

Model Numerik Dua Dimensi Transpor Logam Berat di Perairan Pantai Tanjung Gerem Cilegon

Dlan Noor Handlani ^{1*}, Nining Sari Ningsih ², dan Harun Sukarmadljaya ³

¹ Staf pengajar Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Jl. Penghulu K.H. Mustapa No. 23, Telp. (022). 772215, Bandung 40124, HP: 0818 613 548, E-mail: d_handlani@yahoo.com

² Staf pengajar Program Studi Oseanografi, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

³ Staf pengajar Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10, Bandung 40132

Abstrak

Pemodelan matematik transpor 2 dimensi (2D) telah digunakan untuk mempelajari penyebaran logam berat Cobalt (Co) di perairan Pantai Tanjung Gerem, Cilegon. Hasil model transpor menunjukkan arah penyebaran cobalt dipengaruhi oleh pola sirkulasi arus dan besarnya debit konsentrasi cobalt yang masuk ke perairan. Hasil model menunjukkan, penyebaran cobalt pada kondisi pasut purnama dan perbani saat air pasang menuju surut cenderung menyebar ke arah utara dan saat air surut menuju pasang cenderung menyebar ke arah selatan dari sumber. Kisaran konsentrasi cobalt pada kondisi pasut purnama 0,072 – 0,074 mg/l dan pasut perbani sekitar 0,127 – 0,129 mg/l. Berdasarkan hasil pengukuran lapangan dan simulasi model, diketahui konsentrasi cobalt di perairan Tanjung Gerem sudah memiliki nilai diatas kondisi perairan alami.

Kata kunci : Cobalt, Model Transpor

Abstract

Two dimensional transport models have been used to studies heavy metal Cobalt transport at Tanjung Gerem Waters, Cilegon. The result of transport model shows that direction of cobalt distributions is influenced by current circulation pattern and cobalt concentration discharge from the source. In every season, during neap and spring tide condition, cobalt concentrations move northward through spring ebb condition and move southward through spring flood condition. Range values of cobalt concentrations at spring tide are 0.072–0.074 mg/l and 0.127–0.129 mg/L at neap tide. The field measurement and model result shows that cobalt concentration has higher value than usual concentrations in sea waters.

Key words: Cobalt, Transport Model

Pendahuluan

Perkembangan industri memberikan dua keadaan yang saling bertolak belakang, di satu sisi memberikan keuntungan secara ekonomi dan di sisi lain meningkatkan konsentrasi pencemaran yang berasal dari buangan hasil kegiatan industri tersebut. Bila peningkatan industri tidak diikuti dengan pengelolaan lingkungan yang baik maka peningkatan konsentrasi buangan limbah industri akan menimbulkan pengaruh yang buruk terhadap kualitas lingkungan (Djajadiningrat, 2001). Salah satu buangan limbah industri yang berbahaya adalah logam berat.

Lokasi industri umumnya terdapat di sekitar pesisir pantai, dimana akses transportasi melalui laut lebih mudah dijangkau untuk mendapatkan bahan baku maupun dalam mengirimkan hasil industrinya. Kondisi ini memungkinkan industri untuk membuang limbahnya ke dalam laut (Suprijo, dkk, 200). Perairan

pantai Cilegon, tepatnya sekitar pelabuhan Tanjung Gerem merupakan lokasi industri yang padat. Sehingga industri-industri tersebut sangat berpotensi mencemari pantai sekitarnya. Berdasarkan hasil pemantauan Dinas Pengelolaan Lingkungan Hidup (DPLHD) – Cilegon, beberapa data kualitas air di perairan pantai tersebut telah melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah daerah (Keputusan Walikota Cilegon No. 4, 2002), salah satunya adalah konsentrasi logam berat cobalt.

Kondisi tersebut menyebabkan perlu dibuat solusi yang berimbang (*win-win solution*) dimana tercapai keseimbangan antara eksploitasi dan konservasi. Salah satu usaha yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan monitoring atau pengawasan terhadap lingkungan yang menerima dampak dari perkembangan industri tersebut.

Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk

memonitor pencemaran lingkungan tersebut adalah dengan melakukan studi penyebaran (transpor) dari polutan berdasarkan kondisi fisik lingkungannya (perairan pantai). Sehingga dapat diketahui seberapa jauh penyebaran polutan tersebut dari sumbernya dan seberapa besar pengaruhnya terhadap lingkungan sekitarnya. Melalui informasi ini, diharapkan dapat memberikan rekomendasi atau solusi dalam monitoring buangan limbah cair industri ke sekitar wilayah pesisir pantai secara umum dan khususnya perairan Pantai Tanjung Gerem, Cilegon.

Materi dan Metode

Metode penelitian yang digunakan dalam monitoring terhadap sebaran logam berat di perairan Pantai Tanjung Gerem, Cilegon adalah pemodelan numerik dua dimensi (2D) transpor polutan logam berat. Hasil pemodelan tersebut kemudian diverifikasi dengan data hasil pengukuran lapangan.

Langkah awal dalam pemodelan numerik dua dimensi (2D) transpor polutan logam berat adalah mengetahui pola sirkulasi arus yang disimulasikan dengan menggunakan model hidrodinamika. Selanjutnya, pola sirkulasi arus digunakan sebagai input pada model transpor untuk menggambarkan pola penyebaran polutan yang mungkin terjadi di lokasi tersebut. Hasil simulasi model tersebut kemudian diverifikasi dengan pengukuran lapangan untuk mengetahui keakuratan dari hasil simulasi model.

