

Kode/Nama Rumpun Ilmu : 422/Teknik Lingkungan  
Bidang Fokus Penelitian : Bidang IV. Pengembangan  
Teknologi dan Manajemen  
Transportasi

## **LAPORAN AKHIR PENELITIAN DOSEN PEMULA**



**DINAMIKA KONSENTRASI OKSIGEN TERLARUT DI BAGIAN HULU  
SUNGAI CITARUM MENGGUNAKAN MODEL DINAMIK**  
**(Studi Kasus: Segmen Wangisagara, Koyod, setelah IPAL Cisirung dan  
Nanjung)**

### **TIM PENELITIAN**

**Ketua : Fanny Novia, ST., MT (NIDN: 0306118902)**

**Anggota : Laila Febrina, ST., M.Si (NIDN : 0321027404)**

**UNIVERSITAS SAHID JAKARTA  
NOVEMBER, 2018**

## **HALAMAN PENGESAHAN**

Judul

: Dinamika Konsentrasi Oksigen Terlarut di Bagian Hulu Sungai Citarum Menggunakan Model Dinamik (Studi Kasus : Segmen Wangisagara, Koyod dan setelah IPAL Cisirung)

### **Peneliti/Pelaksana**

Nama Lengkap

: FANNY NOVIA, S.T, M.T

Perguruan Tinggi

: Universitas Sahid

NIDN

: 0306118902

Jabatan Fungsional

: Asisten Ahli

Program Studi

: Teknik Lingkungan

Nomor HP

: 085274776164

Alamat surel (e-mail)

: fannynovia6@gmail.com

### **Anggota (1)**

Nama Lengkap

: LAILA FEBRINA S.T, M.Si

NIDN

: 0321027404

Perguruan Tinggi

: Universitas Sahid

### **Institusi Mitra (jika ada)**

Nama Institusi Mitra

: -

Alamat

: -

Penanggung Jawab

: Tahun ke 1 dari rencana 1 tahun

Tahun Pelaksanaan

: Rp 18,500,000

Biaya Tahun Berjalan

: Rp 18,500,000

Biaya Keseluruhan

Mengetahui,  
Dekan

Kota Jakarta Selatan, 8 - 11 - 2018  
Ketua



(Ninin Gusdini, ST., MT)  
NIP/NIK 20000415

(FANNY NOVIA, S.T, M.T)  
NIP/NIK 20150575

Menyetujui,  
Kepala LPPM



(Prof. Dr.Ir. Riyatmi, M.Si)  
NIP/NIK 19940236

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL

HALAMAN PENGESAHAN

DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR GAMBAR .....	iv
DAFTAR TABEL.....	iv
RINGKASAN .....	v

### **1. PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Ruang Lingkup.....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Target Keluaran .....	3

### **2. TINJAUAN PUSTAKA**

2.1 Kualiat Air dan Beban Pencemar di Daerah Aliran Sungai .....	5
2.2 Oksigen Terlarut di Perairan Sungai.....	7
2.2 Sistem Dinamik.....	13
2.3 Software STELLA dan Aplikasinya .....	16

### **3. METODOLOGI PENELITIAN**

3.1. Jenis Penelitian .....	18
3.2. Lokasi Penelitian.....	18
3.3. Tahapan Penelitian.....	20

### **4. GAMBARAN UMUM WILAYAH PENELITIAN**

4.1. Wilayah Administrasi Sungai Citarum.....	23
4.2. Kondisi Hidrologi Titik Pengamatan di Hulu Sungai Citarum .....	25
4.3. Kondisi Kualitas Air di Hulu Sungai Citarum .....	26
4.4. Beban Pencemar dari Kegiatan Domestik .....	28

### **5. HASIL DAN PEMBAHASAN SEMENTARA**

5.1. Konsep Model .....	30
5.2. Formulasi Model .....	32
5.3. Pembuatan Struktur Model.....	36
5.4 Kalibrasi dan Validasi .....	39
5.5 Analisa Sensitivitas .....	42

### **6. KESIMPULAN**

6.1. Kesimpulan.....	45
----------------------	----

## **DAFTAR PUSTAKA**

## **LAMPIRAN**

## **DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2.1	Diagram Tahapan Proses Pemodelan Sistem Dinamik .....	14
Gambar 2.2	Proses Berulang dalam Kalibrasi Model.....	15
Gambar 3.1	Peta Lokasi Penelitian .....	19
Gambar 3.2	Tahapan Penelitian .....	20
Gambar 4.1	Sub DAS di Bagian Hulu Sungai Citarum .....	24
Gambar 4.2	Grafik Debit Air di Hulu Sungai Citarum .....	26
Gambar 5.1	Konsep Model Oksigen Terlarut .....	31
Gambar 5.2	Causal Loop Model Dinamik Oksigen Terlarut .....	32
Gambar 5.3	Struktur Model Menggunakan STELLA® .....	38
Gambar 5.4	Grafik Perbandingan Data Pengukuran dan Data Model di Titik Wangisagara .....	40
Gambar 5.5	Grafik Perbandingan Data Pengukuran dan Data Model di Titik Jembatan Koyod .....	41
Gambar 5.6	Grafik Perbandingan Data Pengukuran dan Data Model di Titik Setelah IPAL Cisirung .....	41
Gambar 5.7	Grafik Perbandingan Data Pengukuran dan Data Model di Titik Nanjung .....	40
Gambar 5.8	Interface Layer untuk Analisa Sensitivitas.....	43

## **DAFTAR TABEL**

Tabel 1.1 Rencana Target Capaian Tahunan .....	3
Tabel 2.1 Tekanan Uap Air pada Saat Kontak dengan Udara .....	9
Tabel 3.1 Lokasi Titik Lokasi Penelitian di Bagian Hulu Sungai Citarum ...	18
Tabel 4.1 Sub DAS di DAS Citarum Hulu .....	25
Tabel 4.2 Debit Air Rata-rata Tahunan di Hulu Sungai Citarum .....	25
Tabel 4.3 Kualitas Air Rata-rata Tahunan di Hulu Sungai Citarum .....	27
Tabel 4.4 Kapasitas dan Cakupan Layanan IPAL Bojongsoang .....	29
Tabel 4.5 Kualitas Influen dan Efluen Limbah IPAL Bojongsoang .....	29
Tabel 5.1 Komponen yang Mempengaruhi Oksigen Terlarut .....	31
Tabel 5.2 Tekanan Uap Air pada Saat Kontak dengan Udara .....	34
Tabel 5.3 Simbol Komponen dalam Pemodelan Dinamik .....	36
Tabel 5.4 Rentang Nilai Koefisien dalam Model .....	37
Tabel 5.5 Nilai Koefisien dalam Model setelah Kalibrasi .....	39
Tabel 5.6 Nilai AME dan AVE untuk Validasi .....	40

## **DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1 Data Kualitas Air Sungai Citarum Tahun 2013-2017

Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian

Lampiran 3 *Equation Layer* dalam Software STELLA®

Lampiran 4 Data dan Grafik Hasil Simulasi Model dalam Software STELLA®

## RINGKASAN

Sungai Citarum merupakan salah satu sungai di provinsi Jawa Barat dengan kondisi yang sudah memprihatinkan. Kandungan oksigen terlarut pada beberapa titik di Sungai Citarum menunjukkan angka 1,46 mg/L. Nilai ini berada di bawah baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Daerah Provinsi Jawa Barat No. 39 Tahun 2000 tentang peruntukan air dan baku mutu pada Sungai Citarum dan anak-anak sungainya di Jawa Barat, yaitu nilai oksigen terlarut harus lebih dari 3 mg/L. Salah satu pencemar yang dominan masuk ke hulu Sungai Citarum adalah limbah cair domestik. Konsentrasi beban pencemar organik seperti parameter BOD dalam limbah cair domestik mencapai angka 135 mg/L pada tahun 2014. Penelitian dilakukan untuk melihat permasalahan secara sistemik menggunakan pemodelan dinamik.

Penelitian yang sudah dilakukan dimulai dari pembuatan konsep model, pembuatan formulasi model dan pembuatan model menggunakan perangkat lunak STELLA®, kalibrasi dan validasi serta analisa sensitivitas. Oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain reaerasi, fotosintesis, oksigen terlarut dari inflow sungai, beban BOD dari limbah domestik, SOD dan nitrifikasi. Struktur model dibangun berdasarkan *causal loop* yang menggambarkan keterkaitan sebab akibat antar faktor-faktor yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum. Pembuatan struktur model dilakukan menggunakan alat bantu yaitu perangkat lunak STELLA®. Dalam tahapan pembuatan struktur model, formula yang sebelumnya sudah ditentukan untuk menggambarkan proses dalam sistem menjadi input ke dalam model beserta koefisien-koefisien terkait. Setelah struktur model dibangun, dilakukan kalibrasi untuk mendapatkan nilai simulasi model yang paling mendekati nilai aktual. Kalibrasi dan validasi dilakukan untuk mendapatkan nilai simulasi model yang paling mendekati nilai aktual. Rata-rata nilai *Average Mean Error* (AME) dan *Average Variation Error* (AVE) untuk keseluruhan titik pengamatan adalah 1.65 % dan 5.8%, sehingga model dapat dinyatakan valid. Hasil analisa sensitivitas menunjukkan dinamika oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum paling dipengaruhi oleh parameter beban pencemar BOD, koefisien peluruhan (Kd), laju produksi oksigen maksimum alga (pm) dan koefisien respirasi sedimen (Ks).

## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kualitas suatu perairan secara umum dapat dilihat dari konsentrasi oksigen terlarut yang terkandung dalam perairan tersebut. Dinamika oksigen terlarut sendiri di perairan seperti sungai dipengaruhi oleh banyak faktor yaitu faktor fisika dan proses biogeokimia (Huang *et al*, 2017). Faktor fisika seperti turbulensi air (Thomann dan Mueller, 1987), temperatur (Radwan et al., 2003), intensitas cahaya dan kecepatan angin (Hull et al., 2007 dan Boyd et al., 1991), kecepatan aliran dan kedalaman sungai (Churcill, 1962) sangat mempengaruhi perubahan nilai oksigen terlarut di perairan. Proses biogeokimia yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut di sungai adalah kebutuhan oksigen biokimia, proses nitrifikasi, kebutuhan oksigen sedimen, respirasi alga dan fotosintesis (Huang *et al*, 2017).

Sungai Citarum merupakan salah satu sungai yang ada di provinsi Jawa Barat dengan kondisi kualitas perairan yang memprihatinkan. Nasha (2016) menyebutkan dari tahun 2011 sampai tahun 2014, indeks pencemar Sungai Citarum termasuk kepada kategori tercemar berat. Berdasarkan data hasil pemantauan kualitas air dari Badan Pengendalian Lingkungan Daerah (BPLHD) Jawa Barat pada tahun 2015 menunjukkan ruas bagian hulu dari Sungai Citarum tergolong ke kategori tercemar berat dengan nilai oksigen terlarut bahkan mencapai nilai 0 mg/L. Beban pencemar yang masuk ke hulu Sungai Citarum mencapai angka 200.048 ton BOD/hari dari limbah domestik (Arief dkk, 2012), 81.363 ton BOD/hari dari limbah industri dan 14.367 ton BOD/hari dari limbah peternakan (Bukit dan Yusuf, 2002)

Rendahnya kandungan oksigen terlarut di bagian hulu Sungai Citarum ini tentunya akan menimbulkan berbagai masalah, salah satunya adalah tidak terpenuhinya baku mutu kualitas air yang sesuai dengan peruntukannya. Aliran dari hulu Sungai Citarum ini akan menjadi inlet untuk Waduk Saguling dan tentunya akan mempengaruhi kualitas air di waduk tersebut. Permasalahan rendahnya kandungan oksigen terlarut yang ada di Sungai Citarum ini perlu dilihat secara holistik. Karena oksigen terlarut merupakan parameter yang dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, maka analisa permasalahan ini dengan menggunakan metode sistem dinamik perlu dilakukan.

Salah satu alat yang dapat digunakan dalam metode sistem dinamik ini adalah pemodelan dinamik. Pemodelan dinamik merupakan pemodelan yang bertujuan untuk menggambarkan perilaku (*behaviour*) suatu sistem yang kompleks sepanjang waktu (*overtime*). Pemodelan dinamik telah banyak diaplikasikan dalam berbagai macam persoalan lingkungan. Pemodelan dinamik telah diaplikasikan dalam menyelesaikan permasalahan kualitas air antara lain untuk pemodelan air dan sedimen di Lower Churcill River (Nalcor Energy Project, 2009), proses eutrofikasi di Waduk Roxo, Portugal (Gurung, 2007), dinamika oksigen terlarut di daerah estuari, Australia (Bruce et al., 2014), pemodelan oksigen terlarut dengan kebutuhan oksigen biokimia di Sungai Cikapundung (Philomela dan Sudradjat, 2013) dan pemodelan dinamika oksigen terlarut di Waduk Cirata (Novia et al, 2015)

Dengan menggunakan sistem dinamik, hubungan dan dinamisme antara komponen dalam sistem dapat dianalisa dan perilaku objek permasalahan dapat diprediksi (Varshosaz dan Hassan, 2011) sehingga permasalahan dapat dilihat secara sistemik. Pemodelan dinamik juga dapat digunakan sebagai alat bantu dalam pengambilan kebijakan terkait dengan manajemen kualitas perairan. Disamping itu dengan menggunakan pemodelan dinamik pengaruh dari faktor-faktor yang ada dalam sistem terhadap objek permasalahan dapat diketahui.

Oleh karena itu, dinamika oksigen terlarut di Sungai Citarum sangat penting untuk dipahami. Dalam penelitian ini, dinamika oksigen terlarut akan digambarkan dengan menggunakan model dinamik. Model dinamik nantinya akan memberikan gambaran dinamika oksigen terlarut dan bagaimana pengaruh limbah domestik terhadap konsentrasi oksigen terlarut pada hulu Sungai Citarum. Hasil akhir dari penelitian ini diharapkan dapat membantu dalam memberikan masukan untuk kebijakan manajemen terkait pengelolaan Sungai Citarum.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan rendahnya kandungan oksigen terlarut di Sungai Citarum perlu dilihat secara sistemik dengan menggunakan pemodelan dinamik. Melalui model dinamik ini, maka faktor-faktor yang mempengaruhi dinamika kandungan oksigen terlarut dapat diketahui. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana dinamika dan perilaku (*behaviour*) dari konsentrasi oksigen terlarut di bagian hulu Sungai Citarum?
- b. Bagaimana pengaruh limbah domestik yang masuk terhadap kualitas air di hulu Sungai Citarum?

### **1.3 Ruang Lingkup**

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

- Bagian Sungai Citarum yang menjadi lokasi pengamatan dengan menggunakan pemodelan dinamik terdiri dari 4 titik lokasi di bagian hulu Sungai Citarum yaitu lokasi Wangisagara, Jembatan Koyod, setelah IPAL Cisirung dan Nanjung
- Parameter yang dimodelkan adalah oksigen terlarut, meliputi kalibrasi dan validasi model.

### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui dinamika dan perilaku (*behaviour*) konsentrasi oksigen terlarut di bagian hulu Sungai Citarum yaitu di titik pengamatan Wangisagara, Jembatan Koyod, setelah IPAL Cisirung dan Nanjung
- b. Mengetahui faktor yang paling mempengaruhi dinamika konsentrasi oksigen terlarut di bagian hulu Sungai Citarum

### **1.5 Target Keluaran**

Luaran yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah diharapkan hasil dari penelitian ini dapat bermanfaat bagi para pengambil kebijakan dalam manajemen Sungai Citarum yang tepat sasaran, terutama terkait dengan kondisi oksigen terlarut. Selain itu rencana Target Capaian untuk penelitian ini adalah:

**Tabel 1.1. Rencana Target Capaian Tahunan**

No	Jenis Luaran				Indikator Capaian
	Kategori	Sub Kategori	Wajib	Tambahan	
1	Artikel ilmiah dimuat di jurnal	Internasional bereputasi	-	-	-

No	Jenis Luaran				Indikator Capaian
	Kategori	Sub Kategori	Wajib	Tambahan	
		Nasional Terakreditasi	-	-	-
		Nasional Tidak Terakreditas	✓	-	Accepted/Published
2	Artikel Ilmiah dimuat di Prosiding	Internasional Terindeks	-	-	-
		Nasional	-	-	-
3	Invited Speaker dalam temu ilmiah	Internasional	-	-	-
		Nasional	-	-	-
4	Visiting Lecturer	Internasional	-	-	-
5	Hak Kekayaan Intelektual (HKI)	Paten	-	-	-
		Paten Sederhana	-	-	-
		Hak Cipta	-	-	-
		Merek Dagang	-	-	-
		Rahasia Dagang	-	-	-
		Desain Produk Industri	-	-	-
		Indikasi Geografis	-	-	-
		Perlindungan Varietas Tanaman	-	-	-
		Perlindungan Topografi Sirkuit Terpadu	-	-	-
6	Teknologi Tepat Guna		-	-	-
7	Model/Purwarupa/desain/Karya Seni/rekayasa sosial		✓	-	Draft Model
8	Buku ajar (ISBN)		-	-	-
9	Tingkat Kesiapan Teknologi		2		

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kualitas Air dan Beban Pencemar di Daerah Aliran Sungai

Pesatnya perkembangan industri dan peningkatan jumlah penduduk telah memacu penggunaan air, baik berupa air tanah maupun air permukaan. Hal ini merupakan ancaman bagi ketersediaan air maupun kualitas air. Dengan bertambahnya jumlah penduduk, maka kebutuhan air yang berasal dari air permukaan akan meningkat pula. Kebeutuhan air untuk irigasi dari tahun ke tahun juga bertambah, demikian pula kebutuhan air untuk industri diperkirakan akan mengalami peningkatan pula (Sudaryono, 2002).

Kondisi pencemaran air di suatu perairan dapat diindikasikan dengan mengetahui keberadaan atau besar kecilnya muatan oksigen di dalam air. Untuk menentukan status muatan oksigen di dalam air perlu dilakukan pengukuran besarnya BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) atau kebutuhan oksigen biologis untuk memecah bahan buangan di dalam air oleh mikroorganisme, dan atau COD (*Chemical Oxygen Demand*) atau kebutuhan oksigen kimia untuk reaksi oksidasi terhadap bahan buangan di dalam air. BOD adalah angka indeks oksigen yang diperlukan oleh bahan pencemar yang dapat teruraikan di dalam suatu sistem perairan selama berlangsungnya proses dekomposisi aerobic. BOD juga dapat diartikan sebagai angka indeks untuk tolok ukur tingkat pencemar dari limbah yang berada dalam suatu sistem perairan (Cahyaningsih dan Harsoyo, 2010)

Pencemar adalah bahan atau material yang masuk ke dalam lingkungan dan meningkatkan *background* level substansi tersebut di alam. Seringkali, sebenarnya alam tidak memiliki substansi tersebut sampai manusia menambahkannya. Menurut sumbernya, pencemar secara umum dibagi dua yaitu *Point Source* dan *Non Point* atau *diffuse source*. Pencemar *point source* merupakan sumber tunggal yang dapat diidentifikasi yang umumnya bersifat lokal dengan volume relatif tetap seperti dari pipa pembuangan instalasi pembuangan air limbah (IPAL) kegiatan industri, permukiman, hotel, rumah sakit, pusat perdagangan, laboratorium klinik dan gedung-gedung komersial. Sumber pencemaran *non point* adalah sumber pencemar tersebar (*diffuse*) atau bukan titik (*non point source*) yang bukan berasal dari

sumber tunggal teridentifikasi. Umumnya NPS dibawa oleh air larian (*runoff*) pada saat atau setelah terjadinya hujan. Sumber pencemar tersebut meliputi air larian dari berbagai jenis penggunaan lahan (*land based*) seperti pertanian (sawah dan perkebunan), hutan dan lahan terbangun (*built-up area*) di perkotaan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2016).

