



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN FOSFAT PADA BADAN AIR DENGAN INPUT
LIMBAH SECARA MENERUS
(Studi Kasus: Sungai Pesanggrahan dengan Input Lindi
TPA Cipayung Kota Depok)**

SKRIPSI

**GITA LESTARI
0706275605**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMODELAN FOSFAT PADA BADAN AIR DENGAN INPUT
LIMBAH SECARA MENERUS
(Studi Kasus: Sungai Pesangrahan dengan Input Lindi
TPA Cipayung Kota Depok)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**GITA LESTARI
0706275605**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
DEPOK
JUNI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Gita Lestari

NPM : 0706275605

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Gita Lestari
NPM : 0706275605
Program Studi : Teknik Lingkungan
Judul Skripsi : Pemodelan Fosfat Pada Badan Air dengan Input Limbah Secara Menerus (Studi Kasus: Sungai Pesanggrahan dengan Input Lindi TPA Cipayang Kota Depok)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Nyoman Suwartha S.T., M.T., M.Agr. (.....)

Pembimbing II : Ir. Irma Gusniani D., M.Sc. (.....)

Penguji I : Dr. Ir. Djoko M. Hartono, S.E., M.Eng. (.....)

Penguji II : Ir. G.S B. Andari Kristanto, M.Eng., Ph.D. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 15 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Lingkungan pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Nyoman Suwartha, S.T., M.T., M.Agr., dan Ir. Irma Gusniani, M.Sc., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Dwinanti Rika Mananthi, S.T., M.T., yang telah banyak membantu dalam pemahaman prinsip pemodelan kualitas air permukaan;
- (3) Para dosen Departemen Teknik Sipil dan Program Studi Teknik Lingkungan, yang telah membimbing dan memberi dukungan moril dan materil selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi;
- (4) Orang tua dan keluarga saya yang selalu memberikan dukungan materil dan moril;
- (5) Pihak TPA Cipayung yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (6) Departemen Teknik Sipil FTUI, Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Depok, serta Kesbanglinmas Kota Depok yang telah memberikan izin penelitian di TPA Cipayung Kota Depok.
- (7) Subagyo, Licka Kamadewi, dan Sri Diah Handayani, selaku laboran yang telah memberikan bantuan dalam pelaksanaan penelitian di laboratorium dan di lapangan.
- (8) Hana Maryam Ismail dan Adhie Kurnia, atas kerjasama yang baik dan dukungannya sebagai teman satu penelitian dalam skripsi ini.

- (9) Vini Widyaningsih, Widya Larastika, Engga Rahmawati, Agnes Elita Anne, Siti Fatmawati serta seluruh rekan-rekan Teknik Lingkungan Universitas Indonesia Angkatan 2007 yang selalu setia memberikan dukungan mental dan semangat kepada saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
- (10) Semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, yang telah membantu dan memberi dukungan secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Gita Lestari
NPM : 0706275605
Program Studi : Teknik Lingkungan
Departemen : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pemodelan Fosfat Pada Badan Air dengan Input Limbah Secara Menerus (Studi Kasus: Sungai Pesanggrahan dengan Input Lindi TPA Cipayung Kota Depok)

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di :
Pada tanggal :

Yang menyatakan

(Gita Lestari)

ABSTRAK

Nama : Gita Lestari
Program Studi : Teknik Lingkungan
Judul : Pemodelan Fosfat Pada Badan Air dengan Input Limbah Secara Menerus (Studi Kasus: Sungai Pesanggrahan dengan Input Lindi TPA Cipayang Kota Depok)

Fosfat merupakan nutrien yang diperlukan bagi kelangsungan kehidupan akuatik. Namun, keberadaannya dalam jumlah yang berlebih dapat menurunkan produktivitas perairan. Akibat kandungan fosfat yang berlebih, perairan dapat mengalami eutrofikasi. Pemodelan kualitas air permukaan dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui konsentrasi fosfat di Sungai Pesanggrahan yang mendapatkan input lindi dari TPA Cipayang Kota Depok. Model dibuat untuk mengetahui perubahan konsentrasi fosfat dalam sungai terhadap jarak dan terhadap waktu. Perhitungan model perubahan konsentrasi fosfat dalam kondisi *steady state* diselesaikan dengan pendekatan *control volume*. Kemudian perhitungan model dilanjutkan dengan menggunakan metode *finite difference* dan pendekatan *forward-time/centered-space* untuk mengetahui perubahan konsentrasi dalam kondisi *unsteady*. Hasil perhitungan tersebut adalah berupa model perubahan konsentrasi fosfat terhadap jarak (x) dan waktu (t).

Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa konsentrasi awal fosfat dalam Sungai Pesanggrahan cukup tinggi yaitu 1,47 mg/L. Nilai tersebut tidak memenuhi klasifikasi perairan kelas I, II, dan III seperti yang tercantum dalam PP No. 82 Tahun 2001. Observasi lapangan dilakukan sebagai bentuk validasi terhadap model. Perbandingan hasil observasi dengan model menunjukkan terjadinya *over predict*, yaitu hasil prediksi model lebih tinggi daripada pemeriksaan konsentrasi secara langsung (observasi). Hasil pemeriksaan fosfat dalam sungai secara observasi berkisar 1,50 hingga 1,96 mg/L pada jarak 2 hingga 4 m dari titik input lindi. Sedangkan menurut prediksi model, konsentrasi fosfat pada jarak 2 hingga 4 m adalah berkisar 2,03 mg/L. Sementara untuk pemeriksaan konsentrasi yang berubah terhadap waktu, dari observasi diketahui bahwa kenaikan konsentrasi yang terjadi berkisar 0,02 hingga 0,5 mg/L. Sedangkan kenaikan konsentrasi yang diprediksi oleh model adalah sebesar 0,8 hingga 1,1 mg/L.

Perbedaan tersebut dapat terjadi karena adanya batasan-batasan yang diambil oleh penulis dalam penyusunan model. Untuk meningkatkan validitas model, perlu ditinjau kembali batasan yang diambil oleh penulis. Sementara untuk mengantisipasi terjadinya eutrofikasi dalam Sungai Pesanggrahan, dapat dilakukan dengan meningkatkan efisiensi removal fosfat pada Instalasi Pengolahan Air Lindi TPA Cipayang.

Kata kunci:

Fosfat, Eutrofikasi, Pemodelan, Sungai Pesanggrahan, TPA Cipayang, Lindi

ABSTRACT

Name : Gita Lestari
Study Program : Environmental Engineering
Title : Phosphate Modelling in Surface Water with Step Loading Input (Case Study: Pesanggrahan River with Leachate Input from Cipayung Landfill, Depok)

Phosphate is an important nutrient for aquatic life. However, excessive amounts of phosphate can reduce the productivity of waters. Excess phosphate can lead waters to eutrophic condition. Surface water quality modelling in this study is conducted to predict the concentration of phosphate in Pesanggrahan River which receives leachate from Cipayung Landfill at Depok. Model is used to predict the alteration concentration against the distance (space) and time. Model calculation for alteration concentration in steady state condition is solved by control volume approach. Then, model calculation with finite difference methods and forward-time/centered-space approach is done to determine the alteration concentration in unsteady conditions. The result of these calculations is a model for alteration concentration against the distance (x) and time(t).

Direct examination results showed that the initial concentration of phosphate in Pesanggrahan River is quite high at 1,47 mg/L. It doesn't meet the classification of class I, II, and III of waters listed in PP No.82/2001. Field observations is conducted as a form of model validation. Comparison of observation results with model results indicates an over-predict condition. It denotes that the result of model predictions was higher than direct examination by observations. Observation results showed that phosphate concentration in the river is ranged at 1,50 to 1,96 mg/L for the distance of 2 to 4 m from the leachate input. Meanwhile, according to model predictions, the concentration of phosphate at a distance of 2 to 4 m is about 2.03 mg / L. As for the examination of alteration concentration against the time, observation results showed that the increasing concentration occurred is about 0,02 to 0,5 mg/L. While the increasing concentration predicted by the model is ranged at 0,8 to 1,1 mg/L.

Such differences may occur because of the limitations and assumptions taken for the model calculation. To increase the validity of models, its assumptions need to be refined. The potential action required to anticipate the occurrence of eutrophication in Pesanggrahan River is to increase the efficiency of phosphate removal in Leachate Treatment Plant of Cipayung Landfill.

Key words:

Phosphate, Eutrophication, Modelling, Pesanggrahan River, Cipayung Landfill, Leachate

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	7
2.1 Fosfat	7
2.1.1 Sumber.....	7
2.1.2 Siklus	8
2.1.3 Metode Pengukuran.....	10
2.1.3.1 Analisa Ortofosfat	10
2.1.3.2 Analisa Polifosfat	11
2.1.3.3 Analisa Fosfat Total	11
2.2 Eutrofikasi.....	12
2.2.1 Faktor yang Mempengaruhi Eutrofikasi.....	13
2.2.1.1 Pengayaan Nutrien	13
2.2.1.2 Hidrodinamik	14
2.2.1.3 Faktor Lingkungan	14

2.2.1.4	Mikroba dan Keanekaragaman Hayati	15
2.3	Klasifikasi Perairan Berdasarkan Produktivitasnya	16
2.4	Lindi	17
2.5	Pemodelan Kualitas Air	19
2.5.1	Spesifikasi Masalah	19
2.5.2	Pemilihan Model	19
2.5.3	Aplikasi Awal	21
2.5.4	Kalibrasi	21
2.5.5	Konfirmasi	21
2.5.6	Manajemen Aplikasi	22
2.5.7	Audit Akhir	22
2.6	Laju Reaksi	22
2.7	Keseimbangan Massa	25
2.8	Keseimbangan Massa Untuk Sistem Terdistribusi	26
2.9	Pendekatan <i>Control Volume</i> Untuk Sistem <i>Steady State</i>	30
2.10	Pendekatan <i>Finite Difference</i>	33
2.11	Penyelesaian Model dengan Variabel Waktu	34
2.12	Keseimbangan Massa Untuk Input <i>Point Source</i>	36
2.13	Jenis Input Beban (<i>Loading</i>)	37
2.14	Hidrogeometri Sungai	39
2.15	Dinamika Aliran	41
2.16	Metode Numerik	42
2.16.1	Metode Heun	42
2.16.2	Metode Runge-Kutta	44
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	46
3.1	Umum	46
3.2	Kerangka Pemikiran	46
3.3	Kerangka Penelitian	47
3.4	Tahapan Penelitian	49
3.4.1	Ide Studi	49
3.4.2	Studi Literatur	49
3.4.3	Pemilihan Lokasi	50

3.4.4 Studi Awal Lokasi	50
3.4.5 Spesifikasi dan Batasan Masalah	52
3.4.6 Pengembangan Model	52
3.4.6.1 Model Perubahan Konsentrasi Dalam Kondisi <i>Steady State</i> dengan Pendekatan <i>Control Volume</i>	53
3.4.6.2 Model Perubahan Konsentrasi dengan Metode <i>Finite Difference</i>	54
3.4.7 Penentuan Komponen Model.....	56
3.4.8 Validasi Model.....	63
3.5 Metode Pengukuran Fosfat	64
BAB 4 GAMBARAN UMUM LOKASI OBJEK STUDI.....	67
4.1 Gambaran Umum TPA Cipayung	67
4.2 Struktur Organisasi TPA Cipayung.....	69
4.3 Infrastruktur dan Fasilitas TPA Cipayung	69
4.4 Data Teknis TPA Cipayung	73
4.5 Operasional TPA Cipayung	75
4.6 Instalasi Pengolahan Lindi TPA Cipayung.....	77
BAB 5 PENGEMBANGAN MODEL	79
5.1 Komponen Model.....	79
5.1.1 Laju Reaksi (k).....	79
5.1.2 Kecepatan dan Debit Aliran Sungai (U dan Q_r)	81
5.1.3 Konsentrasi Fosfat Dalam Air Sungai (c_r).....	81
5.1.4 Debit Aliran Lindi (Q_w).....	81
5.1.5 Konsentrasi Fosfat Dalam Air Lindi (c_w)	82
5.1.6 <i>Loading</i> Lindi (W).....	82
5.1.7 Koefisien Dispersi (E dan E').....	82
5.1.8 Konsentrasi Awal (c_0).....	84
5.1.9 Selang Waktu (Δt)	84
5.2 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Dalam Kondisi <i>Steady State</i> dengan Pendekatan <i>Control Volume</i>	86
5.3 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi dengan Metode <i>Finite Difference</i>	87

5.3.1 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak.....	89
5.3.2 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu	91
5.4 Validasi Model.....	92
5.4.1 Perbandingan Hasil Observasi dan Perhitungan	93
BAB 6 ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	97
6.1 Analisa Pengembangan Model.....	97
6.1.1 Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak (x) Dalam Kondisi <i>Steady</i> dan <i>Unsteady</i>	98
6.1.2 Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu (t).....	103
6.2 Perbandingan Hasil Observasi dan Model.....	106
6.2.1 Hasil Observasi dan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak.....	107
6.2.2 Hasil Observasi dan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu	111
6.3 Konsentrasi Fosfat Dalam Air Lindi TPA Cipayung	114
6.4 Kondisi Sungai Pesanggrahan Ditinjau Dari Konsentrasi Fosfat ..	115
6.4.1 Kondisi Sungai Pesanggrahan Berdasarkan Hasil Observasi Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak (x).....	118
6.4.2 Kondisi Sungai Pesanggrahan Berdasarkan Hasil Observasi Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu (t)	118
BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN	120
7.1 Kesimpulan	120
7.2 Saran	121
DAFTAR REFERENSI	122

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Karakteristik Fisik, Kimia, dan Biologi Lindi	18
Tabel 3.1. Hasil Pengamatan Untuk Penentuan k	57
Tabel 4.1. Kondisi TPA Cipayang Kota Depok.....	69
Tabel 5.1. Hasil Pemeriksaan Konsentrasi Fosfat Dalam Sampel Air Sungai Pesanggrahan.....	79
Tabel 5.2. Variabel dan Nilai Untuk Penyelesaian Model.....	85
Tabel 5.3. Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap x dengan Pendekatan <i>Control Volume</i> (Sistem <i>Steady State</i>).....	86
Tabel 5.4. Hasil Perhitungan <i>Finite Difference</i> dengan Metode Numerik Runge Kutta Orde 4.....	88
Tabel 5.5. Hasil Perhitungan Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak Pada Δt ke-1	90
Tabel 5.6. Hasil Perhitungan Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu Pada Δx ke-10	92
Tabel 5.7. Hasil Pengukuran Konsentrasi Fosfat di Titik Observasi.....	93
Tabel 5.8. Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak Pada Δt ke-1 (2,88 detik).....	94
Tabel 5.9. Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu Pada Δx ke-3 (6 meter).....	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Siklus Fosfor.....	10
Gambar 2.2. Proses Pemodelan Kualitas Air dan Informasi yang Diperlukan	20
Gambar 2.3. Grafik Konsentrasi vs Waktu Untuk Reaksi Orde Nol.....	23
Gambar 2.4. Grafik Konsentrasi vs Waktu Untuk Reaksi Orde Satu.....	23
Gambar 2.5. Penentuan Nilai Orde Reaksi dan Laju Reaksi	24
Gambar 2.6. Reaktor Kotak Memanjang	27
Gambar 2.7. <i>Mixed-Flow Reactor</i>	28
Gambar 2.8. Pergerakan Zat Dalam Ruang dan Waktu Menurut Mekanisme (a) Adveksi dan (b) Difusi	28
Gambar 2.9. Keseimbangan Massa Dalam Sebuah <i>Control Volume</i>	30
Gambar 2.10. Dua Contoh Kondisi Batas Sistem Plug Flow (a) <i>Open Boundaries</i> (b) <i>Pipe Boundaries</i>	31
Gambar 2.11. Komputasi Grid Untuk Karakterisasi Dimensi Ruang dan Waktu.	34
Gambar 2.12. Notasi Pada Grid Menggambarkan Pendekatan FTCS	35
Gambar 2.13. Representasi Hasil Perhitungan Konsentrasi Dalam Ruang dan Waktu dengan Pendekatan FTCS	36
Gambar 2.14. <i>Point Source</i> dan <i>Distributed Source</i> Untuk Sistem Satu Dimensi	36
Gambar 2.15. Keseimbangan Massa Untuk Input <i>Point Source</i>	37
Gambar 2.16. Respons Badan Air Terhadap Beban Kontinu (<i>Step Loading</i>).....	38
Gambar 2.17. Plot Grafik Fungsi Beban $W(t)$ vs Waktu t	39
Gambar 2.18. Gambaran Grafis Metode Heun (a) <i>Predictor</i> (b) <i>Corrector</i>	43
Gambar 2.19. Penggambaran Grafis Metode Runge Kutta Orde Empat	45
Gambar 3.1. Alur Kerangka Pemikiran	47
Gambar 3.2. Bagan Alir Metodologi Penelitian	48
Gambar 3.3. Layout TPA Cipayung Kota Depok	51
Gambar 3.4. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Untuk Penentuan Nilai k	57
Gambar 3.5. Bagan Alir Penentuan k	58
Gambar 3.6. Ilustrasi Lokasi Pengukuran Untuk Mendapatkan Nilai U	59
Gambar 3.7. Bagan Alir Penentuan c_0	60
Gambar 3.8. Ilustrasi Lokasi Pengukuran Untuk Mendapatkan Nilai Q_r	61

Gambar 3.9. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Untuk Penentuan Nilai c_r	62
Gambar 3.10. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Observasi.....	63
Gambar 3.11. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Observasi.....	64
Gambar 4.1. Lokasi TPA Cipayung Melalui Pencitraan Udara	68
Gambar 4.2. Struktur Organisasi Pengurus TPA Cipayung.....	69
Gambar 4.3. Kondisi Lahan Penimbunan Baru TPA Cipayung Saat Proses Penghamparan Sampah.....	71
Gambar 4.4. Kondisi Lahan Penimbunan Lama TPA Cipayung Setelah Diberikan Tanah Penutup.....	71
Gambar 4.5. Kondisi Jalan Masuk TPA Cipayung.....	72
Gambar 4.6. Kondisi Fasilitas UPS di TPA Cipayung	72
Gambar 4.7. Layout TPA Cipayung Kota Depok	73
Gambar 4.8. Layout TPA Cipayung Melalui Pencitraan Udara.....	74
Gambar 4.9. Kondisi Saat Pembongkaran dan Penghamparan Sampah di Lahan Penimbunan Lama TPA Cipayung Kota Depok.....	76
Gambar 4.10. Instalasi Pengolahan Air Lindi 1 TPA Cipayung Depok	77
Gambar 4.11. Instalasi Pengolahan Air Lindi 2 TPA Cipayung Kota Depok	77
Gambar 4.12. Kondisi Sungai Pesanggrahan Sebagai Badan Air Penerima Air Olahan Lindi	78
Gambar 5.1. Grafik c vs t Orde Nol.....	80
Gambar 5.2. Grafik c vs t Orde Satu.....	80
Gambar 5.3. Grafik c vs t Orde Dua.....	80
Gambar 5.4. Grafik Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak (x) Dalam Kondisi <i>Steady State</i>	87
Gambar 5.5. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak di Setiap Perubahan Waktu	89
Gambar 5.6. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak	91
Gambar 5.7. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu	92
Gambar 5.8. Grafik Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak Pada Δt ke-1 (2,88 detik).....	94
Gambar 5.9. Grafik Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu Pada Δx ke-3 (6 meter).....	96

Gambar 6.1. Grafik Konsentrasi vs Waktu Pada Δx ke-10 dengan Perpanjangan t
Hingga 3600 Detik 106

Gambar 6.2. Lindi yang Tidak Tercampur Sempurna di Sungai Pesanggrahan . 108

Gambar 6.3. Kegiatan Mencuci di Hulu Sungai Pesanggrahan 117



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Fosfor merupakan unsur hara esensial yang diperlukan bagi kelangsungan kehidupan akuatik. Fosfor di alam terdapat dalam dua bentuk yaitu senyawa fosfat organik dan senyawa fosfat anorganik (Sastrawijaya, 1991). Fosfat organik pada air limbah dihasilkan dari makanan dan limbah domestik. Sementara fosfat anorganik terutama berasal dari penggunaan deterjen. Semua bentuk fosfat mengalami proses perubahan biologis menjadi fosfat organik yang selanjutnya digunakan oleh tanaman untuk menghasilkan energi. Fosfat bersama dengan nitrat merupakan salah satu zat hara yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan perkembangan organisme perairan (Muchtari, 1996).

Keberadaan senyawa fosfat dalam air sangat berpengaruh terhadap keseimbangan ekosistem. Kadar fosfat yang rendah ($<0,01$ mg/L) dalam perairan dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan alga. Keadaan ini disebut oligotrop (Alaerts & Santika, 1984). Namun kadar fosfat yang tinggi dalam perairan justru akan mengakibatkan terjadinya pertumbuhan berlebihan dari alga (*alga bloom*). Menurut Sawyer et al. (2003), *alga bloom* tidak terjadi ketika fosfat serta nitrogen berada dalam jumlah yang sangat terbatas. Suatu perairan dengan konsentrasi fosfat sebesar 0,08 mg/L sudah dapat dikatakan sebagai perairan eutrofik (Wetzel, 1983).

Eutrofikasi berawal dari masuknya nutrisi untuk tumbuhan di perairan dari limpasan permukaan atau saluran. Perairan yang kaya akan nutrisi kemudian menghasilkan sejumlah besar biomassa tumbuhan dengan fotosintesis, sejalan dengan jumlah biomassa hewan yang lebih kecil. Jasad biomassa yang mati berakumulasi dalam dasar perairan. Selanjutnya, akibat dari akumulasi jasad biomassa ini dapat terjadi pendangkalan sungai ataupun pertumbuhan tumbuhan yang berakar di dasar sungai menjadi rawa (Manahan, 2005).

Senyawa fosfat dalam air limbah dapat berasal dari limbah penduduk (domestik), industri dan pertanian. Limbah yang masuk ke perairan dapat meningkatkan konsentrasi fosfat dan dalam kondisi berkelanjutan dapat

mengakibatkan eutrofikasi. Lindi dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) umumnya mengandung konsentrasi fosfat yang tinggi. Menurut Tchobanoglous et al. (1993), lindi dari TPA yang berusia kurang dari 2 tahun umumnya mengandung total fosfat sebesar 5-100 mg/L. Lindi merupakan air yang terkontaminasi oleh sampah di lahan pembuangan. Lindi mengandung unsur limbah yang larut, tidak tertahan oleh tanah, dan tidak terdegradasi secara kimia maupun biokimia (Sawyer et al., 2003). Lindi yang dibuang ke sungai berpotensi meningkatkan konsentrasi fosfat dalam perairan tersebut.

Lindi yang dihasilkan oleh TPA Cipayung diolah dengan kolam stabilisasi (*stabilization pond*) sebelum akhirnya dibuang ke badan air Sungai Pesanggrahan yang berada di sisi selatan dan barat TPA. Pengolahan lindi dalam kolam tersebut bertujuan untuk mengurangi konsentrasi pencemar agar memenuhi standar baku mutu air limbah. Berdasarkan hasil survey awal penulis tahun 2010, di permukaan Sungai Pesanggrahan terlihat konsentrasi alga yang cukup besar. Hal ini diperkirakan karena kandungan nutrien yang tinggi dari buangan lindi TPA. Konsentrasi alga yang cukup besar ini dapat mengakibatkan terjadinya eutrofikasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi fosfat di Sungai Pesanggrahan sehingga dapat diperkirakan tingkat pencemaran yang terjadi sebagai akibat dari efluen lindi TPA Cipayung. Kemudian dibuat sebuah model untuk menghitung perubahan konsentrasi fosfat terhadap waktu dengan input buangan lindi secara menerus. Hasil perhitungan dengan model akan dibandingkan dengan hasil observasi di lapangan dan diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan bagi pihak terkait untuk mengendalikan serta memantau kondisi sungai yang mengalami eutrofikasi.

1.2 Perumusan Masalah

Fosfat sebagai unsur hara yang dibutuhkan untuk kehidupan akuatik terdapat dalam air dan air limbah. Masuknya limbah dengan kandungan fosfat ke badan air, memungkinkan pertumbuhan alga yang berlebihan yang mengakibatkan eutrofikasi (Manahan, 2005). Sungai Pesanggrahan mendapatkan buangan lindi dari TPA Cipayung yang mungkin mengandung fosfat dalam

konsentrasi tinggi. Pembuangan lindi ke Sungai Pesanggrahan yang dilakukan secara terus menerus (kontinu) dapat meningkatkan kandungan fosfat di dalamnya yang kemudian menjadikan sungai menjadi eutrofik. Sebuah upaya pengendalian perlu dilakukan untuk mencegah terjadinya eutrofikasi akibat masuknya limbah dengan kandungan fosfat yang tinggi ke dalam badan air tersebut. Pendugaan konsentrasi fosfat melalui pembuatan model dapat dilakukan sebagai suatu cara untuk mengetahui perubahan konsentrasi fosfat dalam badan air terhadap waktu dengan input buangan limbah secara menerus.

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana kondisi badan air Sungai Pesanggrahan akibat buangan lindi secara menerus ditinjau dari parameter fosfat?
- b. Bagaimana penyelesaian model perubahan konsentrasi fosfat dalam sungai akibat buangan limbah secara menerus?
- c. Apakah model mengenai teori buangan limbah pada sungai dapat diterapkan di Sungai Pesanggrahan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui kondisi badan air Sungai Pesanggrahan yang mendapat buangan lindi secara menerus dari TPA Cipayung, ditinjau dari parameter fosfat.
- b. Menentukan model perubahan konsentrasi fosfat dalam sungai akibat buangan limbah secara menerus untuk memperkirakan konsentrasi fosfat dalam Sungai Pesanggrahan yang mendapat buangan lindi secara menerus dari TPA Cipayung.
- c. Membuktikan bahwa model mengenai teori buangan limbah pada sungai dapat diterapkan di Sungai Pesanggrahan.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah:

- a. Penelitian dilakukan pada Sungai Pesanggrahan yang mendapat input limbah berupa lindi dari TPA Cipayung Kota Depok.

- b. Fokus pemodelan dilakukan terhadap konsentrasi fosfat dalam Sungai Pesanggrahan.
- c. Input limbah yang dianggap mempengaruhi konsentrasi fosfat yang ditinjau dibatasi hanya dari efluen lindi TPA Cipayung.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi beberapa pihak, yaitu:

- a. Bagi penulis

Melalui penelitian ini, penulis dapat mempelajari lebih dalam mengenai pemodelan kualitas air. Selain itu, secara umum penelitian ini juga dapat menambah ilmu dan pengalaman di bidang keilmuan penulis, yaitu Teknik Lingkungan. Selanjutnya, ilmu tersebut diharapkan dapat diaplikasikan dalam kehidupan penulis.

- b. Bagi pihak yang terkait

Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan bagi pihak terkait untuk mengendalikan serta memantau konsentrasi fosfat dalam sungai sehingga dapat dilakukan upaya pencegahan sebelum terjadi eutrofikasi yang lebih lanjut di dalam sungai.

- c. Bagi masyarakat

Penelitian ini memberikan informasi kepada masyarakat mengenai perilaku fosfat dalam badan air dan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Penelitian ini juga memberikan informasi mengenai pemodelan kualitas air permukaan sebagai sebuah bentuk pendugaan terhadap kondisi air permukaan.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara garis besar, sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup serta manfaat penelitian.

BAB 2 LANDASAN TEORI

Berisi teori-teori yang mendasari penelitian dan mendukung pengembangan model. Teori-teori yang dibahas meliputi teori mengenai sumber serta siklus dari fosfat, fenomena eutrofikasi dalam badan air, klasifikasi perairan berdasarkan produktivitasnya, lindi dan karakteristiknya, serta teori yang mendukung untuk pengembangan model seperti pengertian pemodelan kualitas air, teori keseimbangan massa, hingga metode numerik.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Berisi langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian, mulai dari kerangka pemikiran, kerangka penelitian, hingga penjelasan untuk tiap tahapan penelitian. Yang dimaksud tahapan penelitian adalah berawal dari ide studi, spesifikasi masalah hingga penyusunan dan aplikasi model serta observasi untuk validasi model.

BAB 4 GAMBARAN UMUM OBJEK STUDI

Dalam bab ini dibahas gambaran umum mengenai TPA Cipayung, infrastruktur dan fasilitas yang ada, data teknis, serta operasional TPA. Selain itu, dibahas pula mengenai instalasi pengolahan air lindi TPA Cipayung.

BAB 5 PENGEMBANGAN MODEL

Dalam bab ini dibahas pengembangan model yang dilakukan oleh penulis. Berawal dari penentuan setiap komponen model. Selanjutnya dibahas pula penyelesaian model perubahan konsentrasi terhadap jarak dan waktu serta validasi model dengan observasi.

BAB 6 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Hasil pengembangan model dan validasi dengan observasi kemudian dianalisa dan dibahas dalam bab ini. Secara garis besar, analisa dibagi menjadi tiga yaitu analisa pengembangan model, perbandingan model

dan hasil observasi, serta analisa kondisi badan air ditinjau dari konsentrasi fosfat.

BAB 7 PENUTUP

Berisi kesimpulan dari pengembangan model dan pembahasan yang telah dilakukan.



BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Fosfat

Fosfat merupakan senyawa dari fosfor yang terdapat di alam dalam bentuk organik dan anorganik (Sastrawijaya, 1991). Senyawa fosfat organik adalah fosfor yang terikat dengan senyawa-senyawa organis sehingga tidak berada dalam keadaan bebas. Dalam air bersih atau air buangan, fosfor yang bebas hampir tidak ditemui. Senyawa fosfat anorganik terdiri dari ortofosfat dan polifosfat. Ortofosfat adalah senyawa monomer seperti H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} dan PO_4^{3-} , sedangkan polifosfat atau disebut juga dengan *condensed phosphates* merupakan senyawa polimer seperti $(\text{PO}_3)_6^{3-}$ (heksametafosfat), $\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$ (tripolifosfat) dan $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ (pirofosfat) (Alaerts, 1984).

Menurut Manahan (2005), bentuk paling sederhana dari fosfat adalah ortofosfat (PO_4^{3-}). Ion pirofosfat ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$) merupakan bentuk pertama dari sebuah rangkaian rantai tak bercabang dari polifosfat yang dihasilkan dari kondensasi ortofosfat :



Ion trifosfat ($\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$) merupakan bentuk kedua dari sebuah rangkaian panjang polifosfat linear yang mungkin terbentuk. Semua senyawa polimer fosfat berhidrolisis menjadi bentuk yang lebih sederhana dalam air. Laju hidrolisis bergantung pada sejumlah faktor termasuk pH dan produk terakhir selalu merupakan bentuk dari ortofosfat sebagai senyawa monomer. Reaksi hidrolisis paling sederhana dari sebuah polifosfat adalah pada asam pirofosforik untuk menghasilkan asam ortofosforik :



2.1.1 Sumber

Setiap senyawa fosfat yang telah disebutkan di atas berada di alam dalam bentuk terlarut, tersuspensi atau terikat di dalam sel organisme. Dalam air limbah, senyawa fosfat dapat berasal dari limbah domestik, industri dan pertanian. Dalam limbah domestik biasanya terdapat fosfat dalam bentuk polifosfat dan fosfat

organis. Dari limbah industri yang mengandung deterjen dihasilkan polifosfat. Sedangkan dari kegiatan pertanian dihasilkan ortofosfat yang berasal dari bahan pupuk (Alaerts, 1984).

Menurut Sawyer (2003), limbah domestik relatif kaya akan fosfat. Deterjen sintetis umumnya memiliki kandungan fosfat anorganik sebesar 2 hingga 3 mg/L dan fosfat organik sebesar 0,5 hingga 1,0 mg/L. Pada umumnya, deterjen sintetis dalam bentuk padat yang didesain untuk kebutuhan rumah tangga mengandung sejumlah besar polifosfat, bahkan hingga 50%. Sebagian fosfat anorganik juga ditemukan dari limbah manusia sebagai hasil pengrusakan protein dan asam nukleat secara metabolis dan pemusnahan fosfor bebas dalam urin.

2.1.2 Siklus

Fosfor merupakan unsur yang tidak mempunyai bentuk gas yang stabil. Siklus fosfor berbeda dengan siklus biogeokimia lain seperti air, karbon, nitrogen dan sulfur. Dalam siklus fosfor tidak terdapat fase gas, walaupun sebenarnya terdapat sejumlah kecil asam fosforik (H_3PO_4) berada dalam atmosfer dan berkontribusi pada hujan asam. Hanya sedikit fosfor yang bersirkulasi di atmosfer karena dalam temperatur dan tekanan normal bumi, fosfor dan berbagai variasi senyawanya tidak berbentuk gas. Reservoir terbesar fosfor di alam adalah dalam batuan sedimen.

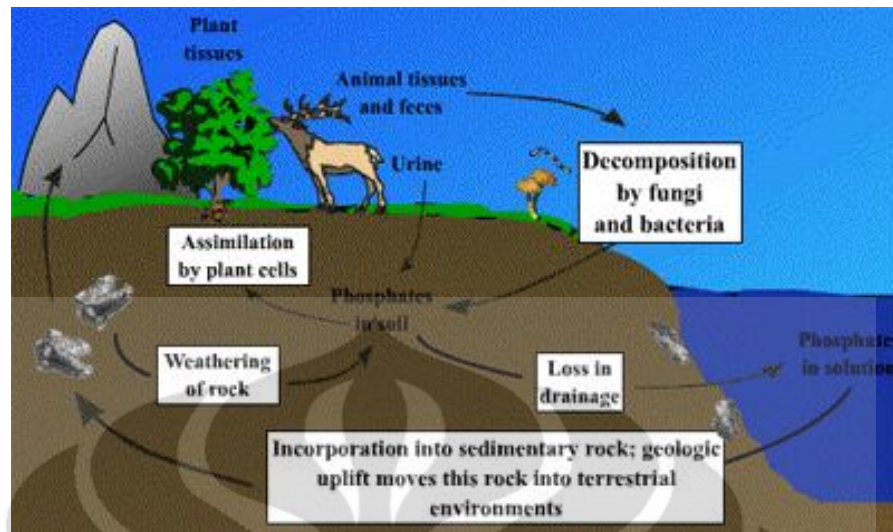
Ketika hujan, fosfat dikeluarkan dari batuan tersebut dan terdistribusi ke tanah dan perairan sekitarnya. Tanaman mengambil ion fosfat dari tanah. Fosfat kemudian berpindah dari tanaman ke hewan ketika hewan herbivora memakan tanaman dan hewan karnivora memakan tanaman dan hewan herbivora. Fosfat kemudian masuk ke dalam asam nukleat yang membentuk material genetik untuk organisme. Fosfat yang diabsorpsi oleh jaringan hewan melalui konsumsi tersebut kembali ke tanah melalui ekskresi urin dan feses, serta dari dekomposisi akhir tanaman dan hewan yang telah mati.

Proses yang sama terjadi dalam ekosistem perairan. Fosfor tidak mudah larut, terikat erat dengan molekul dalam tanah, maka sebagian besar fosfat mencapai perairan melalui limpasan partikel tanah. Fosfat juga memasuki perairan melalui limpasan pertanian, resapan saluran pembuangan air, deposit mineral

alami, dan limbah dari proses industri. Fosfat tersebut kemudian mengendap di dasar lautan dan danau. Ketika sedimen teraduk, fosfat kembali memasuki siklus fosfor, namun umumnya fosfat tersedia bagi organisme perairan melalui terjadinya erosi. Tanaman air mengambil fosfat dalam perairan tersebut yang kemudian berpindah ke organisme lain dengan tingkatan yang lebih tinggi melalui rantai makanan perairan.

Sementara fosfat sangat berguna dalam banyak proses biologis, dalam air permukaan konsentrasi fosfor dalam jumlah yang besar dianggap sebagai polutan. Fosfat memicu pertumbuhan plankton dan tumbuhan, serta mendukung pertumbuhan jenis tumbuhan yang berumput banyak. Pertumbuhan tanaman yang berlebihan ini berakibat pada konsumsi oksigen terlarut yang sangat besar, yang mengancam kelangsungan hidup ikan dan organisme perairan lainnya, sementara juga menghalangi masuknya cahaya matahari yang dibutuhkan oleh spesies di dasar perairan. Kejadian ini dikenal sebagai eutrofikasi.

Manusia dapat mempengaruhi siklus fosfor dengan berbagai cara, termasuk melalui penebangan hutan hujan tropis dan melalui penggunaan pupuk untuk pertanian. Ekosistem hutan hujan mempengaruhi siklus fosfor terutama melalui daur nutrisi, dengan sedikit atau tidak adanya nutrisi yang disimpan dalam tanahnya. Ketika hutan ditebang dan/atau dibakar, nutrisi yang normalnya tersimpan dalam tanaman dan batuan secara cepat terkikis oleh hujan lebat dan mengakibatkan lahan menjadi tidak produktif. Limpasan dari areal pertanian menghasilkan fosfat dalam jumlah besar. Tanaman seringkali tidak dapat mengabsorpsi seluruh pupuk dalam tanah, mengakibatkan limpasan pupuk dalam jumlah besar dan meningkatkan konsentrasi fosfat dalam sungai dan badan air lainnya. Selain itu, pemakaian deterjen pencuci berkontribusi signifikan pada konsentrasi fosfat dalam sungai dan danau.



Gambar 2.1. Siklus Fosfor

(Miller, 2001)

2.1.3 Metode Pengukuran

Secara fisik, fosfat terdiri dari fosfat terlarut dan tidak terlarut atau tersuspensi. Fosfat terlarut lolos dari filter membran dengan pori 0,45 μm . Fosfat total adalah jumlah fosfat terlarut dan tersuspensi. Antara kedua jenis fosfat tersebut, bentuk yang akan dianalisa tergantung dari keperluan pemeriksaan dan keadaan sampel. Untuk sampel air bersih biasanya hanya diperlukan pemeriksaan fosfat total terlarut dan ortofosfat terlarut. Sedangkan untuk sampel air limbah, mungkin diperlukan pemeriksaan fosfat lainnya (Alaerts, 1984).

Di antara pengukuran ortofosfat, polifosfat dan fosfat total, pengukuran ortofosfat lebih mudah dilakukan karena kestabilannya di bawah kondisi pH, waktu, dan temperatur pada saat pengukuran. Bentuk polifosfat maupun fosfat organik harus diubah ke dalam bentuk ortofosfat untuk pengukuran (Sawyer, 2003).

