

Pengumpulan data masukan pemodelan dengan modul model selain modul model HD dengan *decoupled* masih terus dilakukan dan terus diupaya berkoordinasi dengan ESC dan INPEX-Masela. Sementara itu, perkembangan status pengumpulan dan kelengkapan data masukan pemodelan dengan modul model AD, MT dan OS dapat dilihat pada **Tabel 3**.

5 Metodologi

Pemodelan hidro-oseanografi pada dasarnya adalah model numerik-matematis yang dibangun berdasarkan proses-proses fisis-kimiawi-biologis secara dinamis berdasarkan ruang dan waktu yang terjadi dalam kondisi sebenarnya di perairan laut. Model numerik ini digunakan untuk menyederhanakan berbagai parameter yang terlibat dalam suatu fenomena di perairan. Pada Sub Bab Metodologi akan menyajikan metodologi yang digunakan pada kegiatan studi ini yaitu meliputi pemodelan dengan menggunakan modul model HD, AD/TR, MT, SW dan OS secara lebih mendetail.

5.1 Pemodelan Hidrodinamika (HD)

Pemodelan HD digunakan untuk mensimulasikan pola sirkulasi arus laut sebagai dasar untuk gaya pembangkit pergerakan modul model Adveksi-Dispersi (AD) atau *Transport* (TR), *Mud Transport* (MT), *Spectral Wave* (SW) dan *Oil Spill* (OS) dimana secara bersamaan digabungkan (*coupled*) dengan modul model Hidrodinamika (HD). Oleh karena itu, ketepatan luaran modul model HD sangat menuntut hasil validasi model yang baik agar luaran modul model AD, MT, SW dan OS dapat menghasilkan luaran model yang baik. Gaya pembangkit, parameterisasi model dan syarat batas (*boundary condition*) yang dibutuhkan sebagai data masukan modul model HD ini adalah sebagai berikut:

1. Garis pantai.
2. Batimetri.
3. Parameter Flood and Dry
4. Densitas air laut.
5. Viskositas Eddy.
6. Kekasaran dasar perairan.
7. Parameter Coriolis.
8. Angin permukaan laut.
9. Curah hujan dan penguapan.
10. Radiasi gelombang.
11. Struktur tepian pantai berupa bendungan (*weir*), gorong-gorong (*culvert*), gerbang kanal (*gate*), tanggul (*dike*), dermaga (*pier*) ataupun turbin air (*turbine*).
12. Kondisi awal (*initial condition*) tinggi muka laut.

Persamaan numerik utama yang digunakan untuk Modul Hidrodinamika adalah sebagai berikut:

Persamaan kontinuitas yaitu sebagai berikut:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Persamaan momentum pada komponen x dan y dijabarkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} &= fu - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_x}{\partial x} - \\ &\quad \left[\frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_t S \right] \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial z} &= -fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_y}{\partial y} - \\ &\quad \left[\frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_t S \right] \end{aligned}$$

dimana,

t	= Waktu.
x, y & z	= Koordinat Kartesian.
η	= Tinggi Muka Laut.
d	= Kedalaman Sungai.
h	= (η + h)
u, v & w	= Komponen Kecepatan Arus arah Zonal, Meridional dan Vertikal.
f	= Komponen Koriolis (2Ω sin φ) dimana Ω adalah Kecepatan Rotasi Bumi dan φ adalah posisi lintang.
g	= Percepatan Gaya Gravitasi Bumi.
ρ	= Densitas Air Sungai.
Sxx, Sxy, Syx & Syy	= Radiasi Tensor Tekanan Massa Air pada Komponen xx, xy, yx dan yy.
vt	= Turbulensi Vertikal.
Pa	= Tekanan Udara.
ρ0	= Referensi Densitas Air.
S	= Debit dari Sumber.
Us & Vs	= Kecepatan Arus Komponen Zonal dan Meridional ketika memasuki Sistem.

Persamaan gaya pembangkit tekanan muka air pada komponen zonal dan meridional:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \\ F_y &= \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

dimana,

A	= Viscositas Horizontal Eddy.
---	-------------------------------

Syarat batas di permukaan dan dasar perairan dijabarkan sebagai berikut:

Pada $z = \eta$, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 V_t} (\tau_{ix}, \tau_{iy})$$

Pada $z = -d$, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 V_t} (\tau_{ix}, \tau_{iy})$$

dimana,

$$\begin{aligned} \tau_{sx} \text{ dan } \tau_{sy} &= \text{Friksi Gaya Tekanan Angin.} \\ \tau_{bx} \text{ dan } \tau_{by} &= \text{Friksi Gaya Tekanan Dasar Perairan.} \end{aligned}$$

Vertikal integral dari persamaan kontinuitas lokal dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS + P - E$$

$$hu = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad hv = \int_{-d}^{\eta} v dz$$

dimana,

$$\begin{aligned} \hat{P} &= \text{Laju Presipitasi.} \\ \hat{E} &= \text{Laju Evaporasi.} \\ \bar{u} \text{ dan } \bar{v} &= \text{Depth-Averaged Komponen Zonal dan Meridional Kecepatan Arus.} \end{aligned}$$

Massa air diasumsikan tidak dapat dimampatkan (*incompressible*), sehingga densitas massa air tidak tergantung oleh tekanan. Oleh karena itu, persamaan densitas massa air yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\rho = \rho(T, s)$$

Transport difusi suhu (T) dan Salinitas (s) dijabarkan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S$$

dimana,

$$\begin{aligned} D_v &= \text{Koefisien Difusi Vertikal Turbulen.} \\ \hat{H} &= \text{Koefisien Pertukaran Bahang dengan Atmosfer.} \end{aligned}$$

Difusi horizontal (F) dengan sumber suhu (T_s) dan salinitas (S_s) serta koefisien difusi horizontal (D_h) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

dimana D_h dan D_v (difusi vertikal) dengan Prandtl number (σ_T) dijabarkan dengan persamaan sebagai berikut (Rodi, 1984):

$$D_h = \frac{\lambda}{\sigma_T}$$

dan

$$D_v = \frac{v_t}{\sigma_T}$$

Syarat batas suhu di permukaan dan dasar perairan menggunakan persamaan sebagai berikut:

Pada $z = \eta$, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{\rho_s c_p} + T_p \hat{P} - T_s \hat{E}$$

Pada $z = -d$, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0$$

dimana,

$$\begin{aligned} Q_n &= \text{Fluks Bahang Permukaan Bersih.} \\ C_p &= \text{Bahang Spesifik Massa Air.} \end{aligned}$$

Syarat batas salinitas di permukaan dan dasar perairan menggunakan persamaan sebagai berikut:

Pada $z = \eta$, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0$$

Pada $z = -d$, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0$$

dimana persamaan evaporasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\hat{E} = \begin{cases} \frac{q_v}{\rho_0 l_v} & q_v > 0 \\ 0 & q_v \leq 0 \end{cases}$$

dengan,

$$\begin{aligned} q_v &= \text{Fluks Bahang Tersembunyi.} \\ l_v &= \text{Bahang Tersembunyi Massa Air.} \end{aligned}$$

Viskositas Eddy vertikal untuk turbulen menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$v_t = k U_* h \left(c_1 \frac{z+d}{h} + c_2 \left(\frac{z+d}{h} \right)^2 \right)$$

dimana,

$$\begin{aligned} U_{\tau} &= \text{Max}(U_{\tau s}, U_{\tau b}) \\ c_1 \text{ dan } c_2 &= \text{Standar Konstanta Profil Parabolic.} \\ U_{\tau s} \text{ dan } U_{\tau b} &= \text{Friksi Kecepatan pada Permukaan dan Dasar Perairan.} \end{aligned}$$

Stratifikasi pada perairan viskositas Eddy menggunakan persamaan sebagai berikut (Munk dan Anderson, 1948):

$$N_e = N_s (1 + \alpha R_i)^{-0.5}$$

dengan,

$$R_i = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)^{-0.5}$$

dimana,

$$\begin{aligned} R_i &= \text{Gradient Lokal Richardson Number.} \\ a \text{ dan } b &= \text{Konstanta.} \end{aligned}$$

Viskositas Eddy horizontal untuk turbulen menggunakan persamaan sebagai berikut (Smagorinsky, 1963):

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2 S_y S_y}$$

dimana,

$$\begin{aligned} c_s &= \text{Konstanta.} \\ l &= \text{Panjang dan Laju Deformasi} \end{aligned}$$

dengan,

$$S_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j} + \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \right) \quad (i, j = 1, 2)$$

Luaran dari modul model HD dapat langsung dimanfaatkan dengan cara digabungkan (*coupled*) dengan modul model TR, MT dan TM dengan luaran modul model HD yang dapat dihasilkan adalah sebagai berikut:

1. Variasi tinggi muka laut (*surface elevation*).
2. Kedalaman total kolom air (*total water depth*).
3. Arus zonal.
4. Arus meridional.
5. Fluks P.
6. Fluks Q.

7. dan variabel parameterisasi model.

Luaran model ini dapat disimpan dalam bentuk basis data untuk melakukan pemodelan dengan menggunakan modul model AD/TR, MT, SW dan OS yang membutuhkan luaran modul model HD dengan cara yang disebut *decoupling* model. Luaran ini yang dimanfaatkan oleh modul model tersebut tanpa harus mengulang lagi tahapan untuk menjalankan simulasi HD yang pada dasarnya memang membutuhkan waktu komputasi yang cukup lama.

5.2 Pemodelan Adveksi-Dispersi (AD) atau *Transport* (TR)

Modul adveksi-dispersi mensimulasikan proses perpindahan (transport), penyebaran (dispersion) dan pengurangan (decay) dari bahan atau substansi atau material terlarut atau tersuspensi. Bahan atau substansi atau material (disebut juga komponen) dapat berupa bahan pencemar laut yang bersifat kimia, fisik atau biologi. Pergerakan massa air dari modul adveksi-dispersi berasal dari modul hidrodinamika dengan menggabungkan (coupled model) kedua modul tersebut. Gabungan modul ini dapat diterapkan dalam bentuk 2D (2 dimensi) dan 3D (3 dimensi) maupun dalam bentuk grid (rectangular grid) ataupun mesh (Flexible mesh / Finite Mesh). Tipe dari komponen yang akan dimodelkan penyebarannya dengan jenis grid baik model 2D maupun 3D terdiri dari tipe Conservative, Decaying, Heat Dissipating dan Heat Exchange, sedangkan pada jenis mesh dituangkan dalam modul komponen transport baik model 2D maupun 3D.

Data-data yang dibutuhkan untuk mensimulasikan model adveksi-dispersi terdiri dari data dasar untuk hidrodinamika meliputi batimetri, inisial tinggi muka laut, viskositas eddy (Flux atau Velocity based) dan kekasaran dasar perairan (Manning Number atau Chezy Number) dengan gaya pembangkit hidrodinamika meliputi pasang-surut, angin, debit dan refraksi gelombang (Stationary atau Quasi Stationary). Data yang dibutuhkan untuk modul adveksi-dispersi meliputi jenis komponen dan konsentrasi komponen dari sumber-sumbernya (point sources) yang akan dimodelkan penyebarannya, inisial konsentrasi di seluruh perairan yang akan dimodelkan, konsentrasi yang terdeposisi baik di permukaan air dengan sumber masukan komponen dari udara maupun dari dasar perairan, faktor pengurangan konsentrasi komponen (decay component concentration), koefisien penyebaran panas (Heat Dissipation) untuk simulasi penyebaran panas dan koefisien penyebaran (Dispersion Coeff.) dengan dua opsi tidak tergantung terhadap arus maupun tergantung oleh besaran arus. Luaran dari model adalah konsentrasi penyebaran tiap komponen dari sumber-sumbernya ke perairan yang akan dimodelkan.

Pemodelan dengan menggunakan modul model *Transport* (TR) atau yang dahulu lebih dikenal sebagai pemodelan dengan menggunakan modul model *Advection-Dispersion* (AD) adalah pergerakan material atau bahan terlarut dalam air baik senyawa konservatif maupun non konservatif yang bersifat

adveksi dan dispersi dengan memanfaatkan pola gerak aliran arus dengan menggunakan modul model Hidrodinamika (HD). Data masukan yang dibutuhkan untuk mensimulasikan modul model AD/TR adalah sebagai berikut:

1. Konsentrasi komponen bahan limbah terlarut berupa senyawa konservatif dari berbagai sumber buangan limbah.
2. Koefisien dispersi horizontal.
3. Peluruhan konsentrasi bahan limbah terlarut berupa senyawa konservatif.

Persamaan numerik utama yang digunakan adalah persamaan transport yaitu sebagai berikut:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_r S$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial S}{\partial z} \right) + s_s S$$

dimana,

T = suhu perairan.
 S = salinitas perairan.

dengan persamaan difusi yang digunakan yaitu sebagai berikut:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

Dimana,

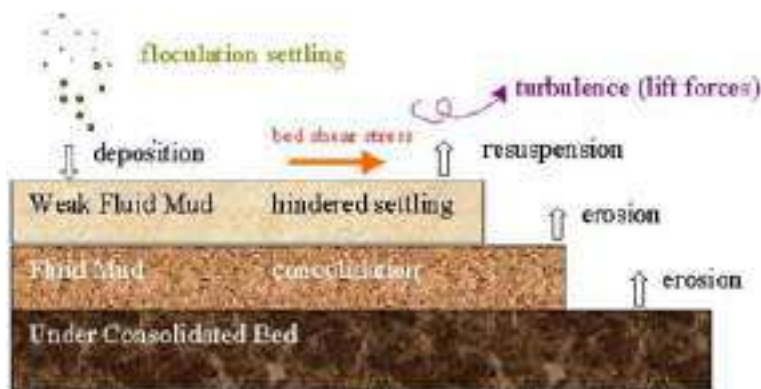
t = waktu.
 x, y, z = koordinat kartesian.
 u, v, w = kecepatan komponen arus.
 D_v = koefisien difusi dari turbulen vertikal (koefisien eddy).
 $\hat{H}$ = perubahan suhu buangan karena adanya transfer bahang dari dan ke atmosfer.
 S = debit dari sumber buangan panas.
 T_s, S_s = nilai suhu dan salinitas di sumber buangan panas.
 F_T, F_s, F_c = fungsi difusi horizontal.
 D_h = koefisien difusi horizontal.
 h = kedalaman.

Luaran dari modul model TR ini adalah berupa sebaran perubahan konsentrasi limbah senyawa konservatif dari sumber limbah buangan baik pada saat pra konstruksi, konstruksi maupun operasi di OLNG dan FPSO.

5.3 Pemodelan *Mud Transport* (MT)

Pemodelan dengan menggunakan modul model MT dimanfaatkan untuk mensimulasikan pergerakan butiran sedimen dalam berbagai macam ukuran pada kolom maupun dasar perairan. Modul model MT melibatkan proses dinamika sedimen di kolom perairan dan dasar perairan (**Gambar 10**). Proses dinamika sedimen tersebut meliputi:

1. Proses *floculation* yaitu bertambahnya densitas sedimen tersuspensi karena proses adsorpsi dan absorpsi sedimen sehingga densitas sedimen di kolom air lebih berat daripada massa air dan terdisposisi dengan kecepatan tertentu mengendap ke dasar perairan.
2. Adanya tekanan gesekan dasar perairan oleh massa air sehingga sedimen yang telah mengendap akan menggelinding diikuti dengan adanya turbulen di kolom air mengakibatkan sedimen tersebut tersuspensi kembali ke kolom air.
3. Proses dinamika sedimen tersebut dapat diikuti pada lapisan sedimen berikutnya karena adanya gaya pembangkit erosi sedimen dasar perairan.
4. Sedimen yang telah tersuspensi kembali melalui proses resuspensi maupun adanya erosi akan kembali lagi mengalami *floculation* dan terdeposisi kembali.



Gambar 10. Sistematika Proses Dinamika Sedimen di Kolom Air (Sedimen Tersuspensi) dan di Dasar Perairan.

Keunggulan modul model MT ini dapat mengakomodir kerumitan proses dinamika sedimen kolom dan dasar perairan yaitu sebagai berikut:

1. Dapat memodelkan satu atau lebih fraksi sedimen (maksimum 7 fraksi) secara bersamaan.
2. Lapisan sedimen dasar dapat terdiri dari satu atau lebih lapisan sedimen (maksimum 8 lapis) dengan proses antar lapisan secara bersamaan.
3. Melibatkan interaksi arus dan gelombang.
4. Proses *floculation* sedimen telah dilibatkan.
5. Penggelindingan butiran sedimen di dasar perairan (*hindered settling*) telah dilibatkan.
6. Dapat melibatkan fraksi sedimen dengan densitas sedimen yang besar (pasir).

7. Berinteraksi antara dinamika di kolom air dan di dasar perairan.
8. Perubahan morfologi dasar perairan telah dilibatkan.

Data masukan yang dibutuhkan untuk mensimulasikan modul model MT cukup kompleks dengan berbagai macam variabel, parameterisasi dan properti sedimen itu sendiri. Data masukan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Jumlah fraksi sedimen (maksimum 8 fraksi sedimen).
2. Jumlah jenis lapisan sedimen dasar perairan (maksimum 12 lapisan).
3. Parameter karakteristik sedimen di kolom perairan yang meliputi laju pengendapan butiran pasir, densitas sedimen tersuspensi, konsentrasi sedimen yang terflokulasi, konsentrasi sedimen yang tergelincir di atas lapisan atas dasar perairan, gaya kritis sedimen terdeposisi dan kecepatan laju sedimen terdeposisi.
4. Parameter karakteristik sedimen di dasar perairan yang meliputi koefisien sedimen tererosi, gaya kritis sedimen tererosi, densitas sedimen dasar perairan dan kekasaran dasar perairan.
5. Parameter gaya pembangkit gelombang meliputi tinggi gelombang periode gelombang dan arah gelombang.
6. Viskositas perairan.
7. Inisial kondisi dari karakteristik sedimen kolom dan dasar perairan.

Persamaan numerik utama yang digunakan untuk modul model MT adalah sebagai berikut:

Persamaan adveksi-dispersi MT dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} - \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} \cdot S$$

dimana,

$\bar{c}$	= Rata-rata Konsentrasi Kolom Perairan.
u dan v	= Kecepatan Arus Komponen Zonal dan Meridional.
D_x dan D_y	= Koefisien Dispersi.
h	= Kedalaman Perairan.
S	= Konstanta Deposisi/Erosi.
Q_L	= Debit Sumber Sedimen.
C_L	= Konsentrasi Sumber Sedimen.

Proses deposisi sedimen mengikuti persamaan sebagai berikut (Krone, 1962):

$$S_{01} = w_s c_b$$

dimana,

w_s	= Settling Velocity.
c_b	= Konsentrasi di dekat Dasar Perairan.

P_d = Probabilitas Deposisi Sedimen.

dengan,

$$P_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} = \tau_b \leq \tau_{cd}$$

dimana,

τ_b = Tekanan Gesek Dasar Perairan.

τ_{cd} = Tekanan Gesek Kritis Dasar Perairan untuk Proses Deposisi.

Perhitungan *settling velocity* menggunakan persamaan sebagai berikut (Burt, 1986):

$$w_s = k c^\gamma$$

untuk

$$c \leq 10 \text{ kg/m}^3$$

dimana,

c = Volume Konsentrasi Sedimen.

k dan γ = Koefisien.

γ = Konstanta.

Persamaan yang digunakan untuk *hindered settling* sebagai berikut:

$$w_s = w_{s0} \frac{(1 - \Phi_s)(1 - \Phi_p)}{1 + 2.5\Phi}$$

dengan,

$$\Phi_p = \frac{c}{\rho_s}$$

dimana,

ρ_s = Densitas Butiran Sedimen.

Fluks sedimen dasar perairan menggunakan persamaan sebagai berikut :

Peclet number untuk konveksi vertikal dan transport melalui difusi sedimen, menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_e = \frac{C_{rc}}{C_{rd}}$$

dimana,

C_{rc} = Konveksi dengan Courant Number ($w_s \Delta t/h$).

C_{rd} = Difusi dengan Courant Number ($\overline{D_z} \Delta t/h^2$).