Beban pencemar merupakan besaran satuan berat zat pencemar dalam satuan waktu, misal 1 kg BOD/hari. Metode perhitungan beban pencemaran dilakukan menggunakan dua pendekatan sebagai berikut:

1. Metode perhitungan langsung menggunakan data kadar dan debit air limbah hasil pengukuran di lapangan. Beban pencemar yang dapat dihitung dengan metode langsung ini adalah beban pencemar yang bersumber industri, hotel, rumah sakit serta domestik yang memiliki IPAL
2. Metode perhitungan tidak langsung dengan menggunakan faktor emisi atau faktor efluen, digunakan untuk memperkirakan beban pencemar dari sumber pencemaran yang sulit diukur kualitas dan kuantitasnya secara langsung. Umumnya digunakan untuk memperkirakan besarnya beban pencemar dari industri, hotel, rumah sakit serta domestik yang tidak memiliki IPAL. Disamping itu metode tidak langsung ini juga sering digunakan untuk memperkirakan besarnya beban pencemar dari kegiatan peternakan, perikanan, sampah serta *non point source* dari penggunaan lahan misalnya pertanian (sawah dan perkebunan), hutan dan lahan terbangun (*built-up area*) di perkotaan.

Komposisi limbah domestik umumnya didominasi oleh bahan organik nitrogen ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ), fosfor (total fosfor dan  $\text{PO}_4$ ), deterjen, fenol dan bakteri kolitinja. Dari limbah organik tersebut, parameter kunci yang umum digunakan adalah *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) dan *Chemical Oxygen Demand* (COD). Beban pencemaran domestik untuk setiap orang berbeda-beda. Setiap orang di Indonesia diperkirakan akan mengeluarkan BOD sebesar 25 g/orang/hari dan COD sebesar 57 g/orang/hari (Salim, 2002).

## 2.2 Oksigen Terlarut di Perairan Sungai

Dinamika nilai oksigen terlarut di perairan secara keseluruhan dipengaruhi oleh proses fisika dan biokimia. Proses fisika terdiri dari proses oksigenasi di lapisan permukaan udara-air dan proses deoksigenasi yang dikendalikan oleh sirkulasi hidrodinamik. Sirkulasi hidrodinamik ini menyebabkan semua oksigen dapat terlarut di seluruh bagian kolom air. Proses biokimia terdiri dari produksi fotosintesis, respirasi dan degradasi bahan organik di air dan sedimen (Hull et al., 2008).

Secara umum, oksigen dapat masuk ke dalam air melalui proses absorpsi langsung dari atmosfer atau dari proses fotosintesis yang dilakukan oleh biota air seperti alga dan makrofita (Chi, 2008 dan Bartholow et al., 2006). Jumlah oksigen terlarut di air tergantung pada temperatur air (Radwan et al., 2003) dan tekanan atmosfer. Sebagai contoh, air dengan suhu lebih dingin mampu menahan lebih banyak oksigen terlarut. Dalam beberapa kondisi, air dapat menjadi jenuh oksigen, artinya air dapat menahan lebih dari 100 % jumlah oksigen pada kondisi temperatur air dan tekanan atmosfer normal. Kondisi jenuh oksigen terjadi akibat hasil fotosintesis yang berlebihan (Walker et al., 2007). Kondisi jenuh yang terjadi di waduk pada kondisi cuaca panas mengindikasikan terjadinya proses fotosintesis berlebihan dan adanya kondisi eutrofik.

Proses deoksigenasi di waduk biasanya terjadi akibat adanya kebutuhan oksigen oleh bahan organik di sedimen (Muller et al., 2012) dan kebutuhan oksigen untuk pertumbuhan alga dan tumbuhan air lainnya yang ada di waduk (Lee dan Lee, 1999). Disamping itu, konsentrasi oksigen terlarut yang turun drastis dalam suatu perairan menunjukkan terjadinya penguraian zat-zat organik.

Oksigen merupakan elemen yang paling penting dalam kehidupan. Kesetimbangan oksigen di dalam suatu perairan dapat digambarkan melalui persamaan berikut (Feng et al, 2012):

$$\frac{dc}{dt} = reoxygenation - deoxygenation \quad (\text{Persamaan 2.1})$$

Dimana C adalah konsentrasi oksigen terlarut, t adalah waktu dan reoksigenasi dan deoksigenasi merupakan proses utama yang mempengaruhi kesetimbangan oksigen. Sumber oksigen terlarut atau disebut juga dengan

reoksigenasi dapat bersumber dari proses reaerasi atmosfer, fotosintesis dan oksigen terlarut yang berasal dari anak sungai. Sedangkan proses dalam badan air yang menyebabkan terjadinya penurunan oksigen terlarut antara lain adalah proses oksidasi limbah karbon, oksidasi limbah nitrogen, kebutuhan oksigen sedimen dan proses pernafasan biota air (Thomman dan Mueller, 1987).

Beberapa faktor yang mempengaruhi oksigen terlarut dalam perairan adalah:

#### a. Reaerasi dari atmosfer

Salah satu proses yang menambah jumlah oksigen terlarut dalam air adalah proses reaerasi. Reaerasi merupakan proses dimana terjadi pertukaran oksigen antara atmosfir dengan permukaan badan air yang berkontak dengan atmosfir. Transfer oksigen biasanya terjadi dari atmosfer ke dalam air, karena nilai oksigen terlarut di dalam perairan alami pada umumnya berada di bawah kondisi jenuh (Mwegoha et al., 2010). Namun, ketika proses fotosintesis terjadi dan menghasilkan oksigen terlarut dalam kondisi *supersaturated*, maka transfer oksigen terjadi dari air kembali menuju atmosfer.

Untuk menghitung flux oksigen melalui permukaan air, digunakan persamaan berikut (Benefield, 1980):

$$DO_R = K_L(C_s - C) \quad (\text{Persamaan 2.2})$$

Dimana:  $DO_R$  = jumlah oksigen terlarut dari reaerasi (mg/L. hari)

$C$  = konsentrasi oksigen terlarut (mg/L)

$C_s$  = konsentrasi oksigen terlarut jenuh (mg/L)

$K_L$  = koefisien reaerasi atau transfer permukaan (hari<sup>-1</sup>)

Koefisien reaerasi memegang peranan penting dalam proses reaerasi. Pada aliran sungai, nilai koefisien reaerasi dipengaruhi oleh temperatur, kecepatan aliran sungai dan kedalaman sungai. Persamaan untuk menghitung nilai koefisien rearasi telah dikembangkan oleh Churcill pada tahun 1962 (Ugbebior, 2012), yaitu:

$$K_L = \frac{5,06V^{0,919}}{H^{1,673}} 1,024^{T-20} \quad (\text{Persamaan 2.3})$$

Dimana :  $K_L$  = koefisien reaerasi ( $\text{hari}^{-1}$ )  
 $V$  = kecepatan aliran sungai (m/detik)  
 $H$  = kedalaman rata-rata sungai (m)  
 $T$  = temperatur air ( $^{\circ}\text{C}$ )

Nilai konsentrasi oksigen terlarut jenuh ( $C_s$ ) sangat dipengaruhi oleh temperatur dan salinitas di air. Bowie et al. (1985) mengembangkan persamaan terkait dengan nilai konsentrasi oksigen terlarut jenuh ( $C_s$ ), temperatur dan salinitas, yaitu:

$$C_s = 14.6244 - 0.367134T + 0.0044972T^2 - 0.0966S + 0.00205ST + 0.0002739S^2 \quad (\text{Persamaan 2.4})$$

Dimana:  $C_s$  = konsentrasi oksigen terlarut jenuh (mg/L)  
 $T$  = temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $S$  = salinitas (mg/L)

Nilai konsentrasi jenuh oksigen pada **Persamaan 5.4** dapat dikoreksi untuk tekanan udara barometrik dengan persamaan berikut (Benefield, 1980):

$$Cs = (Cs_{760}) \frac{P-p}{760-p} \quad (\text{Persamaan 2.5})$$

$P$  menyatakan tekanan barometrik dalam mmHg dan  $p$  menyatakan tekanan jenuh uap air dalam mmHg pada suhu air yang diaerasi. Tekanan jenuh uap air pada berbagai suhu dapat dilihat pada **Tabel 2.1**

**Tabel 2.1** Tekanan uap air pada saat kontak dengan udara

Temperatur (T) °C	Tekanan uap air (p) (mm Hg)
0	4,5
5	6,5
10	9,2
15	12,8
20	17,5
25	23,8
30	31,8

*Sumber: Benefield, 1980*

## b. Fotosintesis Fitoplankton

Dalam proses fotosintesis, fitoplankton memanfaatkan energi sinar matahari untuk mensintesis oksigen dan karbohidrat untuk pertumbuhan. Dalam proses ini, cahaya diserap oleh klorofil, energi berubah menjadi air dan oksigen dihasilkan seperti terlihat dalam reaksi berikut:



Secara umum, terjadi perubahan nilai pH di dalam suatu perairan seiring dengan perubahan temperatur, nilai DO dan produksi fitoplankton. Kondisi pH yang tinggi, produksi fitoplankton tinggi dan nilai DO yang rendah menyebabkan terjadinya pengayaan nutrien di daerah pantai, danau dan *embayment* yang menerima input buangan seperti air limbah domestik dan limbah pertanian.

Untuk menghitung produksi oksigen dari proses fotosintesis dapat digunakan persamaan diurnal model, yaitu (EPA, 1997):

$$DO_F = p_m \left[ \frac{2f}{\pi T} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos \left\{ \frac{2\pi n}{T} \left( t - \frac{f}{2} \right) \right\} \right] \quad (\text{Persamaan 2.6})$$

Untuk menghitung nilai  $b_n$  digunakan persamaan:

$$b_n = \cos \left( \frac{\pi n f}{T} \right) \left[ \frac{4\pi T/f}{\left( \frac{\pi T}{f} \right)^2 - (2\pi n)^2} \right] \quad (\text{Persamaan 2.7})$$

Dimana,  $DO_F$  = produksi oksigen terlarut dari fotosintesis alga (mg/L.hari)

$p_m$  = laju maksimum produksi oksigen fotosintesis (mg/L.hari)

$f$  = fraksi matahari bersinar dalam 24 jam

$T$  = periode (1 hari)

Laju pertumbuhan fitoplankton yang merupakan sumber utama DO di sebuah waduk atau danau, juga dinyatakan sebagai fotosintesis sebagai fungsi dari temperatur (T), intensitas cahaya (L), substrat dan pH. Persamaan yang digunakan adalah (Chapelle, 1999):

$$\text{Fotosintesis} = \mu_{\max} \times f(T, \text{pH}, \text{substrat}, L) \quad (\text{Persamaan 2.8})$$

Dimana  $\mu_{\max}$  adalah laju pertumbuhan maksimum fitoplankton ( $\text{hari}^{-1}$ ).

Berikut adalah penjelasan dari fungsi terkait pertumbuhan fitoplankton:

➤ Fungsi Intensitas Cahaya (L)

Cahaya digunakan sebagai sumber energi dalam proses fotosintesis untuk proses produksi oksigen. Ketika penetrasi cahaya tinggi, fotosintesis dapat terjadi di seluruh bagian perairan, namun seiring pertumbuhan fitoplankton dan peningkatan turbiditas menyebabkan intensitas cahaya yang masuk menjadi berkurang, menyebabkan terhambatnya pertumbuhan fitoplankton.

Fungsi intensitas dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan kinetik Monod, yaitu:

$$f(L) = \frac{I}{IK + I} \quad (\text{Persamaan 2.9})$$

Dimana I adalah intensitas cahaya ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) dan IK adalah *half saturation* cahaya ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

➤ Fungsi pH

Variasi nilai pH mempengaruhi pertumbuhan alga dalam sebuah perairan. Nilai pH dapat merubah distribusi karbondioksida dan ketersediaan karbon, merubah ketersediaan metal dan nutrien penting. Pada kondisi pH ekstrim, ini dapat menyebabkan efek fisiologis secara langsung. Pengaruh pH terhadap laju pertumbuhan dimodelkan dengan persamaan:

$$f(pH) = \frac{K_{pH}}{K_{pH} - y} \quad (\text{Persamaan 2.10})$$

Dimana  $K_{pH}$  adalah pH konstan dan opt pH adalah pH maksimum pada saat pertumbuhan maksimum alga. Nilai y dihitung dengan rumus:

$$y = 10^{|opt\ pH - pH|} - 1 \quad (\text{Persamaan 2.11})$$

➤ Fungsi Temperatur

Temperatur memiliki pengaruh yang kuat terhadap komposisi kimia pada fitoplankton. Fungsi temperatur terhadap pertumbuhan alga dinyatakan dalam persamaan:

$$f(T) = \exp \left[ -2.3 \left( \frac{T - T_{opt}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \right] \text{ untuk } T \leq T_{opt} \text{ maka } f(T) = 1 \quad (\text{Persamaan 2.12})$$

Dimana  $T_{opt}$  adalah temperatur optimum dan  $T_{min}$  adalah temperatur minimum.

➤ Fungsi Substrat

Molekul CO<sub>2</sub> terlarut merupakan jenis karbon anorganik yang digunakan dalam proses fotosintesis. Persamaan yang digunakan untuk menunjukkan fungsi substrat adalah:

$$f(substrate) = \frac{CO_2}{K_{CO_2} + CO_2} \quad (\textbf{Persamaan 2.13})$$

Dimana CO<sub>2</sub> adalah konsentrasi CO<sub>2</sub> terlarut dan K<sub>CO<sub>2</sub></sub> adalah *half saturation constant* untuk CO<sub>2</sub> terlarut.

c. Kebutuhan Oksigen Sedimen (SOD)

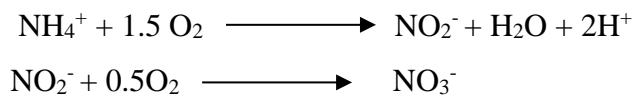
Kebutuhan oksigen sedimen merupakan laju pengurangan oksigen dari dasar air akibat penguraian senyawa organik yang turun ke dasar. SOD mencakup pemakaian oksigen melalui aktivitas biologi di sedimen dan oksidasi kimia dari jenis bahan kimia seperti, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>+2</sup> dan S<sup>2-</sup>. Persamaan yang digunakan untuk menghitung kebutuhan oksigen oleh sedimen adalah (Jamu dan Piedrahita, 2002):

$$r_{O_s} = -K_s O_2 \frac{O_2}{K_{O_2} + O_2} \quad (\textbf{Persamaan 2.14})$$

Dimana:  $r_{O_s}$  = respirasi sedimen (mg O<sub>2</sub>/liter)  
K<sub>s</sub> = laju respirasi sedimen spesifik (hari<sup>-1</sup>)  
O<sub>2</sub> = konsentrasi oksigen (mg O<sub>2</sub>/liter)  
 $K_{O_2}$  = konstanta *half-saturation* untuk oksigen (mg O<sub>2</sub>/liter)

d. Nitrogenous Biochemical Oxygen Demand (NBOD)

Nitrifikasi adalah proses oksidasi ion amonia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) menjadi nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), dengan bantuan bakteri *chemoautotrophic* dari genus *Nitrosomonas* pada tahap NH<sub>4</sub><sup>+</sup> menjadi NO<sub>2</sub> dan *Nitrobacter* pada tahap NO<sub>2</sub> menjadi NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Reaksi kimia yang menggambarkan proses nitrifikasi adalah:



Untuk setiap gram nitrogen pada ammonium-nitrogen (NH<sub>4</sub>-N) yang direduksi pada saat nitrifikasi, dihasilkan satu gram nitrat-nitrogen (NO<sub>3</sub>-N),

memanfaatkan 2 mole (64 gram) oksigen per mole (14 gram) nitrogen ( $64/14=4.57$  gram oksigen per gram nitrogen).

### 2.3 Sistem Dinamik

Sistem dinamik juga telah diaplikasikan oleh Varshosaz dan Hassan (2011) pada kasus analisa dampak lingkungan pada danau buatan di Tehran. Studi ini menyimpulkan bahwa aplikasi sistem dinamik pada analisa dampak lingkungan mungkin dilakukan. Disamping itu, sistem dinamik juga mempermudah identifikasi dinamika antara komponen di sistem lingkungan dan memprediksi perilaku komponen. Ini disebabkan karena sistem dinamik memasukkan konsep *stock-flow* pada sistem yang digambarkan (El Sawah, 2012). Dengan menggunakan sistem dinamik, usulan peraturan terkait analisa dampak lingkungan dapat diimplementasikan melalui simulasi dan pada akhirnya menemukan strategi dan keputusan terbaik.

