

ANALISIS MODEL SEBARAN BAHAN PENCEMAR DI PERAIRAN SELAT NGUAN, BATAM

Suhendar I Sachoemar dan Andri Purwandani

Peneliti di Bidang Teknologi Agroindustri dan Bioteknologi
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

Abstract

Analysis of the pollutant transport model was conducted to understand the magnitude, their pattern and spreading speed of the pollutant at Nguan narrow channel of Batam. The RMA2 (Resource Management Associates) analysis was employed to solve those phenomena. The target analysis of the pollutant is suspended particulate matter (sediment), a most dominant pollutant matter within this area. The result shows that the spreading pollutant was strongly associated with the monsoonal system, current speed, tidal system and the pollutant source. The southward direction of sediment transport was influenced by the northwest monsoon and the tidal flood. While the northward direction was affected by the the southeast monsoon and the ebb tide. The current speed was identified as main factor causing the flushing out magnitude of the water mass at the channel, in which the flushing out in the northwest monsoon was faster than that in the southeast monsoon. As consequence, the water resident time was to be short, the pollutant was easily to be cleaned out and as the result, the water quality within the channel was to be excellent.

Key words: Spreading pollution model, Nguan Batam

1. Pendahuluan

Analisis sebaran bahan pencemar dalam suatu perairan diperlukan untuk memprediksi pola sebaran, sumber dan besaran konsentrasi bahan pencemar. Hasil analisis ini sangat bermanfaat untuk mengetahui jangkauan sebaran bahan pencemar dari sumbernya, luas areal yang dipengaruhi dan jangka waktu bahan pencemar berada dalam perairan. Pengetahuan ini sangat bermanfaat untuk melindungi kawasan budidaya perikanan dari pencemaran.

Secara sederhana bahan pencemar yang masuk kedalam perairan dibedakan berdasarkan sumber dan jenis bahan pencemarnya. Berdasarkan sumbernya, bahan pencemar dapat berasal dari kegiatan manusia di daratan seperti industri, pabrik, hotel dan perumahan atau

dari kegiatan di dalam perairan itu sendiri seperti dari kegiatan budidaya perikanan, buangan limbah kapal dan kegiatan pelabuhan. Sedangkan berdasarkan jenisnya, bahan pencemar dapat berupa limbah organik, limbah yang bersifat kimiawi seperti minyak dan logam berat atau limbah fisik berupa sampah dan partikel baik yang tersuspensi maupun yang tidak tersuspensi. Salah satu bahan pencemar yang sering ditemukan dalam suatu perairan adalah partikel tersuspensi atau lebih sering dikenal dengan nama sedimen^{1, 2, 3, 4, 5}.

Keberadaan sedimen dalam suatu perairan dapat mempengaruhi tingkat kecerahan perairan. Dalam jumlah banyak, sedimen akan menyebabkan terjadinya penurunan kemampuan penetrasi cahaya

kedalam perairan yang akan mengganggu proses fotosintesis dalam perairan. Akibatnya kadar oksigen terlarut dalam perairan menjadi menurun dan kehidupan biota perairan menjadi terganggu. Apabila kadar oksigen terlarut dalam perairan lebih kecil dari 4 mg/l (batas ambang bawah untuk kehidupan biota perairan), maka dikhawatirkan akan menyebabkan kematian masal pada ikan-ikan yang dibudidayakan^{6, 7, 8, 9}.

Secara umum sedimen dapat dibagi kedalam dua komponen, yaitu sedimen dasar (*bed sedimen*) dan sedimen tersuspensi (*suspended sedimen*). Pembagian ini berdasarkan besar atau kecilnya ukuran partikel dimana sedimen dasar memiliki ukuran partikel lebih besar dari 150 mm (*sand*), sedangkan sedimen tersuspensi lebih kecil dari 63 mm (*silt*)¹⁰. Secara teoritis, kemampuan untuk memprediksi kondisi sedimen tersuspensi dapat didekati dengan menggunakan model numerik dinamis (Model RMA2). Sedangkan model numerik yang mampu menghitung transportasi sedimen dasar dan mampu memprediksi erosi serta pengendapan sedimen adalah model SED2D yang dikembangkan oleh *Waterway Experiment Station (WES)*. Untuk mengkaji pola transportasi sedimen di suatu wilayah perairan, terlebih dahulu dilakukan pemodelan arus di perairan tersebut. Pemodelan ini diperlukan untuk menggambarkan keadaan arus di wilayah studi. Oleh karena program SED2D tidak melakukan perhitungan kecepatan arus dan elevasi permukaan air, maka diperlukan model hidrolis yang tepat untuk dapat memecahkan permasalahan tersebut. Untuk memenuhi kemampuan tersebut maka digunakanlah program RMA2. Program ini juga dikembangkan oleh *WES US Army Corp of Engineer*^{11,12}. Hasil dari kajian model arus adalah berupa gambaran kuantitatif sirkulasi arus musiman selama satu siklus pasang surut dari purnama hingga purnama berikutnya serta keadaan arus residu. Gambaran keadaan arus dominan normal bulanan ini

akan menjadi dasar untuk kajian transportasi sedimen di perairan yang akan dikaji.

Pendekatan yang dilakukan untuk menghitung arus dominan normal bulanan tidak hanya menggunakan komponen pembangkit arus berupa pasang surut saja, tapi juga dengan menghitung debit (*flow rate*) dikedua mulut selat di lokasi yang bersangkutan. Hal ini sangat diperlukan untuk melihat pembangkit arus yang disebabkan oleh faktor regional. Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk mendapatkan gambaran sirkulasi arus normal bulanan (*Steady State Solution*) dan pola transportasi sedimen tersuspensi pada setiap bulannya. Dengan mengetahui sedimen transport diharapkan pencemaran yang diakibatkannya dapat dikendalikan.