Persamaan matematik yang digunakan dalam model adalah persamaan hidrodinamika dan transpor polutan dua dimensi horizontal (X,Y). Kedua persamaan kemudian diselesaikan secara numerik (*finite different*), untuk persamaan hidrodinamika digunakan metode eksplisit 2D horizontal yang dirata-ratakan terhadap kedalaman (*depth averaged*), sedangkan untuk persamaan transpor digunakan metode eksplisit upstream.

Model Transpor Polutan Dua Dimensi Horizontal

Persamaan pengatur sebaran polutan logam berat

Persamaan pengatur adveksi-difusi yang digunakan dalam model transpor polutan ini adalah bentuk umum dari persamaan adveksi-difusi dua dimensi horizontal (Rivera, 1997),

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + S + R \dots (1)$$

C = konsentrasi polutan (mg/l)

K_{x,y} = koefisien dispersi dalam arah x dan y (m²/detik)

u,v = kecepatan yang dirata-ratakan terhadap kedalaman, masing-masing dalam arah x dan y (m/detik)

S = suku sumber

R = proses kinetik (suku reaksi)

Polutan logam berat yang akan dimodelkan dalam penelitian ini adalah Cobalt (Co). Logam berat termasuk dalam konsentrasi yang bersifat konservatif, dalam proses penyebarannya dianggap tidak mengalami proses secara kimiawi dan biologi, sehingga suku reaksinya adalah nol (R=0). Suku sumber (S) adalah suku yang menunjukkan pertambahan nilai logam berat yang masuk ke dalam badan air atau perairan yang dimodelkan. Suku sumber dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$S = Q_s C_{in} \dots \dots \dots (2)$$

C_{in} = konsentrasi polutan yang masuk dari sumber (mg/l)

Q_s = debit polutan yang masuk dari sumber (m³/detik)

Diasumsikan tidak ada polutan logam berat cobalt yang mengendap dan tidak ada penambahan konsentrasi dari udara.

Nilai awal dan syarat batas

Nilai awal dan syarat batas diperlukan dalam menyelesaikan persamaan transpor diatas. Konsentrasi cobalt yang digunakan sebagai nilai awal adalah hasil data sekunder Dinas Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah (DPLHD)-Cilegon (Tim DPLHD-Cilegon, 2004) dan data primer hasil pengukuran lapangan (Handlani, 2004).

Pada model transpor polutan logam berat, syarat batas terbuka (batas yang berhubungan dengan laut) dianggap bahwa gradien konsentrasi polutan sama dengan nol, sehingga konsentrasi polutan dibatas terluar sama dengan konsentrasi polutan di sel sebelah dalamnya. Secara matematik kondisi ini dirumuskan sebagai $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$. Sedangkan, untuk batas tertutup dianggap tidak ada massa air dan polutan yang melaluinya, sehingga tidak ada konsentrasi polutan pada sel tersebut. Pada daerah sumber buangan industri diberikan nilai konsentrasi cobalt serta nilai debit buangan dari masing-masing industri (secara kontinu) sebagai input polutan yang masuk ke dalam lingkungan perairan tersebut.

Verifikasi model

Metode statistik yang digunakan dalam proses kalibrasi dan verifikasi adalah metode uji statistik *Mean*

Relative Error, (Chaundhury, dkk, 1998), sebagai berikut:

$$RE = \frac{|X - C|}{X} \times 100\% \quad MRE = \sum_0^n \frac{RE}{n} \dots\dots\dots(3)$$

- RE = Relative error
- X = data lapangan
- MRE= Mean relative error
- C = data hasil simulasi
- n = jumlah data

Data dan desain model

Pengumpulan Data

Lokasi studi yang dikaji berada di Desa Gerem, Kecamatan Pulo Merak, Kotamadya Cilegon dengan batas area 5°58' 33" - 5°57' 20" LS dan 105°58' 33" - 106°00' 00" BT, dengan luas sekitar 2 x 2,5 km² (Gambar 1). Berdasarkan, hasil kajian data sekunder yang didapatkan dari DPLHD - kota Cilegon diketahui terdapat enam industri yang berada dalam lokasi kajian, yaitu Industri A – F, tanda ⊗ pada Gambar 1. Keenam industri tersebut umumnya bergerak dalam bidang produksi bahan kimia, penyediaan fasilitas penyimpanan serta pengirimannya. Sumber yang dianggap potensial menyebarkan pencemaran adalah Industri A, C, dan F. Ketiga industri tersebut memproduksi bahan kimia dan diperkirakan dalam buangan limbahnya memiliki nilai cobalt yang cukup potensial. Sedangkan industri B, D, dan E merupakan industri jasa penyimpanan dan pengiriman bahan kimia sehingga dalam proses operasionalnya hanya memberikan limbah domestik perkantoran dan sisa bekas pencucian sebagai sumber pencemar.

Lokasi sumber buangan polutan ditunjukkan tanda pada Gambar 1. Data konsentrasi sumber polutan dan debit buangan yang digunakan dalam model terdapat pada Tabel 1. Nilai ini berdasarkan data sekunder yang tersedia pada DPLHD – kota Cilegon.