$\frac{w_s}{\overline{D_z}}$ = Rata-rata Settling Velocity Sedimen.

$\overline{D_z}$ = Rata-rata Difusitas Eddy.

Mekanisme transport sedimen antar lapisan sedimen dasar menggunakan persamaan sebagai berikut (Teeter, 1986):

$$\beta = \frac{c_b}{c}$$

dengan,

$$\beta = 1 + \frac{P_e}{1.25 + 4.75 P_e^{0.7}}$$

dan,

$$P_e = \frac{w_s h}{D_s} = \frac{\zeta w_s}{\kappa U_f}$$

dimana,

$$\begin{aligned} \kappa &= \text{Konstanta Von Karman's Universal.} \\ U_f &= \text{Kecepatan Friksi } (\sqrt{\tau_b / \rho}). \end{aligned}$$

Persamaan erosi sedimen dasar (S_E) menggunakan persamaan sebagai berikut (Parchure dan Mehta, 1985):

$$S_E = E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)^n, \tau_b > \tau_{ce}$$

dimana,

$$\begin{aligned} E &= \text{Tingkat Keerosian Sedimen Dasar.} \\ \tau_b &= \text{Tekanan Gesek Dasar Sedimen.} \\ \tau_{ce} &= \text{Tekanan Gesek Kritis Dasar Sedimen.} \\ n &= \text{Power Erosi.} \end{aligned}$$

dengan,

$$S_E = E \exp \left[\alpha (\tau_b - \tau_{ce})^m \right], \tau_b > \tau_{ce}$$

dimana,

$$\alpha = \text{Koefisien } (m / \sqrt{N}).$$

Berbagai macam variabel luaran dari modul model MT dapat dihasilkan sebagai gambaran dari proses fisis-dinamik sedimen di kolom perairan maupun dasar perairan. Luaran variabel-variabel tersebut adalah sebagai berikut:

1. Konsentrasi sedimen tersuspensi.
2. Perubahan ketebalan sedimen dasar perairan.
3. Perubahan berat sedimen dasar perairan.
4. Lapisan dasar perairan.
5. Laju erosi sedimen dasar perairan.
6. Laju deposisi sedimen dasar perairan.

7. Deposisi bersih sedimen dasar perairan.
8. Total Akumulasi bersih sedimen dasar perairan.

Pada studi ini luaran modul model MT akan difokuskan terkait dengan hal-hal sebagai berikut:

1. Potensi sedimentasi dari kegiatan pengerukan di Dermaga Utama dan Pioneer, penimbunan material sumber sedimen untuk membangun *causeway*, penggalian sedimen untuk pipa dasar perairan, pengeboran sumur bor dan buangan limbah TSS baik di perairan sekitar OLNG maupun FPSO.
2. Perubahan konsentrasi sedimen tersuspensi di kolom perairan yang memiliki potensi berdampak pada kualitas perairan terkait dengan organisme laut di habitatnya.
3. Laju perubahan ketebalan sedimen dasar perairan yang terkait dengan pendangkalan perairan akibat dari kegiatan pengerukan ataupun penimbunan material sedimen.

5.4 Pemodelan Gelombang Spektral (SW)

Modul model gelombang spektral adalah generasi baru pemodelan gelombang yang dibangkitkan oleh angin pada jenis grid mesh (*unstructured meshes*). Modul model ini mensimulasikan pertumbuhan, pelemahan dan transformasi dari gelombang yang dibangkitkan oleh angin dan *swell* di pesisir dan lepas pantai. Formulasi persamaan yang digunakan terdiri dari dua tipe yaitu sebagai berikut:

1. Formulasi parameterisasi arah berpasangan gelombang spektral. Tipe ini menggunakan persamaan konservatif dimana parameterisasi dari domain frekuensi aksi spektrum gelombang ditentukan oleh variabel yang digunakan oleh Holthuijsen (1989).
2. Formulasi semua arah gelombang spektral. Tipe ini menggunakan persamaan konservatif dimana parameterisasi dari domain frekuensi aksi spektrum gelombang ditentukan oleh variabel yang digunakan oleh Komen et al (1994) dan Young dan Gorman (1995).

Kedua formulasi tersebut, dapat diterapkan pada koordinat *cartesian* untuk skala dengan luas daerah pelabuhan dan pesisir pantai atau dengan menggunakan koordinat *spherical* pada daerah di lintang tinggi atau untuk skala dengan luas daerah yang besar (Laut Banda, Selatan Jawa, Laut Jawa, Selat Sunda dan lain-lain).

Modul model gelombang spektral telah menyertakan perhitungan-perhitungan yang mengakomodir fenomena-fenomena fisik meliputi sebagai berikut:

1. Pertumbuhan gelombang yang dibangkitkan oleh angin.
2. Interaksi antara gelombang-gelombang non linier.
3. Pelemahan gelombang yang disebabkan oleh karakteristik batas perairan
4. Pelemahan gelombang yang disebabkan oleh kekasaran dasar perairan

5. Pelemahan gelombang yang disebabkan oleh kedalaman yang menyebabkan gelombang pecah.
6. Refraksi dan shoaling gelombang karena variasi kedalaman.
7. Interaksi antara arus dan gelombang.
8. Efek perubahan kedalaman akibat pasang-surut.

Diskretisasi dari persamaan gelombang pada koordinat geografik dan spherical menggunakan sel terpusat pada metode *finite volume*. Integrasi waktu yang digunakan adalah dengan pendekatan langkah fraksional dimana metode eksplisit multi sekuensial dipakai untuk propagasi aksi gelombang.

Data-data yang dibutuhkan untuk mensimulasikan modul model gelombang spektral adalah sebagai berikut:

1. Batimetri
2. Spektral diskretisasi
3. Tinggi muka laut
4. Arus permukaan laut
5. Angin
6. Energi transfer antar gelombang
7. Tinggi gelombang pecah
8. Kekasaran dasar perairan
9. White capping
10. Syarat batas meliputi : parameter gelombang, spektrum aksi gelombang, spektrum energi gelombang atau batas lateral.

Luaran dari modul gelombang spektral adalah sebagai berikut:

1. Tinggi gelombang signifikan
2. Maksimum tinggi gelombang
3. Periode puncak gelombang
4. Periode gelombang T01
5. Periode gelombang T02
6. Periode gelombang Tm10
7. Arah puncak gelombang
8. Rata-rata arah gelombang
9. Standar deviasi arah gelombang
10. Komponen kecepatan gelombang
11. Gaya radiasi gelombang

Persamaan dasar pemodelan SW digambarkan berdasarkan formula persamaan transport gelombang dari densitas aksi gelombang (wave action density). Densitas aksi gelombang merupakan fungsi dari $\hat{N}(\vec{x}, s, q, t)$, dimana $\vec{x} = (f, l)$ adalah vektor gelombang dengan ϕ adalah lintang dan λ adalah bujur. Persamaan tersebut diterapkan pada koordinat spherical yaitu sebagai berikut:

$$\hat{N} = NR^2 \cos \phi = \frac{ER^2 \cos \phi}{\sigma}$$

dimana,

$$\begin{aligned}\hat{N} &= \text{Densitas Aksi Gelombang } N \text{ dan } E. \\ R &= \text{Jari-jari Bumi.} \\ \sigma &= \text{Frekuensi Angular Gelombang}\end{aligned}$$

sehingga persamaan kesetimbangan aksi gelombang dapat dijabarkan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \hat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} c_\phi \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_\lambda \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta \hat{N} = \frac{\hat{S}}{\sigma}$$

dengan $\hat{S}(\vec{x}, s, q, t) = SR^2 \cos f$, adalah sebagai total fungsi sumber dan peredaman gelombang. Sehingga secara lengkap persamaan gerak gelombang dengan karakteristiknya dalam koordinat spherical adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}c_\phi &= \frac{d\phi}{dt} = \frac{c_g \cos \theta + u_\phi}{R} \\ c_\lambda &= \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g \sin \theta + u_\lambda}{R \cos \phi} \\ c_\sigma &= \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} - \frac{d}{R} \left(\frac{1}{\cos \phi} \frac{du_\lambda}{\partial \lambda} + \frac{du_\phi}{\partial \phi} - u_\phi \tan \phi \right) \right] \\ &\quad - \frac{kc_g}{R} \left[\frac{\cos \theta (\sin \theta \frac{du_\lambda}{d\phi} + \cos \theta \frac{du_\phi}{d\phi}) + \frac{\sin \theta}{\cos \phi} (\sin \theta \frac{du_\lambda}{d\lambda} + \cos \theta \frac{du_\phi}{d\lambda})}{\cos \theta \tan \phi (u_\lambda \sin \phi + u_\phi \cos \theta)} \right] \\ c_\theta &= \frac{d\theta}{dt} = \frac{c_g \sin \theta \tan \phi}{R} + \frac{1}{Rk} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\sin \theta \frac{\partial d}{\partial \phi} - \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \frac{\partial d}{\partial \lambda} \right) + \\ &\quad \frac{\sin \theta}{R} \left(\sin \theta \frac{\partial u_\lambda}{\partial \phi} + \cos \theta \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right) - \frac{\cos \theta}{R \cos \phi} \left(\sin \theta \frac{\partial u_\lambda}{\partial \lambda} + \cos \theta \frac{\partial u_\phi}{\partial \lambda} \right)\end{aligned}$$

dimana,

$$\begin{aligned}(u_f, u_l) &= \text{Komponen Kecepatan Gelombang.} \\ \theta &= \text{Arah Gelombang.}\end{aligned}$$

5.5 Pemodelan Sebaran Minyak (OS)

Formula pemodelan digunakan untuk mengekstraksi parameter dari proses-proses pada tumpahan minyak, bagaimana menuangkannya melalui persamaan matematis dan interelasi antar parameter yang digunakan. Semakin banyak parameter yang digunakan akan semakin tepat hasil pemodelannya, karena akan mewakili proses-proses yang terjadi pada tumpahan minyak. Banyaknya proses dan parameter yang terlibat akan dibatasi pada parameter yang berperan besar pada tumpahan minyak. Metode pendekatan formulasi model dapat dilakukan melalui model fisis dan kimia dan juga secara empiris untuk mendapatkan persamaan matematisnya.

5.5.1.1 Sebaran Minyak di Laut

Kandungan minyak yang masuk ke dalam sistem perairan akan dipengaruhi oleh berbagai parameter. Parameter tersebut adalah terdiri dari parameter yang mempengaruhi ketika berada di permukaan laut yaitu atmosfer, ketika berada di kolom perairan dan ketika berada di dasar perairan. Secara umum parameter tersebut meliputi parameter sebaran minyak (dispersi horizontal), properti udara/atmosfer, proses emulsifikasi, penguapan, transport bahang, radiasi matahari, proses sedimentasi, dispersi vertikal dan viskositas perairan. Secara mendetail masing-masing parameter ini akan dijabarkan satu persatu pada sub bab berikutnya.

5.5.1.2 Parameter Sebaran Minyak

Ketika melakukan pemodelan tumpahan minyak, perlu dilakukan pendefinisian parameter-parameter yang menyebabkan tumpahan minyak berubah baik secara fisik, kimia maupun biologi. Tidak semua parameter secara detail diikuti dalam perhitungan numerik pemodelan. Parameter signifikan tersebut adalah parameter yang secara tegas baik kuantitas maupun kualitas membuat tumpahan minyak berubah. Parameter yang lain tidak dianggap penting karena perubahan yang terjadi jika parameter ini diikuti sangat kecil untuk merubah minyak. Pada bagian ini akan memapar proses atau parameter apa yang akan diikuti dalam pemodelan tumpahan minyak.

5.5.1.3 Properti Udara

Parameter properti udara meliputi suhu udara dan tingkat perawanan. Suhu udara dan tingkat perawanan akan mempengaruhi proses pelapukan minyak dan sangat penting dalam menghitung air di dalam minyak pada proses emulsifikasi. Tingkat perawanan akan mengkoreksi perhitungan dari masukan bahang ke dalam minyak dari radiasi matahari sehingga terjadi perbedaan pada saat tumpahan minyak dengan cuaca cerah dan berawan.

5.5.1.4 Emulsifikasi

Parameter yang akan berubah pada saat terjadi proses emulsifikasi adalah dispersi air laut berupa butiran halus yang akan masuk ke medium minyak. Masuknya butiran air ke dalam minyak akan menyebabkan parameter viskositas akan meningkat dan volume minyak akan bertambah. Parameter densitas minyak akan bertambah mendekati densitas di sekitar massa air laut. Proses emulsifikasi juga akan mengakibatkan parameter penguapan akan menurun dengan drastis. Pendekatan numerik dilakukan untuk menghitung seberapa banyak butiran minyak yang akan masuk ke dalam medium minyak dengan menghitung energi percampuran massa air dari aksi gelombang. Tahap selanjutnya adalah perhitungan efek dari parameter proses pelapukan bekerja yang akan membuat formasi emulsifikasi minyak. Setelah itu dilakukan perhitungan seberapa cepat emulsi minyak terbentuk dan seberapa banyak volume air akan masuk. Terakhir adalah perhitungan seberapa stabil emulsi minyak yang terbentuk. Peran dari jenis minyak yang tumpah sangat penting dalam perhitungan emulsi minyak.

5.5.1.5 Penguapan

Parameter yang digunakan untuk menghitung penguapan adalah suhu minyak, ketebalan minyak dan gaya-gaya fisik yang bekerja pada minyak meliputi angin dan energi gelombang. Perubahan pada proses penguapan akan mengakibatkan perubahan parameter densitas dan viskositas. Parameter titik tuang minyak juga akan berubah, baik proses pelapukan terjadi atau tidak minyak akan berubah menjadi waxy solid atau semi solid. Fraksi jenis minyak juga menentukan laju perubahan parameter penguapan. Perubahan bentuk minyak secara fisik, kimia dan biologi akan mempengaruhi proses penguapan. Perhitungan ini didekati dengan memanfaatkan parameter titik didih tiap fraksi minyak. Radiasi termal matahari juga termasuk parameter yang dipertimbangkan dalam proses penguapan.

5.5.1.6 Transport Bahang

Lima parameter masukan digunakan dalam menghitung keseimbangan bahang minyak. Parameter albedo digunakan untuk radiasi matahari yang dipantulkan lapisan minyak. Parameter ini sangat tergantung dari warna minyak yang dapat ditentukan dari jenis minyaknya. Parameter emisifitas minyak, air dan udara, berupa nilai konstanta berdasarkan waktu dan ruang digunakan dalam perhitungan keseimbangan bahang pada tumpahan minyak. Konstanta penguapan digunakan untuk menghitung proporsi seberapa banyak minyak yang akan menguap dan menjadi parameter yang penting dalam melakukan kalibrasi model.

5.5.1.7 Radiasi Matahari

Parameter radiasi matahari digunakan untuk perhitungan suhu tumpahan minyak. Konstanta emisifitas harus spesifik pada air laut, minyak dan udara. Model memperhitungkan variasi radiasi matahari yang ditentukan oleh posisi geografis, lama penyinaran dan musim dari tahun ke tahun.

5.5.1.8 Sedimentasi

Hanya beberapa jenis minyak mentah yang menghasilkan residu dan memiliki densitas yang lebih besar dari air laut dan kemudian mengalami penenggelaman. Sebagian besar minyak mentah mengalami pelapukan dan memiliki densitas yang lebih ringan dari air laut, meskipun proses emulsifikasi telah stabil, material tersebut akan bersifat *bouyancy* positif. Tumpahan minyak yang terapung dapat mengalami kontak dengan partikel mineral berat seperti pasir, lempung dan lain-lain, khususnya di perairan pesisir. Partikel tersebut akan menyelubungi minyak dan akan bersifat *bouyancy* negatif dan tenggelam. Minyak akan sampai ke dasar perairan dan mengalami degradasi yang sangat lambat.

5.5.1.9 Dispersi Vertikal

Transpor minyak ke kolom air mempertimbangkan parameter yang mengiringi proses kelarutan, dispersi, akomodasi dan sedimentasi. Dispersi dan akomodasi merupakan mekanisme parameter yang sangat berperan selama satu minggu mengalami proses pelapukan. Parameter dispersi merupakan proses mekanika. Turbulen dan air laut akan membuat minyak menjadi bentuk butiran-butiran kecil dan juga menguatkan proses emulsifikasi. Pada proses emulsifikasi yang telah stabil, permukaan minyak akan diselubungi suatu lapisan aktif membatasi antara minyak dan air berbentuk koloid. Formasi koloid ini disebut akomodasi. Butiran minyak ini akan masuk ke dalam kolom air sangat ditentukan oleh dispersi vertikal. Selain penguapan, laju dispersi vertikal akan menentukan seberapa lama keberadaan minyak di permukaan. Dispersi vertikal mengurangi volume minyak di permukaan dan mengurangi proses penguapan, tetapi proses dispersi minyak ini tidak akan mengubah properti fisik dan kimia minyak, tidak seperti halnya proses penguapan. Sebagai contoh, minyak pada fase emulsi yang tidak stabil maka butiran minyak di kolom air akan cenderung bergabung dan kembali lagi ke permukaan air membentuk lagi tumpahan minyak.

Parameter yang terlibat dalam ukuran butiran kecil minyak di kolom air adalah tegangan permukaan minyak, semakin kecil tegangan permukaan minyak maka akan terbentuk butiran kecil yang lebih besar. Pendekatan matematis dilakukan oleh Mackay et al (1980).

5.5.1.10 Viskositas

Parameter viskositas minyak berperan penting karena akan mempengaruhi proses-proses yang terjadi pada minyak tumpah, baik fisik maupun kimia minyak. Parameter viskositas akan digunakan dalam hampir semua perhitungan numerik di pemodelan minyak.

Numerik Sebaran Minyak

Pada bagian ini akan menjelaskan model numerik dengan menggunakan persamaan matematis untuk menghitung proses-proses yang terjadi pada tumpahan minyak. Persamaan matematis yang dihitung meliputi proses penyebaran minyak, penguapan, dispersi vertikal, kelarutan, emulsifikasi dan transport bahang.

5.5.2.1 Penyebaran

Penyebaran tumpahan minyak akan dengan segera mulai meningkat di permukaan air. Dua mekanisme yang menyebabkannya, pertama yaitu penyebaran yang diakibatkan oleh properti minyak dan kedua adalah penyebaran yang diakibatkan oleh adanya proses dispersi. Penyebaran minyak akibat adanya properti minyak diformulasikan dengan menggunakan teori yang dikemukakan oleh Fay (1969), dimana menyebutkan bahwa penyebaran minyak ditentukan oleh laju penyebarannya yang terdiri dari tiga fase yaitu sebagai berikut:

1. Fase pertama dengan mempertimbangkan gaya gravitasi dan inersia.
2. Fase intermediet dengan mempertimbangkan gaya gravitasi dan viskositas.
3. Fase akhir dengan mempertimbangkan tegangan permukaan dari parameter viskositas.

Mekanisme kedua adalah dispersi dimana gerakan acak akibat dari gelombang, angin dan arus akan memindahkan elemen minyak relatif terhadap elemen lainnya dan pusat massa dari tumpahan minyak. Ketika lapisan minyak terdekomposisi secara mekanis pada permukaan yang stabil, hanya parameter dispersi yang akan memindahkan elemen minyak dari pusat massa minyak. Mackay et al (1980) telah memodifikasi model gravitasi dan viskositas dari Teori Fays kedalam formula numerik melalui persamaan matematis untuk menghitung pertumbuhan penyebaran minyak dengan asumsi sebagai berikut:

1. Tumpahan minyak dianggap sebagai massa yang homogen.
2. Gerakan minyak diasumsikan sebagai penyebaran dalam bentuk lapisan yang tipis. Pada kenyataannya minyak akan terdispersi dalam berbagai bentukan acak and bahkan terpecah dalam bentuk fragmen. Perhitungan ini akan diakomodasi pada saat menghitung volume per area minyak.

3. Tidak ada massa yang hilang dari minyak yang bergerak. Pada kenyataannya massa minyak akan berkurang lepas pada proses evaporasi dan dispersi. Perhitungan ini akan diakomodasi pada saat menghitung transfer massa pada proses penguapan minyak.