2. Metoda Penelitian

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

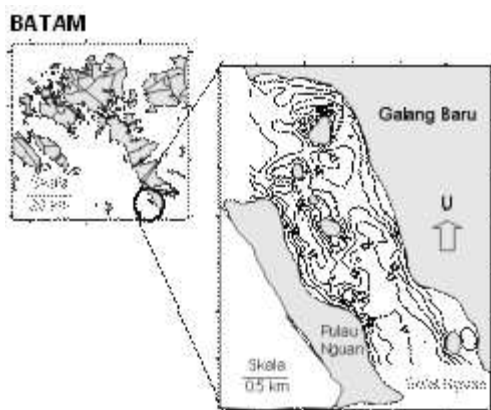
Kajian analisis model sebaran bahan pencemar ini dilakukan di lokasi budidaya perikanan perairan Nguan, Galang Baru Batam (Gambar 1).

2.2. Model Simulasi

Model simulasi material (sedimen) transport di suatu perairan sangat berkaitan erat dengan pola arus atau pasang surut yang berfungsi sebagai media pembawanya. Untuk mengetahui pola sebaran dari sedimen ini maka digunakan model simulasi RMA2 (*Resotirce Management Associates*) dengan penjabaran sebagai berikut:

- 1). RMA2
- 2). Model Matematik Dua Dimensi
- 3). Diskritisasi Dan Solusi Persamaan
- 4). SMS
- 5). Struktur Perangkat Lunak
- 6). Bed Friction Dan Resistansi Aliran
- 7). Turbulence Exchange

- 8). Tahapan Penggunaan RMS2 Dan Sed2d
- 9). Data-Data Yang Diperlukan
- 10). Kalibrasi Model
- 11). Verifikasi Model
- 12). Simulasi Model
- 13). Luaran Model



Gambar 1. Lokasi Kegiatan di Perairan Nguan, Galang Baru, Batam

1). RMA2

RMA2 merupakan program simulasi model numerik dua dimensi (2-D). Program ini menghitung *depth average velocity component* dan *free surface flow*. RMA2 menghitung solusi elemen hingga dari bentuk persamaan *Reynold Navier-Stokes* untuk aliran turbulen. Gesekan (*friction*) dihitung dengan persamaan *Manning* atau *Chezy* dan koefisien viskositas eddy digunakan untuk menentukan karakteristik turbulen. Program ini sangat sesuai digunakan untuk kondisi arus yang *steady state*, simulasi arus *transient* dan *water level* disekitar pulau, selat dan muara sungai. Keunggulan RMA2 adalah :

- (1). Dapat mengidentifikasi *error* dalam pembuatan *mesh*.
- (2). Dapat menggunakan sistim unit

Inggris maupun Standar International (SI).

- (3). Simulasi kejadian *wetting* dan *drying*.
 - a. Perhitungan *off-chanel storage* lebih akurat.
 - b. Penyesuaian *wetting* dan *drying* melalui element.
 - c. Perhitungan *Marsh Porosity wetting* dan *drying*.
- (4). Efek rotasi bumi (*coriolis*) di perhitungkan
- (5). Dapat menerapkan *Wind Stress* :
 - a. *Uniform, Constan* atau *time varying*
 - b. *Storm, front* atau *tropical cyclonic*
- (6). Dapat melakukan simulasi kejadian *wetting* dan *drying*
- (7). Dapat menentukan pengenalan langsung koefisien Manning's dari kedalaman.
- (8). User dapat menentukan perubahan koefisien turbulen secara manual maupun otomatis. (*Direct assignment methods, Peclet method* dan *Smagorinski method*).
- (9). Kontrol struktur aliran 1D dapat memiliki 5 tipe model.
- (10). Menghitung aliran melalui *continuity check lines*.
- (12). User dapat menentukan kontrol komputasi seperti : *wet & dry* parameter, kontrol literasi dan revisi *time step* (koefisien dan syarat batas (*Boundary Condition*)).
- (12). Mampu menerima secara luas *boundary condition* (sudut, komponen kecepatan, *water tidal radiation boundary condition, discharge* sebagai fungsi elevasi, kecepatan dan arah angin.

Selain memiliki kelebihan, RMA2 juga memiliki keterbatasan. RMA2 dijalankan dibawah asumsi hidrostatis dimana kecepatan dalam arah vertical tidak

diperhitungkan, yang diperhitungkan hanya arah dua dimensional dalam sebuah bidang horizontal. Program ini tidak ditujukan untuk digunakan dalam masalah vortisitas, vibrasi dan percepatan vertical. Arus/aliran yang terstratifikasi secara vertical diluar kemampuan dari RMA2.

2). Model Matematik Dua Dimensi

Persamaan dasar model RMA2 dibangun dari persamaan-persamaan hidrodinamika, meliputi persamaan kontinuitas untuk aliran dua dimensi rata-rata kedalaman. Persamaan tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Persamaan momentum dalam arah sumbu x dan y untuk aliran dua dimensi rata-rata kedalaman dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \\ + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g u n^2}{\left(1.486 h^{1/6} \right)^2} (u^2 + v^2)^{3/2} \\ - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2 h v \omega \sin \Phi = 0 \end{aligned}$$

untuk aliran arah sumbu x, dan untuk aliran sumbu y adalah persamaan:

$$\begin{aligned} h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \\ + gh \left[\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{\left(1.486 h^{1/6} \right)^2} (u^2 + v^2)^{3/2} \\ - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2 h u \omega \sin \Phi = 0 \end{aligned}$$

dimana :

x, y : arah kartesian

u, v : kecepatan dalam arah x dan y

h : kedalaman perairan

a : elevasi dasar perairan

E : koefisien viskositas eddy

n : koefisien kekasaran Manning's

V_a : kecepatan angin

y_a : arah angin

w : rotasi bumi

z : Koefisien gesekan angin

F : lintang

3). Diskritisasi Dan Solusi Persamaan

Diskritisasi menggunakan pendekatan variasi kontinyu aliran kecepatan dan *water level* yang merupakan gambaran dari model matematik hidrodinamik. Dua Dimensional (2D) element digunakan dalam model ini yaitu triangular dan quadrilateral element yang didefinisikan secara berturut-turut oleh tiga atau empat *corner node*. *Corner node* ini merupakan *midside node* yang meningkatkan kemampuan kurva model *boundary*. Dengan adanya *midside node*, dimungkinkan kuadratik interpolasi terhadap element.

