

MODEL NUMERIK 2-D (LATERAL & LONGITUDINAL) SEBARAN POLUTAN CADMIUM(Cd) DI MUARA SUNGAI (STUDI KASUS: MUARA SUNGAI BABON, SEMARANG)

Badrus Zaman^{*)}, Syafrudin^{*)}

ABSTRACT

Estuary of River Babon very influenced by condition around its drainage basin. estuary of River Babon also have function as a channel of waste disposal from Terboyo Industrial Park, Semarang (KITS). Cadmium (Cd) as one of heavy metal pollutant and conservative element will certainly spread at estuarine. Based on research at the time of measurement, known that by the content of Cd at estuary of river Babon equal to (0,009 - 0,017) mg / l, where the concentration have exceeded the Quality of Water Go out to sea for the Biota of Go out to sea that is equal to 0.001 mg / l (Kep Men LH No. 51 tahun 2004). Study about disseminating polutan at estuarine can be conducted by using model because by using model can be knowable how disseminating polutan accurately, quickly and cheap so that picture from the model can be made basis for furthermore management. Model developed with numerical 2-D model (lateral & longitude). Model developed by using equation on the basis of hydrodynamics process and conservative transpor polutan. The equation finished by numerik by using differential method (finite difference). The result from developed model for the time of t = 1 hour obtained value with 3.028% mistake from field data.

Keywords: Cadmium, Pollutant spread, Estuarine, Numerical model, Finite difference

PENDAHULUAN

Sungai secara umum berhubungan langsung dengan laut melalui muara atau estuari. Aliran air yang berasal dari hulu sungai akan mengalir ke daerah ini, jadi berbagai polutan dan sedimen akan berkumpul di muara dan akan menyebar ke laut. Sebaran dari berbagai polutan tersebut dapat digambarkan dengan model.

Penelitian dilakukan dengan menitikberatkan model numerik 2-D sebaran polutan, dalam hal ini model diverifikasi dengan konsentrasi Cadmium (Cd) sebagai unsur konservatif di air permukaan pada muara sungai Babon yang menjadi tempat pembuangan limbah cair dari Kawasan Industri Terboyo dan sebagian industri di daerah Trimulyo serta buangan di daerah hulu sungai.

Muara Sungai

Muara sungai merupakan tempat air tawar dan air laut bertemu dan bercampur; daerah transisi antara ekosistem darat dan laut sehingga terjadi interaksi antara kedua ekosistem tersebut. (Nybakken, 1992; Odum, 1993). Sebagai tempat bertemunya aliran air, maka kondisi muara menjadi tempat berkumpulnya polutan. Polutan

adalah zat atau komponen lain yang secara langsung maupun tidak langsung masuk kedalam suatu sistem yang akan mengakibatkan sistem tersebut menjadi lebih buruk atau rusak. Pada daerah muara, polutan tersebut dapat tersebar akibat pengaruh gerak massa air dan transpor polutan.

Polutan Konservatif

Polutan dapat terbagi menjadi polutan konservatif dan polutan non konservatif. Polutan konservatif adalah polutan atau komponen yang tidak mengalami perubahan (tidak terdegradasi, tidak hilang karena pengendapan, tidak hilang karena penguapan, atau akibat aktivitas lainnya) dimana konsentrasinya tidak berubah terhadap waktu). (Chow et al, 2003; Doneker, 2003; KepMen LH 110/2003, 2003).

Salah satu polutan yang berbahaya bagi lingkungan adalah unsur logam berat (logam berat merupakan polutan konservatif). Dari berbagai macam logam berat Cd mempunyai penyebaran yang sangat luas di alam. Berdasarkan sifat-sifat fisiknya, Cd merupakan logam yang lunak, ductile, berwarna putih seperti putih perak (Palar, 1994).