Dalam sistem dinamik, dasar pemikiran yang utama adalah perilaku dinamik dari waktu ke waktu dikembangkan dari sebuah struktur sistem atau jaringan interaksi yang mengikat komponen sistem bersama-sama (El Sawah et al., 2012). Oleh karena itu, pemahaman struktur sebab-akibat merupakan tahapan awal untuk memahami dan mengatur suatu sistem. Secara umum, ada 4 langkah dalam membangun model sistem dinamik yaitu konseptualisasi, formulasi, percobaan dan implementasi. Menurut Sterman (1995), tahapan dalam proses pemodelan sistem dinamik terdiri dari:

i. Artikulasi Masalah

Artikulasi masalah merupakan tahapan yang paling penting dalam membuat model sistem dinamik. Dalam tahapan ini, dilakukan penentuan permasalahan yang dimodelkan serta konsep dan variabel-variabel dasar.

ii. Formulasi Hipotesis Dinamik

Pada tahapan ini dibuat hipotesis awal terkait dengan permasalahan yang dimodelkan berdasarkan literatur yang tersedia. Kemudian pada tahapan ini dikembangkan sebuah peta berdasarkan hipotesis awal, variabel dasar, referensi dan data yang tersedia. Untuk menggambarkan peta ini beberapa

diagram dapat digunakan seperti diagram batasan masalah model, diagram subsistem, diagram causal-loop serta peta stok dan flow

iii. Formulasi Model Simulasi

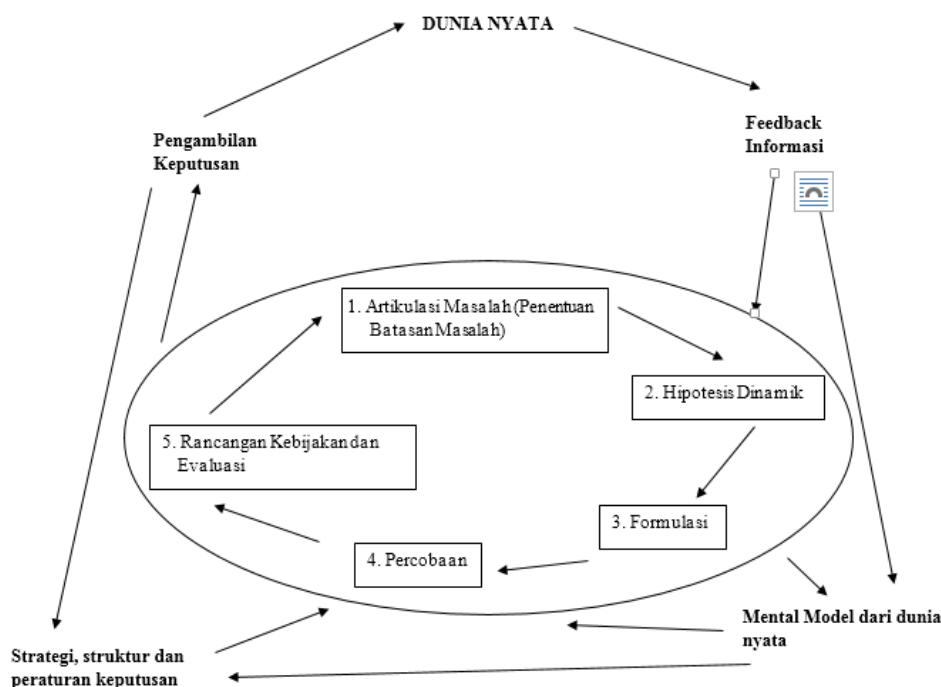
Pada tahapan ini dilakukan spesifikasi struktur serta estimasi parameter, hubungan perilaku dan kondisi awal sistem.

iv. Percobaan

Pada tahapan ini dilakukan analisa sensitivitas serta analisa ketahanan model dibawah kondisi ekstrim.

v. Rancangan Kebijakan dan Evaluasi

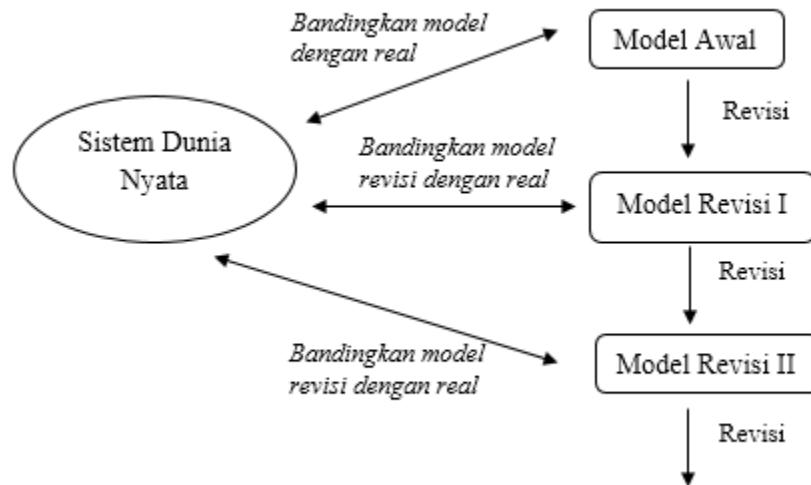
Pada tahapan ini dilakukan uji skenario terhadap model serta penentuan rancangan kebijakan yang mungkin dapat diterapkan di dunia nyata.



**Gambar 2.1** Diagram tahapan proses pemodelan sistem dinamik  
(Sterman, 2000)

Tahapan kalibrasi merupakan tahapan yang dilakukan dalam simulasi model yang sudah dibangun. Kalibrasi adalah proses berulang (iteratif) untuk membandingkan model dengan sistem di dunia nyata, membuat pendekatan atau manipulasi pada model sehingga merubah model di awal serta kembali lagi membandingkan revisi model dengan sistem di dunia nyata, berulang kali hingga

model yang dibangun sesuai dengan sistem di dunia nyata (Azhaginiyal dan Umadevi, 2014). Proses kalibrasi dapat dijelaskan dalam **Gambar 2.2**.



**Gambar 2.2** Proses berulang dalam kalibrasi model

(Azhaginiyal dan Umadevi, 2014)

Analisa sensitivitas merupakan salah satu tahapan yang dilakukan setelah formulasi model. Analisa sensitivitas dilakukan untuk mengetahui seberapa sensitif model terhadap perubahan nilai parameter atau perubahan pada struktur model. Breivora dan Choudhari (2001) menjelaskan bahwa dalam pembuatan model, terdapat beberapa nilai parameter yang sulit untuk diukur secara akurat. Bahkan nilai parameter ini sangat mudah berubah di dunia nyata. Dengan melakukan analisa sensitivitas, pembuat model dapat menentukan tingkat akurasi dari nilai parameter yang digunakan dalam model. Jika hasil analisa sensitivitas menunjukkan model tidak terlalu sensitif dengan perubahan nilai parameter, maka pembuat model dapat menggunakan nilai estimasi daripada nilai dengan akurasi yang lebih tinggi.

Salah satu tahapan penting dalam pemodelan dinamik adalah simulasi. Banyak studi telah membuktikan bahwa teknik simulasi merupakan salah satu teknik penyelesaian dan analisa masalah yang paling praktis dan efektif (Javadi et al., 2011). Simulasi dapat diartikan sebagai operasi hipostatis dari sebuah sistem pada kondisi tertentu (Estuti dan Lipovski, 1997). Jenis model yang paling tepat

dalam menggambarkan suatu permasalahan tertentu tergantung pada tujuan penelitian dan ketersediaan data. Model detail sangat bermanfaat untuk mensimulasikan suatu kejadian dalam waktu yang singkat. Untuk simulasi dalam jangka waktu yang panjang dan untuk keperluan manajemen, konseptual model atau model yang lebih sederhana lebih tepat digunakan (Radwan et al., 2003).

## 2.4 Software STELLA® dan Aplikasinya

Software STELLA® merupakan sebuah contoh aplikasi yang digunakan dalam sistem dinamik yang mulai dikembangkan pada tahun 1960-an. Fungsi Software STELLA® adalah menciptakan suatu model, dan dari model tersebut selanjutnya dapat dilakukan simulasi, analisis dan komunikasi. Dacko (2010) menjelaskan software ini mendukung tiga level yaitu:

- a. Struktur model general merupakan hubungan saling keterkaitan antara sub sistem yang terpisah yang menjelaskan interaksi antar sub sistem.
- b. Diagram alir merupakan interaksi kuantitatif antara variabel yang menjelaskan perilaku dalam sistem
- c. Persamaan diferensial spesifik merupakan penjelasan dari perilaku sistem dan persamaan secara otomatis dirancang oleh software.

Software STELLA® sudah banyak diaplikasikan dalam pemodelan dinamik sistem lingkungan, salah satunya untuk kualitas perairan. Software STELLA® digunakan untuk simulasi cadangan air di waduk serta untuk upaya pencegahan banjir oleh Javadi dkk (2009) di Waduk Boukan, Iran. Untuk mensimulasikan perilaku waduk, terdapat lima parameter yang diimplementasikan ke dalam model yaitu kebutuhan air, tumpahan (*spill*), inflow, evaporasi dan kemungkinan kejadian. Disamping itu, software STELLA® juga terbukti dapat mensimulasikan perilaku dari proses transformasi dan pelepasan nitrogen pada sebuah sistem lahan basah (*wetland*) alami yang mengalir menuju sebuah waduk oleh Singo et al. (2012). Dimana fungsi utama yang digunakan dalam model ini adalah parameter temperatur, pH dan oksigen terlarut.

Studi lain juga yang dilakukan oleh Mwegoha et al. (2010) mengembangkan model matematika menggunakan software STELLA® untuk memprediksi pengaruh kecepatan angin, cahaya, pH, temperatur, karbondioksida terlarut dan kebutuhan

oksidgen kimia terhadap nilai oksigen terlarut di kolam ikan. Kemudian studi yang dilakukan oleh Hull et al. (2008) mengembangkan model dinamik oksigen terlarut di *coastal lagoon* dengan menggunakan STELLA® untuk menganalisa dinamika oksigen terlarut secara musiman dan harian. Model menggunakan parameter temperatur air, radiasi solar dan pergerakan angin sebagai fungsi utama yang paling mempengaruhi dinamika nilai oksigen terlarut.

Feng et al. (2012) juga melakukan studi terkait *Net Ecosystem Metabolism* (NEM) untuk mengindikasikan level tropik suatu ekosistem. Dinamika nilai oksigen terlarut dikembangkan dengan menggunakan STELLA® untuk memprediksi variasi nilai NEM di estuari Sungai Yellow, China. Komposisi keseimbangan sistem oksigen terlarut dalam studi ini digambarkan dalam dua bagian uatama yaitu model reoksigenasi dan model deoksigenasi dengan komponen fisika dan biokimia.

Studi terkait sistem model dinamik oksigen terlarut juga dilakukan oleh Acosta (2012) yang memodelkan oksigen terlarut di Danau Taal. Model yang dikembangkan memperhitungkan pemakaian dan penambahan oksigen dari proses reaerasi, fotosintesis, kebutuhan oksigen biokimia, kebutuhan oksigen sedimen dan respirasi ikan. Beberapa studi ini menyatakan bahwa prinsip sistem dinamik dengan menggunakan software STELLA® cocok digunakan untuk pemodelan dan aplikasi di permasalah sumber daya air dan lingkungan.

## BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian kuantitatif, dimana nilai dari faktor-faktor yang mempengaruhi oksigen terlarut di bagian hulu Sungai Citarum menjadi input dari model dinamik. Didalam penelitian ini, nilai dari faktor-faktor tersebut dimasukkan dalam persamaan akumulasi dan koefisien yang mempengaruhi masing-masing komponen dalam sistem.

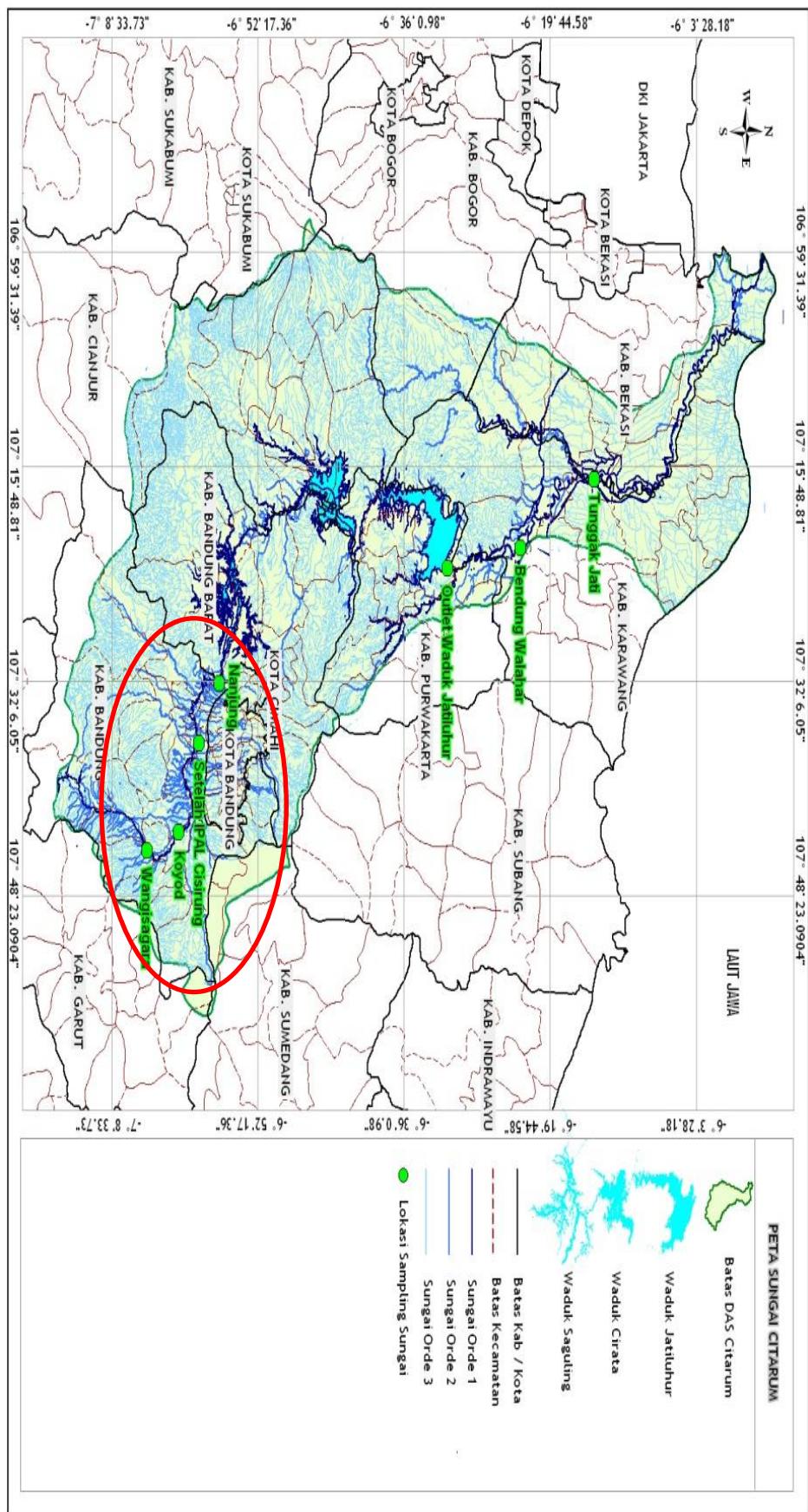
### 3.2 Lokasi Penelitian

Wilayah Sungai Citarum yang akan dijadikan lokasi penelitian adalah bagian hulu Sungai Citarum. Titik lokasi penelitian terdiri dari ruas Wangisagara, Koyod, dan setelah IPAL Cisirung. Lokasi detail dari masing-masing titik pengamatan dapat dilihat pada **Tabel 3.1**.

**Tabel 3.1. Lokasi Titik Lokasi Penelitian di Bagian Hulu Sungai Citarum**

No	Lokasi	Alamat	Koordinat GPS
1	Wangisagara	Jalan Simpang Radug, Kp. Radug, Desa Wangisagara, Kec. Majalaya, Kab. Bandung	107° 44'54,7'' BT 07° 04'26,8'' LS
2	Koyod	Jembatan Koyod, Desa Rancakusumba, Kec. Solokan Jeruk, Kab. Bandung	107° 43'31,0'' BT 07° 00'55,1'' LS
3	Setelah IPAL Cisirung	Ds. Andir, Kec. Baleendah, Kab. Bandung	107° 36'46,0'' BT 06° 58'42,1'' LS
4	Nanjung	Ds. Nanjung, Kec. Soreang, Kab. Bandung	107° 32'09,1'' BT 06° 56'29,8'' LS

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2014

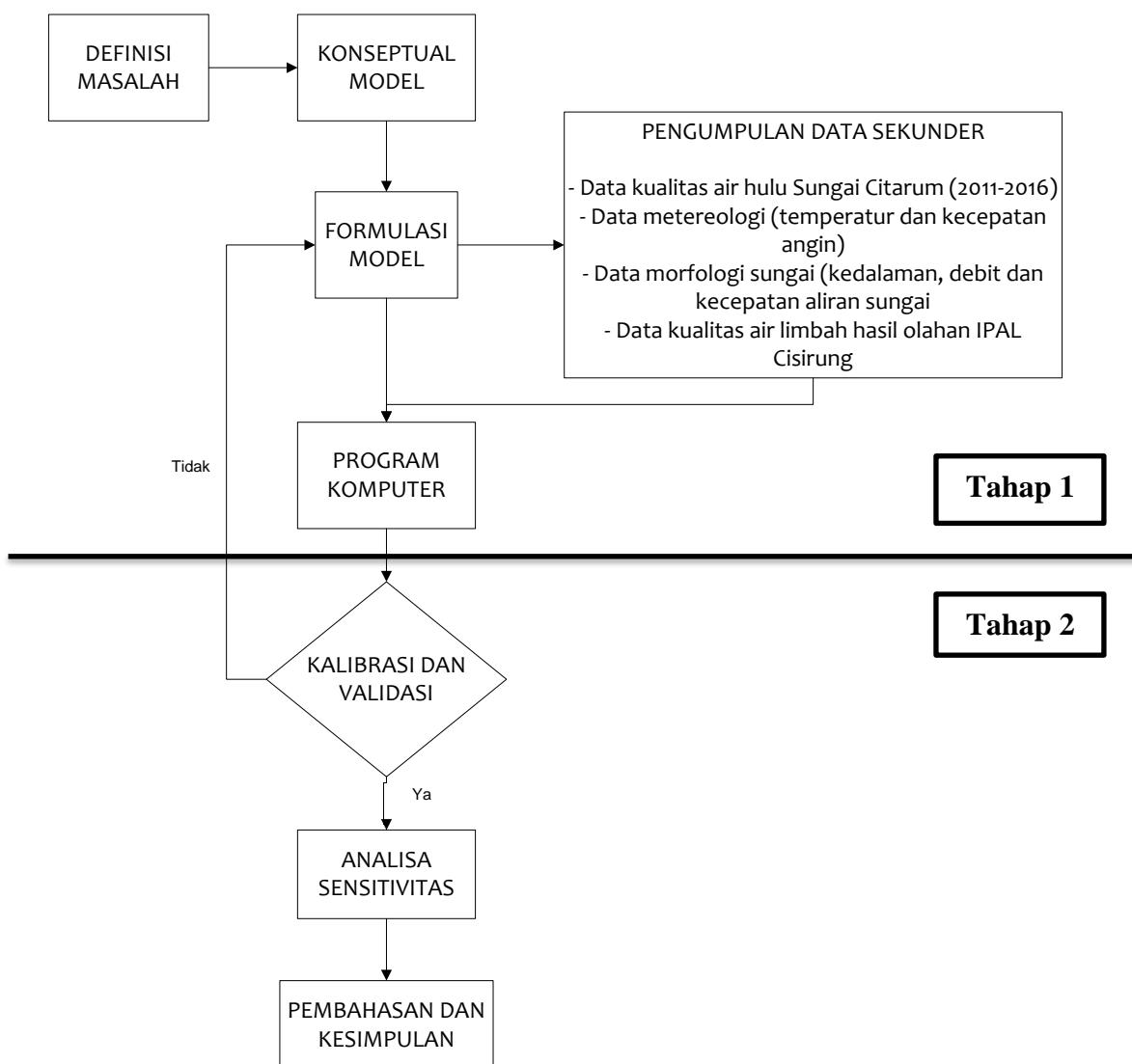


### Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian

(Sumber: BPLHD Jawa Barat. 2016)

### 3.3. Tahapan Penelitian

Secara umum rencana tahapan penelitian ini mengikuti langkah-langkah dalam pemodelan sistem dinamik. Penelitian ini terdiri dari tahap survei pendahuluan, penentuan definisi masalah, konseptual model, formulasi model, pengambilan data, perhitungan beban pencemar ke hulu Sungai Citarum, kalibrasi dan validasi model, analisis sensitivitas, serta pembahasan. Diagram alir tahapan penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.