Hasil pengukuran lapangan dilakukan di tujuh lokasi (ditunjukkan dengan tanda ⊗ pada Gambar 1). Pengukuran lapangan dilakukan selama 24 jam (tanggal 24–25 April 2004). Waktu pengambilan sampel dipilih berdasarkan kondisi pasang surutnya, yaitu pada pukul 04.00, 08.00, 12.00, 16.00, 20.00, dan 00.00 WIB.

Desain model



Model hidrodinamika dan transpor

Gaya pembangkit pola sirkulasi arus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasang surut. Data pasang surut yang digunakan untuk syarat batas

Tabel 1. Konsentrasi dan debit polutan di titik sumber

Nama Industri	Konsentrasi	Cobalt (mg/l)	Debit (m ³ /det)
Industri A	0,02		38
Industri C	0,02		0,06
Industri F	1,52		18

Tabel 2. Perbandingan pola arus hasil pengukuran lapangan dengan simulasi

Kondisi Pasut	Pengukuran Lapangan		Hasil Simulasi	
	Arah	Magnitude (m/det)	Arah	Magnitude (m/det)
	Selatan	0,07 – 0,32	Selatan	Maks. 0,62
	Utara	0,19 – 0,46	Utara	

dan verifikasi diperoleh dari model pasang surut global (ORI.96) yang dibangun di Ocean Research Institute, University of Tokyo.

Luas daerah model sekitar 2 km (dalam arah-x) dan 2,25 km (dalam arah-y) ditunjukkan pada Gambar 1 dan dibagi menjadi 82 x 90 grid dengan ukuran grid masing-masing Dx = Dy = 25m. Sedangkan, nilai Dt = 1 detik dan harga koefisien difusi A_n = 5.

Sumber polutan terdapat di tiga industri yang dianggap berpotensi (industri A, C, dan F) diasumsikan limbahnya dibuang secara kontinu sesuai dengan konsentrasi dan debit konstan pada Tabel 1. Model hidrodinamika dan transpor disimulasikan selama 30 hari (1 – 30 April 2004), kemudian pola arus pada kondisi waktu pasang purnama dan perbani yang masing-masing mewakili kondisi saat air menuju pasang dan saat air menuju surut.

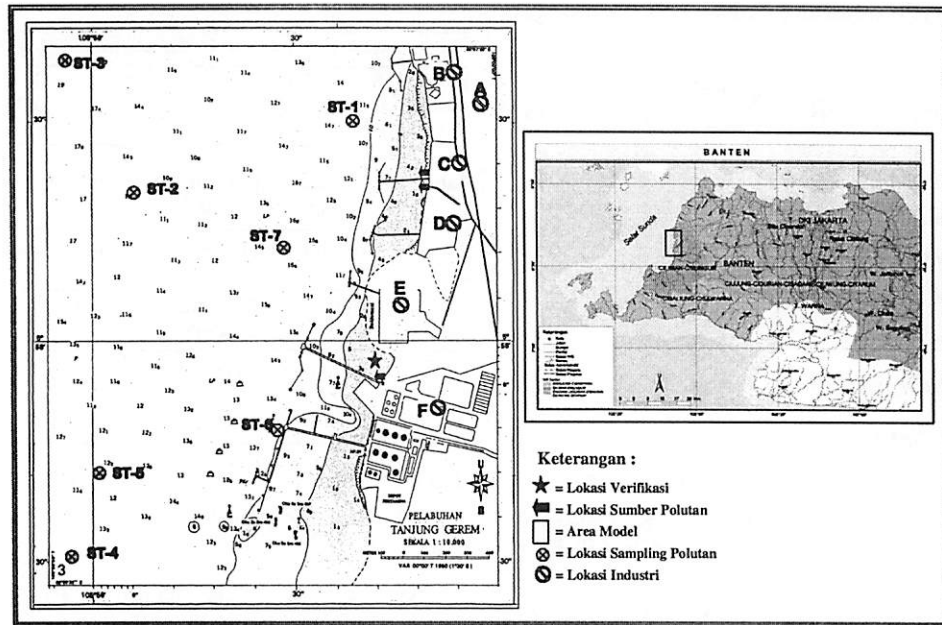
Selanjutnya, nilai elevasi dicuplik pada stasiun verifikasi Industri F (ditandai ★, Gambar 1). Sedangkan, lokasi verifikasi disesuaikan dengan stasiun-stasiun pengambilan sampel saat survey lapangan (ditandai ⊗ Gambar 1).