Persamaan model matematik hidrodinamik dapat dicari solusinya dengan metode element hingga menggunakan *Galerkin – Weighted Residual Methode*. Fungsi yang digunakan dalam interpolasi *flow velocity* dan *water depth* yaitu fungsi kuadratik untuk velocity dan fungsi linear untuk kedalaman. Integrasi yang digunakan menggunakan *Gaussian Integration*. Kemudian Derivatif terhadap waktu didekati dengan *non-linear finite difference*. *Flow* dan *water level* diasumsikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut.

$$f(t) = f(t_0) + at + bt^c \quad t_0 \leq t < t_0 + \Delta t$$

dimana : A, B dan C merupakan konstanta

4). SMS

Surface-Water Modeling System (SMS) merupakan program *pre dan post processing* untuk menentukan *surface-water model* dalam hal ini RMA2. SMS memiliki tiga modul utama untuk membangun model hidrodinamik yang digunakan dalam

simulasi dengan RMA2. Modul-modul tersebut yaitu : *Map Modul, Mesh Modul dan Scatter Point Modul*. Modul tersebut digunakan untuk membangun geometri dimana *node* pada geometri mendefinisikan ukuran dan bentuk dari elemen hingga (*finite elemen*) atau elemen jenis lain dan juga karakteristik hidrolik yang dibutuhkan untuk perhitungan komputasi.

5). Struktur Perangkat Lunak

Gambar 2 berikut ini adalah proses pemodelan dengan menggunakan RMA2. Dimana garis tebal menunjukkan proses yang harus dikerjakan, sedangkan yang lainnya opsional.

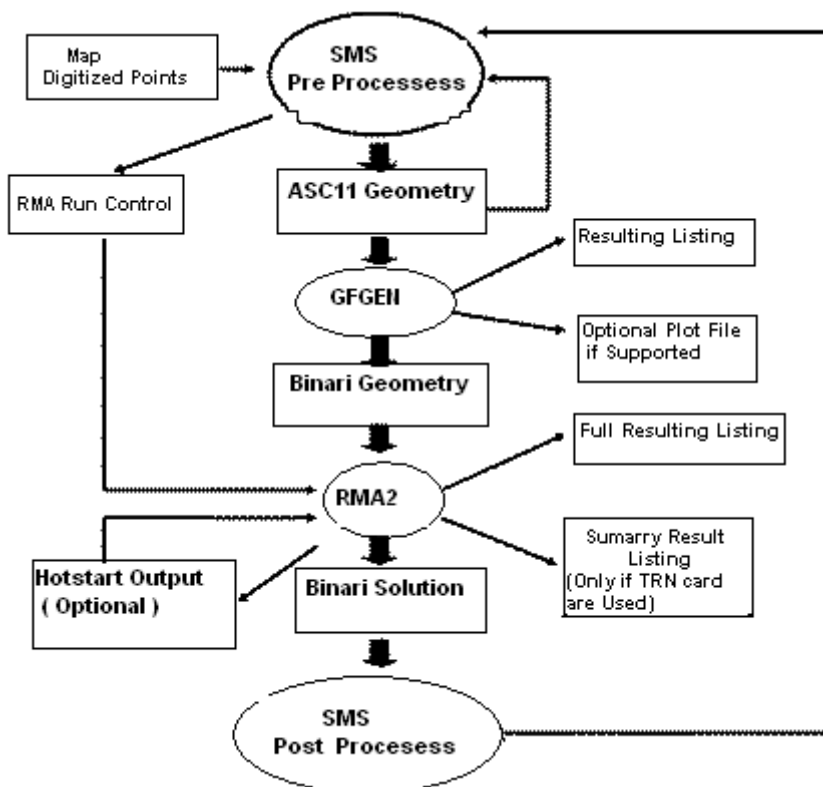
6). Bed Friction Dan Resistansi Aliran

Komputasi *Bed friction energy transfer* atau *bottom rougness* merupakan salah satu factor utama dalam verifikasi dalam RMA2. Perubahan *bed friction* akan mengakibatkan perubahan kontrol terhadap arah dan *magnitude fluid velocity*. *Bottom Shear stress* ?di definisikan sebagai berikut:

$$\tau = \rho gRS$$

dimana τ merupakan densitas air, g percepatan gravitasi, R rata – rata radius hidrolik dan S bed slope.

Bed friction dihitung menggunakan persamaan Manning jika nilai input *rougness* < 3.0, selain nilai tersebut maka *bed friction* dihitung menggunakan persamaan Chezy.



Gambar 2. Proses Pemodelan RMA2 Dalam Simulasi Model Sediment Transport

Persamaan *Manning* untuk uniform flow sebagai berikut :

$$V = 1.49 * \frac{R^{2/3} * S^{1/2}}{n}$$

dimana **V** kecepatan dan **n** merupakan n – value

Dengan mensubstitusikan persamaan manning ke dalam persamaan bottom stress, maka diperoleh persamaan :

$$\tau = \rho g \left(\frac{n}{1.49} \right)^2 \frac{V^2}{R^{1/3}}$$

Jika R merupakan *cross section area* dibagi dengan *wetted perimeter* dari *cross section* untuk pendekatan *wide chanell*, maka diperoleh komponen *shear stress* sebagai berikut :

$$\tau_x = \rho g \left(\frac{n}{1.49} \right)^2 \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

$$\tau_y = \rho g \left(\frac{n}{1.49} \right)^2 \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}$$

7). Turbulence Exchange

Turbulen secara umum dapat didefinisikan sebagai efek variasi temporal dari kecepatan dan pertukaran momentum dimana ada spatial gradien. Secara khusus turbulen dapat digambarkan sebagai efek temporal yang terjadi dalam scale time yang lebih kecil dari model *time step*.

