut akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kelimpahan plankton.

Plankton membutuhkan nutrient dalam metabolisme tubuhnya. Sehingga kehadiran nutrient dapat memicu laju pertumbuhan plankton dengan cahaya yang cukup tersedia dan suhu yang optimum (Gurung, 2007). Nutrien yang dapat dimanfaatkan oleh plankton antara lain *carbon*, *phosphate*, *nitrogen*, dan *silica* (Li dkk., 2015). Nutrien yang umum menjadi fokus perhatian di lingkungan perairan adalah *phosphate*. Keberadaan *phosphate* di perairan adalah sangat penting terutama berfungsi dalam pembentukan protein dan metabolisme bagi organisme. *Phosphate* juga berperan dalam transfer energi di dalam sel misalnya *adenosine triphosphate* (ATP) dan *adenosine diphosphate* (ADP). *Phosphate* menjadi faktor pembatas di sebagian besar perairan tawar karena keberadaannya yang relatif sedikit dibandingkan banyaknya organisme yang membutuhkannya (Green dkk., 2015).

2.2.2 Pemanfaatan oksigen terlarut

Oksigen terlarut di perairan dimanfaatkan oleh tumbuhan air (termasuk di dalamnya fitoplankton) dan biota perairan lainnya dalam proses respirasi, serta mikroba untuk mendekomposisi bahan organik. Oksigen juga digunakan dalam proses nitrifikasi amoniak menjadi nitrat.

a. Respirasi

Proses respirasi berlangsung sepanjang hari baik siang maupun malam hari, sedangkan fotosintesis berlangsung hanya pada siang hari. Hal ini menyebabkan terjadinya fluktuasi harian kadar oksigen terlarut di zona eufotik. Proses respirasi juga berlangsung di seluruh lapisan perairan, sehingga pada zona eufotik kadar oksigen cenderung lebih melimpah dibandingkan lapisan di bawahnya. Penggunaan oksigen terlarut di perairan untuk respirasi plankton dan mikroorganisme perairan lainnya mencapai 72%, untuk ikan hanya tersedia 22%, digunakan untuk respirasi organisme dasar perairan sebesar 2,9% serta sisanya 3,1% lepas ke udara (Amanah, 2011).

Respirasi yang dilakukan oleh plankton akan semakin meningkat jika jumlah plankton juga meningkat. Masukan nutrisi yang tinggi dalam perairan menyebabkan laju pertumbuhan plankton menjadi tinggi. Kondisi ini mengakibatkan bertambahnya kebutuhan respirasi dan selanjutnya menyebabkan menipisnya oksigen terlarut. Laju respirasi plankton secara teoritis yaitu $0,065 - 0,6 \text{ hari}^{-1}$ (Mwegoha, 2010).

b. Deoksigenasi

Proses deoksigenasi dapat terjadi karena dekomposisi bahan organik di perairan. Jumlah bahan organik dapat dihitung sebagai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) maupun *Chemical Oxygen Demand* (COD). BOD menunjukkan jumlah oksigen yang diperlukan mikroorganisme dalam dekomposisi bahan organik. BOD dapat menunjukkan jumlah bahan organik yang mudah urai (*biodegradable organics*) dalam perairan. COD merupakan kebutuhan oksigen untuk mengurai seluruh bahan organik baik yang mudah urai maupun sulit urai menggunakan oksidator kuat (Templeton dan Butler, 2011).

Kebutuhan oksigen dalam dekomposisi bahan organik dapat menggunakan persamaan berikut (Chapra, 1997):

$$\frac{dO}{dt} = -kL \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

k = laju dekomposisi

L = jumlah bahan organik

c. Nitrifikasi

Nitrogen dalam perairan waduk biasanya dalam bentuk NO_2^- , NO_3^- , dan NH_4^+ (Gunalp dan Barlas, 2003). Nitrogen dari limbah dapat dipecah menjadi ammonia. Pada pH normal, ammonia ada dalam bentuk NH_4^+ . Ammonia dioksidasi menjadi nitrat oleh kelompok bakteri dalam dua tahap proses yang disebut nitrifikasi (Chapra, 1997):





Reaksi pertama dilakukan oleh *Nitrosomonas sp.*, sedangkan reaksi kedua dilakukan oleh *Nitrobacter sp.* Keseluruhan reaksi adalah sebagai berikut:



Laju nitrifikasi pada perairan secara teoritis berkisar 0,005 – 0,54 hari⁻¹ (Prasad dkk., 2014). Aktivitas bakteri menurun seiring dengan menurunnya suhu. Aktivitas bakteri juga memerlukan oksigen. Proses nitrifikasi berhenti jika DO perairan di bawah 2 mg/L atau suhu air kurang dari 5 °C (United States-Environmental Protection Agency, 1980).

2.3 Sumber Pencemaran Waduk

Menurut Davis dan Cornwell (1991) sumber pencemar dapat berupa suatu lokasi tertentu (*point source*) atau tak tentu/tersebar (*non point source*). Sumber *point source* bersifat lokal, sedangkan *non point source* dapat berupa *point source* dalam jumlah yang banyak dan menyebar. Umumnya hasil dari limpasan tanah dari daerah pertanian, permukiman, perkotaan dan air hujan (Davis dan Cornwell, 1991; United States-Environmental Protection Agency, 1983).

2.3.1 Keramba Jaring Apung (KJA)

Aktivitas di waduk dan danau umumnya terdapat budidaya perikanan dengan keramba jaring apung. Budidaya perikanan ini menjadi mata pencaharian penduduk sekitar. Kegiatan tersebut selain berdampak pada peningkatan kesejahteraan penduduk juga berpotensi menyumbang bahan pencemar perairan waduk. Hasil penelitian Iriadi (2015) menunjukkan bahwa KJA memiliki kontribusi tertinggi dalam pencemaran N dan P di Danau Laut Tawar. Pakan ikan yang digunakan untuk budidaya perikanan KJA menjadi sumber polutan. Danau Sipin di Jambi menerima beban *phosphate* sebanyak 35 ton per tahun dari pakan ikan yang terlepas ke perairan (Prabasari dkk., 2017).

Waduk Sutami selama ini juga dimanfaatkan dalam sektor budidaya perikanan, terutama keramba jaring apung. Pada tahun 2015 produksi ikan dari KJA sebanyak 3.771,43 ton, dan pada tahun 2016 produksinya sebanyak 3.690,51 ton (BPS Kabupaten Malang, 2017). Kegiatan budidaya perikanan dengan teknik

keramba jaring apung yang berlangsung di badan air merupakan kegiatan yang langsung berhubungan dengan perairan waduk, sehingga berdampak langsung terhadap perairan waduk yaitu penurunan kualitas perairan. Limbah yang dihasilkan oleh kegiatan tersebut pada umumnya berupa limbah organik berupa sisa pakan. Pakan yang tidak dimanfaatkan dari kegiatan budidaya ikan intensif merupakan suatu hal yang dapat mengganggu lingkungan perairan (Iriadi, 2015).

Kandungan unsur *nitrogen* dan *phosphate* yang terdapat dalam pakan masing-masing sebesar 4.86% dan 1.2%. Pakan yang ditebar oleh petani KJA, sebesar 70% dimakan oleh ikan, dan sisanya sebanyak 30% akan lepas ke badan perairan sebagai bahan pencemar atau limbah. Sementara itu, 15–30% dari nitrogen dan fosfor dalam pakan akan diretensikan dalam daging ikan dan selebihnya terbuang ke badan perairan sebagai *feces* ikan (Prabasari dkk., 2017).

2.3.2 Permukiman

Sumber pencemaran perairan waduk juga dapat berasal dari permukiman. Pendugaan beban pencemaran yang berasal dari permukiman penduduk dapat diketahui dengan mengalikan antara jumlah penduduk dengan komposisi beban pencemaran yang dihasilkan. Komposisi beban pencemaran limbah disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Komposisi beban pencemaran limbah domestik

Parameter	Satuan	Beban Pencemaran
BOD	g/orang.hari	25
COD	g/orang.hari	57
Total N	g/orang.hari	11,1
Total P	g/orang.hari	1,1

Sumber: Salim (2002)

2.3.3 Pertanian

Penggunaan pestisida yang terus menerus berpotensi menjadi sumber pencemar perairan danau (Gunalp dan Barlas, 2003). Pendugaan beban pencemaran yang berasal dari daerah pertanian menggunakan pendekatan *rapid assesment* (World Health Organization, 1993; Iriadi, 2015) dengan persamaan:

$$BP = a \times f$$

Keterangan:

BP = beban pencemaran (kg/ha/hari)

a = luas lahan pertanian (ha)

f = fraksi beban limbah organik (BOD = 0,17; TP = 0,04; TN = 0,07)

2.4 Pengendalian Kualitas Air Waduk

Ada banyak faktor yang berhubungan dengan pengendalian kualitas air, termasuk jumlah penduduk di sekitar daerah tangkapan air (DTA) waduk, bagaimana penggunaan lahan, dan kebiasaan masyarakat sehari-harinya. Menurut Iriadi (2014), pengendalian kualitas perairan danau (studi kasus di Danau Laut Tawar) dapat dilakukan melalui peningkatan tingkat pendidikan masyarakat, penerapan Program 3R (*reduce, reuse dan recycle*), pembangunan IPAL komunal dan terpadu, sosialisasi dan penyuluhan lingkungan hidup, penerapan pertanian organik, informasi peringatan kebersihan lingkungan, pemilihan dan teknik pemberian pakan ikan yang tepat serta penataan dan pembatasan luas keramba jaring apung (KJA).

2.4.1 Jumlah penduduk

Jumlah penduduk yang berdomisili di sekitar waduk tentunya akan meningkatkan limbah domestik yang masuk ke waduk. Air limbah domestik yang berupa limbah tinja manusia dan air buangan bekas mandi, cuci dan dari dapur mengandung banyak bahan organik yang dapat diuraikan atau didekomposisi. Pada jumlah sangat besar, limbah domestik dapat mempengaruhi kualitas dan daya tampung air (Rezagama dan Tamlikha, 2016).

Peningkatan jumlah penduduk berbanding lurus dengan peningkatan total beban pencemar. Menurut penelitian Walukow (2011), simulasi terhadap jumlah penduduk di sekitar Danau Sentani menghasilkan perkiraan terjadi pertumbuhan penduduk yang pesat bila tidak ada intervensi kebijakan. Kebijakan yang dapat diterapkan yaitu pembatasan penambahan penduduk. Apabila tidak ada upaya penurunan jumlah penduduk, maka pertumbuhan penduduk yang terus meningkat tersebut akan menyebabkan kualitas Danau Sentani semakin menurun.

2.4.2 Penggunaan Lahan

Penggunaan lahan merupakan hasil akhir dari setiap bentuk campur tangan kegiatan (intervensi) manusia terhadap lahan dipermukaan bumi yang bersifat dinamis dan berfungsi untuk memenuhi kebutuhan hidup baik material maupun spiritual. Penggunaan lahan dapat menurunkan kualitas air, meningkatkan volume dan kecepatan air permukaan, meningkatkan frekuensi air banjir, meningkatkan aliran air dua kali lebih besar dari hutan alam, menyebabkan hilangnya bahan material dan mengakibatkan penurunan air tanah (Setyowati, 2016).

Berkurangnya penggunaan lahan hutan, peningkatan lahan permukiman ladang atau tegalan meningkat terhadap penurunan kualitas air. Semakin kecil tutupan hutan serta semakin beragamnya jenis penggunaan lahan dalam daerah tangkapan air (DTA) menyebabkan kondisi kualitas air waduk yang semakin buruk, terutama akibat adanya aktivitas pertanian dan pemukiman. Penggunaan lahan yang didominasi tanaman pertanian berpengaruh nyata terhadap terjadinya sedimentasi dan pengendapan lumpur pada perairan dan kualitas air. Aktivitas pertanian juga berperan penting terhadap meningkatnya pemasukan nitrogen ke dalam badan air yang dihasilkan oleh beberapa faktor, termasuk penggunaan pupuk kompos, pupuk kandang, dan endapan pembuangan kotoran dari tanaman (Setyowati, 2016).

2.4.3 Kebiasaan Sehari-hari

Meningkatnya beban pencemaran yang masuk ke perairan Waduk juga disebabkan oleh kebiasaan masyarakat yang berdomisili di sekitar Waduk. Kegiatan yang dilakukan sehari-hari dapat menghasilkan dampak terhadap kualitas air. Kebiasaan tersebut dapat dilihat dari kegiatan membuang limbah, baik limbah cair maupun limbah padatnya langsung ke perairan waduk. Kegiatan tersebut akan memberikan tekanan terhadap ekosistem perairan waduk. Selain kebiasaan, usaha masyarakat sekitar waduk berpengaruh terhadap kualitas air. Beberapa usaha yang umumnya menjadi mata pencaharian masyarakat sekitar waduk yaitu keramba jaring apung (KJA), rumah makan, penginapan, dan wisata. Pengetahuan dan persepsi masyarakat dapat mempengaruhi upaya pengelolaan lingkungan dan keberlanjutan waduk (Pujiastuti, 2014).

2.5 Pendekatan Sistem

Pemikiran sistem berupaya mencari keterpaduan antar bagian melalui pemahaman yang utuh, sehingga diperlukan suatu kerangka pikir baru yang dikenal dengan pendekatan sistem (*system approach*). Menurut Pruyt (2013) pendekatan sistem merupakan cara penyelesaian persoalan yang dimulai dengan dilakukannya identifikasi terhadap permasalahan sehingga dapat menghasilkan suatu operasi dari sistem yang dianggap efektif. Tahapan pendekatan sistem, meliputi:

- 1) Identifikasi masalah
Mengidentifikasi dan mengartikulasikan masalah yang akan ditangani.
- 2) Konseptualisasi model
Mengembangkan teori sebab akibat tentang permasalahan.
- 3) Formulasi model
Merumuskan model simulasi sistem dinamik dari teori sebab akibat.
- 4) Pengujian model
Menguji model untuk menilai apakah sesuai dengan proses nyata.
- 5) Penggunaan model
Menggunakan model untuk merancang dan mengevaluasi kebijakan struktural untuk mengatasi masalah ini.

2.6 Sistem Dinamis

Sistem dinamis ditemukan oleh Jay Forrester pada tahun 1958. Pada awalnya dikenal sebagai *Industrial Dynamics* yang dikembangkan sebagai simulasi masalah rantai pasokan (Dangerfield, 2014). Sistem dinamis merupakan sistem yang dapat menjelaskan proses akumulasi dan umpan balik dari situasi yang kompleks. Elemen penting dalam sistem dinamis yaitu *stock, level, time delays*, positif dan negatif *feedback loops*, serta *cause and effects*. Pendekatan model sistem dinamis terdiri dari (Kunc, 2016):

- Menjelaskan masalah secara dinamis, dalam hubungan grafik terhadap waktu
- Melihat perilaku sistem yang penting, fokus ke dalam karakteristik dari sistem tersebut

- Memikirkan keseluruhan konsep pada sistem nyata sebagai kuantitas kontinyu yang saling berhubungan dalam *loops of information feedback and circular causality*
- Mengidentifikasi *stock* pada sistem

Sistem dinamis dapat sebagai model uji untuk sistem di dunia nyata. Sistem ini dapat terintegrasi dengan sektor model dan berguna untuk simulasi proses sosial dan ekonomi.

Sistem dinamis terdiri dari beberapa elemen. Hubungan dan perilaku elemen-elemen tersebut yang membentuk struktur model. Semua elemen penting yang mempengaruhi bagian lain dari sistem dan juga dipengaruhi secara signifikan oleh elemen sistem dimodelkan sebagai variabel endogen. Sedangkan semua elemen yang berdampak serius pada sistem –tetapi yang tidak terlalu dipengaruhi oleh sistem– menjadi variabel eksogen, dan semua elemen lain dihilangkan. Variabel endogen dan eksogen membentuk hubungan yang menggambarkan perilaku model (Pruyt, 2013).

Hubungan variabel dan parameter dalam model sistem dinamis hanya mewakili hubungan sebab akibat langsung. Untuk membangun model sistem dinamis seseorang perlu melihat, mengidentifikasi dan memahami hubungan sebab akibat langsung dalam model tersebut. Oleh karena itu sistem dinamis dapat digunakan untuk menyelidiki interaksi antara struktur dan perilaku kompleks yang dinamis dari suatu masalah. Kemudian dari hasil pengamatan dapat dikembangkan skenario untuk mencapai tujuan yang diinginkan (Pruyt, 2013).

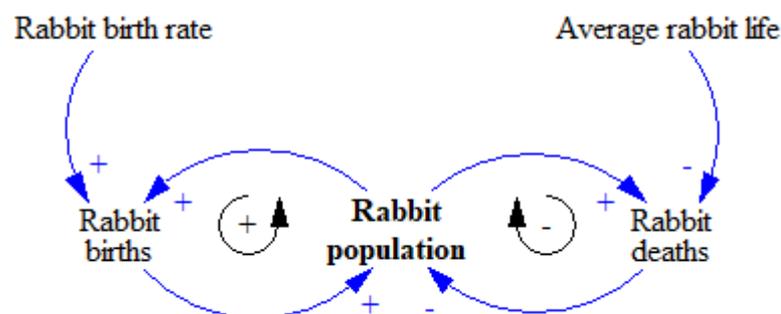
2.6.1 Causal Loops Diagram

Causal loops diagram merupakan titik awal dasar untuk mengerjakan sistem dinamis karena dua alasan. Pertama, menggambar diagram ini cukup sederhana. *Causal loops diagram* terdiri dari variabel-variabel yang terkait, baik secara positif atau negatif, membentuk putaran umpan balik. Kedua, *causal loops diagram* dapat digunakan sebagai cara mudah untuk menggambarkan pemahaman tentang topik yang dipelajari atau diteliti (Kunc, 2016).

Aturan untuk menggambar *causal loops diagram* sangat sederhana. Pruyt (2013) menjelaskan di setiap hubungan dua variabel, variabel di bagian belakang

panah dikatakan menyebabkan perubahan dalam perilaku variabel yang ditunjukkan oleh panah. Jenis perubahan digambarkan menggunakan tanda '+' atau '-'. Tanda '+' berarti dua variabel yang saling terhubung berubah ke arah yang sama, dan '-' berarti dua variabel berubah ke arah yang berlawanan. Hubungan antara dua variabel A dan B digambarkan positif jika peningkatan variabel A menyebabkan B meningkat serta penurunan variabel A menyebabkan B menurun. Hubungan antara dua variabel A dan B digambarkan negatif jika peningkatan variabel A menyebabkan B menurun serta penurunan variabel A menyebabkan B meningkat. Contoh *causal loops diagram* dapat dilihat pada Gambar 2.4. *Basic loop* dibuat ketika dua atau lebih variabel dihubungkan bersama menggunakan panah, yang menghasilkan *loop* tertutup. Sebuah *loop* tertutup adalah bagian dasar untuk menggambarkan perilaku dinamis dalam suatu sistem.

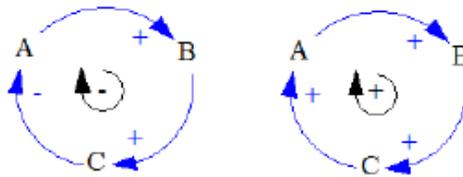
Ada sejumlah batasan tentang penggunaan *causal loops diagram*. Pertama, *causal loops* biasanya tidak komprehensif, misalnya tidak berisi data terperinci dari sistem tetapi berisi persepsi tentang sistem. *Causal loops* berkembang, misalnya pemahaman tentang sistem berubah ketika diskusi di antara para pemangku kepentingan terjadi dan lebih banyak penelitian dilakukan. Kedua, diagram loop kausal tidak membedakan antara *stock* dan *flow* (Sterman, 2000).



Gambar 2.4 *Causal loops diagram*
(Sumber: Pruyt, 2013)

Loop umpan balik (*feedback loop*) adalah elemen yang mewakili sistem tertutup sistem dinamis. *Feedback loop* terdiri dari dua atau lebih hubungan sebab akibat antara elemen. Hubungan elemen ini dimulai dengan adanya akibat ke

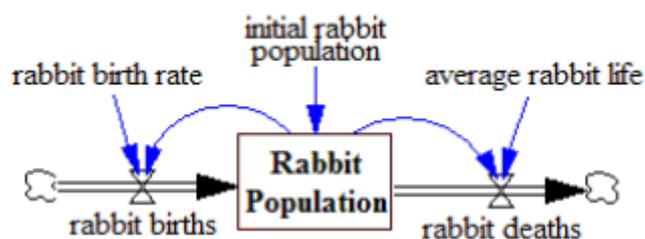
emelen lain, dan pada akhirnya kembali ke elemen pertama. *Feedback loop* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Feedback loops*
(Sumber: Pruyt, 2013)

2.6.2 *Stock dan Flow*

Stock mewakili akumulasi yang ada dalam suatu sistem dan mengkarakterisasi keadaan sistem (Sterman, 2000; Pruyt, 2013). Misalnya, populasi kelinci dapat dianggap sebagai *stock*. *Stock* meningkat karena arus masuk, yaitu kelahiran bayi kelinci, dan *stock* menurun karena arus keluar, akibat kelinci yang mati. Dalam hal notasi, *stock* direpresentasikan sebagai persegi panjang, yang menunjukkan akumulasi, dan *flow* adalah pipa yang menunjuk ke dalam atau keluar dari *stock*. Awan di awal atau akhir *flow* mencerminkan batas representasi model karena mereka mencerminkan sumber (inflows) dan akhir (outflows) (Sterman, 2000). Jaringan *stock* dan *flow* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Stock dan flow*
(Sumber: Pruyt, 2013)

Model sistem dinamis pada dasarnya adalah sistem persamaan integral di mana waktu dianggap berkelanjutan dan ukuran (ds) tercermin dalam ukuran langkah waktu dalam perangkat lunak pemodelan (misalnya Vensim, iThink, dll.) (Pruyt, 2013).

$$Stock(t) = \int_{t_0}^t [Inflow - Outflow] ds + Stock(t_0)$$

2.7 Vensim

Pembentukan model sistem dinamis dapat dibantu oleh penggunaan *software*. Salah satu *software* yang dapat digunakan yaitu Vensim. Vensim adalah sebuah *software* yang dibuat oleh Ventana Inc. untuk pembuatan model sistem dinamis. Software ini menggunakan berbagai grafis sebagai interface untuk membantu pembuatan model sistem dinamis (Stermann, 2000). Sistem dinamis sangat kompleks dan memiliki banyak komponen yang saling berkaitan. Vensim dapat digunakan untuk membuat model, contohnya model reaksi kimia kinetika enzim (Shiflet dan Shiflet, 2011).

Vensim PLE (*Personal Learning Edition*) merupakan salah satu konfigurasi Vensim yang dirancang untuk memudahkan pengguna mempelajari sistem dinamis. Vensim PLE dapat memodelkan satu atau lebih kuantitas yang berubah seiring waktu. ‘*Tools*’ dasar dalam membuat model sistem dinamis dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 ‘*Tools*’ dasar pada Vensim

<i>Tool</i>	<i>Icon</i>	Keterangan
Variable-Auxiliary/Constant atau Converter		konversi; menyimpan persamaan ataupun nilai yang tetap; tidak terakumulasi
Box Variable atau Stock		kata benda; mewakili sesuatu yang terakumulasi
Arrow atau Connector		mengirim input dan informasi
Rate atau Flow		kata kerja; mengubah besaran Box Variable (Stock)

Sumber: Shiflet dan Shiflet (2011)

Pada istilah Vensim PLE, ‘Box Variable’ atau ‘Stock’ merupakan kata benda dan mewakili sesuatu yang terakumulasi. Contoh dari ‘Stock’ antara lain populasi, uang, dan pengunjung. Besaran ‘Stock’ memberi informasi gambaran dari sistem (Shiflet dan Shiflet, 2011).

2.8 Kelembagaan

Kelembagaan (institusi) adalah aturan dan rambu-rambu yang digunakan sebagai panduan oleh para anggota suatu kelompok masyarakat untuk mengatur hubungan yang saling mengikat atau saling tergantung satu sama lain (Ostrom dkk., 1994). Schmid (2004) menyatakan kelembagaan sebagai sejumlah aturan yang berlaku dalam sebuah masyarakat, kelompok, atau komunitas yang mengatur hak, kewajiban, tanggung jawab, baik sebagai individu maupun sebagai kelompok. Kelembagaan merupakan seperangkat hubungan norma-norma, keyakinan-keyakinan dan nilai-nilai yang nyata, yang terpusat pada kebutuhan-kebutuhan sosial dan serangkaian tindakan yang penting dan berulang (Wibowo, 2011).

Kelembagaan umumnya banyak dibahas dalam ilmu sosiologi, antropologi, hukum dan politik, organisasi dan manajemen, psikologi, maupun ilmu lingkungan. Dalam bidang sosiologi dan antropologi kelembagaan banyak ditekankan pada norma, tingkah laku, dan adat istiadat. Dalam bidang politik ilmu kelembagaan banyak ditekankan pada aturan main (*the rules*) dan kegiatan kolektif (*collective action*) untuk kepentingan bersama. Ilmu psikologi melihat kelembagaan dari sudut tingkah laku manusia (*behaviour*). Ilmu hukum menegaskan pentingnya kelembagaan dari sudut hukum, aturan, dan penegakan hukum serta instrumen dan proses litigasinya. Pendekatan ilmu biologi, ekologi, atau lingkungan melihat institusi dari sudut analisis sistem lingkungan (*ecosystem*) atau sistem produksi dengan menekankan struktur dan fungsi sistem produksi atau sistem lingkungan kemudian dapat dianalisis keluaran serta kinerja dari sistem tersebut dalam beberapa karakteristik atau kinerja (*system performance atau system properties*) seperti produktivitas, stabilitas, sustainabilitas, penyebaran dan kemerataannya (Kusumawardhani, 2017).