2.1.3.1 Analisa Ortofosfat

Fosfor dalam bentuk ortofosfat dapat diukur secara kuantitatif dengan metode gravimetri, volumetri, atau colorimetri. Metode gravimetri digunakan bila kandungan fosfat berada dalam jumlah yang sangat besar. Metode volumetri digunakan untuk kandungan fosfat yang melebihi 50 mg/L. Prosedur standar

pengukuran fosfat pada air bersih dan air limbah adalah menggunakan metode colorimetri (Sawyer, 2003).

Prinsip analisa ortofosfat dengan metode colorimetri disebut juga dengan metode asam asorbik. Amonium molibdat dan kalium antimonitartrat sebagai reagen bereaksi dalam suasana asam dengan ortofosfat hingga membentuk asam fosfomolibdik. Asam fosfomolibdik tersebut kemudian direduksi oleh asam asorbik sampai menjadi moden biru. Warna ini menunjukkan konsentrasi fosfor. Skala kadar fosfor yang dapat diukur adalah 0,01 mg/L sampai 2 mg/L. Konsentrasi fosfat didapatkan dari garis kalibrasi yang ditentukan dengan menggunakan alat spektrofotometer (Alaerts, 1984).

2.1.3.2 Analisa Polifosfat

Bila sampel air dipanaskan dalam suasana asam, maka semua polifosfat, pirofosfat, trifosfat, heksafosfat serta sebagian kecil fosfat organik akan terhidrolisis menjadi ortofosfat. Setelah hidrolisis tersebut, jumlah ortofosfat dapat dianalisa dengan metode asam asorbik. Jumlah polifosfat yang terkandung dalam air adalah selisih jumlah ortofosfat yang diukur setelah hidrolisis dengan jumlah ortofosfat tanpa hidrolisis.

Pada analisa ortofosfat tanpa hidrolisis, mungkin terdapat sebagian kecil polifosfat yang ikut teranalisa. Namun jumlahnya dapat diabaikan. Analisa ortofosfat dengan atau tanpa melalui hidrolisis dapat dilakukan pada sampel tidak disaring (polifosfat total) atau sampel yang telah disaring (polifosfat terlarut) (Alaerts, 1984).

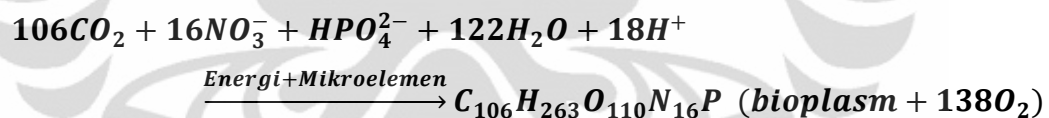
2.1.3.3 Analisa Fosfat Total

Fosfat total adalah semua zat ortofosfat dan polifosfat yang terlarut dan tidak terlarut, serta yang terikat dengan senyawa organik maupun anorganik. Analisa fosfat total adalah analisa ortofosfat setelah sampel dilebur melalui proses digesti. Untuk melepaskan fosfat atau fosfor dari senyawa organik diperlukan proses peleburan dengan asam serta reaksi oksidasi. Proses ini disebut *oxidative destruction* atau *oxidative digestion*. Persulfat merupakan salah satu oksidan yang

dapat digunakan dalam proses peleburan ini. Hasil peleburan ini adalah berupa ortofosfat yang kemudian diukur dengan metode asam asorbik (Alaerts, 1984).

2.2 Eutrofikasi

Eutrofikasi merupakan dampak dari pertumbuhan yang berlebihan dari fitoplankton yang berakibat pada ketidakseimbangan produktivitas badan air, yang disebabkan oleh masuknya nutrisi dalam jumlah besar dari limpasan kegiatan pertanian maupun air limbah lainnya (Khan & Ansari, 2005). Akibat kegiatan manusia, fosfor, nitrogen dan nutrisi lainnya masuk ke badan air dalam jumlah besar dan menghasilkan konsekuensi negatif terhadap struktur, proses dan fungsi ekosistem akuatik. Hal ini mengakibatkan pertumbuhan alga dan plankton lainnya dengan cepat dan memperburuk kualitas air (Western, 2001). Secara umum, eutrofikasi disebabkan oleh pertumbuhan alga autotropik yang berlebihan dalam air. Organisme ini menyusun makanannya dengan energi matahari dan kandungan anorganik dengan bantuan sinar matahari. Proses eutrofikasi dapat dijelaskan menurut reaksi berikut (Yang et al., 2008):



Eutrofikasi dapat merusak keseimbangan ekosistem air dan menuntun pada rusaknya ekosistem air dan kemampuannya dalam regenerasi secara berangsur-angsur. Akibatnya dapat berdampak pada kualitas air dan kejernihannya. Cahaya matahari yang masuk dan dapat digunakan untuk fotosintesis menjadi berkurang. Dampak yang lebih lanjut, fotosintesis menjadi tidak dapat dilakukan. Eutrofikasi juga dapat menyebabkan rendahnya kadar oksigen terlarut dalam air yang dapat berdampak buruk pada organisme perairan. Sistem eutrofik mengakumulasi karbon organik dalam jumlah besar yang menyebabkan perubahan komposisi biokimia material organik (Dell'Anno et al., 2002). Akibat eutrofikasi, populasi alga yang terutama terdiri dari *Cyanophyta* dan alga hijau meningkat dan membentuk lapisan tebal berwarna hijau di permukaan air. Alga dapat melepaskan racun dan menjadikan material organik

dalam air terdekomposisi menjadi gas berbahaya, yang mematikan bagi ikan dan organisme perairan lainnya. Bahaya eutrofikasi juga termasuk menyebabkan kurangnya suplai air minum akibat kualitas air yang menurun. Ketika alga dalam jumlah besar tersebut mati, dihasilkan sejumlah besar racun yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Racun dari cyanobacteria atau cyanotoxins, termasuk cytotoxins dan biotoxins, merupakan racun yang akut, kronis dan mematikan bagi hewan maupun manusia (Carmichael, 2001). Selain itu, konsentrasi nitrit yang meningkat pada air yang tereutrofikasi juga akan membahayakan kesehatan manusia karena hasil dari proses nitrifikasi bersifat sangat karsinogenik (Yang et al., 2008).

2.2.1 Faktor yang Mempengaruhi Eutrofikasi

Menurut berbagai sumber, faktor-faktor yang mempengaruhi eutrofikasi pada perairan antara lain adalah pengayaan nutrisi, hidrodinamik, faktor lingkungan, serta mikroba dan keanekaragaman hayati.

2.2.1.1 Pengayaan Nutrien

Pengayaan nitrogen (N) dan fosfor (P) dalam air merupakan faktor utama yang menyebabkan eutrofikasi. Rumus molekul alga yaitu $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ adalah berdasarkan komponen kimiawi dari alga. Nitrogen dan fosfor terhitung hanya sebagai proporsi yang kecil dalam rumus molekul alga tersebut, terutama fosfor yang merupakan faktor pembatas utama untuk mengontrol pertumbuhan alga dalam air (Mainstone & Parr, 2002). Dilaporkan bahwa 80% eutrofikasi pada danau dan waduk dibatasi oleh fosfor, sekitar 10% eutrofikasi danau dan waduk berhubungan dengan nitrogen, dan 10% lainnya berhubungan dengan faktor selain fosfor dan nitrogen (Zhao, 2004).

Dalam berbagai ekosistem, populasi fitoplankton berhubungan dengan ketersediaan nitrogen atau fosfor (Cloern, 2001; Bledsoe et al., 2004). Komposisi jenis fitoplankton juga dipengaruhi oleh konsentrasi nitrogen dan fosfor (Reynolds, 2006). Rasio N:P dalam badan air atau disebut juga dengan rasio Redfield merupakan indikator penting dari nutrisi yang membatasi eutrofikasi. Bila rasio Redfield adalah 16:1, fosfor mungkin sekali merupakan faktor

pembatas untuk pertumbuhan alga (Redfield et al., 1963; Hodgkiss & Lu, 2004). Fosfor atau P telah ditunjuk sebagai nutrisi pembatas utama untuk produksi fitoplankton dalam berbagai lingkungan perairan (Phlips, 2002), sementara nitrogen atau N umumnya menjadi nutrisi pembatas dalam ekosistem laut (Cloern, 2001).

2.2.1.2 Hidrodinamik

Cai et al. (2007) menemukan bahwa memberikan aliran atau pergerakan pada air dapat mempengaruhi proses eutrofikasi secara tidak langsung karena hal tersebut dapat mempengaruhi pencahayaan dalam air serta keadaan nutrisi. Dalam perairan dangkal peningkatan frekuensi aliran dapat meningkatkan pelepasan P dari sedimen, terutama pada temperatur yang tinggi (Cai et al., 2007). Selain itu, gelombang pasang pada perairan tidak hanya mendorong pembentukan alga tapi juga mempengaruhi pertumbuhan alga yang berlebihan atau *alga bloom* melalui perubahan konsentrasi nutrisi dalam air (Yang et al., 2008).

2.2.1.3 Faktor Lingkungan

Beberapa faktor lingkungan yang mempengaruhi terjadinya eutrofikasi adalah sebagai berikut:

- Temperatur dan salinitas merupakan dua faktor penting yang menyebabkan *alga bloom*. *Alga bloom* selalu terjadi pada temperatur antara 23°C - 28°C, dan pada salinitas antara 23‰ hingga 28‰. Variasi pada temperatur dan salinitas juga mempengaruhi *alga bloom*. Pada saat terjadi *alga bloom*, temperatur dan salinitas menurun dengan drastis dalam waktu yang singkat. Menurut konsep ekologi, perubahan temperatur secara perlahan dapat menyebabkan subrogasi pada komunitas biologis lalu menjadi *alga bloom* ketika kondisi lingkungan lainnya mendukung (Wang et al., 1996).
- Kadar karbon dioksida adalah satu dari faktor-faktor utama yang mengontrol eutrofikasi. *Cyanophytes* mampu memanfaatkan karbon dioksida dalam kadar rendah. *Cyanophytes* juga lebih mudah mengapung pada kadar karbon dioksida yang rendah dan pH yang tinggi. Hal itu membuat organisme tersebut tetap berada di lapisan permukaan air dan

menghalangi masuknya sinar matahari ke dalam perairan. Selain itu, beberapa spesies lain juga menghasilkan vegetasi yang padat, menghambat pertumbuhan fitoplankton yang lain, dan juga membatasi pergerakan zooplankton. Dari beberapa faktor tersebut kemudian dapat disimpulkan bahwa pergerakan yang lambat pada ekosistem perairan dapat menjadikan ekosistem tersebut didominasi oleh alga hijau-biru yang menggantikan populasi fitoplankton dan beberapa komunitas hewan yang lain (Kant & Raina, 1990).

- Cahaya berperan penting dalam pertumbuhan, keragaman dan kepadatan flora air. Pertumbuhan alga dilaporkan meningkat dengan adanya intensitas cahaya (Shen, 2002).
- Faktor lain yang juga mempengaruhi eutrofikasi adalah pH dan oksigen terlarut (Khan & Ansari, 2005). Konsentrasi minimum dan maksimum oksigen terlarut ditemukan berhubungan secara langsung dengan kadar minimum dan maksimum fitoplankton. pH merupakan faktor yang membatasi pertumbuhan tanaman. Perubahan pH berhubungan secara langsung pada ketersediaan dan penyerapan nutrisi dari larutan. pH yang tinggi menaikkan pertumbuhan fitoplankton dan menghasilkan *bloom* (Khan & Ansari, 2005). Berbagai faktor yang mempengaruhi eutrofikasi saling berhubungan dan mempengaruhi satu sama lain.

2.2.1.4 Mikroba dan Keanekaragaman Hayati

Aktivitas mikroba merupakan faktor penyebab *alga bloom* (Paerl, 1998; Paerl et al., 2003). Eutrofikasi banyak disertai dengan perubahan fungsi dan struktur komunitas mikroba (Paerl, 1998). Jumlah populasi mikroba secara positif berhubungan dengan kandungan material organik dan jumlah plankton dalam air yang tereutrofikasi. Terdapat hubungan yang hakiki antara jumlah bakteri dan terjadinya eutrofikasi. Dekomposisi material organik oleh aktivitas mikroba dapat menghasilkan nutrisi dan kandungan organik, yang dapat menaikkan konsentrasi *alga bloom* (Yang et al., 2008).

2.3 Klasifikasi Perairan Berdasarkan Produktivitasnya

Menurut Kevern et al. (1996), berdasarkan produktivitasnya, perairan dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a. Oligotrop, yaitu perairan yang mengandung nutrien yang dibutuhkan untuk pertumbuhan organisme dalam konsentrasi yang sangat rendah, sehingga produktivitas perairan ini rendah. Material organik yaitu plankton serta alga yang hidup dalam perairan ini berada dalam jumlah yang sedikit. Dengan kecilnya produksi material organik, hanya terdapat sedikit akumulasi sedimen organik di dasar perairan oligotrop. Akibatnya, jumlah mikroba di dasar perairan tersebut juga sedikit. Akhirnya dengan jumlah mikroba dan plankton yang kecil tersebut, hanya terdapat sedikit konsumsi oksigen terlarut dalam perairan. Pada umumnya, perairan oligotrop memiliki kandungan oksigen terlarut yang tinggi dari permukaan hingga dasar perairan. Ciri khas lainnya adalah air yang jernih, sedikit alga dan fitoplankton sehingga konsentrasi klorofilnya rendah (rata-rata $1,7 \text{ mg/m}^3$), dan nutrien yang sedikit (konsentrasi fosfat rata-rata $8,0 \text{ mg/m}^3$). Perairan oligotrop memiliki air yang bersih dan bebas dari rumput liar. Biasanya merupakan perairan yang dalam dengan suhu air yang rendah. Perairan jenis ini jarang sekali berada di daerah yang padat penduduk.
- b. Eutotrop, yaitu perairan yang kaya akan nutrien dan tinggi produktivitasnya. Perairan ini memproduksi fitoplankton dalam jumlah besar yang seringkali memperkeruh air. Perairan ini juga memproduksi zooplankton dan ikan kecil lainnya dalam jumlah besar. Ikan kecil menjadi bahan makanan bagi ikan yang lebih besar. Dengan demikian terdapat produktivitas yang tinggi dalam perairan jenis ini. Sedimen organik di dasar perairan berada dalam jumlah besar sehingga pertumbuhan mikroba juga lebih besar. Besarnya jumlah populasi organisme di dalam perairan ini mengakibatkan tingginya konsumsi oksigen terlarut. Salah satu karakteristik dari perairan eutotrop adalah kadar oksigen terlarutnya yang sangat rendah. Pertumbuhan fitoplankton terjadi secara luar biasa mengakibatkan tingginya konsentrasi klorofil dalam perairan ini, yang dapat berkisar 14 mg/m^3 atau lebih. Rata-rata konsentrasi fosfor mencapai 80 mg/m^3 . Perairan jenis ini relatif lebih

dangkal dan ditumbuhi banyak rumput liar sebagai indikasi dari tingginya nutrisi dan sedimen organik yang terdapat di dalamnya. Perairan ini baik untuk kegiatan memancing karena dengan konsentrasi nutrisi yang tinggi, pertumbuhan ikan relatif lebih baik.

- c. Mesotrop, yaitu perairan dengan kondisi produktivitas antara oligotrop dan eutotrop. Perairan ini memiliki karakteristik menengah antara oligotrop dan eutotrop. Produksi plankton tidak terlalu tinggi sehingga terdapat cukup sedimen di dasar perairan ini. Jumlah oksigen terlarut juga tidak terlalu rendah namun juga tidak terlalu tinggi.

2.4 Lindi

Lindi dapat didefinisikan sebagai air yang terkontaminasi oleh limbah TPA. Air tersebut dapat berasal dari aliran permukaan, hujan, air tanah, serta air yang dihasilkan dari dekomposisi limbah (Tchobanoglous, 1993). Air ini kemudian terkontaminasi dan mengandung unsur limbah yang larut, tidak tertahan oleh tanah dan tidak terdegradasi secara kimia maupun biokimia. Beberapa unsur berbahaya dalam lindi merupakan hasil dari transformasi kimia dan biokimia dari limbah (Manahan, 2005).

Komposisi kimiawi lindi bervariasi menurut usia TPA atau *landfill*. Biodegradabilitas lindi bervariasi menurut waktu. Perubahan dalam biodegradabilitas lindi dapat dimonitoring dengan memeriksa rasio BOD₅/COD. Pada mulanya, rasio ini adalah berkisar 0,5 atau lebih. Rasio 0,4–0,6 mengindikasikan bahwa material organik dalam lindi siap terbiodegradasi. Pada lahan TPA yang telah *mature*, rasio BOD₅/COD-nya berkisar 0,02 – 0,5. Rasio ini menurun karena lindi dari TPA ini umumnya mengandung asam *mumic* dan *fulvic*, yang tidak dapat dibiodegradasi (Manahan, 2005). Tipikal karakteristik fisik, kimia, dan biologis lindi disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik Fisik, Kimia, dan Biologi Lindi

Kandungan	Nilai, mg/L		
	<i>New landfill (<2 tahun)</i>		<i>Mature landfil (>10 tahun)</i>
	Kisaran	Tipikal	
BOD ₅	2.000 – 30.000	10.000	100 – 200
TOC	1.500 – 20.000	6.000	80 – 160
COD	3.000 – 60.000	18.000	100 – 500
Total Suspended Solids	200 – 2000	500	100 – 400
Nitrogen organik	10 – 800	200	80 – 120
Ammonia nitrogen	10 – 800	200	20 – 40
Nitrat	5 – 40	25	5 – 10
Total fosfat	5 – 100	30	5 – 10
Ortofosfat	4 – 80	20	4 – 8
Alkalinitas CaCO ₃	1.000 – 10.000	3.000	200 – 1.000
pH	4,5 – 7,5	6	6,6 – 7,5
Kesadahan total CaCO ₃	300 – 10.000	3.500	200 – 500
Kalsium	200 – 3.000	1.000	100 – 400
Magnesium	50 – 1.500	250	50 – 200
Potassium	200 – 1.000	300	50 – 400
Sodium	200 – 2.500	500	100 – 200
Klorida	200 – 3.000	500	100 – 400
Sulfat	50 – 1.000	300	20 – 50
Besi total	50 – 1.200	60	20 – 200

Sumber: Tchobanoglous, 1993

Karena karakteristik lindi yang bervariasi, desain pengolahan lindi juga dapat bervariasi dan sebaiknya disesuaikan dengan karakteristik masing-masing TPA.

Dihasilkannya lindi merupakan konsekuensi dari pembangunan sebuah TPA. Oleh karena itu, TPA membutuhkan sistem pengumpulan dan pengelolaan khusus untuk lindi agar kontaminasi dengan lingkungan sekitar dapat dikendalikan. Pendekatan terbaik untuk mengelola lindi adalah dengan mencegah

pembentukannya dengan membatasi infiltrasi air ke area TPA. Laju produksi lindi dapat menjadi sangat kecil ketika lahan TPA didesain dan dibangun dengan tujuan tersebut. Penutup lahan TPA dengan permeabilitas yang rendah dapat digunakan untuk meminimalkan produksi lindi (Manahan, 2005).

2.5 Pemodelan Kualitas Air

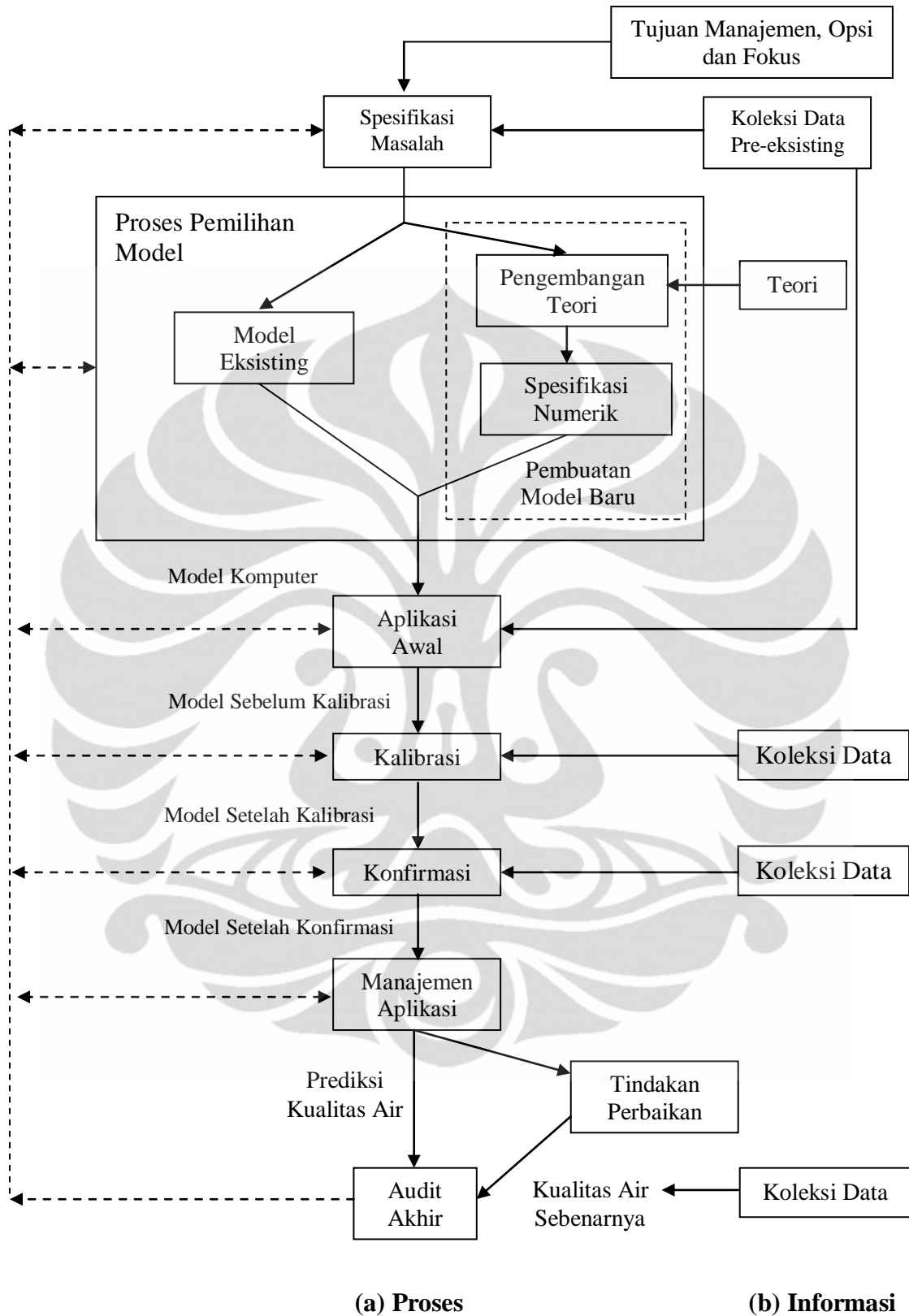
Model kualitas air merupakan satu tahapan dalam sebuah proses yang besar. Sebuah model dihasilkan dari perkembangan model dan proses aplikasi secara bertahap. Tahapan pembuatan model tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2.2.

2.5.1 Spesifikasi Masalah

Pembuatan sebuah model diawali dengan penentuan batasan serta masalah yang akan dikaji. Informasi penting yang perlu dipenuhi pada fase ini adalah yang pertama mengenai pengaturan sasaran, pilihan kontrol, dan batasan, yang termasuk batasan fisik seperti informasi perundang-undangan, peraturan, dan ekonomi. Informasi kedua adalah data yang berhubungan dengan fisik, kimia, dan biologi dari badan air yang akan dikaji. Pada fase ini ide model mulai disusun secara jelas, yang terdiri dari sasaran masalah dan variabel kualitas air yang dibutuhkan. Hal ini bertujuan untuk memperkirakan apakah sasaran tersebut dapat dicapai. Selanjutnya, mulai dikembangkan pula ide mengenai fungsi dari sistem yang akan dimodelkan serta pemecahan waktu, jarak dan pergerakan yang sesuai dengan masalah yang dikaji.

2.5.2 Pemilihan Model

Penyelesaian model dengan software dapat dilakukan bila masalah yang dikaji telah dikembangkan sebelumnya dengan software tersebut. Namun, untuk masalah berbeda yang baru dikaji perlu dikembangkan model tersendiri untuk mencapai sasaran yang diinginkan. Proses pembuatan model terdiri dari dua fase, yaitu: pengembangan teoritis dan spesifikasi numerik.



Gambar 2.2. Proses Pemodelan Kualitas Air dan Informasi yang Diperlukan Untuk Implementasinya (Chapra, 1997)

Pengembangan teori dilakukan untuk menspesifikasikan variabel dan parameter yang dibutuhkan sejalan dengan persamaan kontinuitas yang berhubungan. Persamaan kontinuitas adalah persamaan yang paling sering digunakan untuk massa dan/atau energi. Jika hidrodinamik juga disimulasikan, keseimbangan momentum juga dimasukkan ke dalam persamaan.

Setelah teori dikembangkan secara spesifik berdasarkan masalah yang dikaji, persamaan kemudian diimplementasikan dalam komputer. Fase ini terdiri dari beberapa langkah, termasuk desain algoritma, *coding* dalam bahasa komputer, *debugging*, *testing* dan dokumentasi. Metode numerik dipilih untuk menghasilkan solusi yang cukup stabil dan akurat dengan usaha komputasi yang minimum.

2.5.3 Aplikasi Awal

Proses ini dilakukan untuk mengidentifikasi informasi berikutnya yang dibutuhkan untuk memenuhi persamaan model. Selain itu, fase ini juga bermanfaat untuk mengidentifikasi parameter model mana yang paling utama, atau yang memiliki pengaruh yang kuat dalam prediksi model.

2.5.4 Kalibrasi

Langkah berikutnya dari proses pembuatan model adalah mengkalibrasikan model untuk mencocokkannya dengan kumpulan data yang tersedia. Fase ini termasuk memvariasikan parameter model untuk menghasilkan kesesuaian yang optimum antara hitungan model dan kumpulan data yang tersedia.

2.5.5 Konfirmasi

Model yang telah dikalibrasi selanjutnya harus melalui fase konfirmasi sebelum dapat digunakan. Pada fase ini model yang telah dikalibrasi difungsikan kembali dengan data yang baru, perubahan parameter fisik dan fungsi beban yang berbeda untuk merefleksikan kondisi yang baru. Bila simulasi model ini sesuai dengan data yang baru, berarti model telah dikonfirmasi sebagai alat prediksi yang efektif untuk range kondisi yang telah ditentukan. Bila tidak terdapat

kesesuaian, model sebaiknya dianalisa lebih jauh untuk menentukan alasan yang mungkin mempengaruhi ketidaksesuaian tersebut.

2.5.6 Manajemen Aplikasi

Kesesuaian model dengan keadaan di lapangan dapat dievaluasi dengan merubah parameter model dan fungsi beban sesuai dengan perubahan keadaan yang ada di lapangan. Dengan demikian, model dapat dijadikan untuk memprediksi efek yang terjadi akibat perubahan variabel tersebut.

2.5.7 Audit Akhir

Audit akhir dilakukan dalam bentuk pengecekan untuk mengetahui apakah prediksi model dapat berlaku.

2.6 Laju Reaksi

Laju reaksi dalam air dapat diekspresikan secara kuantitatif dengan hukum aksi massa yang menyatakan bahwa laju sebanding dengan konsentrasi reaktan. Laju ini dapat dinyatakan secara umum sebagai:

$$\frac{dc_A}{dt} = -kf(c_A, c_B, \dots) \quad (2.6.1)$$

Hubungan ini disebut dengan hukum laju. Hukum ini menyatakan bahwa laju reaksi bergantung dengan perkalian konstanta k yang dipengaruhi oleh temperatur dan fungsi konsentrasi reaktan $f(c_A, c_B, \dots)$. Fungsi konsentrasi reaktan biasanya didapatkan secara eksperimental, dengan bentuk umum sebagai berikut:

$$\frac{dc_A}{dt} = -k c_A^\alpha c_B^\beta \quad (2.6.2)$$

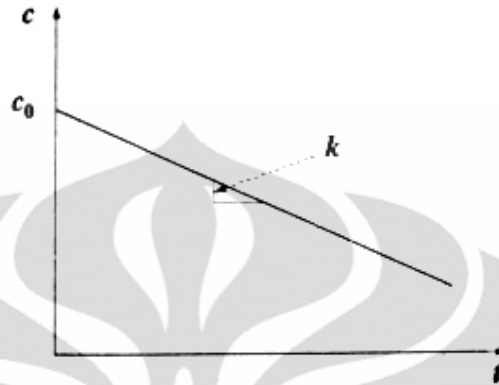
Kemampuan untuk meningkatkan konsentrasi reaktan disebut sebagai orde reaksi. Dalam persamaan di atas, α merupakan orde reaksi untuk reaktan A, dan β merupakan orde reaksi untuk reaktan B. Penjumlahan dari kedua orde tersebut adalah:

$$n = \alpha + \beta \quad (2.6.3)$$

Bila perhitungan difokuskan pada satu konsentrasi reaktan, maka persamaan yang digunakan adalah:

$$\frac{dc_A}{dt} = -kc^n \quad (2.6.4)$$

Dengan c adalah konsentrasi reaktan, dan n adalah orde reaksi.



Gambar 2.3. Grafik Konsentrasi vs Waktu Untuk Reaksi Orde Nol

(Chapra, 1997)

Orde reaksi yang banyak digunakan untuk persamaan dalam air adalah $n=0, 1$, dan 2 . Untuk orde nol ($n=0$), persamaannya adalah:

$$\frac{dc_A}{dt} = -k \quad (2.6.5)$$

Dengan dimensi k adalah $ML^{-3}T^{-1}$. Bila $c=c_0$ pada $t=0$, kemudian persamaan tersebut dapat diintegrasikan dan dengan pemisahan variabel menjadi:

$$c = c_0 - kt \quad (2.6.6)$$



Gambar 2.4. Grafik Konsentrasi vs Waktu Untuk Reaksi Orde Satu

(Chapra, 1997)

Untuk model orde satu, reaksi untuk diintegalkannya adalah:

$$\frac{dc_A}{dt} = -kc \quad (2.6.7)$$

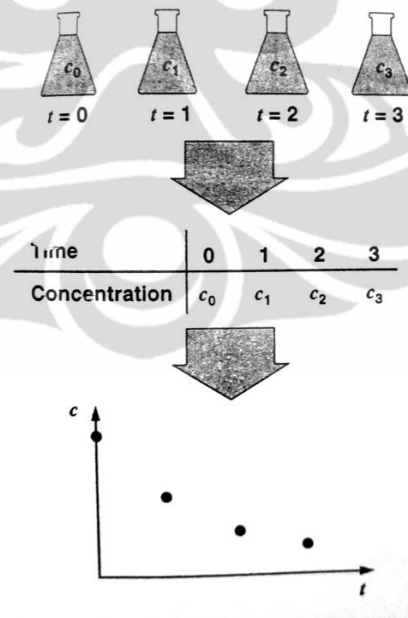
Dimensi dari k untuk orde satu adalah T^{-1} . Bila $c=c_0$ pada $t=0$, maka persamaan tersebut dapat diintegalkan dan dengan pemisahan variabel menjadi:

$$\ln c - \ln c_0 = -kt \quad (2.6.8)$$

Bila kedua sisi dipangkatkan maka menjadi:

$$c = c_0 e^{-kt} \quad (2.6.9)$$

Penentuan orde reaksi serta laju reaksi (k) dalam suatu perairan, dapat dilakukan dengan eksperimen di laboratorium. Pendekatan secara sederhana dilakukan dengan menyimpan sampel dari perairan tersebut dalam gelas beaker di laboratorium. Kemudian konsentrasi zat di dalam sampel perairan tersebut diperiksa dengan jangka waktu yang sama. Hasil pemeriksaan tersebut kemudian diplot dalam grafik konsentrasi (c) vs waktu (t) untuk orde satu, dua, dan tiga. Orde reaksi dan laju reaksi diketahui dari grafik yang paling sesuai.



Gambar 2.5. Penentuan Nilai Orde Reaksi dan Laju Reaksi

(Chapra, 1997)

2.7 Keseimbangan Massa

Dalam sebuah sistem *Completely Stirred Tank Reactor* (CSTR) yang mendapat beban (*loading*), mengalami reaksi, mengalami *settling* atau pengendapan, dan mengeluarkan debit (*outflow*), keseimbangan massanya dapat diekspresikan sebagai:

$$\text{Akumulasi} = \text{beban} - \text{outflow} - \text{reaksi} - \text{settling}$$

Akumulasi menyatakan perubahan massa M dalam sistem dalam waktu t .

$$\text{Akumulasi} = \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (2.7.1)$$

Massa berhubungan dengan konsentrasi, menurut reaksi:

$$c = \frac{M}{V} \quad (2.7.2)$$

dengan V adalah volume sistem (L^3). Dengan demikian, persamaan tersebut dapat disubstitusikan menjadi:

$$\text{Akumulasi} = \frac{\Delta Vc}{\Delta t} \quad (2.7.3)$$

Bila volume diasumsikan merupakan variabel yang tetap dan Δt dapat dianggap sangat kecil, maka persamaan menjadi:

$$\text{Akumulasi} = V \frac{dc}{dt} \quad (2.7.4)$$

Loading menyatakan massa dengan konsentrasi tertentu yang masuk ke dalam sistem.

$$\text{Loading} = W(t) \quad (2.7.5)$$

W menyatakan laju beban massa (*loading*) MT^{-1} , yang merupakan fungsi waktu (t). *Loading* juga dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{Loading} = Qc_{in}(t) \quad (2.7.6)$$

dengan Q adalah debit yang masuk ke dalam sistem (L^3T^{-1}) dan $c_{in}(t)$ adalah konsentrasi rata-rata dari debit yang masuk tersebut (ML^{-3}). Bila disubstitusikan, maka persamaan menjadi:

$$c_{in}(t) = \frac{W(t)}{Q} \quad (2.7.7)$$

Outflow menyatakan massa yang keluar dari sistem. Massa tersebut dapat dinyatakan dengan perkalian debit yang keluar Q dengan konsentrasinya c_{out} . Bila

diasumsikan konsentrasi dalam sistem adalah sama, maka c_{out} sama dengan c_{in} dan persamaan *outflow* bisa dinyatakan dengan:

$$Outflow = Qc \quad (2.7.8)$$

Reaksi untuk menetralkan polutan dalam sistem, umumnya dinyatakan dalam orde satu, dengan rumus:

$$reaction = kM \quad (2.7.9)$$

dengan k adalah konstanta laju reaksi orde satu (T^{-1}). Massa yang bereaksi tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk konsentrasi menjadi:

$$reaction = kVc \quad (2.7.10)$$

Settling atau pengendapan yang terjadi dalam sistem dapat diformulasikan sebagai fluks massa yang melewati luas permukaan sedimen dalam air. Bentuk *settling* dalam keseimbangan massa dapat dirumuskan sebagai:

$$Settling = vA_s c \quad (2.7.11)$$

dengan v adalah kecepatan pengendapan (LT^{-1}) dan A_s adalah luas permukaan sedimen (L^2). Karena volume sama dengan perkalian kedalaman (H) dan luas permukaan (A_s), maka persamaan tersebut dapat diformulasikan pula menjadi persamaan reaksi orde satu yaitu:

$$Settling = k_s Vc \quad (2.7.12)$$

dengan k_s adalah konstanta laju reaksi orde satu yang sama dengan v/H (T^{-1}).

Semua komponen tersebut kemudian disusun sebuah persamaan keseimbangan total untuk sistem CSTR tersebut, yaitu:

$$Akumulasi = beban - outflow - reaksi - settling$$

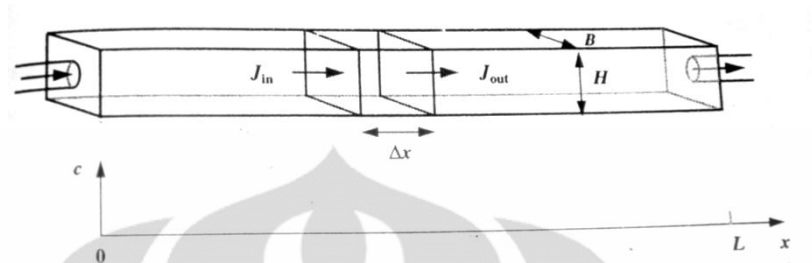
$$V \frac{dc}{dt} = W(t) - Qc - kVc - vA_s c \quad (2.7.13)$$

Dalam persamaan tersebut, c dan t masing-masing merupakan variabel dependen dan independen, karena model didesain untuk memprediksi konsentrasi sebagai fungsi dari waktu. $W(t)$ sebagai faktor luar yang mempengaruhi sistem. Nilai V , Q , k , v , dan A_s mengacu sebagai parameter atau koefisien.

2.8 Keseimbangan Massa Untuk Sistem Terdistribusi

Untuk pemodelan sungai atau sistem terdistribusi, persamaan keseimbangan massa diturunkan menurut bentuk reaktor kotak memanjang, atau

berupa *plug-flow* dan *mixed-flow reactor*. *Plug-flow* dan *mixed-flow reactor* tersebut dapat digambarkan seperti dalam berikut.



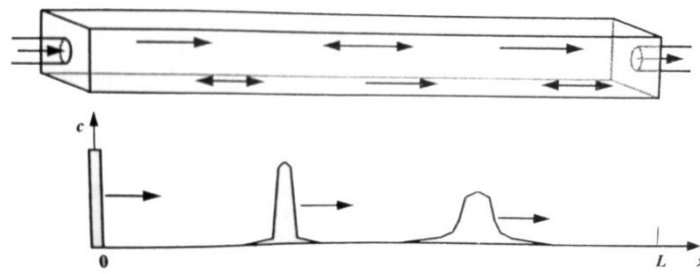
Gambar 2.6. Reaktor Kotak Memanjang
(Chapra, 1997)

Aliran dalam kedua jenis reaktor tersebut diasumsikan tercampur secara lateral (y) dan vertikal (z). Dengan demikian, fokus dilakukan hanya pada variasi dimensi longitudinal (x). Persamaan keseimbangan massa untuk elemen diferensial Δx adalah:

$$\Delta V \frac{\partial c}{\partial t} = J_{in} A_c - J_{out} A_c \pm reaction \quad (2.8.1)$$

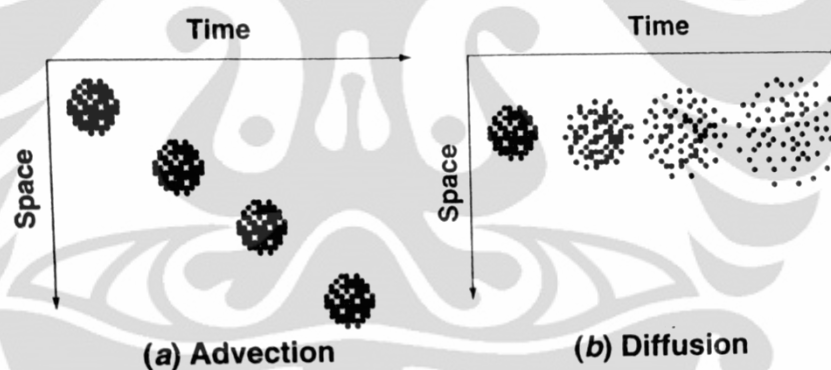
J_{in} dalam persamaan tersebut menyatakan fluks massa yang masuk ke dalam sistem, sedangkan J_{out} menyatakan fluks massa yang keluar dari sistem.