**Gambar 3.2** Tahapan Penelitian

Adapun penjelasan rencana tahapan penelitian ini adalah:

a. Survai Pendahuluan

Pada tahap survai pendahuluan dilakukan pengamatan ke lokasi studi yaitu hulu Sungai Citarum mengenai permasalahan yang ada disana.

b. Definisi Masalah

Setelah melakukan survai pendahuluan, maka pada tahap selanjutnya dilakukan definisi dan pembatasan masalah yang dimodelkan. Permasalahan yang ditemukan antara lain rendahnya nilai oksigen terlarut di sungai, dimana nilai oksigen terlarut tidak memenuhi nilai standar baku mutu. Nilai oksigen terlarut bersifat sangat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor.

c. Konsep Model

Pada tahap ini, masalah yang sudah ditentukan digambarkan secara sederhana dalam sebuah konsep model yang dibuat berdasarkan dari literatur yang terkait dengan permasalahan. Langkah berikutnya adalah membuat diagram *causal loop* yang menggambarkan keterkaitan antara komponen dalam sistem. Diagram *causal loop* menggambarkan umpan balik positif dan negatif yang mempengaruhi nilai konsentrasi oksigen terlarut di sungai

d. Formulasi Model Sistem Dinamik

Pendekatan menggunakan persamaan matematika dapat digunakan untuk memahami dan menggambarkan transformasi dan transportasi polutan yang masuk ke system. Pada tahap ini, faktor-faktor yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut akan digambarkan dalam persamaan akumulasi dan koefisien. Persamaan dan koefisien yang digunakan untuk membangun model diambil dari literatur dan penelitian terkait. Dari tahap formulasi ini juga dapat ditentukan data-data sekunder yang dibutuhkan berdasarkan formula yang digunakan untuk membuat model.

e. Pengambilan Data Sekunder

Karena pemodelan dinamik membutuhkan data dalam jangka waktu yang panjang dan dengan keterbatasan waktu, maka dibutuhkan data sekunder terkait kualitas air di hulu Sungai Citarum tahun 2011-2016. Data sekunder didapatkan dari BPLHD Jawa Barat dan Balai Besar Wilayah Sungai Citarum.

#### f. Pembuatan Model dengan Program Komputer

Pada tahap ini dilakukan pembuatan struktur model dinamik berdasarkan diagram *causal-loop* dengan menggunakan bantuan software STELLA®. Berdasarkan diagram *causal-loop*, maka struktur model dibangun secara bertahap dengan memanfaatkan data dan informasi yang tersedia dari literatur maupun penelitian terkait yang sudah pernah dilakukan sebelumnya

#### g. Kalibrasi dan Validasi Model.

Pemodelan dinamik bertujuan untuk menggambarkan perilaku suatu sistem dalam periode waktu (*overtime*). Oleh karena itu, dalam memodelkan suatu sistem dengan menggunakan pemodelan dinamik, dibutuhkan data mengenai parameter yang dimodelkan dalam periode waktu tertentu. Informasi data dalam periode waktu ini digunakan untuk memvalidasi model yang sudah dibangun.

Validasi model menggunakan uji statistik yaitu menggunakan *Absolute Means Error* (AME) dan *Absolute Variation Error* (AVE). Model dinyatakan valid jika nilai  $AME \leq 5\%$  nilai  $AVE \leq 30\%$  (Satrio dan Suryani, 2017). Persamaan untuk menghitung nilai AME adalah:

Dimana:  $X_s$  = rata-rata nilai simulasi model

X<sub>a</sub> = rata-rata nilai aktual

Persamaan untuk menghitung nilai AME adalah:

Dimana :  $S_s = \text{standar deviasi nilai simulasi model}$

$S_a = \text{standar deviasi nilai aktual}$

$S_i = \text{nilai model pada periode waktu ke-}i$

$A_i = \text{nilai aktual pada periode waktu ke-}i$

$N = \text{interval waktu}$

#### h. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas pada model bertujuan untuk menguji respon sistem terhadap berbagai variasi input parameter. Hasil dari analisis sensitivitas ini dapat juga digunakan untuk mengetahui parameter yang paling sensitif mempengaruhi nilai oksigen terlarut di Sungai Citarum.

#### i. Pembahasan dan Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan pembahasan mengenai hasil simulasi dari model yang sudah divalidasi. Kesimpulan akan ditarik berdasarkan hasil dan pembahasan terkait dengan perilaku dinamika oksigen dan bagaimana pengaruh parameter BOD dalam limbah domestik terhadap konsentrasi oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum.

## **BAB 4. GAMBARAN UMUM WILAYAH PENELITIAN**

### **4.1 Wilayah Administrasi Sungai Citarum**

Wilayah Sungai Citarum ditetapkan sebagai Wilayah Sungai Strategis Nasional dengan kode WS: 02.06.A3 dan luas 1.132.334 ha. Seluruh Wilayah Sungai Citarum berada di wilayah administrasi Provinsi Jawa Barat, meliputi 10 (sepuluh) Kabupaten dan 2 (dua) Kota yaitu :

- a. Kabupaten Cianjur
- b. Kabupaten Bandung
- c. Kabupaten Sumedang
- d. Kabupaten Indramayu
- e. Kabupaten Subang
- f. Kabupaten Purwakarta
- g. Kabupaten Karawang
- h. Kabupaten Bekasi
- i. Kabupaten Bandung Barat
- j. Kabupaten Bogor
- k. Kota Bandung
- l. Kota Cimahi

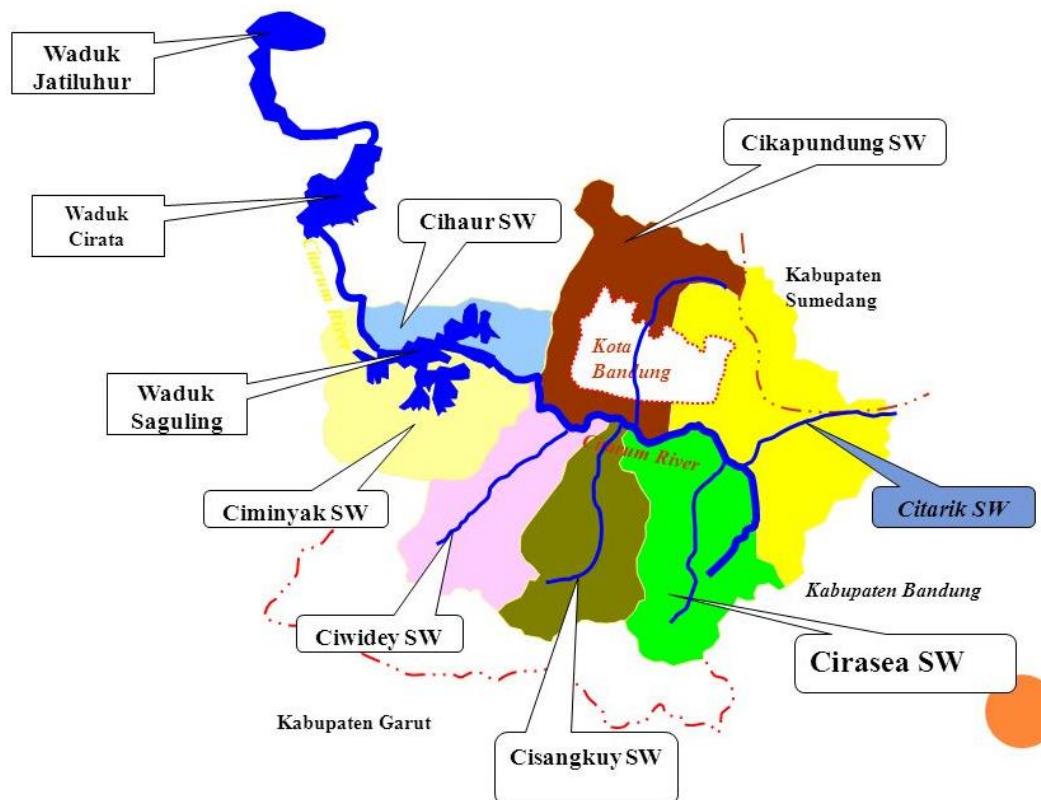
Berdasarkan pembagian administrasi, wilayah DAS Citarum dikelompokkan menjadi :

1. DAS Citarum Hulu sampai dengan Waduk Saguling berada di Kabupaten Sumedang, Kabupaten Bandung, Kota Bandung dan Kota Cimahi. Segmen ini merupakan bagian sungai yang banyak menerima beban pencemar dari limbah industri, domestik dan pertanian
2. Waduk Cirata dan Waduk Jatiluhur berada di Kabupaten Bandung, Kabupaten Cianjur dan Kabupaten Purwakarta. Waduk-waduk tersebut banyak menerima beban pencemar dari limbah perikanan keramba jaring apung
3. Citarum Hilir dari Bendung Curug sampai muara sungai berada di Kabupaten Karawang dan Kabupaten Bekasi

Bagian hulu DAS Citarum merupakan suatu cekungan yang dikelilingi oleh komplek pegunungan Tangkuban Perahu di utara, komplek pegunungan Patuha Malabar di selatan dan Pegunungan Krenceng dan Gunung Mandalawangi di bagian selatan. Secara geografis DAS Citarum Hulu terletak antara  $107^{\circ} 30' BT$  –  $108 BT$  dan  $6^{\circ} 43' LS$  -  $7^{\circ} 15' LS$  dengan batas wilayah sebagai berikut:

- Sebelah utara berbatasan dengan Kabupaten Purwakarta dan Kabupaten Subang
- Sebelah barat berbatasan dengan bagian barat Kabupaten Bandung
- Sebelah timur berbatasan dengan Kabupaten Sumedang dan Garut
- Sebelah selatan berbatasan dengan Kabupaten Cianjur dan Garut

DAS Citarum Hulu dilalui oleh beberapa Sub DAS sungai, dimana aliran dari sub DAS sungai tersebut mengalir masuk ke aliran DAS Citarum Hulu. Keterangan sub DAS yang masuk ke DAS Citarum Hulu dapat dilihat di **Gambar 4.1** dan **Tabel 4.1**.



**Gambar 4.1. Sub DAS di Bagian Hulu Sungai Citarum**

**Tabel 4.1. Sub DAS di DAS Citarum Hulu**

No	Sub DAS	Luas	
		Luas (Ha)	%
1	Citarik	45.164,16	19,39
2	Cirasea	34.208,64	14,61
3	Cisangkuy	30.456	13,01
4	Ciminyak	34.295,04	14,56
5	Cikapundung	43.439,04	18,46
6	Ciwidey	29.374,56	12,55

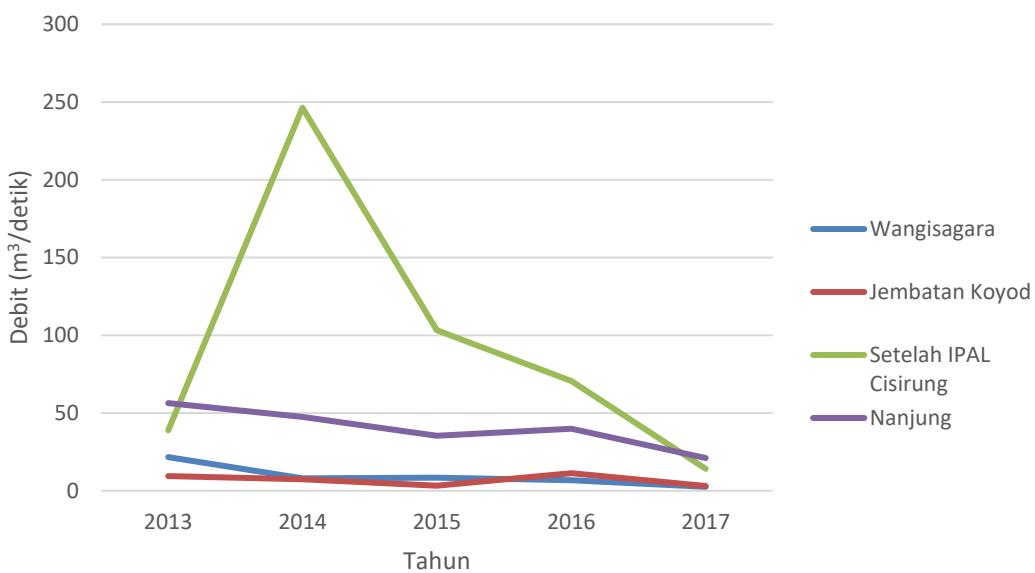
#### **4.2 Kondisi Hidrologi Titik Pengamatan di Hulu Sungai Citarum**

Kondisi debit aliran di sepanjang hulu Sungai Citarum, mulai dari Wangisagara hingga Nanjung, menunjukkan nilai yang cukup fluktuatif. Debit aliran yang fluktuatif terutama terlihat pada titik pengamatan setelah IPAL Cisirung, dimana aliran ini dipengaruhi oleh debit air limbah hasil pengolahan IPAL Cisirung. Nilai debit air rata-rata tahunan di sepanjang hulu Sungai Citarum dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2. Debit Air Rata-rata Tahunan di Hulu Sungai Citarum**

	Satuan	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Wangisagara</b>		21.64	7.96	8.45	6.78	2.54
<b>Jembatan</b>		9.49	7.40	3.19	11.28	3.06
<b>Koyod</b>	m <sup>3</sup> /detik					
<b>Setelah IPAL</b>		38.83	246.30	103.17	70.59	14.12
<b>Cisirung</b>						
<b>Nanjung</b>		56.35	47.78	35.27	39.96	21.04

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018



**Gambar 4.2. Grafik Debit Air di Hulu Sungai Citarum**

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

### 4.3 Kondisi Kualitas Air di Hulu Sungai Citarum

Beberapa penelitian menunjukkan hasil kualitas air di Sungai Citarum sudah tercemar berat, terutama di bagian hulu Sungai Citarum. Dalam penelitian terkait distribusi spasial tingkat pencemaran air di Sungai Citarum yang dilakukan oleh Cahyaningsih dan Harsoyo (2010) menyebutkan bahwa salah satu lokasi yang termasuk zona tercemar berat salah satunya adalah DAS Citarum Hulu bagian utara. Penelitian lainnya dilakukan oleh Nasha ( 2016) menunjukkan hasil bahwa indeks pencemar air di Sungai Citarum tergolong pada tercemar berat. Disamping itu, terdapat beberapa titik di Sungai Citarum yang memiliki nilai oksigen terlarut hingga 1,46 mg/L. Nilai tersebut berada di bawah baku mutu yang dipersyaratkan dalam Keputusan Gubernur Jawa Barat Nomor 32 Tahun 2000 yaitu nilai oksigen terlarut harus  $>3$  mg/L.

Pemantauan kualitas air Sungai Citarum dilakukan secara rutin oleh Badan pengendalian Lingkungan Hidup Jawa Barat sebanyak 5 kali dalam setahun. Periode pemantauan dilakukan tiap bulan April, Mei, Juli, September dan Oktober. Baku mutu untuk Sungai Citarum adalah berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air

untuk peruntukan air Kelas II. Gambaran kualitas air Sungai Citarum hulu rata-rata tahun 2013-2017 dapat dilihat pada **Tabel 4.3**

**Tabel 4.3. Kualitas Air Hulu Sungai Citarum Rata-rata Tahunan**

Parameter	Satuan	Tahun Pemantauan					Baku Mutu*
		2013	2014	2015	2016	2017	
<b>Titik Pemantauan : Wangisagara</b>							
Temperatur	°C	23.18	23.48	21.28	25.60	23.20	-
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.08	0.33	0.01	0.02	0.01	-
BOD	mg/L	6.20	10.86	2.14	11.40	6.15	3
Oksigen Terlarut	mg/L	6.29	5.44	4.23	5.29	5.50	4
Koli Tinja	Jml/100 mL	4572	5098038	97.50	2458	11940	1000
<b>Titik Pemantauan : Jembatan Koyod</b>							
Temperatur		25.48	25.48	23.48	26.20	26.20	-
Amonia Bebas (NH3-N)		0.84	1.66	0.02	0.04	0.29	-
BOD		40.80	45.48	6.32	17.80	39.29	3
Oksigen Terlarut		4.76	3.32	2.93	1.88	0.96	4
Koli Tinja		107112	454680	115	28400	42000	1000
<b>Titik Pemantauan : Setelah IPAL Cisirung</b>							
Temperatur		26.38	26.42	27.5	27.4	27.2	-
Amonia Bebas (NH3-N)		1.18	3.66	0.02	0.07	0.42	-
BOD		33.60	47.42	6.21	12.40	26.48	3
Oksigen Terlarut		2.75	2.24	3.23	2.24	0.22	4
Koli Tinja		55840	3532092	100	24360	38800	1000
<b>Titik Pemantauan : Nanjung</b>							
Temperatur		27.78	26.44	27.52	27.20	27	-
Amonia Bebas (NH3-N)		1.78	4.34	0.06	0.06	0.26	-
BOD		37	30.90	6.99	14.80	25.60	3

Parameter	Satuan	Tahun Pemantauan					Baku Mutu*
		2013	2014	2015	2016	2017	
Oksigen Terlarut		2.97	1.46	3.15	0.86	1.28	4
Koli Tinja		966780	2342092	100	34000	31000	1000

*Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018*

*\*Baku Mutu Air Kelas II dalam Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001*

#### 4.4 Beban Pencemar dari Kegiatan Domestik

Keterbatasan infrastruktur sanitasi, baik dari segi jumlah dan kualitas, menyebabkan limbah domestik sampai ke badan air tanpa melalui pengolahan terlebih dahulu. Pertumbuhan populasi penduduk yang ditandai dengan semakin banyaknya pembangunan rumah tinggal, tidak diiringi dengan peningkatan infrastruktur sanitasi. Sementara fasilitas jaringan air kotor di Cekungan Bandung hanya terdapat di kota Bandung. Tingkat pelayanannya pun baru mencapai kurang dari 60%. Fasilitas sanitasi yang ada antara lain Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) di Kecamatan Cibeet, septik tank komunal di Kecamatan Baleendah, Soreang, dan Pangalengan, serta Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di Kecamatan Bojongsoang (Kabupaten Bandung) untuk melayani masyarakat Kota Bandung (Bandung Timur dan Antapani). Masing-masing fasilitas sanitasi tersebut melayani 25 KK, 144 KK, 150 KK, 5.698 KK, dan 80.835 KK (total 86.852 KK). Sementara jumlah KK yang ada di seluruh KSN Cekungan Bandung pada tahun 2008 sebanyak 1.013.675 KK (Marganingrum dkk, 2013).

Jumlah penduduk di Kabupaten Bandung sebanyak 3.122.374 orang yang menghasilkan limbah domestik tanpa perlakuan dan sebanyak 447.685 orang yang menghasilkan limbah domestik dengan MCK. Beban BOD dari limbah domestik tanpa pengolahan adalah 93.671 ton per hari, sedangkan beban BOD dari limbah domestik dengan MCK adalah 84.718 ton per hari (Salim, 2002).

Salah satu instalasi pengolahan air limbah yang melayani area Kota dan Kabupaten Bandung adalah Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Bojongsoang yang berlokasi di antara Desa Bojongsoang dan Desa Bojongsari, Kecamatan Bojongsoang, Kabupaten Bandung. IPAL ini berfungsi untuk mengolah limbah

domestik masyarakat Bandung sehingga memenuhi baku mutu yang telah ditentukan sebelum dibuang ke badan air. Efluen limbah cair domestik yang sudah diolah di IPAL Bojongsoang dibuang ke bagian hulu Sungai Citarum.

