

**MODEL DISPERSI BAHANG HASIL BUANGAN AIR PROSES  
PENDINGINAN PLTGU CILEGON CCPP KE PERAIRAN PANTAI  
MARGASARI DI SISI BARAT TELUK BANTEN**

***THERMAL DISPERSION MODEL OF WATER COOLING PLTGU CILEGON  
CCPP DISCHARGE INTO MARGASARI COASTAL WATERS AT THE WESTERN  
COAST OF BANTEN BAY***

**I Wayan Nurjaya<sup>1)</sup> dan Heron Surbakti<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Bagian Oseanografi, Dept. Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB

[i.wayan.nurjaya@ipb.ac.id](mailto:i.wayan.nurjaya@ipb.ac.id) dan [wayan.itkipb@yahoo.com](mailto:wayan.itkipb@yahoo.com)

<sup>2)</sup>Jurusan Ilmu Kelautan, FMIPA-UNRI

**ABSTRACT**

*Thermal dispersion model based on the hydrodynamics model was applied on PLTGU Cilegon (electric power industry based on gas and steam) at the coast of Margasari, Pulo Ampel District, Serang-Banten. This PLTGU used around 60.000 m<sup>3</sup>/hour of seawater as cooling water system. Therefore, it produced water with high temperature of about 5 °C higher than the surrounding of seawater temperature. This high water temperature was flowed out into the coastal waters. This study tried to predict their distribution according to southeast and northeast monsoon. Model verification was conducted both to hydrodynamics component (tide and current) and water temperature. The verification results show good enough patterns between the model results and field measurement.*

**Key words:** Bay of Banten, cooling water system, thermal dispersion, hydrodynamics model

**ABSTRAK**

Model dispersi bahang yang didasari dengan model hidrodinamika diaplikasikan di perairan pantai timur Desa Margasari, Kecamatan Pulo Ampel, Kabupaten Serang, Provinsi Banten. Kegiatan PLTGU Cilegon menggunakan air laut dengan debit 60.000 m<sup>3</sup>/jam untuk mendinginkan mesinnya (*cooling water system*). Hasil proses pendinginan ini menghasilkan air buangan bersuhu tinggi, selisih nilai suhu air buangan adalah 5 °C lebih tinggi dari suhu lingkungan yang disalurkan ke perairan pantai melalui *outlet*. Air buangan bersuhu tinggi tersebut secara kontinyu dialirkan ke pantai dengan debit 60.000 m<sup>3</sup>/jam. Dalam model sebaran bahang dilakukan verifikasi hasil model dengan hasil pengukuran di lapangan, baik verifikasi terhadap komponen hidrodinamika (pasang surut dan arus), maupun verifikasi terhadap komponen suhu. Hasil verifikasi menunjukkan ada kesamaan pola yang cukup baik antara hasil model dan pengukuran di lapangan.

**Kata Kunci:** Teluk Banten, *cooling water system*, dispersi bahang, model hidrodinamika

**I. PENDAHULUAN**

Kebutuhan akan energi listrik belakangan ini meningkat. Peningkatan tersebut disebabkan karena permintaan energi listrik untuk pemukiman dan industri meningkat. Kegiatan industri pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTGU) di Indonesia lebih banyak dibangun di dekat pantai misalnya PLTU

Suralaya di Merak Banten, PLTU Paiton di Paiton Jawa Timur, PLTU Muara Karang di Muara Karang Jakarta. Alasan utamanya adalah lebih mudah memperoleh air yang digunakan untuk proses pendinginan mesin atau *cooling water system*.

Permasalahan utama yang selalu muncul dari kegiatan buangan air hasil

proses *cooling water system* adalah suhu air buangan dari sistem tersebut jauh lebih tinggi dari suhu lingkungan di sekitarnya, umumnya suhu air buangan tersebut dapat mencapai 40 °C. Namun, karena ada aturan bahwa nilai maksimum perbedaan suhu air buangan dengan suhu alami adalah 5 °C maka umumnya air buangan tadi dikelola dulu dengan cara menurunkan suhunya dari 40 °C menjadi 34 °C.

PT.Gunanusa Utama Fabricators adalah salah satu perusahaan galangan kapal dan pembuat *offshore platform* atau anjungan minyak lepas pantai yang beroperasi di atas lahan pantai seluas 18 hektar di depan areal PLTGU Cilegon. Adanya peningkatan permintaan atau pemesanan fasilitas penunjang produksi minyak dan gas bumi, maka PT Gunanusa memerlukan lahan yang lebih luas menjadi 24 hektar. Salah satu upaya yang dilakukannya adalah melalui reklamasi pantai. Oleh karena kegiatan reklamasi pantai ini lokasinya berdampingan dengan lokasi *intake* dan *outlet* milik PLTGU, maka diperkirakan akan mengganggu kebutuhan kuantitas dan kualitas air pendingin akibat adanya peningkatan kekeruhan dan pendangkalan di sekitar *intake* dan *outlet*.

Proses fisik yang paling mendasar dalam transpor bahang (*heat transport*) adalah ketika limbah bahang masuk ke dalam badan air, hal ini menyebabkan suhu air meningkat sampai terjadi kehilangan keseimbangan bahang di permukaan. Untuk keperluan komputasi, masuknya bahang ke dalam badan air dikelompokkan menjadi dua zona, yakni badan air yang dekat dengan sumber buangan (*near-field*) dan jauh dari sumber buangan (*far-field*). Pada zona

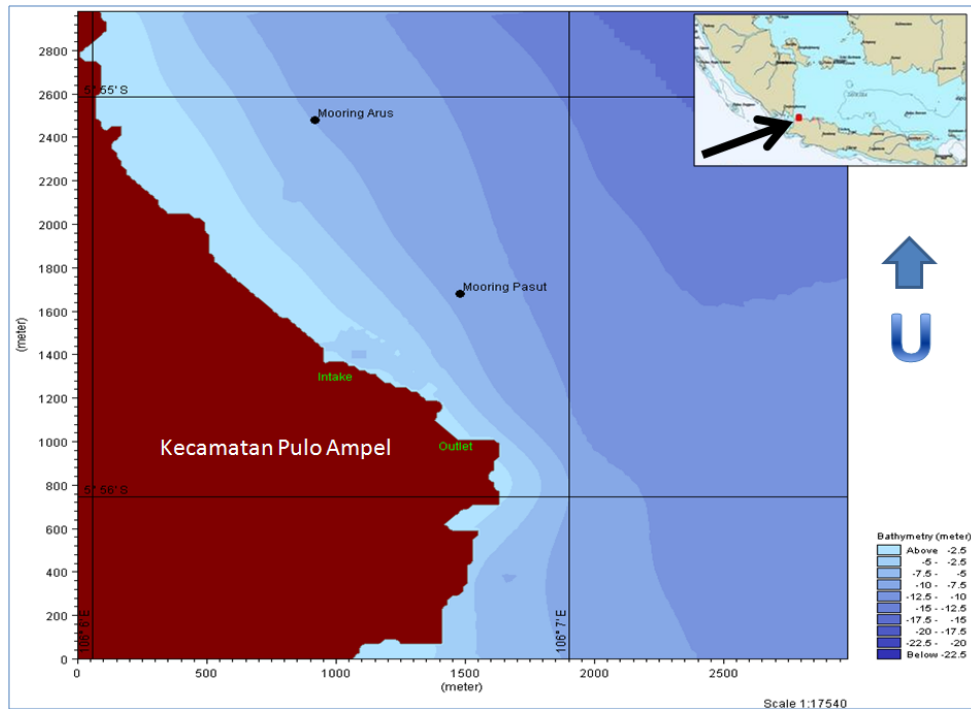
pertama, buangan bahang (*heated discharge*) diencerkan oleh adanya turbulen (*discharge-induced turbulence*). Pada zona kedua yang luas dan berdekatan dengan zona pertama, distribusi bahang diatur oleh proses konveksi dengan adanya arus (*convection by ambient currents*), difusi karena adanya turbulen dan adanya pertukaran bahang melalui permukaan laut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa jauh pengaruh kegiatan reklamasi terhadap lingkungan sekitar, khususnya disperse bahang hasil buangan proses *cooling water* sehingga hasilnya dapat dipakai sebagai pertimbangan dalam rencana reklamasi ke depan. Karena kegiatan reklamasi belum dilakukan, maka dalam penelitian ini dilakukan beberapa skenario (sebelum reklamasi dan setelah reklamasi) dengan menggunakan model hidrodinamika dan transpor polutan (bahang).

## II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan sejak awal Januari 2009 sampai awal Februari 2009. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer hasil pengukuran di lapangan (arus, pasut dan suhu air laut), data sekunder baik yang diperoleh dari internet maupun dari beberapa publikasi ilmiah dan hasil penelitian serta data hasil monitoring di perairan Teluk Banten.