Dalam sistem *mixed-flow reactor*, fluks massa dalam arah x akan mengalami mekanisme adveksi dan dispersi. Sedangkan pada sistem *plug-flow reactor*, fluks massa dianggap hanya mengalami mekanisme adveksi. Seperti tergambar dalam Gambar 2.7 fluks massa dalam sistem *mixed-flow reactor*, selain mengalami adveksi juga akan mengalami dispersi selama perjalanannya hingga mencapai titik keluar dari reaktor.

Gambar 2.7. *Mixed-Flow Reactor*

(Chapra, 1997)

Adveksi adalah berupa aliran yang searah dan tidak memberikan perubahan terhadap kandungan zat yang mengalami aliran. Difusi mengacu pada gerakan massa karena gerakan air acak atau mencampur. Pergerakan ini menyebabkan zat mengalami penyebaran dan pengenceran dari waktu ke waktu. Mekanisme adveksi dan dispersi dapat diilustrasikan seperti dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Pergerakan Zat Dalam Ruang dan Waktu Menurut Mekanisme (a) Adveksi dan (b) Difusi

(Chapra, 1997)

Adapun mekanisme adveksi dan dispersi dalam sumbu x dapat dikuantifikasikan sebagai berikut:

- Adveksi (x)

$$J_{in} = Uc \quad (2.8.2)$$

$$J_{out} = U \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x \right) \quad (2.8.3)$$

- Dispersi (x)

$$J_{in} = E \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.8.4)$$

$$J_{out} = -E \left[\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \Delta x \right] \quad (2.8.5)$$

Berdasarkan mekanisme adveksi dan dispersi tersebut, maka fluks masuk pada sistem *mixed-flow reactor* didefinisikan sebagai:

$$J_{in} = Uc - E \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.8.6)$$

E dalam persamaan tersebut menyatakan difusi turbulen. Fluks keluar sistem didefinisikan sebagai:

$$J_{out} = U \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x \right) - E \left[\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \Delta x \right] \quad (2.8.7)$$

Substitusi kedua persamaan fluks tersebut ke dalam persamaan 2.8.1, menghasilkan:

$$\Delta V \frac{\partial c}{\partial t} = UA_c c - UA_c \left(c + \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x \right) - EA_c \frac{\partial c}{\partial x} + EA_c \left[\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \Delta x \right] - k\Delta V \bar{c} \quad (2.8.8)$$

$$\Delta V \frac{\partial c}{\partial t} = -UA_c \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x + EA_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \Delta x - k\Delta V \bar{c} \quad (2.8.9)$$

Dibagi dengan $\Delta V = A_c \Delta x$ dan mengambil limit ($\Delta x \rightarrow 0$) menghasilkan:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U \frac{\partial c}{\partial x} + E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc \quad (2.8.10)$$

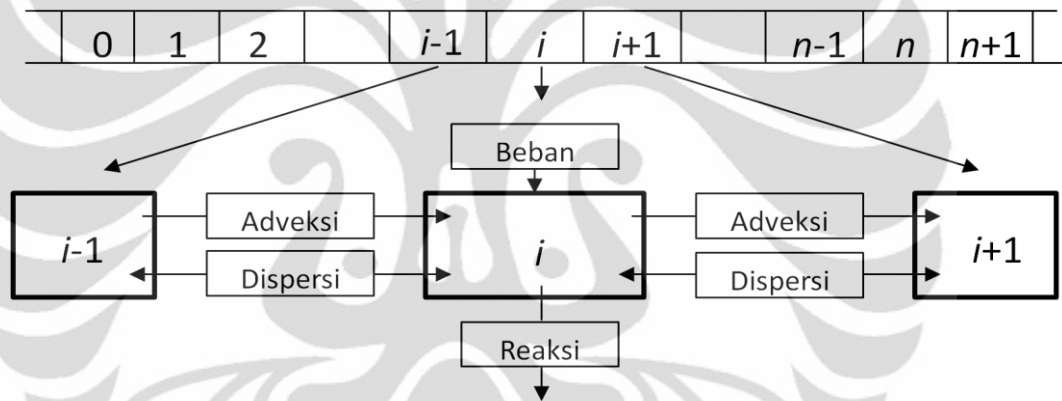
Dalam keadaan *steady-state*, persamaan tersebut menjadi:

$$0 = -U \frac{dc}{dx} + E \frac{d^2 c}{dx^2} - kc \quad (2.8.11)$$

2.9 Pendekatan *Control Volume* Untuk Sistem *Steady State*

Model perubahan konsentrasi terhadap jarak (x) dapat diselesaikan dengan pendekatan *control volume* dengan sistem yang dianggap *steady state* atau tidak terjadi perubahan terhadap waktu. Pendekatan ini berdasarkan pada pembagian badan air ke dalam beberapa segmen atau *control volumes*. Segmen 0 dan $n+1$ menyatakan batasan segmen. Dengan demikian, terdapat n yang tidak diketahui dan akan ditentukan sebagai $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$. Untuk menyelesaikannya, persamaan keseimbangan massa *steady state* untuk volume i dapat dituliskan sebagai berikut.

$$0 = W_i + Q_{i-1,i}c_{i-1,i} - Q_{i,i+1}c_{i,i+1} + E'_{i-1,i}(c_{i-1} - c_i) + E'_{i,i+1}(c_{i+1} - c_i) - k_i V_i c_i \quad (2.9.1)$$



Gambar 2.9. Keseimbangan Massa Dalam Sebuah *Control Volume*

(Chapra, 1997)

Karakter $i-1, i$ menyatakan nilai variabel yang masuk ke sistem, sementara karakter $i, i+1$ menyatakan nilai variabel yang keluar dari sistem.

Dalam persamaan tersebut terdapat variabel $c_{i-1,i}$ dan $c_{i,i+1}$ yang menunjukkan konsentrasi pada bagian hulu (awal) dan hilir (akhir). Variabel tersebut merepresentasikan keadaan sistem, namun memberikan 2 variabel tambahan yang tidak diketahui. Untuk menghilangkan variabel yang tidak diketahui ini, pendekatan yang dilakukan bernama *backward* atau *upstream difference*. Dengan pendekatan ini, persamaan 2.9.1 dapat dinyatakan sebagai:

$$0 = W_i + Q_{i-1,i}c_{i-1} - Q_{i,i+1}c_i + E'_{i-1,i}(c_{i-1} - c_i) + E'_{i,i+1}(c_{i+1} - c_i) - k_i V_i c_i \quad (2.9.2)$$

Dengan mengumpulkan variabel yang sama maka persamaan menjadi:

$$-(Q_{i-1,i} + E'_{i-1,i})c_{i-1} + (Q_{i,i+1} + E'_{i-1,i} + E'_{i,i+1} + k_i V_i)c_i - (E'_{i,i+1})c_{i+1} = W_i \quad (2.9.3)$$

atau

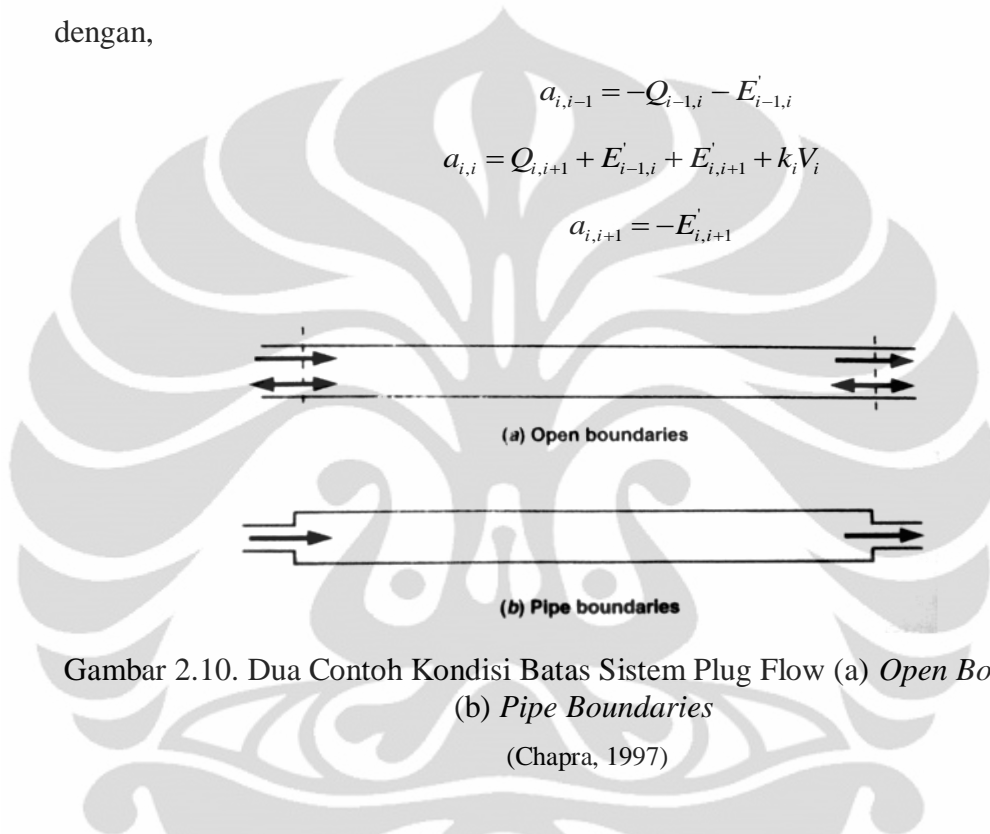
$$a_{i,i-1}c_{i-1} + a_{i,i}c_i + a_{i,i+1}c_{i+1} = W_i \quad (2.9.4)$$

dengan,

$$a_{i,i-1} = -Q_{i-1,i} - E'_{i-1,i} \quad (2.9.5)$$

$$a_{i,i} = Q_{i,i+1} + E'_{i-1,i} + E'_{i,i+1} + k_i V_i \quad (2.9.6)$$

$$a_{i,i+1} = -E'_{i,i+1} \quad (2.9.7)$$



Gambar 2.10. Dua Contoh Kondisi Batas Sistem Plug Flow (a) *Open Boundaries*
(b) *Pipe Boundaries*
(Chapra, 1997)

Untuk massa masuk dan keluar reaktor yang berbentuk *plug flow* dengan volume masuk $i=1$, persamaan keseimbangan massanya adalah sebagai berikut:

$$0 = W_1 + Q_{0,1}c_0 - Q_{1,2}c_1 + E'_{1,2}(c_2 - c_1) - k_1 V_1 c_1 \quad (2.9.8)$$

Dalam persamaan tersebut tidak terdapat nilai dispersi (E) untuk volume masuk (*inflow*). Dengan mengumpulkan variabel yang sama maka persamaan menjadi:

$$W_1 = a_{1,1}c_1 + a_{1,2}c_2 \quad (2.9.9)$$

dengan,

$$a_{1,0} = -Q_{0,1} \quad (2.9.10)$$

$$a_{1,1} = Q_{1,2} + E'_{1,2} + k_1 V_1 \quad (2.9.11)$$

$$a_{1,2} = -E'_{1,2} \quad (2.9.12)$$

Penurunan persamaan yang sama untuk outlet, menghasilkan:

$$W_n = a_{n,n-1}c_{n-1} + a_{n,n}c_n \quad (2.9.13)$$

dengan,

$$a_{n,n-1} = -(Q_{n-1,n} + E'_{n-1,n}) \quad (2.9.14)$$

$$a_{n,n} = Q_{n,n+1} + E'_{n-1,n} + k_n V_n \quad (2.9.15)$$

Pada persamaan $a_{n,n}$ tidak terdapat variabel $E'_{n,n+1}$ karena tidak ada dispersi yang terjadi pada outlet.

Selanjutnya, untuk kondisi *steady state* persamaan yang harus diselesaikan adalah sebagai berikut:

$$a_{1,1}c_1 + a_{1,2}c_2 = W_1 \quad (2.9.16)$$

$$a_{2,1}c_1 + a_{2,2}c_2 + a_{2,3}c_3 = W_2 \quad (2.9.17)$$

$$a_{3,2}c_2 + a_{3,3}c_3 + a_{3,4}c_4 = W_3 \quad (2.9.18)$$

⋮

$$a_{n-1,n-2}c_{n-2} + a_{n-1,n-1}c_{n-1} + a_{n-1,n}c_n = W_{n-1} \quad (2.9.19)$$

$$a_{n,n-1}c_{n-1} + a_{n,n}c_n = W_n \quad (2.9.20)$$

Persamaan tersebut dapat juga dinyatakan dalam bentuk matriks, yaitu:

$$[A]\{c\} = \{W\} \quad (2.9.21)$$

dengan,

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & \cdot & 0 \\ \vdots & & & & & & \vdots \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & a_{n-1,n-2} & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.9.22)$$

$$\{c\} = \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_{n-1} \\ c_n \end{Bmatrix} \quad \{W\} = \begin{Bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \vdots \\ W_{n-1} \\ W_n \end{Bmatrix} \quad (2.9.23)$$

2.10 Pendekatan *Finite Difference*

Finite difference merupakan salah satu metode diferensial untuk penyelesaian secara numerik, pada persamaan diferensial biasa dan persamaan diferensial parsial. Konsepnya adalah dengan mengganti turunan yang muncul di persamaan diferensial dengan *finite differences* yang mendekatinya. Terdapat tiga bentuk *finite difference*, yaitu:

- *Forward difference*, memiliki bentuk sebagai berikut:

$$\Delta_h[f](x) = f(x+h) - f(x) \quad (2.10.1)$$

Nilai h dapat berupa variabel maupun konstanta, tergantung pada aplikasinya.

- *Backward difference*, menggunakan nilai fungsi pada x dan $x-h$ (mundur), bukan pada x dan $x+h$.

$$\Delta_h[f](x) = f(x) - f(x-h) \quad (2.10.2)$$

- *Central difference*, bentuk persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\delta_h[f](x) = f\left(x + \frac{1}{2}h\right) - f\left(x - \frac{1}{2}h\right) \quad (2.10.3)$$

Contoh persamaan yang akan diselesaikan dengan pendekatan *finite difference* adalah persamaan 2.8.11.

$$0 = -U \frac{dc}{dx} + E \frac{d^2c}{dx^2} - kc \quad (2.8.11)$$

Turunan pertama dihitung dengan *backward difference*,

$$\frac{dc}{dx} \cong \frac{c_i - c_{i-1}}{\Delta x} \quad (2.10.4)$$

Turunan kedua dihitung dengan *centered difference*,

$$\frac{d^2c}{dx^2} \cong \frac{\frac{c_{i+1} - c_i}{\Delta x} - \frac{c_i - c_{i-1}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{c_{i+1} - 2c_i + c_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (2.10.5)$$

Substitusi turunan tersebut ke dalam persamaan *mass balance* menjadi:

$$0 = E \frac{c_{i+1} - 2c_i + c_{i-1}}{\Delta x^2} - U \frac{c_i - c_{i-1}}{\Delta x} - kc_i \quad (2.10.6)$$

Dengan mengumpulkan variabel yang sama dan mengalikannya dengan $V_i = A_c \Delta x$, maka persamaan menjadi:

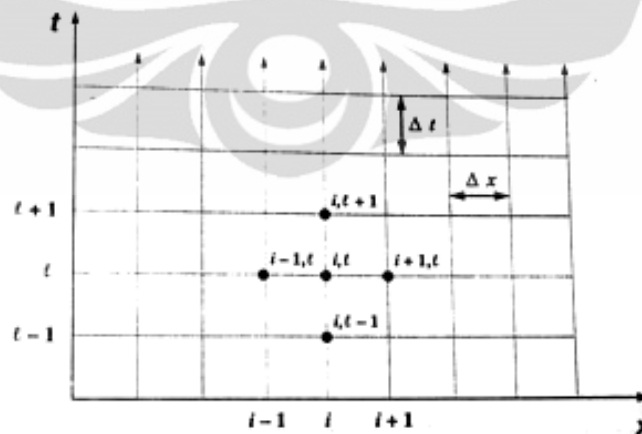
$$-(Q + E')c_{i-1} + (Q + 2E' + kV_i)c_i - E'c_{i+1} = 0 \quad (2.10.7)$$

2.11 Penyelesaian Model dengan Variabel Waktu

Pendekatan untuk variabel waktu diturunkan dari persamaan keseimbangan massa:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.11.1)$$

Maka untuk sementara adveksi dan reaksi diabaikan, dan koefisien dispersi dianggap konstan. Penyelesaian numerik untuk persamaan ini dapat dikembangkan dengan mensubstitusi pendekatan *finite difference* untuk penurunannya. Diskritisasi kemudian dibuat untuk variabel waktu dan jarak. Gambar 2.11 menunjukkan diskritisasi untuk ruang berdimensi satu.



Gambar 2.11. Komputasi Grid Untuk Karakterisasi Dimensi Ruang dan Waktu
(Chapra, 1997)

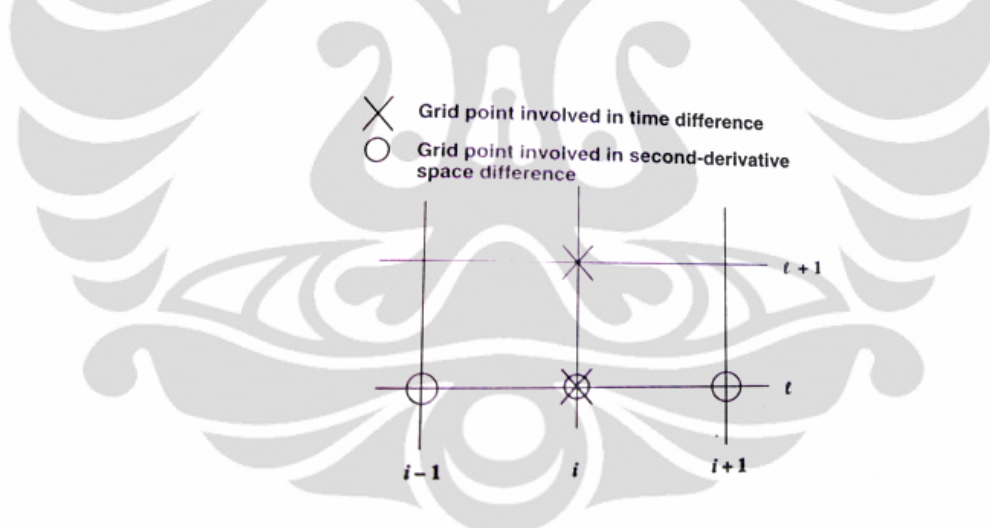
Pendekatan sederhana untuk diskritisasi persamaan 2.11.1 dengan kondisi *grid* seperti pada gambar 2.11, diselesaikan dengan *centered spacial derivative* untuk variabel jarak (x), dan *forward temporal derivative* untuk variabel waktu (t).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{c_i^{l+1} - c_i^l}{\Delta t} \quad (2.11.2)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{c_{i+1}^l - c_i^l + c_{i-1}^l}{\Delta x^2} \quad (2.11.3)$$

Perubahan notasi l (*superscript*) digunakan untuk mewakili perubahan waktu, sementara perubahan notasi i (*subscript*) menyatakan dimensi jarak. Substitusi persamaan tersebut ke dalam persamaan 2.11.1 menjadi:

$$\frac{c_i^{l+1} - c_i^l}{\Delta t} = \frac{c_{i+1}^l - c_i^l + c_{i-1}^l}{\Delta x^2} \quad (2.11.4)$$



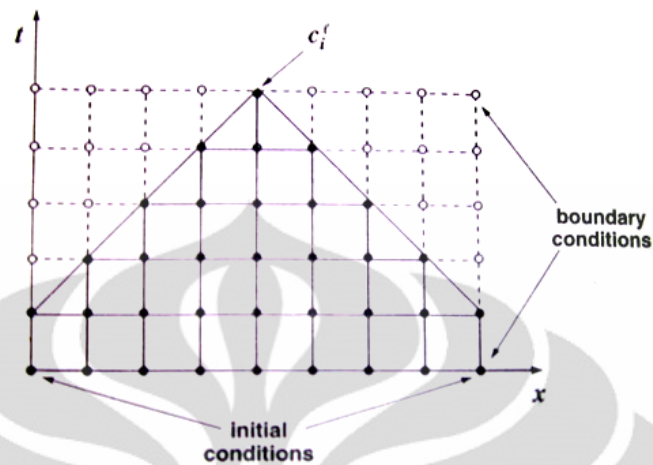
Gambar 2.12. Notasi Pada Grid Menggambarkan Pendekatan FTCS

(Chapra, 1997)

Pendekatan ini dikenal juga dengan nama persamaan diferensial *forward time/centered space* (FTCS). Dengan mengumpulkan variabel yang sama, maka persamaan yang digunakan untuk menentukan konsentrasi saat pertambahan waktu tertentu adalah sebagai berikut:

$$c_i^{l+1} = c_i^l + E \frac{c_{i+1}^l - 2c_i^l + c_{i-1}^l}{\Delta x^2} \Delta t^2 \quad (2.11.5)$$

Dengan metode FTCS atau yang juga dikenal dengan metode eksplisit, maka konsentrasi yang dapat ditentukan akan mengikuti pola seperti gambar 2.13.

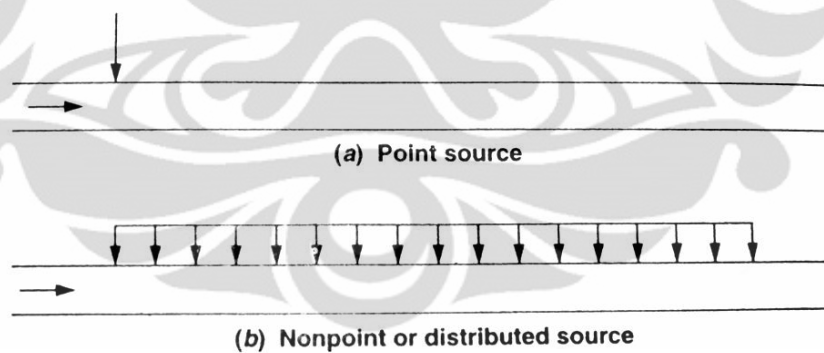


Gambar 2.13. Representasi Hasil Perhitungan Konsentrasi Dalam Ruang dan Waktu dengan Pendekatan FTCS

(Chapra, 1997)

2.12 Keseimbangan Massa Untuk Input *Point Source*

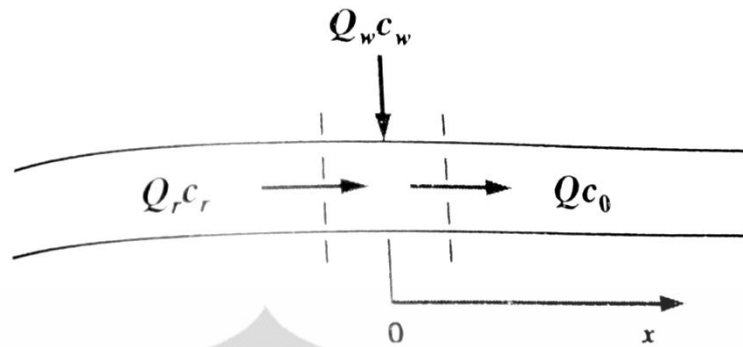
Model *plug-flow reactor* dapat diaplikasikan untuk menganalisa dua jenis input *loading* yaitu *point source* dan *distributed source*.



Gambar 2.14. *Point Source* dan *Distributed Source* Untuk Sistem Satu Dimensi

(Chapra, 1997)

Untuk *point source*, konsentrasi awal c_0 dapat dihitung dengan mengambil keseimbangan massa pada titik masukan. Bila diasumsikan pencampuran sempurna terjadi pada dimensi lateral dan vertikal, situasi dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.15. Keseimbangan Massa Untuk Input *Point Source* ke Dalam Sistem *Plug Flow* (Chapra, 1997)

Keseimbangan alirannya didapat:

$$Q = Q_w + Q_r \quad (2.12.1)$$

Keseimbangan massa kemudian dirumuskan menjadi:

$$0 = Q_w c_w + Q_r c_r - (Q_w + Q_r) c_0 \quad (2.12.2)$$

Persamaan ini diselesaikan menjadi:

$$c_0 = \frac{Q_w c_w + Q_r c_r}{Q_w + Q_r} \quad (2.12.3)$$

atau karena $W = Q_w c_w$, maka:

$$c_0 = \frac{W + Q_r c_r}{Q_w + Q_r} \quad (2.12.4)$$

2.13 Jenis Input Beban (*Loading*)

Input beban yang masuk ke dalam sistem dapat dinyatakan dalam bentuk matematis menjadi beberapa jenis, yaitu:

a. *Impulse Loading (Spill)*

Yaitu beban yang masuk ke dalam sistem dalam waktu yang relatif singkat.

b. *Step Loading (Continuous)*

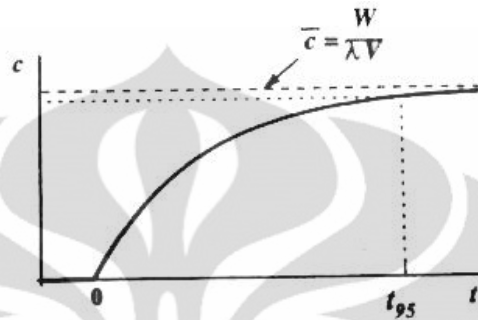
Yaitu beban yang masuk ke dalam sistem secara kontinu. Beban ini dapat direpresentasikan secara matematis sebagai berikut:

$$W(t) = 0 \quad t < 0 \quad (2.13.1)$$

$$W(t) = W \quad t \geq 0 \quad (2.13.2)$$

Dengan W menyatakan nilai beban yang konstan (MT^{-1}). Penyelesaian khusus untuk kasus *step loading* adalah:

$$c = \frac{W}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.13.3)$$



Gambar 2.16. Respons Badan Air Terhadap Beban Kontinu (*Step Loading*)
(Chapra, 1997)

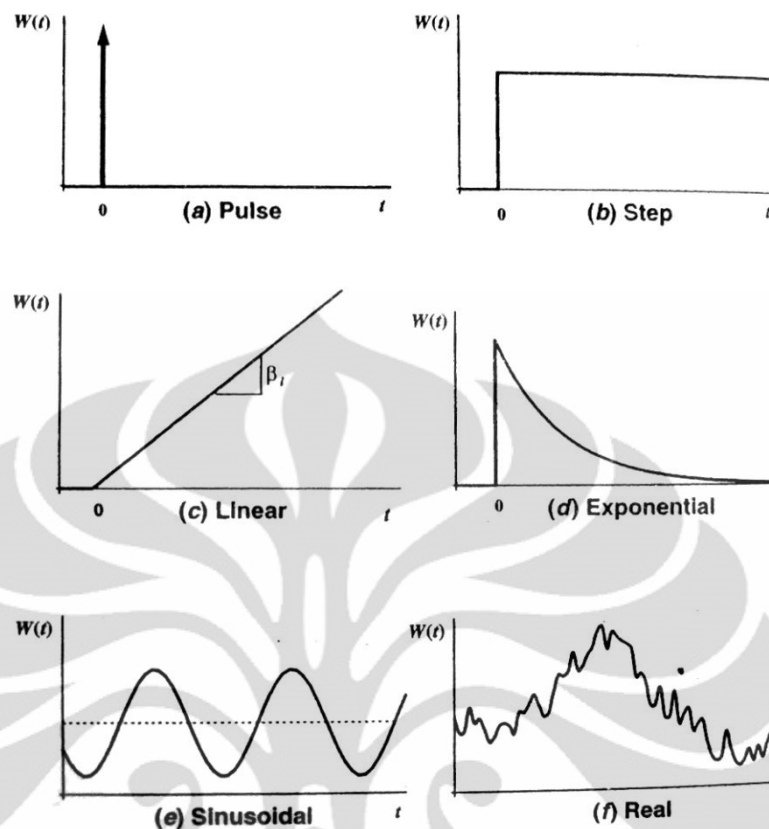
c. *Linear Loading*

Yaitu beban yang masuk ke dalam sistem dengan konsentrasi yang meningkat secara konstan terhadap perubahan waktu. Bila digambarkan dengan grafik, beban tersebut membentuk garis linear terhadap waktu.

d. *Exponential Loading*

Yaitu beban yang masuk ke dalam sistem dengan konsentrasi yang menurun secara eksponensial terhadap perubahan waktu.

Plot dalam grafik untuk masing-masing jenis beban tersebut dapat dilihat dalam Gambar 2.17.



Gambar 2.17. Plot Grafik Fungsi Beban $W(t)$ vs Waktu t
(Chapra, 1997)

2.14 Hidrogeometri Sungai

Hidrogeometri sungai terdiri atas karakteristik hidrologi sungai (kecepatan, debit, dispersi) dan geometri sungai (kedalaman, lebar, luas penampang, kemiringan atau slope). Terdapat dua pendekatan untuk menentukan parameter tersebut, yaitu pendekatan pada titik (*point estimates*) dan pendekatan pada daerah tinjauannya (*reach estimates*).

Metode *reach* biasanya digunakan dengan asumsi bahwa lebar sungai tidak terlalu bervariasi dibandingkan kedalamannya. Dengan demikian, sungai yang ditinjau diidentifikasi memiliki lebar yang relatif konstan.

Kecepatan sungai ditentukan dengan mengobservasi berapa waktu yang diperlukan untuk mencapai jarak tertentu pada aliran tersebut. Kecepatan sungai (U) kemudian dapat dihitung dengan persamaan:

$$U = \frac{x}{t} \quad (2.14.1)$$

dengan

U : kecepatan aliran sungai [LT^{-1}]

x : jarak yang ditempuh pada aliran sungai [L]

t : waktu yang diperlukan untuk menempuh jarak x [T]

Penentuan koefisien dispersi longitudinal sungai (E) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$E = 0,05937 \frac{Q}{SB} \quad (2.14.2)$$

dengan

E : koefisien dispersi sungai [L^2T^{-1}]

Q : debit aliran sungai [L^3T^{-1}]

S : slope/kemiringan sungai

B : lebar sungai [L]

Untuk perhitungan matematis, koefisien dispersi sungai yang digunakan umumnya adalah E' dengan rumus sebagai berikut:

$$E' = \frac{EA_c}{l} \quad (2.14.3)$$

dengan

E' : bulk koefisien dispersi sungai [L^3T^{-1}]

E : koefisien dispersi sungai [L^2T^{-1}]

A_c : luas penampang aliran sungai [L^2]

l : panjang sungai yang ditinjau [L]

Luas penampang aliran ditentukan dengan observasi dan perhitungan berdasarkan persamaan berikut:

$$A_c = \int_0^B z(x) dx \quad (2.14.4)$$

dengan

A_c : kecepatan rata-rata di setiap titik yang ditinjau [L^2]

x : jarak melintang aliran sungai [L]

$z(x)$: kedalaman pada titik x [L]

B : lebar aliran sungai [L]

Kecepatan dan luas penampang aliran rata-rata kemudian dapat digunakan untuk menentukan debit aliran atau Q [$L^3 T^{-1}$], yaitu:

$$Q = U \times A_c \quad (2.14.5)$$

Kedalaman aliran H kemudian dapat ditentukan dengan persamaan:

$$H = \frac{A_c}{B} \quad (2.14.6)$$

2.15 Dinamika Aliran

Aliran fluida terbagi menjadi beberapa jenis. Pada aliran fluida yang sebenarnya atau normal seperti sungai, kondisi aliran di satu titik akan berbeda pada titik lainnya misalnya dalam hal kecepatannya. Aliran ini dinamakan aliran tidak seragam atau *non-uniform*. Jika aliran pada suatu titik berubah menurut waktu, aliran tersebut disebut aliran *unsteady*. Aliran dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- *Uniform flow*
Yaitu bila besar dan arah kecepatan aliran di setiap titik sama.
- *Non-uniform*
Yaitu bila kecepatan di setiap titik tidak selalu sama.
- *Steady*
Yaitu bila kondisi aliran (kecepatan, tekanan, dan luas penampang) dapat bervariasi di setiap titiknya, namun tidak berubah menurut waktu.
- *Unsteady*
Yaitu bila di suatu titik dalam aliran kondisi aliran berubah menurut waktu. Pada kenyataannya, dalam suatu aliran akan selalu terdapat variasi kecepatan dan tekanan. Tetapi bila nilai rata-rata kecepatan dan tekanan tersebut konstan atau tetap, maka aliran dapat dikatakan *steady*.

2.16 Metode Numerik

Perhitungan secara numerik dibutuhkan karena perhitungan secara analitis memiliki beberapa batasan, yaitu:

- Dalam perhitungan secara analitis fungsi loading dianggap ideal untuk memenuhi bentuk linear, eksponensial, maupun sinusoidal. Pada kenyataannya, loading tidak sepenuhnya memenuhi bentuk atau pola tersebut.
- Variabel parameter seperti Q , V , k , v , dalam perhitungan analitis dianggap konstan. Padahal pada kenyataannya, parameter tersebut dapat bervariasi.
- Sistem dengan lebih dari dua segmen membutuhkan perhitungan numerik agar lebih efisien.
- Persamaan analitis yang telah dibahas terbatas pada reaksi orde satu, yang berarti perhitungan terbatas pada aljabar linear dan persamaan diferensial. Pada kenyataannya, terdapat berbagai permasalahan kualitas air yang membutuhkan reaksi nonlinear. Dalam kasus ini, perhitungan secara analitis tidak dapat digunakan.

Terdapat beberapa metode perhitungan numerik, antara lain yaitu metode Euler, metode Heun, dan metode Runge-Kutta. Metode Euler merupakan metode paling sederhana untuk menyelesaikan persamaan diferensial biasa, sedangkan metode Runge Kutta banyak digunakan dalam perhitungan pemodelan kualitas air dengan orde reaksi lebih besar ($n > 1$).

2.16.1 Metode Heun

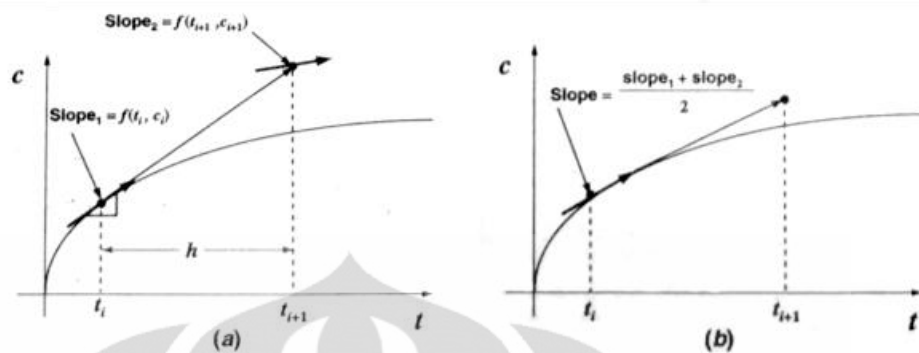
Metode Heun dikembangkan untuk meminimalisasi error dari metode Euler dengan cara memperhitungkan turunan sepanjang interval. Turunan tersebut dirata-ratakan dari satu nilai di awal dan satu nilai di akhir untuk mendapatkan perkiraan yang lebih baik untuk slope sepanjang interval.

Dalam metode Euler, slope di awal interval dinyatakan dengan:

$$\frac{dc_i}{dt} = f(t_i, c_i) \quad (2.16.1)$$

Persamaan tersebut diekstrapolasi secara linear menjadi c_{i+1} :

$$c_{i+1}^0 = c_i + f(t_i, c_i)h \quad (2.16.2)$$



Gambar 2.18. Gambaran Grafis Metode Heun (a) *Predictor* (b) *Corrector*
(Chapra, 1997)

h dalam persamaan 2.16.2 tersebut menyatakan selang waktu (Δt) yang diinginkan.

Pada metode Heun, c_{i+1}^0 yang dikalkulasikan dalam persamaan 2.16.2 bukan merupakan penyelesaian terakhir melainkan merupakan sebuah prediksi lanjutan. Angka 0 di atas c menunjukkan perkiraan c_{i+1} yang merupakan kalkulasi dari perkiraan slope di akhir interval:

$$\frac{dc_{i+1}}{dt} = f(t_{i+1}, c_{i+1}^0) \quad (2.16.3)$$

Dua slope (2.16.2 dan 2.16.3) dapat dikombinasikan untuk mendapatkan rata-rata slope untuk interval, menjadi:

$$\overline{\frac{dc}{dt}} = \frac{f(t_i, c_i) + f(t_{i+1}, c_{i+1}^0)}{2} \quad (2.16.4)$$

Slope rata-rata kemudian digunakan untuk ekstrapolasi linear dari c_i menjadi c_{i+1} menjadi:

$$c_{i+1} = c_i + \frac{f(t_i, c_i) + f(t_{i+1}, c_{i+1}^0)}{2} h \quad (2.16.5)$$

Metode Heun disebut sebagai *predictor-corrector method*. Kemudian dapat diekspresikan secara ringkas sebagai

Predictor:

$$c_{i+1}^o = c_i + f(t_i, c_i)h \quad (2.16.6)$$

Corrector:

$$c_{i+1} = c_i + \frac{f(t_i, c_i) + f(t_{i+1}, c_{i+1}^0)}{2} h \quad (2.16.7)$$

2.16.2 Metode Runge-Kutta

Metode Runge-Kutta (atau RK) merupakan jenis metode numerik yang banyak digunakan untuk pemodelan kualitas air. Metode RK mempunyai sebuah bentuk umum:

$$c_{i+1} = c_i + \phi h \quad (2.16.8)$$

Dengan ϕ adalah perkiraan slope (secara formal disebut sebuah fungsi kenaikan). Metode Euler merupakan orde satu metode RK dengan $\phi = f(t_i, c_i)$. Metode Heun (tanpa pendekatan *corrector*) merupakan orde dua dari metode RK.