**Tabel 4.4. Kapasitas dan Cakupan Layanan IPAL Bojongsoang**

No	Parameter	Volume	Satuan
1	Kapasitas Terpasang	80.835	m <sup>3</sup> /hari
2	Kapasitas Terpakai	67.173	m <sup>3</sup> /hari
3	<i>Idle Capacity</i>	16,9	%
4	Jumlah Sambungan	102.392	SR
5	Cakupan Pelayanan	63,4	%

*Sumber: IPAL Bojongsoang, 2014*

Metode pengolahan di IPAL Bojongsoang ini adalah metode konvensional, yaitu menggunakan kolam fakultatif dan kolam maturasi untuk menurunkan konsentrasi beban pencemar organik yang ada di limbah cair domestic. Kualitas influen dan efluen dari IPAL Bojongsoang dapat dilihat pada **Tabel 4.5**

**Tabel 4.5 Kualitas Influen dan Efluen Limbah IPAL Bojongsoang**

Parameter	Satuan	Kualitas Efluen	Kualitas Influen
pH		7.36	9.07
Oksigen Terlarut	mg/L	0.4	8.21
BOD	mg/L	250	40
COD	MPN/100 ml	280	50
E.Coli	MPN/100 ml	$9 \times 10^8$	$15 \times 10^3$
Coliform	mg/L	$9 \times 10^8$	$3 \times 10^3$

*Sumber: IPAL Bojongsoang, 2014*

## BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Konsep Model

Konsep model merupakan suatu gambaran secara verbal maupun visual dari suatu sistem yang dimodelkan. Konsep model dibangun berdasarkan hipotesis dan pengetahuan yang didapatkan dari literatur serta menggambarkan hubungan antara faktor-faktor yang berkaitan di dalam sistem. Secara umum dinamika nilai oksigen terlarut dipengaruhi oleh proses reoksigenasi dan deoksigenasi. Reoksigenasi merupakan proses yang menyebabkan bertambahnya nilai oksigen terlarut di dalam perairan dan deoksigenasi adalah proses yang menyebabkan berkurangnya nilai oksigen terlarut.

Dinamika oksigen terlarut sendiri di perairan seperti sungai dipengaruhi oleh banyak faktor yaitu faktor fisika dan proses biogeokimia (Huang *et al*, 2017). Faktor fisika seperti temperatur (Radwan *et al.*, 2003), kecepatan aliran dan kedalaman sungai (Churcill, 1962) sangat mempengaruhi perubahan nilai oksigen terlarut di perairan. Proses biogeokimia yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut di sungai adalah kebutuhan oksigen biokimia, proses nitrifikasi, kebutuhan oksigen sedimen, respirasi alga dan fotosintesis (Hung *et al*, 2017).

Dalam membuat model terkait kualitas air, banyak faktor yang menjadi penghambat antara lain minimnya ketersediaan data serta keterbatasan waktu dan biaya yang ada. Batasan model pada penelitian ini antara lain:

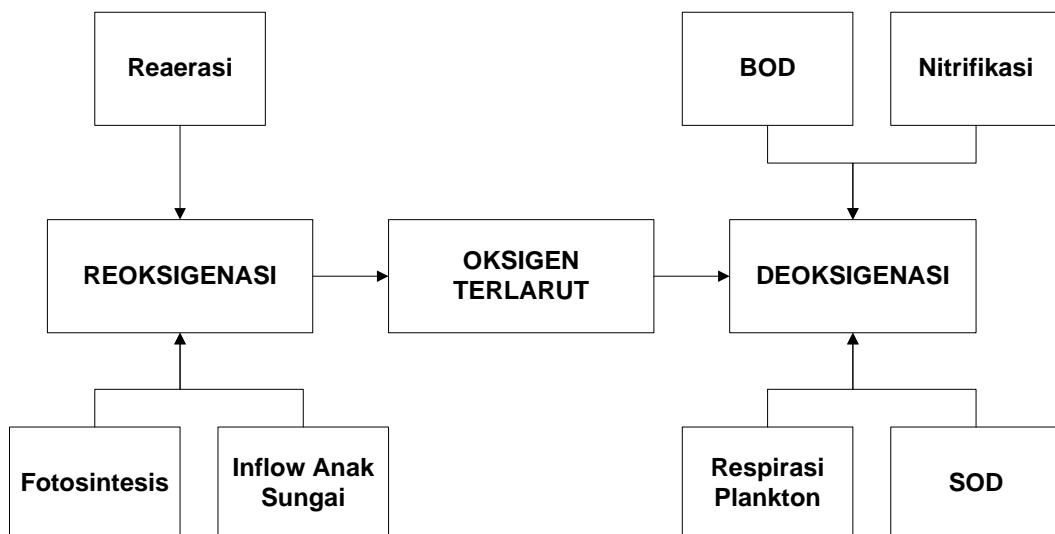
- a. Masing-masing ruas sungai dalam penelitian ini dianggap dalam keadaan *completely mixed*.
- b. Polutan yang masuk ke sungai dibatasi hanya berasal dari polutan organik. Hal ini disebabkan karena hampir sebagian besar limbah yang masuk ke hulu Sungai Citarum berasal dari limbah domestik dan limbah peternakan. Polutan limbah yang dimasukkan dalam penelitian dibatasi hanya limbah organik saja dari kegiatan domestic saja, yaitu parameter kebutuhan oksigen biokimia dan ammonia.

Berdasarkan literatur terkait dan penelitian terdahulu, maka dibuat konsep model yang akan menjadi dasar dalam pembuatan model. Komponen proses yang

mempengaruhi nilai oksigen terlarut terdiri dari reaerasi, fotosintesis, oksigen terlarut dari inflow anak sungai, nitrifikasi, BOD, SOD dan respirasi alga. Lebih lengkapnya, komponen utama yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut dapat dilihat pada **Tabel 5.1** dan **Gambar 5.1**

**Tabel 5.1** Komponen yang mempengaruhi oksigen terlarut

Reoksigenasi	Deoksigenasi
Reaerasi dari atmosfer	Nitrifikasi
Fotosintesis Alga	<i>Biochemical Oxygen Demand (BOD)</i>
Oksigen terlarut dari inflow (anak sungai)	Respirasi plankton
	<i>Sediment Oxygen Demand (SOD)</i>



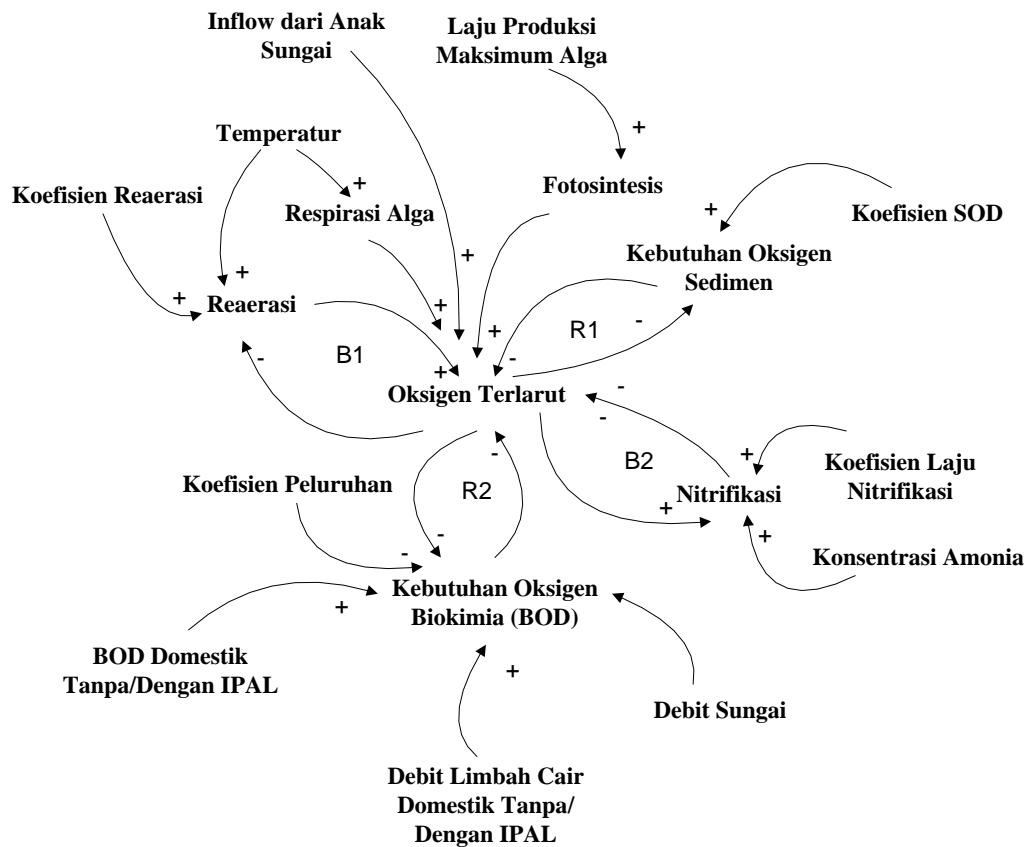
**Gambar 5.1. Konsep Model Oksigen Terlarut**

Berdasarkan komponen reoksigenasi dan deoksigenasi pada **Tabel 5.1** dan **Gambar 5.1**, maka secara umum persamaan kesetimbangan massa untuk oksigen terlarut di sungai dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dc}{dt} = (reaerasi + fotosintesis + DO \text{ inflow}) - (nitrifikasi + respirasi plankton + BOD + SOD)$$

Hubungan sebab akibat yang terjadi di dalam sistem dapat digambarkan melalui diagram *causal-loop*. Diagram *causal-loop* menggambarkan bagaimana keterkaitan antara komponen-komponen yang terdapat di dalam sistem. Dalam sistem nilai oksigen terlarut di sungai, terdapat beberapa proses utama yang

mempengaruhi nilai oksigen terlarut yaitu proses reaerasi, BOD yang berasal dari limbah yang masuk, proses nitrifikasi dan kebutuhan oksigen sedimen (SOD).



**Gambar 5.2. Causal Loop Model Dinamik Oksigen Terlarut**

## 5.2 Formulasi Model

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut secara umum terbagi 2 yaitu reoksigenasi dan deoksigenasi. Dalam penelitian ini, yang termasuk dalam proses reoksigenasi terdiri dari proses reaerasi dari atmosfer, fotosintesis fitoplankton dan oksigen terlarut dari inflow anak sungai. Sedangkan deoksigenasi terdiri dari proses nitrifikasi, kebutuhan oksigen biokimia (BOD), kebutuhan oksigen sedimen (SOD) dan respirasi plankton. Masing-masing proses memiliki formula untuk menggambarkan hubungannya dengan nilai oksigen terlarut.

- **Reaerasi dari Atmosfer**

Reaerasi yang berasal dari atmosfer terjadi secara difusi antar permukaan udara dengan air. Proses aerasi ini merupakan salah satu proses

reoksigenasi, dimana proses ini akan menambah nilai oksigen terlarut di sungai. Untuk menghitung oksigen melalui permukaan air, digunakan persamaan berikut (Benefield, 1980):

$$DO_R = K_L(C_s - C)$$

Dimana:  $DO_R$  = jumlah oksigen terlarut dari reaerasi (mg/L. hari)

$C$  = konsentrasi oksigen terlarut (mg/L)

$C_s$  = konsentrasi oksigen terlarut jenuh (mg/L)

$K_L$  = koefisien reaerasi atau transfer permukaan (hari<sup>-1</sup>)

- **Fotosintesis Fitoplankton**

Untuk menghitung produksi oksigen dari proses fotosintesis, digunakan persamaan diurnal model, yaitu (EPA, 1997):

$$DO_F = p_m \left[ \frac{2f}{\pi T} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos \left\{ \frac{2\pi n}{T} \left( t - \frac{f}{2} \right) \right\} \right]$$

Untuk menghitung nilai  $b_n$  digunakan persamaan:

$$b_n = \cos \left( \frac{\pi n f}{T} \right) \left[ \frac{4\pi T/f}{\left( \frac{\pi T}{f} \right)^2 - (2\pi n)^2} \right]$$

Dimana,  $DO_F$  = produksi oksigen terlarut dari fotosintesis alga (mg/L.hari)

$p_m$  = laju maksimum produksi oksigen fotosintesis (mg/L.hari)

$f$  = fraksi matahari bersinar dalam 24 jam

$T$  = periode (1 hari)

- **Oksigen Terlarut dari Inflow Sungai**

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai oksigen terlarut dari inflow sungai adalah (Ali, 2006):

$$DO_{in} = (Q_{in} \times DO_{sungai})V$$

Dimana:  $DO_{in}$  = konsentrasi DO dari inflow (mg/L)

$Q_{in}$  = debit sungai yang masuk ke waduk (m<sup>3</sup>/detik)

$DO_{sungai}$  = konsentrasi DO inflow sungai (mg/L)

$V$  = volume sungai (m<sup>3</sup>)

## 1) Deoksigenasi

- **Biochemical Oxygen Demand (BOD)**

Nilai oksigen terlarut yang dibutuhkan untuk proses penguraian bahan organik dihitung dengan menggunakan persamaan (Penn et al., 2007):

$$DO_{BOD} = K_d \times \theta^{(T-20)} [BOD]$$

Dimana:  $DO_{BOD}$  = kebutuhan oksigen terlarut untuk bahan biokimia  
(mg/L.hari<sup>-1</sup>)

$K_d$  = koefisien peluruhan BOD (hari<sup>-1</sup>)

[BOD] = konsentrasi BOD (mg/L)

$\theta$  = koefisien empiris

- **Sediment Oxygen Demand (SOD)**

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kebutuhan oksigen oleh sedimen adalah (Jamu dan Piedrahita, 2002):

$$DO_{SOD} = K_s O_2 \frac{O_2}{K_{O_2} + O_2}$$

Dimana:  $DO_{SOD}$  = kebutuhan oksigen terlarut untuk sedimen (mg/L)

$K_s$  = laju respirasi sedimen spesifik (hari<sup>-1</sup>)

$O_2$  = konsentrasi oksigen (mg/L)

$K_{O_2}$  = konstanta *half-saturation* untuk oksigen

- **Nitrifikasi**

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kebutuhan oksigen yang dibutuhkan untuk nitrifikasi adalah (Penn et al., 2007):

$$DO_{NR} = 4.57 \times K_n \times [NH_3]$$

## 5.3 Pembuatan Struktur Model

Pemodelan dinamik pada studi ini menggunakan software STELLA® sebagai alat bantu. Proses pembuatan model dimulai dengan memasukkan komponen-komponen yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut beserta formulasinya secara bertahap. Dalam memasukkan formulasi masing-masing komponen, sangat penting untuk memastikan satuan unit dari semua komponen kompatibel antara yang satu dengan yang lainnya. Terkait dengan pemodelan

dinamik pada sungai, maka simbol yang digunakan dalam model untuk menggambarkan komponen-komponen dalam sistem dapat dilihat pada **Tabel 5.3**

**Tabel 5.3** Simbol komponen dalam pemodelan dinamik oksigen terlarut

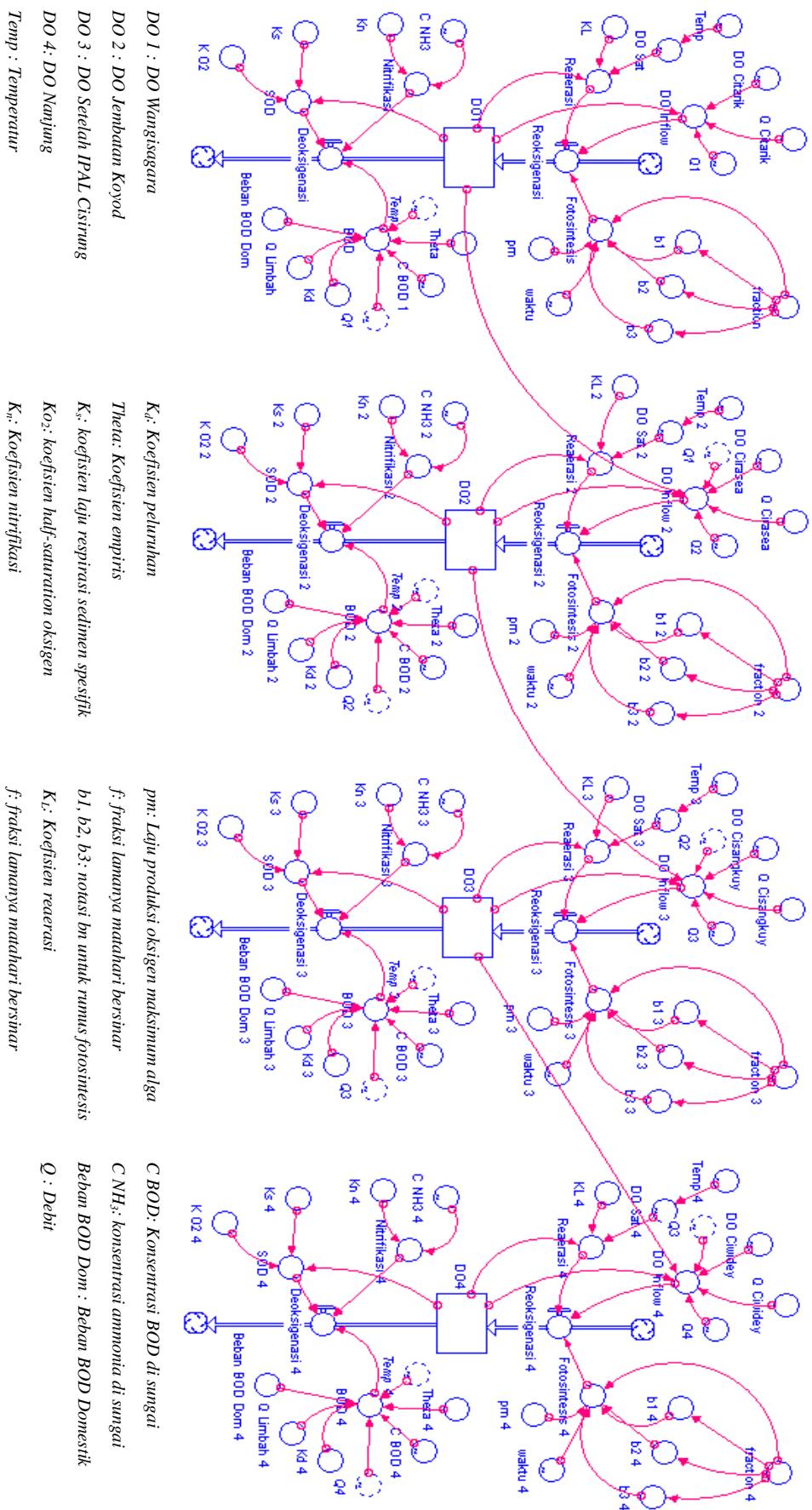
Komponen Sistem Oksigen Terlarut	Simbol dalam STELLA®
Oksigen terlarut pada sungai	<i>Stocks</i>
Reaerasi, fotosintesis alga, BOD, respirasi plankton, SOD, nitrifikasi	<i>Flows</i>
Koefisien reaerasi, koefisien deoksigenasi, koefisien laju respirasi sedimen, temperatur, DO jenuh, kedalaman rata-rata, debit	<i>Converters</i>
Faktor kali	<i>Connectors</i>

Dalam struktur model yang dibangun, terdapat beberapa koefisien dan parameter dalam formulasi yang digunakan yang nantinya dikalibrasi. Koefisien dan parameter yang digunakan dalam model antara lain adalah koefisien rearasi ( $K_L$ ), koefisien peluruhan BOD ( $K_d$ ), koefisien nitrifikasi ( $K_n$ ), koefisien laju respirasi sedimen ( $K_s$ ) dan laju produksi oksigen maksimum alga. Pada tahap berikutnya, nilai koefisien ini dikalibrasi. Masing-masing koefisien ini memiliki rentang nilai sesuai dengan literatur yang ada. Rentang nilai masing-masing koefisien dapat dilihat pada **Tabel 5.4**.