Hasil dan Pembahasan

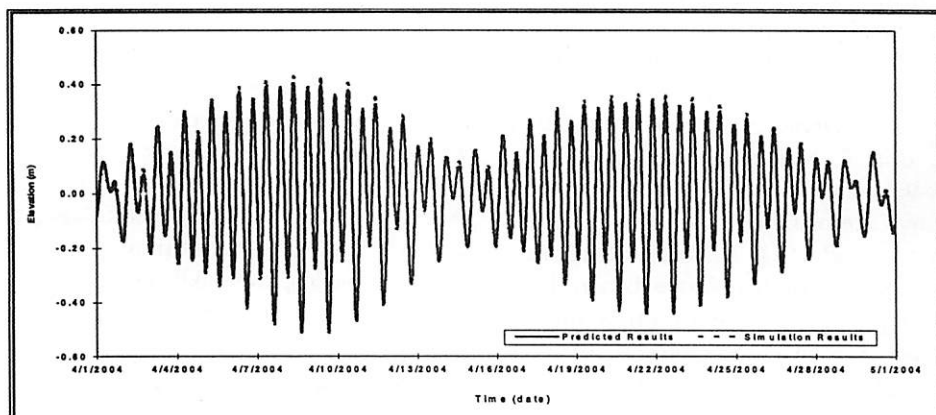
Verifikasi hasil model

Model hidrodinamika

Verifikasi elevasi di Industri F ditunjukkan pada Gambar 2, dan hasilnya memperlihatkan kesesuaian dengan hasil ramalan pasang surut. Hasil simulasi model hidrodinamika memperlihatkan kesesuaian pula dengan hasil penelitian Hadi dkk, (1996) yang mensimulasikan model hidrodinamika untuk pembangunan PLTU Cilegon. Simulasi model oleh Hadi dkk, (1996) memiliki skala lebih luas, yaitu sekitar Selat Sunda – Laut Jawa dengan batasan Pantai Carita (Cilegon). Pada saat air menuju pasang (pasut



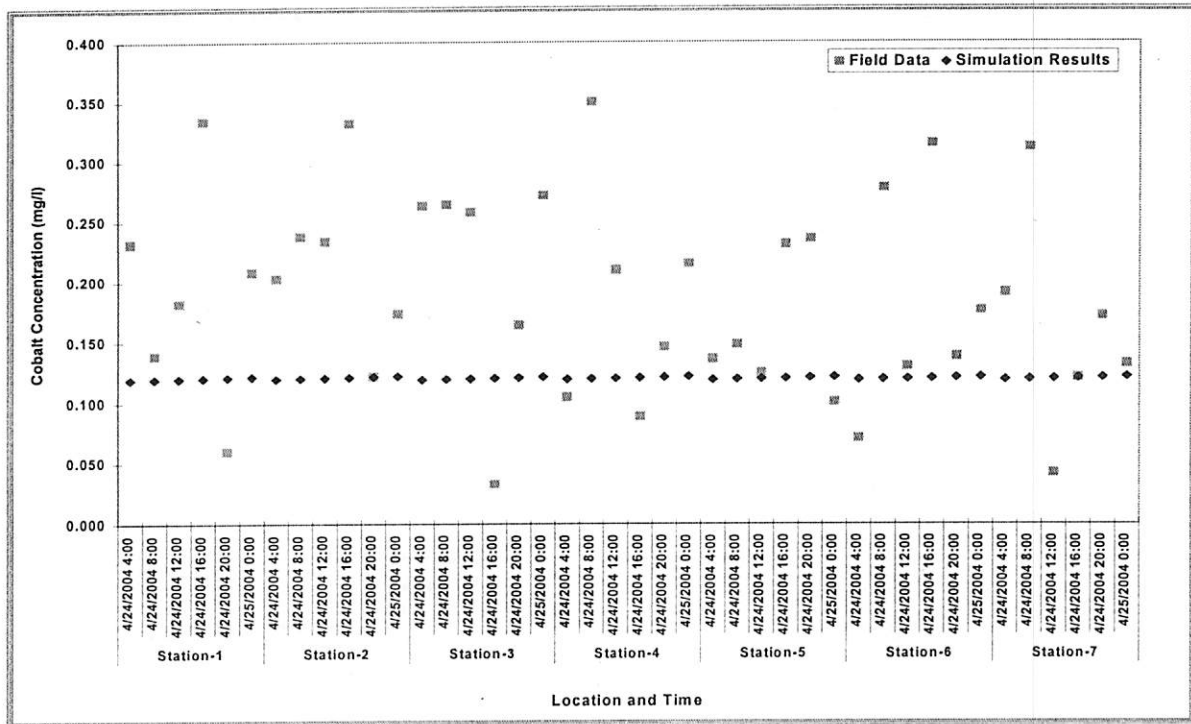
Gambar 1. Area penelitian, lokasi verifikasi, sumber polutan, dan pengambilan sampel di lapangan (sumber: Handlani, 2004)