Metode RK yang paling umum digunakan adalah metode orde empat yang mempunyai bentuk:

$$c_{i+1} = c_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h \quad (2.16.9)$$

dengan

$$k_1 = f(t_i, c_i) \quad (2.16.10)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, c_i + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (2.16.11)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, c_i + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (2.16.12)$$

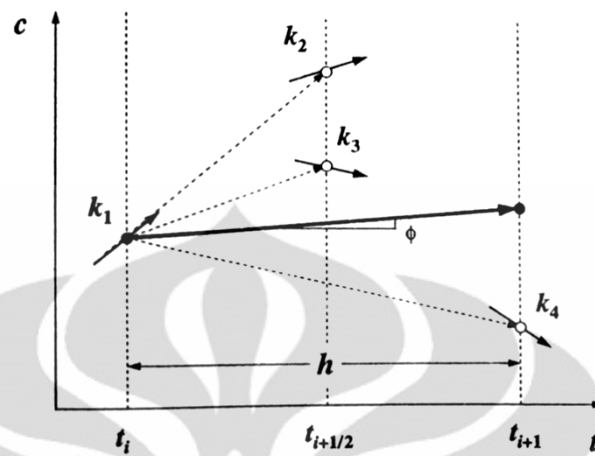
$$k_4 = f(t_i + h, c_i + hk_3) \quad (2.16.13)$$

Fungsi f dinyatakan sebagai berikut:

$$f(t, c) = \frac{dc}{dt}(t, c) \quad (2.16.14)$$

Metode RK orde empat mirip dengan pendekatan Heun dalam hal beberapa perkiraan slope yang dikembangkan untuk mengetahui rata-rata slope sepanjang interval. Seperti yang terlihat dalam Gambar 2.19, setiap nilai k

mewakili sebuah slope. Persamaan 2.16.8 kemudian menunjukkan rata-rata terbobot slope sebagai pendekatan kenaikan slope tersebut.



Gambar 2.19. Penggambaran Grafis Metode Runge Kutta Orde Empat
(Chapra, 1997)

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

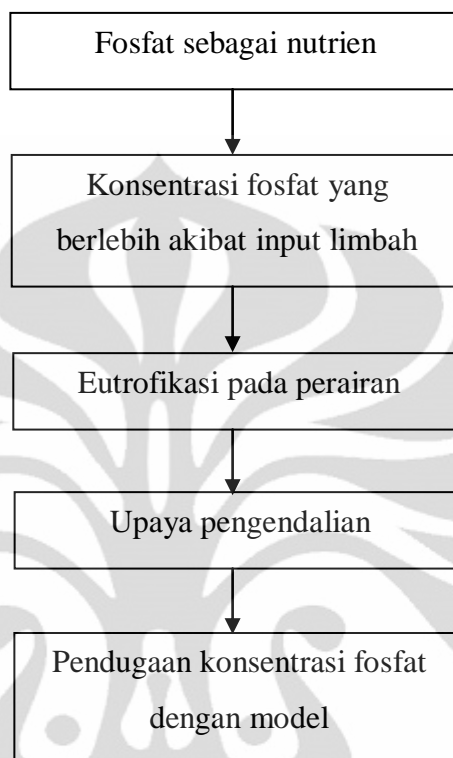
Pendugaan konsentrasi fosfat dalam badan air yang mendapatkan input limbah secara menerus dapat dilakukan melalui pembuatan sebuah model. Sebelum proses pemodelan dilakukan, terdapat beberapa tahapan yang harus dilalui meliputi pemilihan lokasi studi, penentuan spesifikasi dan batasan masalah, pengembangan teori hingga proses pengembangan model dengan metode numerik. Lokasi studi yang dipilih merupakan badan air yang berpotensi mengalami eutrofikasi akibat input konsentrasi fosfat dalam limbah yang dibuang secara menerus. Menurut survey awal penulis di tahun 2010, Sungai Pesanggrahan sebagai badan air penerima lindi dari TPA Cipayung Kota Depok telah mengalami indikasi eutrofikasi berupa tingginya konsentrasi alga di permukaan sungai. Hal inilah yang kemudian menjadi salah satu pertimbangan penulis untuk mengambil lokasi tersebut sebagai lokasi studi untuk dimodelkan.

Dalam proses penyusunan model, juga dibutuhkan pengambilan data baik primer maupun sekunder. Pada penelitian ini, pengambilan sampel atau data primer dan pengumpulan data sekunder dilakukan untuk mengetahui kondisi badan air Sungai Pesanggrahan ditinjau dari parameter fosfat. Sebelum dilakukan perhitungan model juga dilakukan pengambilan sampel atau data primer sebagai bagian dari langkah pengaplikasian model. Observasi lapangan atau pengambilan sampel konsentrasi fosfat dalam badan air yang ditinjau juga kemudian dilakukan sebagai bentuk evaluasi terhadap perhitungan model yang telah dilakukan. Di akhir penelitian akan dilakukan pembahasan mengenai model yang dibuat serta mengenai kondisi badan air Sungai Pesanggrahan bila ditinjau dari konsentrasi fosfat yang diterima akibat input lindi TPA Cipayung.

3.2 Kerangka Pemikiran

Berdasarkan penjelasan di bagian sebelumnya, kemudian dapat dibuat alur kerangka pemikiran yang menunjukkan dasar pemikiran untuk penelitian

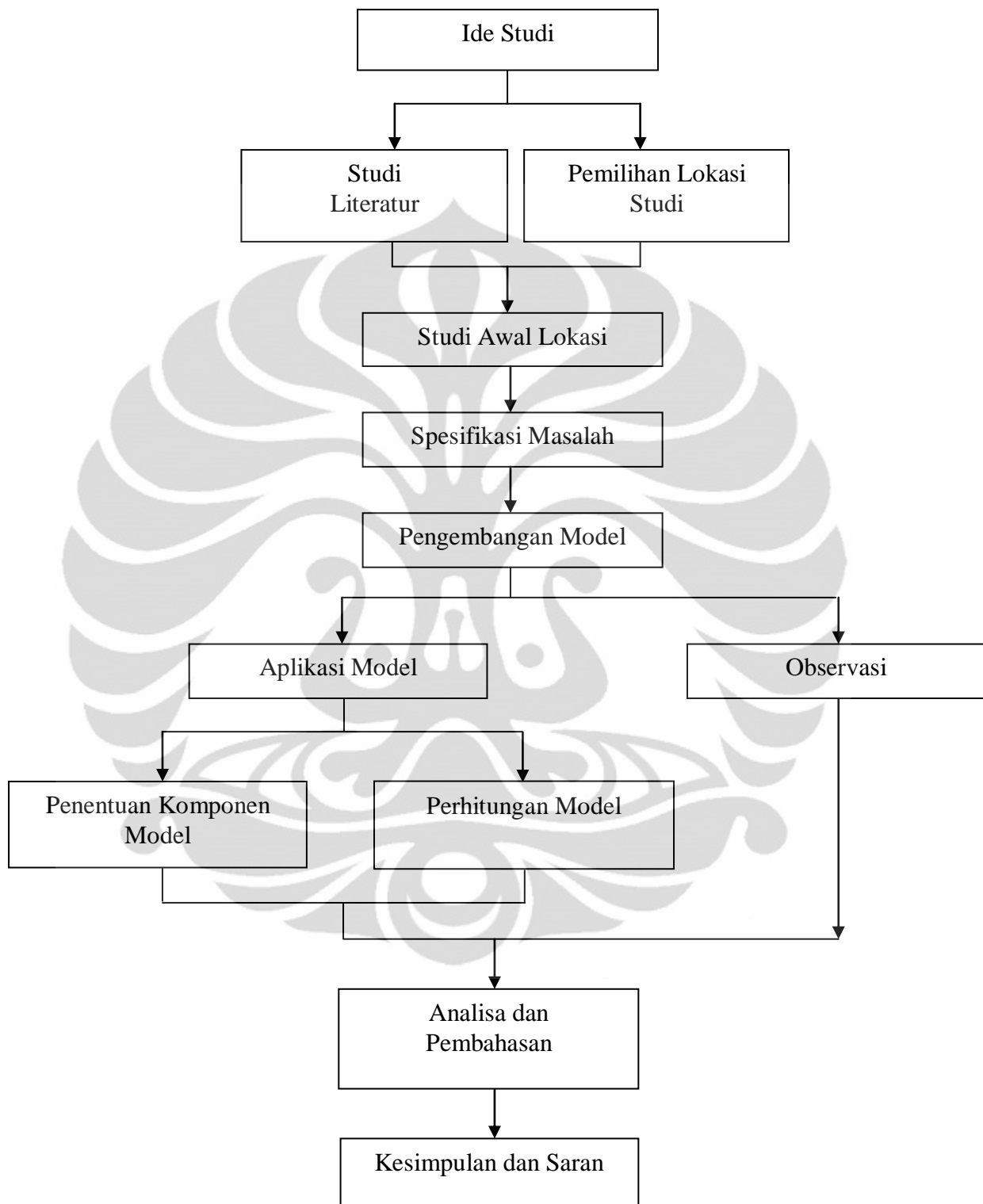
yang dilakukan. Alur kerangka pemikiran untuk penelitian ini dapat dilihat dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Alur Kerangka Pemikiran
(Pengolahan Penulis, 2010)

3.3 Kerangka Penelitian

Metode penelitian disusun sebagai pedoman dalam pelaksanaan penelitian agar permasalahan yang diambil sebagai ide dapat terselesaikan sesuai tujuan penelitian. Kerangka penelitian dibuat untuk mengetahui langkah-langkah yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian. Dengan dibuatnya kerangka penelitian, pelaksanaan dapat dilakukan secara sistematis dan kemungkinan terjadinya kesalahan dalam penelitian dapat dihindari.



Gambar 3.2. Bagan Alir Metodologi Penelitian
(Pengolahan Penulis, 2010)

3.4 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian berisi tentang langkah-langkah yang akan dilakukan selama pelaksanaan penelitian.

3.4.1 Ide Studi

Studi ini dilatarbelakangi oleh potensi terjadinya eutrofikasi pada badan air sebagai penerima air buangan limbah. Eutrofikasi tersebut terjadi sebagai akibat dari tingginya konsentrasi fosfat pada air limbah yang dibuang ke badan air tersebut. Eutrofikasi merupakan salah satu bentuk pencemaran air yang dapat mengakibatkan terganggunya keseimbangan kehidupan akuatik serta menurunnya kualitas air. Pemodelan konsentrasi fosfat dapat dilakukan sebagai suatu bentuk pendugaan terhadap konsentrasi fosfat yang terkandung dalam badan air. Hasil dari pendugaan tersebut kemudian dapat dijadikan sebagai suatu acuan untuk melakukan pengendalian pada badan air tersebut untuk mencegah ataupun mengantisipasi terjadinya eutrofikasi.

3.4.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mendukung pelaksanaan penelitian serta pembuatan model. Pada awal pengembangan ide, studi literatur dilakukan untuk mendapatkan dasar teori yang kuat sehingga dapat dijadikan sebagai acuan dalam pelaksanaan penelitian. Sumber literatur meliputi jurnal, artikel ilmiah, *text book*, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini.

Data sekunder dan studi pustaka yang dibutuhkan untuk proses pembuatan model adalah data mengenai perilaku fosfat di perairan, sumber fosfat yang dihasilkan atau dalam hal ini adalah lindi, instalasi pengolahan air lindi di lokasi studi, data hidrogeometri sungai yang ditinjau sebagai badan air penerima, teori mengenai perhitungan konsentrasi fosfat di sungai, teori mengenai perhitungan numerik, serta teori mengenai pemodelan dan batasan yang perlu diambil dalam proses pembuatan model.

3.4.3 Pemilihan Lokasi

Model konsentrasi fosfat dibuat untuk menduga perubahan konsentrasi fosfat pada badan air sebagai penerima limbah. Lokasi studi yang dipilih diutamakan merupakan badan air yang berpotensi mengalami eutrofikasi sebagai akibat tingginya konsentrasi fosfat dari limbah yang dibuang ke badan air tersebut. Lokasi studi yang dipilih adalah Sungai Pesanggrahan yang merupakan badan air penerima buangan lindi dari TPA Cipayung Kota Depok.

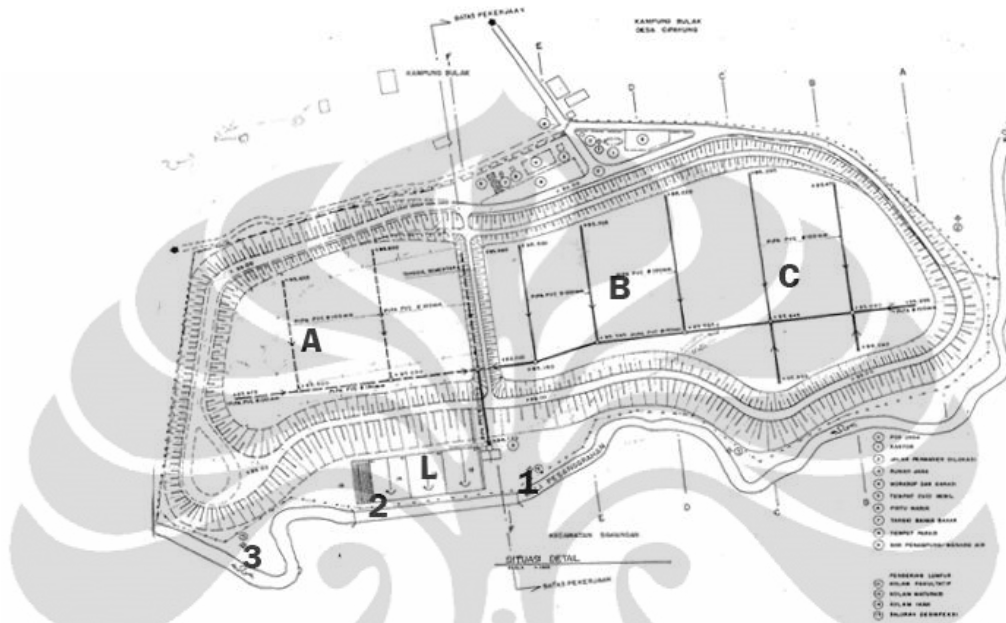
Berdasarkan survey awal penulis pada tahun 2010, di lokasi Sungai Pesanggrahan yang berdekatan dengan efluen pengolahan lindi telah terlihat indikasi eutrofikasi berupa tingginya konsentrasi alga di permukaan air sungai. Badan air penerima lindi dari TPA atau *landfill* berpotensi mengalami peningkatan konsentrasi fosfat karena menurut literatur, lindi dari TPA dapat mengandung fosfat 5 hingga 100 mg/L (Tchobanoglous, 1993). Sementara menurut PP No. 82 Tahun 2001 tentang pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran air, total fosfat dalam perairan kelas I, II, III, dan IV masing-masing tidak boleh melebihi dari 0,2 mg/L, 0,2 mg/L, 1 mg/L, dan 5 mg/L. Menurut Wetzel (1983), perairan dengan konsentrasi fosfat 0,08 mg/L sudah dapat dikatakan sebagai perairan eutrofik karena konsentrasi tersebut dapat memicu pertumbuhan alga yang berlebihan. Dari berbagai pertimbangan tersebut kemudian diputuskan bahwa lokasi yang akan ditinjau untuk dimodelkan adalah Sungai Pesanggrahan sebagai badan air penerima lindi dari TPA Cipayung.

3.4.4 Studi Awal Lokasi

Studi awal lokasi dilakukan untuk mengetahui kondisi badan air yang kemudian dijadikan sebagai bahan pertimbangan dan batasan dalam pembuatan model. Studi awal lokasi juga dilakukan setelah proses perizinan selesai dilakukan untuk mengumpulkan data sekunder dan data primer dari lokasi studi yang dibutuhkan untuk penulisan dan spesifikasi masalah.

Dari studi awal lokasi ini, informasi yang didapatkan antara lain adalah layout dari TPA, termasuk lokasi instalasi pengolahan air lindi dan Sungai Pesanggrahan sebagai badan air penerima. Dari studi awal lokasi ini juga diketahui kondisi hidrogeometri sungai berupa rata-rata kedalaman sungai serta

lebarnya, data konsentrasi fosfat pada efluen lindi menuju sungai, dan informasi lainnya seperti dimensi TPA dan instalasi pengolahan air lindi.



Keterangan:

- A : Zona landfill
- B : Zona landfill
- C : Zona landfill
- L : Unit instalasi pengolahan air lindi 1
- 1 : Sungai Pesanggrahan
- 2 : Efluen instalasi pengolahan air lindi
- 3 : Lokasi unit instalasi pengolahan air lindi 2

Gambar 3.3. Layout TPA Cipayung Kota Depok
(TPA Cipayung, 2007)

Dalam Gambar 3.3 ditunjukkan bahwa instalasi pengolahan air lindi yang dinotasikan dengan huruf L, menerima lindi dari *landfill* pada zona A, B, dan C. Titik 1 menunjukkan aliran Sungai Pesanggrahan bagian hulu. Titik 2 menunjukkan tempat keluar efluen lindi menuju Sungai Pesanggrahan.

TPA Cipayung saat ini telah memiliki 2 unit instalasi pengolahan air lindi. Namun, dalam Gambar 3.3 tidak terlihat lokasi unit instalasi pengolahan air lindi yang baru. Berdasarkan studi awal penulis, lokasi unit instalasi pengolahan air lindi yang baru terletak di sekitar titik 3. Efluen dari unit instalasi pengolahan air lindi 2 ini juga masuk ke Sungai Pesanggrahan.

3.4.5 Spesifikasi dan Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Parameter kualitas air yang diteliti adalah fosfat.
- Model dibuat untuk Sungai Pesanggrahan yang menerima konsentrasi fosfat dari efluen lindi TPA Cipayung. Konsentrasi fosfat di sungai akibat buangan limbah lainnya tidak dimasukkan ke dalam perhitungan.
- Input limbah atau lindi merupakan *step loading* yang diasumsikan mengandung konsentrasi fosfat tetap atau tidak berubah menurut waktu.
- Perhitungan model dilakukan untuk sungai dalam kondisi *steady state* (tanpa perubahan waktu) dengan pendekatan *control volume*, dan sungai dalam kondisi *unsteady uniform* dengan menggunakan metode *finite difference*.
- Model yang dibuat dapat dibedakan menjadi dua. Yang pertama, model untuk perubahan konsentrasi fosfat pada badan air terhadap waktu. Yang kedua adalah model untuk perubahan konsentrasi fosfat terhadap jarak.
- Komponen dispersi, kecepatan dan debit aliran sungai dianggap sama (*uniform*) di setiap segmen serta tidak berubah terhadap waktu.
- Sungai dianggap merupakan sistem *mixed-flow* dimana terjadi pencampuran secara sempurna, dengan fokus hanya dilakukan pada variasi arah longitudinal (x).
- Panjang sungai yang ditinjau untuk model adalah 40 m, dengan jumlah segmen sebanyak 20 buah. Panjang setiap segmen adalah 2 m.

3.4.6 Pengembangan Model

Setelah data awal yang dibutuhkan terkumpul dan batasan masalah selesai dibuat, maka selanjutnya penyusunan model dapat mulai dilakukan.

Pembuatan model dilakukan secara mandiri karena penyelesaian model dengan *software* memiliki banyak batasan yang dikhawatirkan akan membuatnya menjadi tidak sesuai dengan kondisi sungai yang ditinjau.

Dalam proses penyusunan model, dilakukan analisa terhadap lokasi yang ditinjau untuk dimodelkan dan dilakukan pemilihan dan penyesuaian rumus teoritis untuk dikembangkan menjadi model. Batasan masalah yang telah ditentukan sebelumnya juga mempengaruhi pengambilan keputusan untuk persamaan yang akan digunakan.

3.4.6.1 Model Perubahan Konsentrasi Dalam Kondisi *Steady State* dengan Pendekatan *Control Volume*

Sebelum meninjau perubahan konsentrasi terhadap waktu, terlebih dahulu dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai konsentrasi dalam kondisi *steady state* atau tanpa perubahan waktu. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan *control volume*. Hasil dari perhitungan ini kemudian dijadikan sebagai data kondisi awal yang dibutuhkan untuk perhitungan model perubahan konsentrasi terhadap waktu dan jarak dengan metode *finite difference*. Untuk perhitungan dengan pendekatan *control volume*, badan air Sungai Pesanggrahan dibagi menjadi 20 segmen atau *control volume* ($n=20$). Maka nilai c yang akan diketahui adalah c_1, c_2, c_3 , hingga c_{20} .

Persamaan keseimbangan massa untuk setiap segmen atau *control volume* adalah persamaan 2.9.2 yaitu:

$$0 = W_i + Q_{i-1,i}c_{i-1} - Q_{i,i+1}c_i + E'_{i-1,i}(c_{i-1} - c_i) + E'_{i,i+1}(c_{i+1} - c_i) - k_i V_i c_i \quad (2.9.2)$$

Dengan mengumpulkan variabel yang sama maka persamaan menjadi:

$$-(Q_{i-1,i} + E'_{i-1,i})c_{i-1} + (Q_{i,i+1} + E'_{i-1,i} + E'_{i,i+1} + k_i V_i)c_i - (E'_{i,i+1})c_{i+1} = W_i \quad (2.9.3)$$

atau

$$a_{i,i-1}c_{i-1} + a_{i,i}c_i + a_{i,i+1}c_{i+1} = W_i \quad (2.9.4)$$

dengan masing-masing nilai a adalah sebagai berikut.

$$a_{i,i-1} = -Q_{i-1,i} - E'_{i-1,i} \quad (2.9.5)$$

$$a_{i,i} = Q_{i,i+1} + E'_{i-1,i} + E'_{i,i+1} + k_i V_i \quad (2.9.6)$$

$$a_{i,i+1} = -E'_{i,i+1} \quad (2.9.7)$$

Penyelesaian persamaan tersebut akhirnya adalah berupa matriks seperti pada persamaan (2.9.21), yaitu:

$$[A]\{c\} = \{W\} \quad (2.9.21)$$

dengan,

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & \cdot & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & a_{n-1,n-2} & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.9.22)$$

$$\{c\} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_{n-1} \\ c_n \end{bmatrix} \quad \{W\} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \vdots \\ W_{n-1} \\ W_n \end{bmatrix} \quad (2.9.23)$$

Karena jumlah segmen yang dibuat adalah sebanyak 20 buah, maka matriks yang dibuat adalah matriks 20x20. Panjang sungai yang ditinjau adalah 40 m, sehingga panjang setiap segmen sungai adalah 2 m.

3.4.6.2 Model Perubahan Konsentrasi dengan Metode *Finite Difference*

Berdasarkan hasil studi awal di lokasi Sungai Pesanggrahan dan TPA Cipayang serta hasil studi literatur, model perubahan konsentrasi fosfat terhadap waktu dan jarak dapat dikembangkan dengan pendekatan persamaan 2.8.9 yaitu:

$$\Delta V \frac{\partial c}{\partial t} = -UA_c \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x + EA_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \Delta x - k\Delta V \bar{c} \quad (2.8.9)$$

Persamaan tersebut merupakan persamaan untuk sistem sungai yang dianggap adalah sistem *mixed-flow*. Dengan memasukkan input beban berupa *step loading* sesuai persamaan 2.13.2, maka penurunan persamaan menjadi sebagai berikut:

$$\Delta V \frac{\partial c}{\partial t} = -UA_c \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x + EA_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \Delta x - k\Delta V \bar{c} + W(t) \quad (3.4.1)$$

Bila setiap unsur dibagi dengan $\Delta V = A_c \Delta x$ dan diambil batasan ($\Delta x \rightarrow 0$), maka didapatkan:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U \frac{\partial c}{\partial x} + E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc + \frac{W(t)}{\Delta V} \quad (3.4.2)$$

Dalam kondisi *steady state*, persamaan menjadi:

$$0 = -U \frac{dc}{dx} + E \frac{d^2c}{dx^2} - kc + \frac{W(t)}{\Delta V} \quad (3.4.3)$$

Persamaan 3.4.2 digunakan untuk mengetahui perubahan konsentrasi terhadap waktu (t) dan jarak (x) akibat input secara menerus (*step loading*) pada sistem *mixed-flow*. Hal ini sesuai dengan batasan masalah yang telah ditentukan bahwa sistem dianggap merupakan sistem *mixed-flow*, dengan input limbah secara menerus (*step loading*). Sedangkan parameter yang ditinjau adalah konsentrasi fosfat. Selanjutnya persamaan tersebut diturunkan menurut metode *finite difference* dengan pendekatan *forward-time/centered-space (FTCS)*. Hasil penurunan persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

$$\frac{c_i^{l+1} - c_i^l}{\Delta t} = -U \frac{c_{i+1}^l - c_{i-1}^l}{2\Delta x} + E \frac{c_{i+1}^l - c_i^l + c_{i-1}^l}{\Delta x^2} - k_i c_i^l + \frac{W_i}{\Delta V} \quad (3.4.4)$$

Kemudian, agar perhitungan model menjadi lebih efisien, digunakan metode numerik sebagai kelanjutan dari perhitungan rumus teoritis. Metode perhitungan numerik yang digunakan adalah metode Runge-Kutta orde empat. Dengan perhitungan numerik tersebut nilai c dalam persamaan 3.4.4 dihitung dengan pendekatan hingga 4 slope, yang menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$c_{i+1} = c_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h \quad (2.16.9)$$

dengan

$$k_1 = f(t_i, c_i) \quad (2.16.10)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, c_i + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (2.16.11)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}h, c_i + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (2.16.12)$$

$$k_4 = f(t_i + h, c_i + hk_3) \quad (2.16.13)$$

Perhitungan tersebut dilakukan dengan bantuan *spreadsheet* pada program Microsoft Excel. Hasil dari perhitungan ini adalah berupa prediksi nilai perubahan konsentrasi terhadap jarak dan waktu.

Penentuan Δt atau selang waktu yang dapat ditinjau dilakukan dengan menggunakan syarat:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{U} \quad (3.4.5)$$

3.4.7 Penentuan Komponen Model

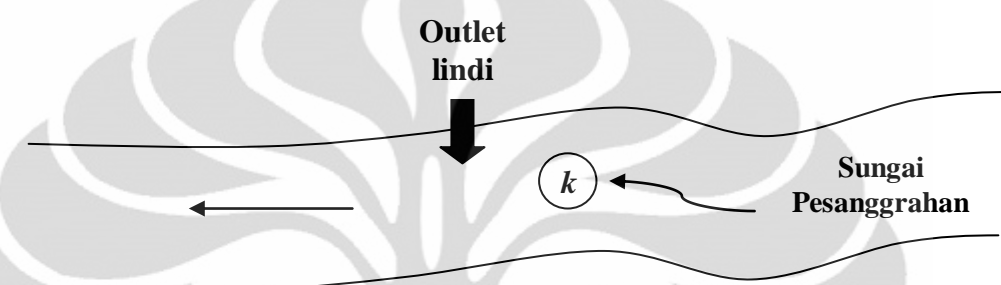
Sebelum melakukan perhitungan model, perlu ditentukan terlebih dahulu komponen-komponen dalam persamaan yang akan digunakan. Untuk penentuan komponen tersebut dilakukan pengambilan data primer dan perhitungan. Persamaan yang akan dimodelkan adalah persamaan 3.4.4, maka komponen yang harus ditentukan terlebih dahulu adalah nilai k , E , U dan c , atau c_0 serta W .

- Penentuan k

k menunjukkan laju pembusukkan (T^{-1}) secara alami pada badan air. Untuk menentukan nilai k dilakukan dengan pengambilan sampel pada bagian hulu sungai sebelum titik efluen lindi, untuk mendapatkan perubahan konsentrasi fosfat terhadap waktu. Konsentrasi fosfat pada sampel diukur dengan metode Spektrofotometri di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan Fakultas Teknik UI. Sampel disimpan dalam wadah terbuka di laboratorium. Pengecekan fosfat dalam sampel tersebut dilakukan setiap 24 jam sampai hari kelima. Hasil pengukuran konsentrasi tersebut kemudian diplot ke dalam grafik untuk mengetahui orde reaksi yang sesuai untuk nilai k . Untuk mendapatkan orde reaksi yang sesuai, grafik hasil pengukuran konsentrasi fosfat menurut waktu dibandingkan dengan grafik pada Gambar 2.3 dan 2.4. Setelah didapatkan orde

reaksi yang sesuai, data konsentrasi fosfat kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan untuk mengetahui nilai k . Langkah-langkah penentuan k adalah sebagai berikut:

- a. Pengambilan sampel air sungai dilakukan di bagian hulu (sebelum outlet lindi) atau pada Gambar 3.4 adalah pada titik k . Sampel diambil secukupnya untuk pengukuran fosfat sebanyak 5 kali selama 5 hari ke depan. Sampel disimpan dalam wadah tertutup untuk dibawa ke laboratorium.



Gambar 3.4. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Untuk Penentuan Nilai k
(Pengolahan Penulis, 2011)

- b. Pengukuran konsentrasi fosfat dalam sampel. Pengukuran dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan FTUI dengan metode Spektrofotometri menggunakan reagen Molybdate dan Asam amino.
- c. Hasil dari pengukuran tersebut disusun dalam tabel seperti berikut ini:

Tabel 3.1. Hasil Pengamatan Untuk Penentuan k

Waktu ke- ($\Delta = 1$ hari)	0	1	2	3	4
Konsentrasi (mg/L P)	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4

Sumber: Pengolahan Penulis, 2010

Data dari tabel tersebut kemudian diplot ke dalam grafik konsentrasi vs waktu.

- d. Grafik yang telah dibuat antara konsentrasi dan perubahan waktu kemudian dibandingkan dengan grafik pada Gambar 2.3 dan 2.4. Untuk kemudian ditentukan sebagai reaksi orde nol atau orde satu.

- e. Setelah orde reaksi untuk k ditentukan, kemudian dilakukan substitusi nilai c atau konsentrasi ke dalam persamaan yang sesuai untuk mendapatkan nilai k . Persamaan untuk reaksi orde nol adalah:

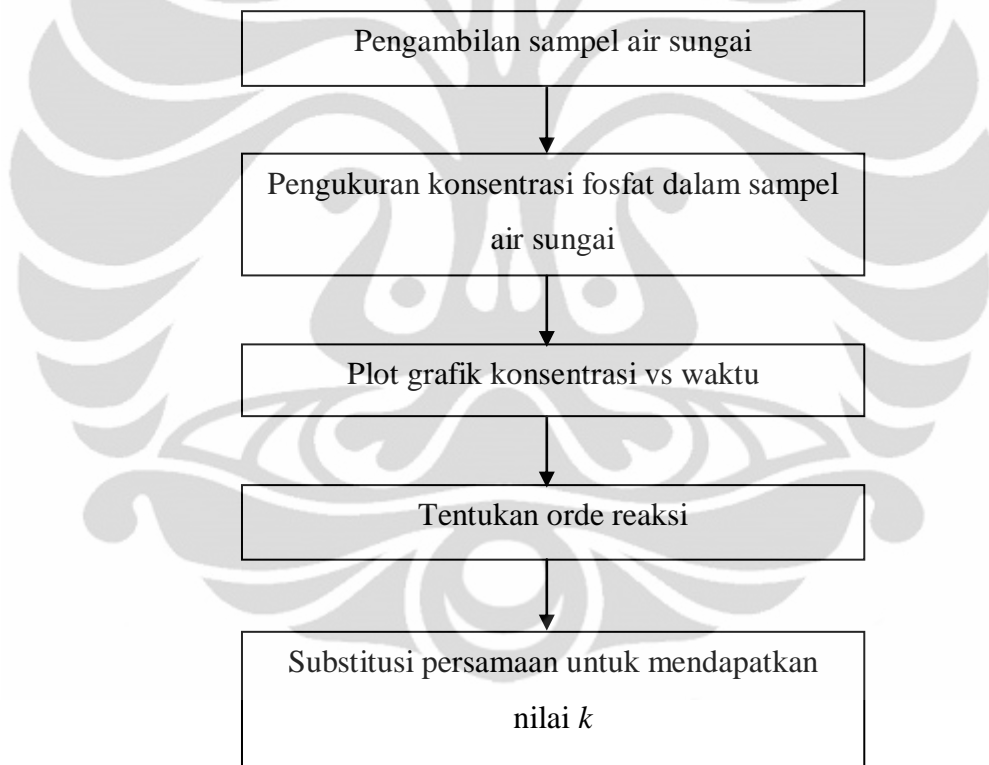
$$c = c_0 - kt \quad (2.6.6)$$

Persamaan untuk reaksi orde satu adalah:

$$c = c_0 e^{-kt} \quad (2.6.9)$$

- f. Hasil substitusi tersebut adalah nilai k yang akan disubstitusikan ke dalam persamaan untuk model.

Diagram alir penentuan k dapat dilihat pada Gambar 3.5.



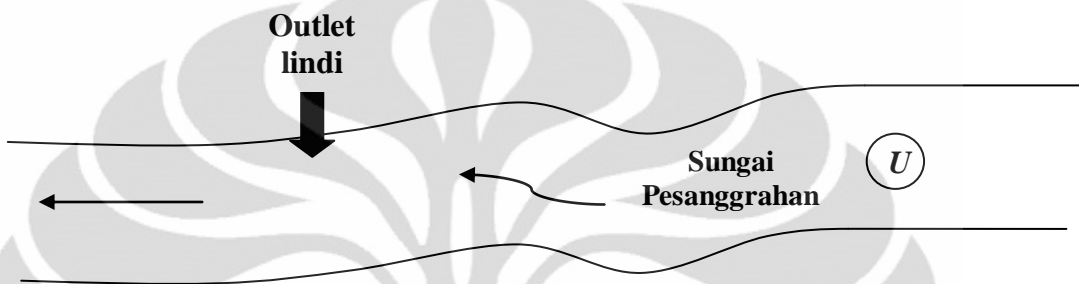
Gambar 3.5. Bagan Alir Penentuan k

(Pengolahan Penulis, 2010)

- Penentuan U

U menyatakan kecepatan aliran sungai atau mekanisme adveksi dalam sungai. Penentuan U dilakukan dengan bantuan alat Currentmeter. Pengukuran dilakukan di lokasi Sungai Pesanggrahan sebelum efluen lindi. Lokasi untuk

pengukuran sebisa mungkin di titik aliran yang cenderung lurus atau tidak berkelok. Ilustrasi lokasi pengukuran untuk nilai U dapat dilihat pada Gambar 3.6. Pengukuran dilakukan di kedalaman 0,2, 0,6, dan 0,8 dari kedalaman sungai dan dilakukan di tiga titik yaitu di tengah–tengah lebar sungai ($0,5L$), pinggir kiri ($0,25L$) dan pinggir kanan ($0,75L$) sungai. Hasil pengukuran diolah dalam *spreadsheet* untuk mengetahui kecepatan aliran sungai (U).



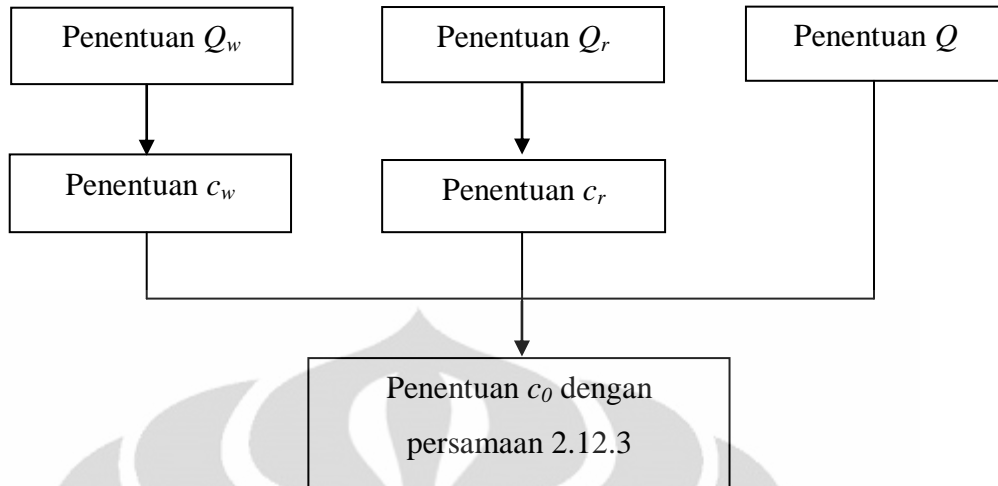
Gambar 3.6. Ilustrasi Lokasi Pengukuran Untuk Mendapatkan Nilai U
(Pengolahan Penulis, 2011)

- Penentuan c_0

c_0 menyatakan konsentrasi awal fosfat pada badan air setelah mendapat input konsentrasi dari limbah (Gambar 2.15). c_0 ditentukan dengan persamaan 2.12.3 yaitu:

$$c_0 = \frac{Q_w c_w + Q_r c_r}{Q_w + Q_r} \quad (2.12.3)$$

Q_w adalah debit efluen lindi yang masuk ke sungai. c_w adalah konsentrasi fosfat dalam air lindi yang masuk ke sungai. Q_r adalah debit air sungai di lokasi hulu atau sebelum titik keluar efluen lindi ke sungai, dan c_r adalah konsentrasi fosfat di lokasi tersebut. Alur penentuan c_0 dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Bagan Alir Penentuan c_0
(Konsentrasi Fosfat dalam Air Sungai Setelah Efluen Lindi)
(Pengolahan Penulis, 2010)

a. Penentuan Q_w

Penentuan debit (Q_w) efluen lindi menuju sungai dilakukan dengan metode pengukuran langsung berdasarkan persamaan 2.14.5.

$$Q = U \times A_c \quad (2.14.5)$$

Pengukuran U atau kecepatan aliran lindi dilakukan secara manual dengan bantuan bola pingpong. Kecepatan bola pingpong yang mengalir di atas aliran lindi diasumsikan akan sama dengan kecepatan aliran lindi. Kemudian nilai U dihitung sesuai dengan persamaan 2.14.1:

$$U = \frac{x}{t} \quad (2.14.1)$$

Nilai A_c ditentukan dengan melakukan pengukuran langsung terhadap luas penampang aliran di saluran lindi. Pengukuran U dan A_c dilakukan sebanyak beberapa kali. Hasil pengukuran tersebut kemudian dirata-ratakan dan dimasukkan ke dalam persamaan 2.14.5 untuk menghasilkan nilai Q_w .

b. Penentuan c_w

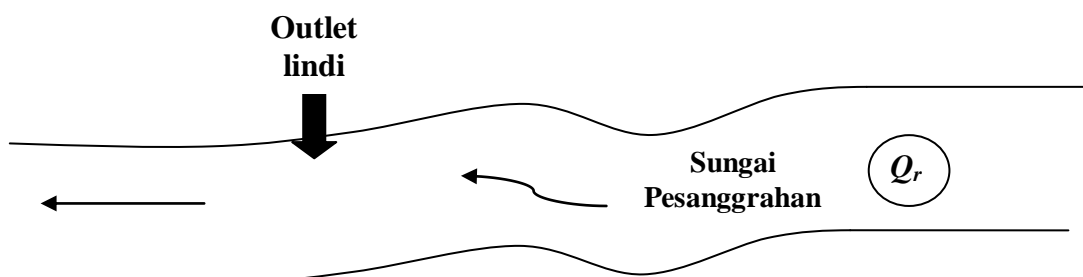
Penentuan c_w atau konsentrasi fosfat dalam efluen lindi yang masuk ke sungai dilakukan melalui pemeriksaan di laboratorium. Untuk menentukan konsentrasi fosfat terlebih dahulu dilakukan pengambilan beberapa sampel

efluen lindi. Pemeriksaan konsentrasi fosfat kemudian dilakukan untuk setiap sampel dengan metode Spektrofotometri. Hasil pengukuran konsentrasi fosfat dalam beberapa sampel air lindi tersebut dirata-ratakan dan ditentukan sebagai c . Langkah-langkah penentuan konsentrasi fosfat dalam efluente lindi adalah sebagai berikut:

- Pengambilan sampel efluente lindi yang menuju ke sungai. Pengambilan sampel adalah dengan menampung efluente lindi yang tepat akan menuju sungai.
- Pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam sampel efluente lindi. Pemeriksaan dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan FTUI dengan metode Spektrofotometri menggunakan reagen Molybdate dan Asam amino. Pemeriksaan dilakukan setelah pengambilan sampel.

c. Penentuan Q_r

Penentuan debit aliran sungai di bagian hulu atau sebelum titik efluente lindi masuk ke sungai (Q_r) dilakukan dengan bantuan alat Currentmeter, dengan prosedur yang sama dengan pengukuran untuk menentukan U . Pengukuran dilakukan di lokasi Sungai Pesanggrahan sebelum efluente lindi. Lokasi untuk pengukuran sebisa mungkin di titik aliran yang cenderung lurus atau tidak berkelok. Ilustrasi lokasi pengukuran dapat dilihat dalam Gambar 3.8. Pengukuran dilakukan di kedalaman 0,2, 0,6, dan 0,8 dari kedalaman sungai dan dilakukan di tiga titik yaitu di tengah-tengah lebar sungai (0,5L), pinggir kiri (0,25L) dan pinggir kanan (0,75L) sungai. Hasil pengukuran diolah dalam *spreadsheet* untuk mengetahui debit aliran sungai (Q_r).