Lokasi penelitian terletak di sisi barat perairan Teluk Banten, persisnya di pantai Desa Margasari, Kecamatan Pulo Ampel, Kabupaten Serang, Propinsi Banten. Secara geografis lokasi penelitian digambarkan pada Gambar 1.



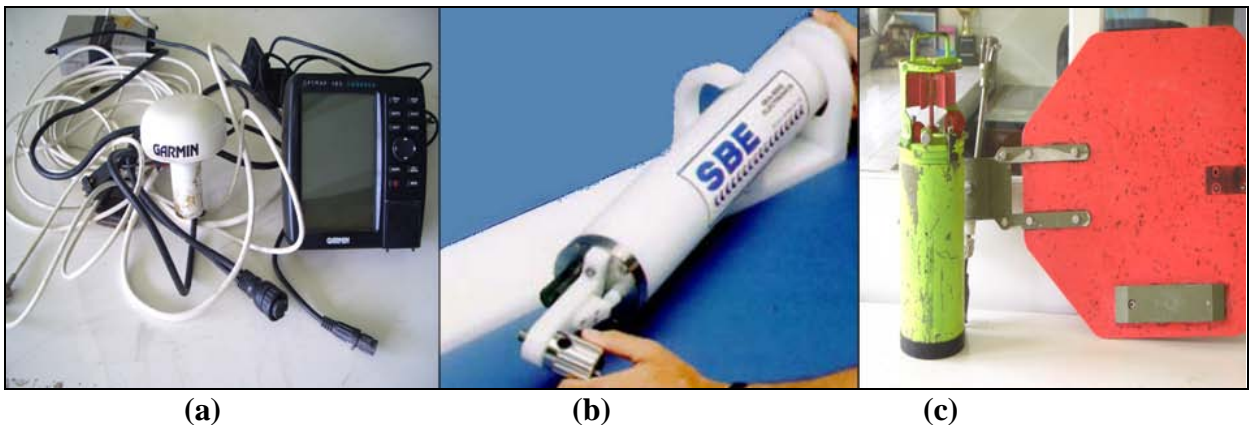
Gambar 1. Lokasi Penelitian

## 2.1. Pengumpulan Data Primer

Pengukuran arus dan pasang surut dilakukan selama tiga hari tiga malam pada posisi  $5^{\circ}55,4934'$  L.S dan  $106^{\circ}07,4975'$  B.T. Alat ukur pasang-surut dan arus dipasang di bagan pada kedalaman laut 14 m dengan system Mooring. *Tide gauge* dengan SBE Type dan *Aandera*

*Current meter* tipe RCM 7 diset dengan interval waktu perekaman setiap 10 menit selama selang waktu pengukuran.

Alat yang digunakan mengukur pasang-surut, arus (komponen kecepatan dan arah) serta posisi di tengah laut berturut-turut adalah *tide gauge*, *current meter* dan *GPS = Global Positioning System* (Gambar 2).



Gambar 2. Peralatan yang digunakan dalam survei lapang (a) GPS Garmin, (b) *Tide Gauge* SBE Type, dan (c) *Aandera Current Meter* tipe RCM 7

**2.2. Model**

**2.2.1. Model Hidrodinamia (Pola Arus)**

Model pola arus dibangun dengan menggunakan Piranti lunak MIKE 21 Versi 2005 yang dikembangkan oleh *Danish Hydraulics Institute (DHI) Water and Environment*, Denmark. Persamaan yang digunakan pada model ini adalah persamaan kontinuitas dan persamaan momentum dengan perata-rataan kedalaman. Model ini menggunakan pendekatan metode beda hingga (*finite difference method*) untuk menyelesaikan persamaan yang digunakan. Berikut uraian persamaan yang digunakan dalam model diatas (Abbott *et al.*, 1978):

**2.2.2. Persamaan kontinuitas:**

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t}$$

**2.2.3. Persamaan momentum**

pada sumbu x

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x - \dots \dots \dots (1)$$

pada sumbu y

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega_p - fVV_y - \dots \dots \dots (2)$$

Dimana:

- $h(x, y, t)$  : kedalaman air  
(=  $\zeta - d, m$ )
- $d(x, y, t)$  : kedalaman air bervariasi terhadap waktu (m)

- $\zeta(x, y, t)$  : elevasi muka laut (m)
- $p, q(x, y, t)$  : kerapatan densitas arah sumbu x dan y ( $m^3/s/m$ ) =  $(uh, vh)$ ;
- $u, v$  = kecepatan rerata terhadap kedalaman pada sumbu x dan y
- $C(x, y)$  : Chezy resistance ( $m^{1/2}/s$ )
- $g$  : percepatan gravitasi ( $m^2/s$ )
- $f(V)$  : faktor gesekan angin
- $V, V_x, V_y(x, y, t)$ : kecepatan angin pada sumbu x dan y (m/s)
- $\Omega(x, y)$  : parameter Coriolis ( $s^{-1}$ )
- $p_a(x, y, t)$  : tekanan atmosfer ( $kg/m^2$ )
- $\rho_w$  : densitas air laut ( $kg/m^3$ )
- $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  : komponen *shear stress* efektif

*Bed shear stress* pada arah x dan y dapat dihitung dengan (Melor, 1998):

$$\tau_{bx} = \rho c_f U \sqrt{U^2 + V^2} \left[ 1 + \left( \frac{\partial z_b}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_b}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3)$$

$$\tau_{by} = \rho c_f V \sqrt{U^2 + V^2} \left[ 1 + \left( \frac{\partial z_b}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_b}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (4)$$

dimana  $c_f$  adalah koefisien gesekan dan dapat dihitung sebagai berikut

$$c_f = \frac{g}{C^2} = \frac{gn^2}{\lambda^2 H^{\frac{1}{2}}} \dots \dots \dots (5)$$

- dimana  $C$  : Koefisien Chezy
- $n$  : Koefisien Manning
- $\lambda$  : 1,486 untuk unit Inggris dan 1,0 untuk SI

Kedalaman rerata gesekan turbulen dapat dihitung menggunakan konsep viskositas Eddy dari Boussinesq, yaitu :

$$\tau_{xx} = \rho v_{xx} \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \dots \dots \dots (6)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \rho v_{xy} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_{yy} = \rho v_{yy} \left( \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (8)$$

dimana,  $v$  adalah  $0,3 \pm 0,6 U*H$   
 $V$  : Kecepatan arus pada arah  $y$   
 $U$  : Kecepatan arus pada arah  $x$

**2.2.4. Model Dispersi Panas**

Model sebaran panas dibuat dengan menggunakan persamaan Adveksi/Dispersi. Model adveksi-dispersi diselesaikan dengan persamaan adveksi-dispersi dua dimensi. Persamaan adveksi-dispersi tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Ramming and Kowalik, 1980):

$$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial t} = - \frac{\partial u(\Delta T)}{\partial x} - \frac{\partial v(\Delta T)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_D \frac{\partial(\Delta T)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_D \frac{\partial(\Delta T)}{\partial y} \right) + \frac{J}{\rho C_p H} \dots\dots\dots(9)$$

dimana:

- $\Delta T$  : beda suhu air terhadap suhu ambien
- $u, v$  : kecepatan horizontal pada arah  $x$  dan  $y$  (m/s)
- $A_D$  : koefisien difusi pada arah  $x$  dan  $y$  ( $m^2/s$ )
- $t$  : waktu
- $J$  : Total fluks bahang di permukaan
- $\rho$  : densitas air laut
- $C_p$  : *Specific heat*
- $H$  : kedalaman penyebaran limbah panas efektif di permukaan laut

Nilai  $u, v$  dan  $h$  untuk tiap time step diperoleh dari hasil simulasi pola arus. Total fluks bahang di permukaan dalam kasus ini adalah (Chapra, 1997):

$$J = J_{sn} + J_{an} - J_{br} - J_c - J_e \dots\dots\dots (10)$$

$$J_{an} = \sigma (T + \Delta T + 273)^4 (0,7 + (0,031 Eud^{0.5}))0,97$$

$$J_{br} = \varepsilon \sigma (T + \Delta T + 273)^4$$

$$J_c = c_1 f(Uw) (T + \Delta T - T_{ud})$$

$$J_e = f(Uw) (E_s - E_{ud}) 133.32$$

dimana:

- $J_{sn}$  = radiasi gelombang pendek (dari matahari)
- $J_{an}$  = radiasi gelombang panjang (dari atmosfer)
- $J_{br}$  = radiasi balik gelombang panjang (dari air)
- $J_c$  = konduksi/konveksi di permukaan (lapisan udara-air)
- $J_e$  = evaporasi/kondensasi (lapisan udara-air)
- $T$  = suhu ambien air laut,
- $\varepsilon$  = emisifitas air,
- $\sigma$  = konstanta Stefan-Boltzmann,
- $c_1$  = koefisien Bowen,
- $f(Uw)$  = pengaruh angin dipermukaan,
- $E_{ud}$  = tekanan uap air udara,
- $E_s$  = tekanan permukaan air dan
- $T_{ud}$  = suhu udara.