Dengan menggunakan asumsi di atas, maka perubahan area tumpahan minyak (A_{oil}) terhadap dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\left(\frac{dA_{oil}}{dt} \right) = K_a A_{oil}^{1/3} \left(\frac{V_{oil}}{A_{oil}} \right)^{4/3}$$

dimana,

$$\begin{aligned} K_a &= \text{konstanta [detik}^{-1}] \\ T &= \text{waktu [detik]} \\ A_{oil} &= \pi R_{oil}^2 \text{ [m}^2] \end{aligned}$$

Volume minyak tumpah dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$V_{oil} = R_{oil}^2 \pi \cdot h_s$$

Initial ketebalan tumpahan minyak diestimasi:

$h_s = 10 \text{ cm}$, pada $t=0$

Nilai ini telah diketahui dari hasil penelitian bahwa sesudah terjadi tumpahan minyak di suatu perairan.

5.5.2.2 Penguapan

Penguapan dari tumpahan minyak ditentukan oleh komposisi dari minyak, suhu udara, suhu perairan, area tumpahan, kecepatan angin, radiasi matahari dan ketebalan tumpahan minyak. Beberapa hasil penelitian telah berhasil menghitung laju penguapan minyak. Asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Tidak ada proses difusi (dispersi) yang membatasi pada oil film.
2. Bentuk minyak adalah campuran yang ideal.
3. Tekanan parsial udara pada perhitungan tekanan uap diabaikan.

Dengan menggunakan asumsi di atas maka laju penguapan minyak dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$N_i^e = k_{ei} \cdot P_i^{SAT} / RT \cdot \frac{M_i}{\rho_i} \cdot X_i \text{ [m}^3 \text{ / m}^2 \text{ s]}$$

dimana,

$$\begin{aligned} N_i^e &= \text{Laju penguapan} \\ k_e &= \text{koefisien transport massa} \end{aligned}$$

P^{SAT}	= Tekanan uap
R	= Konstanta gas
T	= Suhu
M	= Berat Molekul
X	= Fraksi mol
ρ	= Densitas fraksi minyak
i	= Jenis fraksi minyak ke-i

Untuk mengestimasi nilai dari k_{ei} digunakan persamaan dari Mackay et al (1980), yaitu:

$$k_{ei} = k \cdot A_{oil}^{0.045} \cdot Sc_i^{-2/3} \cdot U_w^{-0.78}$$

dimana,

k	= Konstanta
A_{oil}	= Luas area tumpahan minyak [m ²]
Sc_i	= Konstanta penguapan Schmidts pada fraksi minyak ke-i
U_w	= Kecepatan angin [m/detik]

5.5.2.3 Dispersi Vertikal

Transpor minyak ke dalam kolom air terjadi dari beberapa mekanisme yaitu kelarutan, dispersi, akomodasi dan sedimentasi. Fraksi minyak yang terdispersi di dalam kolom air per waktu dihitung sebagai fraksi yang hilang di permukaan laut, pada kondisi tidak ada gelombang pecah dan dihitung menggunakan persamaan, yaitu :

$$D = D_a D_b$$

dimana,

D_a	= fraksi minyak yang terdispersi di permukaan air per satuan waktu.
D_b	= fraksi minyak telah terdispersi yang tidak kembali lagi ke permukaan.

D_a dan D_b dihitung dengan menggunakan persamaan, yaitu:

$$D_a = \frac{0.11 (1 + U_w)^2}{3600}$$

dimana,

U_w	= Kecepatan angin
-------	-------------------

dan

$$D_b = \frac{1}{1 + 50 \mu_{oil} h_s \gamma_{ow}}$$

dimana,

μ_{oil}	= Viskositas minyak [cp]
h_s	= Ketebalan minyak [cm]
γ_{ow}	= Tegangan permukaan minyak dan air [dyne cm ⁻¹]

Laju butiran minyak dalam air yang kembali lagi ke permukaan dihitung dengan persamaan, yaitu:

$$\frac{dV_{oil}}{dt} = D_a (1 - D_b)$$

5.5.2.4 Kelarutan

Dengan menggunakan asumsi bahwa konsentrasi sebenarnya hidrokarbon terhadap kelarutannya, maka laju kelarutan minyak dihitung dengan menggunakan persamaan, yaitu:

$$\frac{dV_{d_{i1}}}{dt} = K_{S_i} C_i^{sat} X_{mol_i} \frac{M_i}{\rho_i} A_{oil}$$

dimana,

- C^{sat} = kelarutan fraksi minyak ke-i [mg/kg air laut]
- X_{mol} = molar fraksi dari fraksi minyak ke-i [kg/mol]
- M = Berat molar dari fraksi minyak ke-i
- ρ = Densitas minyak fraksi ke-i
- A_{oil} = Luas area tumpahan minyak [m²]

Koefisien transfer massa dari kelarutan dihitung dengan menggunakan persamaan, yaitu:

$$K_{S_i} = 2.36 \cdot 10^{-6} e_i$$

dimana,

- e_i = 1.4 untuk fraksi minyak alkana
- e_i = 2.2 untuk fraksi minyak aromatik
- e_i = 1.8 untuk fraksi minyak ringan

5.5.2.5 Emulsifikasi

Proses emulsifikasi merupakan proses sangat penting yang menentukan keberadaan minyak di permukaan karena akan membuat minyak menjadi sangat kental. Masuknya butiran air ke dalam minyak dan stabilitas didalamnya sangat ditentukan oleh kondisi lingkungannya. Stabilitasnya ditentukan oleh kandungan surfaktan didalamnya dan masuknya butiran air ke dalam minyak ditentukan oleh kondisi perairannya terutama gelombang dan proses turbulen di perairan.

Model matematis yang ada saat ini tidak semua parameter yang memperngaruhi proses emulsifikasi masuk semua dalam perhitungannya. Pendetakan yang dilakukan adalah melalui persamaan empiris dari prilaku emulsifikasi dari kondisi di alamnya. Perhitungan perubahan kandungan air di dalam minyak dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$\frac{dy_w}{dt} = R_1 - R_2$$

dimana:

- Y_w = Kandungan air dalam minyak
 R_1 = Masuknya air ke dalam minyak
 R_2 = Keluarnya air dari minyak

Nilai dari masuknya air ke dalam minyak akan bertambah dengan meningkatnya suhu and kecepatan angin. Nilai R_1 dapat dihitung melalui persamaan sebagai berikut:

$$R_1 = K_1 \frac{(1 + U_w)^2}{\mu_{oil}} (Y_w^{max} - Y_w)$$

dimana :

- U_w = Kecepatan angin
 μ_{oil} = Viskositas minyak
 Y_w^{max} = Maksimum kandungan air dalam minyak
 Y_w = Kandungan sebenarnya air di dalam minyak
 K_1 = Koefisien
 R_2 = Laju keluarnya air dari minyak

Nilai dari R_2 akan meningkat dengan meningkat dengan meningkatnya kandungan alphaltenes, wax (lilin) dan surfaktan minyak sehingga menyebabkan meningkatnya viskositas minyak. Nilai dari R_2 dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$R_2 = K_2 \frac{1}{A_s \cdot Wax \cdot \mu_{oil}} \cdot Y_w$$

dimana :

- A_s = Kandungan asphaltenes di dalam minyak (wt%)
 Wax = Kandungan lilin di dalam minyak (wt%)
 K_2 = Koefisien

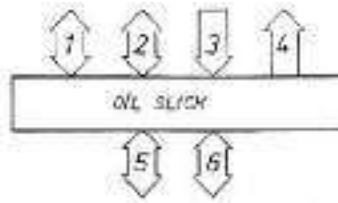
dimana :

$$\begin{aligned}
 K_1 &= 5 \cdot 10^{-7} \text{ [kg/m}^3\text{]} \\
 K_2 &= 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ [kg(wt\%)/s]}
 \end{aligned}$$

Nilai dari K_1 dan K_2 merupakan hasil dari percobaan yang dilakukan oleh Audunson et al (1984).

5.5.2.6 Transfer Bahang

Tekanan uap dan viskositas sangat ditentukan oleh suhu. Suhu pada tumpahan minyak lebih panas dari kondisi lingkungannya baik udara maupun perairannya. Oleh karena itu sangat penting untuk memodelkan perubahan suhu pada tumpahan minyak. Pada **Gambar 11**, memperlihatkan keseimbangan bahang di dalam minyak.



Gambar 11. Keseimbangan Bahang di dalam Minyak, meliputi (1). Transfer Bahang antara Udara dan Minyak, (2). Bahang dari Radiasi yang diemisikan dan diterima antara Minyak dan Udara, (3). Bahang dari Radiasi Matahari, (4). Bahang yang Hilang dari proses Penguapan, (5). Transfer Bahang antara Minyak dan Air, dan (6). Bahang dari Radiasi yang diemisikan dan diterima antara Air dan Minyak.

5.5.2.7 Transfer Bahang Antara Udara dan Minyak

Transfer bahang antara udara dan minyak dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$H_{T}^{oil-air} = A_{oil} k_H^{oil-air} (T_{air} - T_{oil})$$

dimana :

$$k_H^{oil-air} = k_m \rho_a C_{pa} \left(\frac{S_c}{Pr} \right)^{0.67}$$

dan,

- S_c = Schimidt's number
- T_{oil} = Suhu minyak [Kelvin]
- T_{air} = Suhu udara [Kelvin]
- ρ_a = Densitas udara [kg/m³]
- C_{pa} = Kapasitas panas udara [J/kg/°C]

Koefisien Prandtl's untuk udara dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Pr = \frac{C_{pa} \rho_a}{0.0241 (0.18055 + 0.003 T_{air})}$$

Jika tidak ada penguapan, maka $kH_{oil-air}$ dihitung dengan persamaan dari Duffie dan Beckmann (1974), yaitu sebagai berikut:

$$k_H^{oil-air} = 5.7 + 3.8 U_w$$

5.5.2.8 Bahang Dari Radiasi yang Diemisikan

Tumpahan minyak akan menerima dan kehilangan bahang karena emisi radiasi gelombang panjang matahari. Jumlah bahang yang hilang dan diterima dihitung dengan dengan hukum dari Stefan-Boltzman's. Nilai bersih bahang yang diterima oleh tumpahan minyak dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_{total}^{rad} = \sigma(l_{air} \cdot T_{air}^4 + l_{water} \cdot T_{water}^4 - 2 \cdot l_{oil} \cdot T_{oil}^4)$$

dimana:

- σ = Boltzman constant ($5.72 \cdot 108 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$)
- l_{air} = Emisivitas udara
- l_{water} = Emisivitas air
- l_{oil} = Emisivitas minyak
- T_{air} = Suhu udara
- T_{water} = Suhu air
- T_{oil} = Suhu minyak

5.5.2.9 Bahang dari Radiasi Matahari

Radiasi matahari yang diterima tumpahan minyak tergantung dari beberapa faktor. Paramter yang terpenting adalah lokasi dimana minyak tumpah, tanggal dan waktu, tingkat perawanan dan kandungan air, debu dan lapisan ozon di udara. Variasi radiasi matahari dalam sehari diasumsikan dengan fungsi sinusoidal, yaitu sebagai berikut:

$$H(t) = \begin{cases} K_1 \cdot H_0^{\text{max}} \cdot \sin\left(\pi \frac{t - t^{\text{sunrise}}}{t^{\text{sunset}} - t^{\text{sunrise}}}\right), & t^{\text{sunrise}} < t < t^{\text{sunset}} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

dimana:

Dalam satu hari dimulai dari matahari terbit sampai dengan tenggelam.

t^{sunrise} = waktu matahari terbit [detik] dimulai dari tengah malam.

t^{sunset} = waktu matahari terbit [detik] dimulai dari tengah malam.

t^{sunset} dapat dihitung dengan menambahkan lamanya waktu dalam sehari (T_d), dengan persamaan sebagai berikut:

$$t^{\text{sunset}} = t^{\text{sunrise}} + T_d$$

T_d dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_d = \text{acos}(\tan \phi \tan \zeta)$$

dimana:

ϕ = Lintang

ζ = Deklinasi bumi terhadap matahari

ζ sebanding dengan,

$$\zeta \cong 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right)$$

H_0^{max} adalah emisi matahari dari daratan, dihitung dengan persamaan yang digunakan dari Duffie dan Beckmann (1974), yaitu sebagai berikut:

$$H_0^{max} = \frac{12 \cdot K_1}{1^{28381} - 1^{28382}} \cdot I_{sc} \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right) \cdot (\cos(\phi) \cdot \cos(\zeta) \cdot \sin(\omega_s) + \omega_s \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\zeta))$$

dimana:

I_{sc} = Konstanta matahari (1.353 [W/m])
 n = hari dalam setahun
 ω_s = sudut matahari.

dengan,

$$K_t = \frac{H}{H_0} = \frac{\text{solar radiation reaching the surface}}{\text{extra terrestrial radiation}}$$

Jika matahari tidak berawan, maka $K_t \cong 0.75$, tetapi K_t akan meningkat dengan meningkatnya tingkat perawanan. Jika α adalah albedo maka nilai bersih radiasi dari matahari adalah sebagai berikut:

$$(1 - \alpha) \cdot H(t)$$

5.5.2.10 Bahang yang Hilang dari proses Penguapan

Penurunan suhu karena penguapan mengakibatkan hilangnya bahang dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H^{evapor} = \sum_i^{\text{number of components}} N_i \cdot \Delta H_{vi} [\text{W/m}^2]$$

dimana:

ΔH_{vi} = Bahang dari penguapan pada fraksi minyak ke- i [J/mol]

Sehingga keseimbangan bahang dinamis dari tumpahan minyak diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{oil}}{dt} = & \frac{1}{\zeta \cdot C_p \cdot h} \left[(1 - \alpha) \cdot H + (I_{sol} T_{oil}^4 + I_{water} T_{water}^4 - 2 \cdot I_{oil} T_{oil}^4) \right] \\ & + h_{oil} (T_{water} - T_{oil}) + h_{co} (T_{air} - T_{oil}) - \sum N_i \Delta H_{vi} \\ & + \left(\frac{dY_{water}}{dt} \cdot C_{pr} \cdot C_{ps} + \frac{dY_{oil}}{dt} \cdot C_{oil} \cdot C_{ps} \right) \cdot (T_{water} - T_{oil}) \cdot A_{oil} \end{aligned}$$

dimana:

$\frac{dW_{water}}{dt}$ = Laju butiran air yang masuk [m³/s]

$$\frac{dV_{oil}}{dt} = \text{Laju butiran minyak yang masuk ke kolom air [m}^3/\text{s]}$$

$$C_{po} = \text{Kapasitas bahang minyak [J/kg } ^\circ\text{C]}$$

$$C_{pw} = \text{Kapasitas bahang air [J/kg } ^\circ\text{C]}$$

5.5.2.11 Transfer Bahang antara Minyak dan Air

Transfer bahang antara minyak dan air, dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_T^{oil-water} = A_{oil} k_H^{oil-water} (T_{water} - T_{oil})$$

dimana $k_H^{oil-water}$ koefisien transfer bahang dari Bird et al (1960) dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$k_H^{oil-water} = 0.332 + \rho_w C_{pw} Re^{-0.5} Pr_w^{-2/3}$$

Konstanta Prandtl's dari air dihitung dengan persamaan yang dikemukakan oleh Duffie dan Beckmann (1974), yaitu sebagai berikut:

$$Pr_w = C_{pw} \rho_w \left(\frac{\mu}{0.330 + 0.000848 (T_w - 273.15)} \right)$$

Re adalah koefisien Reynolds untuk menghitung koefisien transfer bahang antara minyak dan air, dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{V_w \sqrt{\frac{d A_{oil}}{\pi}}}{\mu_w}$$

dimana V_{rel} adalah viskositas kinematik dari minyak.

Model Numerik Properti Minyak

Pada bagian ini mengemukakan model numerik dari properti minyak yang tumpah. Pendekatan yang digunakan dilakukan dengan fungsi fisis dan juga empiris. Karakterer minyak yang tumpah sangat besar ditentukan oleh berbagai properti minyak.

5.5.3.1 Fraksi Minyak

Campuran minyak terdiri dari beratus-ratus rantai karbon dan properti kimia dari masing-masing fraksi minyak sangat beragam. Properti keseluruhan minyak tergantung dari masing-masing fraksi minyak yang menyusunnya. Masing-masing fraksi minyak memiliki laju perubahan propertinya yang berbeda-beda oleh karena itu, properti minyak akan berubah dengan berubahnya waktu. Properti minyak dibagi dalam delapan fraksi minyak yang ditentukan oleh properti dari destilasi (titik didih) dan struktur kimia minyak (alkana atau aromatik). Kedelapan fraksi minyak tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4** dengan karakteristik fisik-kimia tiap fraksi yang dapat dilihat pada **Tabel 5**. Pada pemodelan sebaran minyak

kali pada studi ini menggunakan minyak dengan rantai karbon yang pendek pada fraksi minyak ringan karena merupakan sisa buangan limbah air terproduksi (*produce water*).

Tabel 4. Delapan Jenis Fraksi Minyak yang digunakan

Fraksi	Jenis	Titik didih
1	C6-C12 (Paraffin)	69-230°C
2	C13-C25 (Paraffin)	230-405°C
3	C6-C12 (Cycloparaffin)	70-230°C
4	C13-C23 (Cycloparaffin)	230-405°C
5	C6-C11 (Aromatic)	80-240°C
6	C12-C18 (Aromatic)	240-400°C
7	C9-C25 (Naphteno-aromatic)	180-400°C
8	Residual (incl. heterocycles)	>400°C

Tabel 5. Properti Fisik dan Kimia dari Tiap Fraksi Minyak.

Fraksi	Mole weight [g/mole]	Density [kg/m3]	Viscosity at 100°F [cs]	Vapor pressure [mm/hg]	Surface tension [103n/m]
1	128.0	715	0.536	$10^{(6.94-1417.61(t+202.17))}$	29.9
2	268.0	775	4.066	$10^{(7.01-1825.05(t+149.76))}$	35.2
3	124.0	825	2.000	$10^{(6.91-1441.79(t+204.7))}$	29.9
4	237.0	950	4.000	$10^{(6.99-1893.78(t+151.82))}$	35.2
5	110.5	990	0.704	$10^{(6.91-1407.34(t+208.48))}$	32.4
6	181.0	1150	6.108	$10^{(6.97-1801.00(t+162.77))}$	29.9
7	208.0	1085	3.000	$10^{(6.97-1789.85(t+164.56))}$	29.9
8	600.0	1050	458.0	0	47.2

5.5.3.2 Viskositas

Viskositas minyak akan meningkat selama proses pelapukan minyak, terutama diakibatkan oleh proses emulsifikasi dan penguapan. Selain itu, viskositas sangat ditentukan oleh suhu tumpahan minyak. Perhitungan viskositas minyak dilakukan melalui tiga tahap yaitu *pertama*, viskositas tanpa adanya butiran air dalam minyak pada suhu referensi $T_{ref} = 100^\circ\text{F}$, dengan persamaan dari Kendall-Monroe yaitu sebagai berikut:

$$V_{ref}^{0.7} = \left(\sum_{i=1}^k X_i V_i^{1/2} \right)^2$$

dimana:

X_i = Fraksi model dari fraksi ke-i

Kedua, perhitungan viskositas minyak pada suhu aktual dengan menggunakan persamaan dari CONCAWE (1983), yaitu sebagai berikut:

$$\log[\log(v^{oil} + 0.7)] = \log[\log(v_{ref}^{oil} + 0.7)] - B \log \frac{T}{T_{ref}}$$

dimana:

- T = Suhu [K]
 v = Viskositas kinematik pada suhu T (Cs)
 B = 3.98

Ketiga, perhitungan viskositas minyak pada suhu aktual dan kandungan air dengan menggunakan persamaan dari Hossain dan Mackay (1980), yaitu sebagai berikut:

$$\eta = \eta^{oil} \exp \frac{2.5 y_w}{1 - 0.654 y_w}$$

Penguapan juga akan menyebabkan peningkatan viskositas dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\eta^{oil} = \eta_0^{oil} \exp(C_4 F_e)$$

dimana:

- C_4 = dimensi kandungan didalam minyak [wt%]
 F_e = Fraksi minyak yang terevaporasi

Kombinasi pengaruh dari emulsifikasi dan penguapan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$\frac{d\eta^{oil}}{dt} = C_4 \eta^{oil} \frac{1}{V_{oil}} \frac{dV_a}{dt} + \frac{2.5 \eta^{oil}}{(1 - y_w^{max} y_w)^5} \frac{dy_w}{dt}$$

5.5.3.3 Tegangan

Tegangan permukaan dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$T = \sum_{i=1}^8 X_i T_i$$

5.5.3.4 Kapasitas Bahang

Kapasitas bahang di air, udara dan minyak diberikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_{p2} = 993.73 + 0.133 T_{ap} - \frac{119.3 \cdot 10^3}{T_{ap}^2}$$

$$C_{p3} = 1684.74 + \frac{3.3912 (T_{oil} - 273.15)}{\sqrt{\rho_{oil} 10^3}}$$

dan,

$$C_{p, \text{air}} = (4.3634 - 0.00061 T_v) / 10^3$$

Suhu dihitung dengan satuan Kelvin.