Persamaan turbulen dapat di formulasikan sebagai berikut :

$$E_{xx} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \mu \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \overline{\partial u' v'}$$

dimana :

- “ : Molekular viskositas
- u', v'** : Kecepatan turbulent dari temporally average velocity **u**
- E_{xx}** : Eddy viskositas / Turbulence Exchange Coefficient
- U'V'** : Suku turbulen

Suku Reynold's stress lebih besar dari efek molecular viskositas. Selanjutnya turbulence exchange merupakan pertukaran transfer momentum dari massa fluida yang berbeda kecepatannya. Selanjutnya untuk menentukan *Turbulence Exchange Coefficient* secara otomatis digunakan *Peclet Number* dan *Smagorinski Coefficient*. Persamaannya dapat di tuliskan berturut-turut sebagai berikut :

$$P = \frac{\rho u dx}{E}$$

dimana :

- δ** : fluid density
- u** : average elemental velocity
- dx** : elemental length
- E** : eddy viskositas dan **P** Peclet number.

$$E = TBFAC * A \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]$$

dimana :

- A** : area elemen
- “u”x dan “v”x** : perubahan rata-rata element dari komponen kecepatan
- E** : eddy viskositas
- TBFAC** : *Smagorinski* koefisien yang memiliki nilai diantara 0.094 dan 0.2

8). Tahapan Penggunaan RMA2

Langkah-langkah yang diperlukan dalam simulasi menggunakan RMA2 adalah sebagai berikut:

- (1). Diskretisasi daerah model ke dalam jaring elemen hingga (*mesh of finite elemen*);
- (2). Penetapan *boundary condition* yang mencakup elevasi dasar, koefisien kekasaran dan viskositas eddy;
- (3). Pengecekan model RMA2;
- (4). Konversi file geometri ASCII menjadi format binary dengan menggunakan program GFGEN;
- (5). Running model RMA2

Setelah diperoleh solusi model RMA2 untuk model aliran pada kondisi *steady state*, selanjutnya dilakukan persiapan untuk simulasi RMA2 dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- (1). Penentuan kondisi awal konsentrasi sedimen tersuspensi pada setiap *mesh*;
- (2). Penentuan parameter global RMA2 seperti ukuran *grain size*, *specific gravity*.
- (3). *Set-up* persamaan dan kontrol waktu.

Setelah diperoleh solusi dari model RMA2, maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis hidrografi RMA2 untuk memperoleh solusi pola aliran dan pola transportasi sedimen tersuspensi yang dinamis. Tahapan yang diperlukan adalah:

- (1). Up-date model RMA2
- (2). Running RMA2

9). Data-Data Yang Diperlukan

Data yang diperlukan dalam kajian model arus dengan RMA2 antara lain:

- (1). Data batimetri

- (2). Data angin
- (3). Data pasang surut
- (4). Data arus, untuk kalibrasi dan verifikasi model

10). Simulasi Model

Untuk mengkaji pola pergerakan sedimen bulanan di perairan P. Nguan – Galang Baru maka dilakukan beberapa simulasi dengan perlakuan sebagai berikut:

- (1). Simulasi sumber sedimen di wilayah studi
- (2). Simulasi konsentrasi sedimen di wilayah studi

11). Luaran Model

- (1). Luaran yang dihasilkan dari pemodelan ini yaitu sebagai berikut:
- (2). Pola material transport di perairan P. Nguan Galang Baru.
- (3). Periode waktu simulasi adalah normal bulanan dari bulan Januari sampai dengan bulan desember.
- (4). Komponen waktu simulasi menggunakan variabel dari angin
- (5). Simulasi menggunakan t (jam) tertentu sampai dengan t+n.

Kompilasi luaran tersebut dikemas dalam 12 gambar hasil pemodelan sedimen tersuspensi.

12). Kalibrasi Model

Kalibrasi merupakan tahapan yang sangat penting dalam proses pemodelan. Kalibrasi dimaksudkan untuk mengatur model sedemikian rupa sehingga model dapat mendekati keadaan sesungguhnya di lapangan ini. Proses ini dilakukan dengan mengatur beberapa parameter model. Parameter yang perlu dikalibrasi pada pemodelan dengan menggunakan RMA2 antara lain : kekasaran dasar, koefisien

difusi, koefisien drag dan koefisien transfer panas.

12). Verifikasi Model

Pada prinsipnya, verifikasi model ditujukan untuk membandingkan hasil model dengan suatu data lapangan. Verifikasi model lebih ditujukan pada pemeriksaan kehandalan dari suatu model setelah model tersebut dikalibrasi. Verifikasi model dengan data lapangan dilakukan seperti pada kalibrasi model, hanya saja tidak lagi dilakukan perubahan apapun pada parameter model. Tujuannya untuk memberi komentar kualitatif atau kuantitatif kemampuan model.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

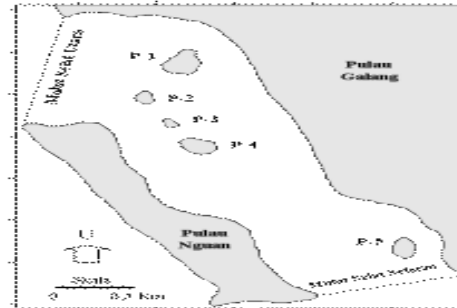
3.1. Morfologi dan Topografi Perairan Nguan, Galang Baru, Batam.

Perairan Nguan yang diapit Pulau Nguan sebelah Barat dan Pulau Galang sebelah Timur merupakan selat yang memiliki panjang pantai 10.829,45 m (10,8 km) termasuk 5 pulau didalamnya (Tabel 1 dan Gambar 3). Luas perairannya 434,5 ha dengan volume air 3,5 juta m³. Lebar selat sebelah utara 1.437,71 m (1,4 km) dan sebelah selatan 1.258,03 m (1,26 km). Topografi pantai Pulau Nguan dan Galang Baru lurus dan sedikit berkelok, landai dengan sedikit berbukit. Hutan mangrovenya masih baik, kecuali di beberapa tempat yang sudah ada aktivitasnya seperti pabrik es, jetty, restoran dan kegiatan reklamasi yang perlu diwaspadai pengaruhnya terhadap kondisi kualitas perairan di Nguan (Gambar 4).