Pengaruh angin dipermukaan dinyatakan dalam rumus empirik (Chapra, 1997):

$$f(Uw) = 19 + 0,95 Uw^2 \dots\dots\dots (11)$$

dimana

$U_w$  = kecepatan angin di permukaan.

**2.2.5. Desain Model dan Syarat Batas:**

Model ini diselesaikan dengan pendekatan numerik yaitu metode beda hingga. Simulasi model dilakukan untuk kasus arus yang dibangkitkan oleh pasang-surut (pasut) dengan memasukkan juga pengaruh angin pada daerah penelitian.

Syarat batas untuk model hidrodinamika (Gambar 1) adalah:

- syarat batas tertutup (daratan)  
 $(\bar{U}, \bar{V}, \eta) = 0 \dots\dots\dots (12)$

- syarat batas terbuka atau *open boundary* (laut)

Elevasi pasut yang diberikan di kondisi batas adalah berdasarkan hasil peramalan pasut NAO 99 selama 15 hari. Selanjutnya untuk kecepatan arus di batas dan elevasi yang belum diberikan,

menggunakan syarat batas radiasi Orlandi (Kowalik dan Murty, 1993):

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial t} \pm C \frac{\partial \bar{F}}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (13)$$

dimana:

$F$  : kecepatan arus rata-rata atau elevasi pasut, dan

$C$  :  $(gH)^{0.5}$ , yaitu kecepatan gelombang panjang.

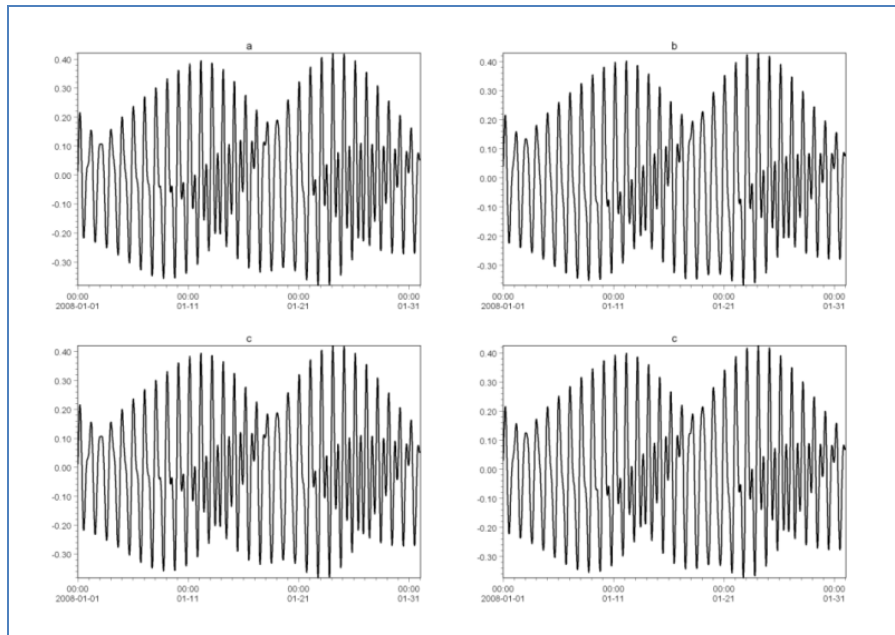
Syarat batas untuk model dispersi bahang di laut mengikuti syarat batas hidrodinamika, dengan mengganti kecepatan dan elevasi menjadi nilai suhu. Pada titik buangan air panas (*outlet*) diberikan sumber air panas secara kontinu dengan nilai  $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 2.3. Data Input Model

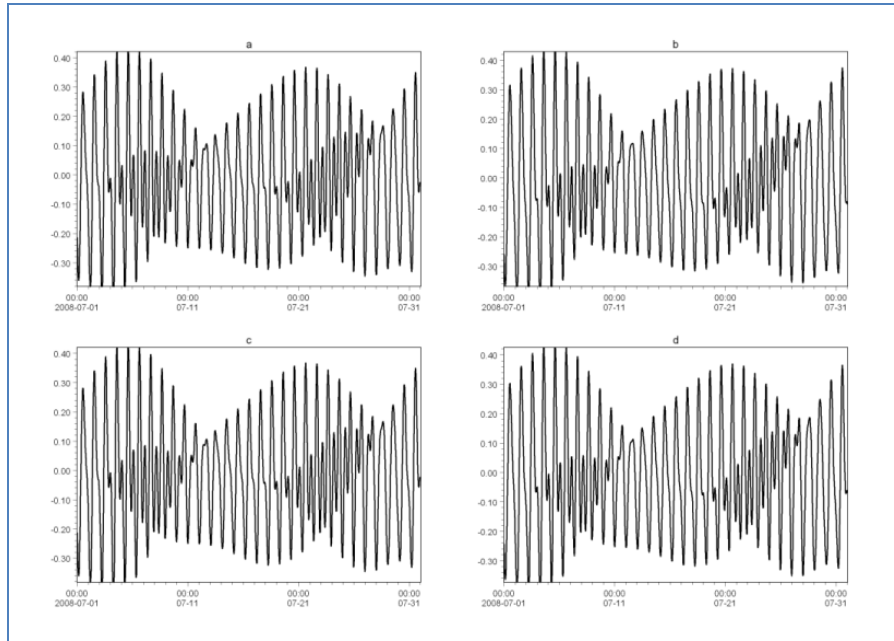
#### 2.3.1. Pasang Surut

Data pasang surut yang digunakan dengan menggunakan data peramalan NAO.99b (*National Astronomical Observatory*, Jepang). NAO Tide merupakan suatu model peramalan pasang surut global dengan resolusi  $1/2^\circ \times 1/2^\circ$  merupakan data asimilasi dari TOPEX/Poseidon selama 5 tahun. Data pasut digunakan sebagai batas terluar model (*open boundary condition*). Pada model digunakan empat batas terluar. Gambaran pasut pada masing-masing batas terluar adalah Gambar 3 untuk musim barat dan Gambar 4 untuk kondisi musim timur.

Data pasang surut dari NAO tide diinterpolasi menjadi tiap 5 detik (sesuai dengan langkah waktu/time step simulasi) dengan menggunakan *cubic spline* untuk mendapatkan stabilitas model.



Gambar 3. Elevasi Permukaan Laut pada Batas Terbuka saat Musim Barat (a) Kiri atas Daerah Model (b) Kanan Atas Daerah Model (c) Kiri Bawah Daerah Model (d) Kanan Bawah Daerah Model



Gambar 4. Elevasi Permukaan Laut pada Batas Terbuka saat Musim Timur (a) Kiri atas Daerah Model (b) Kanan Atas Daerah Model (c) Kiri Bawah Daerah Model (d) Kanan Bawah Daerah Model

### 2.3.2. Angin

Data angin yang digunakan dengan menggunakan data prediksi CERSAT dengan resolusi 15'. Data angin yang digunakan sebagai masukan pada model adalah data bulan Januari (musim Barat) dan data bulan Juli (musim Timur). Pada Lampiran Gambar 1 terlihat angin dominan terjadi pada musim barat adalah angin dari arah Barat Laut dan Utara, sedangkan pada musim timur, angin dominan bertiup dari arah tenggara.

### 2.3.3. Batimetri

Sumber peta batimetri yang digunakan berasal dari Dishidros TNI AL

tahun 2008 skala 1 : 200.000 dan peta Lingkungan Pantai Indonesia untuk daerah Teluk Banten dari Bakosurtanal dengan skala 1:50000 (Lembar Peta 1110-09) serta hasil *sounding* di lokasi kegiatan. Keseluruhan data kedalaman tersebut diatas digambarkan pada Gambar 1.

### 2.4. Diskritisasi Daerah Model

Gambaran mengenai model yang digunakan disajikan dalam Tabel 1. Grid yang dibangun pada area model ditunjukkan pada Gambar Lampiran 2.