5.5.3.5 Titik Tuang

Titik tuang minyak dimana minyak tidak mengandung butiran air dihitung dengan persamaan dari CMFMWOS (1985), yaitu sebagai berikut:

$$P_{p, \text{oil}} = P_{p0} + K_{p1} F_e$$

Nilai titik tuang akan meningkat dengan bertambahnya kandungan air dalam minyak dari proses emulsifikasi dan dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{p, \text{oil-water}} = P_{p, \text{oil}} + |P_{p, \text{oil}}| K_{p2} Y$$

6 Hasil Pemodelan

Berdasarkan tahapan kerja penyelesaian sesuai dengan skenario pemodelan dari dokumen DPH AMDAL yang dimintakan pada saat ini yaitu sebagai berikut:

1. Telah selesai dijalankan pemodelan hidrodinamika (HD) pada lokasi domain model di perairan sekitar OLNK dan FPSO pada Musim Barat dan Timur. Pada domain model di perairan sekitar OLNK dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada kondisi pra konstruksi dan operasi. Kelengkapan luaran hasil ini adalah sebagai berikut:
 - ✓ Animasi model HD yang menyajikan pola sirkulasi perairan.
 - ✓ Gambar dari animasi luaran model HD setiap 5 menit selama 7 hari simulasi.
2. Telah selesai dijalankan pemodelan *decoupled* HD yang digunakan untuk data masukan gaya pembangkit arus dan tinggi muka laut untuk pemodelan dengan modul model AD, MT, SW dan OS. Kelengkapan luaran hasil ini adalah sebagai berikut:
 - ✓ File data *decoupled* HD sebanyak 12 file berformat *.dfsu dengan total ukuran file 314 Gb.
 - ✓ Skenario model *decoupled* dengan modul model AD, MT, SW dan OS.
3. Telah selesai dijalankan pemodelan gelombang dengan modul model SW pada lokasi domain model di perairan sekitar OLNK dan FPSO pada Musim Barat dan Timur. Pada domain model di perairan sekitar OLNK dilakukan dalam dua kondisi yaitu pada kondisi pra konstruksi dan operasi. Kelengkapan luaran hasil ini adalah sebagai berikut:
 - ✓ Animasi model gelombang yang menyajikan karakteristik gelombang dengan parameter yaitu sebagai berikut:
 - a. Tinggi gelombang maksimum.
 - b. Kekuatan gelombang.
 - c. Tinggi gelombang signifikan.
 - d. Puncak periode gelombang.
 - ✓ Gambar dari animasi luaran model gelombang tiap parameter gelombang setiap 5 menit selama 7 hari simulasi.
 - ✓ Analisis potensi abrasi-akresi pantai beserta hasil pemetaannya (total terdapat 48 peta) di tepian garis pantai dari luaran pemodelan gelombang pada kondisi pra konstruksi dan operasi di perairan sekitar OLNK dengan indikator parameter yaitu sebagai berikut:
 - a. Nilai maksimum kekuatan gelombang.
 - b. Nilai rata-rata kekuatan gelombang.
 - c. Nilai maksimum tinggi gelombang maksimum.

- d. Nilai rata-rata tinggi gelombang maksimum.
 - e. Nilai maksimum tinggi gelombang signifikan.
 - f. Nilai rata-rata tinggi gelombang signifikan.
4. Telah selesai dijalankan pemodelan *decoupled* gelombang dengan modul model SW yang digunakan untuk data masukan gaya pembangkit arus dan tinggi muka laut untuk pemodelan dengan modul model AD, MT, SW dan OS. Kelengkapan luaran hasil ini adalah sebagai berikut:
 - ✓ File data *decoupled* HD sebanyak 4 file berformat *.dfsu dengan total ukuran file 12.8 Gb.
 - ✓ Skenario model *decoupled* dengan modul model AD, MT, SW dan OS.
 5. Telah selesainya dijalankan pemodelan pada Musim Barat dan Musim Timur yang terkait dengan buangan limbah potensi polutan yang terdiri sebagai berikut:
 - ✓ Parameter Salinitas masukan air tawar dari sungai pada saat konstruksi.
 - ✓ Parameter Salinitas masukan air tawar dari sungai pada saat operasi.
 6. Telah selesainya dijalankan semua pemodelan yang terkait dengan sedimentasi dari aktifitas pengerukan, penimbunan, dumping dan pengeboran yaitu terdiri dari sebagai berikut:
 - ✓ Pemodelan sedimentasi dari aktifitas pengerukan di Dermaga Pioneer.
 - ✓ Pemodelan sedimentasi dari aktifitas pengerukan di jalur Causeway.
 - ✓ Pemodelan sedimentasi dari aktifitas pengeboran pada sumur bor di DC-2.
 - ✓ Pemodelan sedimentasi dari aktifitas pengerukan dan penimbunan pipa bawah laut di dekat Dermaga Utama.
 - ✓ Pemodelan sedimentasi dari aktifitas pengerukan dan penimbunan pipa bawah laut di dekat Dermaga Pioneer.
 7. Telah dikompilasinya hasil model point-1, point-3, point-5 dan point-6 dengan total file sebanyak 250 file, total ukuran file sebesar 546.43 Gb, total animasi pemodelan sebanyak 76 animasi model, total gambar hasil pemodelan sebanyak 153342 gambar dan total dokumen laporan Termin I, II dan III berupa Laporan Akhir Studi Pemodelan.
 8. Mohon untuk disiapkan media penyimpanan (Eksternal Harddisk) dengan kapasitas 1 (satu) Terra Byte (TB) untuk menyerahkan file-file hasil kegiatan studi pemodelan ini.
 9. Pada Laporan Studi ini, telah sesuai dengan perjanjian jasa sub-konsultan NO.001/RUI-ESC/PK/V/20 pada Pasal 3.2 point-a sampai dengan point-c adalah berupa Laporan Tahap I, II dan III yaitu terdiri dari laporan teknis disain skenario pemodelan, laporan teknis persiapan setup data pemodelan, laporan teknis data masukan pemodelan, hasil pemodelan

decoupled Hidrodinamika dan hasil simulasi hidrodinamika serta semua hasil pemodelan dan simulasinya yang tertuang di dalam dokumen Dampak Penting Hipotetik (DPH).

10. Penamaan file hasil pemodelan berdasarkan tabel DPH yaitu sebagai berikut:

NO	POTENSI DAMPAK	SUMBER BUANGAN	MODEL	DOMAIN	LUARAN	Tahap
1	Peningkatan TSS dari release pengerukan fasilitas di OLNG (Dermaga Utama).	Jalur Dermaga Utama: 5. GPW. 6. MOF. 7. Heavy Duty Ramp. 8. Fire water/seawater intake.	MT	OLNG-Dermaga	TSS	Konstruksi
2	Peningkatan TSS dari release pengerukan fasilitas di OLNG (Dermaga Pioneer).	Jalur Dermaga Pioneer: 1. Pioneer Wharf. 2. Pioneer Wharf Sunken Barge Pad. 3. Pioneer Ramp.	MT	OLNG-Dermaga	TSS	Konstruksi
Animasi model: Sed-2-ON_KS_DP_Barat.mp4 Sed-2-ON_KS_DP_Timur.mp4 Gambar hasil model: Sed-2-ON_KS_DP_Barat.rar Sed-2-ON_KS_DP_Timur.rar						
3	Peningkatan TSS dari release pembuangan sedimen di dumping area.	Dumping area	MT	Mulut Teluk	TSS	Konstruksi dan Operasi
Animasi model: Sed-3-ON_KS_DM_Barat.mp4 Sed-3-ON_KS_DM_Timur.mp4 Gambar hasil model: Sed-3-ON_KS_DM_Barat.rar Sed-3-ON_KS_DM_Timur.rar						
4	Perubahan dinamika sirkulasi arus permukaan laut sebelum dibangun causeway di Dermaga Utama.	None	HD	OLNG-Dermaga	Arus Permukaan Laut	Pra-Konstruksi dan Konstruksi
Animasi model: HD_OLNG_KS_Barat.mp4 HD_OLNG_KS_Timur.mp4 Gambar hasil model: HD_OLNG_KS_Barat.rar HD_OLNG_KS_Timur.rar						

NO	POTENSI DAMPAK	SUMBER BUANGAN	MODEL	DOMAIN	LUARAN	Tahap
5	Perubahan dinamika sirkulasi arus permukaan laut sesudah dibangun causeway di Dermaga Utama.	None	HD	OLNG-Dermaga	Arus Permukaan Laut	Operasi
Animasi model: HD_OLNG_OP_Barat.mp4 HD_OLNG_OP_Timur.mp4 Gambar hasil model: HD_OLNG_OP_Barat.rar HD_OLNG_OP_Timur.rar						
6	Perubahan dinamika gelombang laut sebelum dibangun causeway di Dermaga Utama.	None	SW	OLNG-Dermaga	Gelombang Laut	Pra-Konstruksi dan Konstruksi
Animasi model: - Tinggi Gelombang Maksimum: WM_OLNG_KS_Barat.mp4 WM_OLNG_KS_Timur.mp4 - Kekuatan Gelombang: WP_OLNG_KS_Barat.mp4 WP_OLNG_KS_Timur.mp4 - Tinggi Gelombang Signifikan: WS_OLNG_KS_Barat.mp4 WS_OLNG_KS_Timur.mp4 - Periode Gelombang: WT_OLNG_KS_Barat.mp4 WT_OLNG_KS_Timur.mp4 Gambar hasil model: - Tinggi Gelombang Maksimum: WM_OLNG_KS_Barat.rar WM_OLNG_KS_Timur.rar - Kekuatan Gelombang: WP_OLNG_KS_Barat.rar WP_OLNG_KS_Timur.rar - Tinggi Gelombang Signifikan: WS_OLNG_KS_Barat.rar WS_OLNG_KS_Timur.rar - Periode Gelombang: WT_OLNG_KS_Barat.rar WT_OLNG_KS_Timur.rar						
7	Perubahan dinamika gelombang laut sesudah dibangun causeway di Dermaga Utama.	None	SW	OLNG-Dermaga	Gelombang Laut	Operasi
Animasi model: - Tinggi Gelombang Maksimum:						

NO	POTENSI DAMPAK	SUMBER BUANGAN	MODEL	DOMAIN	LUARAN	Tahap
WM_OLNG_OP_Barat.mp4 WM_OLNG_OP_Timur.mp4 - Kekuatan Gelombang: WP_OLNG_OP_Barat.mp4 WP_OLNG_OP_Timur.mp4 - Tinggi Gelombang Signifikan: WS_OLNG_OP_Barat.mp4 WS_OLNG_OP_Timur.mp4 - Periode Gelombang: WT_OLNG_OP_Barat.mp4 WT_OLNG_OP_Timur.mp4 Gambar hasil model: - Tinggi Gelombang Maksimum: WM_OLNG_OP_Barat.rar WM_OLNG_OP_Timur.rar - Kekuatan Gelombang: WP_OLNG_OP_Barat.rar WP_OLNG_OP_Timur.rar - Tinggi Gelombang Signifikan: WS_OLNG_OP_Barat.rar WS_OLNG_OP_Timur.rar - Periode Gelombang: WT_OLNG_OP_Barat.rar WT_OLNG_OP_Timur.rar						
8	Peningkatan TSS dari release penimbunan material sedimen dari cut & fill untuk pembangunan causeway jalan menuju dermaga utama	Sepanjang jalur causeway	MT	OLNG-Dermaga	TSS	Konstruksi
Animasi model: Sed-4-ON_KS_CS_Barat.mp4 Sed-4-ON_KS_CS_Timur.mp4 Gambar hasil model: Sed-4-ON_KS_CS_Barat.rar Sed-4-ON_KS_CS_Timur.rar						
9.a	Peningkatan TSS dari pengerukan dan penimbunan pipa gas pada jalur pipa dengan kedalaman <20 m di dekat Dermaga Utama	Pengeboran Horizontal (HDD-Horizontal Directional Drilling) dan Penggalan (Trenching) Dekat Pantai	MT	GEP	TSS	Konstruksi
Animasi model: Sed-6a-ON_KS_PU_Barat.mp4 Sed-6a-ON_KS_PU_Timur.mp4 Gambar hasil model: Sed-6a-ON_KS_PU_Barat.rar						

NO	POTENSI DAMPAK	SUMBER BUANGAN	MODEL	DOMAIN	LUARAN	Tahap
Sed-6a-ON_KS_PU_Timur.rar						
9.b	Peningkatan TSS dari pengerukan dan penimbunan pipa gas pada jalur pipa dengan kedalaman <20 m di dekat Dermaga Pioneer	Pengeboran Horizontal (HDD-Horizontal Directional Drilling) dan Penggalan (Trenching) Dekat Pantai	MT	GEP	TSS	Konstruksi
Animasi model: Sed-6b-ON_KS_PP_Barat.mp4 Sed-6b-ON_KS_PP_Timur.mp4 Gambar hasil model: Sed-6b-ON_KS_PP_Barat.rar Sed-6b-ON_KS_PP_Timur.rar						
Animasi model: 08-SC_ON_OP_SL_18_Barat.mp4 08-SC_ON_OP_SL_18_Timur.mp4 Gambar hasil model: 08-SC_ON_OP_SL_18_Barat.rar 08-SC_ON_OP_SL_18_Timur.rar						
10	Potensi gangguan dinamika sirkulasi laut karena adanya causeway	None	HD	ONLG	Arus Permukaan Laut	Operasi
11	Potensi terjadinya gangguan abrasi-akresi akibat perubahan dinamika gelombang karena adanya causeway	Angin maksimum diatas 1x standar deviasi	SW	ONLG	Karakteristik Gelombang	Konstruksi dan Operasi
Map Package ArcGIS pada folder " MXD " dengan keterangan nama file sebagai berikut: – "W_[Parameter Gelombang (2 digit)][Kondisi (1 digit)][Musim (1 digit)].mxd" = Nilai potensi abrasi berdasarkan parameter gelombang. – "W_[kode]_LB.mxd" = Status potensi abrasi berdasarkan parameter gelombang. – [Parameter Gelombang (2 digit)] yaitu sebagai berikut: 1. "MM" adalah maksimum tinggi gelombang tertinggi 2. "MP" adalah masimum kekekuatan gelombang 3. "MS" adalah rata-rata tinggi gelombang signifikan 4. "RM" adalah rata-rata tinggi gelombang tertinggi 5. "RP" adalah rata-rata kekekuatan gelombang 6. "RS" adalah rata-rata tinggi gelombang signifikan – [Kondisi (1 digit)] yaitu sebagai berikut: 1. "B" adalah kondisi pada saat konstruksi 2. "A" adalah kondisi pada saat operasi – [Musim (1 digit)] yaitu sebagai berikut: 1. "B" adalah pada saat Musim Barat 2. "T" adalah pada ssat Musim Timur						

NO	POTENSI DAMPAK	SUMBER BUANGAN	MODEL	DOMAIN	LUARAN	Tahap
Kumpulan gambar dari Map Package dapat dilihat pada folder " FIG ".						
12.a	Penurunan salinitas (desalinasi) karena terkonsentrasinya masukan air tawar dari sungai karena adanya causeway sehingga berpotensi terjadinya suksesi mangrove (konstruksi)	Sungai dan anak-anak sungai	AD via EcoLab	ONLG	Salinitas	Konstruksi dan Operasi
Animasi model: 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Barat.mp4 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Timur.mp4 Gambar hasil model: 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Barat.rar 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Timur.rar						
12.b	Penurunan salinitas (desalinasi) karena terkonsentrasinya masukan air tawar dari sungai karena adanya causeway sehingga berpotensi terjadinya suksesi mangrove (operasi)	Sungai dan anak-anak sungai	AD via EcoLab	ONLG	Salinitas	Konstruksi dan Operasi
Animasi model: 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Barat.mp4 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Timur.mp4 Gambar hasil model: 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Barat.rar 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Timur.rar						

11. Struktur direktori yang berisi folder dan kumpulan file sebagai bagian dari laporan ini adalah sebagai berikut:

1. +---[Abrasi-Akresi](#)
2. | +---[FIG](#)
3. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Barat.jpg
4. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Barat_Status_Abrasi-Akresi.jpg
5. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Timur.jpg
6. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
7. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_DED_Bar_DED_Timur.jpg
8. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_DED_Bar_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg

9. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_DED_Timur.jpg
10. | | Maksimum_Kekuatan_Gelombang_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
11. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Barat.jpg
12. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Barat_Status_Abrasi-Akresi.jpg
13. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Timur.jpg
14. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
15. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Bar_DED_Timur.jpg
16. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Bar_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
17. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Timur.jpg
18. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
19. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Barat.jpg
20. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Barat_Status_Abrasi-Akresi.jpg
21. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Timur.jpg
22. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
23. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Bar_DED_Timur.jpg
24. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Bar_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
25. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Timur.jpg
26. | | Maksimum_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
27. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Barat.jpg
28. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Barat_Status_Abrasi-Akresi.jpg
29. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Timur.jpg
30. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_AMDAL_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
31. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_DED_Bar_DED_Timur.jpg
32. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_DED_Bar_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
33. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_DED_Timur.jpg
34. | | Rata-rata_Kekuatan_Gelombang_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
35. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Barat.jpg
36. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Barat_Status_Abrasi-Akresi.jpg
37. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Timur.jpg
38. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_AMDAL_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
39. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Bar_DED_Timur.jpg
40. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Bar_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
41. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Timur.jpg
42. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Maks_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
43. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Barat.jpg
44. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Barat_Status_Abrasi-Akresi.jpg
45. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Timur.jpg
46. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_AMDAL_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
47. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Bar_DED_Timur.jpg
48. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Bar_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg
49. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Timur.jpg
50. | | Rata-rata_Tinggi_Gelombang_Signifikan_DED_Timur_Status_Abrasi-Akresi.jpg

51. | |

52. | \---[Decoupled_HD](#)

53. | SC_FPSO_Barat_DecouplingArea-2.dfsu

54. | SC_FPSO_Barat_DecouplingArea.dfsu

55. | SC_FPSO_Barat_DecouplingFlux-2.dfsu

56. | SC_FPSO_Barat_DecouplingFlux.dfsu

57. | SC_FPSO_Timur_DecouplingArea-2.dfsu

58. | SC_FPSO_Timur_DecouplingArea.dfsu

59. | SC_FPSO_Timur_DecouplingFlux-2.dfsu

60. | SC_FPSO_Timur_DecouplingFlux.dfsu

61. | SC_OLNG_After_Barat_DecouplingArea.dfsu

62. | SC_OLNG_After_Barat_DecouplingArea2.dfsu

63. | SC_OLNG_After_Barat_DecouplingFlux.dfsu

64. | SC_OLNG_After_Barat_DecouplingFlux2.dfsu

65. | SC_OLNG_After_Timur_DecouplingArea.dfsu

66. | SC_OLNG_After_Timur_DecouplingArea2.dfsu

67. | SC_OLNG_After_Timur_DecouplingFlux.dfsu

68. | SC_OLNG_After_Timur_DecouplingFlux2.dfsu

69. | SC_OLNG_Before_Barat_DecouplingArea.dfsu

70. | SC_OLNG_Before_Barat_DecouplingFlux.dfsu

71. | SC_OLNG_Before_Timur_DecouplingArea.dfsu

72. | SC_OLNG_Before_Timur_DecouplingFlux.dfsu

73. | Wave-Decoupled_MT-OLNG-After-Barat.dfsu

74. | Wave-Decoupled_MT-OLNG-After-Timur.dfsu

75. | Wave-Decoupled_MT-OLNG-Before-Barat.dfsu

76. | Wave-Decoupled_MT-OLNG-Before-Timur.dfsu

77. | \---[MXD](#)