2.9 Interpretative Structural Modeling

Interpretative Structural Modelling (ISM) dikembangkan oleh Saxena, yang dapat digunakan untuk menganalisa program yang sesuai dengan visi dan misi. Ada 9 elemen indikator dalam analisis, yaitu: (1) sektor masyarakat yang terpengaruhi, (2) kebutuhan dari program, (3) kendala utama program, (4) perubahan yang diinginkan, (5) tujuan dari program, (6) tolok ukur untuk menilai

setiap tujuan, (7) aktivitas yang dibutuhkan guna perencanaan tindakan, (8) ukuran aktivitas guna mengevaluasi hasil yang dicapai setiap aktivitas, (9) lembaga yang terlibat dalam pelaksanaan program. Secara garis besar teknik ISM dibagi menjadi dua bagian, yaitu klasifikasi elemen dan penyusunan hirarki. Langkah-langkah yang dilakukan dalam metode ISM sebagai berikut (Eriyatno, 1999 dalam Walukow, 2009):

- 1) Identifikasi elemen
- 2) Hubungan Kontekstual
- 3) SSIM (*Structural Self Interaction Matrix*)

Klasifikasi elemen didasarkan pada *Structural Self Matrix* (SSM) yang dibuat berdasarkan sistem VAXO, yaitu:

V jika $e_{ij} = 1$ dan $e_{ji} = 0$; X jika $e_{ij} = 1$ dan $e_{ji} = 1$

A jika $e_{ij} = 0$ dan $e_{ji} = 1$; O jika $e_{ij} = 0$ dan $e_{ji} = 0$

- Pengertian nilai $e_{ij} = 1$ adalah ada hubungan kontekstual antara subelemen ke-i dan ke-j, sedangkan nilai $e_{ji} = 0$ adalah tidak ada hubungan kontekstual antara subelemen ke-i dan ke-j.
- V jika $e_{ij} = 1$ dan $e_{ji} = 0$; V = subelemen ke-i harus lebih dulu ditangani dibandingkan subelemen ke-j
- A jika $e_{ij} = 0$ dan $e_{ji} = 1$; A = subelemen ke-j harus lebih dulu ditangani dibandingkan subelemen ke-i
- X jika $e_{ij} = 1$ dan $e_{ji} = 1$; X = kedua subelemen harus ditangani Bersama
- O jika $e_{ij} = 0$ dan $e_{ji} = 0$; O = kedua subelemen bukan prioritas yang ditangani.

- 4) RM (*Reachability Matrix*)

Setelah *Structural Self Interaction Matrix* (SSIM) terisi sesuai pendapat responden, maka simbol (V, A, X, O) dapat digantikan dengan simbol (1 dan 0) dengan ketentuan yang ada sehingga dapat diketahui nilai dari hasil *reachability matrix* (RM). Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap aturan transitivity, sampai terjadi matrik yang tertutup. Matriks yang telah memenuhi

transitivity dilanjutkan pengolahannya untuk mendapat matrik *reachability*, untuk mendapatkan *Driver Power* (DP) dan *Dependence* (D).

5) Digraph

Tahap selanjutnya adalah mengelompokkan sub-sub elemen ke dalam 4 sektor.

- *Weak driver-weak dependent variables* (Autonomous)
Peubah di sector ini umumnya tidak berkaitan dengan sistem dan hubungannya sedikit.
- *Weak driver-strongly dependent variables* (Dependent)
Peubah yang masuk kelompok ini merupakan peubah tak bebas.
- *Strong driver- strongly dependent variables* (Linkage).
Peubah pada sector ini harus dikaji secara hati-hati karena interaksinya dapat memberikan dampak dan umpan balik terhadap sistem.
- *Strong driver-weak dependent variables* (Independent)
Peubah dalam sector ini memiliki pengaruh yang kuat dalam sistem dan sangat menentukan keberhasilan program.

6) ISM (*Interpretative structural modeling*) (pembahasan hasil analisis)

Analisis kelembagaan dapat dilakukan dengan metode ISM. Pengembangan model kelembagaan ini bertujuan untuk membangun alternatif institusi pengelola waduk yang tepat, sesuai dengan karakteristik daerah, perkembangan masyarakat dan peraturan yang berlaku. Dalam melakukan analisis kelembagaan, elemen-elemen yang akan digunakan adalah elemen yang dominan yang dikonsultasikan dengan pakar. Pakar dalam hal ini adalah yang memiliki a) pengetahuan tentang waduk; b) pengetahuan tentang model dinamik; c) skill; dan d) sikap (etika dan moral) (Walukow, 2009).

2.10 Penelitian Terdahulu

Beberapa waduk maupun danau di Indonesia telah dilakukan penelitian mengenai kualitas air dan pengendaliannya. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan dan terkait dengan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Waduk Sutami yang secara administratif berada di Desa Karangates, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang, Jawa Timur. Waduk Sutami secara geografis dibatasi oleh wilayah Kecamatan Sumberpucung, Kalipare dan Pagak. Peta dan gambaran Waduk Sutami dapat dilihat pada Lampiran I. Penelitian ini dilaksanakan selama lima bulan mulai bulan Agustus s/d Desember 2018.

3.2 Kerangka Penelitian

Rangkaian kegiatan dalam penelitian ini dilaksanakan secara berurutan dan disajikan dalam bentuk bagan pada Gambar 3.1.

3.3 Bahan dan Alat Penelitian

3.3.1 Bahan penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain data kualitas perairan (DO, BOD, COD, Ammonia, dan Fosfat), debit air, suhu air, data budidaya perikanan KJA, data kependudukan, dan data pertanian.

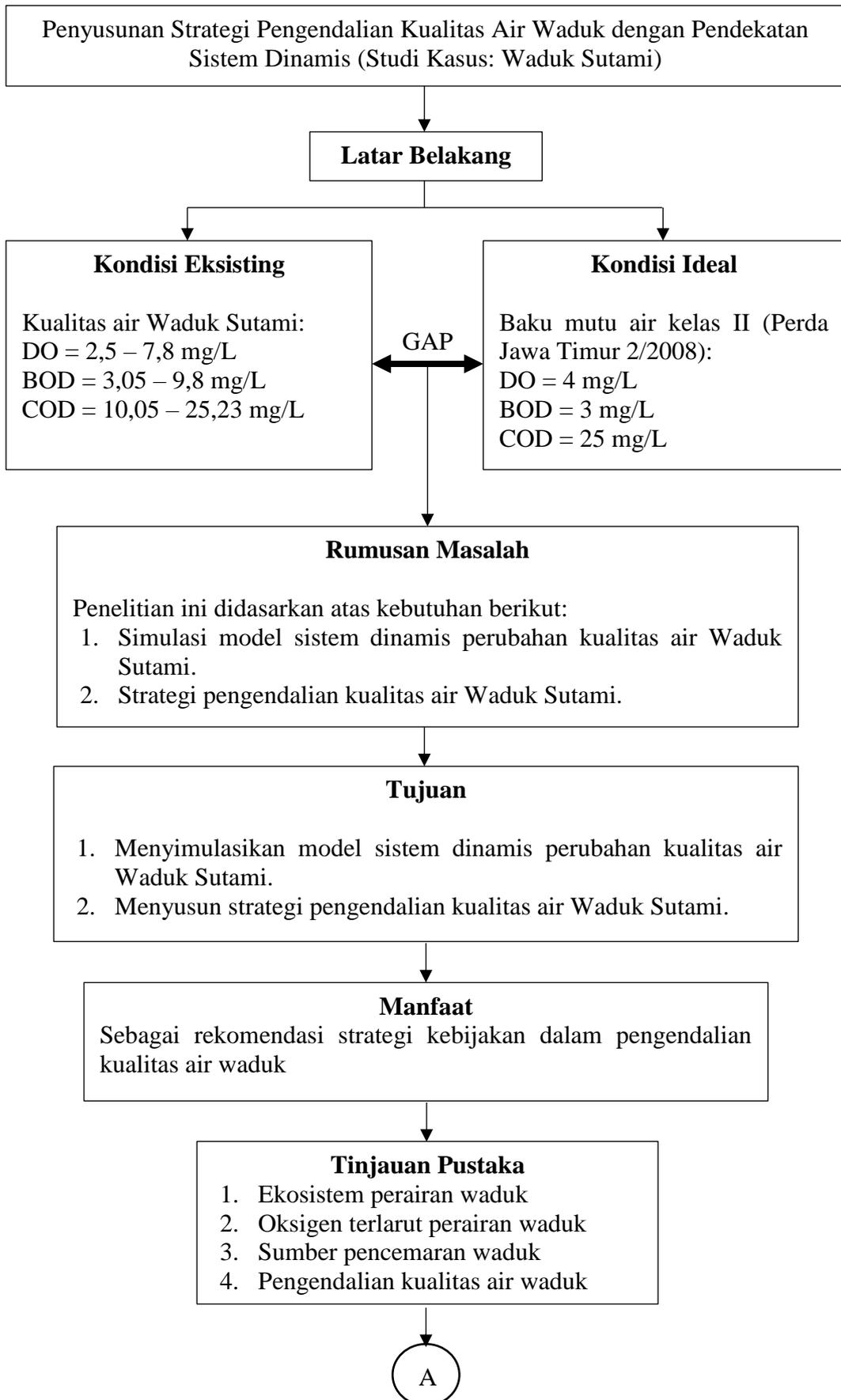
3.3.2 Alat penelitian

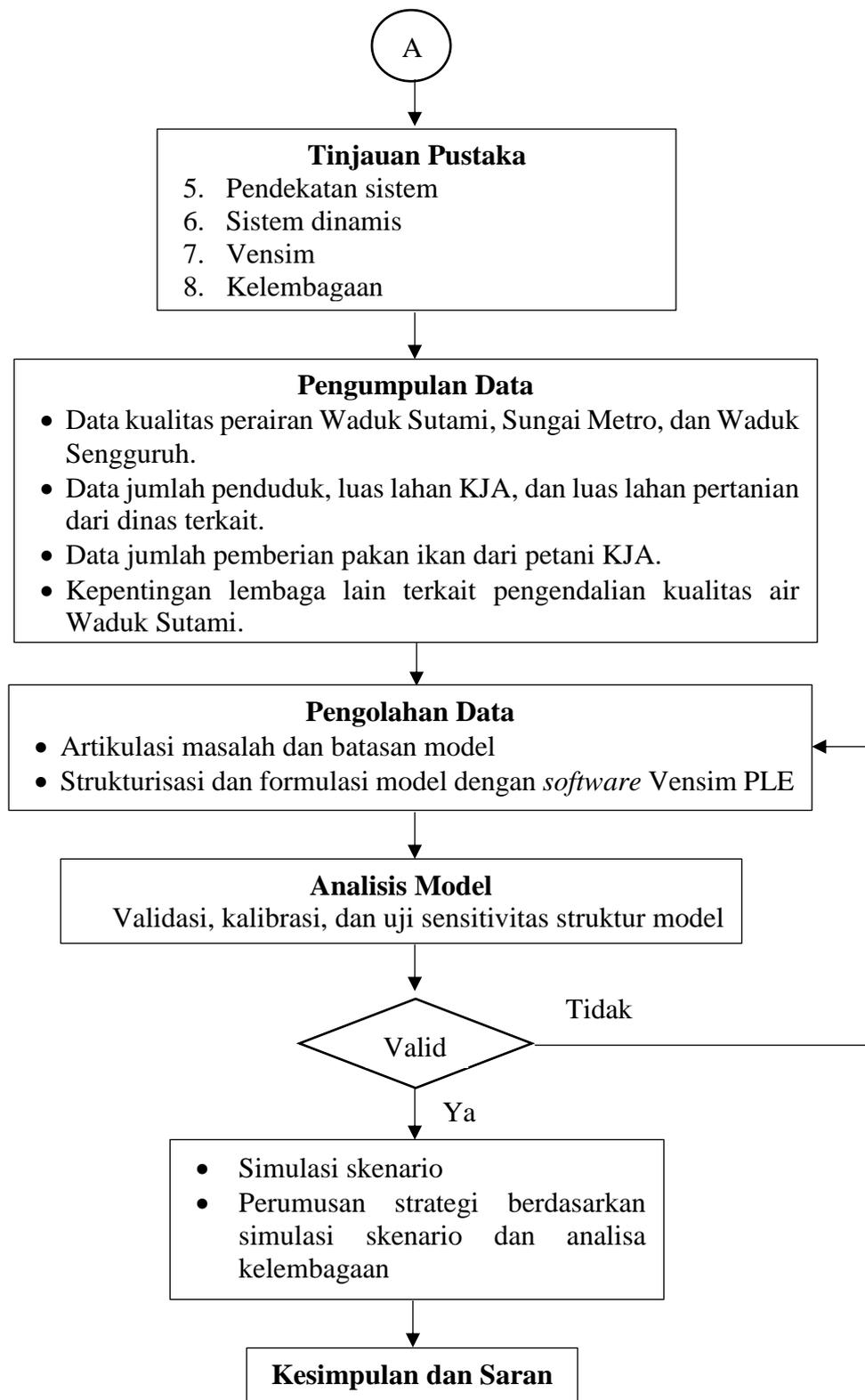
Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *software* Vensim PLE.

3.4 Pengumpulan Data

3.4.1 Jenis Data

Data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain data kualitas perairan (DO, BOD, COD, Ammonia, dan Fosfat), suhu air, debit air, jumlah pakan ikan keramba jaring apung (KJA), jumlah petak/luas lahan KJA, jumlah penduduk dan luas lahan pertanian Kecamatan Sumberpucung, Kalipare dan Pagak. Data primer dari penelitian ini adalah kebutuhan pakan KJA dan keterlibatan lembaga selain PJT 1 dalam pengendalian kualitas air waduk.





Gambar 3.1 Kerangka kerja penelitian

3.4.2 Sumber Data

Data yang digunakan pada penelitian ini didapat dari:

- Data konsentrasi DO, BOD, COD, *Ammonia*, dan *Phosphate* (tahun 2014, 2015, 2016 dan 2017), data suhu air dan data debit air Waduk Sutami dari PJT 1.
- Data konsentrasi DO, BOD, COD, *Ammonia*, dan *Phosphate* (Tahun 2014, 2015, 2016 dan 2017) dan data debit air Waduk Sengguruh (aliran dari Sungai Brantas dan Sungai Lesti) dari PJT 1.
- Data konsentrasi DO, BOD, COD, *Ammonia*, dan *Phosphate* (Tahun 2014, 2015, 2016 dan 2017) dan data debit air segmen sungai Metro sebelum masuk Waduk Sutami dari Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Malang.
- Titik koordinat sampling Waduk Sutami, Waduk Sengguruh dan segmen sungai Metro sebelum masuk Waduk Sutami dari PJT 1 dan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Malang.
- Peta Waduk Sutami dari BAPPEDA Kabupaten Malang.
- Jumlah penggunaan pakan ikan dari petani KJA di Waduk Sutami.
- Luas KJA di Waduk Sutami Tahun 2014, 2015, 2016 dan 2017 dari Dinas Perikanan Kabupaten Malang.
- Jumlah penduduk Kecamatan Sumberpucung, Pagak, Kalipare, Kromengan, Ngajum, dan Kepanjen Tahun 2014, 2015, 2016 dan 2017 dari Dinas Kependudukan dan Catatan Sipil Kabupaten Malang.
- Luas area lahan kebun dan sawah Sumberpucung, Pagak, Kalipare, Kromengan, Ngajum, dan Kepanjen Tahun 2014, 2015, 2016 dan 2017 dari Dinas Tanaman Pangan, Hortikultura dan Perkebunan Kabupaten Malang.
- Kepentingan lembaga lain terkait pengendalian kualitas air Waduk Sutami dari pendapat pengelola Waduk Sutami (PJT 1).

3.5 Pengolahan Data

3.5.1 Identifikasi Kualitas Air

Metode yang digunakan untuk identifikasi kualitas air adalah metode *Storage and Retrieval of Water Quality Data System (STORET)*. Metode ini

dilakukan dengan cara membandingkan data parameter kualitas air hasil pemantauan dengan baku mutu air. Metode ini menggunakan sistem nilai seperti yang telah diatur dalam Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 115 Tahun 2003 tentang Pedoman Penentuan Status Mutu Air dengan mengklasifikasikan kualitas air ke dalam empat kelas, yaitu:

1. Kelas A : baik sekali, skor = 0 (memenuhi baku mutu)
2. Kelas B : baik, skor = -1 s/d -10 (tercemar ringan)
3. Kelas C : sedang, skor = -11 s/d -30 (tercemar sedang)
4. Kelas D : buruk, skor \leq -31 (tercemar berat)

Penentuan status kualitas air dengan metode STORET ditentukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Melakukan tabulasi data kualitas air sehingga membentuk data dari waktu ke waktu (*time series data*) dan mencantumkan nilai maksimum, minimum dan rata-rata hasil pemantauan masing-masing parameter.
2. Membandingkan nilai minimum, maksimum dan rata-rata hasil pengukuran dari masing-masing parameter air dengan standar nilai mutu air.
3. Jika hasil pengukuran memenuhi standar nilai mutu air, maka diberi skor 0.
4. Jika hasil pengukuran tidak memenuhi standar nilai mutu air, maka diberi skor yang disajikan dalam Tabel 3.1.
5. Jumlah negatif dari seluruh parameter dihitung dan ditentukan status kualitasnya dari jumlah skor yang didapat.
6. Standar nilai mutu air merujuk kepada Peraturan Daerah Provinsi Jawa Timur Nomor 2 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air di Provinsi Jawa Timur.

Tabel 3.1 *Scoring* metode STORET

Jumlah Contoh	Nilai	Parameter		
		Fisika	Kimia	Biologi
<10	Maksimum	-1	-2	-3
	Minimum	-1	-2	-3
	Rata-rata	-3	-6	-9
<10	Maksimum	-2	-4	-6
	Minimum	-2	-4	-6
	Rata-rata	-6	-12	-18

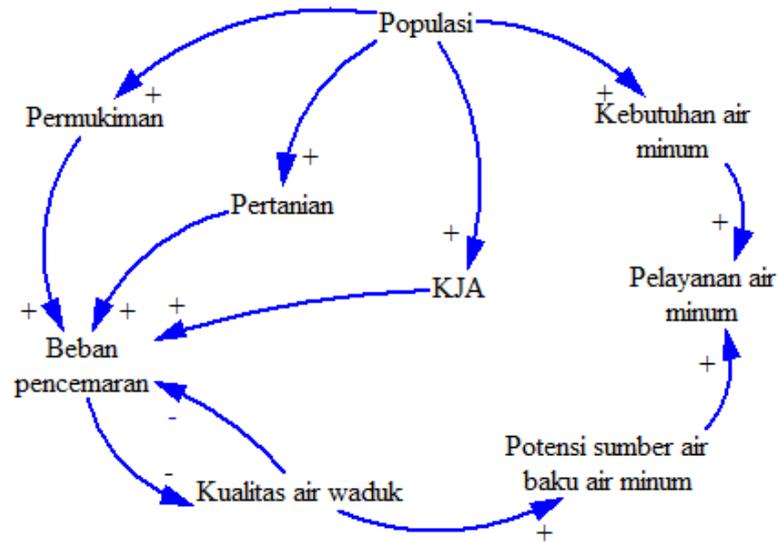
3.5.2 Artikulasi masalah dan penentuan batas model

Permasalahan yang dimaksud pada studi ini adalah pengendalian kualitas air waduk berdasarkan konsentrasi DO dan parameter pencemaran BOD, COD, Ammonia, dan Fosfat. Output yang dikehendaki dari model ini adalah simulasi dinamika DO dan parameter pencemaran BOD, COD, Ammonia, dan Fosfat dengan pengaruh kegiatan permukiman, pertanian dan Keramba Jaring Apung (KJA). Batasan yang digunakan dalam pemodelan ini adalah:

- a. Parameter kualitas air yang dikembangkan pada model ini adalah DO, BOD, COD, Ammonia, dan Fosfat. Masukan beban pencemar berasal dari permukiman, pertanian, dan KJA.
- b. Proses-proses pada perairan waduk yang diterapkan di model yaitu reaerasi, fotosintesis, deoksigenasi, nitrifikasi, dan respirasi. Pemodelan disimulasikan hanya pada lapisan atas perairan waduk. Laju *self purification* tidak disimulasikan pada model ini.
- c. Fotosintesis dan respirasi dibatasi oleh aktivitas plankton.
- d. Faktor pada reaerasi adalah suhu perairan; faktor pada fotosintesis dan respirasi adalah nutrisi plankton berupa fosfat; faktor pada dekomposisi adalah BOD dan COD; faktor pada nitrifikasi adalah oksidasi ammonia hingga menjadi nitrat.
- e. Populasi penduduk sekitar yang mempengaruhi perairan Waduk Sutami dibatasi dari Kecamatan Sumberpucung, Kalipare, Pagak, Kepanjen, Kromengan, dan Ngajum.
- f. Lahan pertanian yang dipertimbangkan yaitu lahan kebun dan sawah. Pencemaran dianggap dari pemakaian pestisida yang dihitung dari luas lahan pertanian.
- g. Aliran masuk waduk dipertimbangkan dari 2 aliran masuk, yaitu Sungai Metro dan Waduk Sengguruh (aliran dari Sungai Brantas dan Sungai Lesti).

3.5.3 Causal loop

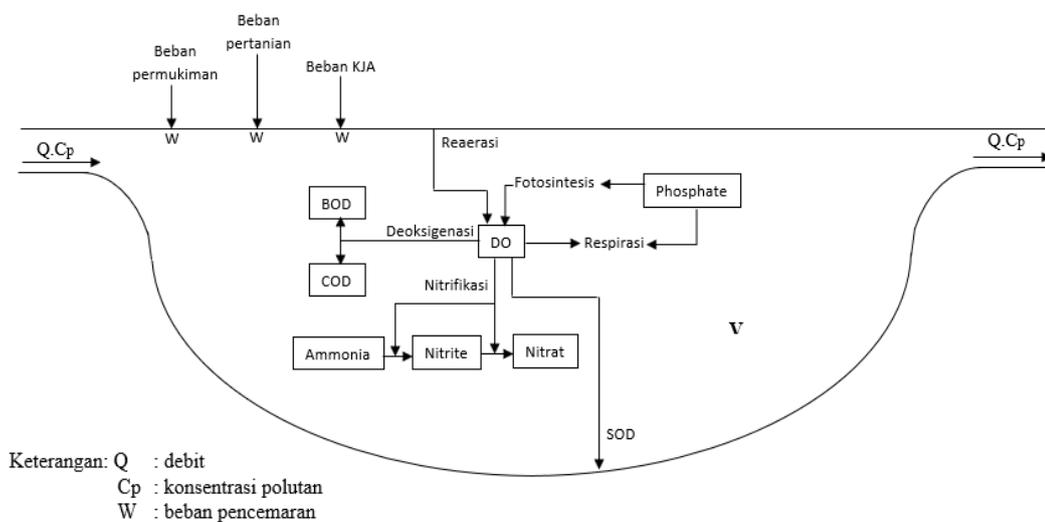
Causal loop menggambarkan hubungan sebab akibat antar variabel yang kemudian dapat dikembangkan dalam struktur model pengendalian kualitas air waduk. *Causal loop* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Causal loop penelitian

3.5.4 Strukturisasi dan Formulasi model

Pada penelitian ini, model pengendalian kualitas air Waduk Sutami dibangun oleh sub model beban pencemaran dan sub model kualitas perairan. Sub model beban pencemaran mewakili kegiatan yang ada di lingkungan perairan waduk yaitu sub model permukiman, sub model pertanian, dan sub model KJA. Sub model kualitas perairan terdiri dari sub model BOD, COD, Ammonia (NH₄), Fosfat (PO₄) dan DO. Kestimbangan yang terjadi di perairan waduk dapat digambarkan melalui *control-volume* yang dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Pendekatan *Control-volume* perairan waduk Sutami

Persamaan yang diterapkan untuk waduk:

$$\text{Akumulasi} = V \frac{dc}{dt} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{Beban masuk} = W = Q_{in}c_{in} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\text{Outflow} = Qc \dots\dots\dots(3.3)$$

$$\text{Reaksi} = kVc \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\text{Settling} = k_sVc \dots\dots\dots(3.5)$$

Dari persamaan (3.1) hingga (3.5) maka akumulasi di perairan waduk dapat dihitung dengan persamaan (3.6) (Chapra, 1997).

$$V \frac{dc}{dt} = W - Qc - kVc - k_sVc \dots\dots\dots(3.6)$$

Pada program Vensim, ‘stock’ pada struktur model merupakan nilai parameter yang dibuat sebagai massa. Sedangkan konsentrasi sama dengan massa per volume.

Sehingga dari persamaan (3.6) didapatkan:

$$\frac{dm}{dt} = W - Q \frac{m}{V} - km - k_s m \dots\dots\dots(3.7)$$

Keterangan:

V = volume perairan (L)

c = konsentrasi parameter kualitas air (mg/L)

m = massa parameter kualitas air (mg)

W = beban pencemaran (mg/hari)

Q = debit (L/hari)

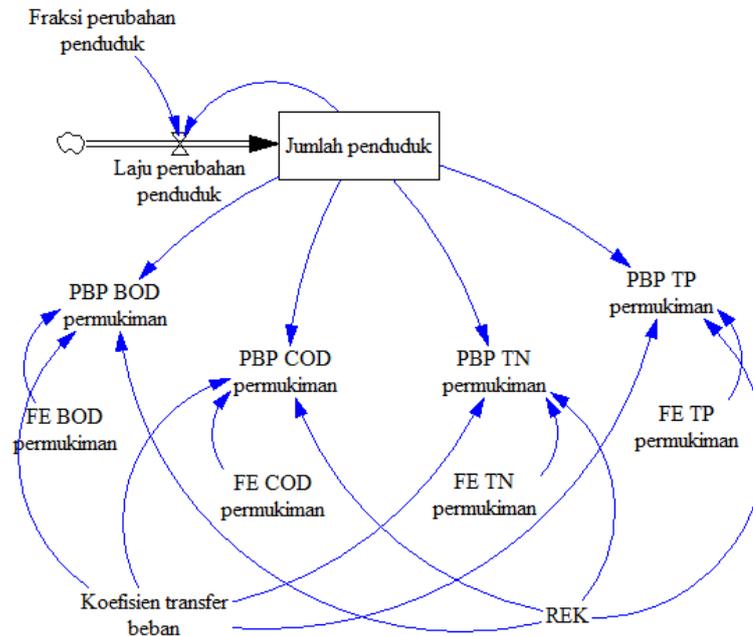
k = kecepatan reaksi (hari⁻¹)

k_s = kecepatan *settling* (hari⁻¹)

1. Sub Model Permukiman

Sub model beban pencemaran permukiman dibuat atas dasar penduduk sebagai sumber penghasil limbah domestik di sekitar Waduk Sutami. Jumlah penduduk sekitar waduk sebagai peubah ‘stock’ dan laju perubahan penduduk sebagai peubah ‘flow’. Jumlah penduduk awal simulasi menggunakan data pada tahun 2014. Laju perubahan penduduk dipengaruhi oleh variabel fraksi pertumbuhan penduduk. Fraksi perubahan penduduk didapat dari rata-rata persentase pertumbuhan penduduk sekitar Waduk Sutami pada rentang tahun

2014 – 2017. Struktur sub model beban pencemaran permukiman dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Sub model permukiman

Potensi Beban Pencemaran (PBP) dari permukiman dapat dihitung dari persamaan 4.2.

$$\text{PBP Domestik} = \text{Jumlah penduduk} \times \text{FE} \times \text{REK} \times \text{transfer beban} \dots (3.8)$$

Faktor emisi (FE) masing-masing parameter beban pencemaran dapat dilihat pada Tabel 3.2. Rasio Ekvivalen Kota (REK) menggunakan nilai 0,8125 karena daerah penelitian merupakan pinggiran kota. Koefisien transfer beban (RRC) menggunakan nilai 0,85 karena pola sanitasi di daerah penelitian tanpa pengolahan air limbah domestik dan dibuang melalui saluran drainase (KLHK, 2016).