Tabel 1. Jumlah grid, dimensi grid, time step yang digunakan dalam model

Parameter	Value	Unit
Number Of X (I) Cells	150	-
Number Of Y (J) Cells	150	-
X Grid Size	20	m
Y Grid Size	20	m
Time Step Of Model	5	second
Max. Number of Time Steps	518400	second

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Verifikasi Model

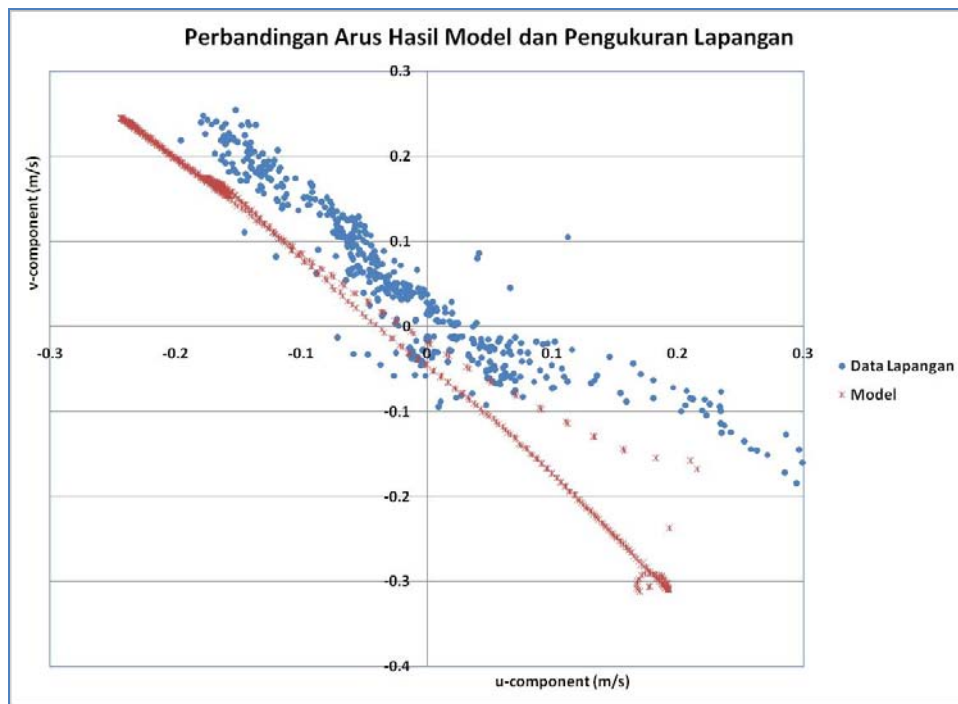
Verifikasi model arus dan sebaran suhu (bahan) telah dilakukan untuk mengetahui apakah model yang dibangun sesuai atau tidak dengan kondisi di lapangan. Hasil verifikasi antara data hasil pemodelan dan data hasil pengukuran di lapangan digambarkan pada grafik pencar, fluktuasi muka laut dan suhu berturut-turut pada Gambar 5, 6, dan 7.

Pada Gambar 5 terlihat bahwa pola pergerakan arus hasil pengukuran (tanda dot warna biru) adalah arah barat laut-tenggara. Pola pergerakan arah arus dari

model hidrodinamika juga memperlihatkan arah yang sama, namun besarnya antara kedua hasil tersebut terlihat masih ada perbedaan. Data arus hasil pengukuran di ukur pada lapisan kedalaman 5 m, sedangkan data arus hasil model merupakan hasil perata-rataan kedalaman 14 m, sehingga kecepatan arus hasil pengukuran cenderung lebih besar.

Fluktuasi muka laut hasil pengukuran (garis berwarna hitam) selama 3 hari dan tiga malam diflotkan bersama dengan hasil running model (garis berwarna orange) pada saat yang sama menghasilkan Gambar 6.

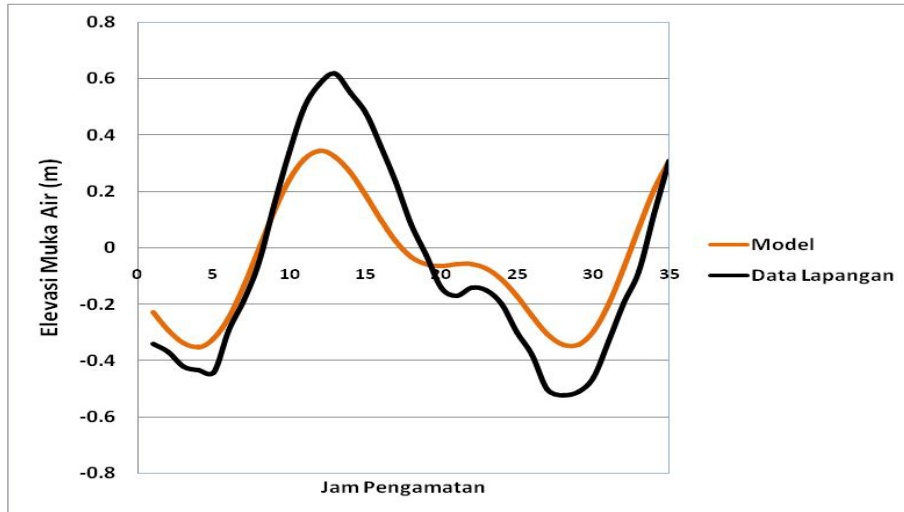
1.



● = Data Hasil Pengukuran      ▲ = Data Hasil Model

Gambar 5. Hasil verifikasi data arus hasil pengukuran dan model simulasi





Gambar 6. Hasil verifikasi data pasut hasil pengukuran tinggi paras laut di lapangan dan hasil model simulasi

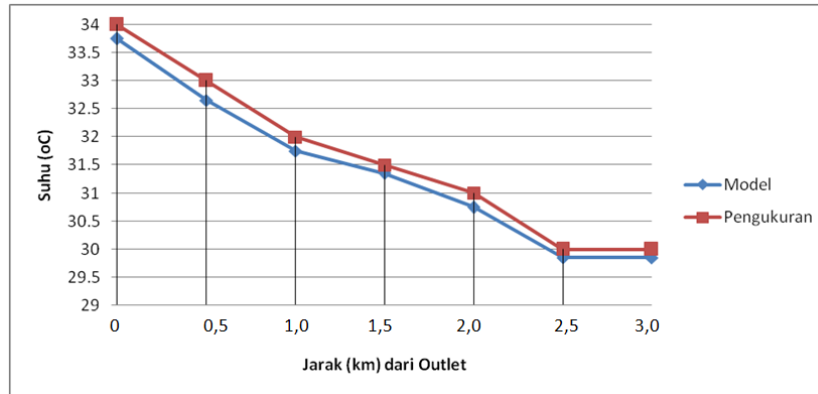
Pada gambar tersebut diatas terlihat bahwa fluktuasi muka laut dari hasil model dan hasil pengukuran di lapangan terdapat sedikit perbedaan, meskipun pola naik turunnya muka laut sudah mendekati sama. Perbedaan ketinggian muka laut yang besar terjadi saat pasang dan surut, perbedaannya dapat mencapai 0,3 m. Faktor penyebabnya diperkirakan karena data pasut dari NAO tide yang dipergunakan sebagai kondisi batas pada batas terbuka pada domain model kurang baik diaplikasikan pada perairan dangkal di daerah teluk atau selat dimana konfigurasi pantainya yang rumit.

### 3.2. Verifikasi Hasil Sebaran Bahang

Verifikasi terhadap data suhu juga dilakukan, dengan cara melakukan pengukuran suhu air laut di 7 titik sampling yang berbeda, mulai dari titik sumber (*outlet*) kemudian menjauh ke

tengah laut dengan interval jarak 0,5 km. Kedua data suhu tersebut baik dari hasil pengukuran dan hasil model diplotkan pada Gambar 7 untuk melihat seberapa jauh kesamaan dari dua data suhu tersebut.

Data suhu air laut hasil pengukuran di lapangan selalu lebih besar dari data suhu air laut hasil model. Perbedaan ini terutama diprediksi karena data suhu hasil pengukuran hanya mewakili 1 lapisan kedalaman (suhu permukaan laut), sedangkan data suhu dari model adalah hasil dari perata-rataan kedalaman sehingga selalu lebih rendah dari hasil pengukuran. Akan tetapi, pola penurunan suhu hasil buangan *cooling water* di perairan pantai Desa Margasari, Kecamatan Pulo Ampel, Kabupaten Serang, Propinsi Banten mempunyai kemiripan yang tinggi antara data suhu dari pengukuran di lapangan dan hasil dari model.