^{*)} Program Studi Teknik Lingkungan FT Undip
Jl. Prof. H. Sudarto, SH Tembalang Semarang

Model

Model adalah suatu teori, bersama dengan penugasan dari nilai numerik untuk parameter model, yang berhubungan dengan beberapa pengamatan dari data lapangan dan laboratorium, dan berhubungan dengan masukan eksternal atau *forcing function* terhadap kondisi variabel suatu sistem. Model adalah suatu gambaran sederhana dari sistem sesungguhnya yang digunakan sebagai alat untuk membantu memecahkan suatu masalah (Thomann, 1987; Jorgensen, 1994).

Model Sebaran Polutan Konservatif

Model sebaran polutan konservatif diselesaikan dari persamaan dari model-model tersebut dilakukan dengan mencari solusi numerik dengan menggunakan metode diferensial hingga (*finite difference*) yang dijadikan dasar dalam penyusunan model sebaran polutan konservatif 2-dimensi (lateral dan longitudinal) berbasis bahasa pemrograman komputer (dalam hal ini digunakan program Delphi Borland 7) dengan persamaan-persamaan pengatur yang terdiri dari :

a. Persamaan Momentum

- arah sumbu x

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{rU}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} + A_x \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

- arah sumbu y

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{rV}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} + A_y \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

b. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

c. Model Transport

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (4)$$

keterangan:

A : luas penampang basah melintang (m²)

A_H : viskositas eddy horizontal = 8.0 m²/dtk (Yustiani, 2000)

C : konsentrasi polutan (mg/l)

D_x : koefisien dispersi x = 0.01 m²/s (Ambrose *et al*, 2002)

D_y : koefisien dispersi y = 0.1 m²/s (Ambrose *et al*, 2002)

g : percepatan gravitasi (9,81 m/dtk²)

H : kedalaman aktual (m)

n : variabel iterasi terhadap waktu

Q : debit (m³/dtk)

r : koefisien gesekan dasar = 0.035 (Yustiani, 2000)

t : variabel waktu (detik)

u : kecepatan arus arah sumbu x (m/detik)

v : kecepatan arus arah sumbu y (m/detik)

x : variabel ruang arah sumbu lateral (m)

y : variabel ruang arah sumbu longitudinal (m)

ζ : elevasi muka air laut terhadap garis rata-rata kedalaman (m)

Syarat Stabilitas Model

Syarat stabilitas untuk model hidrodinamika berdasar pada Courant-Fredrich-Lewy (CFL) sebagai berikut,

$$\sqrt{2gH_{\max}} \leq \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5)$$

Oleh karena itu, dilakukan penentuan Δx = Δy = 20 meter, H_{max} (kedalaman maksimum pada daerah studi) = 2,50 meter.

$$\Delta t = \frac{20}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 2.5}} = 2.85 \text{ det} \Rightarrow \text{untu}$$

k kestabilan numerik interval waktu (Δt) diambil 2 detik.

Sehingga nilai CFL yang diperoleh:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{20}{2} = 10 \text{ m / dtk} .$$

Sedangkan syarat stabilitas untuk model transpor adalah sebagai berikut (Setiadi, 1998 dalam Mardhani, 2002),

$$U_{i,j}^n \frac{\Delta t}{\Delta x} + V_{i,j}^n \frac{\Delta t}{\Delta y} + 2D_x \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} + 2D_y \frac{\Delta t}{(\Delta y)^2} \leq 1 \quad (6)$$

Nilai Awal dan Syarat Batas

Nilai awal untuk simulasi model hidrodinamika diperoleh dengan melakukan interpolasi nilai-nilai parameter terhadap ruang, yang dilakukan dengan program *Surfer 8.0* dengan menggunakan metode interpolasi *Kriging*. Kemudian untuk masing-masing titik pada sumbu x dan y, dicari persamaan polinomial yang memenuhi nilai berdasar interpolasi *Kriging*. Metode *Kriging* mempunyai rumus dasar sebagai berikut:

$$G_j = \sum_{i=1}^N w_{ij} Z_i \quad (7)$$

keterangan:

G_j = nilai hasil interpolasi pada titik j

N = jumlah titik yang digunakan untuk interpolasi pada masing-masing titik
 Z = nilai Z pada titik ke- i

w_{ij} = nilai pemberatan untuk nilai data ke- i ketika melakukan perhitungan nilai G_j

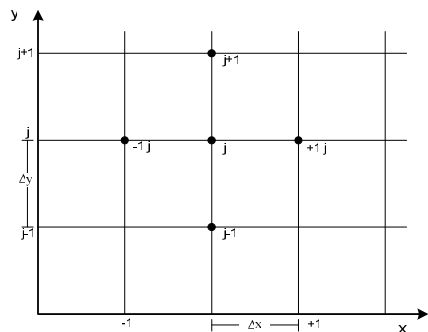
Pada kondisi awal simulasi dianggap perairan yang ditinjau berada dalam keadaan tenang. Sedangkan untuk dapat menyelesaikan persamaan transpor polutan diperlukan nilai awal atau inisialisasi pada saat nilai perhitungan. Sebagai nilai awal digunakan harga konsentrasi pada titik S1. Konsentrasi di titik S1 merupakan input polutan yang besarnya terhadap waktu adalah konstan.

Untuk syarat batas maka pada batas terbuka (batas kondisi daerah model yang berhubungan dengan laut) dianggap bahwa gradien konsentrasi polutan = 0, sehingga harga konsentrasi polutan di batas terluar = konsentrasi di sel sebelah dalamnya.

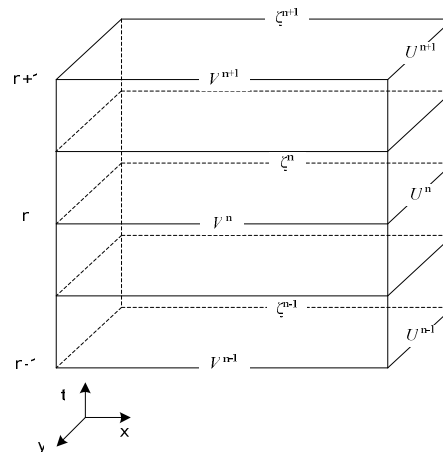
Sedangkan pada batas tertutup dianggap tidak ada masa air dan $\partial C/\partial n = 0$ polutan yang melaluinya, sehingga tidak ada konsentrasi polutan pada sel tersebut dan kecepatan ke arah normal = 0.

Solusi Numerik

Metode ini ditetapkan untuk menyelesaikan persamaan diferensial pembangun kemudian mengganti turunan-turunan dalam persamaan pembangun dengan pendekatan hingga. Untuk model 2-dimensi, daerah solusi didiskretisasi dalam *grid* empat persegi dengan ukuran konstan.



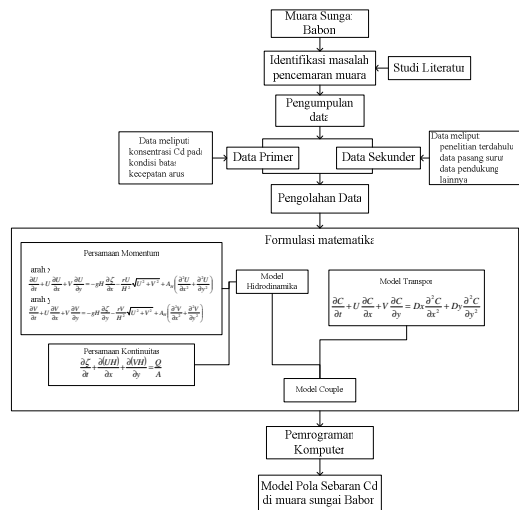
Gambar 1 Jaringan titik hitungan dalam bidang x – y (Sumber: Triatmodjo, 2002)



Gambar 2 Jaringan titik hitungan dalam dimensi bidang XY dan waktu U, V dan Z yang terletak pada tingkat waktu yang sama. (Sumber: Riyanto, 2004)