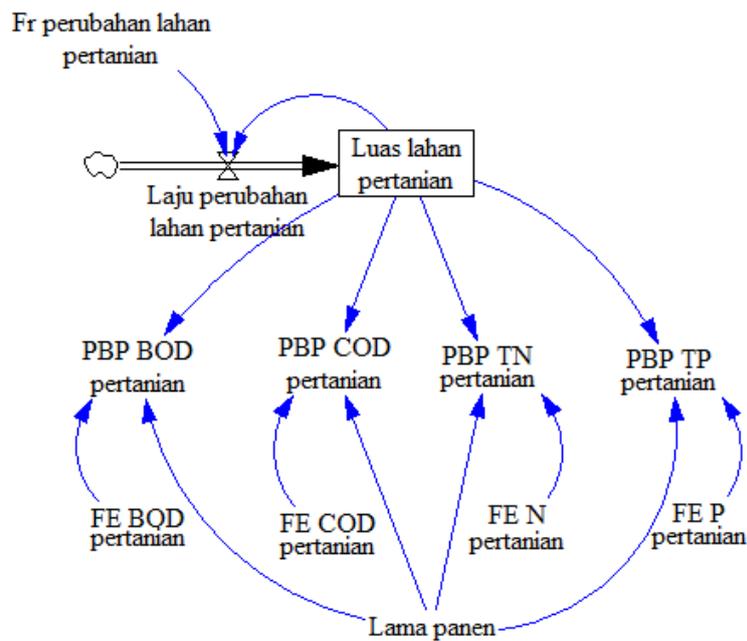
Tabel 3.2 Faktor Emisi (FE) perhitungan beban pencemaran limbah domestik

No.	Polutan	Faktor Emisi (gr/hari)	Faktor Emisi (kg/bulan)*
1.	BOD (<i>grey water</i>)	27	0,81
2.	COD	55	1,65
3.	NH4-N	1.8	0,054
4.	PO4-P	0.17	0,0051

Sumber: KLHK (2016)

2. Sub Model Pertanian

Sub model beban pencemaran pertanian berdasarkan pendekatan limbah pertanian masuk ke perairan waduk melalui air sungai maupun air limpasan (*run off*). Lahan pertanian sekitar Waduk Sutami sebagai peubah ‘*stock*’ dan laju perubahan lahan pertanian sebagai peubah ‘*flow*’. Lahan pertanian yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari lahan sawah, ladang, dan kebun, dengan total luas lahan awal simulasi yang digunakan adalah data pada tahun 2014. Laju perubahan lahan pertanian dipengaruhi oleh fraksi perubahan luas lahan pertanian. Fraksi perubahan luas lahan pertanian menggunakan data rata-rata persentase perubahan luas lahan dari tahun 2014 – 2017. Struktur sub model beban pencemaran pertanian dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Sub model beban pencemaran pertanian

Potensi Beban Pencemaran (PBP) dari pertanian dapat dihitung dari persamaan 4.3 dan 4.4.

$$\text{PBP Pertanian per musim tanam} = \text{Luas lahan} \times \text{FE} \times 10\% \dots \dots \dots (3.9)$$

$$\text{PBP Pertanian} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hari}} \right) = \text{PBP per musim tanam} \times \text{Jumlah hari musim tanam} \dots \dots \dots (3.10)$$

Faktor emisi (FE) masing-masing parameter beban pencemaran dapat dilihat pada Tabel 3.3. FE yang digunakan untuk jenis pertanian sawah karena di wilayah penelitian dominan pertanian padi. Jumlah hari musim tanam didapat dari hasil survei kepada kelompok tani di sekitar Waduk Sutami.

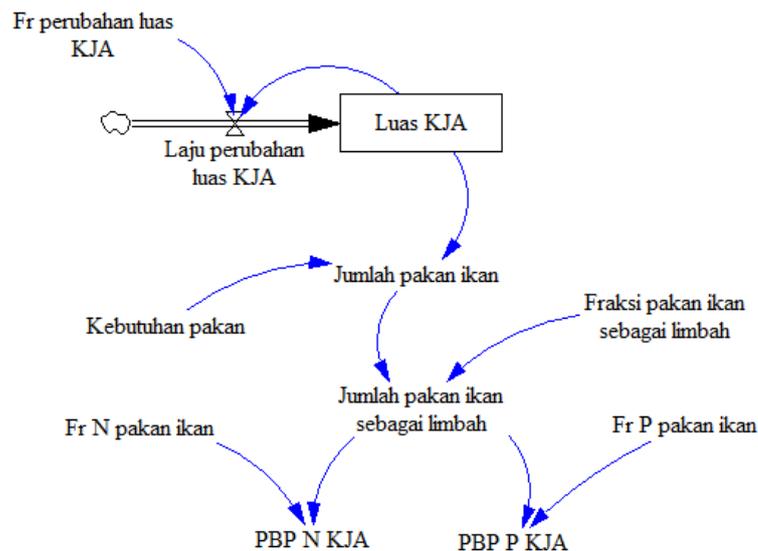
Tabel 3.3 Faktor Emisi (FE) perhitungan beban pencemaran pertanian

Jenis pertanian	Parameter limbah			
	BOD	COD	N	P
	Kg/ha.musim			
Sawah (jerami padi yang membusuk)	225	337,5	20	10

Sumber: KLHK (2016)

3. Sub Model Keramba Jaring Apung (KJA)

Pencemaran yang disebabkan oleh KJA berasal dari pakan ikan yang diberikan per luas keramba. Luas KJA sebagai peubah ‘*stock*’ dengan nilai awal simulasi menggunakan data tahun 2014. Laju perubahan luas KJA sebagai peubah ‘*flow*’ dan dipengaruhi oleh fraksi perubahan luas KJA. Fraksi perubahan luas KJA dihitung dari rata-rata persentase perubahan luas KJA dari tahun 2014 – 2017. Struktur sub model beban pencemaran KJA dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Sub model beban pencemaran KJA

Kebutuhan pakan ikan dihitung menggunakan pendekatan rata-rata kebutuhan pakan per hari dibagi dengan luas KJA yang dimiliki masing-masing petani ikan di Waduk Sutami, sehingga akan didapatkan berat pakan per satuan luas KJA. Data kebutuhan pakan ikan per hari dan luas kepemilikan KJA didapat dari survei kepada kelompok petani ikan. Fraksi pakan ikan sebagai limbah didapat dari jumlah pakan yang lepas ke badan perairan dan jumlah pakan yang terbuang ke badan perairan sebagai *feces* ikan. Hasil perhitungan yaitu fraksi pakan ikan sebagai limbah sebesar 79% – 89,5% dari jumlah pakan ikan yang diberikan. Fraksi unsur N dan P pakan ikan didapat dari kandungan unsur yang terdapat dalam pakan, yaitu N sebesar 4.86% dan P sebesar 1.2%. Fraksi BOD 9,6%, sedangkan COD 14,49%. Potensi Beban Pencemaran (PBP) KJA dapat dihitung dari persamaan 3.11.

$$\text{PBP KJA} = \text{Jumlah pakan ikan sebagai limbah} \times \text{Fraksi unsur} \dots\dots(3.11)$$

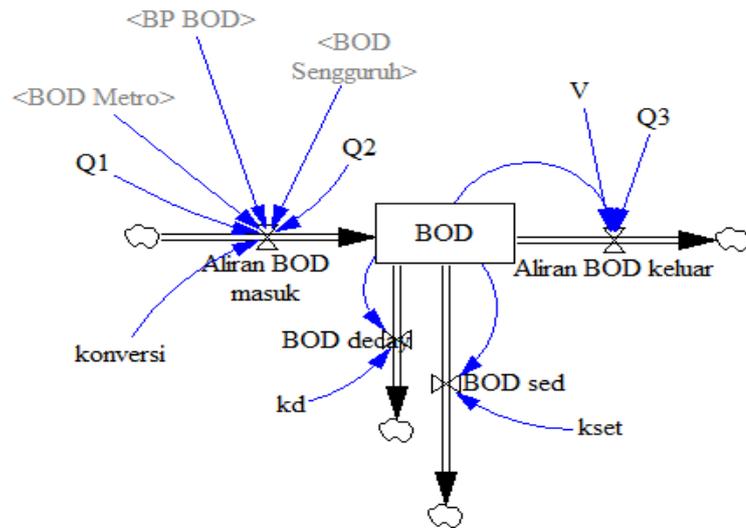
4. Sub Model BOD

Kualitas BOD perairan Waduk Sutami sebagai peubah ‘*stock*’ dengan satuan berat per waktu. Aliran BOD masuk, aliran BOD keluar, dekomposisi, dan sedimentasi sebagai ‘*flow*’. Aliran BOD masuk merupakan penjumlahan dari potensi beban pencemaran BOD (PBP BOD permukiman, PBP BOD pertanian dan PBP BOD KJA), beban BOD sungai Metro dan beban BOD Waduk Sengguruh. Dekomposisi dan sedimentasi dihitung dengan persamaan 4.6 dan 4.7. Penjelasan untuk persamaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.3. Struktur sub model kualitas BOD dapat dilihat pada Gambar 3.7.

$$k_d = k_{20} \times \theta^{(T-20)} \dots\dots\dots(3.12)$$

$$\text{BOD decay} = k_d \times \text{BOD} \dots\dots\dots(3.13)$$

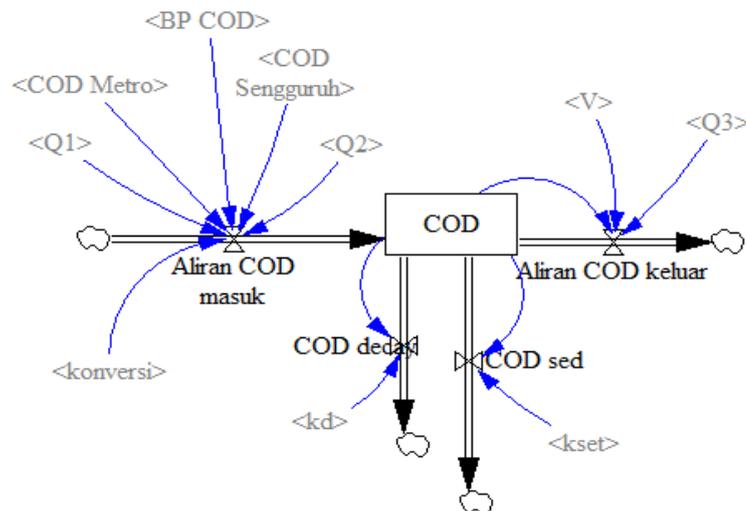
$$\text{BOD sedimentasi} = k_{\text{set}} \times \text{BOD} \dots\dots\dots(3.14)$$



Gambar 3.7 Sub model BOD

5. Sub Model COD

Kualitas COD perairan Waduk Sutami sebagai peubah '*stock*' dengan satuan berat per waktu. Aliran COD masuk, aliran COD keluar, dekomposisi, dan sedimentasi sebagai '*flow*'. Aliran COD masuk merupakan penjumlahan dari potensi beban pencemaran COD (PBP COD permukiman, PBP COD pertanian dan PBP KJA), beban COD sungai Metro dan beban COD Waduk Sengguruh. Dekomposisi dan sedimentasi dihitung seperti BOD yaitu menggunakan persamaan 4.6 dan 4.7 dan mengganti BOD dengan konsentrasi COD. Penjelasan untuk persamaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4. Struktur sub model kualitas COD dapat dilihat pada Gambar 3.8.

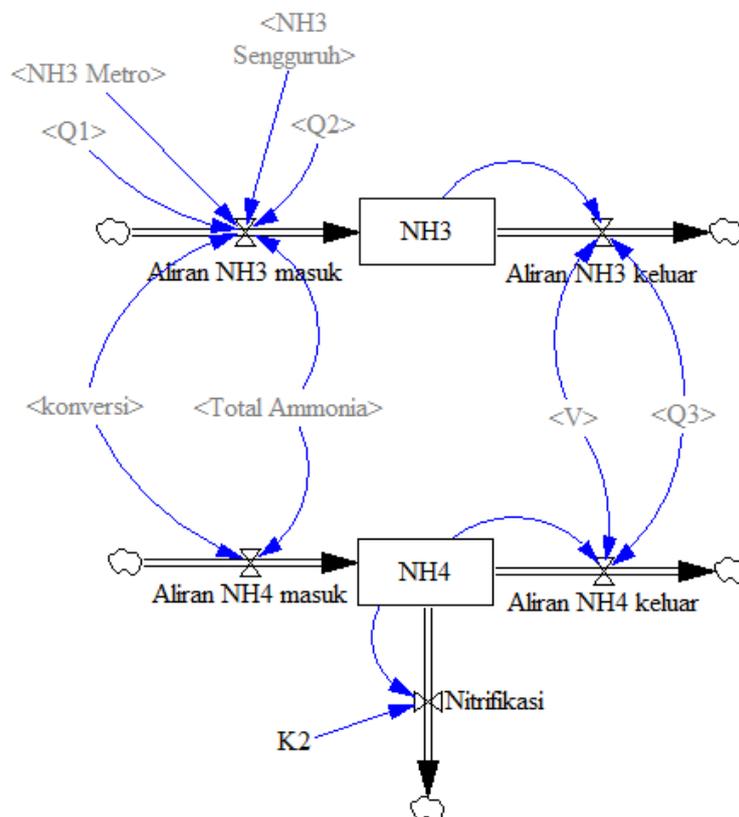


Gambar 3.8 Sub model COD

6. Sub Model Ammonia

Sumber ammonia berasal dari potensi beban total nitrogen (TN) permukiman, pertanian, dan KJA, serta aliran dari sungai Metro dan Waduk Sengguruh yang diukur sebagai NH₃. Total nitrogen terdiri dari Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), nitrit, dan nitrat. Konsentrasi nitrit dan nitrat pada air buangan sangat kecil. TKN merupakan jumlah dari Total Ammonia Nitrogen dan nitrogen organik. Total ammonia yang masuk ke perairan waduk mempengaruhi kualitas NH₃ dan NH₄ perairan dimana NH₃ dan NH₄ dibuat sebagai 'stock' pada model. Pada struktur NH₃, aliran NH₃ masuk dan aliran NH₃ keluar sebagai 'flow', sedangkan pada struktur NH₄ aliran masuk NH₄, aliran keluar NH₄ dan nitrifikasi sebagai 'flow'. Struktur sub model ammonia dapat dilihat pada Gambar 3.8. Banyaknya NH₄ yang mengalami nitrifikasi dihitung berdasarkan persamaan 3.9. Penjelasan untuk persamaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4.

$$\text{Nitrifikasi} = \text{NH}_4 \times 4,57 \times K_2 \dots \dots \dots (3.15)$$



Gambar 3.9 Sub model ammonia

7. Sub Model Fosfat

Sumber fosfat (PO_4) dari total fosfat (TP) permukiman, pertanian, dan KJA, serta aliran dari sungai Metro dan Waduk Sengguruh yang diukur sebagai fosfat. Kualitas PO_4 perairan Waduk Sutami dibuat sebagai 'stock' dalam struktur model. Aliran PO_4 masuk, aliran PO_4 keluar, fotosintesis, dan respirasi sebagai 'flow'. Struktur sub model kualitas COD dapat dilihat pada Gambar 3.10. Reaksi yang terjadi dapat dihitung menggunakan persamaan (3.16) – (3.20). Penjelasan untuk persamaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4.

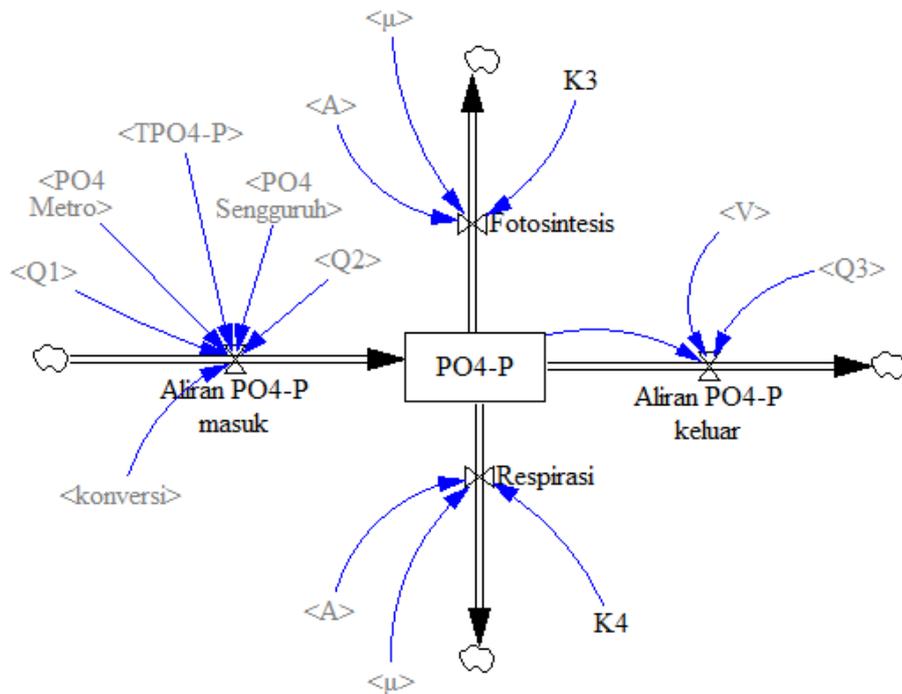
$$Chl\ a = 2,06(PO_4)^{0,387} \dots\dots\dots (3.16)$$

$$A = \alpha \times Chl\ a \dots\dots\dots (3.17)$$

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{PO_4}{K_P + PO_4} \right) \dots\dots\dots (3.18)$$

$$Fotosintesis = K_3 \mu A \dots\dots\dots (3.19)$$

$$Respirasi = K_4 \mu A \dots\dots\dots (3.20)$$



Gambar 3.10 Sub model fosfat

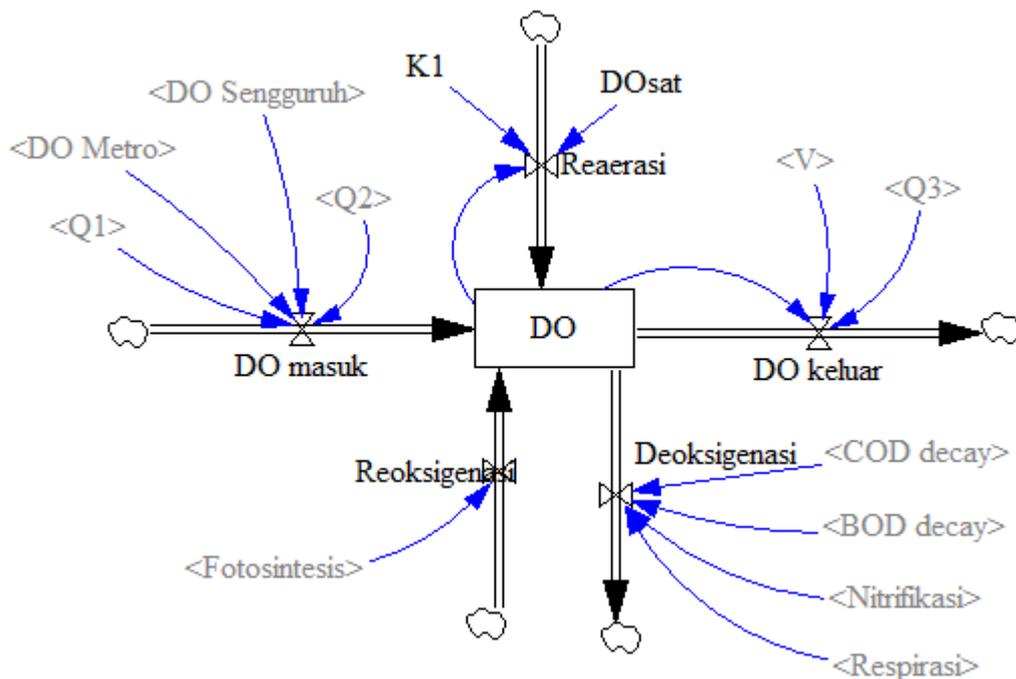
8. Sub Model Kualitas DO

Kualitas DO perairan Waduk Sutami sebagai 'stock' dalam struktur model. Aliran DO masuk, aliran DO keluar, reaerasi, reoksigenasi, dan

deoksigenasi sebagai 'flow'. Aliran DO masuk merupakan penjumlahan dari beban DO sungai Metro dan beban DO Waduk Sengguruh. Reoksigenasi merupakan penambahan DO dari proses fotosintesis. Deoksigenasi merupakan pengurangan DO akibat proses dekomposisi (BOD dan COD), nitrifikasi dan respirasi. Persamaan yang dapat digunakan untuk formulasi sub model DO dapat dilihat pada persamaan (3.21) – (3.22). Penjelasan untuk persamaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.4. Struktur sub model kualitas COD dapat dilihat pada Gambar 3.11.

$$DO_{sat} = 14,652 - 0,41022T + 0,0079910T^2 - 0,000077774T^3 \dots\dots\dots(3.21)$$

$$Reaerasi = K_1(DO_{sat} - DO) \dots\dots\dots(3.22)$$



Gambar 3.11 Struktur sub model DO

Proses penggunaan program Vensim PLE dapat dilihat pada Lampiran IV. Persamaan-persamaan struktur sub model dijabarkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Formulasi dinamika DO

Nama Proses	Formulasi	Parameter	Keterangan
Reaerasi	$K_1(DO_{sat} - DO)$	K_1	<i>Rate</i> reaerasi
		DO_{sat}	DO saturasi (DO jenuh)
		DO	DO perairan waduk
	$DO_{sat} = 14,652 - 0,41022T + 0,0079910T^2 - 0,000077774T^3$	T	Suhu perairan (°C)
Fotosintesis	Fotosintesis = $K_3\mu A$	K_3	<i>Rate</i> fotosintesis
		μ	Laju pertumbuhan fitoplankton
		A	Biomassa fitoplankton
	$A = \alpha \times \text{Chl a}$	α	C:Chl a ratio
		Chl a	Klorofil a
	$\text{Chl a} = 2,06(\text{PO}_4)^{0,387}$		
	$\mu = \mu_{max} \left(\frac{\text{PO}_4}{K_p + \text{PO}_4} \right)$	μ_{max}	Laju pertumbuhan fitoplankton maksimum
K_p		Konstanta <i>half-saturation</i> phosphate	
Dekomposisi	$k_d = k_{20} \times \theta^{(T-20)}$	k_{20}	<i>Rate</i> oksidasi senyawa organik pada suhu 20 °C
		θ	Koefisien suhu oksidasi
	$\text{BOD decay} = k_d \times \text{BOD}$	k_d	<i>Rate</i> dekomposisi
	$\text{BOD sed} = k_{set} \times \text{BOD}$	k_{set}	<i>Rate</i> sedimentasi
		T	Suhu perairan (°C)
Respirasi	Respirasi = $K_4\mu A$	K_4	<i>Rate</i> respirasi
		A	Biomassa fitoplankton
		μ	Laju pertumbuhan fitoplankton
Nitrifikasi	$\text{NH}_4 \times 4,57 \times K_2$	K_2	<i>Rate</i> pengambilan oksigen untuk oksidasi amoniak

3.6 Analisis Model

3.6.1 Validasi dan Kalibrasi

Validasi bertujuan untuk mengetahui kesesuaian antara hasil simulasi dengan gejala atau proses yang ditirukan. Model dapat dinyatakan baik jika kesalahan atau simpangan hasil simulasi terhadap gejala atau proses yang terjadi di dunia nyata relatif kecil (Iriadi, 2015). Tingkat akurasi model yang telah dibuat dapat ditentukan dengan menggunakan formula MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) dan RMSE (*Root Mean Squared Error*). Metode MAPE digunakan jika nilai data besar.

MAPE < 5% : Sangat tepat

5% < MAPE < 10% : Tepat

MAPE > 10% : Tidak Tepat

$$\text{MAPE} = \left| \frac{A - F}{A} \right| \times 100\%$$

Dimana :

A = Nilai data Aktual

F = Nilai data Hasil Prediksi

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}$$

Dimana:

y_t = Nilai data Aktual

\hat{y}_t = Nilai data Hasil Prediksi

3.6.2 Uji Sensitivitas

Uji sensitivitas dilakukan dengan mengetahui respon output model akibat pengaruh dari suatu variabel. Uji ini untuk menentukan variabel mana yang cukup penting ditelaah lebih lanjut pada struktur model. Variabel yang diuji sensitivitasnya adalah variabel *exogenous* (eksogen) yang merupakan variabel dengan nilai yang tidak bergantung atau terpengaruh variabel lain dalam suatu sistem (Iriadi, 2015).

Tiap variabel eksogen akan dinalisa besar pengaruhnya. Setelah melakukan uji sensitivitas, maka dapat diurutkan variabel eksogen yang paling besar pengaruhnya. Variabel tersebut memiliki pengaruh nyata terhadap model, sehingga perubahan variabel tersebut dapat mempengaruhi model secara keseluruhan. Hasil identifikasi dari uji sensitivitas akan digunakan sebagai pertimbangan dalam pembuatan strategi dalam beberapa skenario.

3.6.3 Simulasi Skenario

Kemungkinan kondisi di masa yang akan datang dapat dilakukan pemetaan kedalam beberapa skenario. Variabel yang diubah pada model merupakan variabel eksogen yang berpengaruh pada sistem, yang didapat dari uji sensitivitas.

3.7 Analisis Kelembagaan

3.7.1 Identifikasi Elemen

Elemen yang digunakan pada penelitian ini adalah elemen ke-9, yaitu lembaga yang terlibat dalam pelaksanaan program. Program dalam hal ini yaitu pengendalian kualitas air Waduk Sutami. Dari elemen Lembaga ini akan ditentukan sub elemen yang lebih rinci yang terdiri dari lembaga terkait.