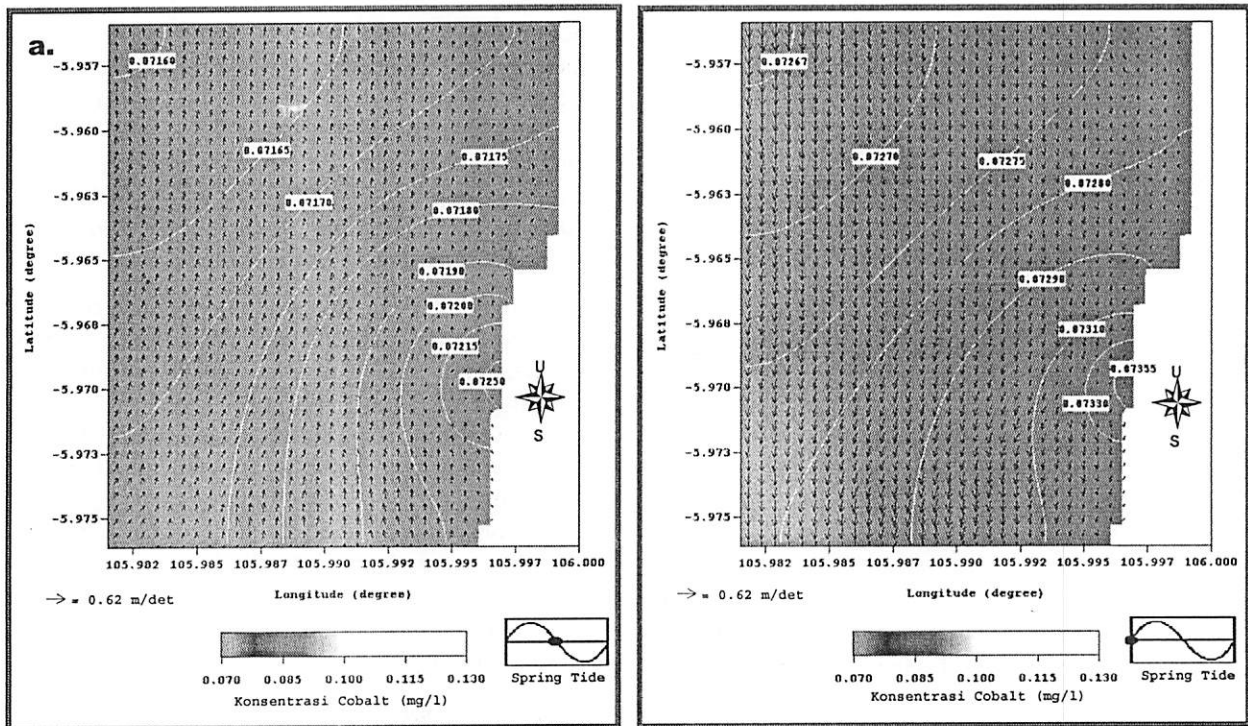
Gambar 2. Grafik verifikasi elevasi di pantai PT. F (Tanggal 1 – 30 April 2004)

Tabel 3. Data lapangan dan hasil simulasi transpor cobalt pada tanggal 24 April 2004

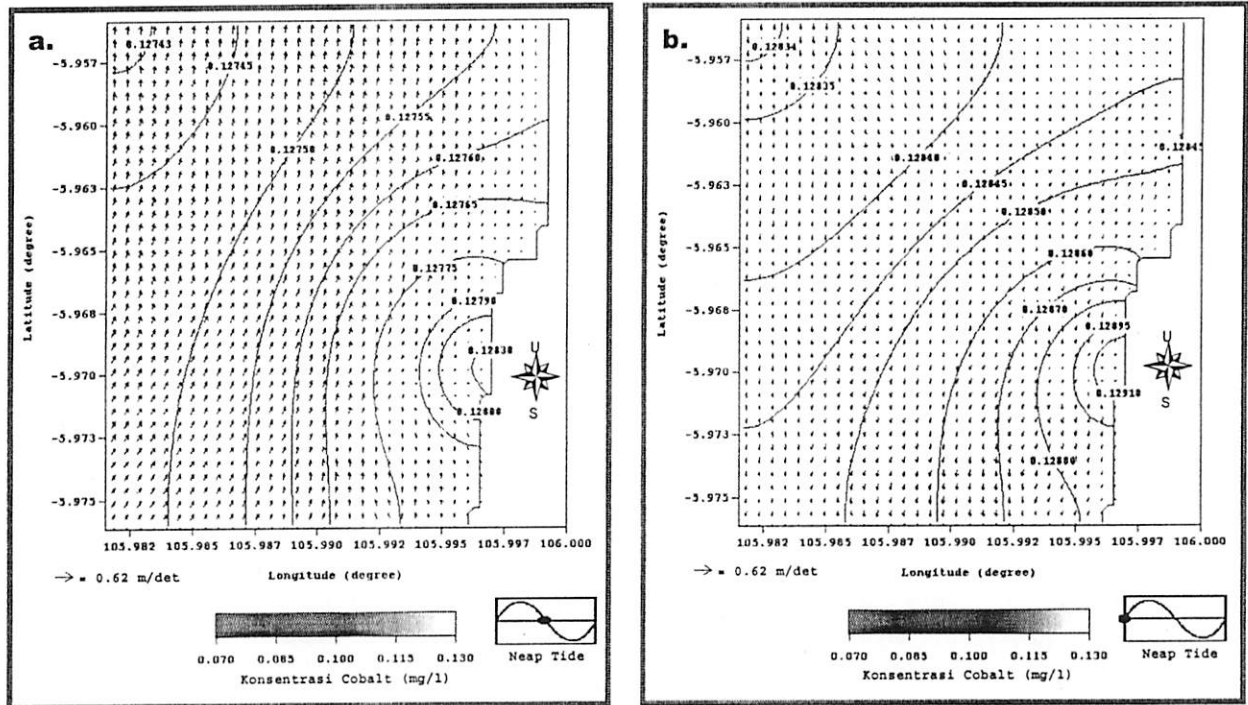
Waktu	Cobalt data lapangan (mg/l)						
	ST 1	ST 2	ST 3	ST 4	ST 5	ST 6	ST 7
04:00	0.232	0.203	0.263	0.105	0.136	0.071	0.191
08:00	0.139	0.238	0.264	0.350	0.148	0.278	0.312
12:00	0.182	0.234	0.258	0.210	0.125	0.130	0.042
16:00	0.334	0.332	0.033	0.089	0.231	0.315	0.121
20:00	0.060	0.122	0.164	0.146	0.236	0.138	0.171
00:00	0.208	0.173	0.272	0.215	0.101	0.176	0.132
Waktu	Cobalt hasil simulasi (mg/l)						
	ST 1	ST 2	ST 3	ST 4	ST 5	ST 6	ST 7
04:00	0.1192	0.1198	0.1192	0.1195	0.1191	0.1190	0.1191
08:00	0.1196	0.1203	0.1197	0.1199	0.1195	0.1195	0.1195
12:00	0.1199	0.1206	0.1200	0.1203	0.1198	0.1198	0.1199
16:00	0.1204	0.1210	0.1204	0.1207	0.1203	0.1202	0.1203
20:00	0.1210	0.1216	0.1209	0.1212	0.1209	0.1208	0.1209
00:00	0.1216	0.1221	0.1215	0.1218	0.1214	0.1214	0.1215