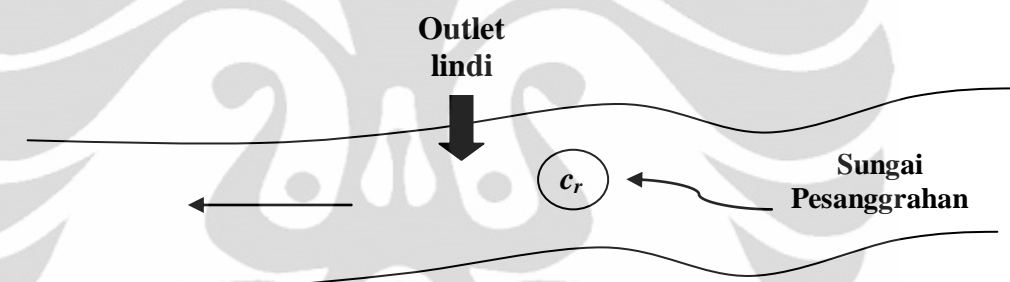
Gambar 3.8. Ilustrasi Lokasi Pengukuran Untuk Mendapatkan Nilai Q_r

(Pengolahan Penulis, 2011)

d. Penentuan c_r

Penentuan c_r dilakukan dengan pengambilan sampel air sungai dan pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam sampel tersebut di laboratorium. Hasil pemeriksaan konsentrasi fosfat tersebut kemudian dirata-ratakan untuk mengetahui nilai c_r . Langkah-langkah penentuan c_r dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Pengambilan sampel air sungai sebelum titik efluen lindi atau tepatnya di titik c_r pada Gambar 3.9.
- Pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam sampel air sungai. Pemeriksaan dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan FTUI dengan metode Spektrofotometri menggunakan reagen Molybdate dan Asam amino. Pemeriksaan dilakukan setelah pengambilan sampel.



Gambar 3.9. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Untuk Penentuan Nilai c_r
(Pengolahan Penulis, 2011)

- Penentuan W

W menyatakan beban limbah yang masuk ke dalam sistem. Nilai W dapat dinyatakan dengan perkalian Q_w dan c_w . Nilai Q_w dan c_w adalah nilai yang telah diketahui sebelumnya pada langkah penentuan c_0 .

- Penentuan E

E menyatakan koefisien dispersi sungai. Untuk sungai yang hanya ditinjau pada sumbu longitudinal, penentuan E dilakukan sesuai dengan persamaan 2.14.2:

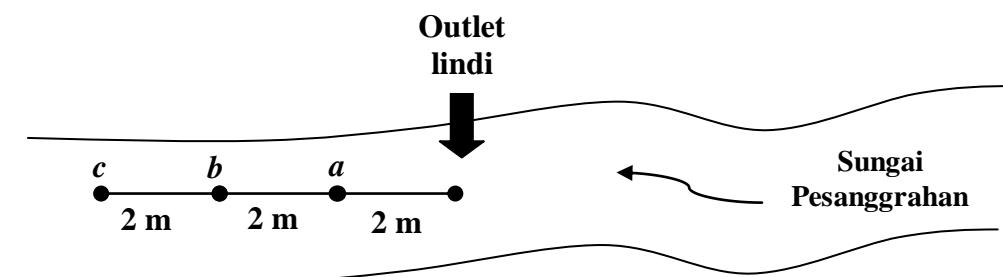
$$E = 0,05937 \frac{Q}{SB} \quad (2.14.2)$$

Nilai Q dalam persamaan tersebut adalah debit aliran sungai atau Q_r . Nilai S menyatakan slope atau kemiringan sungai. Dan l menyatakan panjang sungai yang ditinjau, yaitu 40 m. Penentuan S dilakukan dengan bantuan *Google Earth* untuk mengetahui ketinggian atau elevasi di titik lokasi studi. Panjang sungai ditentukan sesuai dengan batasan model yang akan dibuat. Lebar sungai atau B diketahui melalui pengukuran langsung di beberapa titik. Hasil pengukuran tersebut kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan sebuah nilai B yang akan digunakan dalam perhitungan.

3.4.8 Validasi Model

Sebagai bentuk validasi model, dilakukan pengukuran konsentrasi fosfat di beberapa titik di lapangan (observasi). Proses observasi dilakukan untuk mengetahui konsentrasi fosfat menurut perubahan waktu dan jarak dengan pemeriksaan secara langsung dan membandingkannya dengan hasil konsentrasi yang didapatkan dari hasil perhitungan atau model secara numerik. Untuk mendapatkan data observasi ini dilakukan pengambilan sampel air sungai dan pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam sampel tersebut.

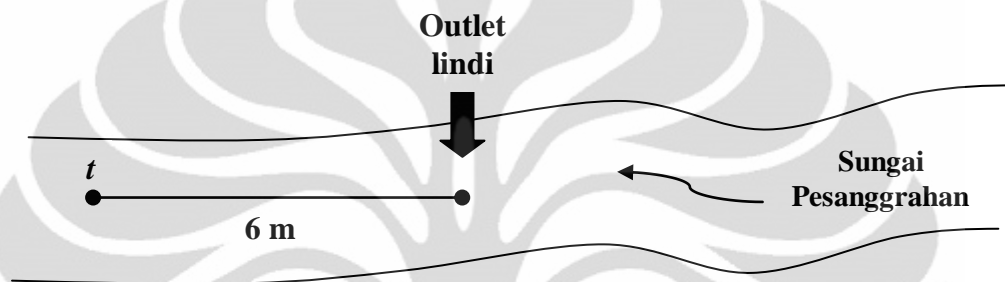
Untuk model perubahan konsentrasi fosfat terhadap jarak, dilakukan pengambilan sampel di 3 titik berbeda pada satu waktu yang sama. Pengambilan sampel dilakukan pada jarak 2 m, 4 m, dan 6 m dari titik outlet lindi. Selengkapnya dapat dilihat dalam ilustrasi berikut. Sampel air sungai diambil di titik a , b , dan c .



Gambar 3.10. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Observasi Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak

(Pengolahan Penulis, 2011)

Untuk model perubahan konsentrasi fosfat terhadap waktu, dilakukan pengambilan sampel air sungai di sebuah titik di hilir sungai atau setelah titik efluen lindi. Ilustrasi lokasi pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 3.11. Sampel yang diambil adalah sebanyak 3 buah. Masing-masing sampel diambil dengan perbedaan waktu sesuai dengan nilai h atau Δt pada perhitungan model, yaitu 2,88 detik atau sekitar 3 detik.



Gambar 3.11. Ilustrasi Lokasi Pengambilan Sampel Observasi Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu

(Pengolahan Penulis, 2011)

Pengukuran konsentrasi fosfat dalam setiap sampel. Konsentrasi fosfat dalam masing-masing sampel ditentukan dengan metode Spektrofotometri menggunakan reagen Molybdat dan Asam amino. Pengukuran konsentrasi fosfat dalam sampel tersebut dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan FTUI setelah pengambilan sampel.

Besarnya penyimpangan atau error antara hasil perhitungan dengan hasil observasi dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\%error = \left| \frac{C_{perhitungan} - C_{observasi}}{C_{perhitungan}} \right| \times 100\% \quad (3.4.6)$$

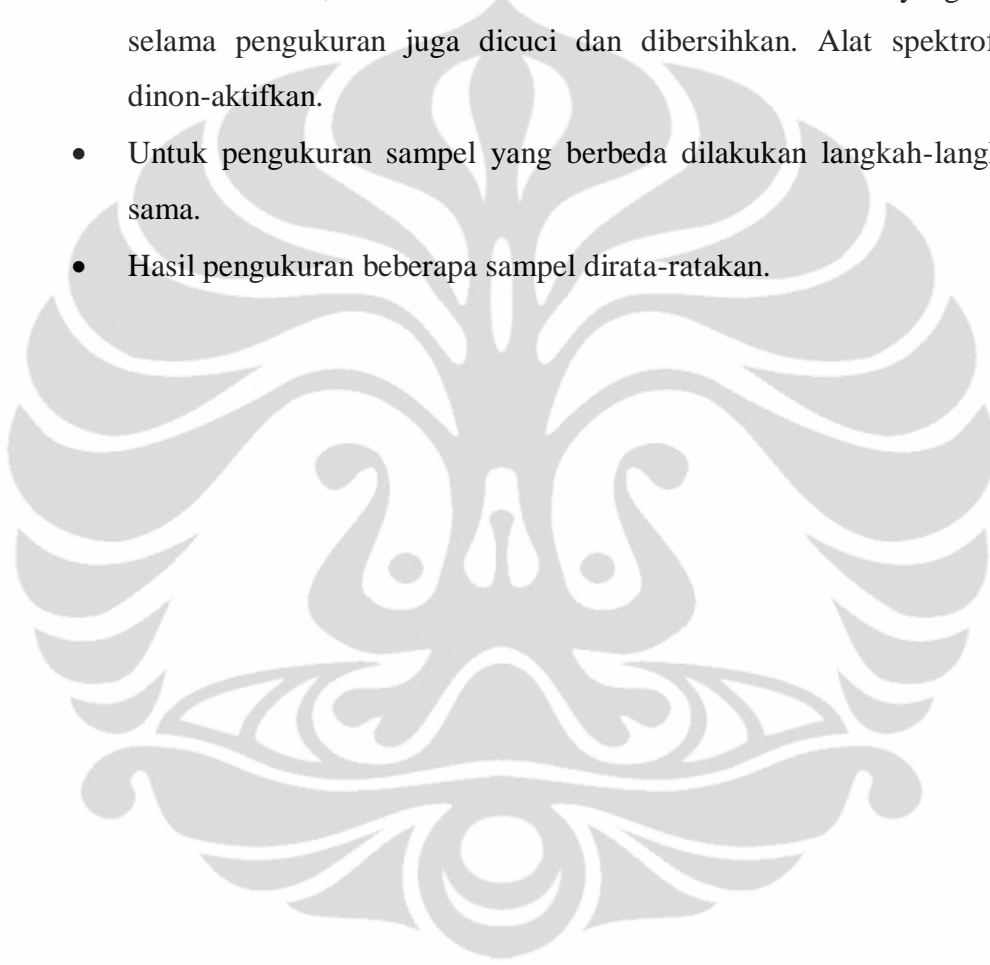
3.5 Metode Pengukuran Fosfat

Fosfat dalam seluruh sampel air dalam penelitian ini diukur dengan metode Spektrofotometri menggunakan reagen Molybdate dan Asam amino. Reagen tersebut bereaksi dalam suasana asam hingga membentuk warna biru. Warna ini menunjukkan konsentrasi fosfor yang dapat dibaca oleh alat

spektrofotometer DR2000 pada panjang gelombang 530 nm. Langkah-langkah yang dilakukan untuk pengukuran fosfat adalah sebagai berikut:

- Sampel dihomogenkan dengan cara dikocok.
- Untuk sampel yang pekat (misalnya air lindi), dilakukan pengenceran sampel terlebih dahulu. Untuk pengenceran 10x, sampel diambil sebanyak 10 ml kemudian diencerkan dengan air suling hingga 100 ml dalam gelas ukur. Untuk pengenceran 100x, sampel diambil sebanyak 1 ml kemudian diencerkan dengan air suling hingga 100 ml. Pengenceran sampel dilakukan karena spektrofotometer hanya dapat membaca kadar fosfat dalam range hingga 2 mg/L. Sampel air yang pekat dengan kadar fosfat yang melebihi range tersebut tidak dapat terbaca oleh alat ini.
- Sampel yang diencerkan dalam gelas ukur dihomogenkan.
- Sampel yang telah diencerkan dan dihomogenkan kemudian dipipet untuk dimasukkan ke dalam dua buah kuvet masing-masing sebanyak 25 ml. Kuvet yang digunakan sebelumnya harus dibilas dengan air suling dan air sampel terlebih dahulu. Kuvet pertama akan digunakan sebagai blanko dan tidak diberi reagen, sementara kuvet kedua akan diberi reagen dan sebagai sampel yang akan ditentukan konsentrasi fosfatnya.
- Sampel dalam kuvet dihomogenkan.
- 1 ml reagen Molybdate dan 1 ml Asam amino ditambahkan ke dalam satu buah kuvet (kuvet kedua) yang telah berisikan 25 ml sampel. Campuran dalam kuvet tersebut kemudian dihomogenkan.
- Spektrofotometer DR 2000 dipasang untuk pengukuran fosfat dengan menekan tombol 487. Kemudian ditentukan pembacaan panjang gelombang sebesar 530 nm.
- Penentuan konsentrasi fosfat akan dilakukan setelah campuran dalam kuvet kedua didiamkan selama 10 menit. *Timer* selama 10 menit dapat dipasang juga pada alat spektrofotometer.
- Setelah 10 menit, kuvet pertama sebagai blanko diletakkan dalam alat spektrofotometer dan ditetapkan sebagai blanko dengan menekan tombol "ZERO". Ditunggu sesaat hingga pembacaan alat spektrofotometer menunjukkan "0,00 mg/L P", kemudian kuvet dikeluarkan.

- Kuvet kedua yang berisi campuran sampel dan reagen dimasukkan ke dalam alat spektrofotometer dan ditentukan konsentrasinya dengan menekan tombol “READ”.
- Alat spektrofotometer akan menunjukkan hasil pembacaan konsentrasi fosfat dengan satuan mg/L P.
- Setelah selesai, kuvet dikeluarkan dan dicuci. Alat-alat yang digunakan selama pengukuran juga dicuci dan dibersihkan. Alat spektrofotometer dinon-aktifkan.
- Untuk pengukuran sampel yang berbeda dilakukan langkah-langkah yang sama.
- Hasil pengukuran beberapa sampel dirata-ratakan.



BAB 4

GAMBARAN UMUM LOKASI OBJEK STUDI

4.1 Gambaran Umum TPA Cipayung

TPA Cipayung terletak di Jalan Bukit Kapur, Kelurahan Cipayung, Kecamatan Pancoranmas, Kota Depok. TPA ini dibangun sejak tahun 1984 dengan sistem pengolahan *open dumping*. Tahun 2002, TPA ini memperluas lahannya dari 6,10 ha menjadi 9,10 ha, dengan kapasitas penampungan sampah sebesar 1.200.000 m³. Sistem pengelolaan sampah di TPA Cipayung saat ini adalah *control landfill*.

Batas-batas wilayah TPA Cipayung adalah:

- Sebelah Utara : Pemukiman Kampung Bulak, Kelurahan Cipayung
- Sebelah Selatan : Sungai Pesanggrahan, Kelurahan Pasir Putih
- Sebelah Timur : Kebun campuran di Kampung Bulak, Kelurahan Cipayung
- Sebelah Barat : Kebun campuran, Sungai Pesanggrahan

Sebelum dibangun TPA, wilayah TPA Cipayung merupakan daerah bukit bertanah kapur. Untuk pembuatan *landfill*, wilayah ini digali dan dilapisi oleh tanah merah. Di sebelah barat dan selatan TPA Cipayung terdapat Sungai Pesanggrahan yang merupakan badan air penerima air olahan lindi TPA. Sungai Pesanggrahan memiliki lebar ± 6 meter dan kedalaman berkisar 1-3 meter. Sungai ini mengalir wilayah Depok dan merupakan salah satu anak Sungai Ciliwung.

Bila dilihat melalui *Google Earth*, TPA Cipayung berada di tengah pemukiman penduduk yang belum terlalu padat. Namun, di sekitar lokasi TPA terdapat beberapa pengembang perumahan yang sudah mulai membangun perumahan baru. Tidak tertutup kemungkinan, beberapa waktu mendatang lokasi sekitar TPA akan padat oleh pemukiman penduduk.



Gambar 4.1. Lokasi TPA Cipayung Melalui Pencitraan Udara
(*Google Earth, 2010*)

Menurut sensus penduduk tahun 2010, jumlah penduduk Kota Depok adalah 1.736.565 jiwa. Dari jumlah tersebut, dengan asumsi timbulan sampah sebesar 2,65 liter/org/hari, maka timbulan sampah penduduk Kota Depok pada tahun 2010 diperkirakan adalah sebesar 4.601,897 m³/hari. Volume sampah yang masuk ke TPA Cipayung menurut data Rekapitulasi Laporan Volume Sampah Harian Bulan Januari-November 2010 adalah berkisar 700 hingga 970 m³. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tingkat pelayanan pengangkutan ke TPA Cipayung tahun 2010 adalah sebesar 15,2 – 21,1 %.

Kondisi TPA Cipayung menurut data dari Dinas Kebersihan dan Pertamanan Kota Depok tahun 2003 dapat dilihat dalam tabel berikut.

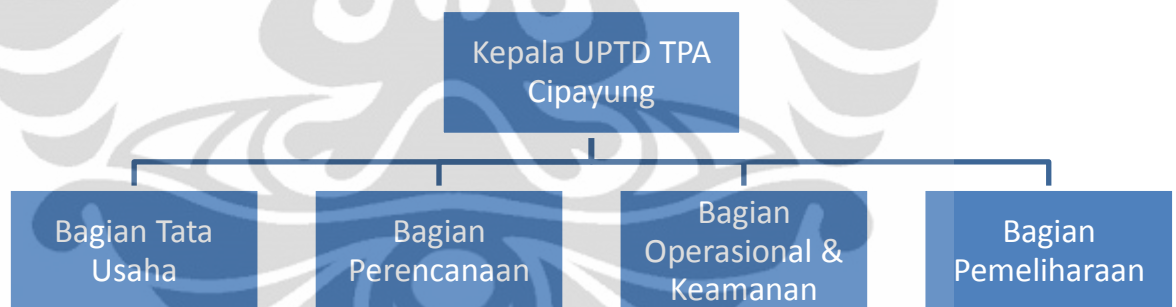
Tabel 4.1. Kondisi TPA Cipayung Kota Depok

Kondisi	TPA Cipayung
Luas	10,1 ha
Jarak dari: <ul style="list-style-type: none"> • Pemukiman terdekat • Pusat kota • Sungai terdekat 	Bersebelahan di blok barat (± 50 m) 10 km Pesanggrahan (10 m)
Usia layanan (rancangan)	10 tahun (sampai tahun 2010)
Kondisi tanah	<i>Lime/ berkapur</i>
Topografi	Kemiringan <20%

Sumber: DKP Kota Depok, 2003

4.2 Struktur Organisasi TPA Cipayung

TPA Cipayung dipimpin oleh seorang Kepala UPTD. Struktur organisasi dalam TPA Cipayung adalah sebagai berikut.



Gambar 4.2. Struktur Organisasi Pengurus TPA Cipayung

(TPA Cipayung, 2010)

4.3 Infrastruktur dan Fasilitas TPA Cipayung

Infrastruktur dan fasilitas yang dimiliki oleh TPA Cipayung antara lain adalah sebagai berikut:

1. Struktur tanah permukaan *landfill* di lokasi TPA Cipayung sebagian besar berupa tanah liat yang mempunyai permeabilitas 10^{-7} cm/detik, sehingga tidak

diperlukan pelapisan kembali. Fungsi lapisan tersebut untuk menahan rembesan air lindi ke dalam tanah.

2. Pipa lindi pada lahan urugan, berfungsi untuk mengalirkan air lindi menuju bangunan pengolahan. Pipa penyalur lindi dipasang di atas permukaan geomembran.
3. Pipa gas, dipasang pada lahan *landfill* setiap radius 50 m. Fungsi dari pipa gas ini adalah untuk mengalirkan gas yang terbentuk dari hasil dekomposisi sampah organik dan mencegah terakumulasi gas didalam *landfill* karena akan menimbulkan ledakan atau hal-hal lain yang tidak diinginkan seperti kebakaran.
4. Drainase saluran pengering di TPA
 - a) Drainase lindi, terdapat di sepanjang pinggir *landfill* dan mengalir ke kolam lindi.
 - b) Drainase air hujan, terdapat di pinggir jalan akses dan drainase sementara pada lahan *landfill* diarahkan ke bak pengumpul.
5. Kolam lindi

Kolam lindi merupakan tempat penampungan lindi dari seluruh area *landfill*. Di kolam tersebut lindi diolah dengan tujuan untuk mengurangi konsentrasi pencemaran dalam *leachate* sampai ke tingkat yang aman untuk dibuang ke badan air terdekat yaitu Sungai Pesanggrahan. Sistem pengolahan yang diterapkan adalah dengan menggunakan kolam stabilisasi yang terdiri atas kolam anaerobik, kolam fakultatif, dan kolam maturasi/ pematangan.
6. Fasilitas lain yang dimiliki antara lain adalah berupa infrastruktur jalan, fasilitas alat berat, UPS atau Unit Pengolahan Sampah, kantor, gudang, rumah jaga, serta tempat cuci mobil dan tempat parkir untuk kendaraan operasional angkutan sampah.



Gambar 4.3. Kondisi Lahan Penimbunan Baru TPA Cipayung Saat Proses Penghamparan Sampah
(Observasi Penulis, 2011)



Gambar 4.4. Kondisi Lahan Penimbunan Lama TPA Cipayung Setelah Diberikan Tanah Penutup
(Observasi Penulis, 2010)

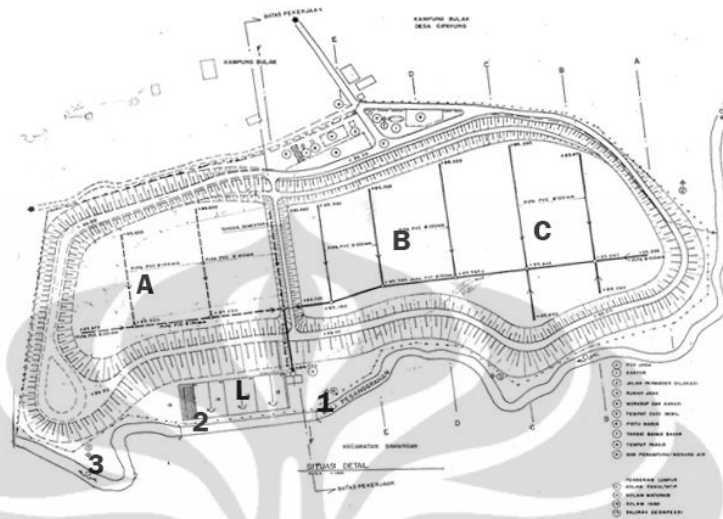


Gambar 4.5. Kondisi Jalan Masuk TPA Cipayung
(Observasi Penulis, 2010)



Gambar 4.6. Kondisi Fasilitas UPS di TPA Cipayung
(Observasi Penulis, 2010)

4.4 Data Teknis TPA Cipayung



Keterangan:

- A : Zona landfill
- B : Zona landfill
- C : Zona landfill
- L : Unit instalasi pengolahan air lindi 1
- 1 : Sungai Pesanggrahan
- 2 : Efluen instalasi pengolahan air lindi
- 3 : Lokasi unit instalasi pengolahan air lindi 2

Gambar 4.7. Layout TPA Cipayung Kota Depok
(TPA Cipayung, 2007)

Seperti terlihat dalam gambar, lahan penimbunan di TPA terbagi menjadi 3 area yaitu Zona A, Zona B, dan Zona C. Desain ketinggian maksimum adalah 30 m. Rata-rata ketinggian 23,20 m dengan level dasar 95 m dan level tertinggi 125 m. Umur sampah diketahui berdasarkan penimbunan sampah pada tiap area tersebut. Misalnya, Zona C memiliki umur timbun hingga 2009 adalah 9 tahun. Dimensi sel yang terbentuk per harinya adalah tinggi 1,2 m, lebar 10 m dan panjang 22,5 m.

Pengisian areal timbunan dilakukan bergiliran setiap waktunya antara Kolam A, B, dan C. Setiap 7 hari atau seminggu sekali, lahan timbunan sampah

ditutup dengan tanah penutup. Kemudian beralih ke lahan timbunan di kolam lainnya, sebelum lahan timbunan pertama digunakan kembali. Selain Kolam A, B, dan C, TPA Cipayung juga memiliki lahan baru yang baru dioperasikan pada Februari 2011.



Keterangan:

- 1 : Lahan penimbunan lama
- 2 : Kantor TPA
- 3 : Unit UPS
- 4 : Lahan penimbunan baru
- 5 : Instalasi pengolahan air lindi 1
- 6 : Instalasi pengolahan air lindi 2
- 7 : Badan air Sungai Pesanggrahan

Gambar 4.8. Layout TPA Cipayung Melalui Pencitraan Udara

(Google Earth, 2010)

Berikut adalah rincian luas TPA dan kapasitasnya setelah Revisi AMDAL TPA Cipayung 2008/2009.

- a. Kolam Lama (A, B, C)
 - Luas total area penimbunan pada kolam lama: 91.000.000 atau 9,1 ha
 - Luas areal penimbunan 61.000 m² atau 6,1 ha
 - Kedalaman penimbunan 16-23 m atau rata-rata 23,3 m
 - Kapasitas tampung 1.200.000 m²
- b. Kolam Baru
 - Luas areal penimbunan 6.174 m² atau 0,6174 ha
 - Kedalaman timbunan sejajar jalan 7,5 m dan 10,0 m (penambahan +2,5 m)
 - Kapasitas tampung 46.305-61.740 m³

4.5 Operasional TPA Cipayung

Sampah yang sampai di lokasi TPA oleh kendaraan pengangkut diturunkan ke lahan timbunan. Pemilahan dilakukan oleh pemulung setelah dihamparkan di lokasi TPA atau oleh petugas pengangkut sebelum sampah dibawa ke TPA. Sampah di lokasi TPA tersebut kemudian dihamparkan dengan bantuan *bulldozer* dan *excavator*.

Operasional penimbunan sampah selengkapnya adalah sebagai berikut.

- Operasional penimbunan sampah dilakukan mulai pukul 07.00 WIB hingga 17.00 WIB. Dengan demikian maka waktu pembongkaran sampah dari truk ke lahan timbunan dijadwalkan selesai paling lambat pada pukul 15.00 WIB. Selanjutnya pada pukul 15.00-17.00 WIB dilakukan perataan dan pemadatan sampah.
- Penghamparan sampah dilakukan dengan menggunakan *bulldozer*. Pada musim kemarau, penghamparan dilakukan dari dasar *landfill*, sedangkan pada musim hujan penghamparan dilakukan dari atas timbunan sampah. Sampah dihamparkan ke seluruh permukaan sel, untuk selanjutnya diratakan dan dipadatkan.



Gambar 4.9. Kondisi Saat Pembongkaran dan Penghamparan Sampah di Lahan Penimbunan Lama TPA Cipayung Kota Depok

(Observasi penulis, 2010)

- Perataan dan pemadatan tanah dilakukan dengan bantuan *truck loader*. Proses perataan dilakukan per lapis, setiap lapisnya diratakan sampai setebal 20 – 60 cm dengan cara mengatur ketinggian *blade* pada *truck loader*. Sampah yang telah rata kemudian dipadatkan dengan cara diberi tekanan sebanyak 3- 5 kali. Perataan dan pemadatan sampah dilakukan sampai seluruh ketebalannya 1,5 m. Setelah seluruh sel tertutup dengan lapisan sampah yang telah dipadatkan, penghamparan dan pemadatan dilanjutkan ke sel berikutnya.
- Setelah pemadatan selesai, sampah kemudian ditutup dengan tanah. Tanah penutup dibutuhkan untuk mencegah timbulnya bau, sampah berserakan, bahaya kebakaran, berkembangbiaknya lalat dan binatang pengerat, mengurangi timbulan lindi, serta untuk menstabilkan timbulan sampah agar terhindar dari longsor. Proses penutupan dilakukan dengan bantuan alat berat. Penutupan dilakukan dengan meratakan tanah setebal 25 cm di atas permukaan sel sampah yang telah dipadatkan. Pemadatan dengan tanah dilakukan 2 – 3 kali lintasan hingga tanah menjadi padat atau mencapai ketebalan 20 cm. Kemiringan tanah pada sisi-sisi lahan TPA tidak boleh lebih dari 30°.

4.6 Instalasi Pengolahan Lindi TPA Cipayung

Lahan penimbunan sampah menghasilkan air lindi yang kemudian dialirkan masuk ke pipa lindi. Air lindi dalam pipa lindi dari lahan penimbunan sampah dialirkan ke unit pengolahan secara gravitasi melalui pipa inlet. Sistem pengolahan yang diterapkan adalah dengan menggunakan kolam stabilisasi yang terdiri dari kolam anaerobik, kolam fakultatif, dan kolam maturasi/pematangan.

Lindi yang telah melalui instalasi pengolahan kemudian dikeluarkan melalui pipa efluen ke badan air terdekat. Badan air penerima buangan lindi ini adalah Sungai Pesanggrahan.



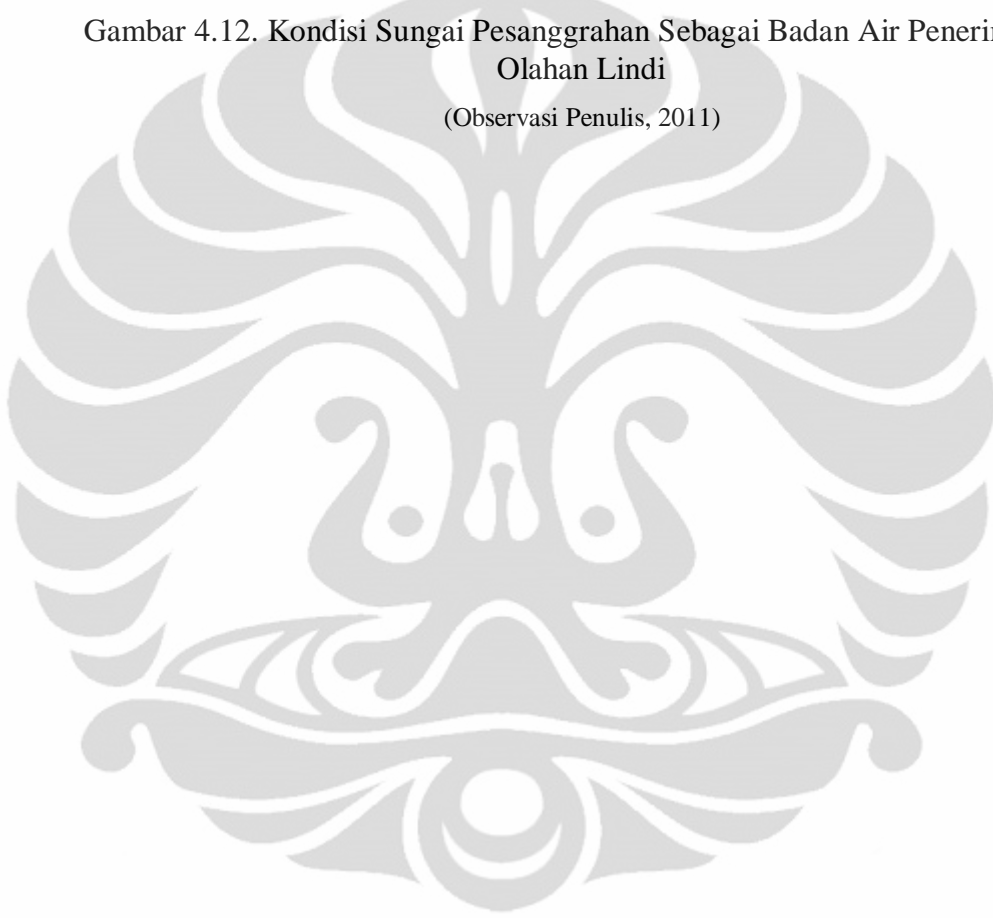
Gambar 4.10. Instalasi Pengolahan Air Lindi 1 TPA Cipayung Depok
(Observasi Penulis, 2010)



Gambar 4.11. Instalasi Pengolahan Air Lindi 2 TPA Cipayung Kota Depok
(Observasi Penulis, 2011)



Gambar 4.12. Kondisi Sungai Pesanggrahan Sebagai Badan Air Penerima Air
Olahan Lindi
(Observasi Penulis, 2011)



BAB 5

PENGEMBANGAN MODEL

Model matematis diturunkan dari persamaan keseimbangan massa untuk sistem terdistribusi berupa *mixed flow reactor*. Sedangkan input beban yang masuk dianggap merupakan beban menerus atau *step loading*. *Governing equation* untuk model adalah seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 3.4.2:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -U \frac{\partial c}{\partial x} + E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc + \frac{W(t)}{\Delta V}$$

(3.4.2)

Penyelesaian model dibagi menjadi dua bagian, yaitu penyelesaian untuk model perubahan konsentrasi fosfat dalam kondisi *steady state*, kemudian hasil perhitungan tersebut dimasukkan ke dalam perhitungan model perubahan konsentrasi terhadap waktu dan jarak dengan dengan metode *finite difference*. Sebelum persamaan model dapat dikerjakan, setiap komponen dalam persamaan ditentukan dengan cara observasi lapangan.

5.1 Komponen Model

5.1.1 Laju Reaksi (*k*)

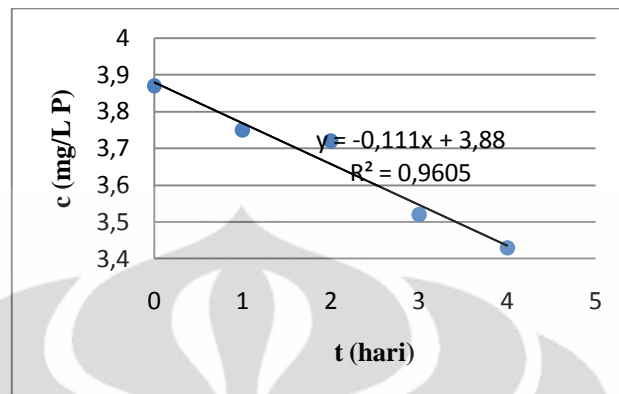
Penentuan laju reaksi (*k*) dilakukan dengan mengambil sampel air sungai di lokasi penelitian dan menyimpannya di laboratorium dengan asumsi kondisi tetap sama. Pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam sampel air sungai tersebut dilakukan setiap 24 jam atau 1 hari selama 5 hari berturut-turut. Metode pemeriksaannya adalah spektrofotometri dengan reagen Molybdate dan Asam Amino. Hasil pemeriksaan fosfat sampel air sungai tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 5.1. Hasil Pemeriksaan Konsentrasi Fosfat Dalam Sampel Air Sungai Pesanggrahan

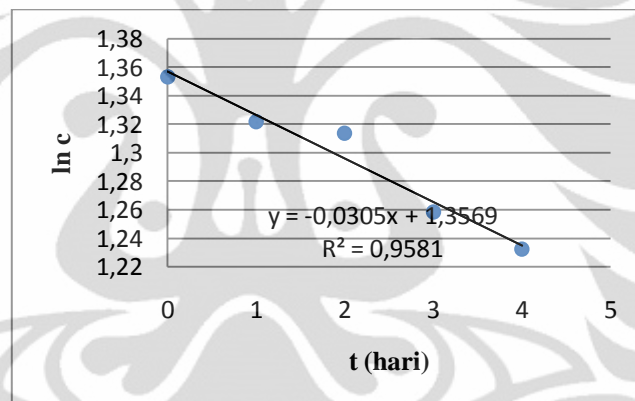
<i>t</i> (hari ke-)	0	1	2	3	4
<i>c</i> (mg/L P)	3,87	3,75	3,72	3,52	3,43

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011

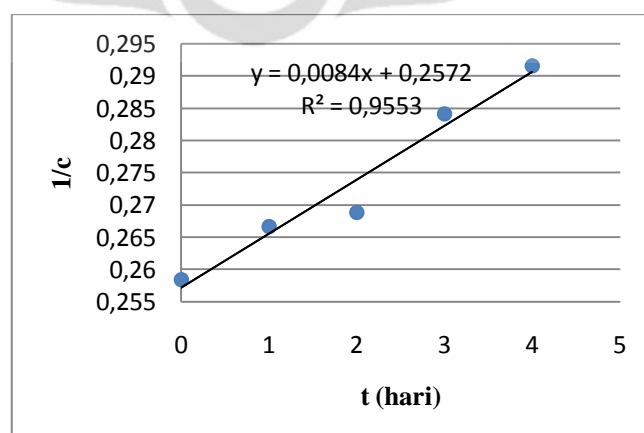
Hasil pemeriksaan tersebut kemudian diplot ke dalam grafik orde reaksi untuk $n=0$, $n=1$ dan $n=2$. Plot grafik tersebut adalah sebagai berikut.