3.2. Transport Sedimen dan Sebaran Bahan Pencemar

Sedimen merupakan salah faktor yang berpengaruh pada kelangsungan hidup organisma akuatik di suatu perairan. Sedimen dapat dibagi kedalam dua komponen sebagai berikut : sedimen dasar (*bed sedimen*) dan sedimen tersuspensi (*suspended sedimen*). Pembagian ini berdasarkan besar atau kecilnya ukuran partikel dimana sedimen

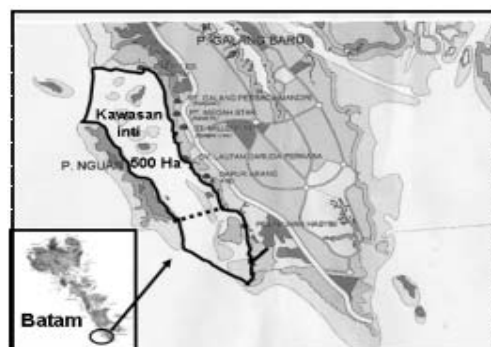
dasar memiliki ukuran partikel lebih besar dari 150 mm (*sand*), sedangkan sedimen tersuspensi lebih kecil dari 63 mm (*silt*). Keberadaan sedimen pada kolom air, dalam hal ini sedimen tersuspensi dapat



Gambar 3. Morfologi Pantai Perairan Nguan, Galang Baru, Batam

Tabel 1. Panjang Garis Pantai, Mulut, Selat, Luas dan Volume Perairan di Perairan Nguan.

Morfologi Perairan Nguan	Ukuran
Panjang Mulut Selat Utara	1,44 km
Panjang Mulut Selat Selatan	1,26 km
Panjang Garis Pantai Galang	4,86 km
Panjang Garis Pantai Nguan	2,71 km
Panjang Garis Pantai P-1	0,96 km
Panjang Garis Pantai P-2	0,48 km
Panjang Garis Pantai P-3	0,36 km
Panjang Garis Pantai P-4	0,75 km
Panjang Garis Pantai P-5	0,70 km
Luas Perairan	4,3 km ²
Volume Perairan	3,5 juta m ³



Gambar 4. Peta Situasi Perairan Nguan Galang Baru, Batam

Kemampuan untuk memprediksi kondisi sedimen tersuspensi dapat didekati dengan menggunakan model numerik dinamis (Model RMA2). Sedangkan model numerik yang mampu menghitung transportasi sedimen dasar dan mampu memprediksi erosi dan pengendapan sedimen adalah model SED2D yang dikembangkan oleh *Waterway Experiment Station (WES)*. Untuk mengkaji pola transportasi sedimen di suatu wilayah perairan, terlebih dahulu dilakukan pemodelan arus di perairan tersebut. Pemodelan ini diperlukan untuk menggambarkan keadaan arus di wilayah studi. Oleh karena program SED2D tidak melakukan perhitungan kecepatan arus dan elevasi permukaan air, maka diperlukan model hidrolis yang tepat untuk dapat memecahkan permasalahan tersebut.

Untuk memenuhi kemampuan tersebut maka digunakanlah program RMA2. Program ini juga dikembangkan oleh *WES US Army Corp of Engineer*. Hasil dari kajian model arus akan berupa gambaran kuantitatif sirkulasi arus musiman selama satu siklus pasang surut dari purnama hingga purnama berikutnya serta keadaan arus residu. Gambaran keadaan arus dominan normal bulanan ini akan menjadi dasar untuk kajian transportasi sedimen di perairan yang akan dikaji. Pendekatan yang dilakukan untuk menghitung arus dominan normal bulanan tidak hanya menggunakan komponen pembangkit arus berupa pasang surut saja, tapi juga dengan menghitung debit (*flow rate*) di kedua mulut selat di lokasi yang bersangkutan. Hal ini sangat diperlukan untuk melihat pembangkit arus yang disebabkan oleh faktor regional.

Tujuan dari pemodelan ini adalah untuk mendapatkan gambaran sirkulasi arus normal bulanan (*Steady State Solution*) dan pola transportasi sedimen tersuspensi pada setiap bulannya. Untuk mendukung kajian sedimen dan bahan pencemar transportasi tersebut maka dipergunakan pula model mesh,

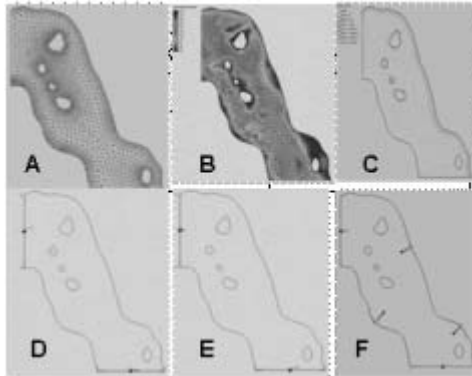
model batimetri, model densitas material, model flowrate dari mulut selat utara, dan selatan, dan model boundary reflection (Gambar 5).

1). Kondisi Oceanografi, Pasut, Arus, Sedimen dan Sirkulasi Air

Perairan Nguan, Galang Baru, Batam memiliki Lintang dan Bujur 0.665° - 0.63° Lintang Utara dan 104.23° - 104.27° Bujur Timur. Kondisi pasang surut daerah ini didominasi oleh tipe pasut semi diurnal (Anonim^d 1999). Sedangkan kondisi iklim didominasi oleh *Northeast* dan *Southwest Monsoon*. Perairan sekitar P. Nguan - Galang baru merupakan tipe perairan selat. Sedimen di perairan P. Nguan - Galang Baru didominasi oleh sedimen pasir (material lebih kasar) dengan kandungan Lumpur di bawah 30 % dan sedimen karang berpasir dengan kandungan Lumpur di bawah 10%.