Gambar 7. Verifikasi hasil model disperse bahang dan hasil pengukuran pada 7 titik sampling dari sumber buangan (outlet) dan dengan interval jarak 0,5 km menjauhi titik outlet

### 3.3. Hasil Simulasi Pola Arus

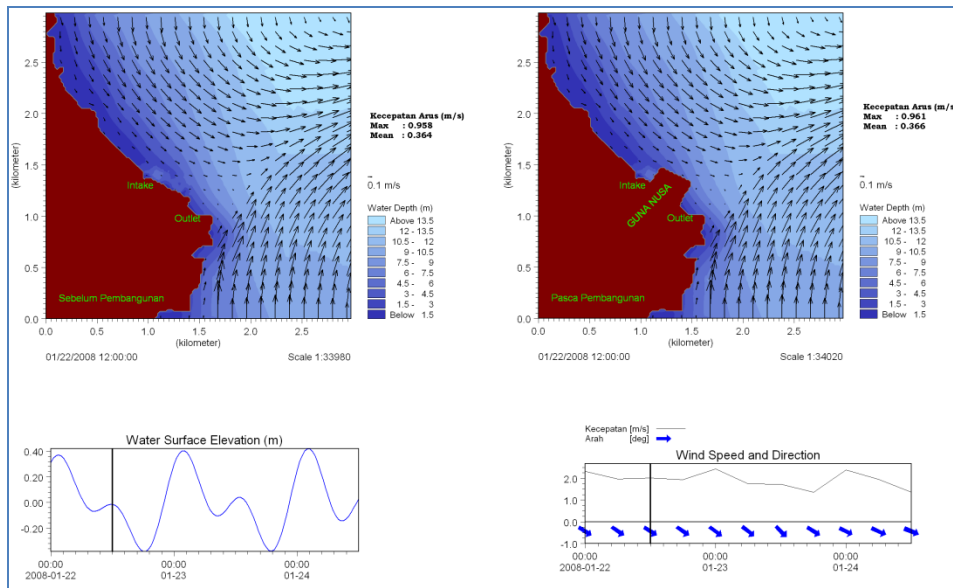
Arus merupakan massa air yang bergerak dapat dibangkitkan oleh berbagai gaya baik secara eksternal maupun internal. Pergerakan massa air atau arus ini merupakan media yang mampu memindahkan bahang dari sumbernya ke tempat lain. Untuk mengetahui kecepatan, arah dan pola gerakan arus dapat dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya dengan melakukan pengukuran langsung di laut (metode euler atau langrangian), membuat model simulasi menggunakan persamaan matematika dengan bantuan komputer melalui pemahaman karakteristik fisika air laut dan faktor-faktor pembangkitnya.

Pola arus yang terjadi di perairan Teluk Banten dipengaruhi oleh fenomena pasang-surut (pasut) dan angin musim (monsoon) yang terjadi di Indonesia khususnya di Laut Jawa (Wyrski, 1961; Hosoya and Muchari, 1986; Qu *et al.*, 2005). Dalam model simulasi arus ini sangat mempertimbangan kondisi tersebut agar mendapatkan kondisi yang sesungguhnya di perairan pantai Desa Margasari, Pulo Ampel, Serang-Banten.

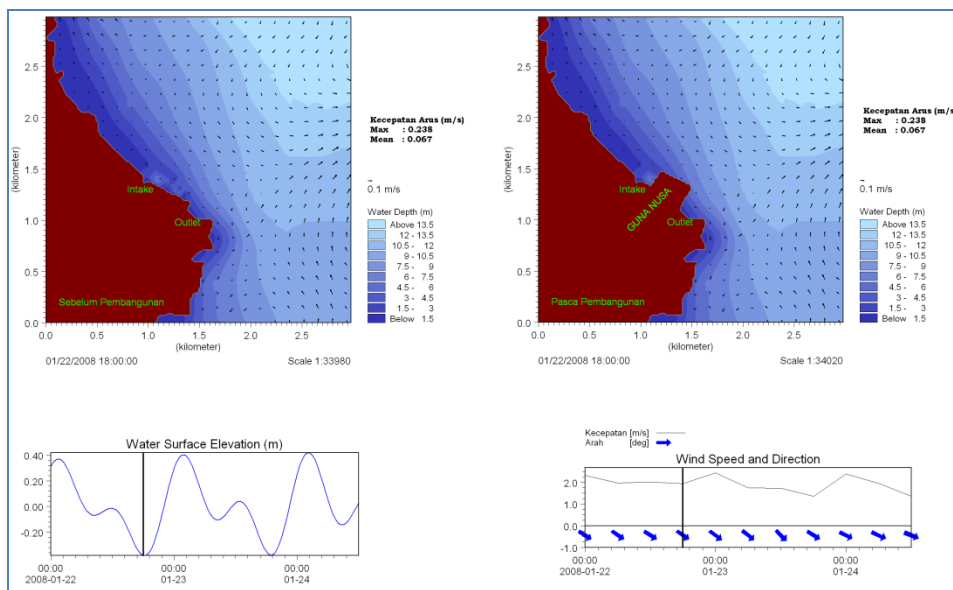
Gambar 8 sampai dengan Gambar 11 merupakan pola arus hasil simulasi

pada musim barat pada empat posisi muka air yang berbeda baik pada saat pra dan pasca reklamasi, yakni saat muka laut menuju surut minimum, surut minimum, muka laut menuju pasang maksimum dan saat pasang maksimum. Perbedaan pola arus saat menuju surut minimum dan pasang maksimum sangat jelas. Saat muka laut menuju surut minimum massa air bergerak meninggalkan perairan pantai Desa Margasari. Sebaliknya, pada saat muka laut menuju pasang maksimum massa air bergerak mendekati pantai, sebagian bergerak ke arah barat laut sejajar pantai dan sebagian bergerak ke arah selatan dengan kecepatan arus berkisar antara 0,1 -0,9 m/det.

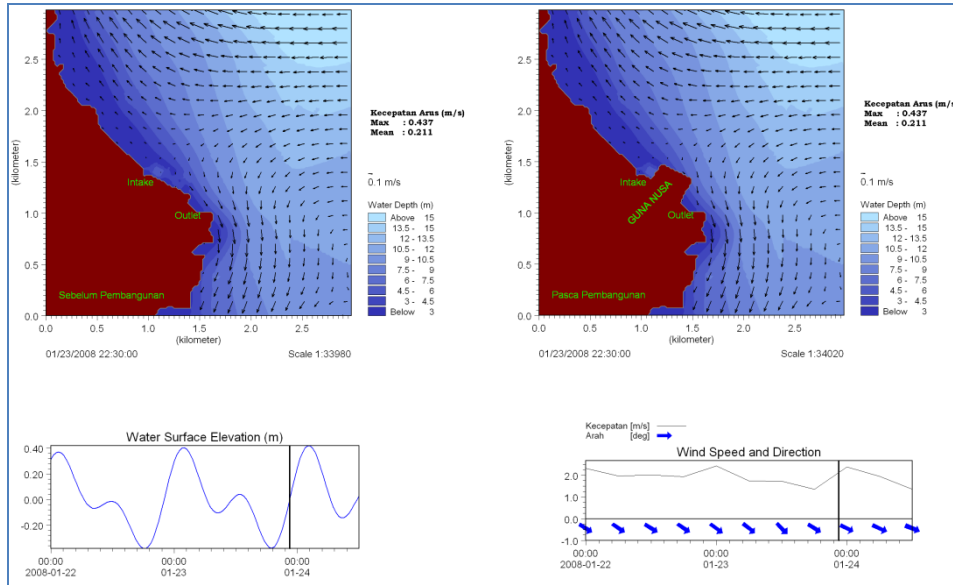
Pada musim timur juga dilakukan simulasi yang sama, pada empat posisi muka air yang berbeda. Gambar 12 sampai dengan Gambar 15 merupakan hasil simulasi arus pada musim timur, dimana pola arus secara umum terlihat sama. Pada saat air laut menuju surut maksimum massa air terlihat bergerak menjauhi pantai, sebaliknya pada saat muka laut menuju pasang maksimum massa air bergerak mendekati pantai. Ketika mendekati pantai massa air bergerak ke barat laut sejajar pantai, sebagian lainnya bergerak ke selatan.