Gambar 5.1. Grafik c vs t Orde Nol
(Pengolahan Penulis, 2011)



Gambar 5.2. Grafik c vs t Orde Satu
(Pengolahan Penulis, 2011)



Gambar 5.3. Grafik c vs t Orde Dua
(Pengolahan Penulis, 2011)

Diantara ketiga grafik orde reaksi tersebut, nilai R atau varian yang paling mendekati 1 adalah grafik orde nol ($n=0$). Hal tersebut berarti hasil pemeriksaan konsentrasi fosfat terhadap waktu paling sesuai dengan orde reaksi nol. Dengan demikian, nilai laju reaksi k dari fosfat dalam air sungai tersebut adalah 0,111.

5.1.2 Kecepatan dan Debit Aliran Sungai (U dan Q_r)

Kecepatan dan debit aliran Sungai Pesanggrahan ditentukan dengan bantuan alat Currentmeter. Hasil pembacaan alat tersebut adalah berupa putaran baling-baling atau *paddle* selama selang waktu yang ditentukan. Dari hasil pengolahan data didapatkan nilai kecepatan sungai adalah sebesar 0,64 m/detik dan debit aliran sungai sebesar 2,855 m³/detik.

5.1.3 Konsentrasi Fosfat Dalam Air Sungai (c_r)

Nilai c_r menyatakan konsentrasi fosfat dalam Sungai Pesanggrahan sebelum mendapat input lindi. Sampel untuk penentuan nilai c_r diambil di titik sebelum efluen lindi TPA. Kemudian konsentrasi fosfat dalam sampel tersebut diukur dengan metode spektrofotometri. Reagen yang digunakan adalah Molybdate dan Asam Amino. Hasil pengukuran konsentrasi fosfat dalam air sungai sebelum input lindi adalah 1,47 mg/L.

5.1.4 Debit Aliran Lindi (Q_w)

Debit aliran lindi ditentukan dengan menggunakan pendekatan persamaan 2.14.3, yaitu:

$$Q = U \times A_c \quad (2.14.3)$$

Kecepatan aliran (U) ditentukan dengan metode konvensional menggunakan bola pingpong dan mencatat berapa waktu yang diperlukan untuk mencapai jarak tertentu. Hal ini dilakukan sesuai dengan persamaan 2.14.1, yaitu:

$$U = \frac{x}{t} \quad (2.14.1)$$

Pengukuran U dilakukan beberapa kali dan hasilnya kemudian dirata-ratakan. Hasil ini bertujuan untuk memperkecil error. Selanjutnya, dilakukan pengukuran terhadap tinggi basah (H) dan lebar penampang (B), untuk mengetahui luas penampang saluran lindi (A_c). Hasil dari pengukuran adalah sebagai berikut:

$$U = \frac{0,385 + 0,345 + 0,357 + 0,357 + 0,370}{5} \text{ m/dtk} = 0,3628 \text{ m/dtk} \quad (5.1.1)$$

$$A_c = B \times H = 50 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} = 50 \text{ cm}^2 = 50 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (5.1.2)$$

$$Q = U \times A_c = 0,3628 \text{ m/dtk} \times 50 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0,001814 \text{ m}^3/\text{dtk} \quad (5.1.3)$$

5.1.5 Konsentrasi Fosfat Dalam Air Lindi (c_w)

Konsentrasi fosfat dalam air lindi (c_w) ditentukan dengan cara mengambil sampel lindi pada kondisi cuaca tertentu dan kemudian mengukur konsentrasi fosfat di dalamnya dengan metode spektrofotometri. Pengukuran fosfat dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan UI. Reagen yang digunakan adalah Molybdate dan Asam Amino. Hasil pengukuran konsentrasi fosfat dalam air lindi TPA Cipayung pada kondisi cuaca cerah tidak hujan adalah sebesar 4,09 mg/L.

5.1.6 Loading Lindi (W)

Nilai W didapatkan dari perkalian debit aliran lindi yang masuk ke sungai dengan nilai konsentrasinya. Dari hasil pemeriksaan di laboratorium, nilai konsentrasi fosfat pada lindi (c_w) adalah sebesar 4,09 mg/L P atau 4,09 g/m³ P. Sementara hasil pengukuran debit aliran lindi (Q_w) adalah sebesar 1,814 x 10⁻³ m³/detik. Maka nilai *loading* lindi dapat dihitung sebagai berikut.

$$W = Q_w \times c_w = 1,814 \times 10^{-3} \times 4,09 = 641,024 \text{ g/dtk} \quad (5.1.4)$$

5.1.7 Koefisien Dispersi (E dan E')

Nilai E menyatakan koefisien dispersi longitudinal sungai, yang ditentukan menggunakan persamaan 2.14.2:

$$E = 0,05937 \frac{Q}{SB} \quad (2.14.2)$$

Nilai Q adalah debit sungai atau Q_r yang telah diketahui sebelumnya yaitu sebesar $2,86 \text{ m}^3/\text{detik}$ atau sama dengan $246.672 \text{ m}^3/\text{hari}$. Untuk menghitung kemiringan sungai atau slope (S), elevasi atau ketinggian titik lokasi objek studi yaitu Sungai Pesanggrahan diobservasi melalui *Google Earth*. Panjang sungai yang akan diamati dan dimodelkan telah ditetapkan sebelumnya yaitu 40 m . Perbedaan elevasi antara hulu dan hilir sungai sepanjang 40 m tersebut diketahui adalah sebesar 2 m . Maka nilai slope atau kemiringan sungai yang akan diamati adalah:

$$\text{Slope} = \frac{2 \text{ m}}{40 \text{ m}} = 0,05 \quad (5.1.5)$$

Lebar sungai (B) diketahui dengan cara pengukuran langsung di beberapa titik. Rata-rata lebar sungai adalah $7,6 \text{ m}$. Dengan demikian, maka nilai E dapat dihitung sebagai berikut:

$$E = 0,05937 \times \left(\frac{246.672 \text{ m}^3 / \text{hari}}{0,05 \times 7,6 \text{ m}} \right) = 38.539,254 \text{ m}^2 / \text{hari} \quad (5.1.6)$$

Sedangkan nilai E' kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan 2.14.3, yaitu sebagai berikut:

$$E' = \frac{EA_c}{l} \quad (2.14.3)$$

Nilai luas penampang aliran sungai (A_c) ditentukan dengan cara pengukuran langsung kedalaman dan lebar sungai di beberapa titik. Hasil pengukuran kemudian dirata-ratakan sehingga didapatkan nilai A_c sebesar $4,864 \text{ m}^2$. Nilai l dalam persamaan 2.14.3 menyatakan panjang tiap segmen dari sungai yang ditinjau. Untuk perhitungan model ini, panjang sungai yang ditinjau yaitu 40 m dan dibagi ke dalam 20 segmen. Dengan demikian, panjang tiap segmen (l) adalah 2 m . Maka perhitungan E' adalah sebagai berikut:

$$E' = \frac{38.539,254 \text{ m}^2 / \text{hari} \times 4,864 \text{ m}^2}{2 \text{ m}} = 93.727,467 \text{ m}^3 / \text{hari} \quad (5.1.7)$$

5.1.8 Konsentrasi Awal (c_0)

Konsentrasi awal (c_0) merupakan nilai konsentrasi fosfat dalam air sungai sesaat setelah mendapatkan input lindi. Konsentrasi awal ditentukan dengan persamaan 2.12.3 yaitu

$$c_0 = \frac{Q_w c_w + Q_r c_r}{Q_w + Q_r} \quad (2.12.3)$$

Adapun perhitungan untuk mendapatkan nilai c_0 adalah sebagai berikut.

$$c_0 = \frac{(1,814 \times 10^{-3} \times 4,093) + (2,86 \times 1,47)}{((1,814 \times 10^{-3}) + 2,86)} = 1,472 \text{ g/m}^3 \quad (5.1.8)$$

Dengan demikian, nilai c_0 adalah $1,472 \text{ g/m}^3$ atau sama dengan $1,472 \text{ mg/L}$.

5.1.9 Selang Waktu (Δt)

Penentuan Δt dilakukan dengan menggunakan syarat:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{U} \quad (3.4.5)$$

Berdasarkan persamaan tersebut, nilai Δt yang digunakan untuk model perubahan konsentrasi fosfat terhadap waktu adalah $3,3 \times 10^{-5}$ hari atau sama dengan 2,88 detik.

Seluruh variabel atau komponen model tersebut dapat diringkas dalam Tabel 5.2 berikut. Selanjutnya komponen model inilah yang akan dimasukkan ke dalam perhitungan model perubahan konsentrasi terhadap jarak dan waktu.

Tabel 5.2. Variabel dan Nilai Untuk Penyelesaian Model

Variabel	Definisi	Nilai	Satuan
U	Kecepatan aliran Sungai Pesanggrahan, mewakili mekanisme adveksi sistem	0,64 55.296	m/detik m/hari
L	Panjang sistem Sungai Pesanggrahan yang dimodelkan	40	m
n	Jumlah segmen dalam sistem	20	buah
E	Koefisien dispersi Sungai Pesanggrahan	38.539,254	m ² /hari
E'	Bulk dispersion coefficient ($E'=EA_c/\Delta x$)	93.727,467	m ³ /hari
Δx	Panjang tiap segmen ($\Delta x=L/n$)	2	m
Δt	Perubahan waktu	2,88 $3,3 \times 10^{-5}$	detik hari
k	Laju peluruhan (<i>decay rate</i>) fosfat dalam Sungai Pesanggrahan	0,111	/hari
W	Beban fosfat dari lindi TPA Cipayung	641,024	g/hari
A_c	Luas potongan melintang (<i>cross section</i>) Sungai Pesanggrahan	4,864	m ²
V	Volume satu segmen ($V=A_cL/n$)	24,32	m ³
Q_r	Debit aliran Sungai Pesanggrahan	246.672	m ³ /hari
Q_w	Debit aliran lindi dari TPA Cipayung ke dalam Sungai Pesanggrahan	156,73	m ³ /hari
Q_0	Debit di titik pencampuran ($Q_0=Q_r+Q_w$)	246.828,73	m ³ /hari
c_r	Konsentrasi fosfat dalam Sungai Pesanggrahan sebelum masuk beban	1,470 1,470	mg/L g/m ³
c_w	Konsentrasi fosfat dalam lindi TPA Cipayung yang masuk ke Sungai Pesanggrahan	4,093 4,093	mg/L g/m ³
c_0	Konsentrasi fosfat di titik pencampuran ($c_0=(Q_w c_w+Q_r c_r)/(Q_w+Q_r)$)	1,472 1,472	mg/L g/m ³

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011

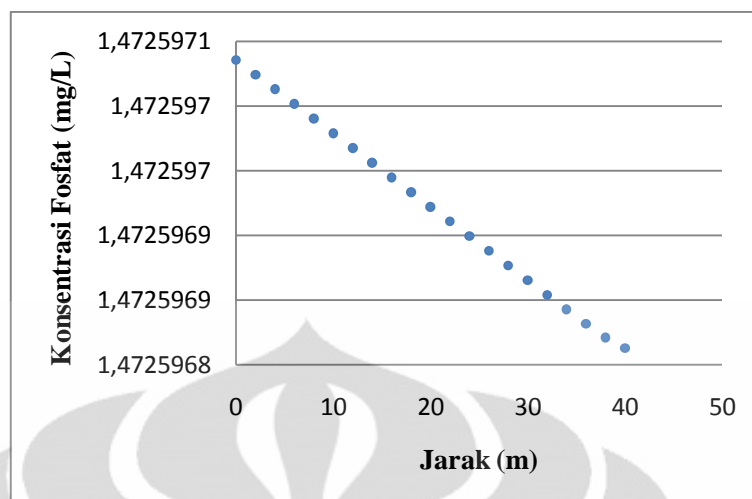
5.2 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Dalam Kondisi *Steady State* dengan Pendekatan *Control Volume*

Model perubahan konsentrasi (c) terhadap jarak (x) dalam kondisi *steady state* diselesaikan dengan pendekatan *control volume*. Adapun yang dimaksud dengan sistem dianggap *steady state* adalah tidak ditinjau perubahan konsentrasi terhadap waktu. Badan air Sungai Pesanggrahan dibagi menjadi 20 segmen atau *control volume* ($n=20$). Maka nilai c yang akan diketahui adalah c_1, c_2, c_3 , hingga c_{20} . Hasil perhitungan dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 5.3. Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap x dengan Pendekatan *Control Volume* (Sistem *Steady State*)

Segmen (n)	Jarak (x) (m)	Konsentrasi (c) (g/m ³)
1	2	1,472597024
2	4	1,472597013
3	6	1,472597002
4	8	1,47259699
5	10	1,472596979
6	12	1,472596967
7	14	1,472596956
8	16	1,472596945
9	18	1,472596933
10	20	1,472596922
11	22	1,472596911
12	24	1,472596899
13	26	1,472596888
14	28	1,472596877
15	30	1,472596865
16	32	1,472596854
17	34	1,472596843
18	36	1,472596831
19	38	1,472596821
20	40	1,472596813

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011



Gambar 5.4. Grafik Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak (x) Dalam Kondisi *Steady State* (Pengolahan Penulis, 2011)

Hasil perhitungan dengan pendekatan *control volume* ini menunjukkan perubahan konsentrasi terhadap jarak (x) dalam kondisi *steady state*. Hasil perhitungan ini kemudian dijadikan sebagai kondisi awal untuk perhitungan model perubahan konsentrasi terhadap waktu dan jarak dengan metode *finite difference*.

5.3 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi dengan Metode *Finite Difference*

Model perubahan konsentrasi fosfat diselesaikan dengan metode *finite difference* menggunakan pendekatan *forward-time/centered-space (FTCS)*. Kemudian, agar perhitungan model menjadi lebih efisien, digunakan metode numerik sebagai kelanjutan dari perhitungan rumus teoritis. Metode perhitungan numerik yang digunakan adalah Runge-Kutta orde empat. Perhitungan tersebut dilakukan dengan bantuan *spreadsheet* pada program Microsoft Excel.

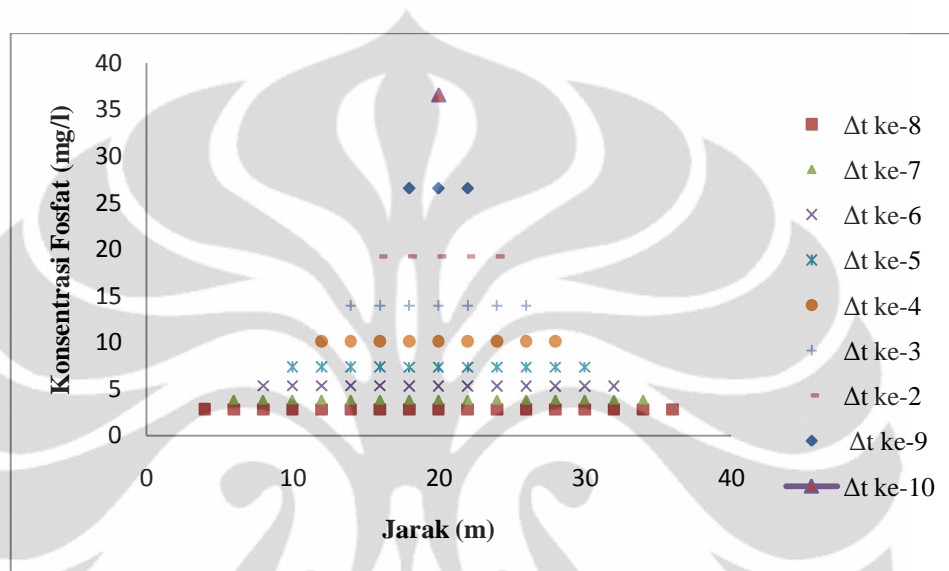
Hasil perhitungan model dengan metode Runge Kutta orde 4 adalah konsentrasi fosfat dalam Sungai Pesanggrahan akibat beban lindi sampai dengan 10 kali perubahan waktu. Hasil tersebut mengikuti pola di Gambar 2.13, bahwa dengan Δx atau jumlah segmen sebanyak 20 maka didapat data perubahan konsentrasi terhadap waktu sebanyak 10 buah ($\Delta t=10$).

Tabel 5.4. Hasil Perhitungan *Finite Difference* dengan Metode Numerik Runge Kutta Orde 4

	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$	$l=6$	$l=7$	$l=8$	$l=9$	$l=10$
$i=1$	2,03285									
$i=2$	2,03155	2,80344								
$i=3$	2,03112	2,80159	3,86522							
$i=4$	2,03090	2,80086	3,86290	5,32870						
$i=5$	2,03078	2,80046	3,86190	5,32591	7,34609					
$i=6$	2,03069	2,80022	3,86132	5,32460	7,34275	10,12717				
$i=7$	2,03063	2,80004	3,86095	5,32381	7,34108	10,12316	13,96114			
$i=8$	2,03058	2,79992	3,86068	5,32329	7,34004	10,12105	13,95630	19,24666		
$i=9$	2,03054	2,79982	3,86048	5,32291	7,33933	10,11971	13,95364	19,24079	26,53337	
$i=10$	2,03052	2,79974	3,86032	5,32262	7,33881	10,11876	13,95190	19,23743	26,52621	36,57902
$i=11$	2,03049	2,79968	3,86020	5,32239	7,33841	10,11806	13,95066	19,23519	26,52196	
$i=12$	2,03047	2,79963	3,86010	5,32221	7,33809	10,11752	13,94973	19,23357		
$i=13$	2,03046	2,79959	3,86002	5,32206	7,33784	10,11709	13,94900			
$i=14$	2,03044	2,79955	3,85994	5,32193	7,33762	10,11673				
$i=15$	2,03043	2,79952	3,85988	5,32183	7,33744					
$i=16$	2,03042	2,79949	3,85983	5,32173						
$i=17$	2,03041	2,79947	3,85978							
$i=18$	2,03040	2,79945								
$i=19$	2,03039									

Sumber: Perhitungan Penulis, 2011

Perhitungan dengan pendekatan *finite difference* secara numerik, menghasilkan data perubahan konsentrasi terhadap waktu dan perubahan konsentrasi terhadap jarak dalam setiap selang waktu. Grafik perubahan konsentrasi fosfat terhadap jarak di setiap perubahan waktu dapat dilihat dalam Gambar 5.5.



Gambar 5.5. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak di Setiap Perubahan Waktu

(Pengolahan Penulis, 2011)

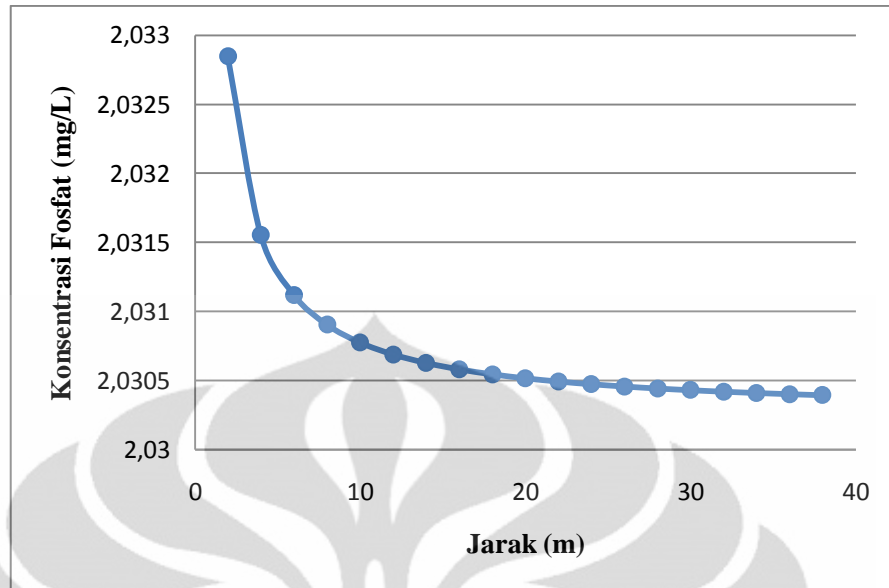
5.3.1 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak

Di setiap selang waktu (Δt), grafik konsentrasi mengalami penurunan terhadap jarak dengan bentuk yang sama. Grafik perubahan konsentrasi fosfat terhadap jarak pada Δt ke-1 dapat dilihat dalam Gambar 5.6.

Tabel 5.5. Hasil Perhitungan Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak Pada Δt ke-1

Δt ke-1	
Jarak (m)	Konsentrasi Fosfat (mg/L)
2	2,032847171
4	2,03155216
6	2,03112048
8	2,030904632
10	2,030775116
12	2,030688768
14	2,030627086
16	2,03058082
18	2,030544832
20	2,030516039
22	2,030492478
24	2,030472841
26	2,030456223
28	2,030441977
30	2,030429628
32	2,03041882
34	2,030409283
36	2,030400803
38	2,030393215

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011



Gambar 5.6. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak Pada Δt ke-1
(Pengolahan Penulis, 2011)

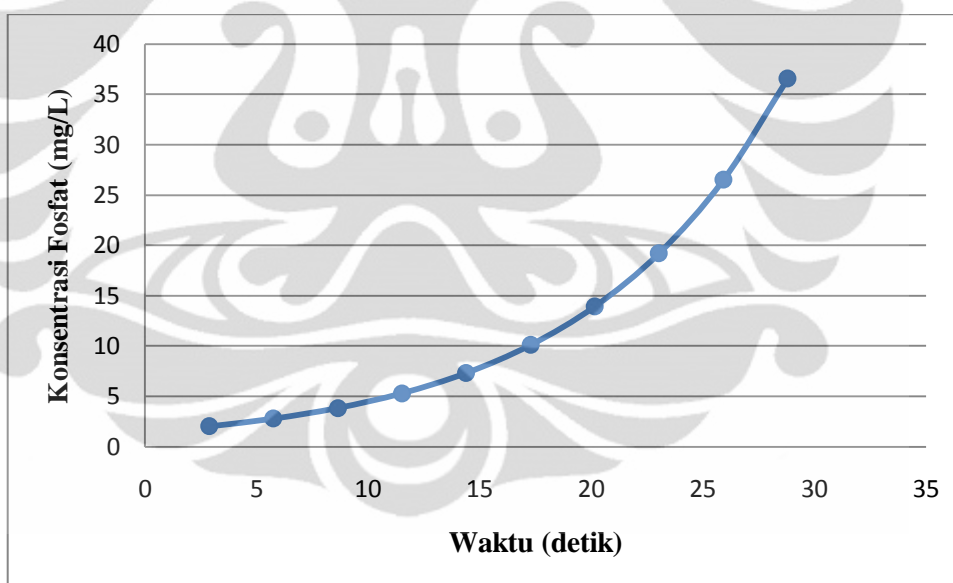
5.3.2 Hasil Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, hasil perhitungan dengan pendekatan *finite difference* juga memperlihatkan perubahan konsentrasi terhadap waktu di setiap jarak tertentu yang ditinjau (Δx). Dari Tabel 5.4 dapat terlihat bahwa perubahan konsentrasi terhadap waktu mengalami kenaikan dengan bentuk yang cenderung sama di setiap jarak yang ditinjau. Grafik perubahan konsentrasi fosfat terhadap waktu pada Δx ke-10 dapat dilihat dalam Gambar 5.7.

Tabel 5.6. Hasil Perhitungan Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu Pada Δx ke-10

Δx ke-10		
Δt ke-	Waktu (detik)	Konsentrasi (mg/L)
1	2,88	2,030516
2	5,76	2,799745
3	8,64	3,860324
4	11,52	5,322618
5	14,4	7,338811
6	17,28	10,11876
7	20,16	13,9519
8	23,04	19,23743
9	25,92	26,52621
10	28,8	36,57902

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011



Gambar 5.7. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu Pada Δx ke-10

(Pengolahan Penulis, 2011)

5.4 Validasi Model

Untuk melakukan validasi, dilakukan pengukuran konsentrasi fosfat di beberapa titik di lapangan (observasi). Titik yang perlu diambil adalah pada badan air sebelum input lindi, air lindi, serta 3 titik untuk perubahan x dan 3 titik lain

untuk perubahan t . Di masing-masing titik diambil satu buah sampel yang dianggap representatif, kemudian masing-masing sampel tersebut diukur konsentrasi fosfatnya sebanyak 3 kali. Pengukuran dilakukan dengan metode spektrofotometri dengan reagen Molybdate dan Asam amino, di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan FTUI.

Untuk meninjau perubahan konsentrasi terhadap x , diambil sampel di tiga titik, yaitu Δx ke-1, Δx ke-2 dan Δx ke-3, yang masing adalah 2 m, 4 m, dan 6 m dari titik input lindi. Sedangkan untuk meninjau perubahan konsentrasi terhadap t , sampel diambil di titik Δx ke-1 sebanyak tiga buah yaitu masing-masing pada Δt ke-1, Δt ke-2, dan Δt ke-3. Hasil pengukuran konsentrasi fosfat pada titik-titik tersebut dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 5.7. Hasil Pengukuran Konsentrasi Fosfat di Titik Observasi

Sampel	Titik pengambilan di sungai	Konsentrasi (mg/L)		
		Pengukuran 1	Pengukuran 2	Pengukuran 3
$c(3,1)$	$\Delta x=6m$ setelah input lindi (Δx ke-3)	1,50	1,58	1,62
	$\Delta t=2,88$ detik (Δt ke-1)			
$c(3,2)$	$\Delta x=6m$ setelah input lindi (Δx ke-1)	1,66	1,70	2,16
	$\Delta t=5,76$ detik (Δt ke-2)			
$c(3,3)$	$\Delta x=6m$ setelah input lindi (Δx ke-1)	1,94	1,72	2,20
	$\Delta t=8,64$ detik (Δt ke-3)			
$c(1,1)$	$\Delta x=2m$ setelah input lindi (Δx ke-1)	1,58	1,66	1,96
	$\Delta t=2,88$ detik (Δt ke-1)			
$c(2,1)$	$\Delta x=4m$ setelah input lindi (Δx ke-2)	1,54	1,61	1,65
	$\Delta t=2,88$ detik (Δt ke-1)			
$c(3,1)$	$\Delta x=6m$ setelah input lindi (Δx ke-3)	1,50	1,58	1,62
	$\Delta t=2,88$ detik (Δt ke-1)			

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011

5.4.1 Perbandingan Hasil Observasi dan Perhitungan

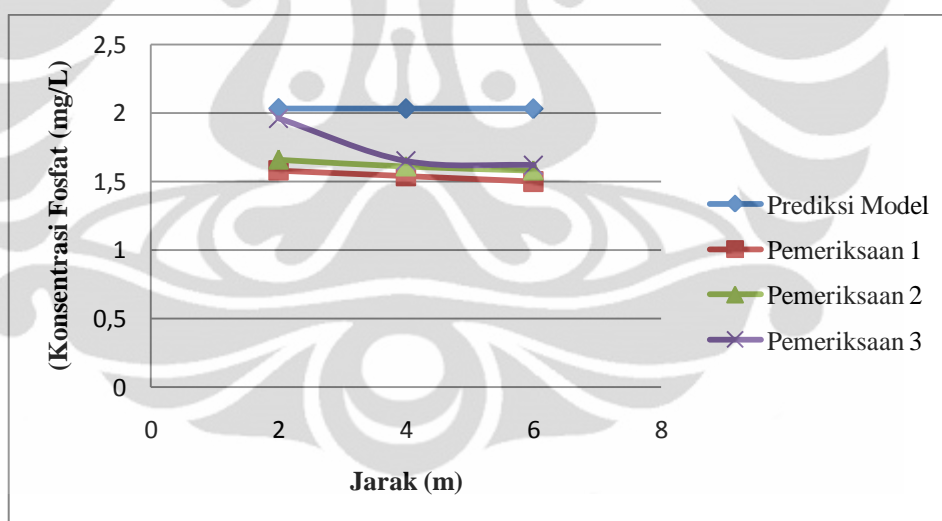
Hasil perhitungan model dengan komponen observasi kemudian diplot pada grafik untuk kemudian dibandingkan dengan hasil observasi di titik-titik

yang telah disebutkan. Tabel berikut ini menunjukkan nilai konsentrasi di titik-titik yang diobservasi berdasarkan perhitungan model dan berdasarkan pengukuran langsung di laboratorium. Dari tabel tersebut kemudian dibuat grafik untuk memperjelas perbandingan antara hasil perhitungan dan observasi dengan nilai konsentrasi awal (c_0) yang sama.

Tabel 5.8. Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak Pada Δt ke-1 (2,88 detik)

	$c(1,1)$ $\Delta x=1$ (2m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)	$c(2,1)$ $\Delta x=2$ (4m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)	$c(3,1)$ $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)
Prediksi Model	2,0328	2,0315	2,0311
Pemeriksaan 1	1,58	1,54	1,50
Pemeriksaan 2	1,66	1,61	1,58
Pemeriksaan 3	1,96	1,65	1,62

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011



Gambar 5.8. Grafik Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak Pada Δt ke-1 (2,88 detik)

(Pengolahan Penulis, 2011)

Besarnya penyimpangan atau error antara hasil perhitungan dengan hasil observasi perubahan konsentrasi terhadap jarak dapat dihitung menggunakan persamaan 3.4.6 sebagai berikut:

- Dari rata-rata hasil pemeriksaan langsung untuk nilai $c(1,1)$, besarnya error adalah:

$$\%error = \left| \frac{2,0328 - 1,7333}{2,0328} \right| \times 100\% = 14,73\% \quad (5.4.1)$$

- Dari rata-rata hasil pemeriksaan langsung untuk nilai $c(2,1)$, besarnya error adalah:

$$\%error = \left| \frac{2,0315 - 1,6}{2,0315} \right| \times 100\% = 21,24\% \quad (5.4.2)$$

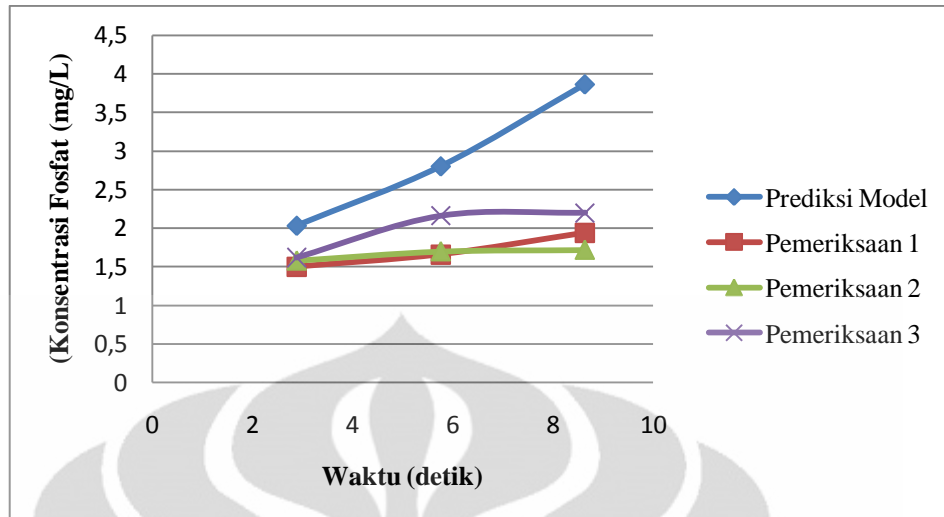
- Dari rata-rata hasil pemeriksaan langsung untuk nilai $c(3,1)$, besarnya error adalah:

$$\%error = \left| \frac{2,0311 - 1,5667}{2,0311} \right| \times 100\% = 22,87\% \quad (5.4.3)$$

Tabel 5.9. Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu Pada Δx ke-3 (6 meter)

	$c(3,1)$ $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)	$c(3,2)$ $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=2$ (5,76 detik)	$c(3,3)$ $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=3$ (8,64 detik)
Prediksi Model	2,031	2,802	3,865
Pemeriksaan 1	1,50	1,66	1,94
Pemeriksaan 2	1,58	1,70	1,72
Pemeriksaan 3	1,62	2,16	2,20

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011



Gambar 5.9. Grafik Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu Pada Δx ke-3 (6 meter)

(Pengolahan Penulis, 2011)

Besarnya penyimpangan atau error antara hasil perhitungan dengan hasil observasi perubahan konsentrasi terhadap waktu dapat dihitung sebagai berikut:

- Dari rata-rata hasil pemeriksaan langsung untuk nilai $c(3,1)$, besarnya error adalah:

$$\%error = \left| \frac{2,031 - 1,567}{2,031} \right| \times 100\% = 22,86\% \quad (5.4.4)$$

- Dari rata-rata hasil pemeriksaan langsung untuk nilai $c(3,2)$, besarnya error adalah:

$$\%error = \left| \frac{2,802 - 1,84}{2,802} \right| \times 100\% = 34,33\% \quad (5.4.5)$$

- Dari rata-rata hasil pemeriksaan langsung untuk nilai $c(3,3)$, besarnya error adalah:

$$\%error = \left| \frac{3,865 - 1,953}{3,865} \right| \times 100\% = 49,46\% \quad (5.4.6)$$

BAB 6

ANALISA DAN PEMBAHASAN

6.1 Analisa Pengembangan Model

Pembuatan model untuk Sungai Pesanggrahan ini dimaksudkan untuk mengetahui kondisi Sungai Pesanggrahan akibat adanya beban berupa lindi dari TPA Cipayung yang masuk secara menerus. Hasil perhitungan model adalah berupa nilai perubahan konsentrasi terhadap jarak (x) dan perubahan konsentrasi terhadap waktu (t). Model perubahan konsentrasi terhadap jarak dibuat dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana konsentrasi fosfat di Sungai Pesanggrahan setelah mencapai jarak tertentu dari input beban. Hasil model ini kemudian dihubungkan dengan mekanisme peluruhan yang dimiliki oleh sungai serta batasan kandungan zat tersebut dalam perairan. Dengan mengetahui konsentrasi zat tersebut setelah mencapai jarak tertentu dari titik masuk beban, dapat diperkirakan kondisi sungai yang sedang dimodelkan ini.

Dari hasil model perubahan konsentrasi menurut waktu, dapat diketahui kondisi sungai yang mendapat input beban menerus setelah jangka waktu tertentu. Dengan adanya input beban menerus, maka kemungkinan akan terjadi akumulasi beban di sungai. Kemampuan sungai untuk meluruhkan beban tersebut akan sangat dipengaruhi oleh karakteristik sungai itu sendiri. Dari simulasi model juga dapat diketahui bagaimana tren yang terjadi akibat beban menerus tersebut terhadap konsentrasi di sungai.

Parameter beban yang dimodelkan adalah fosfat. Fosfat merupakan nutrisi pembatas dalam perairan. Keberadaannya dalam jumlah tertentu mutlak diperlukan untuk keseimbangan ekosistem perairan. Namun, konsentrasinya yang berlebihan dalam perairan justru akan menjadikan perairan menjadi eutrofik dan mengalami penurunan produktivitas. Berdasarkan hasil pemeriksaan penulis, lindi yang masuk dari TPA Cipayung ke Sungai Pesanggrahan mengandung fosfat dalam konsentrasi yang cukup tinggi dan berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem dalam sungai sebagai badan air penerimanya.

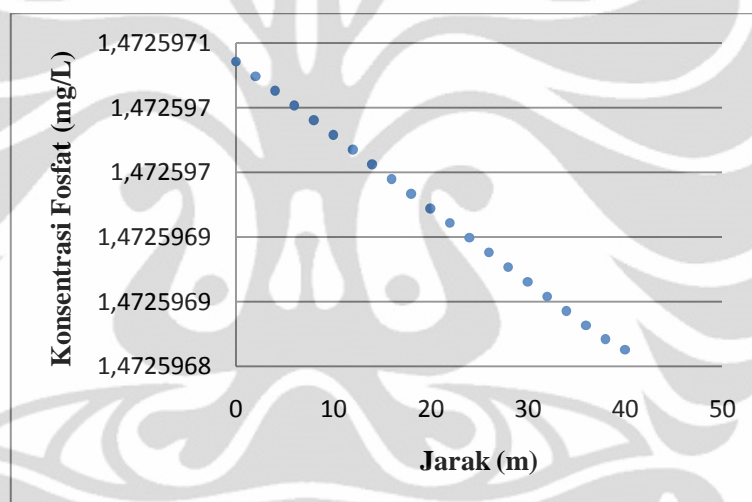
6.1.1 Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak (x) Dalam Kondisi *Steady* dan *Unsteady*

Sebelum melakukan perhitungan dengan metode *finite difference* (kondisi *unsteady*), terlebih dahulu dilakukan perhitungan model perubahan konsentrasi terhadap jarak dalam kondisi *steady state*. Hasil dari perhitungan ini akan dimasukkan ke dalam perhitungan model dengan metode *finite difference* sebagai kondisi awal konsentrasi di sungai. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan *control volume*. Sungai Pesanggrahan yang akan dimodelkan dibuat menjadi beberapa segmen. Masing-masing segmen tersebut kemudian dianggap merupakan sebuah *control volume* yang memiliki debit masuk (*inflow*) dan debit keluar (*outflow*), kecepatan aliran, dispersi, volume, serta laju pembusukan yang sama. Sebelum menentukan jumlah dan panjang masing-masing segmen, terlebih dahulu harus ditentukan panjang sungai yang akan ditinjau dan dimasukkan ke dalam perhitungan. Penulis mengambil panjang sungai 40 m dan membaginya menjadi 20 buah segmen. Dengan demikian, masing-masing segmen memiliki panjang sebesar 2 m. Di setiap perbedaan 2 m inilah perubahan konsentrasi fosfat dalam sungai tersebut ditinjau.