78. | W_MMAB.mxd

79. | W_MMAB_LB.mxd

80. | W_MMAT.mxd

81. | W_MMAT_LB.mxd

82. | W_MMBB.mxd

83. | W_MMBB_LB.mxd

84. | W_MMBT.mxd

85. | W_MMBT_LB.mxd

86. | W_MPAB.mxd

87. | W_MPAB_LB.mxd

88. | W_MPAT.mxd

89. | W_MPAT_LB.mxd

90. | W_MPBB.mxd

91. | W_MPBB_LB.mxd

92. | W_MPBT.mxd

93.		W_MPBT_LB.mxd
94.		W_MSAB.mxd
95.		W_MSAB_LB.mxd
96.		W_MSAT.mxd
97.		W_MSAT_LB.mxd
98.		W_MSBB.mxd
99.		W_MSBB_LB.mxd
100.		W_MSBT.mxd
101.		W_MSBT_LB.mxd
102.		W_RMAB.mxd
103.		W_RMAB_LB.mxd
104.		W_RMAT.mxd
105.		W_RMAT_LB.mxd
106.		W_RMBB.mxd
107.		W_RMBB_LB.mxd
108.		W_RMBT.mxd
109.		W_RMBT_LB.mxd
110.		W_RPAB.mxd
111.		W_RPAB_LB.mxd
112.		W_RPAT.mxd
113.		W_RPAT_LB.mxd
114.		W_RPBB.mxd
115.		W_RPBB_LB.mxd
116.		W_RPBT.mxd
117.		W_RPBT_LB.mxd
118.		W_RSAB.mxd
119.		W_RSAB_LB.mxd
120.		W_RSAT.mxd
121.		W_RSAT_LB.mxd
122.		W_RSBB.mxd
123.		W_RSBB_LB.mxd
124.		W_RSBT.mxd
125.		W_RSBT_LB.mxd
126.		
127.		+--- Fig_RAR
128.		01-SC_FP_KO_DO_12_Barat.rar
129.		01-SC_FP_KO_DO_12_Timur.rar
130.		02-SC_FP_KO_SL_13_Barat.rar
131.		02-SC_FP_KO_SL_13_Timur.rar
132.		03-SC_FP_KO_SH_14_Barat.rar
133.		03-SC_FP_KO_SH_14_Timur.rar
134.		04-SC_FP_KO_TP_15_Barat.rar

135. | 04-SC_FP_KO_TP_15_Timur.rar
136. | 05-SC_FP_KO_TS_16_Barat.rar
137. | 05-SC_FP_KO_TS_16_Timur.rar
138. | 06-SC_FP_KO_BT_17_Barat.rar
139. | 06-SC_FP_KO_BT_17_Timur.rar
140. | 07-SC_ON_KO_SL_01_Barat.rar
141. | 07-SC_ON_KO_SL_01_Timur.rar
142. | 08-SC_ON_OP_SL_18_Barat.rar
143. | 08-SC_ON_OP_SL_18_Timur.rar
144. | 09-SC_ON_OP_TP_19_Barat.rar
145. | 09-SC_ON_OP_TP_19_Timur.rar
146. | 10-SC_ON_OP_TS_20_Barat.rar
147. | 10-SC_ON_OP_TS_20_Timur.rar
148. | 11-SC_ON_OP_KL_21_Barat.rar
149. | 11-SC_ON_OP_KL_21_Timur.rar
150. | 12-SC_ON_OP_SU_22_Barat.rar
151. | 12-SC_ON_OP_SU_22_Timur.rar
152. | 13-SC_ON_OP_BO_23_Barat.rar
153. | 13-SC_ON_OP_BO_23_Timur.rar
154. | 14-SC_ON_OP_CO_24_Barat.rar
155. | 14-SC_ON_OP_CO_24_Timur.rar
156. | 15-SC_ON_OP_TO_25_Barat.rar
157. | 15-SC_ON_OP_TO_25_Timur.rar
158. | 16-SC_ON_OP_PO_26_Barat.rar
159. | 16-SC_ON_OP_PO_26_Timur.rar
160. | 17-SC_ON_OP_NO_27_Barat.rar
161. | 17-SC_ON_OP_NO_27_Timur.rar
162. | 18-SC_ON_OP_FE_28_Barat.rar
163. | 18-SC_ON_OP_FE_28_Timur.rar
164. | 19-SC_ON_OP_HG_29_Barat.rar
165. | 19-SC_ON_OP_HG_29_Timur.rar
166. | 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Barat.rar
167. | 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Timur.rar
168. | 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Barat.rar
169. | 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Timur.rar
170. | HD_FPSO_KO_Barat.rar
171. | HD_FPSO_KO_Timur.rar
172. | HD_OLNG_KS_Barat.rar
173. | HD_OLNG_KS_Timur.rar
174. | HD_OLNG_OP_Barat.rar
175. | HD_OLNG_OP_Timur.rar
176. | Sed-2-ON_KS_DP_Barat.rar

177. | Sed-2-ON_KS_DP_Timur.rar
 178. | Sed-3-ON_KS_DM_Barat.rar
 179. | Sed-3-ON_KS_DM_Timur.rar
 180. | Sed-4-ON_KS_CS_Barat.rar
 181. | Sed-4-ON_KS_CS_Timur.rar
 182. | Sed-5-FP_KS_DC_Barat.rar
 183. | Sed-5-FP_KS_DC_Timur.rar
 184. | Sed-6a-ON_KS_PU_Barat.rar
 185. | Sed-6a-ON_KS_PU_Timur.rar
 186. | Sed-6b-ON_KS_PP_Barat.rar
 187. | Sed-6b-ON_KS_PP_Timur.rar
 188. | WM_OLNG_KS_Barat.rar
 189. | WM_OLNG_KS_Timur.rar
 190. | WM_OLNG_OP_Barat.rar
 191. | WM_OLNG_OP_Timur.rar
 192. | WP_OLNG_KS_Barat.rar
 193. | WP_OLNG_KS_Timur.rar
 194. | WP_OLNG_OP_Barat.rar
 195. | WP_OLNG_OP_Timur.rar
 196. | WS_OLNG_KS_Barat.rar
 197. | WS_OLNG_KS_Timur.rar
 198. | WS_OLNG_OP_Barat.rar
 199. | WS_OLNG_OP_Timur.rar
 200. | WT_OLNG_KS_Barat.rar
 201. | WT_OLNG_KS_Timur.rar
 202. | WT_OLNG_OP_Barat.rar
 203. | WT_OLNG_OP_Timur.rar
 204. |
 205. +---[Rep](#)
 206. | LAPORAN_Final.docx
 207. | LAPORAN_Final.pdf
 208. |
 209. \---[Sim](#)
 210. 01-SC_FP_KO_DO_12_Barat.mp4
 211. 01-SC_FP_KO_DO_12_Timur.mp4
 212. 02-SC_FP_KO_SL_13_Barat.mp4
 213. 02-SC_FP_KO_SL_13_Timur.mp4
 214. 03-SC_FP_KO_SH_14_Barat.mp4
 215. 03-SC_FP_KO_SH_14_Timur.mp4
 216. 04-SC_FP_KO_TP_15_Barat.mp4
 217. 04-SC_FP_KO_TP_15_Timur.mp4
 218. 05-SC_FP_KO_TS_16_Barat.mp4

- 219. 05-SC_FP_KO_TS_16_Timur.mp4
- 220. 06-SC_FP_KO_BT_17_Barat.mp4
- 221. 06-SC_FP_KO_BT_17_Timur.mp4
- 222. 07-SC_ON_KO_SL_01_Barat.mp4
- 223. 07-SC_ON_KO_SL_01_Timur.mp4
- 224. 08-SC_ON_OP_SL_18_Barat.mp4
- 225. 08-SC_ON_OP_SL_18_Timur.mp4
- 226. 09-SC_ON_OP_TP_19_Barat.mp4
- 227. 09-SC_ON_OP_TP_19_Timur.mp4
- 228. 10-SC_ON_OP_TS_20_Barat.mp4
- 229. 10-SC_ON_OP_TS_20_Timur.mp4
- 230. 11-SC_ON_OP_KL_21_Barat.mp4
- 231. 11-SC_ON_OP_KL_21_Timur.mp4
- 232. 12-SC_ON_OP_SU_22_Barat.mp4
- 233. 12-SC_ON_OP_SU_22_Timur.mp4
- 234. 13-SC_ON_OP_BO_23_Barat.mp4
- 235. 13-SC_ON_OP_BO_23_Timur.mp4
- 236. 14-SC_ON_OP_CO_24_Barat.mp4
- 237. 14-SC_ON_OP_CO_24_Timur.mp4
- 238. 15-SC_ON_OP_TO_25_Barat.mp4
- 239. 15-SC_ON_OP_TO_25_Timur.mp4
- 240. 16-SC_ON_OP_PO_26_Barat.mp4
- 241. 16-SC_ON_OP_PO_26_Timur.mp4
- 242. 17-SC_ON_OP_NO_27_Barat.mp4
- 243. 17-SC_ON_OP_NO_27_Timur.mp4
- 244. 18-SC_ON_OP_FE_28_Barat.mp4
- 245. 18-SC_ON_OP_FE_28_Timur.mp4
- 246. 19-SC_ON_OP_HG_29_Barat.mp4
- 247. 19-SC_ON_OP_HG_29_Timur.mp4
- 248. 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Barat.mp4
- 249. 20_33_SC_ON_KO_SL_32_Timur.mp4
- 250. 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Barat.mp4
- 251. 20_33_SC_ON_OP_SL_32_Timur.mp4
- 252. HD_FPSO_KO_Barat.mp4
- 253. HD_FPSO_KO_Timur.mp4
- 254. HD_OLNG_KS_Barat.mp4
- 255. HD_OLNG_KS_Timur.mp4
- 256. HD_OLNG_OP_Barat.mp4
- 257. HD_OLNG_OP_Timur.mp4
- 258. Sed-2-ON_KS_DP_Barat.mp4
- 259. Sed-2-ON_KS_DP_Timur.mp4
- 260. Sed-3-ON_KS_DM_Barat.mp4

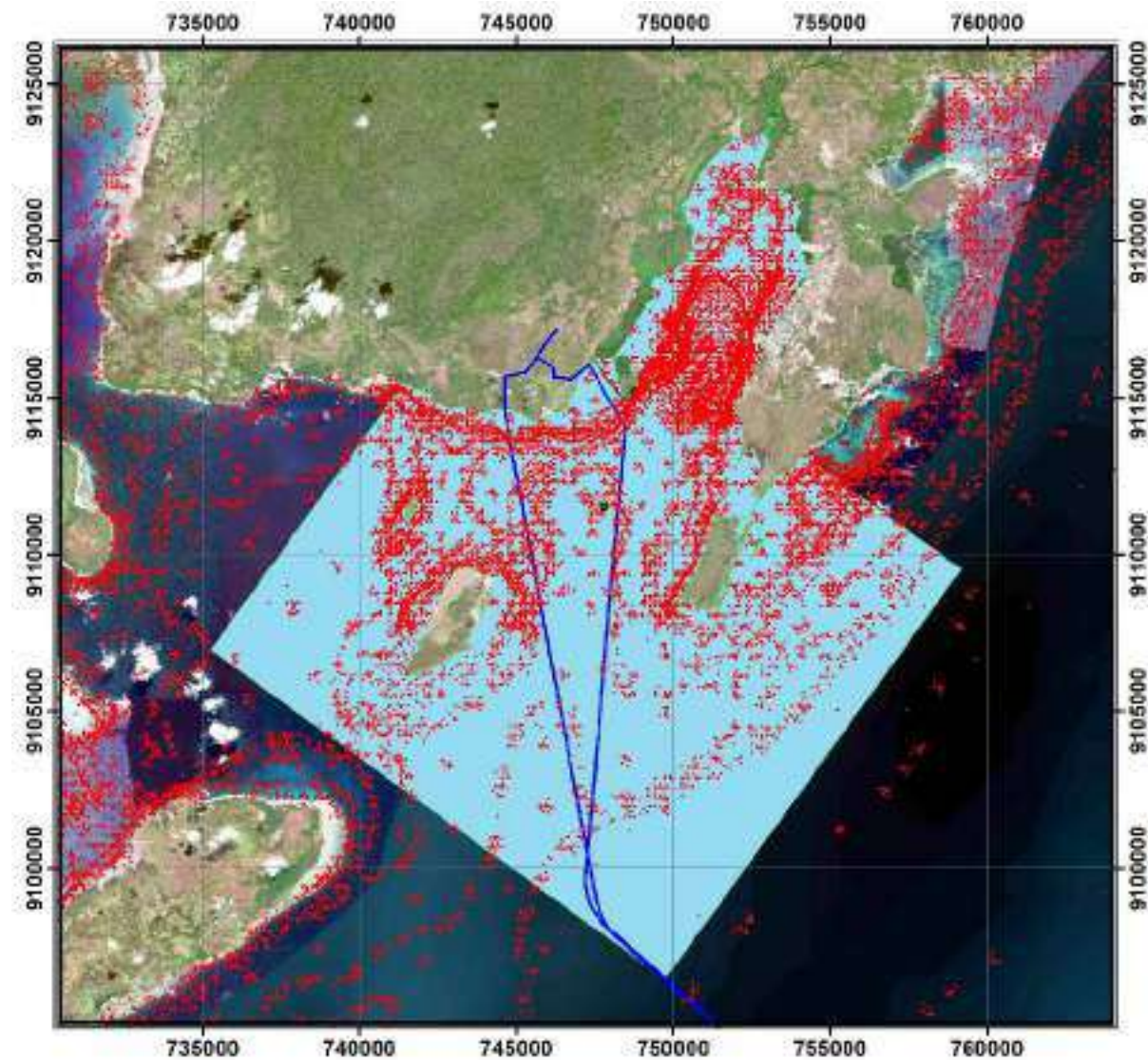
- 261. Sed-3-ON_KS_DM_Timur.mp4
- 262. Sed-4-ON_KS_CS_Barat.mp4
- 263. Sed-4-ON_KS_CS_Timur.mp4
- 264. Sed-5-FP_KS_DC_Barat.mp4
- 265. Sed-5-FP_KS_DC_Timur.mp4
- 266. Sed-6a-ON_KS_PU_Barat.mp4
- 267. Sed-6a-ON_KS_PU_Timur.mp4
- 268. Sed-6b-ON_KS_PP_Barat.mp4
- 269. Sed-6b-ON_KS_PP_Timur.mp4
- 270. WM_OLNG_KS_Barat.mp4
- 271. WM_OLNG_KS_Timur.mp4
- 272. WM_OLNG_OP_Barat.mp4
- 273. WM_OLNG_OP_Timur.mp4
- 274. WP_OLNG_KS_Barat.mp4
- 275. WP_OLNG_KS_Timur.mp4
- 276. WP_OLNG_OP_Barat.mp4
- 277. WP_OLNG_OP_Timur.mp4
- 278. WS_OLNG_KS_Barat.mp4
- 279. WS_OLNG_KS_Timur.mp4
- 280. WS_OLNG_OP_Barat.mp4
- 281. WS_OLNG_OP_Timur.mp4
- 282. WT_OLNG_KS_Barat.mp4
- 283. WT_OLNG_KS_Timur.mp4
- 284. WT_OLNG_OP_Barat.mp4
- 285. WT_OLNG_OP_Timur.mp4

7 Daftar Pustaka

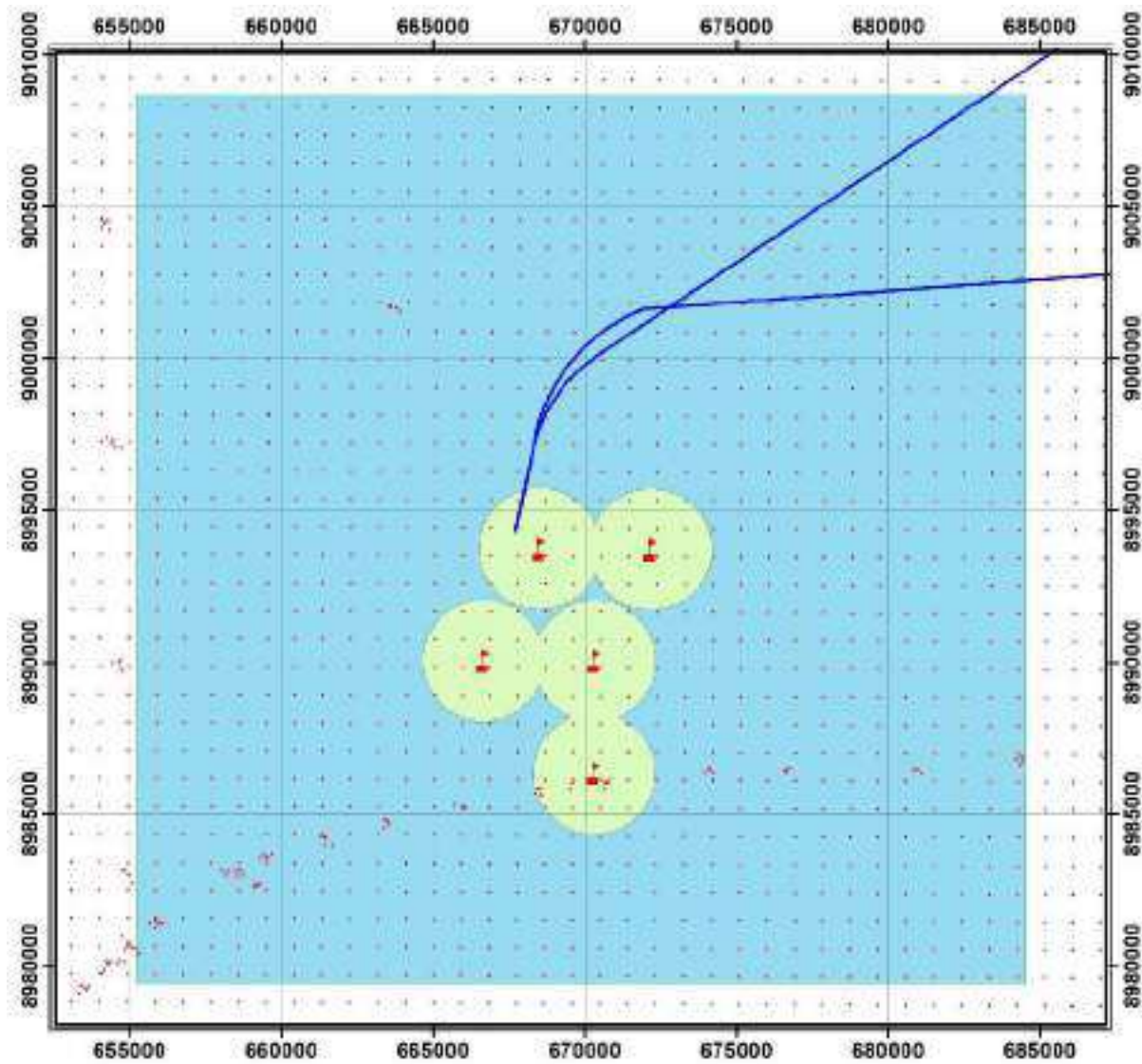
- Audunson T., H.K. Celius, O. Johansen, P. Steinbakke and S.E. Sorstrom. 1984. The Experimental Oil Spill on Haltenbanken 1982. Publication No. 112. Trondheim. Norway. Continental Shelf Institute. pp. 109.
- Burt T.N. 1986. Field settling velocities of estuary muds. In Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Springer Verlag, Berlin, pp 126-150.
- CMFMWOS 1985. Computer Model Forecasting Movements and Weathering of Oil Spills. Final Report for the European Economic Community, WQI and DHI, October 1985.
- CONCAWE. 1983. Characteristics of Petroleum and its Behaviour at Sea. Report no 8/83.
- Duffie. J.A. and W.A. Beckmann. 1974. Diesel Energy Thermal Processes. Wiley Interscience, New York.
- Fay J.A. 1969. The spread of Oil Slick on a Calm Sea. In Oil on the Sea.
- Hossain K. and D. Mackay. 1980. Demoussifier - a new chemical for oil spill countermeasures. Spill Tech News. 5(6):154-156.
- Komen G.J., L. Cavaleri, M. Doneland, K. Hasselmann, S. Hasselmann and P.A.E.M. Janssen. 1994. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press. UK. 560pp.
- Krone R.B. 1962. Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Processes. Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory. Univ. of California. Berkely. California.
- Mackay D., Wells P.G. and Patterson S. 1980. Chemical Dispersion of Oil Spills. An International Research Symposium. Intitute for Environmental Studies. Univ. of Toronto. Pub. No. EE-17. pp. 216.
- Munk W., Anderson E. 1948. Notes on the theory of the thermocline. Journal of Marine Research. 7. 276-295.
- Parchure. T. M. and Mehta A.J. 1985. Erosion of soft cohesive sediment deposits. Journal of Hydraulic Engineering - ASCE 111 (10). 1308-1326.
- Rodi W. 1984. Turbulence models and their applications in hydraulics. IAHR. Delft. the Netherlands.
- Smagorinsky. 1963. J. General Circulation Experiment with the Primitive Equations. Monthly Weather Review. 91. No. 3. pp 99-164.
- Teeter A.M. 1986. Vertical Transport in Fine-Grained Suspension and Nearly-Deposited Sediment. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. Springer Verlag. pp. 126-149.
- Young. I. and R.M. Gorman. 1995. Measurements of the evolution of ocean wave spectra due to bottom friction. J. Geophys. Res. 100. C6. pp. 10987-11004.