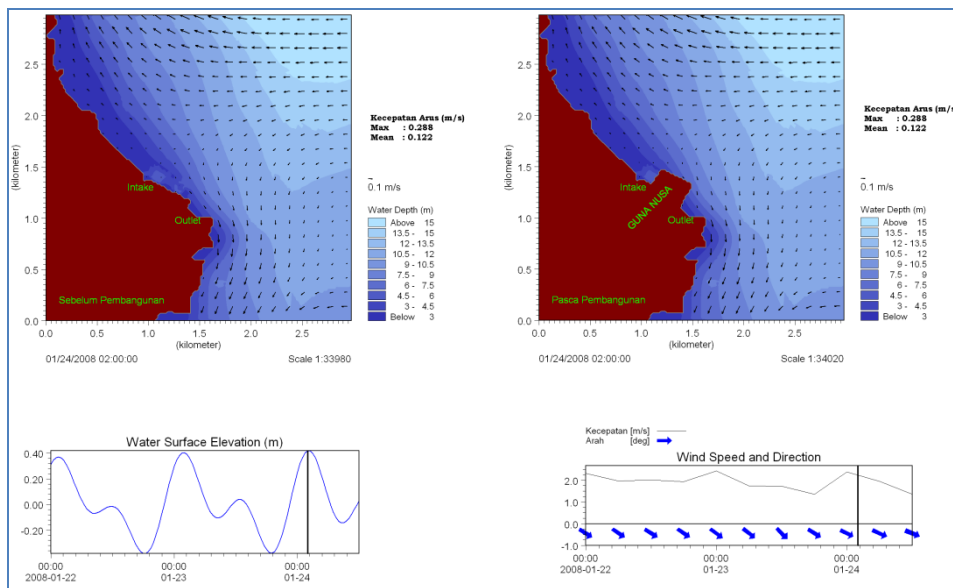
Gambar 8. Pola arus hasil simulasi saat MSL menuju surut minimum pada saat musim barat (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)



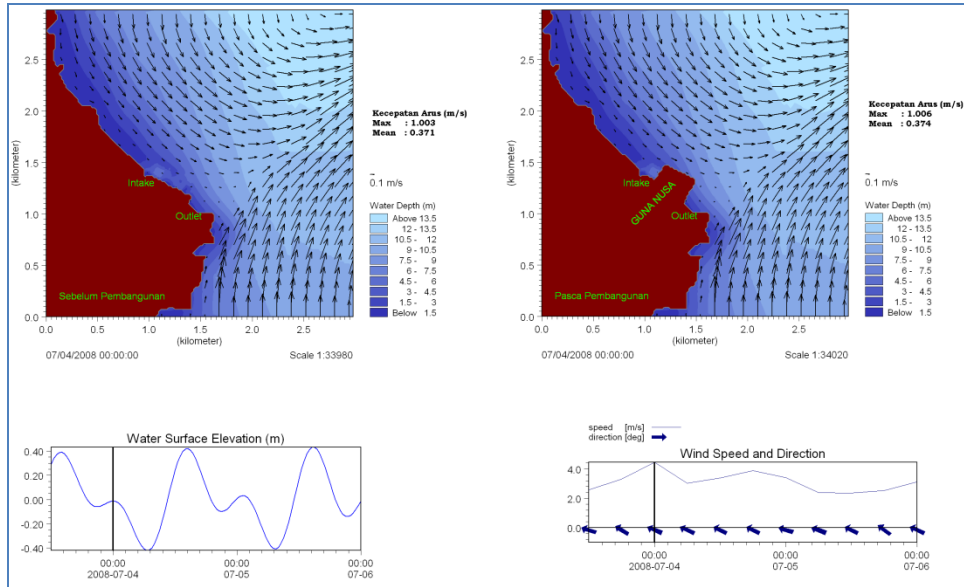
Gambar 9. Pola arus hasil simulasi saat surut minimum pada saat musim barat (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)



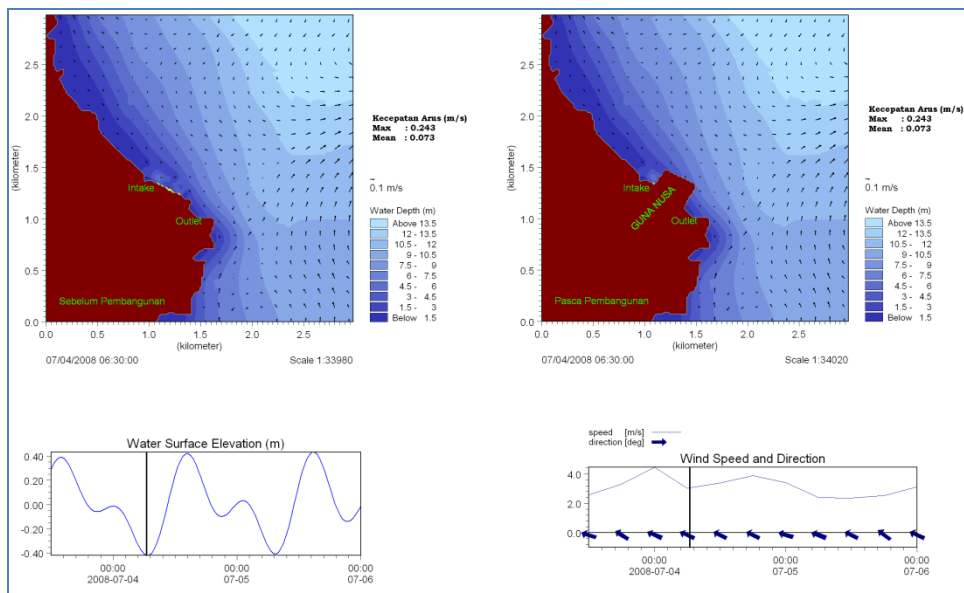
Gambar 10. Pola arus hasil simulasi saat MSL menuju pasang maksimum pada saat musim barat (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)



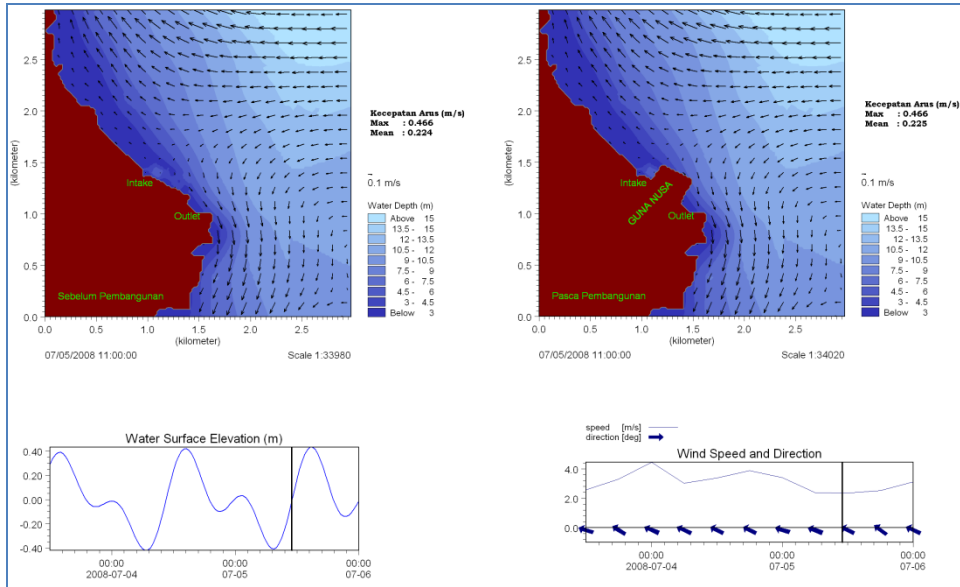
Gambar 11. Pola arus hasil simulasi saat pasang maksimum pada saat musim barat (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)



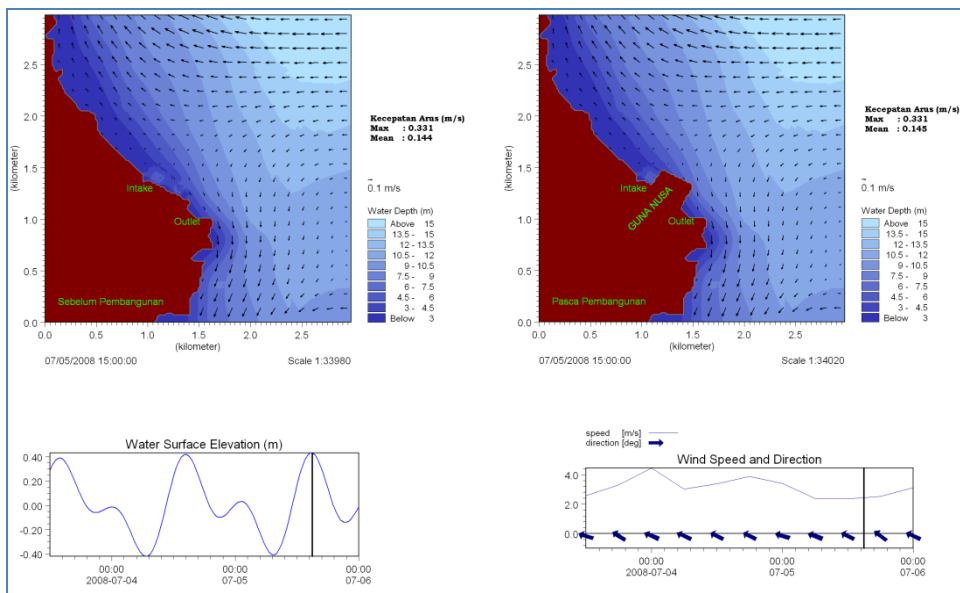
Gambar 12. Pola arus hasil simulasi saat MSL menuju surut minimum pada saat musim timur (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)