Pengambilan panjang sungai sepanjang 40 m didasarkan pada pertimbangan bahwa model yang dibuat terbatas hanya untuk input lindi yang masuk. Yang berarti bahwa input lain yang mungkin menambah konsentrasi fosfat dalam sungai tidak ditinjau dan dimasukkan ke dalam perhitungan. Pada kenyataannya di lapangan, Sungai Pesanggrahan kemungkinan mendapatkan input konsentrasi fosfat lain dari saluran pembuangan limbah milik penduduk, serta dari kegiatan pertanian di sepanjang sungai setelah jauh dari lokasi TPA. Oleh karena itu, pengambilan panjang sungai 40 m diharapkan dapat lebih mewakili bahwa sungai hanya mendapat input fosfat dari lindi, seperti yang dimasukkan ke dalam perhitungan model. Penentuan jumlah segmen sebanyak 20 buah dan panjang segmen sebesar 2 m dilakukan dengan maksud agar konsentrasi fosfat dapat ditinjau kenaikan ataupun penurunannya dalam selang jarak yang tidak terlalu besar. Pertimbangan ini kurang lebih sama dengan pertimbangan sebelumnya bahwa sungai mungkin mendapat input konsentrasi fosfat dari sumber lain selain lindi, maka perhitungan dilakukan untuk perubahan jarak yang kecil, sehingga

pengamatan tidak terlalu jauh dari pipa efluen lindi dan hasil pemodelan diharapkan representatif dengan keadaan di lapangan.

Hasil perhitungan perubahan konsentrasi terhadap jarak dalam kondisi *steady state* telah disajikan dalam Tabel 5.3 dan Gambar 5.4. Hasil perhitungan dalam tabel tersebut menunjukkan bahwa perubahan konsentrasi yang terjadi setiap perubahan jarak sebesar 2 m adalah kecil yaitu berkisar pada 0,0000001 atau 10^{-7} mg/L. Nilai perubahan tersebut cenderung sangat kecil dan hampir tidak mungkin untuk terukur secara langsung. Namun perhitungan secara matematis memungkinkan dicapainya hasil dengan nilai perubahan yang sangat kecil tersebut.



Gambar 5.4. Grafik Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak (x) Dalam Kondisi *Steady State*
(Pengolahan Penulis, 2011)

Perhitungan model perubahan konsentrasi terhadap jarak (x) dalam kondisi *steady state* dilakukan menggunakan matriks pada persamaan 2.9.21. Hasil perhitungan tentunya akan dipengaruhi oleh nilai variabel yang dimasukkan ke dalam persamaan tersebut. Adapun variabel-variabel yang dimasukkan ke dalam persamaan tersebut dan mungkin mempengaruhi hasil perhitungan adalah sebagai berikut.

- Debit keluar (*outflow*)

Dalam setiap segmen terdapat debit keluar (*outflow*) yang sekaligus merupakan debit masuk (*inflow*) bagi segmen berikutnya. Nilai variabel ini

didapatkan dari hasil pengukuran langsung di Sungai Pesanggrahan menggunakan alat Currentmeter. Dari hasil pengukuran tersebut didapatkan nilai debit dalam sungai yang relatif besar bila dibandingkan dengan debit aliran lindi, yaitu $2,855 \text{ m}^3/\text{detik}$ atau setara dengan $246.672 \text{ m}^3/\text{hari}$. Nilai debit ini dianggap tetap atau tidak berubah di sepanjang aliran sungai dan di setiap segmen (*uniform*). Nilai debit yang cukup besar berpengaruh terhadap hasil perhitungan konsentrasi dalam sungai. Dengan besarnya nilai debit yang mewakili komponen sungai tersebut, konsentrasi fosfat dalam air sungai cenderung tidak berubah atau mengalami perubahan yang sangat kecil setelah mendapatkan input beban. Hal ini juga mungkin sekali terjadi karena perbandingan yang tidak seimbang antara beban yang masuk dengan komponen dalam sungai itu sendiri. Dalam hal ini, debit yang merupakan komponen sungai memiliki nilai yang terlampau besar.

- Dispersi (E)

Koefisien dispersi (E) menunjukkan kemampuan sungai untuk mendispersikan bahan dan memecah konsentrasinya. Nilai variabel ini didapatkan dengan pendekatan matematis dan studi lapangan, yang menghasilkan nilai E untuk Sungai Pesanggrahan adalah sebesar $38.539,254 \text{ m}^2/\text{hari}$. Sedangkan berdasarkan literatur, nilai E yang dibutuhkan untuk perhitungan adalah E' yang sama dengan $EA/\Delta x$. Nilai variabel E' adalah sebesar $37.490,987 \text{ m}^3/\text{hari}$. Nilai E' sungai yang cukup besar ini menunjukkan dominasi komponen sungai di dalam perhitungan. Bersama dengan nilai debit yang besar, nilai E membuat konsentrasi fosfat dalam sungai menurut hasil perhitungan cenderung tidak berubah atau mengalami perubahan yang sangat kecil.

- Laju peluruhan (k)

Variabel k termasuk salah satu variabel yang dimasukkan ke dalam perhitungan perubahan konsentrasi menurut jarak ini. Nilai k didapatkan dari pemeriksaan di laboratorium untuk sampel Sungai Pesanggrahan. Hasilnya, Sungai Pesanggrahan memiliki laju peluruhan fosfat yang cenderung kecil, yaitu sebesar $0,111/\text{hari}$. Laju peluruhan yang kecil ini

turut menyumbang hasil pada perhitungan bahwa penurunan konsentrasi terhadap jarak menjadi sangat kecil. Meskipun demikian, hasil perhitungan juga berhubungan dengan nilai dari variabel lainnya seperti debit dan dispersi sungai.

- Input beban (W)

Beban fosfat dari lindi TPA Cipayung diketahui dari hasil pemeriksaan debit lindi di lapangan dan pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam lindi tersebut di laboratorium. Hasilnya, beban fosfat dari lindi TPA Cipayung adalah sebesar 641,024 g/hari. Nilai ini cenderung kecil dibandingkan dengan nilai debit dan dispersi. Beban yang cenderung kecil ini secara teoritis juga akan membuat perubahan konsentrasi menjadi kecil. Hal ini karena komponen sungai yang terdiri dari Q dan E sudah memiliki nilai yang cukup besar, sehingga masuknya beban dengan nilai yang kecil hanya berpengaruh sedikit terhadap konsentrasi di sungai. Hal ini terlihat dalam hasil perhitungan yang menunjukkan konsentrasi fosfat cenderung tidak mengalami penurunan atau mengalami penurunan yang sangat sedikit.

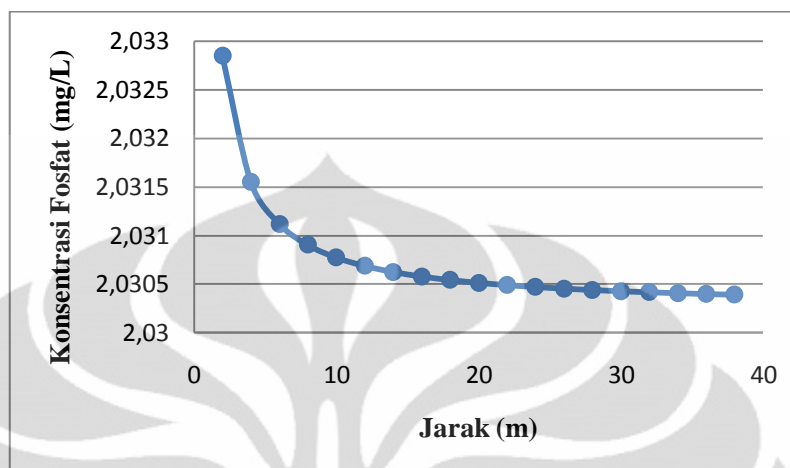
Prediksi nilai perubahan konsentrasi terhadap jarak dalam kondisi *unsteady* di sungai didapatkan dari hasil perhitungan model dengan metode *finite difference*. Persamaan untuk model tersebut adalah persamaan 3.4.4, yaitu:

$$\frac{c_i^{l+1} - c_i^l}{\Delta t} = -U \frac{c_{i+1}^l - c_{i-1}^l}{2\Delta x} + E \frac{c_{i+1}^l - c_i^l + c_{i-1}^l}{\Delta x^2} - k_i c_i^l + \frac{W_i}{\Delta V} \quad (3.4.4)$$

Dalam persamaan tersebut, karakter i menotasikan dimensi jarak dan karakter l menotasikan dimensi waktu. Maka karakter $i-1$ menotasikan lokasi atau titik yang berada sebelum titik utama yang ditinjau, karakter i menotasikan titik utama yang ditinjau, karakter $i+1$ menotasikan titik yang berada setelah titik yang ditinjau. Sedangkan karakter l menotasikan waktu sekarang, dan karakter $l+1$ menotasikan waktu yang akan datang.

Perhitungan untuk model ini dilanjutkan dengan menggunakan metode numerik Runge Kutta orde 4. Perhitungan dilakukan dengan bantuan *spreadsheet* pada program Microsoft Excel. Hasil perhitungan model ini adalah berupa prediksi nilai perubahan konsentrasi terhadap jarak dan waktu.

Hasil untuk nilai perubahan konsentrasi terhadap jarak dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut.



Gambar 5.6. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak Pada Δt ke-1
(Pengolahan Penulis, 2011)

Plot hasil perhitungan ke dalam grafik (Gambar 5.6) menunjukkan bahwa konsentrasi mengalami penurunan seiring dengan pertambahan jarak. Yang berarti bahwa segmen yang lebih jauh dari titik input beban (segmen hilir) memiliki konsentrasi fosfat yang lebih kecil dari segmen yang berada dekat dengan titik input beban (segmen hulu). Hasil ini menunjukkan terjadinya mekanisme peluruhan dalam sungai serta adanya debit dan dispersi sungai yang memecah konsentrasi sehingga nilainya mengalami penurunan seiring dengan pertambahan jarak. Penurunan konsentrasi dalam sungai juga dipengaruhi oleh variabel V yang masuk dalam perhitungan matriks. Nilai V menunjukkan volume sistem yang nilainya bertambah seiring dengan pertambahan segmen. Hal ini karena nilai V merupakan fungsi perkalian dari luas penampang sungai dan panjang sungai. Dengan demikian, pada segmen 2, nilai V akan lebih besar daripada segmen 1 karena nilai V ditinjau dari titik awal sungai hingga akhir segmen yang sedang dihitung. Semakin besarnya nilai V seiring dengan pertambahan segmen menghasilkan terjadinya penurunan nilai perubahan konsentrasi.

Penurunan konsentrasi menurut jarak yang terjadi berbentuk grafik eksponensial. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin jauh, penurunan yang terjadi semakin kecil atau hampir tidak terjadi penurunan lagi. Mekanisme

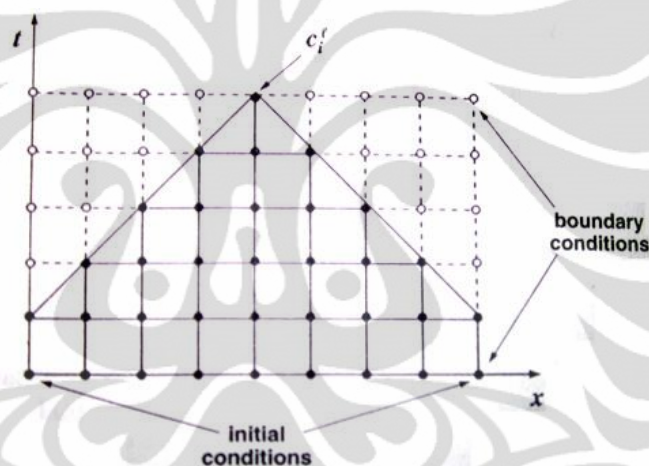
penurunan seperti ini dapat terjadi karena konsentrasi fosfat yang masuk ke sungai pada satu titik tertentu, mengalami mekanisme peluruhan di sepanjang aliran sungai hingga konsentrasinya berkurang. Mekanisme peluruhan tersebut dapat berupa pengendapan, reaksi dengan senyawa lain, serta pemecahan konsentrasi akibat debit dan dispersi sungai. Karena mekanisme peluruhan terjadi sepanjang aliran sungai, di titik yang semakin jauh konsentrasi fosfat semakin kecil. Dari konsentrasi yang kecil tersebut, fosfat masih terus mengalami penurunan namun tentunya dalam skala yang lebih kecil dibandingkan penurunan yang terjadi di segmen bagian hulu. Hal ini mengakibatkan grafik penurunan berbentuk ekponensial.

6.1.2 Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu (t)

Prediksi nilai perubahan konsentrasi terhadap waktu (t) didapatkan dari hasil perhitungan dengan metode *finite difference* serta pendekatan *forward-time/centered-space (FTCS)*. Dengan pendekatan ini, dapat diketahui nilai konsentrasi di titik tertentu pada waktu yang akan datang (*forward time*) dengan mengetahui konsentrasi di titik sebelum, sesudah, dan di titik tersebut (*centered space*) pada waktu sekarang.

Hasil perhitungan model ini menunjukkan besarnya konsentrasi fosfat dalam sungai dalam setiap selang waktu yang ditinjau. Selang waktu ditentukan berdasarkan nilai kecepatan aliran sungai (U) dan panjang tiap segmen. Karena nilai U yang cenderung besar, dengan panjang segmen yang kecil, didapatkan selang waktu yang dapat ditinjau adalah kurang dari 3,125 detik. Angka tersebut menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan untuk menempuh jarak sebesar 2 m (satu segmen) dengan kecepatan aliran sebesar 0,64 m/s adalah 3,125 detik. Dari hasil tersebut, nilai selang waktu yang dapat dimasukkan ke dalam perhitungan haruslah lebih kecil. Penulis mengambil selang waktu untuk diamati adalah sebesar 2,88 detik atau sama dengan $3,3 \times 10^{-5}$ hari. Dengan demikian, hasil perhitungan akan menunjukkan konsentrasi fosfat dalam sungai pada setiap selang waktu tersebut. Hasil perhitungan adalah seperti yang telah disajikan dalam Tabel 5.4.

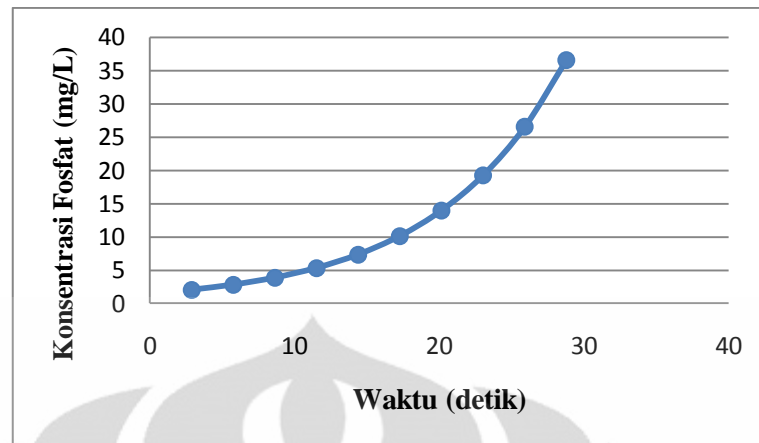
Hasil perhitungan yang didapat dengan metode *finite difference* tersebut memiliki kekurangan yaitu perubahan konsentrasi terhadap waktu tidak dapat dihitung dalam setiap segmen. Sebagai contoh, pada segmen pertama ($i=1$) nilai konsentrasi hanya dapat diketahui pada selang waktu yang pertama ($l=1$). Pada segmen kedua ($i=2$), nilai konsentrasi hanya dapat diketahui sampai dengan selang waktu kedua ($l=2$), dan seterusnya hingga menghasilkan bentuk seperti pada Gambar 2.13. Nilai konsentrasi dapat diketahui sampai dengan selang waktu ke-10 ($l=10$) hanya pada segmen ke-10 ($i=10$). Hasil perhitungan dalam Tabel 5.4 tidak hanya dapat menunjukkan perubahan konsentrasi terhadap waktu dalam setiap segmen, namun juga dapat menunjukkan perubahan konsentrasi di setiap perubahan segmen dalam setiap selang waktu.



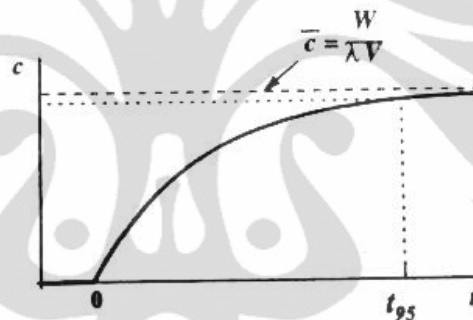
Gambar 2.13. Representasi Hasil Perhitungan Konsentrasi Dalam Ruang dan Waktu dengan Pendekatan FTCS

(Chapra, 1997)

Dari hasil perhitungan, terlihat bahwa konsentrasi fosfat di setiap segmen dalam sungai mengalami kenaikan seiring dengan pertambahan waktu. Dari plot grafik konsentrasi vs waktu (Gambar 5.7) terlihat bahwa kenaikan konsentrasi cenderung terjadi secara linear seiring pertambahan waktu. Hal ini sedikit menyimpang dari teori yang mengatakan bahwa badan air yang mendapatkan input beban secara menerus akan mengalami kenaikan konsentrasi dengan bentuk seperti pada Gambar 2.16.



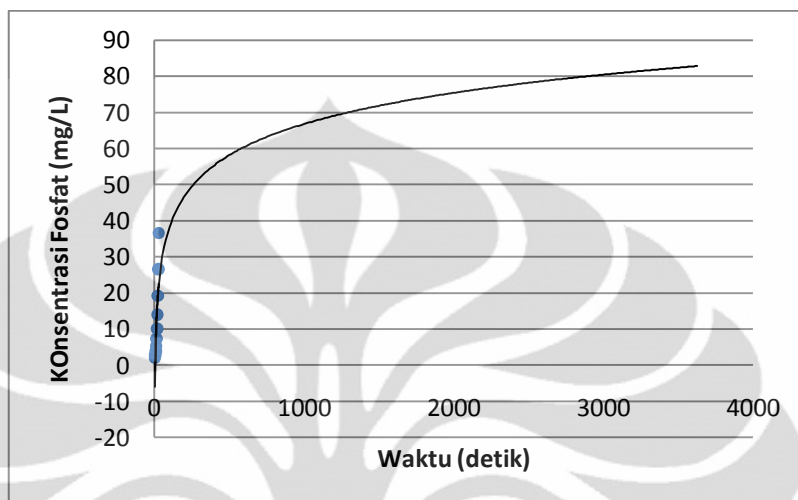
Gambar 5.7. Grafik Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu Pada Δx ke-10
(Pengolahan Penulis, 2011)



Gambar 2.16. Respons Badan Air Terhadap Beban Kontinu (*Step Loading*)
(Chapra, 1997)

Bentuk grafik pada Gambar 2.16 tersebut menunjukkan bahwa di selang waktu yang lebih panjang, badan air dengan mekanisme peluruhan yang dimiliki telah mampu meluruhkan sebagian besar konsentrasi pencemar yang masuk ke dalamnya. Sehingga kenaikan konsentrasi yang terjadi cenderung lebih kecil dibandingkan pada selang waktu awal, bahkan cenderung tidak lagi mengalami kenaikan. Hasil perhitungan yang tidak sesuai dengan teori tersebut diperkirakan karena selang waktu yang diamati terlalu pendek. Dengan total selang waktu yang dapat dihitung adalah sebanyak 10 buah ($l=10$), maka jumlah waktu yang dapat diamati adalah sebesar 28,8 detik. Dalam waktu tersebut diperkirakan badan air atau sungai yang dimodelkan belum mampu meluruhkan sebagian besar konsentrasi fosfat yang masuk ke dalamnya, sehingga nilai konsentrasi terhadap

waktu masih mengalami kenaikan secara linear. Untuk mengetahui respons sungai terhadap beban fosfat yang masuk ke dalamnya pada selang waktu yang lebih lama dapat dilakukan dengan perpanjangan t pada grafik (*forecast*).



Gambar 6.1. Grafik Konsentrasi vs Waktu Pada Δx ke-10 dengan Perpanjangan t Hingga 3600 Detik

(Pengolahan Penulis, 2011)

Perpanjangan grafik dilakukan hingga t mencapai 3600 detik atau satu jam dan diambil satu contoh pada segmen ke-10. Hasil perpanjangan grafik tersebut menunjukkan kesesuaian dengan teori yaitu seiring pertambahan waktu, sungai akan mampu meluruhkan sebagian besar pencemar di dalamnya sehingga kenaikan konsentrasi di dalamnya terjadi dalam jumlah lebih kecil, dengan input beban yang masuk secara menerus. Perhitungan tidak dilakukan untuk menghasilkan grafik dengan selang waktu yang lebih panjang, namun pendugaan dengan melakukan perpanjangan grafik dapat merepresentasikan hasil yang akan didapat bila perhitungan dilakukan.

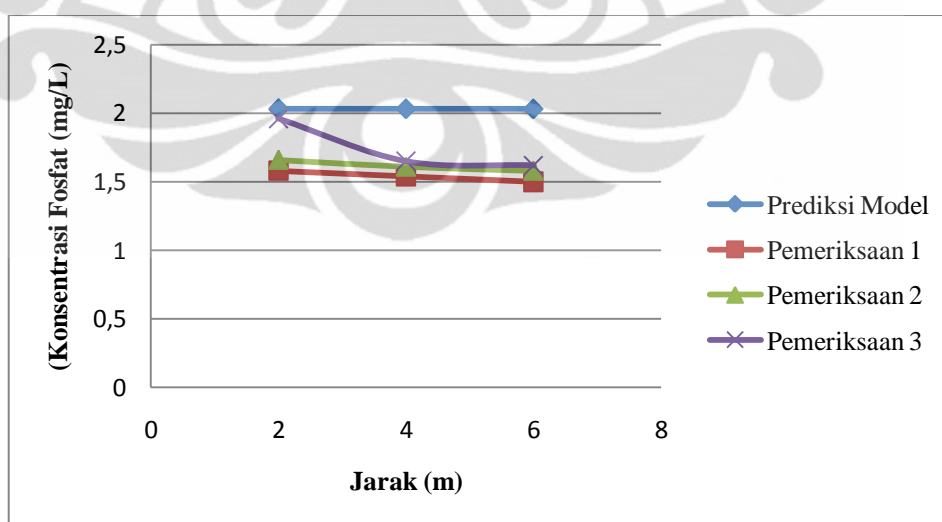
6.2 Perbandingan Hasil Observasi dan Model

Observasi dilakukan sebagai bentuk validasi terhadap model yang telah dibuat. Hasil perhitungan atau prediksi model dibandingkan dengan hasil pemeriksaan dari sampel yang diambil di beberapa titik di sungai. Pengambilan sampel di sungai dilakukan di titik-titik yang direncanakan akan dibandingkan

dengan model perubahan konsentrasi terhadap jarak dan model perubahan konsentrasi terhadap waktu.

6.2.1 Hasil Observasi dan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak

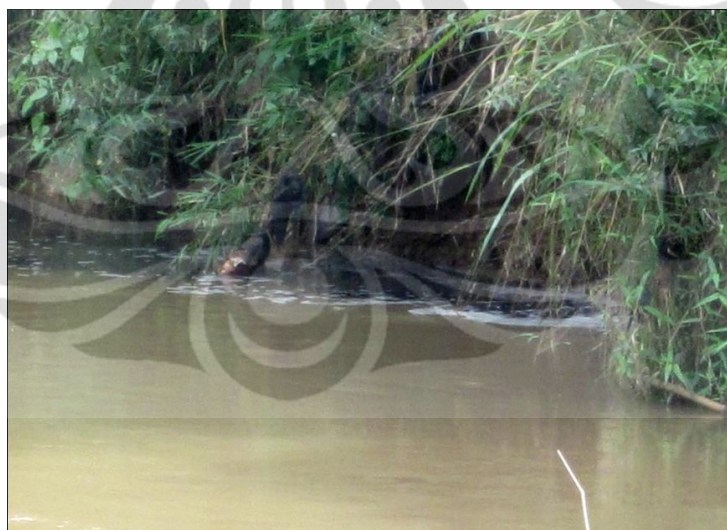
Model yang dibandingkan dengan hasil observasi adalah model perubahan konsentrasi dalam kondisi *unsteady*. Untuk model perubahan konsentrasi terhadap jarak, sampel diambil di titik 2 m, 4 m, dan 6 m setelah input lindi atau masing-masing sama dengan segmen (Δx) ke-1, 2, dan 3 dari sungai. Pengambilan di ketiga titik tersebut dilakukan pada waktu yang sama, yaitu selang waktu pertama atau 2,88 detik. Sampel yang diambil di titik-titik tersebut kemudian diawetkan dalam botol sampel untuk kemudian ditentukan konsentrasi fosfatnya. Pemeriksaan konsentrasi fosfat dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan FTUI. Metode pemeriksaan yang dilakukan sama dengan pemeriksaan sebelumnya yaitu metode Spektrofotometri pada panjang gelombang 530 nm dengan reagen Molybdate dan Asam Amino. Hasil perhitungan dan hasil pemeriksaan sampel observasi telah disajikan dalam Tabel 5.8. Hasil perhitungan dan pemeriksaan tersebut kemudian diplot ke dalam grafik yaitu pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8. Grafik Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak Pada Δt ke-1 (2,88 detik)

(Pengolahan Penulis, 2011)

Grafik pada Gambar 5.8 menunjukkan terjadinya *over predict*, yaitu hasil perhitungan lebih besar dari hasil pemeriksaan langsung di lapangan (observasi). Hal ini diperkirakan karena kondisi sesungguhnya di lapangan yang tidak sesuai dengan asumsi dalam perhitungan. Lindi yang masuk dari instalasi pengolahan air lindi TPA tidak mengalami pencampuran yang sempurna di sungai. Lindi cenderung mengalir di pinggir aliran sungai sehingga asumsi pencampuran tidak berlaku pada saat pengambilan sampel observasi. Air lindi yang hanya mengalir di pinggir sungai mengakibatkan konsentrasi fosfat dalam sungai di bagian tengah dan sisi yang lain tidak mendapat pengaruh yang besar dari lindi tersebut. Sehingga hasil pemeriksaan menjadi lebih kecil dari hasil perhitungan dengan model. Pada perhitungan, konsentrasi fosfat dalam air lindi diasumsikan mengalami pencampuran sempurna dengan air sungai, dan konsentrasi pencampuran dihitung dengan menggunakan persamaan keseimbangan massa. Asumsi pencampuran tersebut mengakibatkan hasil perhitungan lebih besar dibandingkan hasil pemeriksaan langsung di sungai.



Gambar 6.2. Lindi yang Tidak Tercampur Sempurna di Sungai Pesanggrahan
(Observasi Penulis, 2011)

Persen error untuk ketiga titik yang diukur secara langsung (observasi) masing-masing adalah sebesar 14,73%, 21,24% dan 22,87% terhadap hasil perhitungan atau prediksi model. Perbedaan hasil perhitungan model dengan pemeriksaan langsung juga dapat diakibatkan karena batasan-batasan model

seperti debit, dispersi serta kecepatan aliran sungai yang dianggap *uniform* atau sama di setiap segmennya. Dalam kenyataannya, debit, dispersi, maupun kecepatan aliran dapat memiliki nilai yang cenderung fluktuatif atau berubah-ubah. Nilai komponen sungai yang berubah-ubah tersebut dapat mengakibatkan mekanisme peluruhan konsentrasi fosfat yang berbeda pula di setiap segmen. Namun, hal ini tidak diperhitungkan dalam model karena komponen sungai tersebut dianggap *uniform* atau tetap di sepanjang aliran sungai.

Hasil pemeriksaan konsentrasi fosfat pada ketiga titik mengalami penurunan dari segmen hulu ke segmen hilir. Penurunan ini sesuai dengan hasil perhitungan dan literatur yang menyatakan bahwa konsentrasi dalam sungai akan mengalami penurunan seiring dengan penambahan jarak dari titik input beban. Hal tersebut terjadi karena adanya mekanisme peluruhan dalam sungai yang mengakibatkan konsentrasi fosfat mengalami penurunan. Mekanisme peluruhan tersebut dapat berupa pengendapan, reaksi dengan senyawa lain, serta pemecahan konsentrasi akibat debit dan dispersi aliran sungai. Dari hasil perhitungan, konsentrasi fosfat dalam sungai mengalami penurunan sampai ke segmen hilir. Di segmen hilir, penurunan konsentrasi semakin kecil dan nilai konsentrasi hampir mendekati konstan. Namun, pada hasil observasi, penurunan konsentrasi hingga mencapai nilai yang konstan tersebut tidak dapat terlihat karena pengambilan sampel hanya diambil pada tiga segmen hulu. Penurunan konsentrasi yang semakin kecil hingga mendekati konstan tersebut terjadi karena di sepanjang segmen konsentrasi fosfat telah mengalami penurunan hingga nilainya semakin kecil. Dengan nilai konsentrasi yang semakin kecil tersebut, penurunan yang terjadi juga relatif lebih kecil dibandingkan penurunan konsentrasi di segmen hulu. Akibatnya, konsentrasi di segmen hilir terlihat konstan dibanding konsentrasi pada segmen hulu.

Tabel 5.8. Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak Pada Δt ke-1 (2,88 detik)

	c (1,1) $\Delta x=1$ (2m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)	c (2,1) $\Delta x=2$ (4m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)	c (3,1) $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)
Prediksi Model	2,0328	2,0315	2,0311
Pemeriksaan 1	1,58	1,54	1,50
Pemeriksaan 2	1,66	1,61	1,58
Pemeriksaan 3	1,96	1,65	1,62

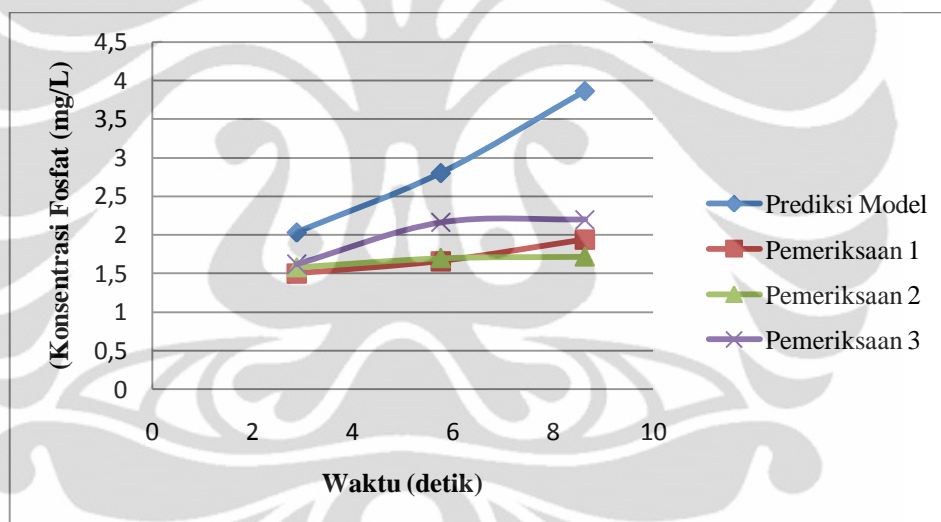
Sumber: Pengolahan Penulis, 2011

Pada Tabel 5.8 dapat terlihat bahwa penurunan konsentrasi menurut perhitungan model secara numerik sangat kecil dibandingkan penurunan konsentrasi yang terjadi pada hasil pemeriksaan secara langsung (observasi). Penurunan konsentrasi terhadap jarak dari hasil perhitungan numerik adalah berkisar 0,001 mg/L. Sedangkan pada hasil pemeriksaan langsung, penurunan konsentrasi adalah berkisar 0,01 mg/L atau berbeda 10 kali lipatnya. Penurunan yang sangat kecil pada hasil perhitungan model secara numerik ini mengakibatkan grafik penurunan tidak terlalu terlihat jelas atau terlihat cenderung datar dibandingkan grafik penurunan dari hasil observasi.

Perbedaan yang terjadi antara hasil observasi dan prediksi model dapat terjadi karena berbagai faktor. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bahwa penurunan konsentrasi fosfat dalam sungai dapat terjadi karena adanya mekanisme peluruhan dengan laju peluruhan sebesar k . Laju peluruhan untuk Sungai Pesanggrahan ditentukan melalui pemeriksaan di laboratorium. Diperkirakan laju peluruhan yang didapatkan dari hasil pemeriksaan di laboratorium ini kurang sesuai dengan kondisi sesungguhnya di sungai. Hal ini mungkin terjadi karena konsentrasi fosfat dalam perairan dipengaruhi oleh suhu serta cahaya matahari. Penyimpanan sampel di laboratorium selama 7 hari di *beaker glass*, mungkin menyebabkan perbedaan kondisi bagi fosfat dalam sampel tersebut dibandingkan kondisi sesungguhnya di sungai. Perbedaan tersebut dapat menyebabkan dihasilkannya nilai k yang lebih kecil, sehingga penurunan konsentrasi fosfat dalam sungai menurut hasil prediksi model menjadi lebih kecil dibandingkan hasil pemeriksaan sampel yang diobservasi langsung di sungai.

6.2.2 Hasil Observasi dan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu

Untuk model perubahan konsentrasi fosfat terhadap waktu, sampel diambil di satu titik yang sama dan pada tiga waktu berbeda. Sampel diambil pada titik sejauh 6 m dari titik input lindi atau pada segmen (Δx) ke-3, saat detik ke-2,88, 5,76, dan 8,64 atau sama dengan Δt ke-1, 2, dan 3. Sampel tersebut kemudian diawetkan dalam botol untuk kemudian dilakukan pemeriksaan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan. Pemeriksaan fosfat dalam sampel tersebut dilakukan dengan metode Spektrofotometri pada panjang gelombang 530 nm. Reagen yang digunakan adalah Molybdate dan Asam Amino. Hasil pemeriksaan kemudian dimasukkan dalam Tabel 5.9 dan diplot ke dalam grafik pada Gambar 5.9 untuk dibandingkan dengan hasil perhitungan model.



Gambar 5.9. Grafik Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu Pada Δx ke-3 (6 meter)

(Pengolahan Penulis, 2011)

Dari grafik pada Gambar 5.9 terlihat bahwa hasil perhitungan model perubahan konsentrasi terhadap waktu tidak sama dengan hasil pemeriksaan konsentrasi secara observasi. Persen error untuk ketiga sampel yang diukur secara langsung (observasi) masing-masing adalah sebesar 22,86%, 34,33% dan 49,46% terhadap hasil perhitungan atau prediksi model. Dalam hal ini, terjadi *over predict*, yaitu hasil perhitungan model konsentrasi fosfat terhadap waktu lebih besar daripada hasil pemeriksaan langsung di sungai. *Over predict* ini dapat

terjadi karena alasan yang sama seperti pada hasil observasi untuk model perubahan konsentrasi terhadap jarak, yaitu air lindi yang tidak mengalami pencampuran sempurna seperti yang diperhitungkan dalam model yang dibuat. Dalam model, lindi dan air sungai diasumsikan mengalami pencampuran sempurna dan konsentrasi pencampuran dihitung dengan persamaan keseimbangan massa. Pada kenyataannya di lapangan, air lindi hanya mengalami pencampuran dengan air sungai di bagian pinggir. Sehingga pada air sungai bagian tengah dan sisi lainnya, tidak terjadi pengaruh yang besar akibat air lindi tersebut. Hal ini sejalan dengan hasil pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam air sungai yang nilainya lebih kecil dibandingkan prediksi model. Saat observasi, sampel tidak diambil di bagian pinggir sungai, melainkan agak ke bagian tengah yang tidak mengalami pencampuran sempurna dengan air lindi. Hal tersebut mengakibatkan hasil pemeriksaan konsentrasi yang lebih kecil dibandingkan prediksi dengan model, seperti yang terlihat pada Gambar 5.9.

Perbedaan hasil perhitungan model dengan pemeriksaan langsung juga dapat diakibatkan karena batasan-batasan model antara lain adalah debit, dispersi serta kecepatan aliran sungai yang dianggap *uniform* atau sama di setiap segmennya. Dalam kenyataannya, debit, dispersi, maupun kecepatan aliran dapat memiliki nilai yang cenderung fluktuatif atau berubah-ubah. Nilai komponen sungai yang berubah-ubah tersebut dapat mengakibatkan mekanisme peluruhan konsentrasi fosfat yang berbeda pula di setiap segmen. Namun, hal ini tidak diperhitungkan dalam model karena komponen sungai tersebut dianggap *uniform* atau tetap di sepanjang aliran sungai. Selain itu, debit aliran lindi yang dianggap sama atau konstan juga kemungkinan mempengaruhi perbedaan hasil perhitungan model dengan hasil pemeriksaan langsung. Pada kenyataannya debit aliran lindi dapat mengalami fluktuasi atau cenderung tidak konstan.

Tabel 5.9. Hasil Observasi dan Prediksi Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu Pada Δx ke-3 (6 meter)

	c (3,1) $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=1$ (2,88 detik)	c (3,2) $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=2$ (5,76 detik)	c (3,3) $\Delta x=3$ (6m) $\Delta t=3$ (8,64 detik)
Prediksi Model	2,031	2,802	3,865
Pemeriksaan 1	1,50	1,66	1,94
Pemeriksaan 2	1,58	1,70	1,72
Pemeriksaan 3	1,62	2,16	2,20

Sumber: Pengolahan Penulis, 2011

Hasil pemeriksaan konsentrasi fosfat dalam air sungai (Tabel 5.9) menunjukkan kenaikan terhadap perubahan waktu. Hal ini sejalan dengan prediksi model serta literatur yang menyebutkan bahwa dengan beban yang masuk ke dalam sungai secara menerus, maka konsentrasi dalam sungai tersebut akan mengalami kenaikan karena terjadinya akumulasi. Pada perhitungan atau prediksi dengan model, kenaikan konsentrasi yang terjadi cukup signifikan yaitu berkisar 0,8 mg/L pada selang waktu pertama dan 1,1 mg/L pada selang waktu kedua. Kenaikan yang cukup besar tersebut dapat terlihat pada grafik perhitungan yang menunjukkan kenaikan yang signifikan dibandingkan dengan kenaikan pada grafik hasil pemeriksaan. Hasil pemeriksaan konsentrasi fosfat terhadap waktu menunjukkan kenaikan yang relatif kecil dibandingkan dengan hasil prediksi model. Kenaikan yang terjadi pada pemeriksaan pertama adalah berkisar 0,1 hingga 0,3 mg/L. Pada pemeriksaan kedua, kenaikan konsentrasi yang terjadi berkisar 0,02 hingga 0,2 mg/L. Dan pada pemeriksaan ketiga kenaikan konsentrasi yang terjadi berkisar 0,04 hingga 0,5 mg/L. Kenaikan yang cenderung lebih kecil ini mengakibatkan grafik cenderung lebih datar dibandingkan grafik kenaikan konsentrasi dari prediksi model. Perbedaan dalam kenaikan konsentrasi ini diperkirakan juga berhubungan dengan kondisi pencampuran air lindi di sungai yang tidak sempurna seperti yang diperhitungkan dalam model. Akibatnya, hasil pemeriksaan konsentrasi sampel air sungai menunjukkan nilai yang lebih kecil karena pengaruh dari air lindi yang tidak merata atau tercampur sempurna di sungai.