**Tabel 5.4** Rentang nilai koefisien dalam model

Koefisien dan Parameter	Rentang Nilai	Satuan	Sumber
Koefisien Peluruhan BOD ( $K_d$ )	0.1 - 0.23	hari <sup>-1</sup>	Penn dkk, 2007
Koefisien Nitrifikasi ( $K_n$ )	0.1 - 0.5	hari <sup>-1</sup>	Lee dan Baker, 2007
Koefisien Laju Respirasi Sedimen ( $K_s$ )	0.5 - 1.4	hari <sup>-1</sup>	Jamu dan Piedrahita, 2002
Koefisien Empiris ( $\theta$ )	1.012 - 1.047	hari <sup>-1</sup>	Benefield, 1980
Konstanta Half-saturation O <sub>2</sub> ( $K_{O_2}$ )	0.7 -1.4	mg/L	Chin, 2013
Laju Produksi Oksigen Maksimum Alga ( $P_m$ )	3.36 - 31.2	mg/L	Talling, 1956





**Gambar 5.3. Struktur Model Menggunakan STELLA®**

#### 5.4 Kalibrasi dan Validasi

Kalibrasi dilakukan dengan mengubah nilai koefisien dan konstanta dalam persamaan yang digunakan dalam model. Tujuan dilakukannya kalibrasi adalah agar nilai oksigen terlarut dari model mendekati nilai aktual hasil pengukuran di lapangan. Tahapan kalibrasi model merupakan suatu proses yang dilakukan dengan cara *trial and error*. Parameter yang diubah dalam kalibrasi ini adalah koefisien peluruhan ( $K_d$ ), koefisien nitrifikasi ( $K_n$ ) dan koefisien laju respirasi sedimen spesifik ( $K_s$ ), koefisien empiris ( $\theta$ ), laju produksi maksimum alga (pm) dan fraksi lamanya matahari bersinar (f). Selama proses kalibrasi, nilai koefisien dan parameter diganti (*trial and error*) sesuai dengan rentang nilai yang tersedia dari literatur. Nilai koefisien dan konstanta yang digunakan setelah dilakukan kalibrasi dapat dilihat pada **Tabel 5.5**

**Tabel 5.5 . Nilai Koefisien dalam Model setelah Kalibrasi**

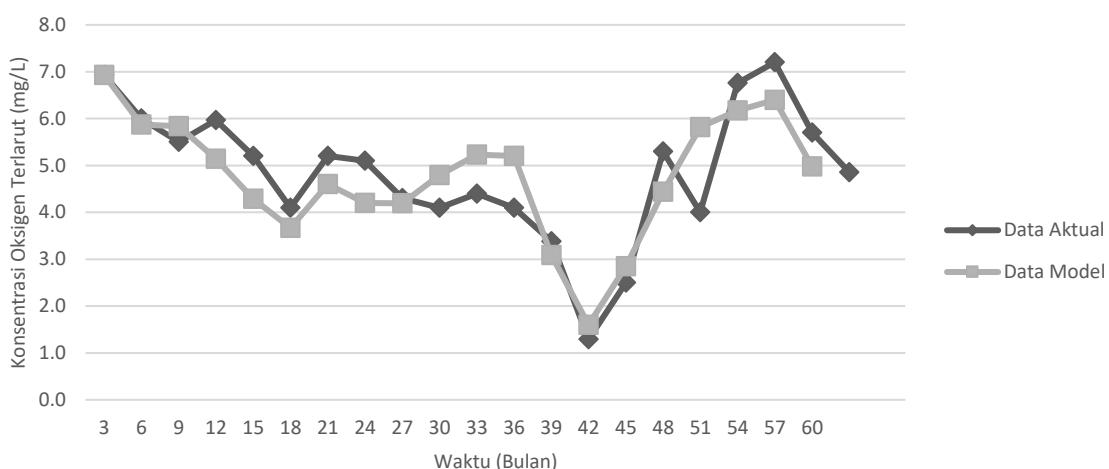
	Wangisagara	Jembatan Koyod	Setelah IPAL Cisirung	Nanjung
Koefisien Reaerasi (KL)	0.36	0.5	0.3	0.2
Koefisien Peluruhan BOD ( $K_d$ )	0.11	0.19	0.1	0.12
Koefisien Nitrifikasi ( $K_n$ )	0.26	0.5	0.1	0.1
Koefisien Laju Respirasi Sedimen ( $K_s$ )	1.01	0.5	0.7	1.3
Koefisien Empiris ( $\theta$ )	1.041	1.030	1.040	1.041
Konstanta Half-saturation $O_2$ ( $K_{O_2}$ )	1.4	1.4	1	1.3
Laju Produksi Oksigen Maksimum Alga (Pm)	3.7	6	4.5	3.6
Fraksi Lamanya Matahari Bersinar (f)	0.42	0.42	0.42	0.42

Setelah kalibrasi, langkah berikutnya adalah melakukan validasi terhadap nilai simulasi model. Validasi dilakukan dengan menggunakan uji statistik sederhana, yaitu menghitung nilai *Average Mean Error (AME)* dan *Average Variation Error (AVE)*. Keseluruhan nilai AME di titik pengamatan yang dimodelkan adalah < 5 % dan nilai AVE adalah < 30%, maka model dinyatakan valid. Nilai AME dan AVE untuk masing-masing titik pengamatan dapat dilihat pada Tabel 5.6

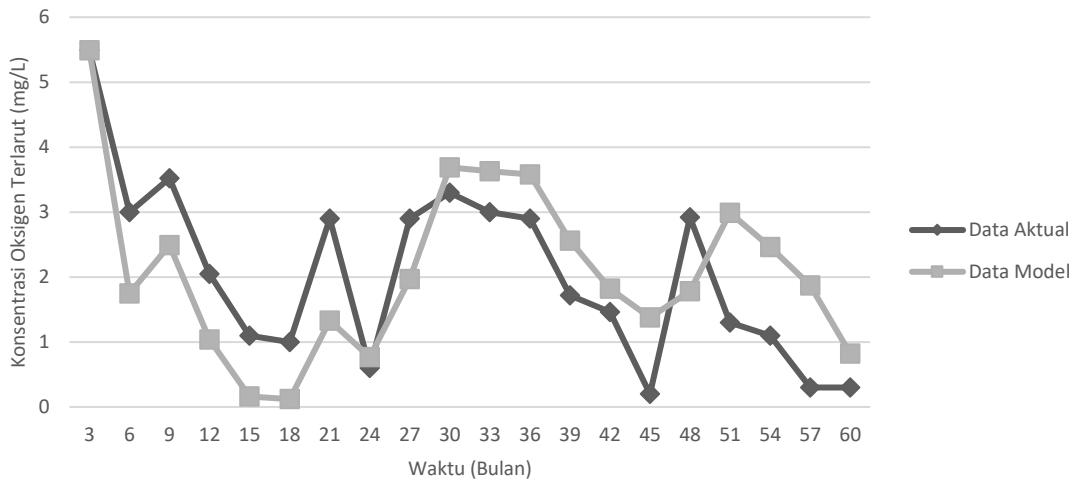
**Tabel 5.6. Nilai AME dan AVE untuk Validasi**

	Wangisagara	Jembatan Koyod	Setelah IPAL Cisirung	Nanjung
Average Mean Error (%)	1.7	1.5	0.9	2.5
Average Variation Error (%)	2.1	6.5	12	2.7

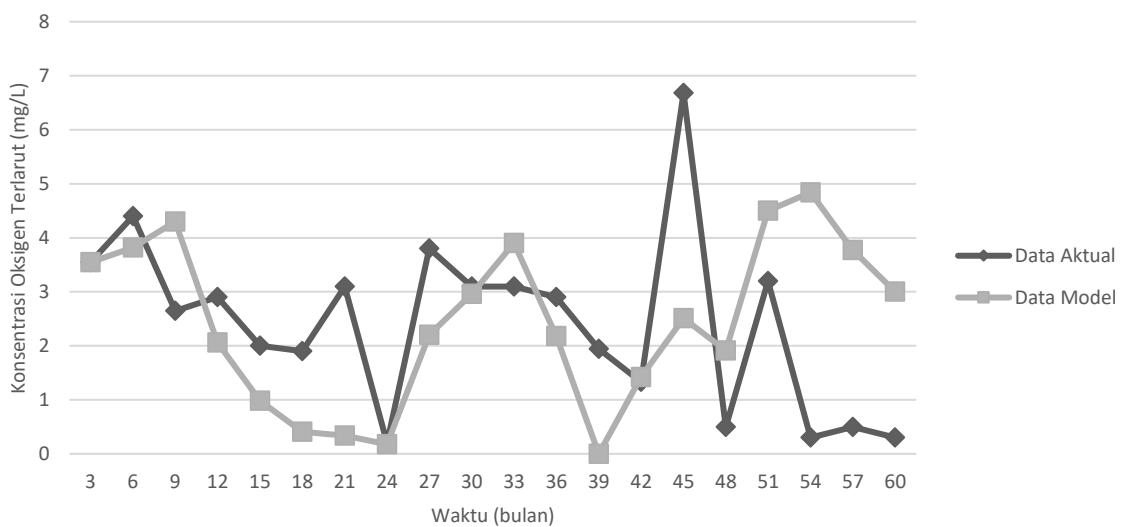
Hasil simulasi model menggunakan STELLA® menunjukkan pola fluktuasi yang mendekati *behavior* dari data aktual oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum. Kondisi oksigen terlarut di titik Wangisagara masih tergolong cukup baik, hal ini dikarenakan daerah tersebut bukan daerah yang padat penduduk. Beban BOD pada Jembatan Koyod dan setelah IPAL Cisirung cenderung lebih tinggi dikarenakan di sekitar daerah tersebut merupakan daerah padat penduduk. Disamping itu, limbah cair domestik di daerah tersebut belum terjangkau fasilitas Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) domestik di Bojongsoang. Dinamika oksigen terlarut pada titik Wangisagara, Jembatan Koyod dan setelah IPAL Cisirung dapat dilihat pada Gambar 5.4, Gambar 5.5 dan Gambar 5.6.



**Gambar 5.4. Grafik perbandingan data pengukuran dan data model di Titik Wangisagara**

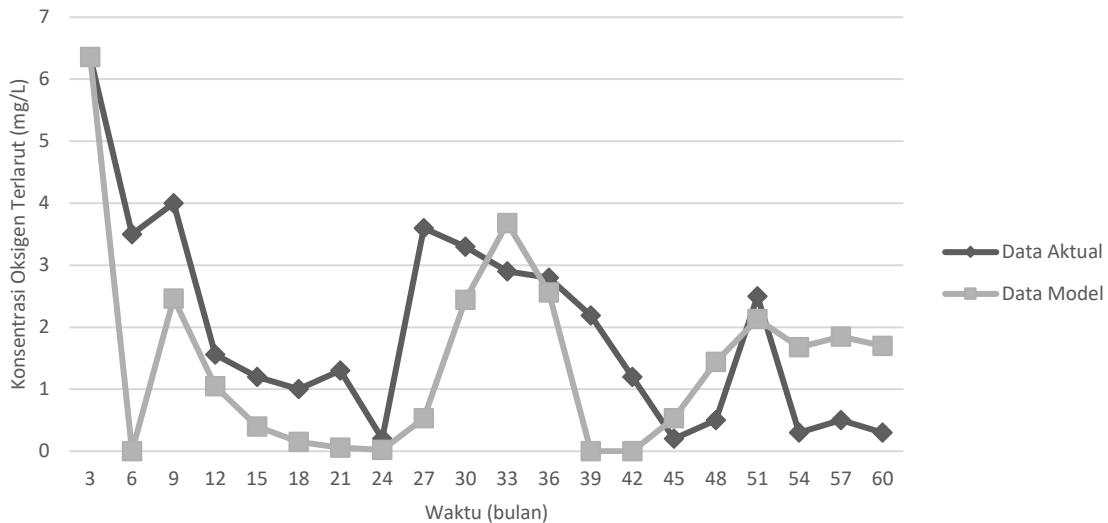


**Gambar 5.5. Grafik perbandingan data pengukuran dan data model di Titik Jembatan Koyod**



**Gambar 5.6. Grafik perbandingan data pengukuran dan data model di Titik Setelah IPAL Cisirung**

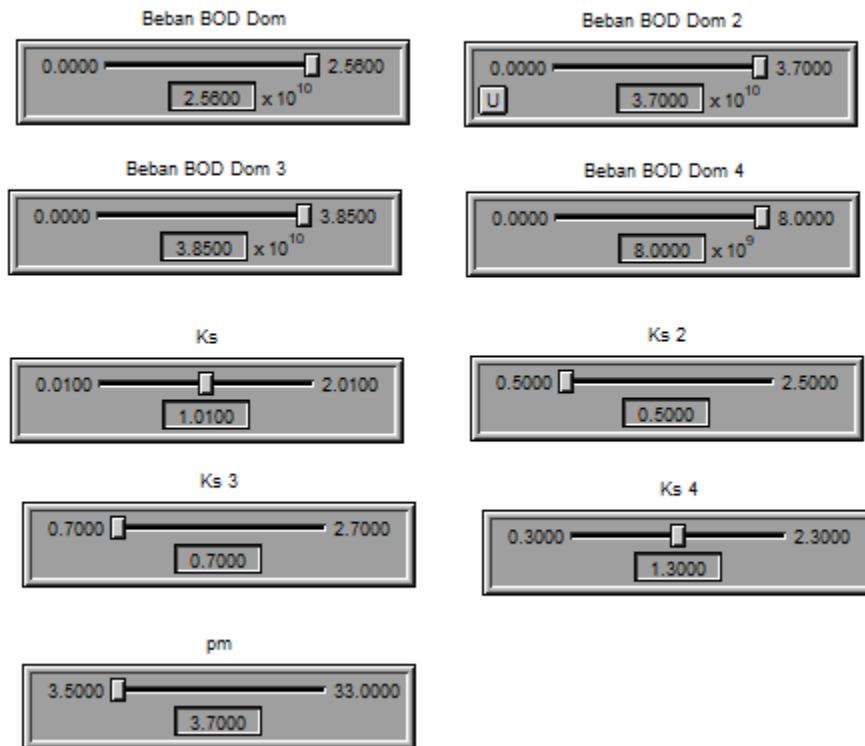
Nanjung merupakan wilayah sungai yang menerima beban BOD dari limbah domestik yang belum terolah sekaligus menerima air limbah hasil olahan IPAL Bojongsoang, dimana rata-rata beban BOD dari efluen IPAL adalah 2500 kg/hari (Salim, 2000). Hal ini menyebabkan oksigen terlarut di titik ini lebih rendah dibandingkan titik lainnya. Dinamika oksigen terlarut pada titik Wangisagara, Jembatan Koyod dan setelah IPAL Cisirung dapat dilihat pada Gambar 5.7.



**Gambar 5.7. Grafik perbandingan data pengukuran dan data model di Titik Nanjung**

### 5.5 Analisa Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan terhadap model untuk menguji respon sistem terhadap berbagai variasi input parameter. Analisa sensitivitas dilakukan terhadap nilai koefisien dan nilai paramater pada model. Untuk nilai koefisien, dilakukan analisa sensitivitas terhadap nilai fraksi lamanya matahari bersinar ( $f$ ), laju produksi maksimum oksigen alga ( $pm$ ), koefisien peluruhan BOD ( $Kd$ ), koefisien laju respirasi sedimen spesifik ( $Ks$ ), koefisien reaerasi ( $KL$ ), koefisien nitrifikasi ( $Kn$ ) dan beban BOD dari limbah domestik. Analisa sensitivitas dilakukan dengan mengurangi dan menambah nilai awal masing-masing koefisien yaitu sebesar -25%, -50%, +25% dan +50%.



**Gambar 5.8 Interface Layer untuk Analisa Sensitivitas**

Analisa sensitivitas dilakukan untuk mengetahui parameter yang paling mempengaruhi dinamika oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum. Berdasarkan hasil analisa sensitivitas, parameter yang paling mempengaruhi dinamika oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum adalah beban BOD, koefisien peluruhan (Kd), koefisien reaerasi, laju produksi oksigen maksimum alga (pm) dan koefisien respirasi sedimen (Ks). Koefisien reaerasi sangat mempengaruhi dinamika oksigen terlarut disebabkan karena adanya faktor kecepatan aliran di sungai. Pengaruh koefisien sedimentasi menunjukkan bahwa kondisi sedimen yang cukup tinggi di sungai tersebut. Laju produksi maksimum alga juga sangat mempengaruhi dinamika oksigen terlarut menunjukkan bahwa fotosintesis memegang peranan penting dalam proses reoksigenasi di sungai.

Terdapat beberapa kekurangan dalam pembuatan model dinamik oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum ini. Model ini masih belum dilengkapi dengan besaran beban pencemar dari kegiatan peternakan, pertanian dan industri.

Pengembangan lebih lanjut dari model ini masih sangat memungkinkan untuk dilakukan. Selain itu, minimnya ketersediaan data terkait kecepatan aliran dan kedalaman sungai di masing-masing titik pengamatan kualitas air Sungai Citarum menyebabkan nilai koefisien reaerasi hanya berdasarkan asumsi dari literatur terkait. Nilai koefisien reaerasi akan lebih tepat dihitung menggunakan persamaan jika data kecepatan aliran dan kedalaman sungai di titik pengamatan tersedia.