Gambar 13. Pola arus hasil simulasi saat surut minimum pada saat musim timur (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)



Gambar 14. Pola arus hasil simulasi saat MSL menuju pasang maksimum pada saat musim timur (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)



Gambar 15. Pola arus hasil simulasi saat pasang maksimum pada saat musim timur (Panel kiri atas sebelum reklamasi, Panel Kanan atas sesudah reklamasi, panel kiri bawah posisi muka laut, dan panel kanan bawah adalah kecepatan dan arah angin)

Tabel 2. Kecepatan arus hasil simulasi untuk musim barat dan timur pada empat posisi muka laut berbeda baik sebelum dan setelah reklamasi

MUSIM	Posisi Muka Laut		Kecepatan Arus (m/s)	
			Sebelum Reklamasi	Setelah Reklamasi
BARAT	MSL ST	Maksimum	0.958	0.961
		Rata-rata	0.364	0.366
	ST	Maksimum	0.238	0.238
		Rata-rata	0.067	0.068
	MSL PT	Maksimum	0.437	0.437
		Rata-rata	0.211	0.211
	PT	Maksimum	0.288	0.288
		Rata-rata	0.122	0.122
TIMUR	MSL ST	Maksimum	1.003	1.006
		Rata-rata	0.371	0.374
	ST	Maksimum	0.243	0.243
		Rata-rata	0.073	0.073
	MSL PT	Maksimum	0.466	0.466
		Rata-rata	0.224	0.225
	PT	Maksimum	0.331	0.331
		Rata-rata	0.144	0.145

**Keterangan:**

MSL ST= muka laut di *Mean Sea Level* menuju titik surut minimum

ST = muka laut di titik surut minimum

MSL PT= muka laut di Mean Sea Level menuju titik pasang maksimum

PT = muka laut di titik pasang maksimum

Kecepatan arus pada saat posisi muka laut di titik *Mean Sea Level* menuju Surut terendah (MSL ST), di titik surut terendah (ST), Mean Sea Level menuju pasang tertinggi (MSL PT) dan pasang tertinggi (PT) baik musim barat maupun musim timur serta kondisi sebelum reklamasi dan setelah reklamasi ditabulasikan pada Tabel 2 diatas. Secara umum terlihat bahwa adanya kegiatan reklamasi terutama saat muka laut menuju titik surut minimum pada musim timur dapat meningkatkan kecepatan arus sebesar 0,003 m/det. Pada posisi muka laut lainnya di kedua musim tidak terjadi perubahan kecepatan arus.

### 3.4. Hasil Simulasi Dispersi Bahang

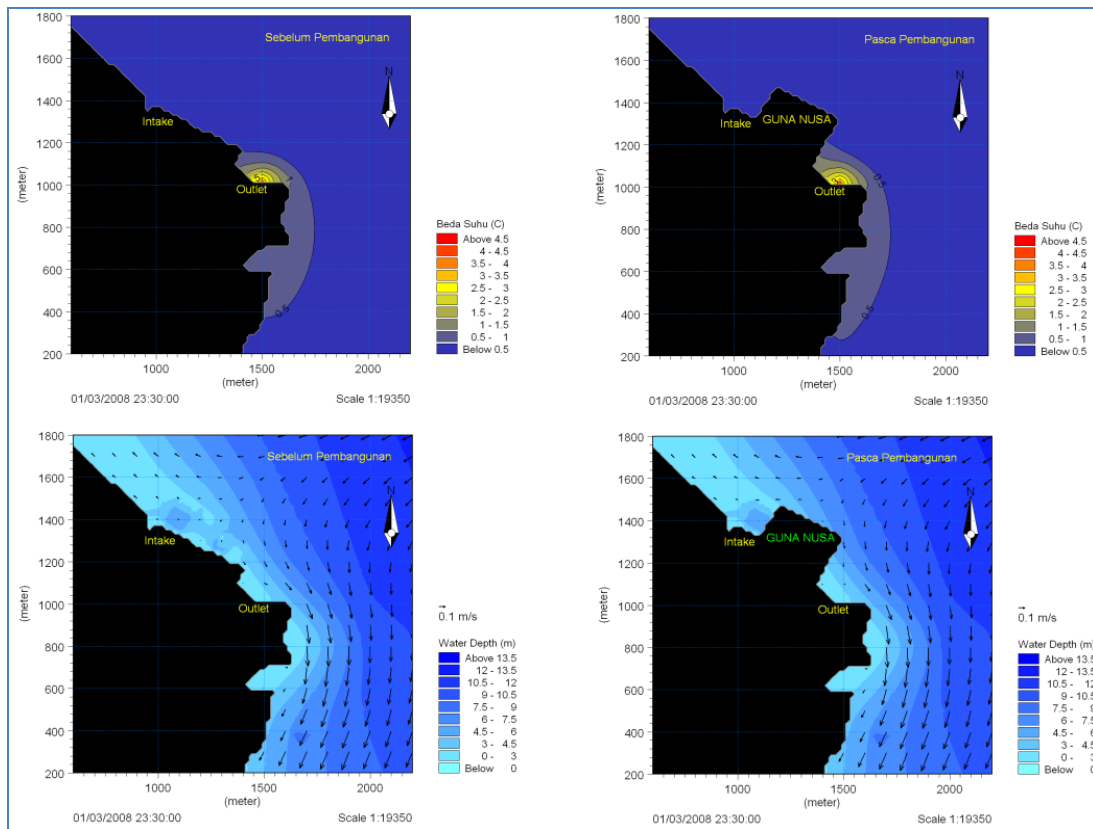
Gambar 16 dan Gambar 17 merupakan beberapa contoh hasil dispersi bahang setelah di-*running* selama 15 hari, baik pada musim barat dan musim timur serta sebelum dan setelah reklamasi. Setiap Gambar disajikan dengan 4 panel, panel kiri atas menunjukkan hasil dispersi bahang sebelum dilakukan reklamasi pantai, panel kanan atas menggambarkan dispersi bahang setelah reklamasi. Pada panel kiri bawah menggambarkan pola arus sebelum ada reklamasi dan panel kanan bawah setelah reklamasi. Skala warna yang ada disisi kanan pada kedua panel diatas menunjukkan skala suhu,

nilai suhu meningkat ke arah warna merah, sebaliknya suhu menurun bila warna biru. Skala warna yang ada disisi kanan pada panel-panel dibawah menunjukkan kedalaman laut yang berubah-ubah sesuai dengan tinggi muka laut diakibatkan oleh fenomena pasang surut. Kedalaman laut bertambah tentu pada periode pasang ditandai dengan warna biru, sebaliknya kedalaman laut berkurang pada periode surut, ditandai dengan warna biru muda.

Dispersi bahang yang keluar pada outlet pembuangan air hasil proses *cooling water system* ditandai dengan warna merah kira-kira 150 m sebelah selatan batas reklamasi, baik pada