METODOLOGI

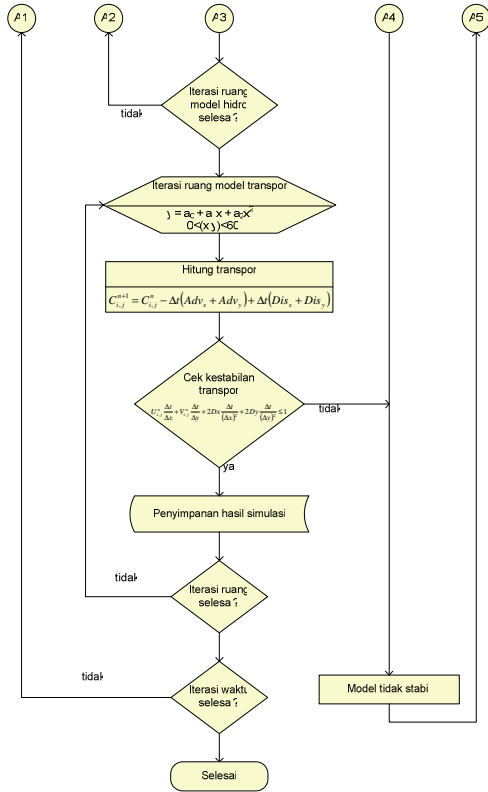
Setelah dilakukan pengumpulan data sekunder muara Sungai Babon, langkah selanjutnya adalah melakukan analisa terhadap kondisi awal tersebut. Kemudian dilakukan formulasi matematika untuk merepresentasikan keadaan sistem di muara tersebut dengan membangun suatu model dengan metodologi penelitian sebagai berikut :



Gambar 3 Diagram Alir Metodologi Penelitian dan Penyusunan Model

Dalam penyusunan model digunakan asumsi dan batasan bahwa:

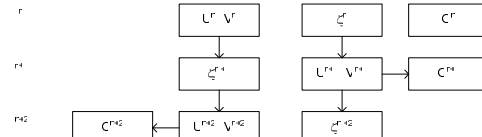
- muara adalah 2-dimensi secara lateral dan longitudinal.



Gambar 6 Diagram Alir Langkah Perhitungan Model (lanjutan)

Keluaran Hasil Simulasi Model

Keluaran dari solusi numerik persamaan momentum adalah kecepatan arah x (U) dan arah y (V). Sedangkan keluaran dari persamaan kontinuitas adalah elevasi air (ζ). Keluaran dari persamaan transpor adalah konsentrasi (C). Pada waktu $t = n$, dititik i, j terdapat nilai $U_{i,j}^n, V_{i,j}^n, \zeta_{i,j}^n$, dan $C_{i,j}^n$. Pada iterasi waktu $t = n + 1$, nilai $U_{i,j}^n$ dan $V_{i,j}^n$ dimasukkan pada persamaan kontinuitas dan transpor untuk menghitung harga $\zeta_{i,j}^{n+1}$ dan $C_{i,j}^{n+1}$ dan nilai $\zeta_{i,j}^n$ dimasukkan pada persamaan momentum untuk menghitung harga $U_{i,j}^{n+1}$ dan $V_{i,j}^{n+1}$. Demikian seterusnya sehingga untuk satu kali iterasi waktu akan diperoleh harga U, V, ζ , dan C disemua grid.



Gambar 7 Skema Keluaran Hasil Simulasi Model (Sumber: Mardhani, 2002)

Verifikasi Model

Dalam proses verifikasi ini, dilihat sejauh mana kemiripan hasil simulasi terhadap data lapangan. Metode statistik yang dapat digunakan pada proses verifikasi model adalah Rata-Rata Kesalahan Relatif (*Mean Relative Error/ MRE*).

$$RE = \frac{|X - C|}{X} \times 100\% \quad (8)$$

$$MRE = \sum_0^n \frac{RE}{n} \quad (9)$$

keterangan:

- RE = Relative Error (%)
- MRE = Mean Relative Error (%)
- C = data hasil simulasi
- X = data lapangan
- n = jumlah data

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengukuran yang dilakukan dilapangan maupun di laboratorium terhadap parameter fisik dan kimia perairan, maka didapatkan hasil sebagai berikut.