8 Lampiran

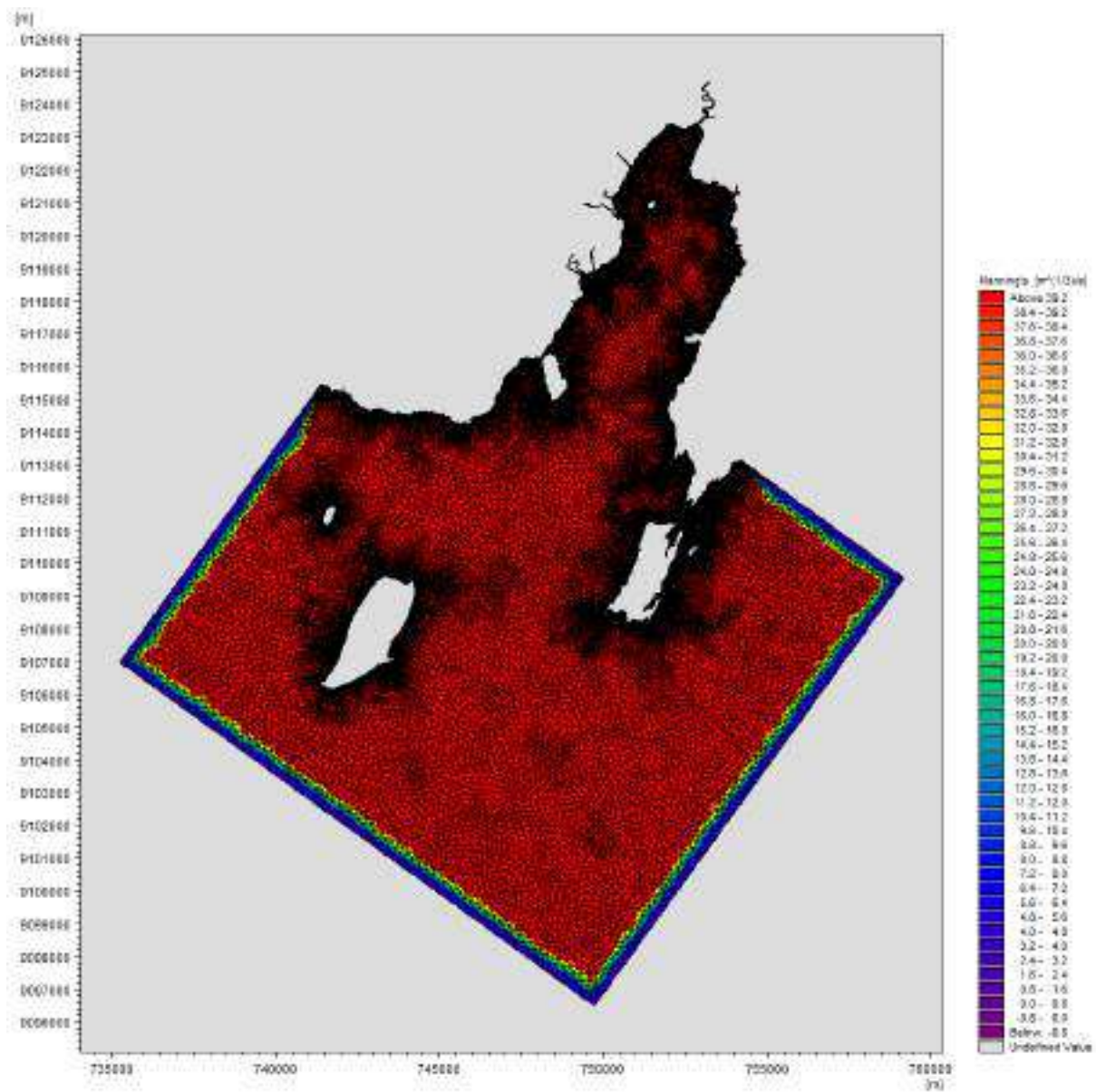
Lampiran 1. Sebaran Data In-situ Batimetri yang digunakan untuk Membangun Disain Grid Finite Elment di Domain Model di OLNG.



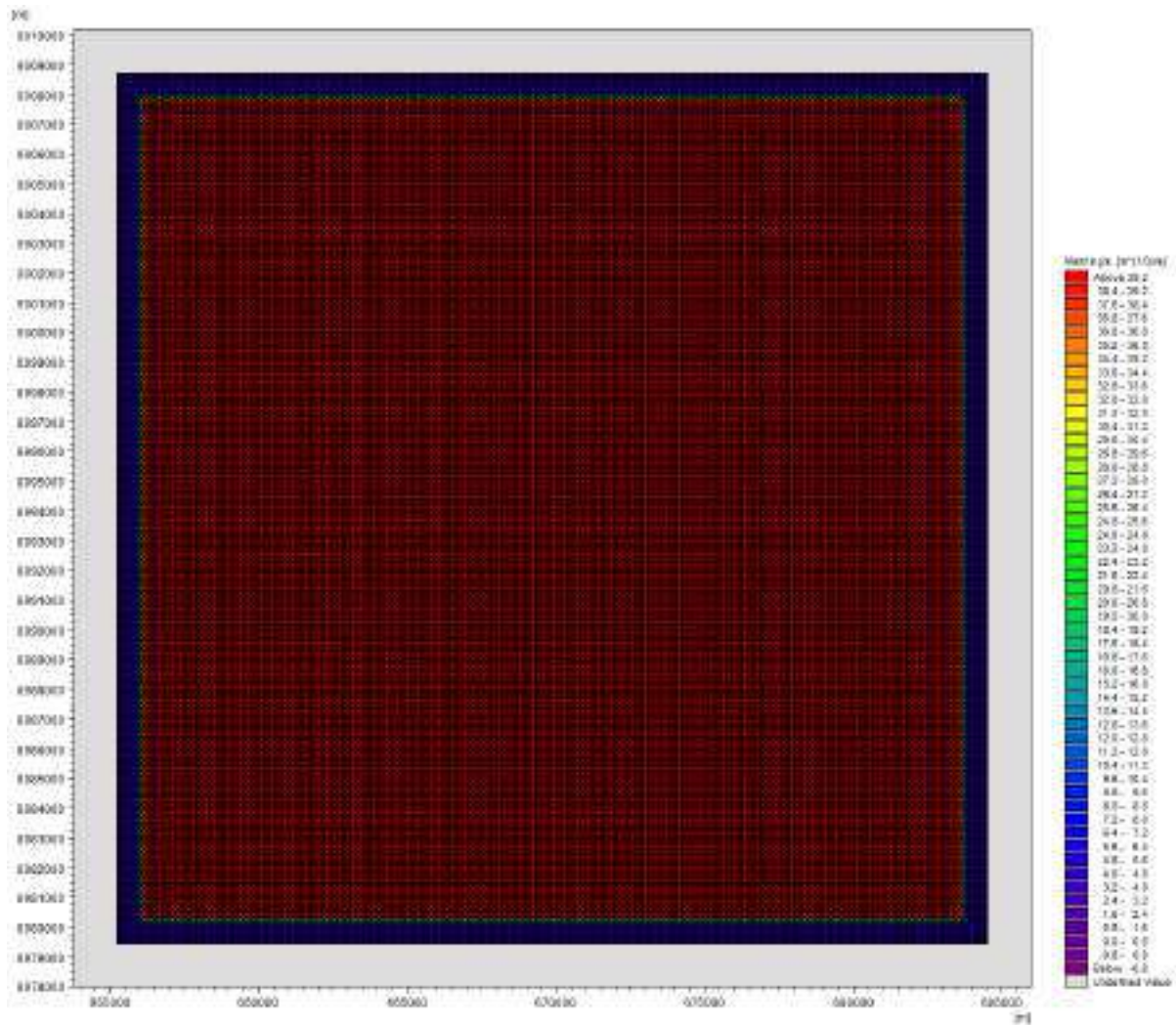
Lampiran 2. Sebaran Data In-situ Batimetri yang digunakan untuk Membangun Disain Grid Finite Elment di Domain Model di FPSO.



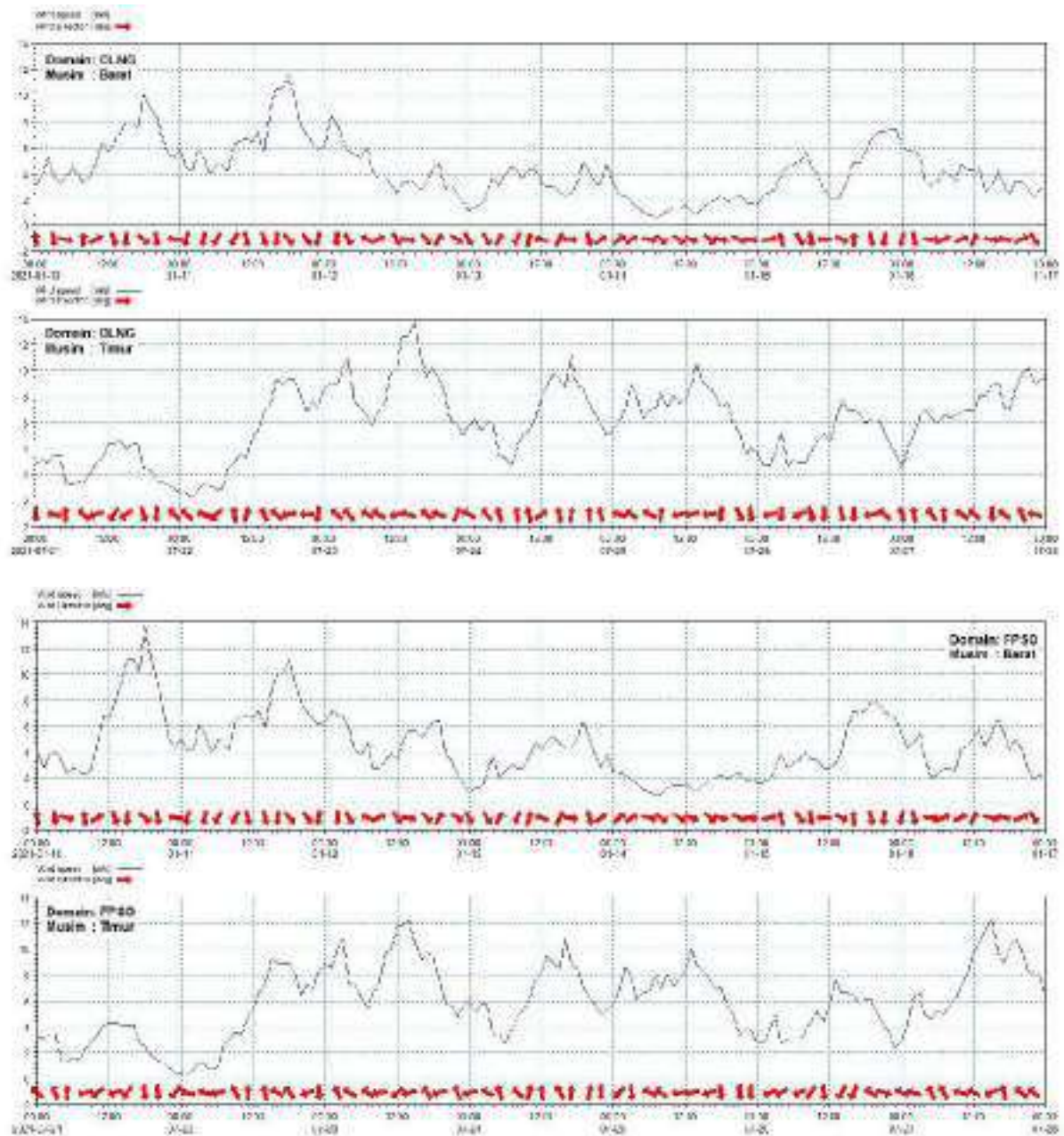
Lampiran 3. Sebaran Data In-situ Batimetri yang digunakan untuk Membangun Disain Grid Finite Elment di Domain Model di OLNG dan FPSO.



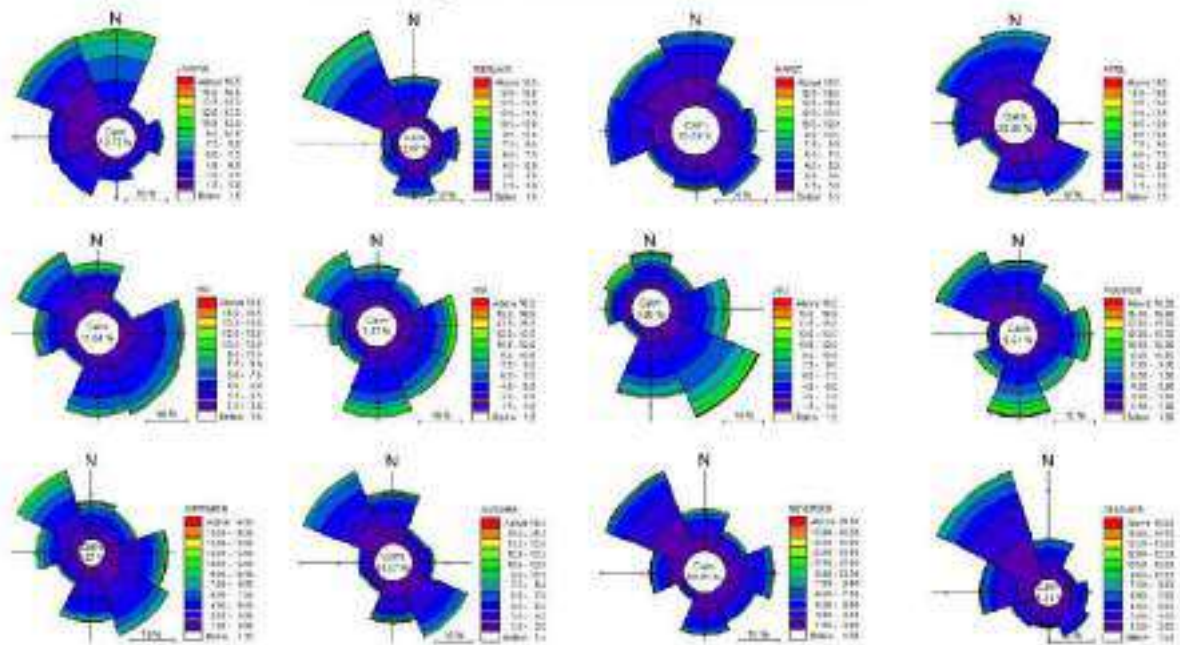
Lampiran 4. Sebaran Data In-situ Batimetri yang digunakan untuk Membangun Disain Grid Finite Elment di Domain Model di OLNG dan FPSO.



Lampiran 5. Karakteristik Angin di Lokasi Domain Model OLNG dan FPSO pada Musim Barat dan Timur dan Mawar Angin Normal Bulanan di Perairan Sekitar OLNG.

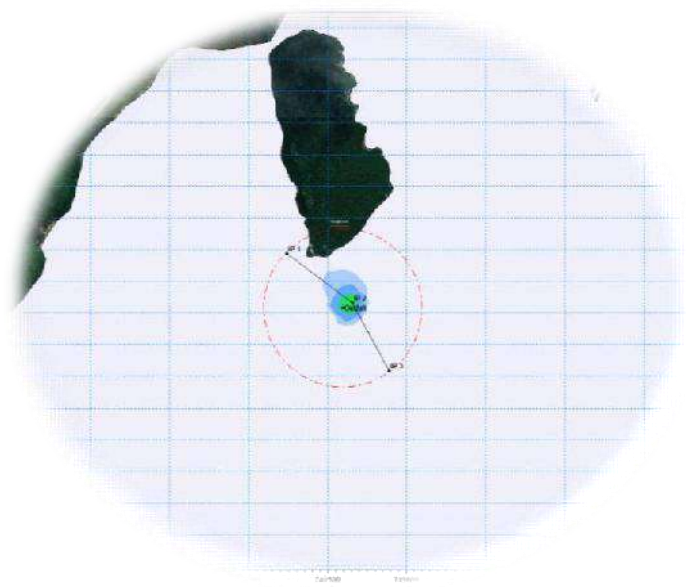


Mawar Angin di OLANG Muka Teluk Saumlaki



Studi Sebaran Limbah Dari Kegiatan OLNG di Perairan Teluk Saumlaki

INPEX Masela, Ltd



Draft Report

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL.....	ii
DAFTAR GAMBAR	ii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan dan Sasaran	1
1.3. Manfaat	2
1.4. Lokasi Kajian	2
1.5. Ruang Lingkup Sudi	2
2. METODOLOGI.....	3
2.1. Pengumpulan data	3
2.2. Metode Model Sebaran Limbah.....	4
2.2.1.Modul Hidrodinamika (HD)	4
2.2.2.Modul Mud Transport (MT).....	7
2.2.3.Modul Transport (T).....	8
2.3. Setup dan Desain Model.....	9
2.3.1. Domain dan Elemen Model.....	9
2.3.2. Initial dan open boundary	9
2.4. Sekenario Simulasi Model.....	11
3. KONDISI OSEANOGRAFI	13
3.1. Kedalaman Perairan	13
3.2. Pasang Surut	14
3.3. Gelombang.....	17
3.4. Suhu dan Salinitas	19
3.5. Pola Arus	21
3.5.1.Arus Pengukuran	21
3.5.2.Arus Pemodelan	24
4. AREA SENSITIF.....	42
5. PARAMETER KUNCI DAN SEBARAN AIR LIMBAH.....	44
5.1. Parameter Kunci.....	44

5.2. Sebaran Air Limbah Model Skenario 1 -----	45
5.3. Sebaran Air Limbah Model Seknario 2 -----	115
6. ZID DAN USULAN TITIK PANTAU -----	185
7. KESIMPULAN-----	188
8. DAFTAR PUSTAKA -----	189