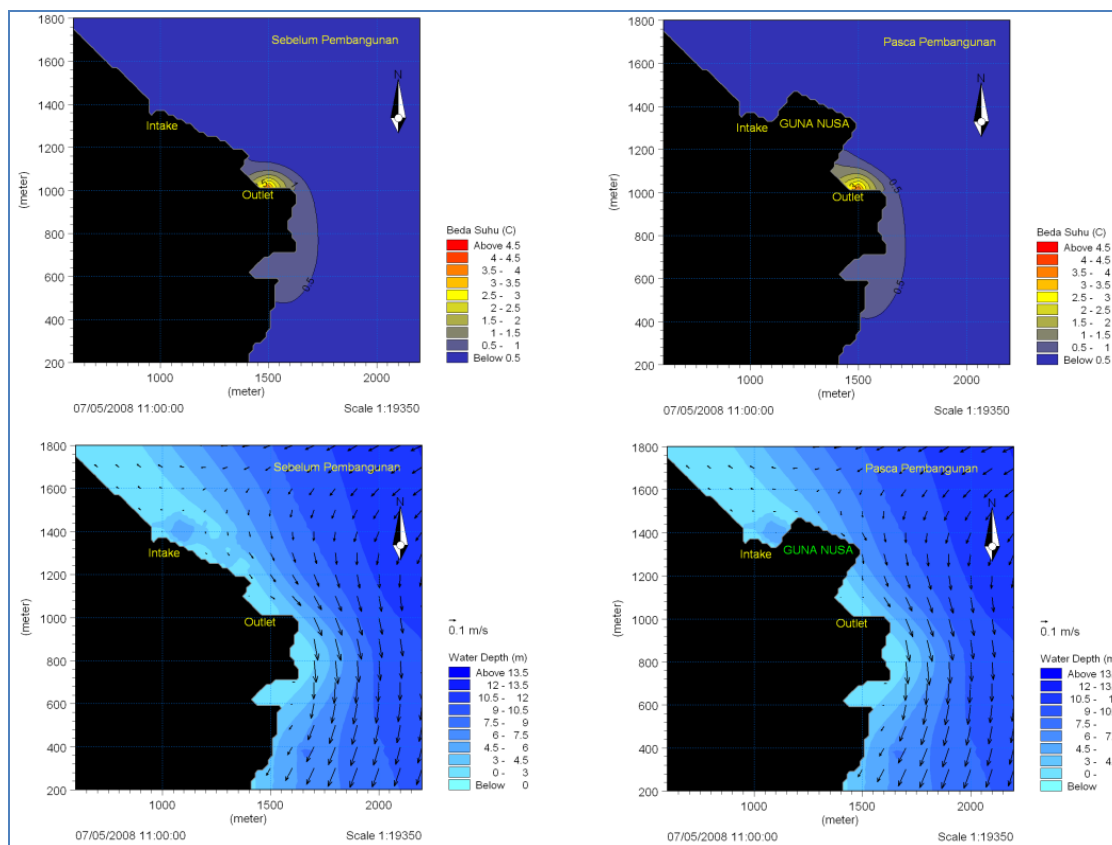
kondisi pra dan pasca-reklamasi sebarannya terlihat bergerak kearah selatan menyusur garis pantai. Garis isothermal 0,5 °C terlihat memanjang dan bergerak ke selatan sejauh 600 meter pada periode tidak ada reklamasi. Bertambah ke selatan kira-kira sampai 750 m dari titik outlet pada periode pasca reklamasi. Sebaran thermal dari garis pantai hamper sama antara sebelum dan setelah reklamasi.

Kondisi yang hampir sama terlihat pada skenario musim timur (Gambar 17), yang berbeda adalah jarak maksimum sebaran isothermal 0,5 °C lebih pendek bila dibandingkan dengan musim barat.



Gambar 16. Sebaran panas (delta suhu 5 °C) terjauh hasil simulasi pada saat musim barat sebelum dan setelah reklamasi.





Gambar 17. Sebaran panas (delta suhu  $5^{\circ}\text{C}$ ) terjauh hasil simulasi pada saat musim timur sebelum dan setelah reklamasi.

#### IV. KESIMPULAN

Hasil model simulasi arus mempunyai pola yang sama yakni bergerak dengan sumbu utama barat laut dan tenggara, namun besaran kecepatan arus dari model lebih kecil bila dibandingkan dengan hasil pengukuran arus di lapangan.

Pola dispersi bahang hasil buangan dari proses pendinginan turbin PLTGU yang di-*running* selama 15 hari baik pada saat musim timur dan musim barat hampir sama, yaitu 600-750 ke arah selatan dengan beda suhu  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Data pasut dari NAO tide kurang baik digunakan di perairan pantai yang dangkal dan memiliki konfigurasi yang kompleks, seperti di perairan sisi barat Teluk Banten.

#### SARAN

Untuk verifikasi model, data arus dan suhu hasil pengukuran di lapangan sebaiknya diukur pada setiap lapisan kedalaman, kemudian dirata-ratakan berdasarkan kedalaman. Ketika diverifikasi dengan data dari model hasilnya lebih baik.

Untuk input data pada batas terbuka di perairan dangkal dan mempunyai konfigurasi pantai yang kompleks, sebaiknya tidak menggunakan data pasut dari NAO.

#### Ucapan Terima Kasih

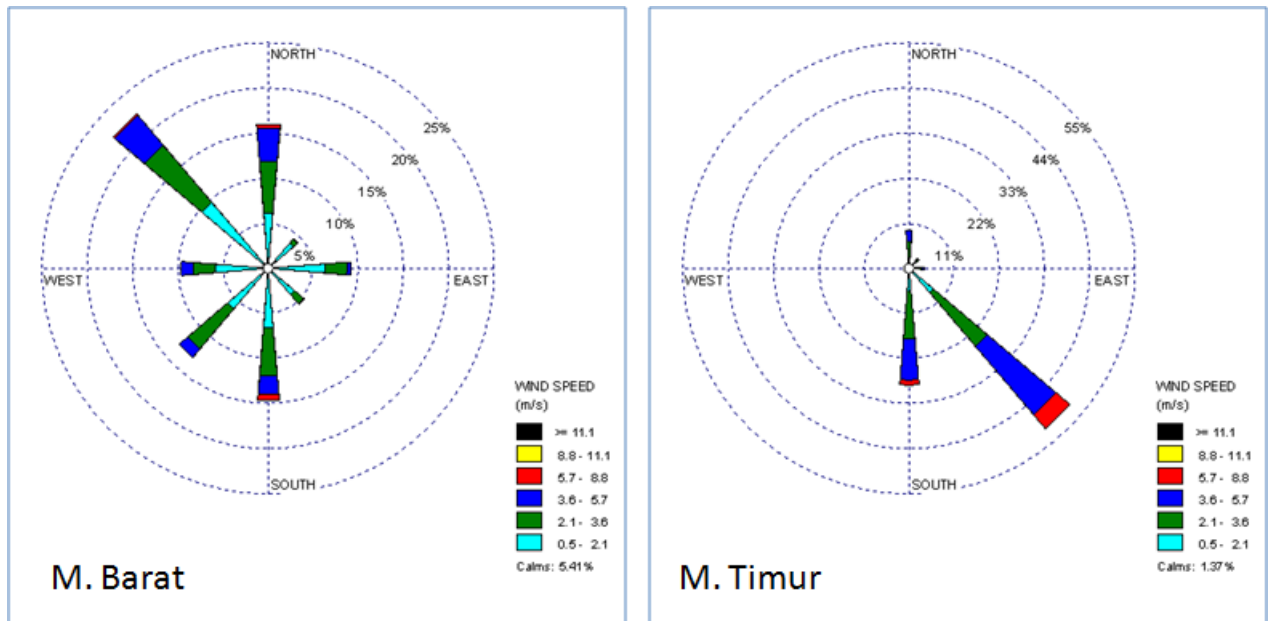
Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Gunanusa dan LPPM IPB atas kesempatan yang diberikan dalam studi kajian sebaran bahang hasil

buangan air pendingin PLTGU Cilegon di Serang, Provinsi Banten.

### Daftar Pustaka

- Abbott, M.B., H.M. Petersen and O. Skovgard. 1978. On the Numerical Modelling of Short Waves in Shallow Water. *Journal of Hydraulic Research*, 16(3).
- Chapra, 1997. Surface water quality modelling. McGraw-Hill. Singapore.
- Hydrodynamics Module of MIKE 21 Flow Model, 2007. Scientific Documentation, DHI Water Environmental. Denmark. 58 p.
- Hosoya, M. and M. Muchari. 1986. Survey on the oceanographical conditions in Banten Bay October 1979 to September 1980. *In* Scientific Report of Mariculture Research and Development Project (ATA-192) in Indonesia March 1986. JICA Jakarta. 289-321 p.
- Kowalik, Z. dan T.S. Murty. 1993. Numerical modelling of ocean dynamics. Advance series on ocean engineering, vol. 5. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore
- Melor, G. L. 1998. User guide for a three dimensional primitive equation, numerical ocean model. Princeton University.
- MIKE. 2005 Coastal Hydraulics and Oceanography, Hydrodynamic Module, Scientific Documentation, DHI Software.
- MIKE. 2005. Environmental Hydraulics Advection, Mud Transport Module, User Guide, DHI Software.
- MIKE. 205. Environmental Hydraulics Advection, Mud Transport Module, Scientific Background, DHI Software.
- MIKE 21 Environmental Hydraulics Advection, Dispersion Module, Reference Manual, DHI Software.
- MIKE. 2005. Environmental Hydraulics Advection, Dispersion Module, scientific Documentation, DHI Software.
- Qu, T., Yan D., J. Strachan, G. Meyers and J. Slingo. 2005. Sea surface temperature and its variability in the Indonesian region. *Oceanography*, 18(4):50-61.
- Ramming, H-G. dan Z. Kowalik. 1980. Numerical Modelling of Marine Hydrodynamics; Applications to Dynamic Physical Processes. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam
- Wyrcki, K. 1961. Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report. Vol. 2. The University of California Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California.

Lampiran Gambar 1. *Windrose* diolah dari data angin selama 10 tahun terakhir



Lampiran Gambar 2. Grid daerah model sebelum dan setelah kegiatan reklamasi