Di perairan Nguan, pengaruh pasut dan musim sangat dominan terhadap pola perubahan sirkulasi air di perairan Nguan. Karena berbentuk selat, maka perairan ini memiliki daya cuci (*flushing out*) yang cukup tinggi baik ke arah utara maupun selatan dan sangat ideal untuk pengembangan kegiatan budidaya perikanan laut. Berdasarkan hasil analisa terhadap kecepatan dan arah arus dari data tahun 1900 -1903 ini diketahui bahwa arus di perairan Nguan bergerak ke selatan pada bulan Januari dengan kecepatan < 2,6 m/detik, Februari < 1,8 m/detik, Mei < 2,7 m/detik, Juni < 4,1 m/detik, Juli < 6,6 m/detik dan Agustus < 6,1 m/detik. Kecepatan pergerakan arus ke selatan rata-rata berkisar antara 1 - 2 m/detik dengan kecepatan arus terendah terjadi pada bulan Februari dan tertinggi pada bulan Juli. Sementara, arus yang bergerak ke utara terjadi pada bulan Maret < 2,7 m/detik, April < 2,0 m/detik, September < 4,6 m/detik, Oktober < 1,7 m/detik, Nopember < 2,1 m/detik dan Desember < 3,4 m/detik

dengan kecepatan tertinggi rata-rata antara 1-1.5 m/detik. Kecepatan arus terendah yang bergerak ke utara terjadi pada bulan Oktober dan tertinggi pada bulan September (Tabel 2 dan Gambar 6).



Gambar 5. Model mesh (A), model batimetri (B), model densitas material (C), model flowrate dari mulut selat utara (D), dan selatan (E) , dan model boundary reflection (F)

Tabel 2. Pola Arus Normal Bulanan dari luaran Model RMA2 (*Steady State Solution*)

No	Bulan	Keterangan Data Input
1	Januari	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut atas selat Flowrate : 18677.0051 m ³ /s Kecepatan angin : 2.55 m/s Arah Angin : 2.281°
2	Februari	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut atas selat Flowrate: 12929.7379 m ³ /s Kecepatan angin : 3.37 m/s Arah Angin : 11.43°
3	Maret	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut bawah selat Flowrate: 18664.0399 m ³ /s Kecepatan angin : 3.34 m/s Arah Angin : 18.78°
4	April	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut bawah selat Flowrate : 14208.3089 m ³ /s Kecepatan angin : 2.04 m/s Arah Angin : 24.12°

5	Mei	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut atas selat Flowrate : 23017.0568 m ³ /s Kecepatan angin : 0.92 m/s Arah Angin : 40.87°
6	Juni	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut atas selat Flowrate : 24223.1237 m ³ /s Kecepatan angin : 1.00 m/s Arah Angin : 160.13°
7	Juli	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut atas selat Flowrate : 34030.7015 m ³ /s Kecepatan angin : 1.93 m/s Arah Angin : 168.12°
8	Agustus	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut atas selat Flowrate : 49825.2884 m ³ /s Kecepatan angin : 2.44 m/s Arah Angin : 165.88°
9	September	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut bawah selat Flowrate : 28.322.4349 m ³ /s Kecepatan angin : 2.51 m/s Arah Angin : 162.73 °
10	Oktober	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut bawah selat Flowrate : 10064.7213 m ³ /s Kecepatan angin : 2.25 m/s Arah Angin : 170.29 °
11	November	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut bawah selat Flowrate : 14721 m ³ /s Kecepatan angin : 0.92 m/s Arah Angin : 197.59 °
12	Desember	Input Data : Sumber flowrate : dari mulut bawah selat Flowrate: 29615.9718 m ³ /s Kecepatan angin : 0.95 m/s Arah Angin : 334.90 °



Gambar 6. Arah dan Kecepatan Arus, pola Sirkulasi Air Bulanan

Dari gambar tersebut terlihat bahwa arus dengan kecepatan tertinggi menyusuri kedua sisi pantai Nguan dan Galang. Sedangkan di bagian tengahnya terutama di sekitar pulau-pulau, kecepatannya relatif rendah baik untuk arus yang mengarah ke selatan maupun ke utara. Pola perubahan arus yang demikian terjadi akibat adanya pengaruh perubahan musim, dimana pada musim barat, arus bergerak ke selatan dan musim timur, arus bergerak ke utara. Namun demikian untuk perairan Nguan, pola perubahan ini nampaknya dipengaruhi pula oleh kondisi oseanografi laut Cina Selatan dimana pola musimnya menjadi kurang konsisten dengan pola musiman perairan Indonesia pada umumnya. Pada bulan Nopember dan Desember (musim barat) arus yang seharusnya mengarah ke selatan ternyata mengarah ke utara, demikian halnya untuk bulan Maret dan April (musim peralihan).