Gambar 3. Grafik verifikasi konsentrasi cobalt hasil pengamatan lapangan dengan hasil model



Gambar 4a dan b. Sebaran konsentrasi cobalt, saat air menuju surut dan saat air menuju pasang kondisi pasut pumama



Gambar 5a dan b. Sebaran konsentrasi cobalt, saat air menuju surut dan saat air menuju pasang kondisi pasut perbani

Tabel 4. Perhitungan rata-rata perhitungan kesalahan (MRE) transpor cobalt pada tiap stasiun

Pengambilan	Sampel	Perhitungan Error
	MRE (%)	MRE Rata-rata (%)
Stasiun-1	50,63	47,06
Stasiun-2	38,70	
Stasiun-3	84,88	
Stasiun-4	36,36	
Stasiun-5	25,46	
Stasiun-6	39,65	
Stasiun-7	53,76	

purnama), hasil simulasi oleh Hadi *dkk* (1996) memperlihatkan arus bergerak dari Laut Jawa menuju Samudera Hindia melewati Selat Sunda dengan kecepatan maksimum 0,6 m/det. Sedangkan hasil simulasi pada perairan Pantai Tanjung Geram, menunjukkan kesesuaian dimana arus bergerak dari arah utara ke selatan dengan kecepatan maksimum 0,62 m/det. Selain waktu tersebut, saat air menuju surut (pasut perbani) hasil simulasi Hadi *dkk* (1996) memperlihatkan pola arus yang berkebalikan dengan saat air menuju pasang, yaitu bergerak dari Samudera Hindia melewati Selat Sunda menuju Laut Jawa. Hal ini berkesesuaian dengan hasil model Perairan Pantai Tanjung Geram dimana arus bergerak dari arah selatan ke utara (dari Samudera Hindia menuju Selat Sunda).

Pola arus pasut hasil simulasi model perairan Pantai Tanjung Geram juga berkesesuaian dengan hasil

pengukuran lapangan yang dilakukan oleh Tim Amdal Industri C (Tim Amdal Industri C, 2000) yang memperlihatkan pola arus sebagai berikut: saat air menuju pasang arus bergerak ke selatan dengan kecepatan 0,07 – 0,32 m/det, sedangkan saat air menuju surut arus bergerak sebaliknya (ke arah utara) dengan kecepatan 0,19 – 0,46 m/det. Meskipun nilai magnitudenya berbeda akan tetapi pergerakan pola arusnya bolak balik (arah utara – selatan) telah menunjukkan kesesuaian (Tabel 2).

Pengaruh angin terhadap pola arus di lokasi penelitian tidak terlalu besar ditunjukkan dengan dominasi arus pasang surut untuk setiap musimnya. Kondisi ini didukung oleh hasil penelitian Wyrcki (1961) dalam Ningsih (2004), secara global di lokasi Selat Sunda, pergerakan arus di Selat Sunda dipengaruhi oleh perbedaan tinggi muka air (gradient permukaan air laut) antara Laut Jawa dengan Samudera Hindia. Menurut Nontji (1993) dalam Ningsih (2004), arus di Selat Sunda mencapai aliran maksimum pada bulan Agustus (musim timur) dan bulan Desember-Februari (musim barat).

Model transpor

Verifikasi hasil simulasi konsentrasi cobalt dengan data lapangan ditunjukkan Gambar 3, dari grafik tersebut memperlihatkan hasil simulasi tranpor cobalt pada setiap stasiun memiliki nilai perubahan yang kecil (range 0,1190 – 0,1221 mg/l) jika dibandingkan

dengan hasil pengukuran lapangan yang nilainya lebih fluktuatif, rangenya 0,033 – 0,350 mg/l (Tabel 3). Kondisi ini dapat terjadi karena beberapa kemungkinan, diantaranya belum sesuainya nilai awal dan data fluktuasi input polutan di sumber. Fluktuasi konsentrasi pada sumber (output industri) sangat berpengaruh pada kondisi perairan laut karena jika konsentrasi masukan dari industri tinggi maka efek pemekatan akan terjadi dan kontur konsentrasi akan terbentuk gradasi makin ke lepas pantai. Sebaliknya, apabila konsentrasi dari industri mengecil maka akan terjadi pengenceran dimana konsentrasi polutan di pantai dan sekitar sumber akan terencerkan terlebih dahulu sedangkan di beberapa bagian di lepas pantai terdapat kadar polutan yang lebih tinggi, yang belum terencerkan (Suprijo, *dkk*, 2000).