3.7.2 *Structural Self Matrix* (SSM)

Untuk membuat SSM diperlukan pendapat para pakar. SSM dapat dibentuk sebagaimana pada Gambar 3.12.

	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	V						A					
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												

Gambar 3.12 *Structural Self Matrix*

3.7.3 RM (*Reachability Matrix*)

Setelah dibentuk SSM, maka simbol pada SSM dapat diganti dengan angka 1 dan 0 dengan ketentuan yang ada. Matriks yang dibentuk dapat disajikan dalam bentuk sesuai pada Gambar 3.13, dengan DP adalah *Driver Power*, D adalah *Dependence*, R adalah *Ranking*, dan L adalah *Level/Hirarki*.

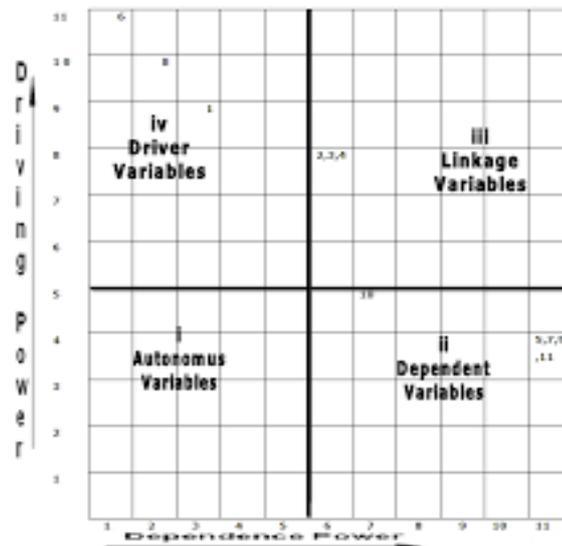
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	DP	R
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
D														
L														

Gambar 3.13 *Reachability Matrix*

3.7.4 Membentuk Digraph

Tahap selanjutnya adalah mengelompokkan sub-sub elemen ke dalam 4 sektor, yang dapat dilihat pada Gambar 3.14.

- Sektor 1: *Weak driver-weak dependent variabels (Autonomous)*
Subelemen yang masuk pada sektor 1 jika: Nilai $DP \leq 0.5 X$ dan nilai $D \leq 0.5 X$, X adalah jumlah subelemen
- Sektor 2: *Weak driver-strongly dependent variabels (Dependent)*
Subelemen yang masuk pada sektor 2 jika: Nilai $DP \leq 0.5 X$ dan nilai $D > 0.5 X$.
- Sektor 3: *Strong driver- strongly dependent variabels (Lingkage).*
Subelemen yang masuk pada sektor 3 jika: Nilai $DP > 0.5 X$ dan nilai $D > 0.5 X$.
- Sektor 4: *Strong driver-weak dependent variabels (Independent)*
Subelemen yang masuk pada sektor 4 jika: Nilai $DP > 0.5 X$ dan nilai $D \leq 0.5 X$.



Gambar 3.14 Digraph ISM

Dari hasil pembentukan digraph ISM, akan didapat pengelompokkan sub elemen ke dalam sektor Autonomus, Dependent, Linkage, dan Independent. Sub elemen yang berada dalam sektor Independent menjadi elemen kunci, dan berarti menjadi lembaga yang berperan penting dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami.

Halaman ini sengaja dikosongkan

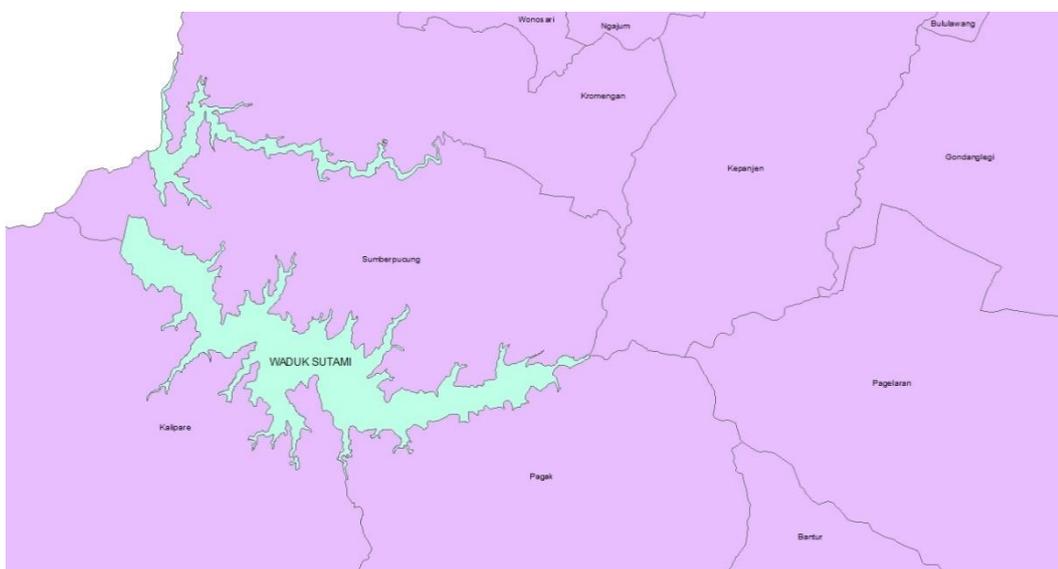
BAB 4

DESKRIPSI DAERAH PENELITIAN

4.1 Geografis

Waduk Sutami terletak di Desa Karangates, Kecamatan Sumberpucung, Kabupaten Malang. Waduk Sutami merupakan waduk terbesar di Jawa Timur sebagai tampungan aliran DAS Brantas Hulu (Irianto dkk., 2010). Letak Waduk Sutami dapat dilihat pada Gambar 4.1. Secara geografis Waduk Sutami berada pada posisi, dengan Batasan Kawasan sebagai berikut:

- Sebelah utara : Kecamatan Sumberpucung
- Sebelah timur : Waduk Sengguruh, Kecamatan Sumberpucung
- Sebelah selatan : Kecamatan Pagak, Kecamatan Kalipare
- Sebelah barat : Kecamatan Sumberpucung

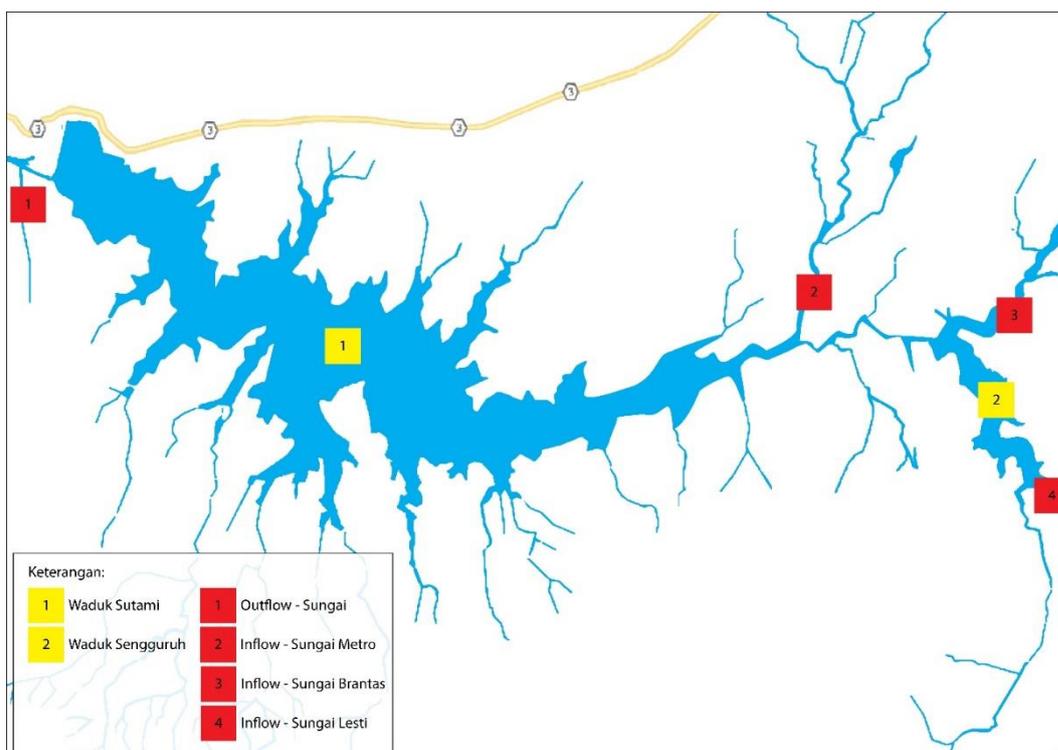


Gambar 4.1 Batas-batas Waduk Sutami

4.2 Gambaran Umum Sumber Aliran Waduk Sutami

Waduk Sutami dialiri oleh beberapa aliran sungai, yang utama yaitu Sungai Metro, Sungai Brantas dan Sungai Lesti. Sungai Brantas dan Sungai Lesti sebelum masuk ke Waduk Sutami ditampung di Waduk Sengguruh. Sungai-sungai tersebut bersumber dari Brantas Hulu. Pada Sungai Metro, titik pantau kualitas air sebelum

masuk ke Waduk Sutami terletak di Kecamatan Ngajum dengan titik koordinat S 08°06'580" E 112°30'233". Sungai Metro ini melewati wilayah kecamatan Ngajum, Kepanjen, dan Kromengan sebelum masuk ke Waduk Sutami. Pada Waduk Sengguruh, titik pantau kualitas air terletak pada koordinat S 08°11.014' E 112°32.955'. Pemodelan kualitas air Waduk Sutami nantinya juga akan dipengaruhi oleh kualitas air hasil pemantauan dari dua titik pantau tersebut. Penampakan Waduk Sutami dan sumber aliran airnya dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Waduk Sutami

4.3 Permukiman

Permukiman menjadi aspek yang berpotensi sebagai penyumbang polutan yang masuk ke Waduk Sutami. Permukiman yang berpotensi merupakan penduduk sekitar daerah tangkapan air Waduk Sutami. Data penduduk yang digunakan pada penelitian ini yaitu penduduk yang secara administratif berdomisili di kecamatan Sumberpucung, Pagak, Kalipare, Kromengan, Ngajum, dan Kepanjen. Pada tahun 2017, jumlah penduduk terbanyak terdapat di Kecamatan Kepanjem (106.759 jiwa) dan terendah di Kecamatan Kromengan (41.985 jiwa). Jumlah penduduk di sekitar Waduk Sutami secara lengkap disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Jumlah penduduk sekitar Waduk Sutami tahun 2017

No.	Kecamatan	Jumlah Penduduk (jiwa)	Kepadatan Penduduk (jiwa/km ²)
1	Sumberpucung ^a	60.192	1.693
2	Pagak ^b	52.349	582
3	Kalipare ^c	68.944	766
4	Kromengan ^d	41.985	1.073
5	Ngajum ^e	52.126	867
6	Kepanjen ^f	106.759	2.309
	Jumlah	382.355	

Sumber: BPS Kabupaten Malang (2018a, 2018b, 2018c, 2018d, 2018e, 2018f)

Perubahan jumlah penduduk dapat dipengaruhi oleh kelahiran, kematian, penduduk yang pindah, dan penduduk yang datang. Perubahan penduduk ini dapat dianalisis menggunakan data historis jumlah penduduk beberapa tahun sebelumnya. Pada penelitian ini digunakan tahun awal simulasi 2014, sehingga data penduduk yang dibutuhkan mulai dari tahun 2014 hingga 2017. Sedangkan jumlah penduduk yang berpotensi menyumbang beban pencemaran ke perairan diasumsikan dari permukiman penduduk hingga jarak 2 km dari perairan.

4.4 Pertanian

Pertanian yang ada di sekitar Waduk Sutami yaitu dari jenis lahan sawah, ladang, dan kebun. Berdasarkan hasil survei, lahan pertanian sebagian besar digunakan untuk pertanian tembakau, padi, dan jagung. Para petani menggunakan jenis pupuk organik maupun kimia. Masa panen dilakukan 2 – 3 dalam satu tahun, dan membutuhkan waktu 95 hari untuk 1 kali panen. Luas lahan pertanian di sekitar Waduk Sutami secara lengkap disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Luas lahan pertanian sekitar Waduk Sutami tahun 2017

No.	Lahan	Luas (ha)
1	Sawah	10.495
2	Ladang	4.481
3	Kebun	6.638
	Jumlah	21.614

Sumber: Dinas Tanaman Pangan dan Hortikultura Kabupaten Malang, 2018

4.5 Perikanan

Kegiatan perikanan di Waduk Sutami menggunakan sistem keramba jaring apung (KJA). KJA di Waduk Sutami terbagi menjadi wilayah Sumberpucung, Kalipare, dan Pagak. KJA yang ada Waduk Sutami milik perorangan dengan total seluas 173 ha pada tahun 2017. Jenis ikan yang dipanen dari KJA antara lain nila, lele, *red devil*, dan wader, dengan jenis yang terbanyak yaitu ikan nila. Produksi ikan nila pada tahun 2016 mencapai 7.538,98 ton dari KJA Sumberpucung sebanyak 3.771,43 ton, KJA Kalipare sebanyak 2.022,99 ton, dan KJA Pagak sebanyak 1.744,56 ton (BPS Kabupaten Malang, 2018). Berdasarkan hasil survei, satu petani ikan bisa memiliki KJA seluas 200 m² – 900 m². Ikan nila dapat dipanen setelah 7 – 8 bulan sejak penebaran bibit ikan.

BAB 5

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Status Mutu Air Waduk Sutami

Status mutu air adalah tingkat kondisi mutu air yang menunjukkan kondisi cemar atau kondisi baik pada suatu sumber air dalam waktu tertentu dengan membandingkan dengan baku mutu air. Penentuan status mutu perairan Waduk Sutami menggunakan Metode STORET. Baku mutu yang digunakan untuk perbandingan yaitu baku mutu air kelas II pada Peraturan Daerah Provinsi Jawa Timur Nomor 2 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air di Provinsi Jawa Timur. Peruntukan air kelas II yaitu dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama. Selain itu, aliran sungai utama yang masuk ke Waduk Sutami (Sungai Metro, Sungai Brantas dan Sungai Lesti) ditetapkan dengan baku mutu kelas II. Secara lebih lengkap hasil analisis STORET disajikan pada Lampiran I. Status mutu air Waduk Sutami disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Perhitungan STORET

No.	Parameter	Baku Mutu (mg/L)	Skor			Jumlah Skor
			Maksimum	Minimum	Rata-Rata	
1.	DO	4	0	-2	0	-2
2.	BOD	3	-2	-2	-6	-10
3.	COD	25	-2	0	0	-2
4.	NH3	-	0	0	0	0
5.	TP	0,2	0	0	0	0
Total Skor						-14

Sumber: Pengolahan data (2018)

Berdasarkan Tabel 5.1, total skor penilaian kualitas air Waduk Sutami yaitu (-14), sehingga masuk kategori nilai kelas C. Penilaian ini menunjukkan kualitas air Waduk Sutami tercemar sedang apabila dibandingkan dengan mutu air kelas II pada Peraturan Daerah Provinsi Jawa Timur Nomor 2 Tahun 2008. Parameter yang menyebabkan mutu air tercemar sedang antara lain DO dengan skor (-2), BOD dengan skor (-10), dan COD dengan skor (-2).

5.2 Deskripsi Model

Model pengendalian kualitas air Waduk Sutami dibangun menggunakan pendekatan sistem dinamis, karena merupakan suatu metode yang efektif dalam menghadapi permasalahan dinamis. Poin utama dari sistem dinamis yaitu memahami proses, informasi perubahan, dan hubungan interaksi antar variabel. Variabel-variabel dan hubungan interaksinya dalam sistem membentuk struktur model. Formulasi yang diberikan pada variabel-variabel model akan membentuk perilaku model.

5.2.1 Struktur Model

Struktur model dibuat dengan pendekatan sistem di dunia nyata. Kegiatan sekitar Waduk Sutami yang dipertimbangkan dalam penelitian ini yaitu permukiman, pertanian, dan perikanan Keramba Jaring Apung (KJA). Sedangkan kualitas air yang simulasikan yaitu DO, BOD, COD, ammonia, dan fosfat. Struktur model kualitas air dibangun dengan pendekatan *control volume* dan dinamika DO yang terjadi di perairan waduk.

1. Sub Model Permukiman

Sub model permukiman dibangun dengan mempertimbangan penduduk sekitar Waduk Sutami. Jumlah penduduk yang bermukim di sekitar waduk menjadi '*stock*' pada struktur model yang dipengaruhi oleh laju perubahan penduduk dan berubah seiring waktu. Laju perubahan jumlah penduduk dipengaruhi oleh fraksi perubahan penduduk. Berdasarkan pengolahan data jumlah penduduk tahun 2014 – 2017, rata-rata perubahan penduduk sekitar Waduk Sutami sebesar 1,463% per tahun atau sekitar 0,122% per bulan. Rata-rata perubahan ini menunjukkan adanya peningkatan penduduk sebanyak 54 jiwa tiap bulan. Perubahan jumlah penduduk sekitar Waduk Sutami ini dapat dipengaruhi oleh kelahiran, kematian, penduduk yang pindah, dan penduduk yang datang.

Jumlah penduduk dengan peubah '*flow*' laju perubahan penduduk dapat digunakan untuk menghitung potensi beban pencemaran dari permukiman. Potensi beban pencemaran dari permukiman dihitung berdasarkan faktor emisi (FE), koefisien transfer beban, dan Rasio Ekivalen Kota (REK). Pola sanitasi di permukiman wilayah penelitian ini tidak ada Instalasi Pengolahan Air

Limbah (IPAL) domestik dan buangan limbah mengalir melalui saluran terbuka, sehingga diasumsikan limbah yang masuk perairan waduk sebanyak 85% dan koefisien transfer beban menggunakan nilai 0,85. Wilayah Waduk Sutami termasuk di pinggiran kota, sehingga REK menggunakan nilai 0,8125. Besaran potensi beban pencemaran akan berubah seiring dengan perubahan jumlah penduduk tiap bulan. Potensi beban pencemar permukiman ini menjadi masukan beban polutan ke perairan waduk.

2. Sub Model Pertanian

Sub model pertanian dibangun dengan mempertimbangan luas lahan pertanian di sekitar Waduk Sutami. Lahan pertanian yang digunakan pada penelitian ini yaitu lahan sawah, kebun, dan ladang. Lahan pertanian menjadi '*stock*' pada struktur model. Laju perubahan lahan pertanian dipengaruhi oleh fraksi perubahan luas lahan pertanian. Berdasarkan pengolahan data luas lahan pertanian tahun 2014 – 2017, rata-rata perubahan luas lahan pertanian sekitar Waduk Sutami sebesar 0% atau tidak ada perubahan luas tiap bulan. Hal ini dikarenakan luas lahan pertanian di kecamatan-kecamatan di sekitar Waduk Sutami tidak mengalami perubahan.

Luas lahan pertanian dengan peubah '*flow*' laju perubahan lahan pertanian dapat digunakan untuk menghitung potensi beban pencemaran dari kegiatan pertanian. Potensi beban pencemaran dari kegiatan pertanian dipengaruhi oleh faktor emisi (FE) dan lama waktu musim tanam. Berdasarkan hasil survei terhadap petani di sekitar Waduk Sutami, dalam satu tahun terdapat dua kali musim tanam. Jumlah hari dalam satu musim tanam yaitu 95 hari, sehingga lama waktu tanam pertanian di sekitar Waduk Sutami sekitar 6 bulan dalam satu tahun.

3. Sub Model Keramba Jaring Apung (KJA)

Sub model KJA dibangun dengan mempertimbangan keseluruhan luas keramba jaring apung yang ada di perairan Waduk Sutami. KJA yang ada di waduk merupakan milik perorangan. Lahan KJA menjadi '*stock*' pada struktur model. Laju perubahan luas KJA dipengaruhi oleh fraksi perubahan luas KJA. Berdasarkan pengolahan data tahun 2014 – 2017, rata-rata perubahan luas KJA di perairan Waduk Sutami sebesar -7,56% per tahun atau sekitar -0,63% per

bulan, hal ini menunjukkan terjadi penurunan luas KJA di perairan Waduk Sutami.

Sumber pencemar dari kegiatan perikanan KJA yaitu pakan ikan. Jumlah pakan ikan per luas KJA didapat dari pengolahan data hasil survei pemilik KJA, sehingga dari luas KJA sebagai '*stock*' dan jumlah pakan per luas KJA didapatkan jumlah pakan ikan keseluruhan. Pakan ikan tidak seluruhnya termakan oleh ikan, selain itu pakan ikan juga akan diretensikan sebagai feses. Fraksi pakan ikan sebagai limbah sebesar 79% - 89,5% dari jumlah pakan (Prabasari, 2017). Potensi beban pencemaran dari kegiatan perikanan KJA dipengaruhi oleh kebutuhan pakan, jumlah pakan sebagai limbah, dan fraksi nitrogen dan fosfor yang terkandung dalam pakan.

4. Sub Model BOD

Akumulasi massa BOD pada perairan dibuat sebagai '*stock*'. Massa BOD ini dipengaruhi oleh beban BOD yang masuk, proses dekomposisi (BOD *decay*), pengendapan partikel (*settling*), dan beban BOD yang keluar dari Waduk Sutami. Beban BOD yang masuk merupakan jumlah beban pencemar sub model permukiman, sub model pertanian, beban BOD Sungai Metro, dan beban BOD Waduk Sengguruh. Debit Sungai Metro disimbolkan Q1, debit Waduk Sengguruh disimbolkan Q2, dan debit Waduk Sutami disimbolkan Q3.

Laju dekomposisi menurun pada kedalaman perairan lebih dari 2,4 m. Hal ini mengakibatkan laju dekomposisi cenderung konstan pada perairan yang dalam dan tidak dipengaruhi oleh kedalaman perairan. Laju dekomposisi untuk perairan dengan kedalaman lebih dari 2,4 m sebesar 0,3/hari (Chapra, 1997). Laju dekomposisi tersebut dapat dikoreksi berdasarkan suhu perairan menggunakan persamaan (3.12). Faktor koreksi suhu untuk proses dekomposisi BOD (θ) yaitu 1,047 (Chapra, 1997).

5. Sub Model COD

Struktur sub model COD hampir sama dengan sub model BOD. Akumulasi massa COD pada perairan dibuat sebagai '*stock*'. Massa COD ini dipengaruhi oleh beban COD yang masuk, proses dekomposisi (COD *decay*), pengendapan partikel (*settling*), dan beban COD yang keluar dari Waduk Sutami. Beban COD yang masuk merupakan jumlah beban pencemar sub

model permukiman, sub model pertanian, beban COD Sungai Metro, dan beban COD Waduk Sengguruh. Perhitungan laju dekomposisi COD diasumsikan sama dengan BOD.

6. Sub Model Ammonia

Sub model ammonia dibangun dengan mempertimbangkan siklus nitrogen di perairan. Beban nitrogen dari sub model permukiman, pertanian, dan perikanan merupakan total nitrogen (TN). Total nitrogen terdiri dari nitrogen organik dan anorganik. Total nitrogen dapat dijelaskan sebagai jumlah dari Total Kjeldahl Nitrogen (TKN), nitrit, dan nitrat. Konsentrasi nitrit dan nitrat pada air buangan sangat kecil. TKN merupakan jumlah dari Total Ammonia Nitrogen dan nitrogen organik, dimana Total Ammonia berkisar antara 60% – 70% dari TKN (Tchobanoglous dkk., 2003). TAN sendiri terdiri dari NH_3 dan NH_4 (Chapra, 1997). Pada perairan dengan $\text{pH} < 8$, lebih dari 90% Total Ammonia berada dalam bentuk NH_4 (Tchobanoglous dkk., 2003). pH perairan yang masuk ke Waduk Sutami rata-rata bernilai 7,65. Sehingga pada struktur model ini, Total Ammonia yang masuk diasumsikan 70% dari TKN. Aliran Total Ammonia tersebut 99% menjadi aliran masuk NH_4 dan sisanya menjadi aliran masuk NH_3 .

Pada struktur sub model ammonia, massa NH_4 dan NH_3 dibuat sebagai 'stock'. Massa NH_4 dipengaruhi oleh beban NH_4 masuk dari Total Ammonia, nitrifikasi, dan beban NH_4 yang keluar waduk. Massa NH_3 dipengaruhi oleh beban NH_3 masuk dari Total Ammonia, beban NH_3 Sungai Metro, beban NH_3 Waduk Sengguruh, dan beban NH_3 yang keluar Waduk Sutami. NH_3 merupakan ammonia dalam bentuk *un-ionized* dan berbahaya bagi ikan. Konsentrasi NH_3 akan digunakan untuk proses validasi output model dengan data aktual.

Nitrifikasi merupakan oksidasi ion ammonium (NH_4) melalui dua tahap, pertama dikonversi menjadi nitrit (NO_2) oleh bakteri Nitrosomonas. Kedua, nitrit dikonversi menjadi nitrat (NO_3) oleh bakteri Nitrobacter. Proses ini diwakili oleh persamaan reaksi (2.5). Oksigen yang dikonsumsi untuk oksidasi ion ammonium menjadi nitrit sebanyak $3,43 \text{ gO gN}^{-1}$, dan oksidasi nitrit menjadi nitrat membutuhkan $1,14 \text{ gO gN}^{-1}$. Sehingga kebutuhan oksigen

untuk nitrifikasi sebanyak $4,57 \text{ gO gN}^{-1}$ (Chapra, 1997). Kebutuhan oksigen ini kemudian dikali dengan konsentrasi NH_4 dan laju nitrifikasi sesuai pada persamaan (3.15) untuk mendapatkan total kebutuhan oksigen pada proses nitrifikasi.

7. Sub Model Fosfat

Sub model fosfat dibangun dengan mempertimbangkan siklus fosfor di perairan. Beban fosfor dari sub model permukiman, pertanian, dan perikanan merupakan total fosfor (TP). Total fosfor di air berada dalam bentuk fosfat, dan terdiri dari orthofosfat, fosfat organik, dan polifosfat. Orthofosfat merupakan bentuk yang dapat digunakan sebagai nutrient bagi fitoplankton. Keberadaan orthofosfat dalam perairan dengan pH 7 – 11 yaitu kurang dari 30% total fosfor (TP) (Chapman, 1996). Sehingga pada struktur model ini diasumsikan 10% beban TP dari permukiman, pertanian, dan KJA menjadi aliran masuk orthofosfat.