## BAB 6. KESIMPULAN

Oksigen terlarut merupakan parameter kualitas air yang sangat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik itu faktor fisika maupun faktor kimia. Rendahnya nilai oksigen terlarut dalam perairan menandakan kondisi kualitas perairan yang buruk. Sungai Citarum adalah salah satu sungai yang termasuk kategori tercemar berat dengan nilai oksigen terlarut mencapai nilai 0 mg/L. Hulu Sungai Citarum juga termasuk kategori tercemar berat karena adanya beban pencemar organik yang besar dari kegiatan domestik yang ada disekitarnya. Model dinamik dikembangkan untuk melihat permasalah secara holistik serta untuk mengetahui perilaku (*behavior*) dan faktor-faktor yang mempengaruhi nilai oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum. Model yang telah dibangun dikalibrasi sehingga mendapatkan model yang valid. Berdasarkan hasil simulasi model, maka dapat diambil kesimpulan untuk penelitian ini, yaitu:

1. Oksigen terlarut di Hulu Sungai Citarum bersifat sangat fluktuatif. Sedikit perubahan pada faktor-faktor yang dominan mempengaruhi seperti fotosintesis dan input beban BOD limbah akan sangat mempengaruhi dinamika oksigen terlarut.
2. Faktor yang paling mempengaruhi dinamika oksigen terlarut di hulu Sungai Citarum adalah beban BOD dari limbah domestik, koefisien peluruhan (Kd), koefisien reaerasi, laju produksi oksigen maksimum alga (pm) dan koefisien respirasi sedimen (Ks).
3. Terdapat beberapa kekurangan dalam pembuatan model dinamik ini antara lain, masih minimnya input beban pencemar yang masuk ke hulu Sungai Citarum serta masih kurangnya ketersediaan data terkait kecepatan aliran sungai pada masing-masing titik pemantauan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Sajjad dan Simonovic, P. Slobodan (2000): System Dynamic Modeling of Reservoir Operations for Flood Management. *Journal of Computing in Civil Engineering Vol. 14.*
- Boyd, Claude E dan Coddington, David Teichert (1991) : Relationship Between Wind Speed and Reaeration in Small Aquaculture Ponds. *Aquaculture Engineering Vol. 11 pp 121-131*
- Bruce, L.C., Cook. P.L.M., Teakle,L., Hipsey, M.R (2014): Hydrdynamic Controls on Oxygen Dynamics in a Riverine Salt Wedge Estuary, the Yarara River Estuary, Australia. *Hydrology and Earth System Sciences Vol 18, pp 1397-1411*
- Cahyaningsih, Andriati dan Harsoyo, Budi. (2010). Distribusi Spasial Tingkat Pencemaran Air di DAS Citarum. *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca Vol. 11, pp 1-9*
- Chi, Xinyan. 2003. Hydrogeological Assessment of Stream Water in Forested Watershed: Temperature, Dissolved Oxygen, pH and Electrical Conductivity. Thesis. The University of New Brunswick
- Churcill, M.A, Elmore, H.L dan Buckingham, R.A (1962). The Prediction of Stream Reaeration Rates. *Journal of Sanitary Engineering Div. ASCE, Vol 88 (4) pp. 83*
- Desriyan, Ramdhana., Wardhani, Eka., Pharmawati, Kancitra (2015). Identifikasi Pencemaran Logam Berat Timbal (Pb) pada Perairan Sungai Citarum Hulu Segmen Dayeuhkolot sampai Nanjung. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional Vol 3, pp 1-12*
- DeVink, Jean Michel dan Mazzocco, Paul. 2009. *Water and Sediment Modelling In The Lower Churchill River*. Environmental Baseline Report; Environmental Impact Statement for the Lower Churchill Hydroelectric Generation Project.
- Environmental Protection Agency, 1995. *Technical Guidance Manual for Developing Total Maximum Daily Loads*. EPA 823-B-95-007 United States
- Feng, M.L, Zhang., L.X dan Shen, X.M (2012) : Net Ecosystem Metabolism Simulation by Dynamic Dissolved Oxygen Model in Yellow River Estuary, China. *Procedia Environmental Sciences 13 (2012) 807 – 817*
- Green, W. Reed (1996): Eutrophication Trends Inferred From Hypolimnetic Dissolved Oxygen Dynamics Within Selected White River Reservoir, Nothern Arkansas-Southern Missouri. *Water Resources Investigations Report 96-4096*

Gurung, Riseth Prasad (2007): *Modelling of Eutrophication in Roxo Reservoir, Alentejo, Portugal – A System Dynamic Based Approach*. Thesis International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlandsz

Huang, Jingshui., Yin, Hailong., Chapra, Steven C dan Zhou, Qi (2017). Modelling Dissolved Oxygen Depression in an Urban River in China. *Journal Water* Vol. 9 pp 1-19

Hull, Vincent., Parrella,Luisa., Falcucci, Margherita (2008) : Modelling Dissolved Oxygen Dynamics in Coastal Lagoons. *ScienceDirect Ecological Modelling* 211 (2008) 468–480

Marganingrum, D., Roosmin, Dwina., Pradono dan Sabar, Arwin. (2013). Diferensiasi Sumber Pencemar Sungai Menggunakan Pendekatan Metode Indeks Pencemar (Studi Kasus: Hulu DAS Citarum). *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, Vol.23 No. 1 ISSN : 0125-9849

Novia, Fanny; Priana Sudjono dan Arief Sudradjat. (2015). Dynamic of Dissolved Oxygen at Inlet Zone of Fish Cage Area in Cirata Reservoir, West Java, Indonesia. *Proceeding of The 1<sup>st</sup> Young Scientist International Conference of Water Resources Development and Environmental Protection, Malang*

Radwan, M., Willems, P., Sadek, A. El., Berlamont, J (2003): Modelling of Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand Using a Detailed and a Simplified Model. *International Journal River Basin Management* Vol. 1, No 2 pp- 97-103

Sterman, John D. 2000. *Business Dynamic: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Massachusetts Institute of Technology: McGraw-Hill

Sudaryono (2002). Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) Terpadu, Konsep Pembangunan Berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, Vol.3 pp.153-158

Thomann, Robert V dan Mueller, John A. 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. New York: Harper & Row Publisher

Varhosaz, Katnoon dan Hassan, Elham Mobarak (2011): Application of Dynamic System in Environmental Impact Assessment Method-Case Study: The Man-made Lake in Tehran. *International Conference on Biology, Environment and Chemistry IPCBEE* vol.24 IACSIT Press, Singapore

# **LAMPIRAN**

## LAMPIRAN 1. Kualitas Air di Hulu Sungai Citarum per Periode Pengukuran

### A. Titik Pengukuran Wangisagara

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2013)				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	21.6	21.9	23.8	24.7	23.9
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.17	0.13	0.08	0.01	0.01
BOD	mg/L	6	10	8	3.5	3.5
Oksigen terlarut	mg/L	6.93	6	7.48	5.97	5.08
Koli tinja	Jml/100 mL	1500	12000	4600	460	4300
Debit	m3/detik	1.98	84.75	14.64	3.29	3.52

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2014)				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	23.1	21.8	23	24.5	25
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.79	0.71	0.01	0.07	0.05
BOD	mg/L	4.22	10.71	15.34	21.84	2.17
Oksigen terlarut	mg/L	6.93	6	7.48	5.97	5.08
Koli tinja	Jml/100 mL	193	1100000	24000000	210000	180000
Debit	m3/detik	10	21.9	2.9	2.2	2.8

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2015)			
		Agustus	September	Oktober	November
Temperatur	oC	21.9	19.5	23.5	20.21
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.014	0.017	0.017	0.011
BOD	mg/L	2	2.57	2	2
Oksigen terlarut	mg/L	4.3	4.1	4.4	4.1
Koli tinja	Jml/100 mL	100	100	90	100
Debit	m3/detik	1.69	0.89	0.55	30.67

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2016)				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	29	20	29	25	25
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01
BOD	mg/L	9	25	12	6	5
Oksigen terlarut	mg/L	3.88	1.29	6.68	7.31	7.31
Koli tinja	Jml/100 mL	13000	7900	13000	43000	46000
Debit	m3/detik	13.5	2.8	9.65	2.73	5.22

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2017)				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	23	24	20	26	23
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
BOD	mg/L	7.65	5.77	4.13	5.19	8.01
Oksigen terlarut	mg/L	4	6.76	7.2	5.7	4
Koli tinja	Jml/100 mL	12000	22000	3500	13000	9200
Debit	m3/detik	3.12	1.13	2.35	2.1	4

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

## B. Titik Pengukuran Jembatan Koyod

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2013)				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	22.4	23.8	24.7	29.8	26.5
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.18	0.25	0.28	3.22	0.27
BOD	mg/L	6	20	10	150	18
Oksigen terlarut	mg/L	5.49	8.8	3.52	2.05	3.95
Koli tinja	Jml/100 mL	21000	460	93000	200000	240000
Debit	m3/detik	12.48	5.36	17.87	5.04	6.7

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2014)				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	24	23.3	24.6	28.5	27
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.66	2.61	0.03	4.99	0
BOD	mg/L	5.46	10.68	30.22	126.11	54.91
Oksigen terlarut	mg/L	5.9	5.6	2.9	0.6	1.6
Koli tinja	Jml/100 mL	2400	31000	930000	210000	1100000
Debit	m3/detik	19.1	9.4	4.4	1	3.11

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2015)			
		Agustus	September	Oktober	November
Temperatur	oC	22.6	23.9	22.9	24.5
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.015	0.019	0.02	0.015
BOD	mg/L	6.98	3.79	8.29	6.21
Oksigen terlarut	mg/L	2.9	3.3	2.6	2.9
Koli tinja	Jml/100 mL	120	120	120	100
Debit	m3/detik	5.6	0.75	0.87	5.54

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2016)				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	28	26	28	24	25
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.01	0.05	0.03	0.1	0.01
BOD	mg/L	10	18	42	14	5
Oksigen terlarut	mg/L	1.72	1.46	0.2	2.92	3.11
Koli tinja	Jml/100 mL	13000	12000	22000	49000	46000
Debit	m3/detik	18	13.91	1.72	13.61	9.18

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2017)				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	25	26	28	28	26
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.06	0.2	0.4	0.6	0.2
BOD	mg/L	18.04	13	106.85	39.28	19.26
Oksigen terlarut	mg/L	1.3	1.1	0.3	0.3	4
Koli tinja	Jml/100 mL	28000	49000	28000	35000	70000
Debit	m3/detik	3.1	3.92	4.26	2	2

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

### C. Titik Pengukuran Setelah IPAL Cisirung

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2013)				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	26.5	25	25.6	27.3	27.5
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.23	0.22	0.39	4.46	0.59
BOD	mg/L	12	36	15	65	40
Oksigen terlarut	mg/L	3.55	4.4	2.65	2.9	0.45
Koli tinja	Jml/100 mL	93000	2900	93000	150000	24000
Debit	m3/detik	14.94	38.35	99.33	21.01	20.53

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2014)				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	24.9	25.2	26.3	28.7	27
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.96	3.42	2.81	5.58	5.55
BOD	mg/L	7.14	12.4	13.94	135.83	67.8
Oksigen terlarut	mg/L	4.2	3.3	3.1	0.2	0.4
Koli tinja	Jml/100 mL	460	460000	15000000	1100000	1100000
Debit	m3/detik	127	77.3	25.3	8.6	8.1

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2015)			
		Agustus	September	Oktober	November
Temperatur	oC	29.2	27.6	25.7	27.5
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.015	0.019	0.017	0.015
BOD	mg/L	6.21	7.11	5.24	6.27
Oksigen terlarut	mg/L	3.8	3.1	3.1	2.9
Koli tinja	Jml/100 mL	90	130	100	80
Debit	m3/detik	10.79	15.44	12.17	374.2

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2016)				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	28	25	26	30	28
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.01	0.2	0.01	0.1	0.02
BOD	mg/L	14	21	10	11	6
Oksigen terlarut	mg/L	1.94	1.33	6.68	0.5	0.73
Koli tinja	Jml/100 mL	7900	14000	7900	46000	46000
Debit	m3/detik	220	36.37	2.29	50.03	44.28

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2017)				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	26	27	26	29	28
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.01	0.4	0.6	1	0.07
BOD	mg/L	9.83	12	43.29	44.14	23.14
Oksigen terlarut	mg/L	3.2	0.3	0.5	0.3	1.8
Koli tinja	Jml/100 mL	17000	63000	22000	22000	38800
Debit	m3/detik	4.19	18.35	5.66	7.4	35

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

#### D. Titik Pengukuran Nanjung

Parameter	Satuan	Periode (Tahun 2013)				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	27.7	25.3	26.2	29.6	27.6
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.22	0.58	0.63	4.58	2.87
BOD	mg/L	6	56	15	8	60
Oksigen terlarut	mg/L	6.36	3.5	3.08	1.56	0.33
Koli tinja	Jml/100 mL	3600	21000	9300	200000	4600000
Debit	m3/detik	4.91	9.72	141.14	81.6	44.36

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Periode (Tahun 2014)</b>				
		April	Mei	Juli	September	Oktober
Temperatur	oC	24.7	25.2	26.7	28.6	27
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.04	3.8	0.03	7.46	10.35
BOD	mg/L	6.75	11.66	21.21	82.97	31.89
Oksigen terlarut	mg/L	3.1	2.5	1.3	0.2	0.2
Koli tinja	Jml/100 mL	460	210000	9300000	1100000	1100000
Debit	m3/detik	132	80.1	11.4	6.9	7

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Periode (Tahun 2015)</b>			
		Agustus	September	Oktober	November
Temperatur	oC	25.8	27.6	28.9	27.8
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.065	0.065	0.053	0.065
BOD	mg/L	6.59	4.95	8.21	8.21
Oksigen terlarut	mg/L	3.6	3.3	2.9	2.8
Koli tinja	Jml/100 mL	80	110	120	90
Debit	m3/detik	12.77	6.05	1.67	120.99

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Periode (Tahun 2016)</b>				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	27	26	28	27	28
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.01	0.2	0.02	0.05	0.03
BOD	mg/L	15	22	15	13	9
Oksigen terlarut	mg/L	2.19	1.2	0.2	0.5	0.2
Koli tinja	Jml/100 mL	13000	14000	17000	63000	63000
Debit	m3/detik	33.6	67.04	11.7	47.48	40

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

<b>Parameter</b>	<b>Satuan</b>	<b>Periode (Tahun 2017)</b>				
		Mei	Juli	Agustus	September	Oktober
Temperatur	oC	26	26	28	28	27
Amonia Bebas (NH3-N)	mg/L	0.01	0.2	0.8	0.2	0.09
BOD	mg/L	10.83	23.81	40.13	40.13	13.11
Oksigen terlarut	mg/L	2.5	0.3	0.5	0.3	1.8
Koli tinja	Jml/100 mL	17000	49000	13000	13000	31000
Debit	m3/detik	8.64	34.88	21.06	13.6	27

Sumber: BPLHD Jawa Barat, 2018

## LAMPIRAN 2. LOKASI PENGAMATAN DI HULU SUNGAI CITARUM

### a. Wangisagara





**b. Jembatan Koyod**







c. Setelah IPAL Cisirung



### **Lampiran 3. Equation Layer di Software STELLA**

$$DO1(t) = DO1(t - dt) + (Reoksigenasi - Deoksigenasi) * dt$$

$$INIT DO1 = 6.93$$

INFLOWS:

$$Reoksigenasi = DO\_Inflow+Fotosintesis+Reaerasi$$

OUTFLOWS:

$$Deoksigenasi = BOD+Nitrifikasi+SOD$$

$$DO2(t) = DO2(t - dt) + (Reoksigenasi_2 - Deoksigenasi_2) * dt$$

$$INIT DO2 = 5.49$$

INFLOWS:

$$Reoksigenasi_2 = DO\_Inflow_2+Fotosintesis_2+Reaerasi_2$$

OUTFLOWS:

$$Deoksigenasi_2 = BOD_2+Nitrifikasi_2+SOD_2$$

$$DO3(t) = DO3(t - dt) + (Reoksigenasi_3 - Deoksigenasi_3) * dt$$

$$INIT DO3 = 3.55$$

INFLOWS:

$$Reoksigenasi_3 = DO\_Inflow_3+Fotosintesis_3+Reaerasi_3$$

OUTFLOWS:

$$Deoksigenasi_3 = BOD_3+Nitrifikasi_3+SOD_3$$

$$DO4(t) = DO4(t - dt) + (Reoksigenasi_4 - Deoksigenasi_4) * dt$$

$$INIT DO4 = 6.36$$

INFLOWS:

$$Reoksigenasi_4 = DO\_Inflow_4+Fotosintesis_4+Reaerasi_4$$

## OUTFLOWS:

$$\text{Deoksigenasi}_4 = \text{BOD}_4 + \text{Nitrifikasi}_4 + \text{SOD}_4$$

$$b1 = \text{COS}(3.14 * 1 * \text{fraction}) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}) / (((3.14 / \text{fraction})^2) - (2 * 3.14 * 1)^2))$$

$$b1\_2 = \text{COS}(3.14 * 1 * \text{fraction}_2) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_2) / (((3.14 / \text{fraction}_2)^2) - (2 * 3.14 * 1)^2))$$

$$b1\_3 = \text{COS}(3.14 * 1 * \text{fraction}_3) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_3) / (((3.14 / \text{fraction}_3)^2) - (2 * 3.14 * 1)^2))$$

$$b1\_4 = \text{COS}(3.14 * 1 * \text{fraction}_4) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_4) / (((3.14 / \text{fraction}_4)^2) - (2 * 3.14 * 1)^2))$$

$$b2 = \text{COS}(3.14 * 2 * \text{fraction}) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}) / (((3.14 / \text{fraction})^2) - (2 * 3.14 * 2)^2))$$

$$b2\_2 = \text{COS}(3.14 * 2 * \text{fraction}_2) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_2) / (((3.14 / \text{fraction}_2)^2) - (2 * 3.14 * 2)^2))$$

$$b2\_3 = \text{COS}(3.14 * 2 * \text{fraction}_3) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_3) / (((3.14 / \text{fraction}_3)^2) - (2 * 3.14 * 2)^2))$$

$$b2\_4 = \text{COS}(3.14 * 2 * \text{fraction}_4) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_4) / (((3.14 / \text{fraction}_4)^2) - (2 * 3.14 * 2)^2))$$

$$b3 = \text{COS}(3.14 * 3 * \text{fraction}) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}) / (((3.14 / \text{fraction})^2) - (2 * 3.14 * 3)^2))$$

$$b3\_2 = \text{COS}(3.14 * 3 * \text{fraction}_2) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_2) / (((3.14 / \text{fraction}_2)^2) - (2 * 3.14 * 3)^2))$$

$$b3\_3 = \text{COS}(3.14 * 3 * \text{fraction}_3) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_3) / (((3.14 / \text{fraction}_3)^2) - (2 * 3.14 * 3)^2))$$

$$b3\_4 = \text{COS}(3.14 * 3 * \text{fraction}_4) * ((4 * 3.14 / \text{fraction}_4) / (((3.14 / \text{fraction}_4)^2) - (2 * 3.14 * 3)^2))$$

$$\text{Beban\_BOD\_Dom} = 25.6 * 10^9$$

$$\text{Beban\_BOD\_Dom\_2} = 37 * 10^9$$

$$\text{Beban\_BOD\_Dom\_3} = 38.5 * 10^9$$

$$\text{Beban\_BOD\_Dom\_4} = 8 * 10^9$$

$$\text{BOD} = \text{Kd} * (\text{Theta}^\text{Temp} - 20) * ((\text{C\_BOD\_1} * \text{Q1} * 1000) + (\text{Beban\_BOD\_Dom})) / ((\text{Q1} * 1000) + \text{Q\_Limbah})$$

BOD\_2 = Kd\_2\*(Theta\_2^(Temp\_2-20))\*((C\_BOD\_2\*Q2\*1000)+(Beban\_BOD\_Dom\_2))/((Q2\*1000)+Q\_Limbah\_2)

BOD\_3 = Kd\_3\*(Theta\_3^(Temp\_3-20))\*((C\_BOD\_3\*Q3\*1000)+(Beban\_BOD\_Dom\_3))/((Q3\*1000)+Q\_Limbah\_3)

BOD\_4 = Kd\_4\*(Theta\_4^(Temp\_4-20))\*((C\_BOD\_4\*Q4\*1000)+(Beban\_BOD\_Dom\_4))/((Q4\*1000)+Q\_Limbah\_4)

DO\_Inflow =  
(DO\_Citarik\*Q\_Citarik)+(DO1\*Q1\*1000))/((Q1\*1000)+Q\_Citarik)

DO\_Inflow\_2 =  
(DO\_Cirasea\*Q\_Cirasea)+(DO1\*Q1\*1000)+(DO2\*Q2\*1000)/(Q\_Cirasea+((Q1+Q2)\*1000))

DO\_Inflow\_3 =  
(DO\_Cisangkuy\*Q\_Cisangkuy)+(DO3\*Q3\*1000)+(DO2\*Q2\*1000)/(Q\_Cisangkuy+((Q3+Q2)\*1000))