Tabel 1 Hasil Penelitian

Sta	Koordinat		Parameter								H (m)
			Konsentrasi Cd		Salinitas		Kec. arah x (u)		Kec. arah y (v)		
	(mg/l)		(‰)		(m/dk)		(m/dk)				
	t = 0	t = 1	t = 0	t = 1	t = 0	t = 1	t = 0	t = 1			
S1	110° 27' 40,9"	006° 56' 01,9"	0.016	0.017	28.2	28.7	-0.017	-0.02	0.139	0.145	0.8
S2	110° 27' 27,2"	006° 55' 56,8"	0.013	0.013	29.7	29.5	-0.078	0.08	-0.12	0.114	2
S3	110° 27' 40,3"	006° 55' 47,3"	0.012	0.012	29.9	30.3	-0.023	-0.031	0.094	0.108	2
S4	110° 27' 26,6"	006° 55' 42,2"	0.009	0.010	30.3	30.9	-0.107	-0.145	0.081	0.093	3
SB	110° 27' 17,8"	006° 55' 29,4"	0.009	0.010	31.4	31.4	-0.035	-0.021	0.05	0.041	3.5

(Sumber: Data Primer, 2005)

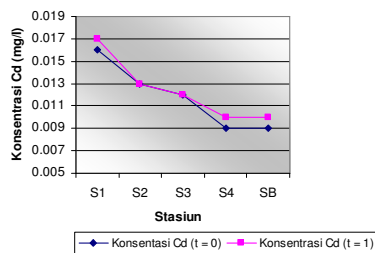
Pada S1 didapat konsentrasi Cd yang sedikit lebih besar, hal ini dikarenakan pengaruh dari masukan polutan yang berasal dari bagian hulu sungai Babon. Diperkirakan limbah tersebut berasal dari buangan industri dan rumah tangga yang berada di sekitar sungai tersebut.

Hal ini sesuai dengan pendapat Palar (1994), yang menyatakan bahwa beberapa kasus pencemaran menunjukkan pelepasan logam berat yang berasal dari

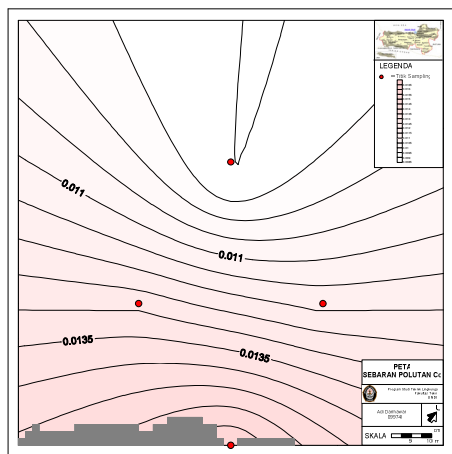
aktivitas manusia jauh lebih besar dari pada yang dihasilkan melalui proses alamiah. Dengan demikian dapat diketahui bahwa sumber logam berat yang berasal dari laut memiliki jumlah lebih sedikit dari pada yang berasal dari aktivitas industri maupun rumah tangga yang ada di sekitar Daerah Aliran Sungai.

Sedangkan pada stasiun lain, yang berada lebih menuju laut, mempunyai konsentrasi yang menurun. Hal tersebut disebabkan oleh pengenceran polutan oleh massa air laut dan adanya proses adveksi dan dispersi yang menyebabkan polutan tersebar dan konsentrasinya menurun (lihat Gambar 8 dan 9).