Orthofosfat (PO_4) dibuat sebagai '*stock*' dalam struktur sub model fosfat. Massa PO_4 dipengaruhi oleh beban PO_4 masuk dari total fosfat, beban PO_4 Sungai Metro, beban PO_4 Waduk Sengguruh, dan beban PO_4 yang keluar Waduk Sutami. PO_4 dapat digunakan untuk menghitung chlorophyll a (Chl a) menggunakan persamaan (3.16). Konsentrasi Chl a dapat merepresentasikan banyaknya biomassa fitoplankton (A) dengan dikalikan perbandingan C:Chl a (α). Rasio C:Chl a yaitu $10 - 50 \mu\text{g Chl mgC}^{-1}$.

8. Sub Model DO

Struktur sub model DO dibangun dengan pertimbangan proses-proses yang menambah dan mengurangi oksigen terlarut. Proses reaerasi dan fotosintesis menambah oksigen terlarut di perairan. Proses dekomposisi, nitrifikasi, respirasi dan kebutuhan oksigen sedimen waduk mengurangi ketersediaan oksigen terlarut. Massa oksigen terlarut dibuat sebagai '*stock*' dalam struktur sub model DO. Massa DO dipengaruhi oleh beban oksigen masuk dari Sungai Metro dan Waduk Sengguruh, reaerasi, fotosintesis, dekomposisi BOD, dekomposisi COD, nitrifikasi, dan respirasi, dan beban oksigen yang keluar Waduk Sutami.

Model kualitas air telah dibahas pada penelitian Kaur dkk. (2007), dimana kesetimbangan massa DO dipengaruhi oleh proses langsung (reaerasi) dan proses lain seperti oksidasi/dekomposisi, fotosintesis, respirasi, dan nitrifikasi. Reaerasi di perairan waduk dapat dipengaruhi oleh titik jenuh DO perairan (DO saturasi). DO saturasi pada struktur model ini dihitung berdasarkan suhu perairan dengan persamaan (3.21). Nilai suhu perairan merupakan rata-rata suhu hasil pengukuran data sekunder selama satu tahun, yaitu 26,3 °C. Berdasarkan perhitungan, konsentrasi DO saturasi yaitu 8,08 mg/L. Pada struktur model ini, nilai DO saturasi dikalikan dengan nilai volume perairan waduk sehingga memiliki satuan milligram (mg) karena nilai DO pada model merupakan massa oksigen terlarut dengan satuan milligram (mg).

Fotosintesis dan respirasi dalam struktur model ini dipengaruhi oleh biomassa dan laju pertumbuhan fitoplankton dengan fungsi nutrisi ortofosfat. Pada struktur model ini fosfat menjadi nutrisi yang diperhitungkan dalam laju pertumbuhan fitoplankton karena menjadi faktor pembatas di sebagian besar perairan tawar dan keberadaannya yang relatif sedikit dibandingkan banyaknya organisme yang membutuhkannya (Green dkk., 2015). Proses dekomposisi material organik yang membutuhkan oksigen terlarut diwakili oleh BOD *decay* dan COD *decay* pada struktur model ini. Konversi ammonium ion (NH₄) menjadi nitrat juga membutuhkan oksigen terlarut pada proses nitrifikasi.

5.2.2 Formulasi Model

Model pengendalian kualitas air Waduk Sutami dibangun berdasarkan sumber beban polutan yang masuk ke perairan waduk. Formulasi model ini menggunakan persamaan matematis umum perhitungan potensi beban pencemar dan dinamika DO. Perhitungan potensi beban pencemar dilakukan pada kegiatan permukiman, pertanian, dan perikanan keramba jaring apung (KJA). Persamaan matematis dinamika DO digunakan pada sub model kualitas BOD, COD, Ammonia, Fosfat, dan DO. Pada program dinamis, unit satuan yang dimasukkan ke model harus disesuaikan dengan variabel-variabelnya. Hasil formulasi terhadap model pengendalian kualitas air Waduk Sutami dapat dilihat pada Tabel 5.2. Formulasi model lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran III.

Tabel 5.2 Formulasi model dalam program dinamis

No.	Variabel	Formulasi	Unit
1	PBP BOD permukiman	Jumlah penduduk x FE BOD permukiman x REK x RRC	kg/bulan
2	PBP COD permukiman	Jumlah penduduk x FE COD permukiman x REK x RRC	kg/bulan
3	PBP TN permukiman	Jumlah penduduk x FE TN permukiman x REK x RRC	kg/bulan
4	PBP TP permukiman	Jumlah penduduk x FE TP permukiman x REK x RRC	kg/bulan
5	PBP BOD pertanian	Luas lahan pertanian x FE BOD pertanian x Lama panen x 0.1	kg/bulan
6	PBP COD pertanian	Luas lahan pertanian x FE COD pertanian x Lama panen x 0.1	kg/bulan
7	PBP TN pertanian	Luas lahan pertanian x FE N pertanian x Lama panen x 0.1	kg/bulan
8	PBP TN pertanian	Luas lahan pertanian x FE P pertanian x Lama panen x 0.1	kg/bulan
9	PBP BOD KJA	Jumlah pakan ikan sebagai limbah x Fr BOD pakan ikan	kg/bulan
10	PBP COD KJA	Jumlah pakan ikan sebagai limbah x Fr COD pakan ikan	kg/bulan
11	PBP TN KJA	Jumlah pakan ikan sebagai limbah x Fr N pakan ikan	kg/bulan
12	PBP TP KJA	Jumlah pakan ikan sebagai limbah x Fr P pakan ikan	kg/bulan
13	BOD	Aliran BOD masuk – Aliran BOD keluar – BOD <i>decay</i> – BOD sedimentasi	mg
14	COD	Aliran COD masuk – Aliran COD keluar – COD <i>decay</i> – COD sedimentasi	mg
15	NH ₃	Aliran NH ₃ masuk – Aliran NH ₃ keluar	mg
16	NH ₄	Aliran NH ₄ masuk – Aliran NH ₄ keluar – Nitrifikasi	mg
	PO ₄	Aliran PO ₄ masuk – Aliran PO ₄ keluar – Fotosintesis – Respirasi	mg
	DO	DO masuk + Reaerasi + Reoksigenasi – DO keluar – Deoksigenasi – SOD	mg

Pada program dinamis, parameter BOD, COD, NH₄, PO₄, dan DO dibuat sebagai 'stock'. 'Stock' dianggap sebagai akumulasi dalam sistem yang meningkat karena ada 'flow' masuk dan menurun akibat 'flow' keluar. Unit satuan dari 'flow'

adalah massa per waktu, dalam penelitian ini adalah milligram per bulan (mg/bulan). Pada struktur sub model BOD, COD, ammonia, fosfat, dan DO terdapat variabel ‘konversi’ yang merupakan peubah satuan kilogram (kg) menjadi miligram (mg). Konversi ini diperlukan untuk mengubah satuan dari potensi beban pencemar permukiman, pertanian, dan KJA yang masuk ke perairan Waduk Sutami. Hasil simulasi massa BOD, COD, NH₃, PO₄, dan DO dari model sistem memiliki satuan milligram (mg), sehingga untuk mengetahui nilai konsentrasinya perlu dibagi dengan volume perairan waduk dalam satuan liter (L).

5.2.3 Hasil Validasi Model

Validasi output model dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi model yang dibuat. Validasi ini berguna untuk membangun kepercayaan terhadap model sebagai alat bantu dalam menganalisis skenario kebijakan.

1. Sub Model Permukiman

Jumlah penduduk awal simulasi sebesar 152.561 jiwa yang didapat dari pengolahan data tahun 2014. Laju pertumbuhan penduduk dipengaruhi oleh variabel fraksi pertumbuhan penduduk. Fraksi pertumbuhan penduduk sebesar 0,122% yang didapat dari rata-rata persentase pertumbuhan penduduk sekitar Waduk Sutami pada rentang tahun 2014 – 2017. Validasi dilakukan terhadap ‘*stock*’ yaitu jumlah penduduk. Perbandingan hasil simulasi jumlah penduduk sekitar Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Perbandingan simulasi jumlah penduduk dengan data aktual

Tahun	Jumlah Penduduk (jiwa)		% Simpangan
	Simulasi	Aktual	
2016	154.811	155.476	0,43
2017	157.093	159.178	1,31
MAPE (%)			0,87

Sumber: Pengolahan data (2018)

Nilai MAPE dari hasil perbandingan data simulasi dengan data aktual jumlah penduduk di sekitar Waduk Sutami sebesar 0,87%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa akurasi sub model permukiman yang dibuat sangat tepat. Simulasi jumlah penduduk sekitar Waduk Sutami yang tepat akan mempengaruhi hasil simulasi potensi beban pencemaran dari kegiatan penduduk. Jumlah penduduk

dengan aktifitasnya merupakan peubah yang berpengaruh dalam peningkatan beban pencemaran. Uji validitas sub model permukiman juga dilakukan pada penelitian Iriadi (2015), dimana MAPE dari model penduduk sebesar 0,88%. Walukow (2009) juga menguji validitas model penduduk, dengan hasil MAPE sebesar 1,01%.

2. Sub Model Pertanian

Luas lahan sawah 10.495 ha, ladang 4.481 ha, dan kebun 6.638 ha di tahun 2014. Luas lahan pertanian di awal simulasi sebesar 21.614 ha yang merupakan jumlah dari luas lahan sawah, ladang, dan kebun. Luas lahan tersebut tidak berubah hingga tahun 2017. Fraksi perubahan luas lahan yaitu 0%. Validasi dilakukan terhadap ‘*stock*’ yaitu luas lahan pertanian. Perbandingan hasil simulasi luas lahan pertanian sekitar Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Perbandingan simulasi luas lahan pertanian dengan data aktual

Tahun	Luas Lahan Pertanian (ha)		% Simpangan
	Simulasi	Aktual	
2016	21.614	21.614	0
2017	21.614	21.614	0
MAPE (%)			0

Sumber: Pengolahan data (2018)

Luas lahan pertanian di kecamatan-kecamatan sekitar Waduk Sutami tidak ada perubahan dapat disebabkan oleh adanya beberapa peraturan daerah. Pada Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Malang terdapat kebijakan mengenai kawasan pertanian, dimana luasan lahan sawah secara keseluruhan tidak boleh berkurang. Selain itu, lahan pangan berkelanjutan tidak boleh dialih fungsi untuk peruntukan lain (Pemerintah Kabupaten Malang, 2010).

3. Sub Model Keramba Jaring Apung (KJA)

Luas lahan Keramba Jaring Apung (KJA) awal simulasi yaitu 241 ha pada tahun 2014. Fraksi perubahan luas KJA sebesar -0,629% yang didapat dari rata-rata persentase penurunan luas KJA di Waduk Sutami pada rentang tahun 2014 – 2017. Validasi dilakukan terhadap peubah ‘*stock*’ yaitu luas KJA. Perbandingan hasil

simulasi luas KJA di Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Perbandingan simulasi luas KJA dengan data aktual

Tahun	Luas KJA (ha)		% Simpangan
	Simulasi	Aktual	
2016	177,66	191,64	7,3
2017	164,71	173	4,8
MAPE (%)			6,0

Sumber: Pengolahan data (2018)

4. Sub Model BOD

Validasi dilakukan terhadap data aktual konsentrasi BOD Waduk Sutami tahun 2016 – 2017. Perbandingan hasil simulasi BOD Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Gambar 5.1. Data lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran IV. Hasil simulasi sub model BOD menunjukkan konsentrasi BOD pada rentang 2,81 mg/L – 6,87 mg/L. Sedangkan data aktual konsentrasi BOD pada rentang 3,00 mg/L – 6,6 mg/L. Berdasarkan hasil perhitungan, sub model BOD memiliki MAPE 8,6%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model ini tepat dengan sistem di dunia nyata.

5. Sub Model COD

Validasi terhadap sub model COD Waduk Sutami dilakukan dengan membandingkan data aktual pada data tahun 2016 – 2017. Perbandingan hasil simulasi COD Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Gambar 5.1. Data lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran IV. Hasil simulasi sub model COD menunjukkan konsentrasi COD pada rentang 11,11 mg/L – 20,93 mg/L. Sedangkan data aktual konsentrasi COD pada rentang 12,02 mg/L – 21,23 mg/L. Berdasarkan hasil perhitungan, sub model COD memiliki MAPE 8,6%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model ini tepat dengan sistem di dunia nyata.

6. Sub Model Ammonia

Validasi terhadap sub model ammonia dilakukan dengan membandingkan simulasi NH₃ dengan data NH₃ Waduk Sutami pada tahun 2016 – 2017. Data hasil

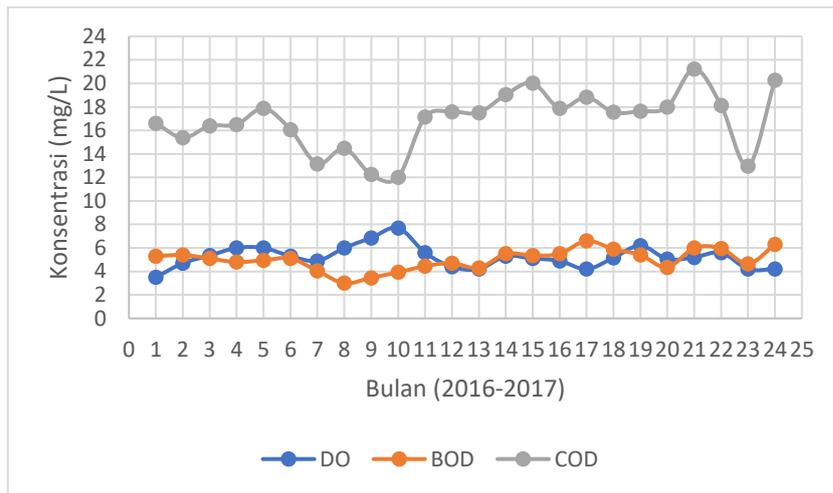
simulasi NH_3 Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Lampiran IV. Hasil simulasi sub model ammonia menunjukkan konsentrasi NH_3 pada rentang 0,119 mg/L – 0,161 mg/L. Sedangkan data aktual konsentrasi NH_3 pada rentang 0,011 mg/L – 0,238 mg/L. Berdasarkan hasil perhitungan, sub model NH_4 memiliki RMSE 0,06. Nilai RMSE yang kecil menunjukkan prediksi model yang semakin baik. Nilai RMSE digunakan pada sub model ammonia karena data bernilai kecil, sehingga pengukuran ketepatan model tidak cocok menggunakan MAPE.

7. Sub Model Fosfat

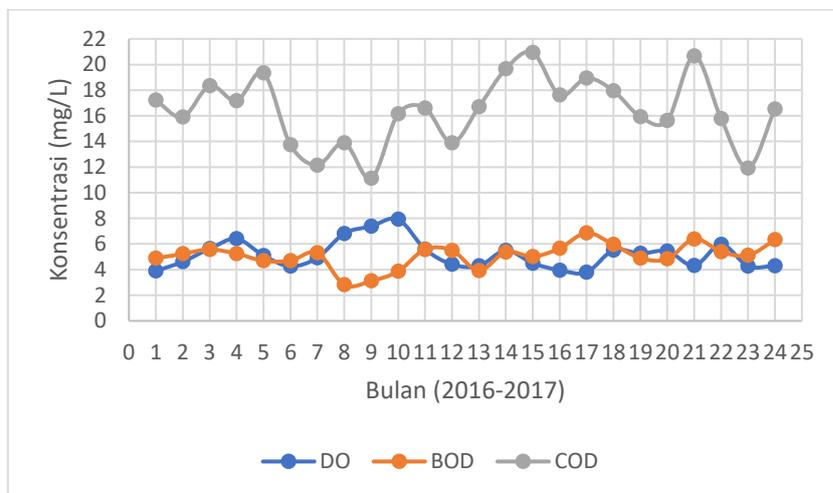
Validasi terhadap sub model fosfat dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi PO_4 dengan data aktual konsentrasi PO_4 Waduk Sutami tahun 2016 – 2017. Data hasil simulasi PO_4 Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Lampiran IV. Hasil simulasi sub model fosfat menunjukkan konsentrasi PO_4 pada rentang 0,010 mg/L – 0,166 mg/L. Sedangkan data aktual konsentrasi PO_4 pada rentang 0,009 mg/L – 0,149 mg/L. Berdasarkan hasil perhitungan, sub model PO_4 memiliki RMSE 0,05. Nilai RMSE yang kecil menunjukkan prediksi model yang semakin baik. Nilai RMSE juga digunakan pada sub model fosfat karena data bernilai kecil, sehingga pengukuran ketepatan model tidak cocok menggunakan MAPE.

8. Sub Model DO

Validasi terhadap sub model DO Waduk Sutami dilakukan dengan membandingkan data aktual pada data tahun 2016 – 2017. Perbandingan hasil simulasi DO Waduk Sutami dengan data aktual dapat dilihat pada Gambar 5.1. Data lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran IV. Hasil simulasi sub model DO menunjukkan konsentrasi DO pada rentang 3,79 mg/L – 7,92 mg/L. Sedangkan data aktual konsentrasi DO pada rentang 3,5 mg/L – 7,7 mg/L. Berdasarkan hasil perhitungan, sub model DO memiliki MAPE 7,9%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model ini tepat dengan sistem di dunia nyata.



(a)



(b)

Gambar 5.1 Perbandingan output model dan data aktual; (a) data aktual; (b) hasil simulasi

5.2.4 Hasil Kalibrasi model

Proses validasi output model melibatkan proses kalibrasi terhadap konstanta-konstanta yang ada pada struktur model. Kalibrasi dibutuhkan untuk membuat output model mendekati kondisi di dunia nyata dan memperkecil error output model. Kalibrasi dilakukan bersamaan dengan proses validasi. Konstanta dalam model yang telah dikalibrasi dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Laju reaerasi dilakukan kalibrasi untuk proses validasi output sub DO, dan didapatkan nilai $1,1382 \text{ hari}^{-1}$. Laju nitrifikasi hasil kalibrasi model yaitu $0,05 \text{ hari}^{-1}$. Nilai ini masih dalam rentang laju nitrifikasi ($0,005 - 0,54 \text{ hari}^{-1}$) (Prasad dkk.,

2014). Laju fotosintesis yang didapat dari hasil kalibrasi yaitu 4,2 hari⁻¹, nilai ini masih dalam rentang 2,7 – 4,2 hari⁻¹ (Chapra, 1997). Laju respirasi 0,2 hari⁻¹ masih dalam rentang 0,065 – 0,6 hari⁻¹ (Mwegoha, 2010). Konstanta *half-saturation* PO₄ masih dalam rentang 1 – 5 µg P/L (Chapra, 1997). Rasio C:Chl a dengan nilai 50 µg Chl mgC⁻¹ masih dalam rentang 10 – 50 µg Chl mgC⁻¹ (Chapra, 1997).

Tabel 5.6 Kontanta terkalibrasi

Konstanta	Keterangan	Nilai
K1	Laju reaerasi	1,1382 hari ⁻¹
K2	Laju nitrifikasi	0,05 hari ⁻¹
K3	Laju fotosintesis	4,2 hari ⁻¹
K4	Laju respirasi	0,2 hari ⁻¹
Kp	Konstanta <i>half-saturation</i> PO ₄	4,6 µg P/L
µ max	Laju pertumbuhan fitoplankton maksimum	3 hari ⁻¹
C:Chl a	Rasio C:Chl a	50 µg Chl mgC ⁻¹

Sumber: Pengolahan data (2018)

5.2.5 Hasil Uji Sensitivitas

Uji sensitivitas model merupakan uji yang dilakukan untuk mengetahui besar pengaruh suatu variabel secara signifikan terhadap output model. Output model yang digunakan sebagai pembanding yaitu output sub model DO. Variabel yang diuji sensitivitasnya adalah variabel eksogen yang merupakan variabel dengan nilai yang tidak bergantung atau terpengaruh variabel lain dalam suatu sistem. Variabel exogenous dalam model sistem pengendalian kualitas air waduk ini antara lain fraksi pertumbuhan penduduk, fraksi perubahan luas KJA, fraksi koefisien transfer beban (RRC), dan fraksi pakan ikan sebagai limbah. Nilai-nilai fraksi tersebut diubah -50% dan +50% lalu hasil output DO dibandingkan dengan output DO tanpa perubahan fraksi. Fraksi koefisien transfer beban (RRC) perubahan nilainya mengikuti nilai yang menjadi pilihan pada perhitungan potensi beban, 100% dan 30% beban terbuang ke perairan.

Besar pengaruh dari variabel terhadap output model dapat diketahui melalui perhitungan regresi linear. Perhitungan ini menggunakan program SPSS dan output perhitungan dapat dilihat pada Lampiran V. Berdasarkan uji sensitivitas, maka variabel eksogen yang paling besar pengaruhnya sampai yang paling kecil pengaruhnya dapat dilihat pada Tabel 5.7.

Penentuan variabel yang berpengaruh dapat dilihat berdasarkan nilai signifikansi. Apabila nilai signifikansi lebih kecil dari probabilitas 0,05 maka ada pengaruh perubahan variabel exogenous terhadap output sub model DO, dan sebaliknya. Variabel fraksi pakan ikan sebagai limbah, fraksi perubahan penduduk, fraksi perubahan luas KJA, dan koefisien transfer beban (RRC) memiliki pengaruh terhadap kinerja model. Variabel fraksi pakan ikan sebagai limbah menjadi variabel exogenous yang paling berpengaruh terhadap struktur model. Variabel koefisien transfer beban (RRC) menjadi variabel yang paling kecil pengaruhnya dibanding ketiga variabel lainnya. Variabel yang telah diurutkan berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap perilaku model dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam pembuatan skenario.

Tabel 5.7 Peringkat signifikansi variabel eksogen terhadap output model

Peringkat	Variabel	Signifikansi
1	Fraksi pakan ikan sebagai limbah	0,001
2	Fraksi perubahan penduduk	0,003
3	Fraksi perubahan luas KJA	0,010
4	Koefisien transfer beban (RRC)	0,033

Sumber: Pengolahan data (2018)

5.3 Simulasi Skenario

Simulasi skenario dilakukan terhadap kemungkinan-kemungkinan yang terjadi di masa yang akan datang. Kondisi yang mungkin terjadi bisa sesuai dengan kondisi sekarang atau ada perubahan. Variabel yang diubah pada simulasi dapat dilihat pada Tabel 5.8. Variabel-variabel yang dilakukan intervensi adalah variabel yang berpengaruh terhadap sistem berdasarkan uji sensitivitas, antara lain:

1. Pakan ikan sebagai limbah :
 - Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah akibat sisa pakan maupun berupa feses ikan sebesar 82% (Prabasari dkk., 2017)
 - Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah berkurang 50% menjadi 41%.
2. Laju perubahan penduduk :
 - Laju perubahan penduduk 1,463% per tahun yang didapat dari perhitungan perubahan

jumlah penduduk sekitar Waduk Sutami dari tahun 2014 – 2017.

- Laju perubahan penduduk 0,86% per tahun mengikuti perubahan penduduk Kabupaten Malang (BPS Kabupaten Malang, 2017).
3. Luas lahan KJA : • Luas KJA berkurang sebesar 22,83% per tahun hingga mencapai luas 15 ha (1% dari luas perairan waduk)
- Luas lahan KJA berkurang sebesar 7,56% per tahun yang didapat dari perhitungan perubahan luas KJA dari tahun 2014 – 2017
4. Transfer beban limbah domestik : • Beban limbah domestik yang masuk ke waduk diasumsikan 30% karena adanya IPAL (KLHK, 2016)
- Beban limbah domestik yang masuk ke waduk diasumsikan 85% karena tidak adanya IPAL (KLHK, 2016)

Tabel 5.8 Variabel peubah dalam simulasi skenario

No.	Variabel	Kondisi di masa yang akan datang	
1	Pakan ikan sebagai limbah	1A	1B
		82% 0,82	41%
2	Laju perubahan penduduk	2A	2B
		Laju perubahan penduduk 0,86% per tahun	Laju perubahan penduduk 1,463% per tahun
3	Luas lahan KJA	3A	3B
		Laju perubahan luas KJA -22,83% per tahun	Laju perubahan luas KJA -7,56% per tahun
4	Transfer beban limbah domestik	4A	4B
		Beban limbah domestik 30% mengalir ke waduk	Beban limbah domestik 85% mengalir ke waduk

Berdasarkan Tabel 5.8, kemungkinan kondisi di masa yang akan datang dapat menghasilkan beberapa skenario. Skenario-skenario yang terbentuk merupakan kombinasi-kombinasi dari kemungkinan kondisi variabel peubah di masa yang akan datang. Kombinasi kondisi variabel peubah yang membentuk skenario dapat dilihat pada Tabel 5.9.

Tabel 5.9 Skenario dan kombinasi kondisi variabel

No.	Kombinasi	No.	Kombinasi
1	1A – 2A – 3A – 4A	7	1B – 2B – 3B – 4B
2	1B – 2A – 3A – 4A	8	1A – 2B – 3B – 4B
3	1A – 2B – 3A – 4A	9	1B – 2A – 3B – 4B
4	1A – 2A – 3B – 4A	10	1B – 2B – 3A – 4B
5	1A – 2A – 3A – 4B	11	1B – 2B – 3B – 4A
6	1A – 2A – 3B – 4B	12	1B – 2B – 3A – 4A

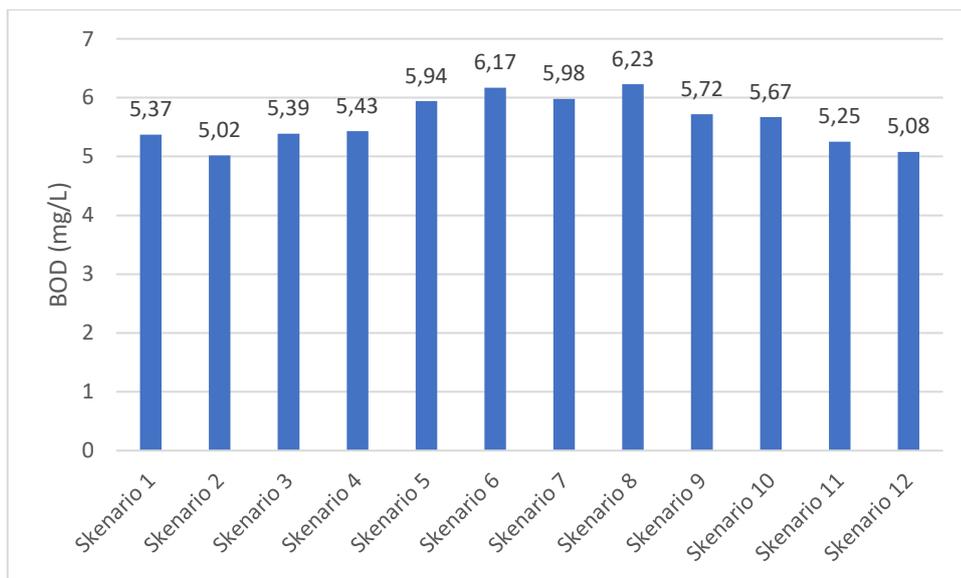
1. Skenario 1 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 82%; Laju perubahan penduduk sebesar 0,86% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 22,83% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 30%.
2. Skenario 2 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 41%; Laju perubahan penduduk sebesar 0,86% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 22,83% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 30%.
3. Skenario 3 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 82%; Laju perubahan penduduk sebesar 1,463% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 22,83% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 30%.
4. Skenario 4 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 82%; Laju perubahan penduduk sebesar 0,86% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 7,56% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 30%.