6.3 Konsentrasi Fosfat Dalam Air Lindi TPA Cipayung

Bila ditinjau dari sumbernya yaitu air lindi, jenis fosfat yang mungkin masuk ke dalam sungai antara lain adalah fosfat anorganik. Hal ini berdasarkan pengamatan penulis terhadap air lindi yang dihasilkan oleh TPA Cipayung yang berbau sangat menyengat. Timbulnya bau air lindi tersebut merupakan hasil dari proses dekomposisi bahan organik di dalamnya yang terjadi secara anaerob. Proses secara anaerob tersebut akan menghasilkan senyawa yang berbau menyengat berupa senyawa amonia, H_2S , dan metana (Arbain, 2008). Dengan demikian, bau lindi yang sangat menyengat mengindikasikan adanya aktivitas dekomposisi bahan organik di dalamnya. Aktivitas dekomposisi bahan organik tersebut dapat menghasilkan bentuk fosfat anorganik (Sawyer, 2003). Fosfat anorganik tersebut dapat terdiri dari ortofosfat dan polifosfat (Alaerts, 1984).

Selain bentuk anorganik, fosfat dalam lindi juga dapat berbentuk senyawa fosfat organik, yaitu fosfat yang terikat dengan senyawa-senyawa organik sehingga tidak terdapat dalam keadaan bebas. Air lindi diketahui memiliki kandungan organik yang tinggi. Selain itu, fosfat dalam air buangan jarang sekali ditemui dalam keadaan bebas (Alaerts, 1984). Dengan demikian, fosfat dalam lindi dapat berupa fosfat anorganik dan fosfat organik. Namun, pengukuran hanya dilakukan terhadap total fosfat, sehingga persentase masing-masing jenis fosfat tersebut dalam air lindi tidak dapat diketahui. Dari kedua jenis fosfat tersebut, fosfat anorganik akan mengalami mekanisme peluruhan dalam perairan berupa pengendapan menjadi sedimen, sementara fosfat organik akan dikonsumsi oleh organisme di dalam perairan.

Sampel air lindi memiliki nilai konsentrasi fosfat yang cenderung berubah atau tidak tetap. Pemeriksaan pada bulan Januari 2011 menunjukkan hasil konsentrasi fosfat yang lebih besar dibandingkan konsentrasi fosfat pada pemeriksaan terakhir, yaitu bulan Mei 2011. Konsentrasi fosfat dalam lindi pada pemeriksaan terdahulu kemungkinan lebih besar karena saat pengambilan sampel tersebut, lahan penimbunan sampah yang terdekat dengan instalasi pengolahan air lindi baru saja dioperasikan. Menurut literatur, kualitas dan kuantitas air lindi dari dekomposisi sampah baru lebih besar daripada sampah lama. Hal tersebut berarti semakin lama penimbunan sampah, maka kuantitas dan kualitas atau konsentrasi

yang terkandung dalam air lindi akan semakin kecil (Arbain, 2008). Hal tersebut sejalan dengan hasil pemeriksaan yang menunjukkan bahwa konsentrasi fosfat dalam air lindi pada pemeriksaan terdahulu mencapai 15,1 mg/L, sedangkan pada pemeriksaan terakhir, konsentrasi fosfat dalam air lindi hanyalah sebesar 4,093 mg/L. Nilai konsentrasi fosfat ini kurang lebih sesuai dengan literatur yang mengatakan bahwa konsentrasi fosfat dalam lindi dari TPA adalah berkisar 5-100 mg/L (Tchobanoglous, 1993). Meskipun konsentrasi fosfat dalam lindi dari TPA Cipayung masih cenderung kecil dibandingkan literatur tersebut, namun debitnya yang masuk ke sungai secara menerus diperkirakan tetap dapat meningkatkan konsentrasi fosfat dalam sungai.

6.4 Kondisi Sungai Pesanggrahan Ditinjau Dari Konsentrasi Fosfat

Hasil pemeriksaan konsentrasi awal fosfat di Sungai Pesanggrahan yaitu 1,47 mg/L, menunjukkan bahwa konsentrasi fosfat dalam sungai berada dalam nilai yang berpotensi menjadikan perairan menjadi eutrofik. Menurut PP No. 82 Tahun 2001 tentang pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran air, total fosfat dalam perairan kelas I, II, III, dan IV masing-masing tidak boleh melebihi dari 0,2 mg/L, 0,2 mg/L, 1 mg/L, dan 5 mg/L. Berdasarkan peraturan tersebut, maka ditinjau dari konsentrasi fosfat di dalamnya, Sungai Pesanggrahan tidak memenuhi klasifikasi untuk perairan kelas I, II dan III. Namun, sungai ini masih memiliki konsentrasi fosfat di bawah 5 mg/L yang berarti bahwa sungai ini memenuhi klasifikasi untuk perairan kelas IV, yaitu perairan yang peruntukkannya dapat digunakan untuk mengairi tanaman atau peruntukkan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Menurut Wetzel (1983), perairan dengan kandungan fosfat mencapai 80 mg/m³ atau setara dengan 0,08 mg/L dapat dikatakan merupakan perairan yang eutrofik atau memiliki kandungan nutrisi yang berlebih. Berdasarkan literatur tersebut, dapat dikatakan bahwa Sungai Pesanggrahan telah mengalami kondisi eutrofik bahkan sebelum mendapatkan input lindi. Kondisi eutrofik dalam suatu perairan ditunjukkan dengan tingginya konsentrasi mikroorganisme dalam perairan yang mengakibatkan perairan menjadi keruh. Mikroorganisme mengalami pertumbuhan dengan cepat karena tersedianya nutrisi fosfat dalam

jumlah besar. Seharusnya, populasi ikan dalam perairan ini juga tinggi karena tersedianya nutrisi dan mikroba yang berlebih. Namun, berdasarkan observasi penulis, tidak ditemukan populasi ikan dalam sungai tersebut. Hal ini mungkin terjadi karena oksigen terlarut yang tidak tersedia dalam jumlah yang mencukupi untuk kebutuhan respirasi ikan. Keterbatasan oksigen terlarut dalam perairan eutrofik mungkin terjadi karena tingginya populasi mikroba mengakibatkan tingginya konsumsi oksigen tersebut. Rendahnya konsentrasi oksigen terlarut dalam perairan tersebut lebih lanjut dapat berakibat pada musnahnya populasi ikan dan meningkatnya aktivitas mikroba secara anaerob.

Indikasi lain dari perairan eutrofik adalah banyaknya sedimen di dasar perairan yang mengakibatkan perairan menjadi dangkal. Hal ini sesuai dengan observasi penulis bahwa sedimen di dasar perairan cukup tinggi, yang mengakibatkan perairan menjadi dangkal. Kedalaman perairan yang tidak merata menunjukkan ketebalan sedimen yang tidak seragam di dasar perairan. Sedimen terbentuk akibat pengendapan dari sejumlah nutrisi yang masuk ke perairan ini. Jumlah nutrisi yang berlebih mengakibatkan besarnya sedimen yang terbentuk di dasar perairan.

Kandungan fosfat yang tinggi dalam sungai tersebut dapat bersumber dari limpasan pertanian yang berada di pinggir aliran sungai, saluran pembuangan limbah milik penduduk, deposit mineral alami, maupun limbah dari proses industri yang dibuang ke dalam sungai tersebut. Fosfat dari kegiatan pertanian adalah fosfat dalam bentuk ortofosfat, sedangkan dari limbah domestik fosfat dapat berupa polifosfat dan fosfat organik. Fosfat dari limbah industri biasanya mengandung polifosfat dan fosfat organik, sementara fosfat yang terbentuk dari deposit alami adalah fosfat dalam bentuk anorganik (Alaerts, 1984). Selain sumber-sumber tersebut, berdasarkan pengamatan penulis, bagian hulu Sungai Pesanggrahan sebagai lokasi objek studi juga dimanfaatkan oleh penduduk untuk kegiatan mencuci. Aktivitas pencucian di sungai tersebut dapat meningkatkan konsentrasi fosfat dalam air sungai berupa polifosfat yang bersumber dari deterjen pencuci. Pengukuran yang dilakukan di laboratorium terhadap konsentrasi fosfat adalah pengukuran untuk total fosfat, sehingga diperkirakan bahwa semua jenis

fosfat telah terukur. Namun, persentase masing-masing jenis fosfat tersebut tidak dapat diketahui karena tidak dilakukan pengukuran yang lebih spesifik.



Gambar 6.3. Kegiatan Mencuci di Hulu Sungai Pesanggrahan
(Observasi Penulis, 2011)

Konsentrasi fosfat dalam Sungai Pesanggrahan cenderung tidak tetap atau selalu berubah. Hal ini dipengaruhi oleh aktivitas manusia di sekitar sungai, maupun faktor cuaca. Penulis menemukan bahwa konsentrasi fosfat dalam sampel air sungai pada pemeriksaan untuk penentuan k (Februari, 2011) adalah sebesar 3,87 mg/L sedangkan pada pemeriksaan terakhir (Mei, 2011) konsentrasi fosfat dalam air sungai hanyalah 1,47 mg/L. Hal ini mungkin terjadi antara lain karena faktor cuaca. Cuaca hujan di beberapa hari sebelum pengambilan sampel dapat menjadi penyebab lebih rendahnya kandungan fosfat dalam sungai karena fosfat tersebut mengalami mekanisme adveksi dan dispersi yang lebih besar di dalam sungai saat terjadi hujan. Selain itu, input konsentrasi fosfat dari bagian hulu sungai juga mempengaruhi konsentrasi fosfat dalam sungai tersebut. Kegiatan mencuci penduduk di bagian hulu sungai saat pengambilan sampel untuk penentuan nilai k diperkirakan mengakibatkan konsentrasi fosfat dalam sungai mengalami kenaikan. Hal ini sesuai dengan literatur yang mengatakan bahwa deterjen mengandung fosfat organik maupun anorganik dalam jumlah yang besar (Sawyer, 2003).

6.4.1 Kondisi Sungai Pesanggrahan Berdasarkan Hasil Observasi Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Jarak (x)

Untuk observasi, pemeriksaan konsentrasi fosfat dilakukan untuk sampel air sungai yang berada di titik 2 m, 4 m dan 6 m dari titik input air lindi. Sampel dari ketiga titik tersebut diperiksa konsentrasi fosfatnya masing-masing sebanyak tiga kali. Hasil pemeriksaan tersebut telah disajikan dalam Tabel 5.8. Dalam tabel tersebut terlihat bahwa konsentrasi fosfat di sungai pada titik-titik yang telah disebutkan, berada dalam kisaran 1,50 hingga 1,96 mg/L.

Hasil pemeriksaan konsentrasi menunjukkan penurunan terhadap pertambahan jarak. Di titik yang lebih jauh (hilir) dari titik input, penulis menemukan konsentrasi selalu lebih kecil dibandingkan konsentrasi di titik hulu pada pemeriksaan 1, 2 dan 3. Namun, penurunan yang terjadi cenderung tidak seragam atau tidak menciptakan tren yang sama. Penurunan yang terjadi berkisar 0,02 hingga 0,1 mg/L. Penurunan konsentrasi dapat terjadi akibat adanya mekanisme peluruhan fosfat di dalam sungai, yang dapat terdiri dari dekomposisi oleh mikroorganisme (fosfat organik) ataupun pengendapan menjadi sedimen (fosfat anorganik).

Meskipun konsentrasi fosfat dalam sungai mengalami penurunan seiring dengan pertambahan jarak, namun nilainya masih cenderung tinggi dan mengindikasikan perairan mengalami kondisi eutrofik. Mekanisme peluruhan yang cenderung lebih kecil mengakibatkan penurunan fosfat belum terlalu signifikan dibandingkan dengan input beban yang masuk, terutama dari lindi TPA Cipayung. Untuk mengatasi konsentrasi fosfat yang berlebih dalam sungai tersebut, upaya yang diperkirakan dapat dilakukan adalah dengan meningkatkan efisiensi Instalasi Pengolahan Air Lindi TPA Cipayung. Dengan demikian, diharapkan beban fosfat yang masuk ke Sungai Pesanggrahan menjadi lebih kecil dan tidak mengakibatkan perairan menjadi semakin eutrofik.

6.4.2 Kondisi Sungai Pesanggrahan Berdasarkan Hasil Observasi Perubahan Konsentrasi Fosfat Terhadap Waktu (t)

Hasil pemeriksaan konsentrasi fosfat di sungai menunjukkan kenaikan terhadap perubahan waktu. Hasil yang tersaji dalam Tabel 5.9 menunjukkan bahwa konsentrasi fosfat dalam air sungai menunjukkan kenaikan berkisar 0,02

hingga 0,5 mg/L. Kenaikan yang terjadi relatif lebih kecil dibandingkan kenaikan yang diprediksi oleh model yaitu berkisar 0,8 hingga 1,1 mg/L. Konsentrasi fosfat dalam sungai mengalami kenaikan akibat adanya input lindi yang masuk secara menerus. Air lindi yang mengandung konsentrasi fosfat tersebut mengakibatkan terjadinya kenaikan konsentrasi dalam sungai seiring dengan perubahan waktu. Adanya kenaikan konsentrasi ini juga menunjukkan kemampuan sungai dalam meluruhkan konsentrasi fosfat yang masih lebih kecil dibandingkan bertambahnya konsentrasi yang terjadi akibat input lindi.

Peningkatan konsentrasi ini mengakibatkan sungai yang telah berada dalam kondisi eutrofik dengan kandungan fosfat melebihi 0,08 mg/L, menjadi semakin tinggi kandungan nutriennya. Di waktu awal hingga perubahan waktu ketiga, konsentrasi fosfat dalam perairan diketahui adalah berkisar 1,50 hingga 2,20 mg/L. Terlihat bahwa dari waktu yang lebih awal, konsentrasi fosfat dalam sungai telah berada dalam kondisi eutrofik. Seiring pertambahan waktu, konsentrasi fosfat pun meningkat karena adanya input lindi mengandung konsentrasi fosfat yang tinggi. Dengan semakin tingginya konsentrasi fosfat sebagai nutrisi dalam sungai tersebut, dapat diperkirakan Sungai Pesanggrahan akan mengalami *alga bloom* ataupun pertumbuhan yang berlebihan dari organisme lainnya dalam sungai. Pertumbuhan mikroorganisme dan alga dalam jumlah berlebihan dalam sungai dapat mengakibatkan terganggunya keseimbangan ekosistem. Produktivitas perairan dapat mengalami penurunan karena aktivitas mikroorganisme tersebut. Mikroorganisme yang berada dalam jumlah besar mengkonsumsi oksigen dalam jumlah besar, yang mengakibatkan oksigen terlarut dalam perairan menjadi rendah. Dalam kondisi kekurangan oksigen terlarut, organisme lain seperti ikan akan musnah dan aktivitas mikroorganisme beralih menjadi aktivitas anaerob. Aktivitas anaerob tersebut dapat mengakibatkan perairan menjadi keruh dan bahkan berbau.

Untuk mengantisipasi hal tersebut, sungai perlu memiliki mekanisme peluruhan yang lebih baik agar konsentrasi fosfat tidak mengalami kenaikan yang mengakibatkan terjadinya pertumbuhan berlebihan dari mikroorganisme. Selain itu, pengurangan beban yang masuk berupa lindi dari TPA Cipayung diperkirakan dapat mengurangi tingginya konsentrasi fosfat dalam Sungai Pesanggrahan.

BAB 7

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Konsentrasi awal fosfat di Sungai Pesanggrahan diketahui dengan pemeriksaan di laboratorium, yaitu 1,47 mg/L. Hasil observasi perubahan konsentrasi fosfat terhadap jarak menunjukkan terjadi penurunan seiring pertambahan jarak. Namun penurunan yang terjadi tidak sama atau berbeda sekitar 10 kali lipat lebih kecil dari prediksi model. Dalam hal ini, model mengalami *over predict*. Hasil pemeriksaan fosfat dalam sungai secara observasi berkisar 1,50 hingga 1,96 mg/L dari jarak 2 hingga 4 m dari titik input lindi. Hal tersebut menunjukkan bahwa sungai berada dalam kondisi eutrofik atau kelebihan nutrien fosfat. Hasil observasi perubahan konsentrasi terhadap waktu menunjukkan terjadinya kenaikan konsentrasi seiring pertambahan waktu karena input lindi TPA yang masuk secara menerus. Kenaikan ini sesuai dengan prediksi model, namun model mengalami *over predict*. Kenaikan yang diprediksi oleh model adalah sebesar 0,8 hingga 1,1 mg/L sementara dari observasi, diketahui bahwa kenaikan yang terjadi berkisar 0,02 hingga 0,5 mg/L.
2. Model perubahan konsentrasi fosfat dalam kondisi *steady state* dikembangkan dengan pendekatan *control volume*. Selanjutnya perhitungan dilanjutkan untuk kondisi *unsteady* dengan metode *finite difference* dan pendekatan *forward-time/centered-space* (FTCS). Hasil perhitungan tersebut adalah model perubahan konsentrasi fosfat terhadap jarak (x) dan waktu (t).

3. Masih terdapat penyimpangan model dibandingkan dengan hasil observasi. Hal ini disebabkan oleh penentuan batasan masalah dan asumsi dalam perhitungan model terlalu homogen bila dibandingkan dengan kondisi sesungguhnya di lapangan.

7.2 Saran

Saran yang dapat diberikan oleh penulis terkait hasil penelitian ini adalah sebagai berikut.

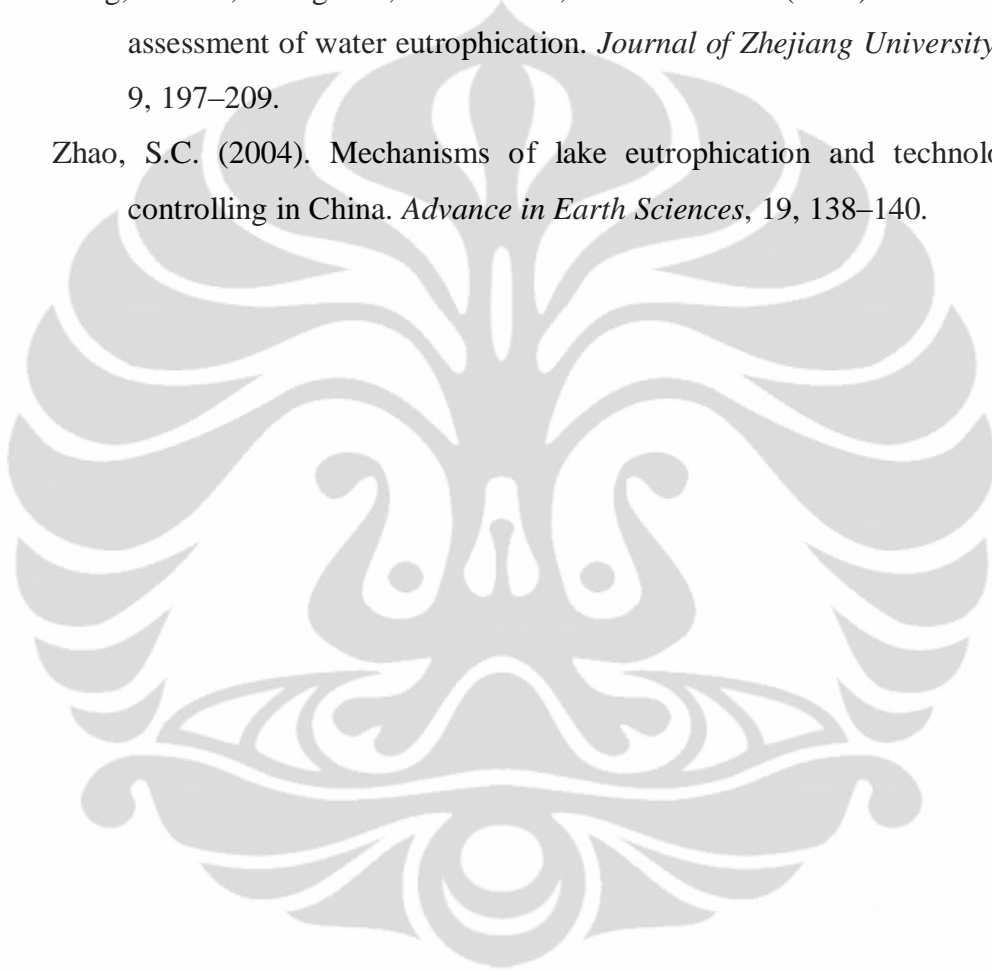
1. Untuk meningkatkan keakuratan model, dibutuhkan pengembangan model lebih lanjut terutama dalam hal sensitivitas model terhadap komponen sungai seperti dispersi, debit dan kecepatan aliran sungai.
2. Metode validasi model perlu dikembangkan antara lain dengan cara menambah titik observasi serta variasi waktu pengambilan sampel pada musim yang berbeda.
3. Untuk mengantisipasi terjadinya eutrofikasi dalam Sungai Pesangrahan, dapat dilakukan dengan meningkatkan efisiensi *removal* fosfat pada Instalasi Pengolahan Air Lindi TPA Cipayung.

DAFTAR REFERENSI

- Alaerts, G., & S.S. Santika. (1984). *Metode penelitian air*. Surabaya: Usaha Nasional.
- Arbain, N.K. Mardana, dan I.B. Sudana. (2008). Pengaruh air lindi Tempat Pembuangan Akhir Sampah Suwung terhadap kualitas air tanah dangkal di sekitarnya di Kelurahan Pedungan Kota Denpasar. *Ecotrophic* 3 (2): 55-60.
- Bledsoe E.L., Philips E.J., Jett C.E., & Donnelly K.A. (2004). The relationships among 336 phytoplankton biomass, nutrient loading and hydrodynamics in an inner-shelf estuary. *Ophelia*, 58,29–47.
- Cai J.B., Ding X.F., Peng H.Y., Chang H.Q., & Yang X.E. (2007). Effects of environmental factors and submerged aquatic plants on phosphorus release from the sediment. *Journal of Soil and Water Conservation*, 21,151–154.
- Carmichael, W.W. (2001). Health effects of toxin-producing Cyanobacteria: “The CyanoHABs”. *Human and Ecological Risk Assessment*, 7,1393–1407.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface water-quality modelling*. Singapore: McGraw-Hill.
- Cloern, J.E. (2001). Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication 350 problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210, 223–253.
- Dell’Anno A., Mei M.L, Pusceddu A., & Danovaro R. (2002). Assessing the trophic state and eutrophication of coastal marine systems: A new approach based on the biochemical composition of sediment organic matter. *Marine Pollution Bulletin*, 44,611–622.
- Hadianto. (1996). *Studi kualitas air Sungai Cisadane*. Bogor: IPB.
- Handono, M. (2010). *Model pengelolaan Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) sampah secara berkelanjutan di TPA Cipayung Kota Depok-Jawa Barat*. Bogor: Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- Hodgkiss I.J, & Lu S.H. (2004). The effects of nutrients and their ratios on phytoplankton abundance in Junk Bay, Hong Kong. *Hydrobiologia*, 512, 215–229.
- Kant S., & Raina A.K. (1990). Limnological studies of two ponds in Jammu. II. Physico-chemical parameters. *Journal of Environmental Biology*, 11, 137–144.

- Kevern, N.R., Darrell L. King, & Robert Ring. (1996, February). *Lake Clasification Systems-Part 1*. The Michigan Riparian. <http://www.mlswa.org>
- Khan F.A., & Ansari A.A. (2005). Eutrophication: An ecological vision. *The Botanical Review*, 71,449–482.
- Manahan, S.E. (2005). *Environmental chemistry* (8th ed.). USA: CRC Press.
- Miller, G.T.Jr. (2001). *Environmental science*. London: Brooks/Cole Thomson Learning.
- Muchtar, M. (1996). *Konsentrasi fosfat di beberapa perairan Indonesia*. Puslitbang Oseanografi. Jakarta: LIPI.
- Paerl, H.W. (1998). Structure and function of anthropogenically altered microbial communities in coastal waters. *Current Opinion in Microbiology*, 1,296–302.
- Paerl, H.W., Dyble J., Moisander P.H., Noble R.T., Piehler M.F., Pinckney J.L., Steppe T.F., Twomey L., & Valdes L.M. (2003). Microbial indicators of aquatic ecosystem change: current applications to eutrophication studies. *FEMS Microbiology Ecology*, 46, 233–246.
- Phlips E.J. (2002). Algae and eutrophication. In Bitton G. (Ed). *Encyclopedia of environmental microbiology*. New York: John Wiley and Sons.
- Redfield A.C., Ketchum B.H., & Richards F.A. (1963). The influence of organisms on the composition of seawater. In Hill M.N. (Ed). *The Sea Volume 2* (pp. 26–77). New York: Wiley-Interscience.
- Reynolds, C. (2006). *Ecology of phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sastrawijaya, T.A. 1991. *Pencemaran lingkungan*, Jakarta: Rineka Cipta.
- Sawyer, C.N. (1996). Basic concepts of eutrophication. *Water Environment Federation Journal (Water Pollution Control Federation)*, 38, 737-744.
- Sawyer, C.N., Perry L.M., & Gene F.P. (2003). *Chemistry for environmental engineering and science* (5th ed.). Singapore: McGraw-Hill.
- Shen, D.S. (2002). Study on limiting factors of water eutrophication of the network of rivers in plain. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 28, 94–97.
- Sudja, W.A. (1985). *Ilmu kimia lingkungan*. Jakarta: Universitas Terbuka.

- Tchobanoglous, G., Hilary Theisen, & Samuel Vigil. (1993). *Integrated solid waste managemet*. Singapore: McGraw-Hill.
- University of Leeds. (2009). *An introduction to fluid mechanics: statics, dynamics, momentum, real fluids, dimensional analysis*. December 30, 2010.
- Wetzel, R.G. (1983). *Limnology*. Philadelphia: W.B. Saunders Co.
- Yang, Xiao-e, Xiang Wu, Hu-lin Hao, & Zhen-li He. (2008). Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University Science*, 9, 197–209.
- Zhao, S.C. (2004). Mechanisms of lake eutrophication and technologies for controlling in China. *Advance in Earth Sciences*, 19, 138–140.



LAMPIRAN 1

Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Jarak ($\Delta x = 5m$) Dalam Kondisi *Steady State* dengan Pendekatan *Control Volume*

$$[A]\{c\} = \{W\}$$

340557,3	-93727,5	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_1	641,024
-340556	434284,7	-93727,5	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_2	0
0	-340556	434284,7	-93727,5	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_3	0
0	0	-340556	434284,7	-93727,5	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_4	0
0	0	0	-340556	434284,7	-93727,5	.	0	0	0	0	0	0	0	c_5	0
0	0	0	0	-340556	434284,7	.	0	0	0	0	0	0	0	c_6	0
0	0	0	0	0	-340556	.	0	0	0	0	0	0	0	c_7	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_8	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_9	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_{10}	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_{11}	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_{12}	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_{13}	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	0	0	0	c_{14}	0
0	0	0	0	0	0	.	-93727,5	0	0	0	0	0	0	c_{15}	0
0	0	0	0	0	0	.	434284,7	-93727,5	0	0	0	0	0	c_{16}	0
0	0	0	0	0	0	.	-340556	434284,7	-93727,5	0	0	0	0	c_{17}	0
0	0	0	0	0	0	.	0	-340556	434284,7	-93727,5	0	0	0	c_{18}	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	-340556	434284,7	-93727,5	0	0	c_{19}	0
0	0	0	0	0	0	.	0	0	0	0	-340556	340557,3	0	c_{20}	0

(lanjutan)

$$\{c\} = [A^{-1}]\{W\}$$

Hasil (ditambahkan dengan c_0)

$$c_0 = 1,472 \text{ mg/L}$$

c ₁	0,00259702424	1,47259702424
c ₂	0,00259701288	1,47259701288
c ₃	0,00259700152	1,47259700152
c ₄	0,00259699016	1,47259699016
c ₅	0,00259697880	1,47259697880
c ₆	0,00259696744	1,47259696744
c ₇	0,00259695608	1,47259695608
c ₈	0,00259694472	1,47259694472
c ₉	0,00259693336	1,47259693336
c ₁₀	0,00259692199	1,47259692199
c ₁₁	0,00259691063	1,47259691063
c ₁₂	0,00259689927	1,47259689927
c ₁₃	0,00259688791	1,47259688791
c ₁₄	0,00259687655	1,47259687655
c ₁₅	0,00259686520	1,47259686520
c ₁₆	0,00259685386	1,47259685386
c ₁₇	0,00259684256	1,47259684256
c ₁₈	0,00259683144	1,47259683144
c ₁₉	0,00259682094	1,47259682094
c ₂₀	0,00259681270	1,47259681270

LAMPIRAN 2

**Perhitungan Model Perubahan Konsentrasi Terhadap Waktu ($\Delta x = 2m$)
Pendekatan *Finite Difference* dan FTCS, Metode Numerik Runge Kutta Orde 4**

l=1					
k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	c	i
14253,9294	16542,80224	16910,34573	19684,80112	2,032847171	1
14220,9819	16504,56411	16871,25803	19639,30037	2,03155216	2
14209,9994	16491,81798	16858,22871	19624,13334	2,031120480	3
14204,508	16485,44485	16851,71399	19616,54976	2,030904632	4
14201,2132	16481,62093	16847,8051	19611,99955	2,030775116	5
14199,0166	16479,0716	16845,19913	19608,96602	2,030688768	6
14197,4475	16477,25061	16843,33769	19606,79918	2,030627086	7
14196,2707	16475,88484	16841,94157	19605,174	2,030580820	8
14195,3554	16474,82255	16840,85568	19603,90995	2,030544832	9
14194,6232	16473,97269	16839,98694	19602,89867	2,030516039	10
14194,024	16473,27732	16839,27612	19602,07123	2,030492478	11
14193,5247	16472,69783	16838,68376	19601,38168	2,030472841	12
14193,1022	16472,20748	16838,18251	19600,79819	2,030456223	13
14192,74	16471,78715	16837,75284	19600,29803	2,030441977	14
14192,4261	16471,42285	16837,38045	19599,86454	2,030429628	15
14192,1514	16471,10408	16837,05459	19599,48522	2,030418820	16
14191,9091	16470,82278	16836,76705	19599,1505	2,030409283	17
14191,6936	16470,57273	16836,51144	19598,85295	2,030400803	18
14191,5008	16470,34897	16836,28271	19598,58669	2,030393215	19
					20

l=2					
k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	c	i
					1
19638,54	22792,06	23298,45	27120,99	2,803444064	2
19602,24	22749,93	23255,38	27070,86	2,801585674	3
19589,24	22734,85	23239,97	27052,91	2,800859030	4
19582,49	22727,02	23231,96	27043,59	2,800464259	5
19578,35	22722,21	23227,04	27037,87	2,800215014	6
19575,54	22718,95	23223,71	27034	2,800043025	7
19573,52	22716,6	23221,31	27031,2	2,799917082	8
19571,98	22714,82	23219,49	27029,08	2,799820833	9
19570,78	22713,43	23218,07	27027,42	2,799744863	10
19569,82	22712,31	23216,92	27026,09	2,799683364	11
19569,02	22711,39	23215,98	27024,99	2,799632554	12
19568,36	22710,62	23215,19	27024,08	2,799589867	13
19567,8	22709,96	23214,53	27023,3	2,799553495	14
19567,31	22709,4	23213,95	27022,63	2,799522133	15
19566,89	22708,91	23213,45	27022,05	2,799494811	16
19566,52	22708,49	23213,02	27021,54	2,799470795	17
19566,2	22708,11	23212,63	27021,09	2,799449518	18
					19
					20

(lanjutan)

<i>l=3</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	i
					1
					2
27061,05	31406,47	32104,25	37371,55	3,865219	3
27020,62	31359,54	32056,28	37315,71	3,862903	4
27005,12	31341,56	32037,9	37294,31	3,861900	5
26996,79	31331,89	32028,01	37282,8	3,861323	6
26991,56	31325,82	32021,81	37275,58	3,860945	7
26987,96	31321,65	32017,54	37270,61	3,860678	8
26985,34	31318,6	32014,43	37266,99	3,860479	9
26983,34	31316,28	32012,06	37264,23	3,860324	10
26981,76	31314,45	32010,19	37262,05	3,860201	11
26980,49	31312,97	32008,68	37260,29	3,860100	12
26979,44	31311,75	32007,43	37258,84	3,860016	13
26978,56	31310,73	32006,38	37257,62	3,859945	14
26977,81	31309,86	32005,49	37256,59	3,859884	15
26977,16	31309,11	32004,73	37255,69	3,859831	16
26976,6	31308,46	32004,06	37254,92	3,859785	17
					18
					19
					20

<i>l=4</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	i
					1
					2
					3
37292,93	43281,37	44242,98	51501,86	5,328701	4
37247,4	43228,52	44188,96	51438,98	5,325907	5
37228,79	43206,93	44166,89	51413,29	5,324599	6
37218,45	43194,93	44154,62	51399	5,323815	7
37211,82	43187,24	44146,76	51389,86	5,323287	8
37207,21	43181,88	44141,29	51383,48	5,322906	9
37203,81	43177,93	44137,25	51378,78	5,322618	10
37201,19	43174,9	44134,15	51375,17	5,322392	11
37199,12	43172,5	44131,69	51372,31	5,322210	12
37197,44	43170,54	44129,7	51369,99	5,322060	13
37196,05	43168,93	44128,04	51368,07	5,321934	14
37194,87	43167,57	44126,65	51366,45	5,321827	15
37193,87	43166,4	44125,46	51365,06	5,321735	16
					17
					18
					19
					20

(lanjutan)

<i>l=5</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	i
					1
					2
					3
					4
51397,72	59651,08	60976,39	70980,7	7,346093	5
51345,88	59590,92	60914,89	70909,11	7,342747	6
51323,39	59564,82	60888,21	70878,05	7,341079	7
51310,5	59549,86	60872,92	70860,25	7,340044	8
51302,08	59540,09	60862,93	70848,63	7,339333	9
51296,14	59533,2	60855,89	70840,42	7,338811	10
51291,72	59528,06	60850,64	70834,32	7,338411	11
51288,3	59524,1	60846,59	70829,59	7,338094	12
51285,58	59520,93	60843,35	70825,83	7,337837	13
51283,35	59518,35	60840,72	70822,76	7,337624	14
51281,51	59516,21	60838,52	70820,21	7,337444	15
					16
					17
					18
					19
					20

<i>l=6</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	i
					1
					2
					3
					4
					5
70841,64	82217,27	84043,95	97832,92	10,12717	6
70781,99	82148,05	83973,19	97750,55	10,12316	7
70754,63	82116,29	83940,73	97712,76	10,12105	8
70738,49	82097,56	83921,58	97690,47	10,11971	9
70727,77	82085,12	83908,86	97675,67	10,11876	10
70720,11	82076,23	83899,78	97665,09	10,11806	11
70714,36	82069,55	83892,95	97657,14	10,11752	12
70709,87	82064,35	83887,64	97650,96	10,11709	13
70706,29	82060,19	83883,38	97646	10,11673	14
					15
					16
					17
					18
					19
					20

(lanjutan)

<i>l=7</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	<i>i</i>
					1
					2
					3
					4
					5
					6
97646,04	113325,9	115843,7	134850	13,96114	7
97576,7	113245,4	115761,5	134754,3	13,95630	8
97543,21	113206,5	115721,7	134708	13,95364	9
97522,93	113183	115697,7	134680	13,95190	10
97509,23	113167,1	115681,4	134661,1	13,95066	11
97499,33	113155,6	115669,7	134647,4	13,94973	12
97491,83	113146,9	115660,8	134637,1	13,94900	13
					14
					15
					16
					17
					18
					19
					20

<i>l=8</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	<i>i</i>
					1
					2
					3
					4
					5
					6
					7
134597,6	156211,1	159681,7	185880,5	19,24666	8
134516,2	156116,6	159585,2	185768,1	19,24079	9
134475	156068,8	159536,3	185711,1	19,23743	10
134449,4	156039,1	159505,9	185675,8	19,23519	11
134431,9	156018,7	159485,1	185651,6	19,23357	12
					13
					14
					15
					16
					17
					18
					19
					20

(lanjutan)

<i>l=9</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	i
					1
					2
					3
					4
					5
					6
					7
					8
185538,2	215331,7	220115,8	256229,9	26,53337	9
185441,8	215219,7	220001,4	256096,7	26,52621	10
185390,8	215160,5	219940,9	256026,3	26,52196	11
					12
					13
					14
					15
					16
					17
					18
					19
					20

<i>l=10</i>					
k_1	k_2	k_3	k_4	c	i
					1
					2
					3
					4
					5
					6
					7
					8
					9
255764,4	296834,6	303429,6	353212,8	36,57902	10
					11
					12
					13
					14
					15
					16
					17
					18
					19
					20

Peraturan Pemerintah No. 82 Tahun 2001

PERATURAN PEMERINTAH NOMOR 82 TAHUN 2001
TANGGAL 14 DESEMBER 2001
TENTANG
PENGELOLAAN KUALITAS AIR DAN PENGENDALIAN
PENCEMARAN AIR

Empat Klasifikasi Mutu Air:

1. Kelas I, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum, dan atau peruntukan lain yang memper-syaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
2. Kelas II, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
3. Kelas III, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.
4. Kelas IV, air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanaman dan atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Kriteria Mutu Air Berdasarkan Kelas:

PARAMETER	SATUAN	KELAS				KETERANGAN
		I	II	III	IV	
Total Fosfat sebagai P	mg/L	0,2	0,2	1	5	-