DAFTAR TABEL

1. Spesifikasi data beserta sumbernya yang digunakan dalam kajian-----	3
2. Koordinat titik penataan dan titik buangan beserta masing-masing debit sumber limbah -----	12
3. Konstanta pasut hasil analisis metode <i>least square</i> stasiun Saumlaki dan OLNG ----	16
4. Elevasi-elevasi penting pasang surut pada tipe pasut harian tunggal (<i>mixed semidiurnal tides</i>)-----	16
5. Deskripsi statistik tinggi dan periode gelombang hasil pengukuran bulan Februari-September 2020-----	17
6. Persentase tinggi dan arah gelombang hasil pengukuran bulan Februari-September 2020 -----	18
7. Deskripsi ststistik suhu hasil pengukuran bulan Februari-September 2020-----	20
8. Salinitas berdasarkan hasil analisis samper air laut 18 titik stasiun -----	20
9. Deskripsi statistik kecepatan arus hasil bulan Februari-September 2020 -----	21
10. Nilai RMSE (<i>root mean square error</i>) dan persen kesalahan relative (<i>error percent</i>) arus dan pasut hasil model dengan hasil pengukuran -----	25
11. Jarak area sensitif degan titik buangan aktivitas OLNG -----	42
12. Koordinat titik penataan dan titik buangan beserta masing-masing debit sumber limbah -----	44
13. Parameter dan konsentrasi limbah yang keluar dari masing-masing titik buangan ---	45
14. Hasil perhitungan delta temperature yang digunakan sebagai input model-----	64
15. Hasil perhitungan delta temperature yang digunakan sebagai input model-----	125
16. Koordinat usulan titik pemantauan kualitas air laut-----	186

DAFTAR GAMBAR

1. Lokasi kajian-----	2
2. Diskritisasi model dalam bentuk elemen seitiga -----	9
3. Rata-rata angin bulanan 2011-2020. (a) bulan Januari; (b) bulan April ; (c) bulan Agustus; (d) bulan Oktober-----	11
4. Karakterisitk kedalaman sekitar lokasi studi -----	13
5. Profil melintang (<i>cross section</i>) kedalaman dari pantai ke arah tenggara (A-B)---	14
6. Grafik fluktuasi pasang surut hasil pengukuran tanggal 1-31 Juli 2021 stasiun Saumlaki (atas) dan pengukuran Feburari-Spetember 2020 stasiun OLNG (bawah) -----	15
7. Tinggi dan periode gelombang signifikan hasil pengukuran bulan Februari-September 2020 -----	17
8. Mawar gelombang (kiri) dan distribusi frekuensi tinggi gelombang (kanan) hasil pengukuran bulan Februari-September 2020-----	19
9. Karakter suhu hasil pengukuran bulan Februari-September 2020 -----	20
10. Mawar arus (<i>current rose</i>) yang menunjukkan arah dan kecepatan arus-----	24
11. Perbandingan pola arus hasil model dan pengukuran-----	24

12.	Perbandingan pasang surut hasil model dan pengukuran. (atas) Stasiun pasut Saumlaki dan (bawah) Stasiun Pasut OLNG -----	25
13.	Rata-rata pola arus permukaan hasil simulasi pada bula Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah)-----	28
14.	Rata-rata pola arus permukaan hasil simulasi pada bula Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah) -----	29
15.	Pola arus saat menjelang pasang kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model -----	31
16.	Pola arus saat menjelang pasang kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model -----	32
17.	Pola arus saat pasang kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model-----	34
18.	Pola arus saat pasang kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model-----	35
19.	Pola arus saat menjelang surut kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model -----	37
20.	Pola arus saat menjelang surut kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model -----	38
21.	Pola arus saat surut kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model-----	40
22.	Pola arus saat surut kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) <i>overlay</i> vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model-----	41
23.	Area sensitif sekitar aktivitas OLNG -----	42
24.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	48
25.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I-----	49
26.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	50
27.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	51
28.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat -----	52
29.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	53
30.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	54
31.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	55
32.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	56
33.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	57
34.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	58

35.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	59
36.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	60
37.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I-----	61
38.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	62
39.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	63
40.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	65
41.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I-----	66
42.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	67
43.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	68
44.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	69
45.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I-----	70
46.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	71
47.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	72
48.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	73
49.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I-----	74
50.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	75
51.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	76
52.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	78
53.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I-----	79
54.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	80
55.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	81
56.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	82
57.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi musim skenario-1 kondisi peralihan I-----	83
58.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur-----	84
59.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II-----	85
60.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat-----	86
61.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I-----	87

62.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	88
63.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	89
64.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat -----	90
65.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	91
66.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	92
67.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	93
68.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat -----	96
69.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	97
70.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	98
71.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	99
72.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat -----	100
73.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	101
74.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	102
75.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	103
76.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat -----	103
77.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	104
78.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	105
79.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	106
80.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat -----	107
81.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	108
82.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	109
83.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	110
84.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat -----	111
85.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I -----	112
86.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur -----	113
87.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II -----	114
88.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	117

89.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I-----	118
90.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur-----	119
91.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II-----	120
92.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat-----	121
93.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I-----	122
94.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur-----	123
95.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II-----	124
96.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat-----	127
97.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I-----	128
98.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur-----	129
99.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II-----	130
100.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat-----	131
101.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I-----	132
102.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur-----	132
103.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II-----	133
104.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat-----	134
105.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I-----	135
106.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur-----	136
107.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II-----	137
108.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat-----	139
109.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I-----	140
110.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur-----	141
111.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II-----	142
112.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat-----	143
113.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I-----	144
114.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur-----	145
115.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II-----	146

116.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	147
117.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	148
118.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	149
119.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	150
120.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	151
121.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	152
122.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	153
123.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	154
124.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	156
125.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	157
126.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	158
127.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	159
128.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	160
129.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	161
130.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	162
131.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	163
132.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	164
133.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	165
134.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	166
135.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	167
136.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	168
137.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	169
138.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	170
139.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	171
140.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	173
141.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	174
142.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	175

143.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	176
144.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	177
145.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	178
146.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	179
147.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	180
148.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat -----	181
149.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I -----	182
150.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur -----	183
151.	Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II -----	184
152.	Area <i>Zone of Initial Dilution</i> (ZID) berdasarkan deliniasi model skenario-1 parameter nitrat -----	185
153.	Area <i>Zone of Initial Dilution</i> (ZID) berdasarkan deliniasi model skenario-2 parameter nitrat -----	186
154.	Peta usulan titik pantau kualitas air laut-----	187

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

INPEX Masela, Ltd berencana mengajukan permohonan persetujuan teknis (PERTEK) pembuangan limbah cair ke laut. Salah satu syarat dalam mengajukan PERTEK yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 Tahun 2021 adalah membuat kajian lingkungan terkait parameter oseanografi dan model sebaran limbah ketika masuk ke perairan laut. Parameter oseanografi yang akan dikaji dalam studi ini adalah parameter oseanografi yang berpengaruh terhadap limbah ketika masuk ke perairan. Beberapa parameter oseanografi tersebut meliputi batimetri, pasang surut, arus, suhu dan salinitas (stratifikasi dan profil densitas). Selanjutnya beberapa data oseanografi tersebut akan digunakan untuk mengkaji atau digunakan sebagai input model sebaran dan *fate* limbah ketika masuk ke perairan.

Limbah yang dimodelkan bersumber dari *Treated wastewater from AOC Drains Treatment package, Treated wastewater from COC Drains Treatment package, Treated wastewater from Chemically Contaminated Waste Treatment package, Treated wastewater from Leachate Treatment package, Treated sewage (sanitary water) from STP dan Brine water*, sedangkan parameter yang dimodelkan minyak dan lemak, total organic carbon, klorin residu, temperature, pH, BOD, COD, TSS, total nitrogen, mercury, cadmium, ammonia, total coliform, salinitas, fosfat dan nitrat. Keenambelas parameter tersebut diduga akan memberikan dampak yang tidak baik pada ekosistem perairan laut. Untuk mengetahui perilaku limbah tersebut ketika memasuki perairan laut maka diperlukan suatu kajian yang mampu menggambarkan penyebaran secara spasial maupun temporal. Salah satu metode yang sering digunakan untuk menggambarkan sebaran dan *fate* dari limbah ketika memasuki perairan laut adalah dengan melakukan pemodelan numerik.

1.2. Tujuan dan Sasaran

Tujuan dari studi ini adalah

- Mempelajari karakteristik beberapa parameter oseanografi seperti kedalaman perairan (batimetri), pasang surut, pola arus, suhu dan salinitas
- Menduga pola sebaran dan peningkatan konsentrasi limbah setelah masuk ke perairan badan air penerima
- Menentukan zona of initial dilution (ZID)
- Mengusulkan beberapa titik pantau kualitas air laut berdasarkan deliniasi zona of initial dilution (ZID)

Sasaran yang ingin dicapai adalah

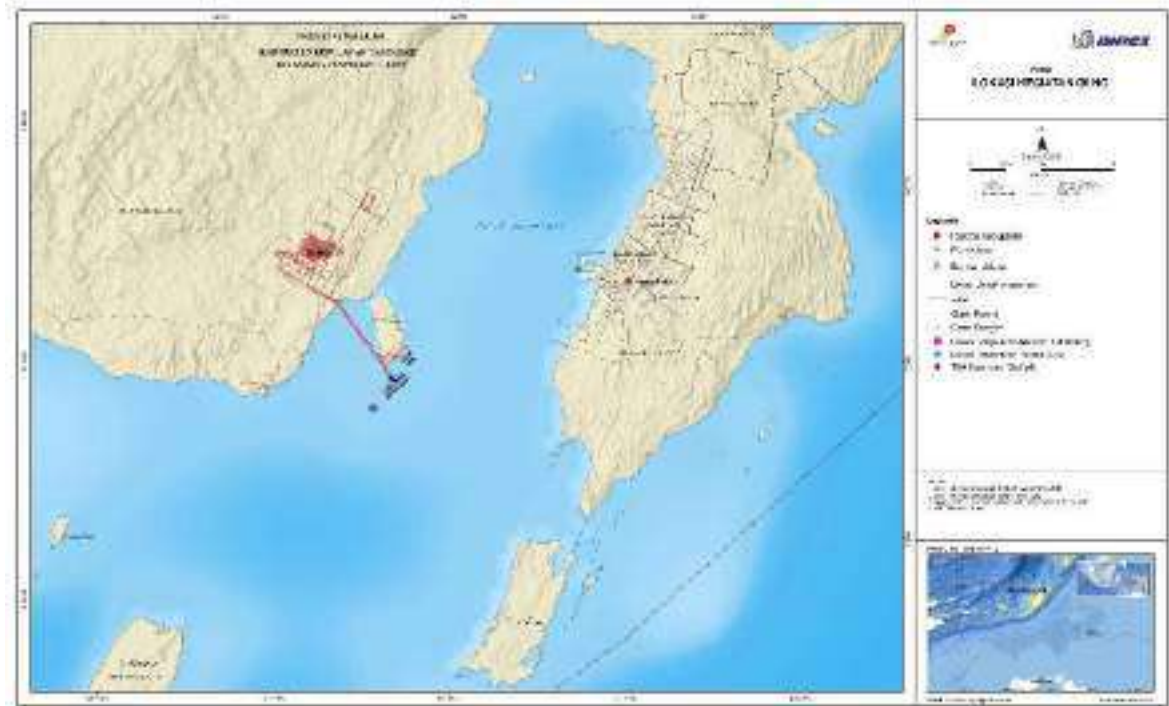
- Diketahuinya area atau luasan yang terpapar oleh limbah konsentrasi tinggi (melebihi baku mutu)

1.3. Manfaat

Manfaat dari kajian ini adalah diperoleh informasi sebaran dari limbah tersebut, sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengelolaan lingkungan

1.4. Lokasi Kajian

Lokasi kajian ini berada di perairan Laut Teluk Saumlaki, Provinsi Maluku. Lokasi tersebut terhubung langsung dengan perairan Samudera Hindia dan Laut Arafura. Secara geografis lokasi kajian disajikan dalam **Gambar 1**.



Gambar 1. Lokasi kajian

1.5. Ruang Lingkup Sudi

Berberapa lingkup studi dalam kegiatan ini adalah sebagai berikut:

- Melakukan pengumpulan dan pengolahan data pendukung seperti kedalaman perairan (batimetri), pasang surut, gelombang, arus, suhu dan salinitas, serta limbah cair
- Mensimulasikan sebaran limbah cair dibuang di kolom perairan dengan menggunakan model DHI MIKE 3 FM
- Menentukan zona of initial dilution berdasar model sebaran limbah
- Mengusulkan titik pemantauan berdasarkan *zona of initial dilution*

2. METODOLOGI

2.1. Pengumpulan data

Data yang digunakan dalam studi ini terdiri dari data meteorologi, oseanografi dan kualitas air. Data meteorologi yang digunakan hanya berupa angin, sedangkan beberapa data fisik oseanografi yang digunakan diantaranya adalah batimetri, pasang surut, gelombang, arus, suhu dan salinitas. Untuk data kualitas air terdiri dari kualitas air limbah dan kualitas air laut badan air penerima. Data yang digunakan merupakan data primer maupun sekunder yang diperoleh berbagai sumber, seperti ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), Marine Copernicus, Badan Informasi Geospasial (BIG), PUSHIDROSAL dan INPEX Masela, Ltd. Spesifikasi data beserta masing-masing sumber tersaji dalam **Tabel 1**

Tabel 1. Spesifikasi data beserta sumbernya yang digunakan dalam kajian

No	Data	Spesifikasi	Sumber
1	Batimetri	Peta PUSHIDROSAL No 382 R1 dan R2 skala 1:15000 dan 1:50000	- PUSHIDROSAL
		Hasil pengukuran	- INPEX Masela, Ltd
2	Angin	Data angin interval per 6 jam tahun 2011-2020	- ECMWF
3	Pasang Surut	Pasang surut untuk verifikasi model hasil pengukuran	- INPEX Masela, Ltd dan BIG
		Elevasi pasut untuk syarat batas atau batas terbuka input model	Prediksi berdasarkan model FES2004
4	Gelombang	Hasil pengukuran Februari-September 2020	INPEX Masela, Ltd
5	Suhu dan salinitas	Hasil pengukuran (mooring) Februari-September 2020	INPEX Masela, Ltd
6	Arus	Arus harian tahun 2020 untuk syarat batas model	Copernicus marine data
		Hasil pengukuran Februari-September 2020	INPEX Masela, Ltd
7	Limbah cair	Koordinat buangan, debit buangan, parameter dan konsentrasi limbah	INPEX Masela, Ltd
8	Kualitas air laut	Kualitas air laut berdasarkan analisis sampel dengan parameter mengacu pada PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII	INPEX Masela, Ltd

2.2. Metode Model Sebaran Limbah

Model yang digunakan dalam studi ini adalah model numerik dalam bentuk *software user interface* dengan nama DHI MIKE yang dikembangkan oleh *Danish Hydraulic Institute* (DHI) *Water and Environment*, Denmark. Di dalam model DHI MIKE terdiri dari beberapa paket model, akan tetapi dalam studi ini paket model yang digunakan adalah DHI MIKE 3 Flow Model FM. Paket ini merupakan paket model yang digunakan untuk pemodelan 3 dimensi dengan pendekatan berdasarkan *cell-centred finite volume method* (metode volume hingga). Di dalam paket model ini terdiri dari beberapa modul untuk menyelesaikan beberapa permasalahan yang terjadi di lingkungan perairan, akan tetapi dalam studi ini hanya menggunakan modul Hidrodinamika (HD), Modul *Mud Transport* (MT) dan modul Transport (T). Ketiga modul tersebut masing-masing digunakan untuk menyelesaikan hidrodinamika perairan (sirkulasi arus), dinamika sedimen ketika masuk ke perairan dan menyelesaikan sebaran polutan yang masuk ke perairan.

2.2.1. Modul Hidrodinamika (HD)

Langkah awal sebelum melakukan pemodelan limbah adalah melakukan pemodelan hidrodinamika perairan dengan menggunakan modul HD dari paket model DHI MIKE 3 Flow FM, selanjutnya hasil dari pemodelan hidrodinamika digunakan sebagai masukan model sebaran polutan atau limbah. Dasar persamaan yang digunakan dalam pemodelan hidrodinamika ini adalah kontinuitas dan persamaan momentum dengan menggunakan solusi 3 dimensi tak mampat (*incompressible*) Reynolds persamaan Navier-Stokes, dengan asumsi Boussinesq dan tekanan hidrostatik. Persamaan kontinuitas dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

Selanjutnya persamaan momentum arah x dan arah y berturut-turut dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) +$$

$$F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) +$$

$$F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

dimana,

t : waktu.

x, y & z : koordinat kartesian.

η : tinggi muka laut.

d : kedalaman perairan.

h : $(\eta + h)$

u, v & w : komponen kecepatan arus arah zonal, meridional dan vertikal.

f : komponen koriolis ($2\Omega \sin \phi$) dimana Ω adalah kecepatan rotasi bumi dan ϕ adalah posisi lintang

g : percepatan gaya gravitasi bumi.

ρ : densitas air sungai.

S_{xx}, S_{xy}, S_{yx} & S_{yy} : radiasi tensor tekanan massa air pada komponen xx, xy, yx dan yy .

vt : turbulensi vertikal.

P_a : tekanan udara

ρ_0 : referensi densitas air.

S : debit dari sumber.

U_s & V_s : kecepatan debit aliran

- Tegangan horisontal digambarkan sebagai gradien tekanan yang disederhanakan sebagai

$$F_u + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (4)$$

$$F_v + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (5)$$

Dimana, A adalah eddy viscosity horisontal

- Syarat batas (*boundary condition*) permukaan dan dasar komponen u, v dan w dituliskan sebagai berikut

- Saat $Z = \eta$, menggunakan persamaan sebagai berikut

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (6)$$

- Saat $Z = -d$, menggunakan persamaan berikut

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (7)$$

Dimana, (τ_{sx}, τ_{sy}) dan (τ_{bx}, τ_{by}) masing-masing merupakan gaya gesek angin dan dasar perairan arah x dan arah y .

- Total kedalaman (h) dapat diperoleh dari kinematika kondisi batas (*boundary condition*) dipermukaan setelah medan kecepatan diketahui dari persamaan momentum dan kontinuitas, namun demikian persamaan cenderung lebih kuat apabila mengintegrasikan persamaan kontinuitas lokal sebagai berikut

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}}{\partial y} = hS + \hat{P} - \hat{E} \quad (8)$$

Dimana, $\hat{P}$ dan $\hat{E}$ masing-masing adalah evaporasi dan curah hujan, sedangkan $\bar{u}$ dan $\bar{v}$ kecepatan arus yang dirata-ratakan terhadap kedalaman.