5. Skenario 5 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 82%; Laju perubahan penduduk sebesar 0,86% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 22,83% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 85%.
6. Skenario 6 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 82%; Laju perubahan penduduk sebesar 0,86% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 7,56% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 85%.
7. Skenario 7 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 41%; Laju perubahan penduduk sebesar 1,463% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 7,56% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 85%.
8. Skenario 8 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 82%; Laju perubahan penduduk sebesar 1,463% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 7,56% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 85%.
9. Skenario 9 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 41%; Laju perubahan penduduk sebesar 0,86% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 7,56% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 85%.
10. Skenario 10 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 41%; Laju perubahan penduduk sebesar 1,463% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 22,83% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 85%.
11. Skenario 11 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 41%; Laju perubahan penduduk sebesar 1,463% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 7,56% per tahun;

Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 30%.

12. Skenario 12 : Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah sebesar 41%; Laju perubahan penduduk sebesar 1,463% per tahun; Luas lahan KJA berkurang hingga 22,83% per tahun; Beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 30%.

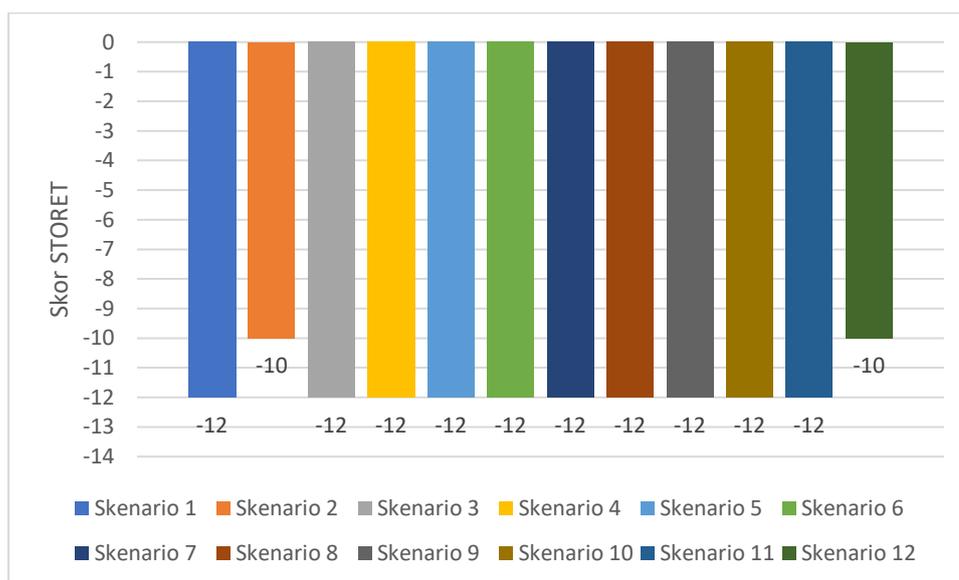
Skenario 1 sampai 12 dilakukan simulasi dan diidentifikasi output dari model. Simulasi skenario dilakukan hingga 2022. Penerapan masing-masing skenario menghasilkan simulasi kualitas air yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan beban polutan yang masuk ke perairan Waduk Sutami dipengaruhi oleh kondisi variabel pada skenario. Rata-rata BOD perairan Waduk Sutami terkecil terjadi pada simulasi skenario 2, yaitu 5,02 mg/L. Rata-rata BOD simulasi terbesar yaitu 6,23 mg/L yang terjadi pada skenario 8. Grafik BOD masing-masing skenario dapat dilihat pada Gambar 5.2. Data simulasi selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran VI.



Gambar 5.2 Nilai BOD perairan Waduk Sutami dari simulasi skenario

Pada akhir tahun simulasi, output model masing-masing skenario dilakukan identifikasi kualitas air waduk dengan perhitungan STORET. Baku mutu yang

digunakan adalah air kelas II berdasarkan Peraturan Daerah Provinsi Jawa Timur Nomor 2 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air di Provinsi Jawa Timur. Status mutu kualitas air Waduk Sutami berdasarkan perhitungan sebelumnya adalah tercemar sedang. Hasil perhitungan identifikasi kualitas air waduk untuk simulasi skenario 1 sampai 12 dapat dilihat pada Lampiran VII. Perbandingan kualitas air dari masing-masing skenario dapat dilihat pada Gambar 5.3.

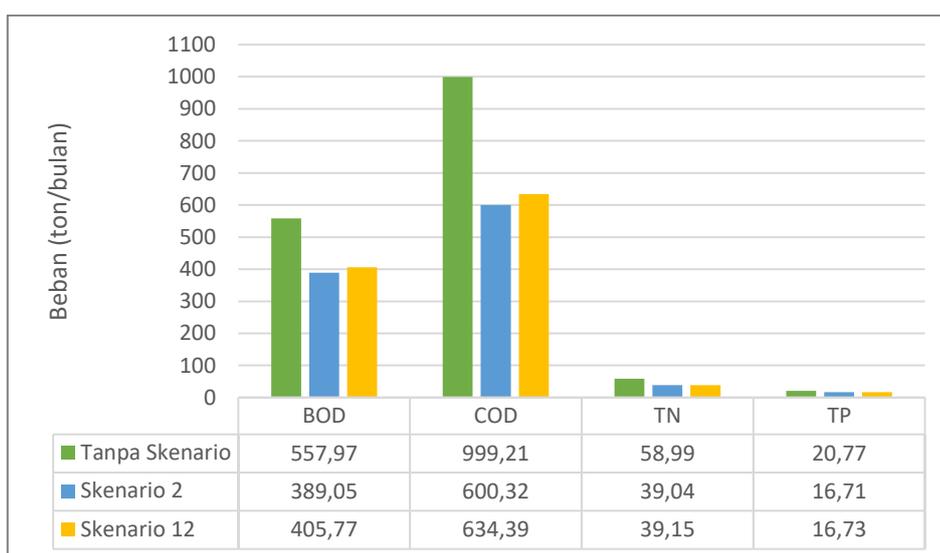


Gambar 5.3 Skor STORET Waduk Sutami berdasarkan simulasi skenario

Nilai skor STORET untuk kategori kelas B adalah (-1) – (-10), kelas C adalah (-11) – (-30), dan kelas D \geq (-31). Status mutu kualitas perairan Waduk Sutami pada identifikasi tanpa skenario yaitu masuk kategori kelas C atau tercemar sedang. Pada simulasi skenario 1 hingga 12, skenario yang menghasilkan peningkatan status mutu kualitas air Waduk Sutami yaitu skenario 2 dan 12. Status mutu perairan Waduk Sutami pada simulasi skenario 2 dan 12 yaitu masuk kategori kelas B atau tercemar ringan. Parameter yang menyebabkan mutu air tercemar ringan yaitu BOD dengan skor (-10). Peningkatan kualitas air waduk berdasarkan simulasi skenario 2 dan 12 tersebut dapat disebabkan adanya penurunan beban pencemaran yang masuk ke perairan. Beban pencemaran yang dihasilkan dari

simulasi skenario 2 dan 12 jika dibandingkan dengan simulasi tanpa skenario dapat dilihat pada Gambar 5.4.

Berdasarkan Gambar 5.4, simulasi di masa yang akan datang menunjukkan beban polutan yang masuk ke perairan Waduk Sutami untuk BOD mencapai 557,97 ton/bulan, COD mencapai 999,21 ton/bulan, TN mencapai 58,99 ton/bulan, dan TP mencapai 20,77 ton/bulan jika tidak ada skenario yang diterapkan terhadap variabel-variabel yang mempengaruhi sistem. Penurunan beban polutan masuk ke perairan Waduk Sutami dapat terjadi dengan penerapan skenario. Pada skenario 2, polutan yang masuk ke perairan Waduk Sutami mengalami penurunan untuk BOD mencapai 389,05 ton/bulan, COD mencapai 600,32 ton/bulan, TN mencapai 39,04 ton/bulan, dan TP mencapai 16,71 ton/bulan. Pada skenario 12, polutan yang masuk ke perairan Waduk Sutami mengalami penurunan untuk BOD mencapai 405,77 ton/bulan, COD mencapai 634,39 ton/bulan, TN mencapai 39,15 ton/bulan, dan TP mencapai 16,73 ton/bulan.



Gambar 5.4 Perbandingan beban pencemaran di Waduk Sutami untuk simulasi tanpa skenario dan dengan skenario terbaik

5.4 Alternatif Strategi

5.4.1 Strategi Berdasarkan Simulasi Skenario pada Model

Simulasi model di masa yang akan datang dengan penerapan skenario 2 dan 12 mampu meningkatkan kualitas perairan Waduk Sutami. Penerapan kondisi-

kondisi pada skenario tersebut memerlukan beberapa upaya, sehingga kondisi di masa yang akan datang dapat terbentuk seperti pada simulasi model. Variabel yang dijadikan faktor dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami antara lain pakan ikan sebagai limbah, laju pertumbuhan penduduk, laju perubahan luas lahan KJA, dan transfer beban limbah domestik ke perairan waduk.

Pada kegiatan budidaya perikanan KJA, pakan ikan yang terbuang sebagai limbah menjadi variabel yang mempengaruhi sistem. Hal ini karena kandungan nutrisi pada pakan ikan menyumbang beban nitrogen dan fosfat ke perairan. Pakan ikan yang terbuang sebagai limbah dapat mencapai 82% dari banyaknya pakan yang diberikan. Simulasi skenario pada model menunjukkan perlu adanya penurunan fraksi pakan sebagai limbah menjadi 41%. Upaya yang dapat dilakukan untuk mendapatkan kondisi tersebut yaitu dengan pemasangan *double net* pada jaring apung. Pemasangan *double net* ini mampu mereduksi limbah pakan ikan hingga 50% dari total pakan yang diberikan (Prabasari dkk., 2017).

Kondisi laju pertumbuhan penduduk perlu dipertahankan sebesar 1,463% per tahun ataupun diturunkan menjadi 0,86% per tahun. Akan tetapi upaya yang diperlukan untuk mencapai kondisi ini tergantung pada program pemerintah pusat, sehingga pada penelitian dilakukan upaya dengan mengolah limbah domestik dari kegiatan penduduk. Laju pertumbuhan penduduk juga menjadi faktor dalam pengendalian kualitas air di Danau Sentani, Papua (Walukow, 2009).

Kondisi lain yang perlu diterapkan pada budidaya perikanan KJA yaitu penurunan luas lahan KJA sebesar 22,83% per tahun. Hal ini dilakukan dengan penetapan aturan pembatasan luas lahan KJA sebesar 1% dari luas perairan waduk (Walukow, 2009). Luas perairan Waduk Sutami \pm 1500 ha, oleh sebab itu batasan maksimal luas lahan KJA dari kebijakan tersebut adalah 15 ha. Penurunan KJA berkontribusi terhadap penurunan pencemaran seperti yang dijelaskan pada simulasi model Danau Sentani, Papua, dimana penurunan luas KJA sebanyak 10% menyumbang penurunan polutan sekitar 23% (Walukow, 2009).

Transfer beban limbah domestik ke perairan waduk dapat berkurang dengan adanya pengolahan air limbah. Kondisi yang diharapkan yaitu beban limbah domestik yang masuk ke waduk sebesar 30%. Upaya yang perlu dilakukan adalah pengolahan air limbah domestik melalui pembangunan instalasi pengolahan air

limbah (IPAL) komunal di permukiman dengan efisiensi minimal 70%. Perancangan skenario optimistik dengan pembangunan IPAL juga dilakukan pada penelitian Iriadi (2015). Pembangunan IPAL komunal pada permukiman sekitar Danau Laut Tawar, Kabupaten Aceh Tengah mampu mereduksi beban pencemaran sebanyak 75% (Iriadi, 2015).

Penerapan strategi-strategi di atas dapat memperbaiki kualitas air Waduk Sutami. Kualitas air yang dimaksud adalah DO, BOD, COD, NH₃, dan PO₄. Simulasi model hingga akhir tahun simulasi menunjukkan kualitas air dengan rata-rata DO 5,71 mg/L – 5,75 mg/L, BOD 5,02 mg/L – 5,08 mg/L, 12,67 mg/L – 12,99 mg/L, NH₃ 0,098 mg/L – 0,099 mg/L, dan PO₄ 0,099 mg/L. Status mutu kualitas air Waduk Sutami juga mengalami peningkatan yang awalnya masuk kategori tercemar sedang menjadi tercemar ringan.

5.4.2 Strategi Berdasarkan Analisa Kelembagaan

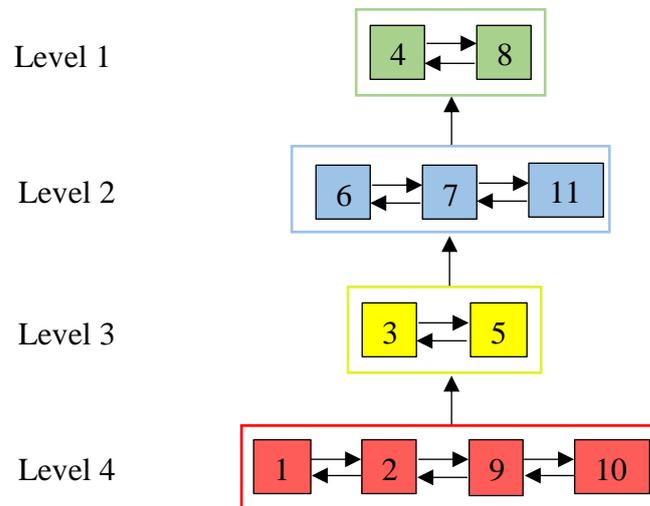
Kelembagaan dapat berarti bentuk atau wadah atau organisasi, bahkan kelembagaan merupakan sistem yang kompleks, rumit, dan abstrak (Walukow dkk., 2008). Oleh sebab itu perlu dianalisis mengenai lembaga yang terlibat dalam pengembangan model pengendalian kualitas air Waduk Sutami. Metode *Interpretative Structural Modelling* (ISM) dapat digunakan untuk menganalisis kapasitas lembaga pemerintah yang terlibat dalam mengatasi suatu permasalahan. Metode tersebut juga dapat digunakan untuk menganalisis mekanisme koordinasi antar Lembaga yang terlibat (Walukow dkk., 2008).

Pada metode ISM diperlukan pendapat pakar di bidang lembaga pengelola. Waduk Sutami sendiri dikelola oleh Perusahaan Umum Jasa Tirta 1 (PJT 1), sehingga kuesioner dilakukan kepada PJT 1 yang membidangi pengawasan kualitas air dan pengelolaan waduk. Elemen lembaga yang terlibat dalam pengembangan model dijabarkan menjadi 12 sub elemen seperti terlihat pada Tabel 5.10. Struktur hierarki disajikan dalam Gambar 5.5 dan pada Gambar 5.6 sub elemen dikelompokkan kedalam empat sektor yakni *autonomous*, *dependent*, *linkage* dan *independent*. Identifikasi dengan ISM lebih lengkap dapat dilihat pada Lampiran VIII.

Tabel 5.10 Lembaga yang terlibat dalam pengelolaan Waduk Sutami

No.	Sub Elemen Lembaga
1.	Dinas Lingkungan Hidup
2.	Dinas Perikanan
3.	Dinas Perindustrian dan Perdagangan
4.	Dinas Pekerjaan Umum Sumber Daya Air
5.	Dinas Tanaman Pangan, Hortikultura, dan Perkebunan
6.	Dinas Pariwisata dan Kebudayaan
7.	Dinas Peternakan dan Kesehatan Hewan
8.	Dinas Pengendalian Penduduk dan Keluarga Berencana
9.	BBWS Brantas
10.	Kelompok petani ikan keramba jaring apung
11.	Kelompok petani sawah

Berdasarkan Gambar 5.5, elemen kunci pada hasil analisis ISM ini yaitu pada level 4. Hasil analisis ini menggambarkan bahwa Lembaga yang berperan dan menjadi elemen kunci dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami antara lain Dinas Lingkungan Hidup (1), Dinas Perikanan (2), BBWS Brantas (9), dan Kelompok petani ikan keramba jaring apung (10). Lembaga-lembaga tersebut menjadi penggerak utama dalam koordinasi dengan PJT 1 untuk pengendalian kualitas air Waduk Sutami.

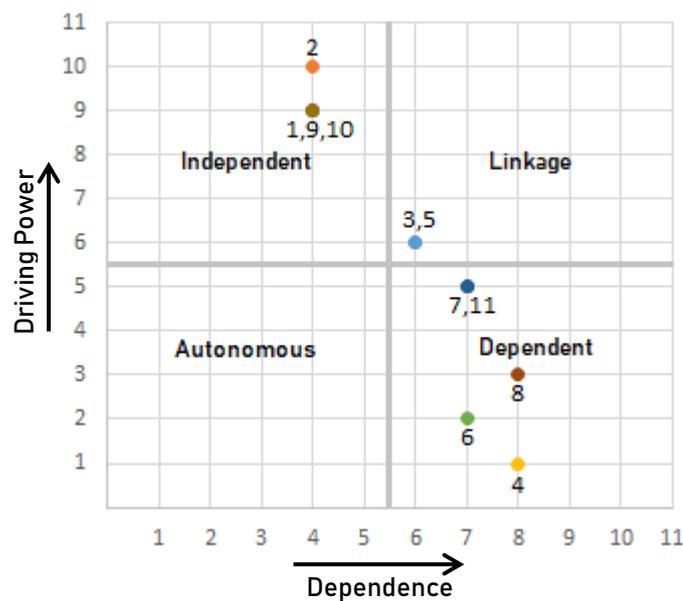


Gambar 5.5 Diagram hierarki dari sub elemen Lembaga

Sub elemen jika dikelompokkan berdasarkan Driver Power (DP) dan Dependance (D) dapat dilihat pada Gambar 5.6. Berdasarkan nilai Driver Power

dan Dependence, sub elemen dapat dikelompokkan ke dalam 4 sektor. Sub elemen yang masuk kedalam sektor *Dependent* adalah Dinas Pekerjaan Umum Sumber Daya Air (4), Dinas Pariwisata dan Kebudayaan (6), Dinas Peternakan dan Kesehatan Hewan (7), Dinas Pengendalian Penduduk dan Keluarga Berencana (8), dan Kelompok petani sawah (11). Hal ini memberikan makna bahwa sub elemen sektor dependent ini sangat tergantung pada sistem dan tidak mempunyai kekuatan penggerak yang besar (kekuatan penggeraknya lemah) atau kelima sub elemen tersebut merupakan variabel tak bebas yang akan dipengaruhi sub elemen lainnya dalam sistem.

Sub elemen Dinas Perindustrian dan Perdagangan (3) dan Dinas Tanaman Pangan, Hortikultura, dan Perkebunan (5) berada di sektor *Linkage*, yang berarti sub elemen sektor ini harus dikaji secara hati – hati dalam megkaji tolok ukur keberhasilan dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami karena akan memberikan dampak terhadap lainnya dan umpan balik pengaruhnya bisa memperbesar dampak tersebut.



Gambar 5.6 Digraph ISM

Sub elemen Dinas Lingkungan Hidup (1), Dinas Perikanan (2), BBWS Brantas (9), dan Kelompok petani ikan keramba jaring apung (10) berada pada

sektor *Independent*, dimana sub elemen ini memiliki kekuatan penggerak yang besar dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami. Sehingga dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami sangat penting untuk melakukan koordinasi dengan sub elemen dalam sektor ini.

Dalam upaya pengendalian kualitas air, diperlukan persiapan dari aspek kelembagaan, karena kelembagaan ini memiliki wewenang dalam aspek pengaturan dan kebijakan. Sistem pengelolaan air di masa mendatang, disamping menyangkut masalah-masalah fisik dan pembiayaan, juga masalah kelembagaan termasuk didalamnya peraturan, personil (SDM), dan peralatan serta pelatihan, akan semakin berperan. Oleh sebab itu antispasi yang disiapkan untuk menanggulangi permasalahan penurunan kualitas air adalah meningkatkan keterpaduan pengelolaan sumberdaya air melalui koordinasi nyata antar lembaga yang terlibat dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi model sistem dinamis perubahan kualitas air Waduk Sutami dapat disusun dari sub model sumber pencemar dan sub model kualitas air. Sub model sumber pencemar yaitu sub model permukiman, pertanian, dan perikanan KJA, sedangkan sub model kualitas air yaitu sub model DO, BOD, COD, ammonia, dan fosfat.
2. Strategi pengendalian kualitas air Waduk Sutami antara lain pemasangan *double net* pada KJA, pembatasan total luas lahan KJA di waduk maksimal 15 ha, pembangunan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) komunal di permukiman sebelum masuk ke perairan, serta mengikutsertakan Dinas Lingkungan Hidup, Dinas Perikanan, BBWS Brantas, dan Kelompok petani ikan KJA dalam program pengendalian kualitas air Waduk Sutami.

6.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan penelitian ini yaitu:

1. Simulasi sub model ammonia dan fosfat perlu ditinjau lebih lanjut untuk meningkatkan validasi model.
2. Perlu dilakukan simulasi model proses nitrifikasi, respirasi, dan fotosintesis yang lebih kompleks.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Amanah, S.N. (2011), *Distribusi Oksigen Terlarut Secara Vertikal Pada Lokasi Karamba Jaring Apung di Danau Lido, Bogor, Jawa Barat*, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Malang. (2017), *Kecamatan Sumberpucung dalam Angka 2017*, BPS, Malang.
- Chapman, D. (1996), *Water Quality Assessments – A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring – Second Edition*, Great Britain at the University Press, Cambridge.
- Chapra, S.C. (1997), *Surface Water-Quality Modelling*, McGraw-Hill Companies, Inc, Singapore.
- Dangerfield, B. (2014), “Systems Thinking and System Dynamics: A Primer”, ResearchGate, hal. 1-24.
- Davis, M.L. dan Cornwell, D.A. (1991), *Introduction to Environmental Engineering, Second edition*, Mc-Graw-Hill Inc, New York.
- Davis, M.L. dan Masten, S.J. (2004), *Principles of Environmental Engineering and Science*, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Environmental Protection Agency. (2001), *Parameters of Water Quality*, EPA, Irlandia.
- Eriyatno. (1999), “Ilmu Sistem Meningkatkan Mutu dan Efektivitas Manajemen”, IPB Press, Bogor.
- Forum Danau Indonesia. (2004), *Visi Danau Dunia*, Forum Danau Indonesia, Jakarta.
- Green, W.R., Robertson, D.M., dan Wilde, F.D. (2015), *Lakes and Reservoirs: Guidelines for Study Design and Sampling*, Geological Survey, Virginia.
- Guneralp, B. dan Barlas, Y. (2003), “Dynamic Modelling of a Shallow Freshwater Lake for Ecological and Economic Sustainability”, *Ecological Modelling*, 167, hal. 115-138.
- Gurung, R.P. (2007), *Modelling of Eutrophication in Roxo Reservoir, Alentejo, Portugal - A System Dynamic Based Approach*, Tesis Msc, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.

- Hairston Jr, N.G. dan Fussmann G.F. (2002), "Lake Ecosystems", *Encyclopedia of Life Sciences*, Macmillan Publishers Ltd, hal. 1-3.
- Horne, A.J dan Goldman, C.R. (1994), *Limnology Chapter 1: Understanding Lake Ecology*, 2nd Edition, McGraw-Hill Co., New York, USA.
- Iriadi, R. (2015), *Model Pengendalian Pencemaran Perairan Danau Laut Tawar di Kabupaten Aceh Tengah*, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Irianto, E.W., Triweko, R.W., dan Yudianto, D. (2010), "Pengembangan Kriteria Status Mutu Ekosistem Danau Sebagai Bagian dari Indikator Pengelolaan Terpadu Wilayah Sungai", *Jurnal Teknik Hidraulik*, Vol. 1, No. 1, hal. 27-42.
- Juantari, G.Y., Sayekti, R.W., dan Harisuseno, D. (2013), "Status Trofik dan Daya Tampung Beban Pencemaran Waduk Sutami", *Jurnal Teknik Pengairan*, Vol. 4, No. 1, hal. 61-66.
- Kaur, J., Jalgama, G., Atkinson, J.F., DePinto, J.V., Nemura, A.D. (2007), "Modeling Dissolved Oxygen in a Dredged Lake Erie Tributary", *Journal Great Lakes Res.*, 33, hal. 62-82.
- Kusumawardhani, A. (2017), *Analisis Biaya dan Manfaat Kelembagaan Pengelolaan Waduk Cirata Provinsi Jawa Barat*, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2009), *Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 28 Tahun 2009 Tentang Daya Tampung Beban Pencemaran Air Danau dan/atau Waduk*, Kementerian Lingkungan Hidup, Jakarta.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2016), *Potensi Beban Pencemar*. Workshop handout: Inventarisasi dan Identifikasi Sumber Pencemar.
- Konikow, L.F. dan Kendy, E. (2005), "Groundwater Depletion: A Global Problem", *Hydrogeology Journal*, 13, hal. 317-320.
- Kunc, M. (2016), "System Dynamics: A Behavioral Modeling Method", *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, hal. 53-64.
- Li, Y., Liu, Y., Zhao, L., Hastings, A., dan Guo, H. (2015). "Exploring Change of Internal Nutrients Cycling in A Shallow Lake: A Dynamic Nutrient Driven Phytoplankton Model", *Ecological Modelling*, 313, hal. 137-148.
- Mwegoha, W.J.S., Kaseva, M.E., dan Sabai, S.M.M. (2010), "Mathematical Modeling of Dissolved Oxygen in Fish Ponds", *Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 4, No. 9, hal. 625-638.