Namun, di beberapa stasiun pada waktu pengamatan tertentu hasil pengukuran dan simulasi memiliki kesesuaian yang cukup baik diantaranya stasiun 2, 3, 4 pada pukul 12.00 (Gambar 3).

Hasil verifikasi transport cobalt yang diujikan secara statistik (*Mean Relative Error, MRE*) diperoleh nilai MRE rata-rata sebesar 47,06 % (Tabel 4).

Hasil simulasi transpor polutan

Pola sebaran konsentrasi cobalt hasil simulasi menunjukkan bahwa sumber polutan yang terlihat dominan adalah sumber dari industri F yang berada di tenggara lokasi model (Gambar 1). Konsentrasi limbah cobalt di industri F memiliki konsentrasi yang melebihi baku mutu pemerintah daerah setempat (Keputusan Walikota Cilegon No. 4, 2002a) yaitu 1,52 mg/l, standar baku mutunya kurang dari 0,6 mg/l. Adapun dua sumber di sebelah timur laut lokasi model (industri A dan C, Gambar 1) tidak begitu dominan. Kondisi ini disebabkan oleh kecilnya nilai konsentrasi cobalt dan debit di sumber tersebut yang mengakibatkan pengaruh dari keduanya tidak dominan.

Konsentrasi pada sumber diberikan secara kontinu dengan debit konstan sesuai dengan masing-masing industri (Tabel 1) sehingga konsentrasi di sekitar sumber akan mengalami perubahan setiap waktunya, bergantung dari jumlah konsentrasi dan debit yang masuk ke perairan. Selain itu akan dipengaruhi pula oleh kuat-lemahnya arus di lokasi tersebut juga berpengaruh. Arus yang lemah akan mengakibatkan konsentrasi tersebar lebih lambat, sedangkan sebaliknya saat arus kuat konsentrasi akan menyebar lebih luas.

Hasil simulasi model transpor memperlihatkan, saat kondisi pasut pumama konsentrasi cobalt terendah yang masih nampak di area model adalah 0,0716 mg/l

berada $\pm 2,1$ km dari lokasi sumber dominan di tenggara (Gambar 4a dan 4b). Nilai ini terlihat pada saat air menuju surut (Gambar 4a) dimana konsentrasinya cenderung menyebar ke arah utara dari sumber. Sedangkan saat air menuju pasang konsentrasi terendah 0,0727 (Gambar 4b) dengan konsentrasi cenderung menyebar sebaliknya ke arah selatan dari sumber. Konsentrasi cobalt di sekitar sumber pada saat air menuju surut sebesar 0,0725 mg/l dan saat air menuju pasang sebesar 0,0735 mg/l. Rentang sebaran konsentrasi cobalt saat pumama adalah 0,072–0,074 mg/l.

Nilai terendah konsentrasi cobalt saat pasut perbani pada saat air menuju surut mencapai 0,1274 mg/l dengan sebaran sejauh $\pm 2,2$ km dari sumber dominan di tenggara (Gambar 5a) dengan arah sebaran cenderung ke utara. Saat air menuju pasang konsentrasi terendah mencapai 0,1283 mg/l dengan arah sebaran cenderung menyebar ke selatan. Konsentrasi cobalt di sekitar sumber (jarak ± 300 m di sekitar lokasi sumber dominan di tenggara) saat air menuju surut maupun pasang berada pada kisaran nilai 0,128–0,129 mg/l. Kisaran sebaran konsentrasi pada kondisi pasut perbani antara 0,127 – 0,129 mg/l (Gambar 5a dan 5b).

Pola konsentrasi yang terjadi di lokasi model tersebut diduga berkaitan dengan pola arus di lokasi model. Saat air menuju pasang konsentrasi cobalt yang berasal dari lokasi sumber di sebelah tenggara (industri F, Gambar 1) dan timur laut (industri A dan C, Gambar 1) bergerak menyebar ke arah selatan, ditunjukkan oleh garis kontur yang cenderung ke barat daya berkesesuaian dengan arah panah dari arus (Gambar 4b dan 5b). Sedangkan saat air menuju surut konsentrasi cobalt bergerak dominan ke arah utara, terlihat dari garis kontur yang arahnya cenderung ke barat laut (Gambar 4a dan 5b), tampak jelas pada kontur di sekitar sumber industri F (sebelah tenggara).

Faktor besarnya kecepatan arus juga mempengaruhi sebaran konsentrasi cobalt. Pada kondisi pasut pumama (Gambar 4), arus saat air menuju pasang maupun saat air menuju surut memiliki kecepatan yang lebih besar dibandingkan saat air menuju pasang dan air menuju surut pada kondisi pasut perbani (Gambar 5), mengakibatkan sebaran cobalt cenderung menyebar lebih luas pada pasut pumama dibandingkan dengan saat pasut perbani.

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan konsentrasi cobalt di Pantai Tanjung Gerem, Cilegon berada pada kisaran 0,060–0,334 mg/l. Konsentrasi cobalt di perairan pantai tersebut sudah cukup besar dari kadar perairan laut pada umumnya yaitu 0,0005 mg/l (McNeely *et al.*, 1979 dalam Effendi, 2000) dan

0,00003 mg/l untuk kondisi alami pada air permukaan di Laut Atlantik dan Pasifik (www.theccdi.com). Aturan baku mutu untuk konsentrasi cobalt di perairan laut di Indonesia belum ditentukan, sedangkan standar baku mutu untuk limbah cair di kawasan industri (Keputusan Walikota Cilegon, 2002b) adalah 0,6 mg/l.