2). Pola Sebaran Sedimen dan Bahan Pencemar di Perairan Nguan

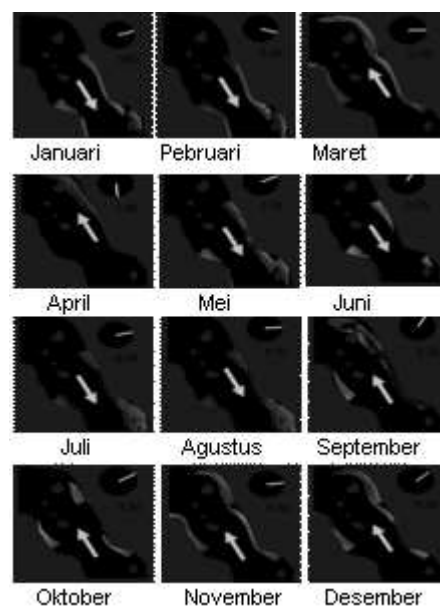
Pola, arah dan kecepatan sebaran sedimen dan bahan pencemar dalam suatu perairan, berkaitan erat dengan pola, arah, kecepatan arus, batimetri dan morfologi pantai serta densitas atau konsentrasi sedimen atau bahan pencemar itu sendiri. Untuk mengetahui pola, arah dan kecepatan sebaran sedimen dan bahan pencemar di perairan Nguan, maka diskennariokan bahwa sumber bahan pencemar berasal dari 1). Sisi kedua pantai (Nguan dan Galang), 2) Pulau-pulau (P1 - P5) pada Gambar 5 dan 3). Secara acak dari berbagai tempat dalam perairan Nguan. Dalam skenario ini juga diasumsikan bahwa densitas atau konsentrasi sedimen di bagian tengah (utama), kiri kanan pantai dan pulau-pulau, masing-masing sebesar 1025 g/m^3 , 1025 g/m^3 dan 1325 g/m^3 seperti terlihat pada Gambar 5 (C). Karena pola arah dan kecepatan sebaran sedimen dan bahan pencemar berkaitan erat dengan tingkah laku arus, maka arus menjadi media utama yang mentransportasikan material ke berbagai tempat sesuai dengan pola aliran, sirkulasi, arah dan kecepatannya.

Berdasarkan pola, arah dan kecepatan arus serta kecepatan angin bulanan yang terlihat pada Gambar 6 dan Tabel 2, diketahui bahwa kecepatan arus di perairan Nguan berkisar antara 1 - 40 cm/detik dan kecepatan angin berkisar antara 1 - 3,3 m/dtk. Dengan demikian sebaran bahan pencemar dari mulut. sebelah utara ke selatan dan sebaliknya akan memakan waktu cukup singkat sekitar kurang dari 0,5 jam sampai dengan 8 jam. Arus dengan kecepatan tertinggi bulanannya terlihat menyusuri kedua sisi pantai Nguan dan Galang, terutama pada lintasan pantai yang berlekuk dengan kecepatan arus lebih dari 50 cm/detik. Pada Gambar 5 (B), juga terlihat bahwa kecepatan arus permukaan di bagian tengah perairan Nguan pada bulan Januari 2001 cukup tinggi dengan kecepatan arus

melebihi 40 cm/detik dan yang datang dari utara membentur dinding pantai Galang dan mebelok ke kanan searah jarum jam membentuk suatu pusaran (*eddy*) dan turbulensi atau pergolakan. Sementara di bagian tengah dan antara pulau-pulau, kecepatan arusnya berkisar antara rendah sampai sedang dengan kecepatan rata-rata antara 5 - 25 cm/detik. Hal ini berarti bahwa kecepatan arus di perairan Nguan cukup tinggi dengan sirkulasi air yang sangat baik, sehingga dapat dikatakan bahwa perairan Nguan merupakan kolam air deras raksasa (*Giant Race Water*) yang sangat baik untuk kegiatan budidaya laut, tetapi juga harus hati-hati, karena dengan kecepatan arus yang cukup tinggi, akan berpengaruh terhadap kecepatan sebaran bahan pencemar yang pada akhirnya akan mengganggu kegiatan budidaya ikan. Namun demikian nampaknya kondisi tersebut bersifat situasional, tetapi harus tetap diwaspadai.

Pola, arah, kecepatan sebaran sedimen dan bahan pencemar dari kedua sisi pulau Nguan dan Galang serta pulau-pulau disekitarnya selengkapny terlihat pada Gambar 7 dan 8. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pola, arah dan kecepatan sebaran sedimen terlarut dan bahan pencemar mengikuti pola, arah dan kecepatan arus yang bervariasi perbulanannya. Konsentrasi sedimen dan bahan pencemar akan berkurang sesuai dengan jarak dan waktu sebarannya. Semakin jauh dari sumbernya akan semakin berkurang konsentrasi. Jumlah konsentrasi ini tergantung dari konsentrasi sedimen dan bahan pencemar dari sumbernya. Semakin tinggi konsentrasi sedimen dari sumbernya, konsentrasi yang tersebarpun akan semakin tinggi. Demikian halnya dengan jenis bahan pencemar. Apabila bahan pencemar itu tidak dapat larut dalam air seperti minyak dan oli atau beberapa buangan limbah industri lainnya, maka bahan pencemar dengan konsentrasi hampir sama dengan sumbernya akan tersebar kemana-mana. Untuk itu demi

keamanan suatu kegiatan budidaya perikanan, hendaknya kawasan budidaya tidak berdekatan atau bebas dari pengaruh berbagai kegiatan yang potensial mengeluarkan limbah atau buangan yang akan mengganggu kehidupan biota perairan. Sedimen dari erosi, buangan minyak dan oli dari kapal serta bahan beracun berbahaya merupakan bahan pencemar yang harus dihindari untuk menjaga kelangsungan budidaya perikanan.

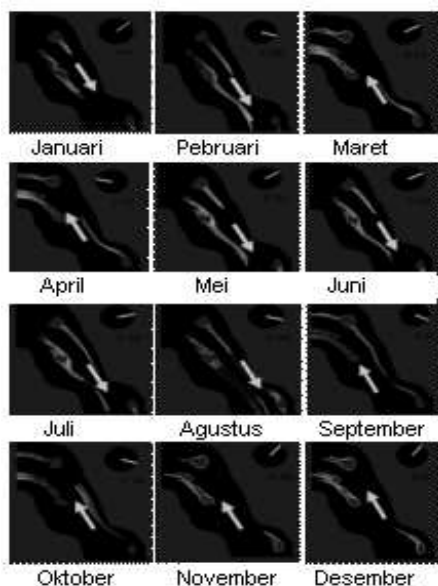


Gambar 7. Pola Arah dan Kecepatan Sebaran Sediment dan Polutan dari Kedua Sisi Pantai Pulau Nguan dan Galang.