- Ostrom E, Gardner, R, dan Walker, J. (1994), *Rules, Games, and Common-Pool Resources*. The University of Michigan Press, USA.
- Pemerintah Kabupaten Malang. (2017), *Laporan Informasi Kinerja Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah Kabupaten Malang Tahun 2016*, Pemerintah Kabupaten Malang, Malang.
- Prabasari, I.G., Syarifuddin, H. dan Muhammad, D. (2017), “Modelling of Phosphate Enrichment and Trophic Status of Sipin Lake Jambi Using TSI Carlson Method”, *MATEC Web of Conferences*, 101, hal. 1-6.
- Prasad, B.S.R.V., Srinivasu, P.D.N., Varma, P.S., Raman, A.V., dan Ray, S. (2014), “Dynamics of Dissolved Oxygen in relation to Saturation and Health of an Aquatic Body: A Case for Chilka Lagoon, India”, *Journal of Ecosystems*, hal. 1-17.
- Pujiastuti, P. (2014), *Persepsi Masyarakat Terhadap Pengendalian Pencemaran Perairan Waduk Gajah Mungkur Wonogiri*.
- Pruyt, E. (2013), *Small System Dynamics Models for Big Issues: Triple Jump towards Real-World Complexity*, TU Delft Library, Delft, The Netherlands.
- Salim, H. (2002), “Beban Pencemaran Limbah Domestik dan Pertanian di DAS Citarum Hulu”, *Jurnal Teknologi Lingkungan*. Vol. 3, No. 2, hal. 107-111.
- Schmid, A.A. (2004). *Conflict and Cooperation: Institutional and Behavioral Economics*, Blackwall, Malden.
- Setyowati, Rr.D.N. (2016), *Studi Literatur Pengaruh Penggunaan Lahan Terhadap Kualitas Air*, *Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik – Sistem*, Vol. 12, No. 1, hal. 7-15.
- Shiflet, A.B. dan Shiflet, G.W. (2011), *Sistem Dynamics Tool: Vensim PLE Tutorial 1*, Princeton University Press, Wofford College.
- Sterman, J.D. (2000), *System Dynamics: Sytem Thinking and Modeling for A Complex World*, Massachusetts Institute of Technologies, USA.
- Rezagama, A. dan Tamlikha, A. (2016), *Identifikasi Pencemar Waduk Manggar Kota Balikpapan*, *Jurnal Pengembangan Kota*, Vol. 4, No. 1, hal. 40-48.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L, dan Stensel, H.D. (2003), *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse Fourth edition*, McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Templeton, M. dan Butler, D. (2011) *An Introduction to Wastewater Treatment*, Ventus Publishing ApS.

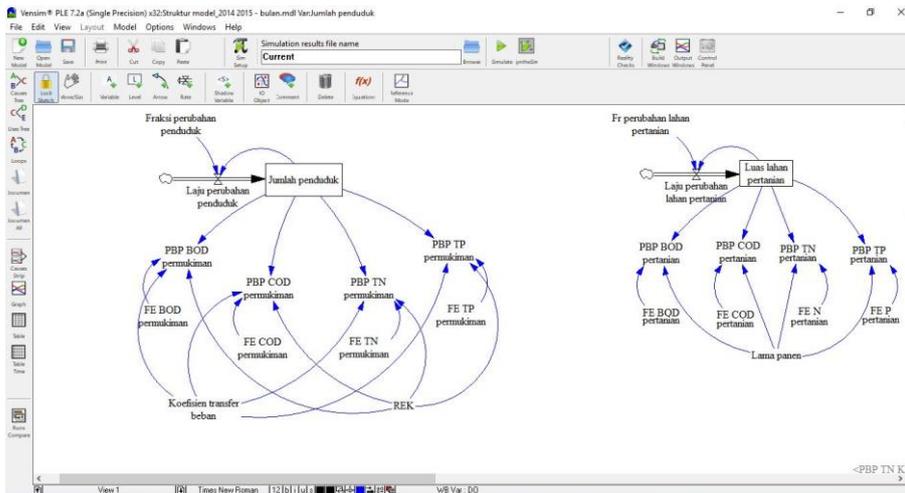
- United States-Environmental Protection Agency. (1980), *Mathematical Models of Water Quality in Large Lakes, Part 2. Lake Erie*. EPA-600/3-80-065, EPA, Duluth.
- United States-Environmental Protection Agency. (1983), *Technical Guidance Manual for Performing Waste Load Allocations, Book IV: Lake, Reservoirs, and Impoundment – Chapter 2: Eutrophication*. EPA-440/4-84-019, EPA, Washington, D.C.
- Venkiteswaran, J.J., Wassenaar, L.I., dan Schiff, S.L. (2007), “Dynamics of Dissolved Oxygen Isotopic Ratios: A Transient Model to Quantify Primary Production, Community Respiration, and Air–Water Exchange in Aquatic Ecosystems”, *Oecologia*, 153, hal. 385-398.
- Vigil, K.M. (2003), *Clean Water: An Introduction to Water Quality and Water Pollution Control, Second Edition*, Oregon State University Press, USA.
- Wei-Bing, G., Lai-Ah, W., dan Dong-Feng, X. (2001), “Modeling Nitrogen and Phosphorus Cycles and Dissolved Oxygen in The Pearl River (Zhujiang) Estuary”, *Research Gate*.
- World Health Organization. (1993), *Rapid Assesment of Sources of Air, Water and Land Polution*. WHO, Geneva.
- Walukow, A.F., Djokosetiyanto, D., Kholil, dan Soedarma D. (2008), Analisis Strategi Pengelolaan dan Peran Lembaga dalam Rangka Konservasi Danau Sentani, *Media Konservasi*, Vol. 13, No. 1., hal. 21-31.
- Walukow, A.F. (2009), *Rekayasa Model Pengelolaan Danau Terpadu Berwawasan Lingkungan Studi Kasus di Danau Sentani*, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Walukow, A.F. (2011), Dampak Pertumbuhan Penduduk Terhadap Beban Sumber Pencemar di Danau Sentani dengan Model Sistem Dinamik Berwawasan Lingkungan, *Jurnal Purifikasi*, Vol. 12, No.2, hal. 63-74.
- Wibowo, A. P. (2011). Pengembangan Kelembagaan Lokal. Manajemen Studio dan Klinik. Jakarta.
- Xu, Z. dan Xu, Y.J. (2016), “A Deterministic Model for Predicting Hourly Dissolved Oxygen Change: Development and Application to a Shallow Eutrophic Lake”, *Journal Water*, Vol. 8, No. 41, hal. 1-15.

Lampiran I Identifikasi kualitas air Waduk Sutami tahun 2017

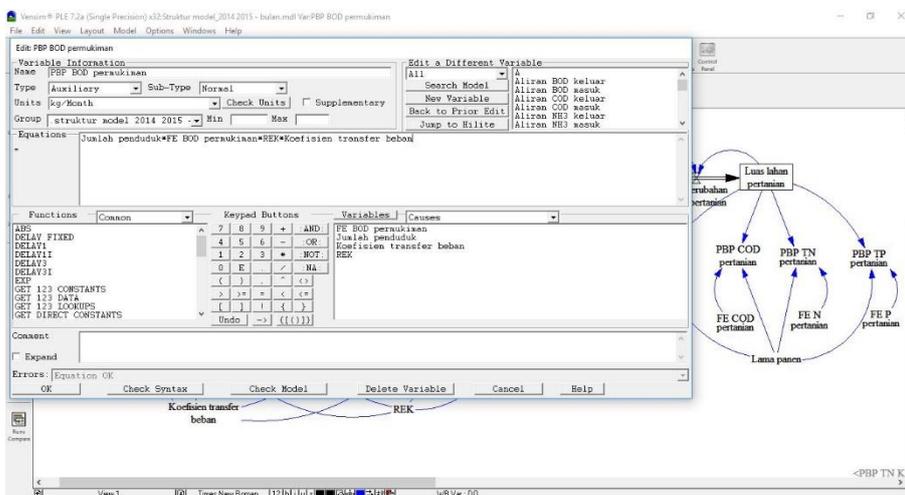
Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran II Running progam Vensim PLE

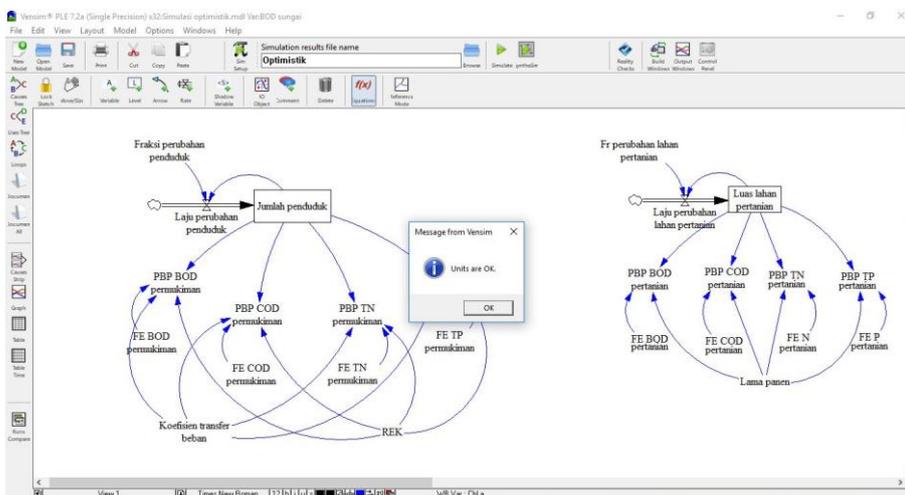
1. Pembuatan struktur model



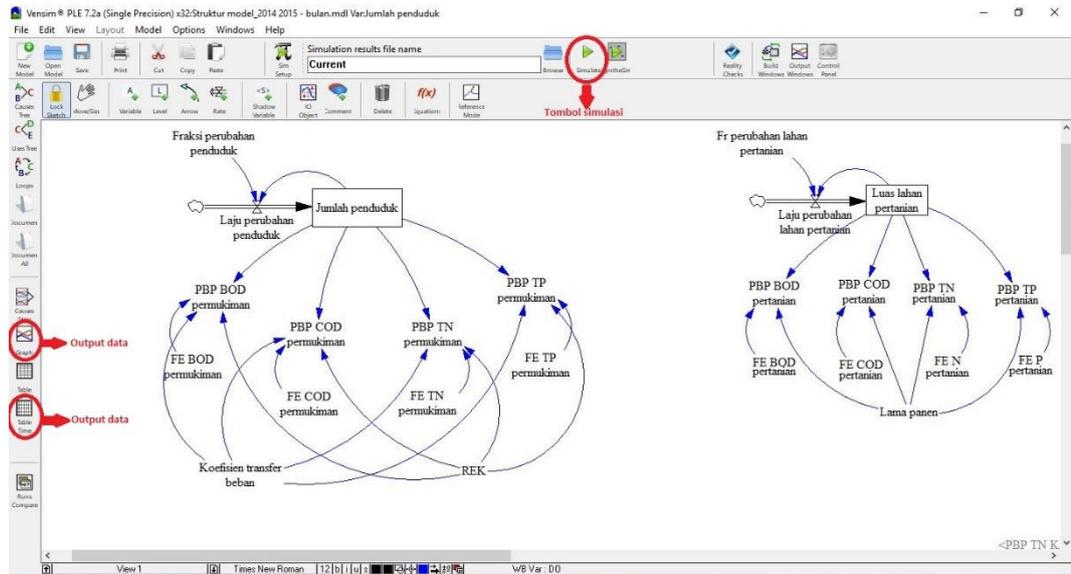
2. Input formulasi



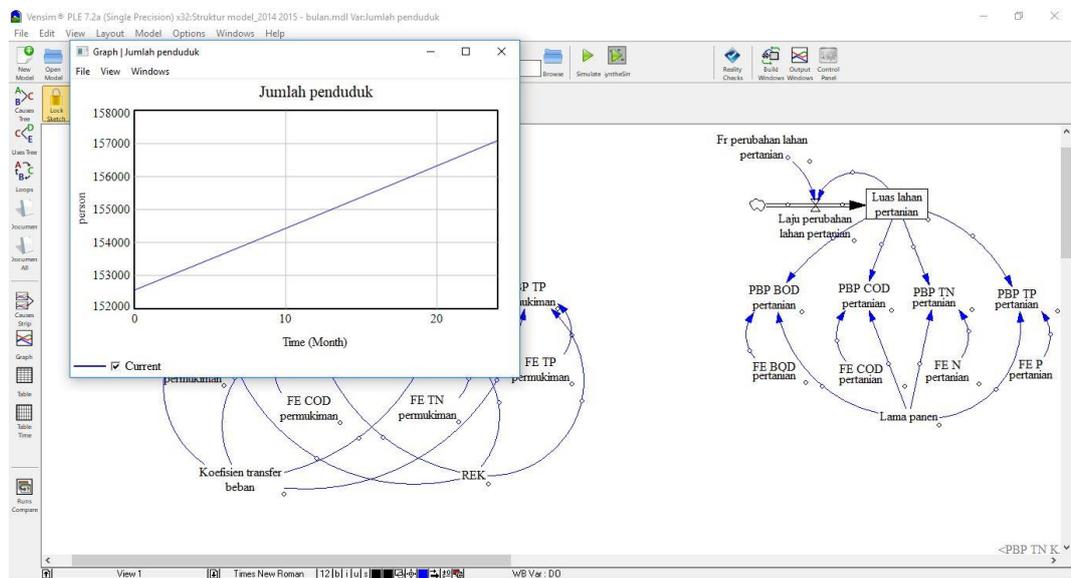
3. Verifikasi model



4. Proses simulasi



5. Output data



Lampiran III Dokumen input formulasi model dalam program Vensim

- (001) $A = \text{Chl } a * \alpha$
Units: mg
- (002) Aliran BOD keluar = $(\text{BOD} * \text{Q3}) / V$
Units: mg/Month
- (003) Aliran BOD masuk = $(\text{BP BOD} * \text{konversi}) + (\text{BOD Metro} * \text{Q1}) + (\text{BOD Sengguruh} * \text{Q2})$
Units: mg/Month
- (004) Aliran COD keluar = $(\text{COD} * \text{Q3}) / V$
Units: mg/Month
- (005) Aliran COD masuk = $(\text{BP COD} * \text{konversi}) + (\text{COD Metro} * \text{Q1}) + (\text{COD Sengguruh} * \text{Q2})$
Units: mg/Month
- (006) Aliran NH3 keluar = $(\text{NH3} * \text{Q3}) / V$
Units: mg/Month
- (007) Aliran NH3 masuk = $((0.01 * \text{Total Ammonia}) * \text{konversi}) + (\text{NH3 Metro} * \text{Q1}) + (\text{NH3 Sengguruh} * \text{Q2})$
Units: mg/Month
- (008) Aliran NH4 keluar = $\text{NH4} * (\text{Q3} / V)$
Units: mg/Month
- (009) Aliran NH4 masuk = $(0.99 * \text{Total Ammonia}) * \text{konversi}$
Units: mg/Month
- (010) "Aliran PO4-P keluar" = $\text{PO4-P} * (\text{Q3} / V)$
Units: mg/Month
- (011) "Aliran PO4-P masuk" = $(\text{TPO4-P} * \text{konversi}) + (\text{PO4 Metro} * \text{Q1}) + (\text{PO4 Sengguruh} * \text{Q2})$
Units: mg/Month
- (012) $\text{BOD} = \text{INTEG} (\text{Aliran BOD masuk} - \text{Aliran BOD keluar} - \text{BOD decay} - \text{BOD sed}, 0)$
Units: mg
- (013) $\text{BOD decay} = \text{BOD} * \text{kd}$
Units: mg/Month
- (014) $\text{BOD Metro} = \text{WITH LOOKUP} (\text{BOD sungai}, [(0,0)-(48,20)], (0,0), (1,14.05), (2,11), (3,14.7), (4,9.05), (5,5.25), (6,4.35), (7,4.5), (8,7.2), (9,12.9), (10,15.1), (11,5.25), (12,8.6), (13,5.7), (14,11.1), (15,5.05), (16,8.85), (17,17.2), (18,6.7), (19,5.87), (20,9.75), (21,11.25), (22,17.45), (23,12.45), (24,14.25), (25,14.3), (26,8.85), (27,5), (28,6.85), (29,11.15), (30,11.9), (31,13), (32,12.35), (33,17.6), (34,3.85), (35,4.35), (36,15.95), (37,6.25), (38,9.15), (39,5.7), (40,13.35), (41,12.9), (42,13.2), (43,4.5), (44,7.95), (45,12.9), (46,9.3), (47,8.75), (48,8.05))$
Units: mg/L
- (015) $\text{BOD sed} = \text{BOD} * \text{kset}$
Units: mg/Month
- (016) $\text{BOD Sengguruh} = \text{WITH LOOKUP} (\text{BOD waduk Sengguruh}, [(0,0)-(48,10)], (0,0), (1,6.35), (2,3.4), (3,5.6), (4,3.05), (5,4), (6,2.6), (7,4.35), (8,4.4), (9,4.06), (10,3.67), (11,5.75), (12,3.1), (13,6.35), (14,3.4), (15,3), (16,5.9), (17,3.05), (18,5.55), (19,3.65), (20,4.55), (21,3), (22,3.1), (23,4.15), (24,5.25), (25,6.4), (26,7.5), (27,9.05), (28,4.7), (29,5.75), (30,3.5), (31,4.05), (32,4.25), (33,3.6), (34,5.45), (35,3.75), (36,4.55),$

(37,5.5),(38,4.7),(39,8.35),(40,4.55),(41,6.3),(42,6.3),(43,5.3),(44,6.45),(45,6.75),(46,4.75),(47,5.45),(48,6.08))

Units: mg/L

(017) BP BOD=PBP BOD permukiman+PBP BOD pertanian+PBP BOD KJA

Units: kg/Month

(018) BP COD=PBP COD permukiman+PBP COD pertanian+PBP COD KJA

Units: kg/Month

(019) Chl a= 2.06*("PO4-P"^0.378)

Units: mg

(020) COD= INTEG (Aliran COD masuk-Aliran COD keluar-COD decay-COD sed,0)

Units: mg

(021) COD decay=COD*kd COD

Units: mg/Month

(024) COD Metro = WITH LOOKUP (COD sungai,([(0,0)-(48,70)],(0,0),(1,33.86),(2,40.66),(3,33.62),(4,11.69),(5,61.32),(6,46.29),(7,25.66),(8,28.02),(9,22),(10,37.68),(11,51.78),(12,17.53),(13,33.68),(14,25.52),(15,31.62),(16,20.78),(17,42.3),(18,38.9),(19,24.05),(20,35.58),(21,34.08),(22,60.06),(23,19.88),(24,46.54),(25,43.2),(26,45.89),(27,38.74),(28,19.48),(29,38.18),(30,8.33),(31,22.13),(32,55.55),(33,63.31),(34,7.53),(35,44.74),(36,18.07),(37,49.57),(38,43.61),(39,16.11),(40,46.67),(41,36.59),(42,54.11),(43,17.85),(44,33.53),(45,36.59),(46,33.1),(47,22.37),(48,18.98)))

Units: mg/L

(025) COD sed=COD*kset COD

Units: mg/Month

(026) COD Sengguruh = WITH LOOKUP (COD waduk Sengguruh,([(0,0)-(48,40)],(0,0),(1,13.53),(2,7.54),(3,10.47),(4,8.18),(5,9.21),(6,6.71),(7,10.12),(8,8.5),(9,9.83),(10,8.2),(11,12.65),(12,9.89),(13,14.68),(14,9.65),(15,10.88),(16,26.4),(17,10.02),(18,11.68),(19,17.54),(20,14.87),(21,23.49),(22,12.5),(23,11),(24,21.74),(25,12.64),(26,17.46),(27,21.38),(28,12.6),(29,14.02),(30,10.61),(31,12.67),(32,13.82),(33,11.25),(34,22.11),(35,6.2),(36,16.45),(37,24.21),(38,13.54),(39,30.62),(40,22.1),(41,27.66),(42,21.44),(43,17),(44,29.63),(45,30.28),(46,16.9),(47,17.65),(48,19.02))

Units: mg/L

(027) Deoksigenasi=BOD decay+COD decay+Nitrifikasi+Respirasi

Units: mg/Month

(028) DO= INTEG (DO masuk+Reaerasi+Reoksigenasi-Deoksigenasi-DO keluar-SOD,0)

Units: mg

(029) DO keluar=(DO*Q3)/V

Units: mg/Month

(030) DO masuk=(DO Metro*Q1)+(DO Sengguruh*Q2)

Units: mg/Month

(031) DO Metro = WITH LOOKUP (DO sungai,([(0,0)-(48,10)],(0,0),(1,3.4),(2,6.8),(3,3.1),(4,3.3),(5,6.5),(6,6.2),(7,6),(8,3.5),(9,4.9),(10,6.3),(11,4.2),(12,3.6),(13,3.1),(14,5.4),(15,4.6),(16,6.4),(17,5.5),(18,3.3),(19,5.9),(20,6),(21,5.6),(22,6.7),(23,3.7),(24,4.1),(25,4.2),(26,2.9),(27,4.1),(28,5.5),(29,5.9),

(30,3),(31,4.8),(32,3.1),(33,6.1),(34,2.8),(35,5.6),(36,5.4),(37,3),(38,3.2),(39,4.6),(40,3.9),(41,3.7),(42,5.1),(43,4.7),(44,3.4),(45,3.7),(46,4.7),(47,4.8),(48,3.2))

Units: mg/L

(032) DO Sengguruh = WITH LOOKUP (DO waduk Sengguruh, ([[0,0)-(48,10)],(0,0),(1,6.2),(2,5.3),(3,6.6),(4,6.5),(5,5.5),(6,5.9),(7,6.2),(8,5.6),(9,3.2),(10,4.4),(11,5),(12,3.7),(13,8.2),(14,7.3),(15,6.4),(16,5.4),(17,8.9),(18,7.1),(19,6.8),(20,2.1),(21,2.3),(22,7.1),(23,6.5),(24,2.6),(25,3.4),(26,4.8),(27,5.4),(28,6.1),(29,3),(30,5.3),(31,2.8),(32,3.9),(33,3.2),(34,6.3),(35,4.3),(36,4.3),(37,2.5),(38,4.3),(39,5.2),(40,4.1),(41,5.9),(42,4.6),(43,3.5),(44,4.8),(45,3.6),(46,3.7),(47,7),(48,5.5))

Units: mg/L

(033) DO_{sat}=1.09473e+12

Units: mg

(034) FE BOD permukiman=1.2

Units: kg/(person*Month)

(035) FE BOD pertanian=35.526

Units: kg/(Month*ha)

(036) FE COD permukiman=1.65

Units: kg/(Month*person)

(037) FE COD pertanian=53.289

Units: kg/(Month*ha)

(038) FE N pertanian=3.159

Units: kg/(ha*Month)

(039) FE P pertanian=1.578

Units: kg/(ha*Month)

(040) FE TN permukiman=0.0585

Units: kg/(Month*person)

(041) FE TP permukiman=0.0063

Units: kg/(Month*person)

(042) FINAL TIME = 24

Units: Month

The final time for the simulation.