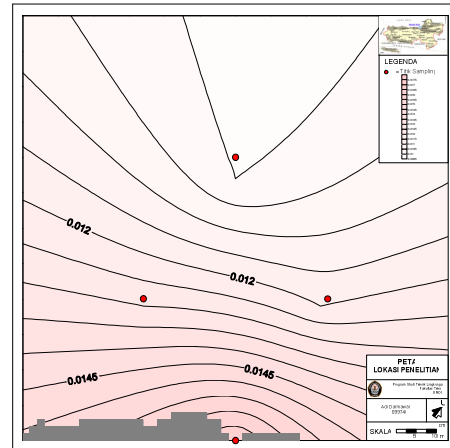
Kemudian pada saat $t = 1$ jam, konsentrasi Cd mengalami kenaikan. Kenaikan konsentrasi tersebut disebabkan adanya input dari muara sungai yang kemudian akan tersebar menuju laut (lihat Gambar 10).



Gambar 8 Grafik Variasi Konsentrasi Cd (Sumber : Data Primer, 2005)



Gambar 9 Pola Penyebaran Cd Daerah Studi pada saat $t = 0$ jam (Sumber: Data Primer, 2005)



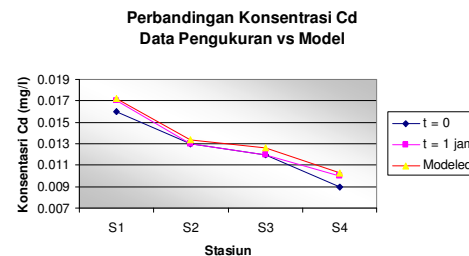
Gambar 10 Pola Penyebaran Cd Daerah Studi pada saat $t = 1$ jam (Sumber: Data Primer, 2005)

Berdasar hasil model yang dibangun diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 2 Perbandingan Konsentrasi Cd Data Pengukuran vs Hasil Model

Stasiun	Konsentrasi Cd (mg/l)		
	Data Pengukuran		Model (t=1 jam)
	t = 0	t = 1 jam	
S1	0.016	0.017	0.01720
S2	0.013	0.013	0.01333
S3	0.012	0.012	0.01266
S4	0.009	0.010	0.01029

(Sumber: Hasil Analisa, 2006)



Gambar 11 Grafik Perbandingan Konsentrasi Cd Data Pengukuran vs Hasil Model (Sumber: Hasil Analisa, 2006)

Data hasil model pada saat $t = 1$ jam diperoleh dari 1800 kali iterasi terhadap waktu, hal ini karena model menggunakan langkah waktu 2 detik. Berdasarkan analisa statistik yang dilakukan (dalam hal ini menggunakan metode Rata-Rata Kesalahan Relatif (Mean Relative Error / MRE)), hasil dari model mempunyai nilai

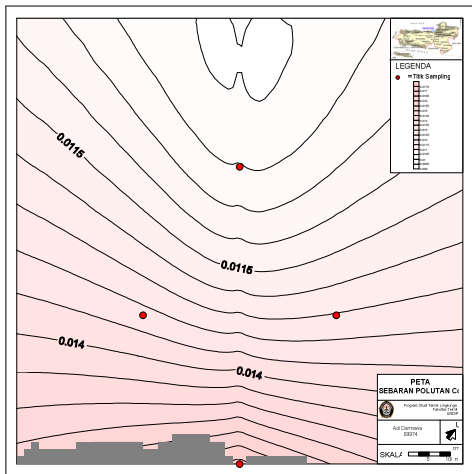
kesalahan terhadap data pengukuran sebesar 3.028 %.

Tabel 3 Analisa Statistik Hasil Model

Stasiun	Konsentrasi Cd (mg/l)		RE (%)
	Pengukuran	Model	
S1	0.017	0.01720	1.156
S2	0.013	0.01333	2.542
S3	0.012	0.01266	5.488
S4	0.010	0.01029	2.927
MRE (%)			3.028

(Sumber: Hasil Analisa, 2006)

Hasil dari keluaran model disusun menjadi data XYZ, kemudian disimpan dalam format Excell. Dengan menggunakan program *Surfer 8.0* dengan metode gridding program *Surfer 8.0* dengan metode gridding *Krigging*, file Excell tersebut akan dirubah menjadi file berekstensi .GRD, untuk kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta kontur. Berikut merupakan gambar sebaran polutan hasil model.