Hasil simulasi dan pengukuran lapangan dari konsentrasi cobalt dalam penelitian ini dapat memberikan gambaran mengenai proses dispersi dari cobalt di perairan pantai baik saat air menuju pasang maupun saat air menuju surut untuk kondisi pasang purnama dan perbani. Informasi sebaran ini akan bermanfaat dalam melakukan prediksi sebaran dampak logam cobalt yang berasal dari buangan industri di sekitar pantai sehingga dapat dilakukan tindakan preventif dalam pengelolaan dampak lingkungan yang nantinya akan ditimbulkan.

Hasil penelitian ini masih perlu disempurnakan, diantaranya perlu melengkapi data-data terkait kondisi perairan dan konsentrasi polutan seperti: pasang surut, musim, fluktuasi konsentrasi polutan, dan debit sumber, serta konsentrasi logam cobalt yang tidak terlarut sehingga model yang dibangun akan lebih representatif. Selain itu perlu dilakukan pengukuran data arus di lapangan untuk mendapatkan validasi model hidrodinamika yang lebih akurat.

Kesimpulan

Dominasi pola arus pasang surut di lokasi model sangat mempengaruhi pola penyebaran konsentrasi cobalt, saat air menuju surut cobalt cenderung menyebar ke utara sedangkan saat air menuju pasang cobalt cenderung menyebar ke selatan dari lokasi sumber. Kisaran konsentrasi cobalt pada kondisi pasang purnama adalah 0,072–0,074 mg/l dan pasang perbani 0,127–0,129 mg/l.

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Dinas Pengelolaan Lingkungan Hidup (DPLHD)-Cilegon yang telah memberikan data-data terkait penelitian ini dan Tim reviewer di Jurnal Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro atas saran dan perbaikan pada tulisan ini.

Daftar Pustaka

- Djajadiningrat, Suma Tjahja. 2001. Untuk Generasi Muda Depan Pemikiran, Tantangan dan Permasalahan Lingkungan. Program Studi Tekno Ekonomi. Departemen Teknik Industri. Fakultas Teknologi Industri. ITB, Bandung.
- Effendi, H. 2003. Telaahan Kualitas Air. Buku Bagi Pengelolaan Sumberdaya dan Lingkungan Perairan. Penerbit Kanisius. Jakarta.
- Hadi, S., Mihardja, D.K., Ali, M., M.S. Fitriyanto, Permono, S., Suprijo, T., Setiawan, & A., Indriyetty. 1996. Studi Hidro-Oseanografi dalam Rangka Analisis Dampak Lingkungan, PLTU Serang, Cilegon. PT. Wiratman & Acociates, Jakarta.
- Handiani, D.N. 2004. Studi Sirkulasi Arus dan Transpor Polutan Cobalt dan COD (Chemical Oxygen Demand) di Perairan Pantai Cilegon untuk Memonitor Buangan Limbah Industri.. Tesis Magister, Program Studi Teknologi Pengelolaan Lingkungan. Program Magister Teknik Lingkungan, ITB, Bandung
- [Http://www.theccdi.com/cdi/images/documents/facts/Cobalt_Facts-HS&E.pdf](http://www.theccdi.com/cdi/images/documents/facts/Cobalt_Facts-HS&E.pdf)
- Ningsih, N.S. 2004. Fishing Ground Prediction in Indonesia Waters Based on Upwelling Regions and Its Relation to Seasonal Circulation. Final Report of The Assahi Glass Foundation Overseas Research Grant 2002. LPPM, ITB, Bandung.
- Rivera, P.C. 1997. Hydrodynamics, Sediment Transport and Light Extinction Off Cape Bolinao, Philippines. Dissertation. A.A.Balkema. Rotterdam. Netherlands.
- Suprijo, T., Yustiani, Y.M., & Supangat, A. 1999/2000. Studi Penyebaran Ammonium, Nitrat, dan Nitrat di Perairan Pantai Melalui Pengembangan Model Numerik. Laporan Penelitian Dasar Keilmuan. Program Studi Oseanografi, ITB, Bandung.
- Tim Amdal Industri B. 2000. Laporan Akhir Amdal dan RKL-RPL dalam Pengembangan dan Pengelolaan Dermaga untuk Kepentingan Sendiri (DUKS) dan Terminal Bahan Kimia Cair (TBKC) Industri B. 1999/2000. Cilegon, Propinsi Banten.
- Tim Dinas Pengelolaan Lingkungan Hidup (DPLHD)-Cilegon. 2004. Data Hasil Pemantauan Kualitas Air untuk Sampel Air Limbah dan Air Laut. 2002 – 2003. Cilegon, Propinsi Banten.
- Walikota Cilegon. 2002a. Baku Mutu Air Laut bagi Kegiatan Pertambangan dan Industri. Keputusan Walikota Cilegon No. 3 Tahun 2002. Cilegon, Propinsi Banten.
- Walikota Cilegon. 2002b. Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri. Keputusan Walikota Cilegon No. 4 Tahun 2002. Cilegon, Propinsi Banten.