(043) Fotosintesis=K₃*A*μ

Units: mg/Month

(044) Fr BOD pakan ikan=0.0966

Units: Dmnl

(045) Fr COD pakan ikan=0.1449

Units: Dmnl

(046) Fr N pakan ikan=0.0486

Units: Dmnl

(047) Fr P pakan ikan=0.012

Units: Dmnl

(048) Fr perubahan lahan pertanian=0

Units: 1/Month

(049) Fr perubahan luas KJA=-0.0063

Units: 1/Month

(050) Fraksi pakan ikan sebagai limbah=0.82

Units: Dmnl

(051) Fraksi perubahan penduduk=0.00122

- Units: 1/Month
- (052) INITIAL TIME = 0
Units: Month
The initial time for the simulation.
- (053) Jumlah pakan ikan=Luas KJA*Kebutuhan pakan
Units: kg/Month
- (054) Jumlah pakan ikan sebagai limbah=Jumlah pakan ikan*Fraksi pakan ikan sebagai limbah
Units: kg/Month
- (055) Jumlah penduduk= INTEG (Laju perubahan penduduk,152561)
Units: person
- (056) Kebutuhan pakan=2339.1
Units: kg/(ha*Month)
- (057) Koefisien transfer beban=0.85
Units: Dmnl
- (058) konversi=1e+06
Units: mg/kg
- (059) Kp=4.87552e+08
Units: mg
- (060) Laju perubahan lahan pertanian=Fr perubahan lahan pertanian*Luas lahan pertanian
Units: ha/Month
- (061) Laju perubahan luas KJA=Luas KJA*Fr perubahan luas KJA
Units: ha/Month
- (062) Laju perubahan penduduk=Fraksi perubahan penduduk*Jumlah penduduk
Units: person/Month
- (063) Lama panen=6.33
Units: Month
- (064) Luas KJA= INTEG (Laju perubahan luas KJA,191.64)
Units: ha
- (065) Luas lahan pertanian= INTEG (Laju perubahan lahan pertanian,15598)
Units: ha
- (066) NH3= INTEG (Aliran NH3 masuk-Aliran NH3 keluar,0)
Units: mg
- (067) NH3 Metro = WITH LOOKUP (NH3 sungai,([(0,0)-(48,10)],(0,0),(1,0.029),(2,0.193),(3,0.181),(4,0.165),(5,0.116),(6,0.139),(7,0.217),(8,0.044),(9,0.234),(10,0.308),(11,0.164),(12,0.377),(13,0.124),(14,0.35),(15,0.41),(16,0.38),(17,0.152),(18,0.196),(19,0.382),(20,0.233),(21,0.388),(22,0.42),(23,0.191),(24,0.097),(25,0.141),(26,0.384),(27,0.209),(28,0.446),(29,0.392),(30,0.101),(31,0.082),(32,0.438),(33,0.02),(34,0.162),(35,0.304),(36,0.381),(37,0.265),(38,0.116),(39,0.048),(40,0.229),(41,0.452),(42,0.036),(43,0.11),(44,0.021),(45,0.452),(46,0.288),(47,0.024),(48,0.16)))
Units: mg/L
- (068) NH3 Sengguruh = WITH LOOKUP (NH3 waduk Sengguruh,([(0,0)-(48,10)],(0,0),(1,0.046),(2,0.05),(3,0.026),(4,0.168),(5,0.05),(6,0.686),(7,0.276),(8,0.058),(9,0.147),(10,5.4e-08),(11,0.172),(12,0.181),(13,0.19),(14,0.815),(15,0.413),(16,0.011),(17,0.013),(18,0.029),(19,0.032),(20,0.009),(21,0.174),(22,0.339),(23,0.087),(24,0.066),(25,0.0

59),(26,0.051),(27,0.044),(28,0.041),(29,0.032),(30,0.058),(31,0.068),(32,0.15),(33,0.201),(34,0.059),(35,0.052),(36,0.044),(37,0.037),(38,0.004),(39,0.155),(40,0.245),(41,0.097),(42,0.112),(43,0.098),(44,0.156),(45,0.125),(46,0.107),(47,0.093),(48,0.068))

Units: mg/L

(069) $NH_4 = INTEG$ (Aliran NH_4 masuk-Aliran NH_4 keluar-Nitrifikasi,0)

Units: mg

(070) $Nitrifikasi = NH_4 * 4.57 * K_2$

Units: mg/Month

(071) $PBP_{BOD\ KJA} = \text{Jumlah pakan ikan sebagai limbah} * Fr_{BOD\ pakan\ ikan}$

Units: kg/Month

(072) $PBP_{BOD\ permukiman} = \text{Jumlah penduduk} * FE_{BOD\ permukiman} * REK * \text{Koefisien transfer beban}$

Units: kg/Month

(073) $PBP_{BOD\ pertanian} = \text{Luas lahan pertanian} * FE_{BOD\ pertanian} * 0.1 * \text{Lama panen}$

Units: kg/Month

(074) $PBP_{COD\ KJA} = \text{Jumlah pakan ikan sebagai limbah} * Fr_{COD\ pakan\ ikan}$

Units: kg/Month

(075) $PBP_{COD\ permukiman} = \text{Jumlah penduduk} * FE_{COD\ permukiman} * REK * \text{Koefisien transfer beban}$

Units: kg/Month

(076) $PBP_{COD\ pertanian} = \text{Luas lahan pertanian} * FE_{COD\ pertanian} * 0.1 * \text{Lama panen}$

Units: kg/Month

(077) $PBP_{TN\ KJA} = \text{Jumlah pakan ikan sebagai limbah} * Fr_{N\ pakan\ ikan}$

Units: kg/Month

(078) $PBP_{TN\ permukiman} = \text{Jumlah penduduk} * FE_{TN\ permukiman} * REK * \text{Koefisien transfer beban}$

Units: kg/Month

(079) $PBP_{TN\ pertanian} = \text{Luas lahan pertanian} * FE_{N\ pertanian} * 0.1 * \text{Lama panen}$

Units: kg/Month

(080) $PBP_{TP\ KJA} = \text{Jumlah pakan ikan sebagai limbah} * Fr_{P\ pakan\ ikan}$

Units: kg/Month

(081) $PBP_{TP\ permukiman} = \text{Jumlah penduduk} * FE_{TP\ permukiman} * REK * \text{Koefisien transfer beban}$

Units: kg/Month

(082) $PBP_{TP\ pertanian} = \text{Luas lahan pertanian} * FE_{P\ pertanian} * 0.1 * \text{Lama panen}$

Units: kg/Month

(083) $PO_4\ Metro = WITH\ LOOKUP$ (PO_4 sungai, [(0,0)-(48,10)],(0,0),(1,0.088),(2,0.067),(3,0.078),(4,0.069),(5,0.041),(6,0.054),(7,0.071),(8,0.089),(9,0.039),(10,0.095),(11,0.068),(12,0.037),(13,0.06),(14,0.1),(15,0.091),(16,0.033),(17,0.056),(18,0.102),(19,0.109),(20,0.119),(21,0.036),(22,0.087),(23,0.117),(24,0.091),(25,0.04),(26,0.083),(27,0.112),(28,0.081),(29,0.088),(30,0.114),(31,0.064),(32,0.076),(33,0.12),(34,0.05),(35,0.104),(36,0.045),(37,0.05),(38,0.083),(39,0.054),(40,0.079),(41,0.031),(42,0.054),(43,0.011),(44,0.086),(45,0.031),(46,0.09),(47,0.112),(48,0.112))

Units: mg/L

- (084) PO4 Sengguruh = WITH LOOKUP (PO4 waduk Sengguruh,
 [(0,0)-(24,10)],(0,0),(1,0.174),(2,0.854),(3,0.145),(4,0.183),(5,0.351),
 (6,0.638),(7,0.212),(8,0.096),(9,0.234),(10,0.053),(11,0.103),(12,0.066),(1
 3,0.09),(14,0.038),(15,0.411),(16,0.281),(17,0.098),(18,0.098),(19,0.32),(2
 0,0.163),(21,0.062),(22,0.088),(23,0.077),(24,0.106))
 Units: mg/L
- (085) "PO4-P"= INTEG ("Aliran PO4-P masuk"- "Aliran PO4-P keluar"-
 Fotosintesis-Respirasi,0)
 Units: mg
- (086) Q1=2.64384e+10
 Units: L/Month
- (087) Q2=2.65105e+11
 Units: L/Month
- (088) Q3=2.63248e+11
 Units: L/Month
- (089) Reaerasi=K1*(DOsat-DO)
 Units: mg/Month
- (090) REK=0.8125
 Units: Dmnl
- (091) Reoksigenasi=Fotosintesis
 Units: mg/Month
- (092) Respirasi=K4*A*μ
 Units: mg/Month
- (093) SOD=(SOD20*θ)/Z
 Units: mg/Month
- (094) SOD20=1.3
 Units: (mg*m)/Month
- (095) TN=PBP TN permukiman+PBP TN KJA+PBP TN pertanian
 Units: kg/Month
- (096) Total Ammonia=0.7*TKN
 Units: kg/Month
- (097) TP=PBP TP permukiman+PBP TP KJA+PBP TP pertanian
 Units: kg/Month
- (098) "TPO4-P"=0.05*TP
 Units: kg/Month
- (099) V=1.35431e+11
 Units: L
- (100) Z=0.97
 Units: m
- (101) α=0.05
 Units: Dmnl
- (102) θ=1.53
 Units: Dmnl
- (103) μ=μ max*("PO4-P"/(Kp+"PO4-P"))
 Units: 1/Month

Lampiran IV Validasi output model terhadap data aktual Waduk Sutami tahun
2016 - 2017

Bulan	DO (mg/L)		Simpangan	BOD (mg/L)		Simpangan
	Simulasi	Aktual		Simulasi	Aktual	
1	3,89	3,5	0,111	4,89	5,30	0,078
2	4,62	4,7	0,017	5,23	5,40	0,032
3	5,63	5,35	0,052	5,57	5,10	0,092
4	6,40	6	0,067	5,24	4,80	0,093
5	5,09	6	0,152	4,69	4,95	0,053
6	4,26	5,3	0,196	4,70	5,10	0,079
7	4,93	4,9	0,005	5,31	4,05	0,312
8	6,82	6	0,137	2,81	3,00	0,062
9	7,38	6,85	0,077	3,11	3,46	0,100
10	7,92	7,7	0,029	3,87	3,93	0,016
11	5,60	5,6	0,001	5,57	4,45	0,252
12	4,41	4,40	0,003	5,50	4,70	0,170
13	4,29	4,2	0,021	3,92	4,30	0,088
14	5,49	5,3	0,037	5,37	5,50	0,023
15	4,50	5,1	0,118	5,02	5,35	0,062
16	3,95	4,9	0,194	5,66	5,50	0,029
17	3,79	4,2	0,098	6,87	6,60	0,040
18	5,52	5,15	0,072	5,96	5,90	0,010
19	5,25	6,2	0,153	4,90	5,40	0,093
20	5,44	5,05	0,078	4,83	4,35	0,110
21	4,31	5,2	0,171	6,40	6,00	0,066
22	5,96	5,6	0,064	5,40	5,95	0,093
23	4,27	4,2	0,018	5,11	4,65	0,099
24	4,29	4,2	0,022	6,33	6,30	0,004
MAPE (%)			7,9	MAPE (%)		8,6

Bulan	COD (mg/L)		Simpangan
	Simulasi	Aktual	
1	17,21	16,6	0,037
2	15,90	15,38	0,034
3	18,34	16,38	0,120
4	17,17	16,5	0,041
5	19,33	17,88	0,081
6	13,74	16,07	0,145
7	12,15	13,16	0,077
8	13,89	14,475	0,041
9	11,11	12,24	0,092
10	16,14	12,02	0,343
11	16,61	17,14	0,031
12	13,89	17,59	0,210
13	16,69	17,51	0,047
14	19,66	19,05	0,032
15	20,93	20,03	0,045
16	17,61	17,89	0,016
17	18,93	18,84	0,005
18	17,95	17,54	0,023
19	15,93	17,64	0,097
20	15,62	17,99	0,131
21	20,65	21,23	0,027
22	15,78	18,12	0,129
23	11,92	12,97	0,081
24	16,53	20,26	0,184
MAPE (%)			8,6

Bulan	NH ₃ (mg/L)		(Simulasi-Aktual) ²	PO ₄ (mg/L)		(Simulasi-Aktual) ²
	Simulasi	Aktual		Simulasi	Aktual	
1	0,142	0,044	0,0098	0,052	0,08	0,0008
2	0,159	0,061	0,0096	0,105	0,106	0,0000
3	0,130	0,049	0,0066	0,094	0,09	0,0000
4	0,161	0,071	0,0081	0,071	0,084	0,0002
5	0,131	0,034	0,0095	0,091	0,089	5,E-06
6	0,156	0,107	0,0024	0,093	0,069	0,0006
7	0,148	0,068	0,0065	0,093	0,085	0,0001
8	0,130	0,167	0,0014	0,065	0,065	2,E-09
9	0,140	0,184	0,0020	0,080	0,073	0,0000
10	0,144	0,011	0,0176	0,099	0,104	3,E-05
11	0,142	0,187	0,0020	0,082	0,078	0,0000
12	0,142	0,081	0,0037	0,111	0,121	9,E-05
13	0,148	0,076	0,0052	0,043	0,144	0,0102
14	0,151	0,071	0,0064	0,142	0,149	4,E-05
15	0,123	0,088	0,0012	0,087	0,062	6,E-04
16	0,157	0,238	0,0066	0,166	0,039	0,0160
17	0,141	0,16	0,0004	0,098	0,032	0,0044
18	0,136	0,125	0,0001	0,065	0,049	2,E-04
19	0,129	0,189	0,0036	0,114	0,033	0,0066
20	0,154	0,157	0,0000	0,043	0,021	5,E-04
21	0,119	0,131	0,0001	0,108	0,009	1,E-02
22	0,132	0,179	0,0022	0,010	0,071	0,0037
23	0,139	0,138	7,92343E-07	0,136	0,133	0,0000
24	0,133	0,129	1,31533E-05	0,146	0,02	0,0159
RMSE			0,06	RMSE		0,05

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran V Uji Sensitivitas

1. Fraksi perubahan penduduk

Variables Entered/Removed^b

Mode	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Fraksi perubahan penduduk ^a	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: DO perubahan penduduk

Model Summary

Mode	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	1.000 ^a	1.000	1.000	.000001225

a. Predictors: (Constant), Fraksi perubahan penduduk

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.000	1	.000	5.468E4	.003 ^a
	Residual	.000	1	.000		
	Total	.000	2			

a. Predictors: (Constant), Fraksi perubahan penduduk

b. Dependent Variable: DO perubahan penduduk

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	3.936	.000		2.104E6	.000
	Fraksi perubahan penduduk	-.332	.001	-1.000	-233.827	.003

a. Dependent Variable: DO perubahan penduduk

2. Fraksi Koefisien Transfer Beban/RRC

Variables Entered/Removed^b

Mode	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	RRC ^a	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: DO perubahan RRC

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.999 ^a	.997	.994	.000407167

a. Predictors: (Constant), RRC

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.000	1	.000	362.046	.033 ^a
	Residual	.000	1	.000		
	Total	.000	2			

a. Predictors: (Constant), RRC

b. Dependent Variable: DO perubahan RRC

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	3.951	.001		7.403E3	.000
	RRC	-.015	.001	-.999	-19.028	.033

a. Dependent Variable: DO perubahan RRC

3. Fraksi perubahan luas KJA**Variables Entered/Removed^b**

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Fraksi perubahan luas KJA ^a	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: DO perubahan luas KJA

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	1.000 ^a	1.000	.999	.000000920

a. Predictors: (Constant), Fraksi perubahan luas KJA

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.000	1	.000	3.685E3	.010 ^a
	Residual	.000	1	.000		
	Total	.000	2			

a. Predictors: (Constant), Fraksi perubahan luas KJA

b. Dependent Variable: DO perubahan luas KJA

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	3.936	.000		2.788E6	.000
	Fraksi perubahan luas KJA	-.013	.000	-1.000	-60.703	.010

a. Dependent Variable: DO perubahan luas KJA

4. Fraksi pakan ikan sebagai limbah

Variables Entered/Removed^b

Model	Variables Entered	Variables Removed	Method
1	Fraksi pakan sebagai limbah ^a	.	Enter

a. All requested variables entered.

b. Dependent Variable: DO perubahan fraksi pakan sebagai limbah

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	1.000 ^a	1.000	1.000	.000000324

a. Predictors: (Constant), Fraksi pakan sebagai limbah

ANOVA^b

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.000	1	.000	7.684E5	.001 ^a
	Residual	.000	1	.000		
	Total	.000	2			

a. Predictors: (Constant), Fraksi pakan sebagai limbah

b. Dependent Variable: DO perubahan fraksi pakan sebagai limbah

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	3.937	.000		6.633E6	.000
	Fraksi pakan sebagai limbah	.000	.000	-1.000	-876.610	.001

a. Dependent Variable: DO perubahan fraksi pakan sebagai limbah

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran VI Simulasi kualitas air Waduk Sutami

Tabel 1 Data kualitas air tahun 2021

Skenario 1						Skenario 2					
Bulan	Konsentrasi (mg/L)					Bulan	Konsentrasi (mg/L)				
	DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄		DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄
Jan	3,97	4,53	15,37	0,105	0,173	Jan	4,45	5,03	13,89	0,097	0,172
Feb	4,49	4,02	14,88	0,106	0,113	Feb	4,52	4,52	13,40	0,098	0,113
Mar	5,55	2,80	13,91	0,105	0,090	Mar	5,75	3,31	12,43	0,097	0,089
Apr	4,84	5,92	8,67	0,121	0,087	Apr	5,19	6,43	7,18	0,113	0,087
Mei	6,57	6,49	12,62	0,109	0,146	Mei	7,10	7,00	11,14	0,101	0,146
Jun	4,40	4,07	15,24	0,094	0,113	Jun	4,80	4,58	13,76	0,086	0,113
Jul	5,93	4,57	15,95	0,092	0,067	Jul	6,15	5,08	14,47	0,085	0,067
Agu	6,66	3,87	14,51	0,109	0,096	Agu	7,04	4,38	13,02	0,101	0,096
Sep	4,87	4,63	13,59	0,106	0,015	Sep	5,19	5,15	12,11	0,099	0,015
Okt	5,12	4,43	15,56	0,116	0,142	Okt	5,47	4,94	14,07	0,109	0,142
Nop	6,67	3,90	13,24	0,108	0,099	Nop	6,81	4,41	11,75	0,101	0,099
Des	5,78	4,87	16,30	0,101	0,046	Des	6,52	5,39	14,82	0,095	0,046
Skenario 3						Skenario 4					
Bulan	Konsentrasi (mg/L)					Bulan	Konsentrasi (mg/L)				
	DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄		DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄
Jan	3,90	4,55	13,96	0,106	0,173	Jan	3,90	4,59	14,00	0,115	0,173
Feb	4,48	4,04	13,47	0,106	0,113	Feb	4,48	4,08	13,51	0,116	0,113
Mar	5,50	2,82	12,50	0,105	0,090	Mar	5,50	2,86	12,54	0,115	0,090
Apr	4,79	5,94	7,25	0,121	0,087	Apr	4,79	5,99	7,29	0,131	0,087
Mei	6,50	6,51	11,21	0,109	0,146	Mei	6,50	6,56	11,25	0,119	0,147
Jun	4,36	4,09	13,83	0,094	0,113	Jun	4,36	4,13	13,87	0,104	0,113
Jul	5,90	4,59	14,54	0,092	0,067	Jul	5,90	4,64	14,58	0,103	0,067
Agu	6,61	3,89	13,09	0,109	0,096	Agu	6,61	3,94	13,13	0,119	0,096
Sep	4,84	4,66	12,18	0,106	0,015	Sep	4,84	4,70	12,22	0,117	0,016
Okt	5,08	4,45	14,14	0,116	0,142	Okt	5,08	4,50	14,18	0,127	0,142
Nop	6,65	3,92	11,82	0,108	0,099	Nop	6,65	3,97	11,86	0,119	0,100
Des	5,68	4,89	14,89	0,101	0,046	Des	5,68	4,94	14,92	0,112	0,047

Skenario 5						Skenario 6					
Bulan	Konsentrasi (mg/L)					Bulan	Konsentrasi (mg/L)				
	DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄		DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄
Jan	3,89	5,10	16,13	0,120	0,173	Jan	3,89	5,33	16,19	0,130	0,173
Feb	4,47	4,59	15,64	0,120	0,113	Feb	4,47	4,82	15,70	0,130	0,114
Mar	5,49	3,37	14,67	0,119	0,090	Mar	5,49	3,60	14,73	0,129	0,090
Apr	4,78	6,50	9,42	0,135	0,087	Apr	4,78	6,73	9,49	0,145	0,087
Mei	6,49	7,07	13,38	0,123	0,146	Mei	6,49	7,30	13,44	0,133	0,147
Jun	4,35	4,64	16,00	0,109	0,113	Jun	4,35	4,88	16,07	0,119	0,113
Jul	5,89	5,15	16,71	0,107	0,067	Jul	5,89	5,38	16,77	0,117	0,068
Agu	6,60	4,45	15,27	0,123	0,096	Agu	6,60	4,68	15,33	0,134	0,096
Sep	4,83	5,21	14,35	0,120	0,015	Sep	4,83	5,45	14,42	0,131	0,016
Okt	5,07	5,00	16,32	0,131	0,142	Okt	5,07	5,24	16,39	0,142	0,142
Nop	6,64	4,47	14,00	0,123	0,099	Nop	6,64	4,71	14,06	0,134	0,100
Des	5,67	5,45	17,06	0,116	0,046	Des	5,67	5,69	17,13	0,127	0,047
Skenario 7						Skenario 8					
Bulan	Konsentrasi (mg/L)					Bulan	Konsentrasi (mg/L)				
	DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄		DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄
Jan	3,87	5,12	16,17	0,117	0,173	Jan	3,85	5,40	16,25	0,130	0,173
Feb	4,47	4,61	15,68	0,117	0,113	Feb	4,46	4,89	15,76	0,131	0,114
Mar	5,47	3,39	14,72	0,117	0,090	Mar	5,46	3,67	14,80	0,130	0,090
Apr	4,76	6,52	9,48	0,133	0,087	Apr	4,74	6,80	9,55	0,146	0,087
Mei	6,46	7,09	13,44	0,121	0,146	Mei	6,44	7,37	13,51	0,134	0,147
Jun	4,34	4,67	16,06	0,107	0,113	Jun	4,33	4,94	16,14	0,119	0,113
Jul	5,88	5,17	16,77	0,105	0,067	Jul	5,87	5,45	16,85	0,118	0,068
Agu	6,58	4,47	15,33	0,122	0,096	Agu	6,56	4,75	15,41	0,134	0,096
Sep	4,81	5,24	14,42	0,119	0,015	Sep	4,80	5,51	14,49	0,132	0,016
Okt	5,05	5,03	16,39	0,130	0,142	Okt	5,03	5,31	16,46	0,142	0,142
Nop	6,63	4,50	14,07	0,122	0,100	Nop	6,63	4,78	14,14	0,134	0,100
Des	5,63	5,48	17,14	0,115	0,046	Des	5,60	5,75	17,21	0,128	0,047

Skenario 9						Skenario 10					
Bulan	Konsentrasi (mg/L)					Bulan	Konsentrasi (mg/L)				
	DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄		DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄
Jan	3,89	4,88	16,11	0,116	0,173	Jan	4,83	5,41	16,14	0,112	0,172
Feb	4,47	4,37	15,62	0,117	0,113	Feb	4,32	4,90	15,65	0,112	0,113
Mar	5,49	3,15	14,65	0,116	0,090	Mar	3,11	3,69	14,69	0,111	0,090
Apr	4,78	6,28	9,41	0,132	0,087	Apr	6,23	6,81	9,44	0,128	0,087
Mei	6,49	6,85	13,37	0,120	0,146	Mei	6,80	7,38	13,40	0,116	0,146
Jun	4,35	4,43	15,99	0,106	0,113	Jun	4,38	4,96	16,03	0,101	0,113
Jul	5,89	4,93	16,70	0,105	0,067	Jul	4,88	5,46	16,74	0,100	0,067
Agu	6,60	4,23	15,25	0,121	0,096	Agu	4,18	4,77	15,30	0,116	0,096
Sep	4,83	5,00	14,34	0,119	0,015	Sep	4,95	5,53	14,38	0,114	0,015
Okt	5,07	4,79	16,31	0,129	0,142	Okt	4,74	5,32	16,35	0,124	0,142
Nop	6,64	4,26	13,99	0,121	0,100	Nop	4,21	4,80	14,03	0,116	0,099
Des	5,67	5,24	17,06	0,115	0,046	Des	5,19	5,77	17,10	0,110	0,046
Skenario 11						Skenario 12					
Bulan	Konsentrasi (mg/L)					Bulan	Konsentrasi (mg/L)				
	DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄		DO	BOD	COD	NH ₃	PO ₄
Jan	3,90	4,41	13,94	0,102	0,172	Jan	4,40	5,09	13,91	0,097	0,172
Feb	4,48	3,90	13,45	0,103	0,113	Feb	4,52	4,58	13,42	0,098	0,113
Mar	5,50	2,68	12,48	0,102	0,090	Mar	5,74	3,37	12,45	0,097	0,089
Apr	4,79	5,81	7,24	0,118	0,087	Apr	5,17	6,49	7,21	0,113	0,087
Mei	6,50	6,38	11,20	0,106	0,146	Mei	7,05	7,06	11,16	0,101	0,146
Jun	4,36	3,96	13,82	0,092	0,113	Jun	4,75	4,64	13,79	0,087	0,113
Jul	5,90	4,46	14,52	0,090	0,067	Jul	6,12	5,14	14,49	0,085	0,067
Agu	6,61	3,76	13,08	0,107	0,096	Agu	7,01	4,44	13,05	0,101	0,096
Sep	4,84	4,53	12,17	0,104	0,015	Sep	5,15	5,21	12,13	0,099	0,015
Okt	5,08	4,32	14,13	0,115	0,142	Okt	5,43	5,00	14,10	0,109	0,142
Nop	6,65	3,79	11,81	0,107	0,099	Nop	6,79	4,47	11,78	0,101	0,099
Des	5,68	4,77	14,88	0,100	0,046	Des	6,45	5,45	14,84	0,095	0,046

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran VII Identifikasi kualitas air dari simulasi skenario

Lampiran VIII Analisis kelembagaan dengan ISM

Sub Elemen: Lembaga yang berpotensi terlibat dalam pengendalian kualitas air Waduk Sutami

1. Dinas Lingkungan Hidup
2. Dinas Perikanan
3. Dinas Perindustrian dan Perdagangan
4. Dinas Pekerjaan Umum Sumber Daya Air
5. Dinas Tanaman Pangan, Hortikultura, dan Perkebunan
6. Dinas Pariwisata dan Kebudayaan
7. Dinas Peternakan dan Kesehatan Hewan
8. Dinas Pengendalian Penduduk dan Keluarga Berencana
9. BBWS Brantas
10. Kelompok petani ikan keramba jaring apung
11. Kelompok petani sawah

Structural Self Matrix

$i \backslash j$	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	V	X	X	O	V	O	V	V	V	X	
2	V	X	X	V	V	O	V	V	V		
3	V	O	A	V	A	V	X	V			
4	O	A	A	A	O	A	O				
5	X	O	O	V	X	V					
6	A	A	A	O	A						
7	A	A	A	V							
8	X	A	A								
9	O	X									
10	V										
11											

V = lebih penting sub elemen i dari pada sub elemen j

A = lebih penting sub elemen j dari pada sub elemen i

X = sub elemen i dan j mempunyai nilai tingkat kepentingan yang sama dan saling terkait.

O = sub elemen i dan j tidak saling terkait

Reachability Matrix

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	DP	R
1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	9	2
2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	10	1
3	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	6	3
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	7
5	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	6	3
6	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	6
7	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	5	4
8	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	3	5
9	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	9	2
10	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	9	2
11	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	5	4
D	4	4	6	8	6	7	7	8	4	4	7		
L	4	4	3	1	3	2	2	1	4	4	2		

Lampiran IX Dokumentasi



Gambar 1 Keramba jaring apung di Waduk Sutami



Gambar 2 Waduk Sutami bagian hulu



Gambar 3 Waduk Sutami bagian tengah



Gambar 4 Waduk Sutami bagian hilir (Bendungan Sutami)



Gambar 5 Pengumpulan data sekunder



Gambar 6 Pengumpulan data sekunder



Gambar 7 Survei perikanan



Gambar 8 Survei pertanian



Gambar 9 Survei pertanian



Gambar 10 Lahan pertanian sekitar Waduk Sutami



Gambar 11 Irigasi pertanian sekitar Waduk Sutami



Gambar 12 Saluran air wilayah permukiman sekitar Waduk Sutami

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir di Surabaya pada tanggal 30 September 1994. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu SD Muhammadiyah Ponorogo, SMP Negeri 2 Ponorogo, SMA Negeri 1 Ponorogo, dan S1 Jurusan Ilmu dan Teknologi Lingkungan Universitas Airlangga. Selama menempuh pendidikan sarjana, penulis mengikuti beragam organisasi antara lain Kelompok Studi Strategi Analisis Peka Lingkungan (KSSAPL), Kelompok Studi Lingkungan (KSL) dan Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM). Selain itu, penulis juga menjadi asisten laboratorium kelas Praktikum Ekologi Lingkungan dan asisten dosen kelas Gambar Teknik.

Pada tahun 2017, penulis melanjutkan pendidikan magister di jurusan Teknik Lingkungan Departemen Teknik Lingkungan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Masa-masa setelah lulus pendidikan sarjana hingga menempuh pendidikan magister dimanfaatkan penulis dengan menjadi konsultan di bidang lingkungan.