3). Kondisi Lingkungan dan Kualitas Perairan Nguan

Secara umum kondisi Perairan Nguan, Galang bersifat *oligotmfik*, yaitu perairan yang tergolong sangat baik, bersih, sehat, jernih dan sangat baik untuk pengembangan kegiatan budidaya ikan. Dengan dasar perairannya yang berupa karang berpasir serta jauh dari muara sungai, menjadikan perairan ini sangat sesuai untuk pengembangan budidaya ikan kerapu dalam

karamba jaring apung. Sirkulasi air yang baik dengan waktu penggantian air hanya beberapa jam, membuat perairan ini sangat mirip dengan kolam air deras raksasa yang dapat dimanfaatkan untuk memacu produktivitas seoptimal mungkin. Namun demikian, ada beberapa yang perlu diwaspadai saat ini sehubungan dengan kondisi lingkungan perairan di Nguan. Hadirnya beberapa kegiatan berupa pabrik es, jetty tempat berlabuhnya kapal-kapal dan kegiatan reklamasi disepanjang pantai Galang, telah mengindikasikan terjadinya gangguan lingkungan berupa kenaikan suhu perairan, penurunan kecerahan perairan, meningkatnya kekeruhan dan kadar partikel tersuspensi serta minyak dan oli yang angat potensial mengganggu kegiatan budidaya dan berbahaya bagi kehidupan biota perikanan dan keamanan investasi. Karenanya kegiatan disekitar perairan Nguan, harus disesuaikan dengan konsep Batam Marikultur Estat yang akan mengembangkan kegiatan pengelolaan kawasan budidaya secara berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.



Gambar 8. Pola arah dan Kecepatan Sebaran Sediment dan Polutan dari Pulau-pulau di Perairan Nguan dan Galang

4. PENUTUP

Pola sebaran bahan pencemar di perairan Nguan dipengaruhi oleh musim, pasang surut, arah dan kecepatan arus. Faktor lain yang turut mempengaruhinya adalah ukuran besar kecilnya volume bahan pencemar dan asal atau lokasi sumber pencemar. Bahan pencemar yang paling dominan saat ini di perairan Nguan adalah partikel tersuspensi atau sedimen yang berasal dari lahan terbuka disepanjang pesisir Pulau Nguan dan tambang pasir di sekitar perairan Nguan. Sumber pencemar lainnya adalah berupa tumpahan minyak, bahan organik dan sumber panas yang berasal dari kegiatan bongkar muat kapal di lokasi penambatan kapal disepanjang pantai Galang Baru. Demikian halnya dengan kegiatan jaring apung di sekitar pulau yang berada diperairan Nguan. Sirkulasi masa air yang bergerak ke utara pada musim selatan dan keselatan pada musim utara mempengaruhi arah penyebaran bahan pencemar sesuai dengan pola pergerakan masa air. Demikian halnya pada waktu pasang surut, bahan pencemar akan bergerak ke selatan atau utara.

Mengingat perairan Nguan berupa selat, maka pergerakan bahan pencemar diperkirakan tidak akan banyak mempengaruhi kegiatan budidaya perikanan di perairan Nguan, karena bahan pencemar akan mengalir melintasi perairan Nguan. Namun demikian apabila bahan pencemar yang melintas bersifat sangat toksik atau beracun, maka pengaruhnya akan sangat fatal untuk perairan yang berupa selat. Karena proses penyebarannya akan berlangsung sangat cepat sesuai dengan kecepatan arus yang cukup tinggi untuk perairan selat.

Perairan Nguan memiliki *flushing out* atau kemampuan membersihkan diri yang cukup tinggi karena perairannya berupa selat. Kondisi ini sangat baik untuk pengembangan usaha budidaya ikan secara intensif dan berskala industri. Untuk menjaga keberlanjutannya, maka kondisi

lingkungan disekitarnya perlu di jaga sebaik mungkin agar tidak berkembang menjadi kawasan industri seperti di daerah Batam bagian utara.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim^a 2000. *Convening of Global Conference on the Sustainable Development on Small Island Developing States*. Web Site.
2. Anonim^b. 2000. *Small Island Characteristics and Their Constraints on Sustainable Development*. Web Site.
3. Anonim^c 2000. Draft Pedoman Umum Pengelolaan Pulau-Pulau Kecil yang Berkelanjutan dan Berbasis Masyarakat. Dirjen Pesisir, Pantai dan Pulau-Pulau Kecil. Departemen Kelautan dan Perikanan RI. Jakarta.
4. Anonim^d 1999. Laporan Tahunan Dinas Perikanan Kota Madya Batam. Batam
5. Anonim^e. 1996. Inventarisasi dan Evaluasi Lingkungan Pesisir : Oseanografi, Geologi, Biologi dan Ekologi. P3O-LIPI. Jakarta.
6. Nontji, A. 1987. Laut Nusantara, Penerbit Djembatan - Jakarta.
7. Nybakken, J.W. 1988. Biologi Laut, suatu Pendekatan Ekologi. Gramedia - Jakarta.
8. Soegiarto, A. 1994. Pelestarian Alam dan Lingkungan Dalam Rangka Pembangunan yang Berkelanjutan. Yayasan Pelestarian Alam. Jakarta.
9. Supriharyono.2000. Pelestariandan Pengelolaan Sumberdaya Alam di Wiiayah Pesisir Tropis. PT. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
10. Hehanussa, P.E. 1995. *Geohydrological Factors in Water Resources Planning for Small Islands*. Proc. Work. Water Resources Assesment and Development in Small Island and The Coastal Zone. (P.E. Hehanusa dan G.S. Haryani, Ed.). LIPI-UNESCO. Jakarta.
11. Courboules. J., 1996. *Design and Management Planning of Four Marine Conservation Areas*. BCEOM. Jakarta.
12. Falkland, T. 1995. *Water Resources Assesment, Development and Management for Small Tropical Islands*. Proc. Work. Water Resources Assesment and Development andDevelopment in Small Island and The Coastal Zone. (P.E. Hehanusa dan G.S. Haryani, Ed.). LIPI- UNESCO. Jakarta.