Gambar 12 Pola Penyebaran Cd Hasil Model pada saat t = 1 jam
 (Sumber: Hasil Analisa, 2006)

Dari hasil model pada saat t = 1 jam, dapat dilihat bahwa konsentrasi Cd pada tiap titik sampel semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan asumsi bahwa debit polutan yang berasal dari sungai adalah konstan, dengan demikian konsentrasi polutan akan terus bertambah. Arah sebaran dari konsentrasi polutan berubah karena pengaruh dari arah arus dan elevasi air.

KESIMPULAN

1. Dari hasil penelitian yang dilakukan pada saat pengukuran, diketahui konsentrasi Cd pada muara sungai Babon sebesar 0.009- 0.017 mg/l, yang jika dibandingkan dengan baku mutu, dalam hal ini adalah Kep Men LH No. 51 tahun 2004 tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut (Cd = 0.001 mg/l), maka dapat dilihat bahwa kandungan Cd pada air di muara sungai Babon telah melebihi baku mutu tersebut.
2. Model numerik 2-dimensi (lateral dan longitudinal sebaran polutan konservatif yang dibangun, diselesaikan dengan membuat persamaan diferensial parsial pada persamaan-persamaan pengatur menjadi bentuk diferensial hingga (*finite difference*) sehingga dapat dihitung secara numerik. Dari hasil keluaran model, untuk waktu t = 1 jam diperoleh konsentrasi Cd dengan kesalahan terhadap data pengukuran sebesar 3.028 %.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Adi Darmawan atas terselesaikannya penelitian ini dengan baik

DAFTAR PUSTAKA

- Ambrose, R.B., Wool, T.A., Martin, J.L. 1993. *The Water Quality Analysis Simulation Program, WASP5 Part A: Model Documentation*. Environmental Research Laboratory. Georgia.
- Chow, Miranda M., Cardoso, Silvana SS., Holford, Joanne M. 2003. *Dispersion of Pollutants Discharged Into The Ocean: The Interaction of Small And Large Scale Phenomena*. Department of Chemical Engineering & Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, UK.
- Doneker, Robert L., Ph.D., P.E. 2003. *Systems Development for Environmental Impact Assessment of Concentrate Disposal: CorVue and CorSpy Interactive Visualization Tools for CORMIX*. Denver, CO 80224.

- Jorgensen, S.E. 1994, *Fundamentals of Ecological modeling (2nd Edition)*. Elsevier. Amsterdam-London-New York-Tokyo.
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 110 tahun 2003 tentang *Pedoman Penetapan Daya Tampung Beban Pencemaran Air Pada Sumber Air*.
- Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 51 tahun 2004 tentang *Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut*.
- Mardhani, Amy Pringgo. 2002. *Simulasi Model Numerik Penyebaran Amonium, Nitrit dan Nitrat; Studi Kasus Muara Sungai Cisadane di Teluk Jakarta*. Departemen Teknik Lingkungan Program Magister Teknik Sipil dan Perencanaan, ITB. Bandung.
- Nybaken, J. W. 1992. *Biologi Laut suatu pendekatan ekologis*. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- Odum EP. 1993. *Dasar-Dasar Ekologi. Edisi ketiga*. Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Palar, H. 1994. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. PT. Rineka Cipta. Jakarta.
- Riyanto, Hendro. 2004. *Model Numerik Dispersi Sedimen akibat Pasang Surut di Pantai*. Program Magister Teknik Sipil. Universitas Diponegoro. Semarang
- Thomann, Robert V. 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper & Row Publisher, New York.
- Yustiani, Yonik Meilawati. 2000. *Model Dua Dimensi Penyebaran Ammonium, Nitrat di Perairan Pantai Semarang dengan Persamaan Kinetik Orde Satu Thomman*. Departemen Teknik Lingkungan Program Magister Teknik Sipil dan Perencanaan, ITB. Bandung.