DO\_Inflow\_4 =  
(DO\_Ciwidey\*Q\_Ciwidey)+(DO3\*Q3\*1000)+(DO4\*Q4\*1000)/(Q\_Ciwidey+((Q3+Q4)\*1000))

Fotosintesis = (pm\*(2\*fraction/3.14))+((b1+b2+b3)\*(COS((2\*3.14\*3)\*(waktu-fraction/2))))

Fotosintesis\_2 =  
(pm\_2\*(2\*fraction\_2/3.14))+((b1\_2+b2\_2+b3\_2)\*(COS((2\*3.14\*3)\*(waktu\_2-fraction\_2/2))))

Fotosintesis\_3 =  
(pm\_3\*(2\*fraction\_3/3.14))+((b1\_3+b2\_3+b3\_3)\*(COS((2\*3.14\*3)\*(waktu\_3-fraction\_3/2))))

Fotosintesis\_4 =  
(pm\_4\*(2\*fraction\_4/3.14))+((b1\_4+b2\_4+b3\_4)\*(COS((2\*3.14\*3)\*(waktu\_4-fraction\_4/2))))

fraction = 0.42

fraction\_2 = 0.42

fraction\_3 = 0.42

fraction\_4 = 0.42

K\_O2 = 1.4

K\_O2\_2 = 1.4

K\_O2\_3 = 1

K\_O2\_4 = 1.3

Kd = 0.11

Kd\_2 = 0.19

Kd\_3 = 0.1

Kd\_4 = 0.12

KL = 0.36

KL\_2 = 0.5

KL\_3 = 0.3

KL\_4 = 0.2

Kn = 0.26

Kn\_2 = 0.5

Kn\_3 = 0.1

Kn\_4 = 0.1

Ks = 1.01

Ks\_2 = 0.5

Ks\_3 = 0.7

Ks\_4 = 1.3

Nitrifikasi = 4.57\*Kn\*C\_NH3

Nitrifikasi\_2 = 4.57\*Kn\_2\*C\_NH3\_2

Nitrifikasi\_3 = 4.57\*Kn\_3\*C\_NH3\_3

Nitrifikasi\_4 = 4.57\*Kn\_4\*C\_NH3\_4

pm = 3.7

pm\_2 = 6

pm\_3 = 4.5

pm\_4 = 3.6

Q\_Cirasea = 93990

Q\_Cisangkuy = 163717

Q\_Citarik = 6750

Q\_Ciwidey = 6750

Q\_Limbah = 840000000

Q\_Limbah\_2 = 940000000

Q\_Limbah\_3 = 810000000

Q\_Limbah\_4 = 350000000

Reaerasi = KL\*(DO\_Sat-DO1)

Reaerasi\_2 = KL\_2\*(DO\_Sat\_2-DO2)

Reaerasi\_3 = KL\_3\*(DO\_Sat\_3-DO3)

Reaerasi\_4 = KL\_4\*(DO\_Sat\_4-DO4)

SOD = Ks\*DO1\*(DO1/(K\_O2+DO1))

SOD\_2 = Ks\_2\*DO2\*(DO2/(K\_O2\_2+DO2))

SOD\_3 = Ks\_3\*DO3\*(DO3/(K\_O2\_3+DO3))

SOD\_4 = Ks\_4\*DO4\*(DO4/(K\_O2\_4+DO4))

Theta = 1.041

Theta\_2 = 1.030

Theta\_3 = 1.040

Theta\_4 = 1.041

C\_BOD\_1 = GRAPH(TIME)

(3.00, 6.00), (6.00, 10.0), (9.00, 8.00), (12.0, 3.50), (15.0, 4.22), (18.0, 10.7),  
(21.0, 15.3), (24.0, 21.8), (27.0, 2.26), (30.0, 2.00), (33.0, 2.00), (36.0, 9.00),  
(39.0, 25.0), (42.0, 12.0), (45.0, 6.00), (48.0, 7.65), (51.0, 5.77), (54.0, 4.13),  
(57.0, 9.00), (60.0, 8.40)

C\_BOD\_2 = GRAPH(TIME)

(3.00, 6.00), (6.00, 20.0), (9.00, 10.0), (12.0, 150), (15.0, 5.46), (18.0, 10.7),  
(21.0, 30.2), (24.0, 126), (27.0, 6.98), (30.0, 3.79), (33.0, 8.29), (36.0, 6.21),  
(39.0, 10.0), (42.0, 18.0), (45.0, 42.0), (48.0, 14.0), (51.0, 5.00), (54.0, 18.0),  
(57.0, 13.0), (60.0, 107)

C\_BOD\_3 = GRAPH(TIME)

(3.00, 12.0), (6.00, 36.0), (9.00, 15.0), (12.0, 65.0), (15.0, 40.0), (18.0, 7.14),  
(21.0, 12.4), (24.0, 13.9), (27.0, 136), (30.0, 6.21), (33.0, 7.11), (36.0, 5.24),

(39.0, 6.27), (42.0, 14.0), (45.0, 21.0), (48.0, 10.0), (51.0, 11.0), (54.0, 6.00),  
(57.0, 9.83), (60.0, 12.0)

C\_BOD\_4 = GRAPH(TIME)

(3.00, 6.00), (6.00, 56.0), (9.00, 15.0), (12.0, 8.00), (15.0, 6.75), (18.0, 11.7),  
(21.0, 21.2), (24.0, 83.0), (27.0, 6.59), (30.0, 4.95), (33.0, 8.21), (36.0, 8.21),  
(39.0, 15.0), (42.0, 22.0), (45.0, 15.0), (48.0, 13.0), (51.0, 9.00), (54.0, 10.8),  
(57.0, 23.8), (60.0, 40.1)

C\_NH3 = GRAPH(TIME)

(3.00, 0.17), (6.00, 0.13), (9.00, 0.08), (12.0, 0.01), (15.0, 0.79), (18.0, 0.71),  
(21.0, 0.01), (24.0, 0.014), (27.0, 0.017), (30.0, 0.017), (33.0, 0.011), (36.0, 0.01),  
(39.0, 0.01), (42.0, 0.01), (45.0, 0.03), (48.0, 0.01), (51.0, 0.01), (54.0, 0.01),  
(57.0, 0.01), (60.0, 0.01)

C\_NH3\_2 = GRAPH(TIME)

(3.00, 0.18), (6.00, 0.25), (9.00, 0.28), (12.0, 3.22), (15.0, 0.66), (18.0, 2.61),  
(21.0, 0.02), (24.0, 4.99), (27.0, 0.015), (30.0, 0.019), (33.0, 0.02), (36.0, 0.015),  
(39.0, 0.01), (42.0, 0.05), (45.0, 0.03), (48.0, 0.1), (51.0, 0.06), (54.0, 0.2), (57.0,  
0.4), (60.0, 0.6)

C\_NH3\_3 = GRAPH(TIME)

(3.00, 0.23), (6.00, 0.22), (9.00, 0.39), (12.0, 4.46), (15.0, 0.96), (18.0, 3.42),  
(21.0, 2.81), (24.0, 5.58), (27.0, 0.015), (30.0, 0.019), (33.0, 0.017), (36.0, 0.015),  
(39.0, 0.01), (42.0, 0.2), (45.0, 0.01), (48.0, 0.2), (51.0, 0.01), (54.0, 0.1), (57.0,  
0.01), (60.0, 0.4)

C\_NH3\_4 = GRAPH(TIME)

(3.00, 0.22), (6.00, 0.58), (9.00, 0.63), (12.0, 4.58), (15.0, 0.04), (18.0, 3.80),  
(21.0, 0.03), (24.0, 7.46), (27.0, 0.065), (30.0, 0.065), (33.0, 0.053), (36.0, 0.065),  
(39.0, 0.01), (42.0, 0.2), (45.0, 0.02), (48.0, 0.05), (51.0, 0.01), (54.0, 0.2), (57.0,  
0.8), (60.0, 0.2)

DO\_Cirasea = GRAPH(TIME)

(3.00, 5.40), (6.00, 5.00), (9.00, 5.00), (12.0, 5.80), (15.0, 5.90), (18.0, 5.20),  
(21.0, 6.40), (24.0, 5.00), (27.0, 5.30), (30.0, 6.10), (33.0, 5.00), (36.0, 6.50),  
(39.0, 7.40), (42.0, 6.30), (45.0, 5.50), (48.0, 4.30), (51.0, 5.00), (54.0, 5.20),  
(57.0, 6.30), (60.0, 5.50)

DO\_Cisangkuy = GRAPH(TIME)

(3.00, 5.50), (6.00, 5.00), (9.00, 6.10), (12.0, 5.20), (15.0, 5.70), (18.0, 5.40),  
(21.0, 5.60), (24.0, 5.20), (27.0, 5.90), (30.0, 5.40), (33.0, 5.80), (36.0, 5.60),  
(39.0, 6.00), (42.0, 6.70), (45.0, 5.30), (48.0, 5.30), (51.0, 6.10), (54.0, 6.90),  
(57.0, 5.50), (60.0, 6.50)

**DO\_Citarik = GRAPH(TIME)**

(3.00, 5.69), (6.00, 5.82), (9.00, 6.33), (12.0, 5.70), (15.0, 5.69), (18.0, 6.00),  
(21.0, 6.33), (24.0, 5.70), (27.0, 5.00), (30.0, 5.00), (33.0, 5.00), (36.0, 5.30),  
(39.0, 5.10), (42.0, 5.00), (45.0, 5.30), (48.0, 5.20), (51.0, 5.50), (54.0, 5.90),  
(57.0, 5.20), (60.0, 5.50)

**DO\_Ciwidey = GRAPH(TIME)**

(3.00, 5.00), (6.00, 5.30), (9.00, 5.50), (12.0, 5.40), (15.0, 5.10), (18.0, 6.00),  
(21.0, 6.30), (24.0, 6.10), (27.0, 6.40), (30.0, 5.00), (33.0, 5.10), (36.0, 5.00),  
(39.0, 5.20), (42.0, 5.90), (45.0, 5.50), (48.0, 5.20), (51.0, 5.00), (54.0, 5.30),  
(57.0, 5.50), (60.0, 5.50)

**DO\_Sat = GRAPH(Temp)**

(0.00, 14.6), (2.00, 13.8), (4.00, 13.1), (6.00, 12.5), (8.00, 11.9), (10.0, 11.3),  
(12.0, 10.8), (14.0, 10.4), (16.0, 9.95), (18.0, 9.54), (20.0, 9.17), (22.0, 8.83),  
(24.0, 8.53), (26.0, 8.22), (28.0, 7.92), (30.0, 7.63)

**DO\_Sat\_2 = GRAPH(Temp\_2)**

(0.00, 14.6), (2.00, 13.8), (4.00, 13.1), (6.00, 12.5), (8.00, 11.9), (10.0, 11.3),  
(12.0, 10.8), (14.0, 10.4), (16.0, 9.95), (18.0, 9.54), (20.0, 9.17), (22.0, 8.83),  
(24.0, 8.53), (26.0, 8.22), (28.0, 7.92), (30.0, 7.63)

**DO\_Sat\_3 = GRAPH(Temp\_3)**

(0.00, 14.6), (2.00, 13.8), (4.00, 13.1), (6.00, 12.5), (8.00, 11.9), (10.0, 11.3),  
(12.0, 10.8), (14.0, 10.4), (16.0, 9.95), (18.0, 9.54), (20.0, 9.17), (22.0, 8.83),  
(24.0, 8.53), (26.0, 8.22), (28.0, 7.92), (30.0, 7.63)

**DO\_Sat\_4 = GRAPH(Temp\_4)**

(0.00, 14.6), (2.00, 13.8), (4.00, 13.1), (6.00, 12.5), (8.00, 11.9), (10.0, 11.3),  
(12.0, 10.8), (14.0, 10.4), (16.0, 9.95), (18.0, 9.54), (20.0, 9.17), (22.0, 8.83),  
(24.0, 8.53), (26.0, 8.22), (28.0, 7.92), (30.0, 7.63)

**Q1 = GRAPH(TIME)**

(3.00, 1.98), (6.00, 84.8), (9.00, 14.6), (12.0, 3.29), (15.0, 10.0), (18.0, 18.0),  
(21.0, 2.90), (24.0, 1.69), (27.0, 0.89), (30.0, 0.55), (33.0, 30.7), (36.0, 13.5),  
(39.0, 10.0), (42.0, 9.25), (45.0, 2.73), (48.0, 3.12), (51.0, 1.13), (54.0, 2.35),  
(57.0, 2.00), (60.0, 4.00)

**Q2 = GRAPH(TIME)**

(3.00, 12.5), (6.00, 5.36), (9.00, 17.9), (12.0, 5.04), (15.0, 19.1), (18.0, 9.40),  
(21.0, 4.40), (24.0, 1.00), (27.0, 5.60), (30.0, 0.75), (33.0, 0.87), (36.0, 5.54),  
(39.0, 18.0), (42.0, 13.9), (45.0, 1.72), (48.0, 13.6), (51.0, 3.10), (54.0, 3.92),  
(57.0, 4.26), (60.0, 2.00)

**Q3 = GRAPH(TIME)**

(3.00, 14.9), (6.00, 38.4), (9.00, 99.3), (12.0, 21.0), (15.0, 127), (18.0, 77.3),  
(21.0, 25.3), (24.0, 8.60), (27.0, 10.8), (30.0, 15.4), (33.0, 12.2), (36.0, 374),  
(39.0, 220), (42.0, 36.4), (45.0, 2.29), (48.0, 50.0), (51.0, 4.19), (54.0, 18.4),  
(57.0, 5.66), (60.0, 7.40)

Q4 = GRAPH(TIME)

(3.00, 4.91), (6.00, 9.72), (9.00, 141), (12.0, 81.6), (15.0, 132), (18.0, 80.1), (21.0,  
11.4), (24.0, 6.90), (27.0, 12.8), (30.0, 6.05), (33.0, 1.67), (36.0, 121), (39.0,  
33.6), (42.0, 67.0), (45.0, 11.7), (48.0, 47.5), (51.0, 1.13), (54.0, 34.9), (57.0,  
21.1), (60.0, 13.6)

Temp = GRAPH(TIME)

(3.00, 21.6), (6.00, 21.9), (9.00, 23.8), (12.0, 24.7), (15.0, 20.0), (18.0, 19.0),  
(21.0, 23.0), (24.0, 24.5), (27.0, 23.0), (30.0, 19.5), (33.0, 23.5), (36.0, 20.2),  
(39.0, 29.0), (42.0, 29.1), (45.0, 29.0), (48.0, 25.0), (51.0, 23.0), (54.0, 24.0),  
(57.0, 20.0), (60.0, 26.0)

Temp\_2 = GRAPH(TIME)

(3.00, 22.4), (6.00, 23.8), (9.00, 24.7), (12.0, 29.8), (15.0, 24.0), (18.0, 23.3),  
(21.0, 24.6), (24.0, 28.5), (27.0, 22.6), (30.0, 23.9), (33.0, 22.9), (36.0, 24.5),  
(39.0, 28.0), (42.0, 26.0), (45.0, 28.0), (48.0, 24.0), (51.0, 25.0), (54.0, 26.0),  
(57.0, 28.0), (60.0, 28.0)

Temp\_3 = GRAPH(TIME)

(3.00, 26.5), (6.00, 25.0), (9.00, 25.6), (12.0, 27.3), (15.0, 24.9), (18.0, 25.2),  
(21.0, 26.3), (24.0, 28.7), (27.0, 29.2), (30.0, 27.6), (33.0, 25.7), (36.0, 27.5),  
(39.0, 28.0), (42.0, 25.0), (45.0, 26.0), (48.0, 30.0), (51.0, 26.0), (54.0, 27.0),  
(57.0, 26.0), (60.0, 29.0)

Temp\_4 = GRAPH(TIME)

(3.00, 27.7), (6.00, 25.3), (9.00, 26.2), (12.0, 29.6), (15.0, 24.7), (18.0, 25.2),  
(21.0, 26.7), (24.0, 28.6), (27.0, 25.8), (30.0, 27.6), (33.0, 28.9), (36.0, 27.0),  
(39.0, 26.0), (42.0, 28.0), (45.0, 28.0), (48.0, 26.0), (51.0, 26.0), (54.0, 28.0),  
(57.0, 28.0), (60.0, 26.0)

waktu = GRAPH(TIME)

(3.00, 90.0), (6.00, 180), (9.00, 270), (12.0, 360), (15.0, 450), (18.0, 540), (21.0,  
630), (24.0, 720), (27.0, 810), (30.0, 900), (33.0, 990), (36.0, 1080), (39.0, 1170),  
(42.0, 1260), (45.0, 1350), (48.0, 1440), (51.0, 1530), (54.0, 1620), (57.0, 1710),  
(60.0, 1800)

waktu\_2 = GRAPH(TIME)

(3.00, 90.0), (6.00, 180), (9.00, 270), (12.0, 360), (15.0, 450), (18.0, 540), (21.0,  
630), (24.0, 720), (27.0, 810), (30.0, 900), (33.0, 990), (36.0, 1080), (39.0, 1170),

(42.0, 1260), (45.0, 1350), (48.0, 1440), (51.0, 1530), (54.0, 1620), (57.0, 1710),  
(60.0, 1800)

waktu\_3 = GRAPH(TIME)

(3.00, 90.0), (6.00, 180), (9.00, 270), (12.0, 360), (15.0, 450), (18.0, 540), (21.0,  
630), (24.0, 720), (27.0, 810), (30.0, 900), (33.0, 990), (36.0, 1080), (39.0, 1170),  
(42.0, 1260), (45.0, 1350), (48.0, 1440), (51.0, 1530), (54.0, 1620), (57.0, 1710),  
(60.0, 1800)

waktu\_4 = GRAPH(TIME)

(3.00, 90.0), (6.00, 180), (9.00, 270), (12.0, 360), (15.0, 450), (18.0, 540), (21.0,  
630), (24.0, 720), (27.0, 810), (30.0, 900), (33.0, 990), (36.0, 1080), (39.0, 1170),  
(42.0, 1260), (45.0, 1350), (48.0, 1440), (51.0, 1530), (54.0, 1620), (57.0, 1710),  
(60.0, 1800)

#### LAMPIRAN 4. DATA DAN GRAFIK HASIL SIMULASI MODEL

Months	DO1	DO2	DO3	DO4
3	6.93	5.49	3.55	6.36
6	5.87	1.75	3.82	0.00
9	5.84	2.49	4.30	2.46
12	5.14	1.04	2.06	1.05
15	4.29	0.16	0.98	0.40
18	3.67	0.12	0.41	0.15
21	4.60	1.33	0.34	0.06
24	4.20	0.77	0.18	0.02
27	4.19	1.97	2.20	0.53
30	4.79	3.69	2.96	2.44
33	5.23	3.63	3.90	3.68
36	5.20	3.58	2.18	2.56
39	3.09	2.56	0.00	0.00
42	1.60	1.82	1.42	0.00
45	2.85	1.38	2.51	0.53
48	4.44	1.78	1.91	1.44
51	5.82	2.99	4.50	2.13
54	6.17	2.46	4.84	1.68
57	6.40	1.87	3.77	1.85
60	4.98	0.82	3.00	1.70
Final	3.81	0.31	2.98	1.48
Data Simulasi Model: (1)				