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (9)$$

- Fluida diasumsikan sebagai aliran tak mampat (*incompressible*), akan tetapi densitas (ρ) tidak tergantung dengan tekanan, melainkan pada suhu (T) dan salinitas (s) dengan persamaan sebagai berikut (UNESCO dalam DHI, 2012)

$$\rho = \rho(T, S) \quad (10)$$

- Perpindahan (*Transport*) suhu dan salinitas dijabarkan sebagai persamaan difusi sebagai berikut

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial S}{\partial z} \right) + \hat{H} + S_s S \quad (12)$$

Dimana D_v merupakan koefisien turbulensi vertikal (*eddy*); $\hat{H}$ adalah koefisien pertukaran bahang dengan atmosfer. T_s dan S_s masing-masing menyatakan sumber suhu dan salinitas

- Difusi horisontal (F) didefinisikan sebagai berikut

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (13)$$

Dimana D_h adalah koefisien difusi horisontal. Koefisien difusi berhubungan dengan eddy viskositas yang dijabarkan dalam persamaa berikut

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T} \text{ dan } D_v = \frac{V_t}{\sigma_T} \quad (14)$$

Dimana σ_T adalah bilangan Prandtl

- Syarat batas (*boundary condition*) suhu di dasar dan permukaan perairan dijabarkan sebagai berikut

- Saat $z = \eta$, maka :

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 c_p} + T_p \hat{P} - T_e \hat{E} \quad (15)$$

- Saat $z = -d$, maka:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

Dimana Q_n merupakan fluks bersih bahang permukaan dan $c_p = 4217 \text{ J/(kg.}^\circ\text{K)}$ adalah bahang spesifik air

- Syarat batas (*boundary condition*) salinitas di permukaan dan dasar dijabarkan sebagai berikut

- Saat $z = \eta$, maka :

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

- Saat $z = -d$ maka :

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

- Selanjutnya ketika mempertimbangkan evaporasi dalam pertukaran bahang di atmosfer, maka persamaannya adalah sebagai berikut

$$\hat{E} = \begin{cases} \frac{q_v}{\rho_0 l_v} & q_v > 0 \\ 0 & q_v \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

Dimana q_v merupakan fluk bahang laten dan $l_v = 2,5 \times 10^6$ adalah bahang laten penguapan air

2.2.2. Modul Mud Transport (MT)

Modul Mud Transport (MT) digunakan dalam pemodelan sebaran dinamika sedimen ketika masuk ke perairan, dalam studi ini sedimen yang dimodelkan adalah sedimen melayang atau sering disebut total suspended solid (TSS). Hasil model hidrodinamika dua dimensi, pada saat yang bersamaan akan menjadi data masukan (input) *model mud transport* guna menduga sebaran TSS. Dasar persamaannya yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial wc}{\partial z} - \frac{\partial w_s c}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{Tx}}{\sigma_{Tx}} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{Ty}}{\sigma_{Ty}} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{Tz}}{\sigma_{Tz}} \frac{\partial c}{\partial z} \right) &+ S \end{aligned} \quad (20)$$

Dimana:

- t : waktu
- x,y,z : koordinat kartesian
- u,v,w : kecepatan komponen arus
- c : konsentrasi
- w_s : kecepatan jatuh sedimen
- σ_{Tx} : bilangan turbulen schmidt
- VT_x : anistropik eddy viskositas
- S : debit buangan

- Laju deposisi dinyatakan dengan persamaan (Krone dalam DHI, 2012) berikut:

$$S_D = w_s c_b p_d \quad (20)$$

Dimana:

S_D : laju deposisi

w_s : kecepatan jatuh sedimen (m/s)

c_b : konsentrasi dekat dasar (kg/m³)

p_d : probability deposisi : $1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$, $\tau_b \leq \tau_{cd}$

τ_b : tegangan geser dasar (N/m²)

τ_{cd} : tegangan geser dasar kritis untuk deposisi (N/m²)

- Mehta et al. (1989) dalam DHI (2012), menggambarkan laju erosi dasar dengan persamaan berikut:

$$S_E = E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right), \quad \tau_b > \tau_{ce} \quad (21)$$

dimana:

E : erodibility dasar (kg/m²/s)

τ_{ce} : tegangan geser dasar kritis untuk erosi (N/m²)

- Kecepatan jatuh sedimen, diformulasikan dengan persamaan berikut (Rijn, 1984; Yalin, 1972; Engelund, Fredsoe, 1976 dalam DHI, 2012):

$$w = \begin{cases} \frac{(s-1)gd^2}{18v} & d < 100\mu\text{m} \\ \frac{10v}{d} \left\{ \left[1 + \frac{0.01(s-1)gd^3}{v^2} \right]^{0.5} - 1 \right\} & 100 < d \leq 1000\mu\text{m} \\ 1.1[(s-1)gd]^{0.5} & d > 1000\mu\text{m} \end{cases} \quad (22)$$

2.2.3. Modul Transport (T)

Modul Transport digunakan untuk pemodelan sebaran polutan atau limbah, dalam studi ini polutan yang dimodelkan adalah *minyak dan lemak, total organic carbon, klorin residu, temperature, pH, BOD, COD, TSS, total nitrogen, mercury, cadmium, ammonia, total coliform, salinitas, fosfat dan nitrat*. Model sebaran polutan diselesaikan dengan persamaan adveksi-dispersi. Persamaan adveksi-dispersi dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial}{\partial t}(hc) + \frac{\partial}{\partial x}(uhc) + \frac{\partial}{\partial y}(vhc) = \frac{\partial}{\partial x} \left(h \cdot D_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) + \left(h \cdot D_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} \right) - F \cdot h \cdot c + S \quad (23)$$

Dimana :

c : konsentrasi polutan rata-rata terhadap kedalaman

u, v : kecepatan aliran yang dirata-ratakan terhadap kedalaman (m/s)

D_x, D_y : koefisien dispersi (m²/s)

h : kedalaman (m)

F : koefisien peluruhan/pelarutan (sec-1)

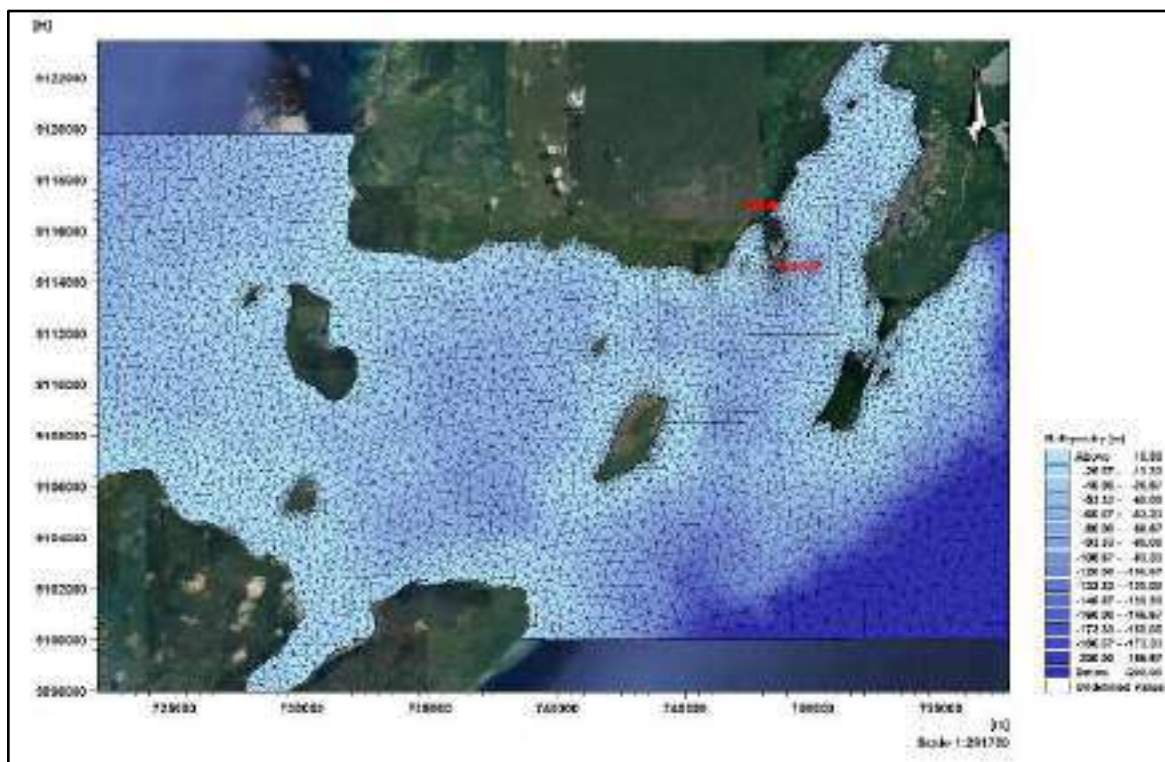
S : $Q_s, (C_s - c)$

Qs : debit polutan per satuan luas horizontal ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)
 Cs : konsentrasi polutan dari debit

2.3. Setup dan Desain Model

2.3.1. Domain dan Elemen Model

Dalam studi ini area pemodelan (area komputasi) dibuat seluas mungkin atau sejauh mungkin dengan area *interest*, tujuannya adalah untuk mendapatkan aliran batas terbuka pasut secara benar dan memperoleh kestabilan model yang baik di area *interest*. Lokasi yang menjadi area *interest* dalam kajian ini adalah di sekitar lokasi rencana pembuangan limbah. Selanjutnya dikarenakan dalam studi ini solusi numerik yang digunakan adalah *cell-centred finite volume method* (metode volume hingga), maka area model dibagi dalam bentuk segitiga kecil (elemen) kemudian diterapkan ke dalam bentuk diskritisasi. Elemen-elemen yang digunakan dalam studi ini dibuat bervariasi, ukuran elemen yang detail di buat di area *interest* (lokasi pembuangan limbah), sedangkan untuk elemen yang lokasi yang jauh dari wilayah kajian dibuat ukuran besar. Gambaran diskritisasi area model secara horisontal (*horizontal plane*) diperlihatkan pada **Gambar 2** berikut:



Gambar 2. Diskritisasi model dalam bentuk elemen segitiga

2.3.2. Initial dan open boundary

a. Kondisi awal (*initial condition*)

Kondisi awal yang digunakan dalam pemodelan hidrodinamika adalah tinggi muka air permukaan dan komponen kecepatan arus. Dalam studi ini nilai kondisi awal untuk muka

air menggunakan nilai nol atau muka air dianggap rata, sementara komponen arus menggunakan model global yang dikembangkan oleh *marine copernicus*. Kondisi awal yang digunakan dalam model *Mud Transport* (perpindahan sedimen) dan Transport (sebaran limbah) adalah konsentrasi TSS dan beberapa parameter limbah input model. Dalam kajian nilai konsentrasi awal TSS dan parameter limbah lainnya di perairan dianggap nol atau konsentrasi hasil model merupakan nilai peningkatan (penambahan).

b. Syarat batas (*boundary condition*)

Kondisi batas yang digunakan dalam pemodelan hidrodinamika terdiri batas tertutup (*closed boundary*), batas terbuka laut (*open sea boundary condition*), batas permukaan bebas (*free surface boundary condition*) dan debit (*discharge*).

➤ Batas tertutup (*closed boundary*)

Batas tertutup yang digunakan adalah daratan atau pulau-pulau yang berada di area komputasi model. Pada batas ini secara otomatis komputasi tidak dilakukan.

➤ Batas terbuka (*Open boundary*)

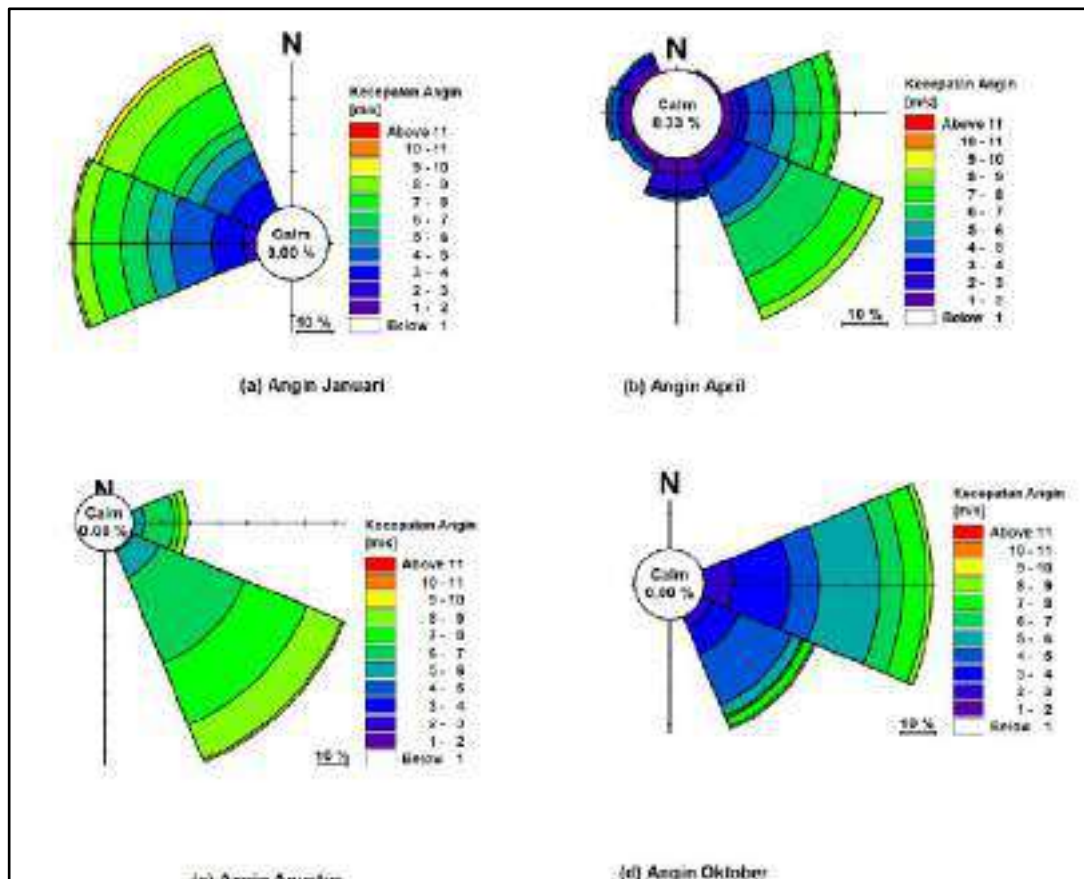
Batas terbuka yang digunakan dalam kajian ini adalah data pasang surut. Data tersebut adalah ramalan dari AG95 (*updated to Andersen 2006*) yang dikembangkan oleh Ole Baltazar Andersen. Model ini merupakan suatu model peramalan pasang surut global dengan resolusi $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ yang merupakan data asimilasi dari data TOPEX/Poseidon dengan menggunakan pendekatan *finite element*. Lokasi pemodelan pada studi ini akan menggunakan empat batas terbuka pasang surut, yakni batas utara (*north boundary*), batas timur (*easth boundary*) dan batas selatan (*south boundary*) dan batas barat (*west boundary*). Data ramalan pasut yang digunakan sebagai batas terbuka bervariasi terhadap ruang dan waktu.

➤ Debit (*discharge*)

Data debit yang digunakan untuk syarat batas merupakan debit dari sistem buangan limbah. Debit yang digunakan berasal dari satu titik buangan (*outfall*). Debit buangan tersebut diasumsikan mengalir secara terus menerus

➤ Batas permukaan bebas (*Free Surface Boundary Condition*)

Batas permukaan yang digunakan dalam kajian ini adalah angin, hal ini dikarenakan pergerakan angin di permukaan perairan akan mengubah kecepatan arus dibawahnya karena efek tegangan geser (*shear stress*). Data angin masukan model diperoleh dari ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) yang merupakan data reanalisis dari gabungan data seluruh Badan Meteorologi dunia. Data angin mempunyai interval waktu tiap 3 jam dengan resolusi spasial $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ dengan cakupan global. Data angin yang digunakan merupakan data bulan Januari (mewakili Musim Barat), April (mewakili Musim Peralihan I), Agustus (mewakili Musim Timur) dan Oktober (mewakili Musim Peralihan II). Gambaran data angin yang digunakan input model disajikan dalam **Gambar 3**



Gambar 3. Rata-rata angin bulanan 2011-2020. (a) bulan Januari; (b) bulan April ; (c) bulan Agustus; (d) bulan Oktober

2.4. Skenario Simulasi Model

Dalam studi ini lama simulasi model hidrodinamika dan sebaran limbah dilakukan selama 15 hari dengan tujuan untuk memperoleh kondisi pasut perbani dan pasut purnama, selain itu waktu simulasi dilakukan pada empat kondisi musim yang berbeda, yakni

1. Skenario 1; simulasi dilakukan pada bulan Januari dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh Musim Barat
2. Skenario 2; simulasi dilakukan pada bulan April dengan tujuan untuk memperoleh pengaruh Musim Peralihan I
3. Skenario 3; simulasi dilakukan pada bulan Agustus dengan tujuan untuk memperoleh pengaruh Musim timur
4. Skenario 4; simulasi dilakukan pada bulan oktober dengan tujuan untuk memperoleh pengaruh Musim Peralihan II

Selain skenario lama hari simulasi dan skenario musiman, skenario juga diterapkan terhadap debit buangan limbah. Dalam studi ini skenario pembuangan limbah terdiri dari 2 skenario seperti yang diperlihatkan dalam **Tabel 2** berikut:

Tabel 2. Koordinat titik penataan dan titik buangan beserta masing-masing debit sumber limbah

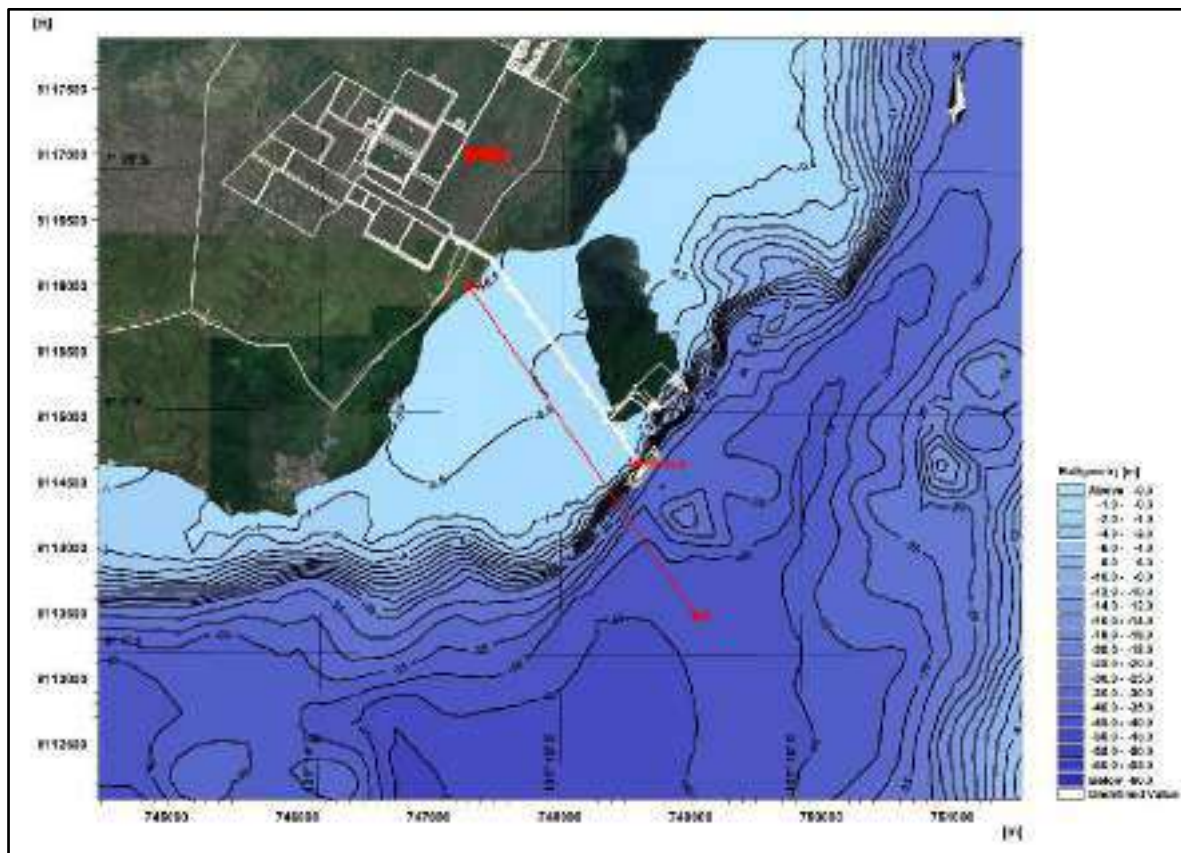
No	Bujur	Lintang	Kode	Jenis Titik	Sumber Limbah	Debit [m3/jam] Skenario-1	Debit [m3/jam] Skenario-2
1	131°14'37.62"E	7°58'56.05"S	TP- 1A	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from AOC Drains Treatment package</i>	10	10
2	131°14'37.26"E	7°58'55.83"S	TP-1B	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from COC Drains Treatment package</i>	10	10
3	131°14'36.93"E	7°58'57.15"S	TP-1C	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from Chemically Contaminated Waste Treatment package</i>	10	10
4	131°14'36.58"E	7°58'55.49"S	TP-1D	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from Leachate Treatment package</i>	50	50
5	131°14'36.18"E	7°58'55.27"S	TP-2	Titik Penataan	<i>Treated sewage (sanitary water) from STP</i>	25	128
6	131° 15' 14,98" 131° 15' 33,04"	08° 00' 26,64" 08° 00' 09,72"	TP-3A dan TP-3B	Titik Penataan	<i>Brine water</i>	300	300
7	131°15' 19.19" E	8°00' 12.64 " S	Outfall	Titik Buangan	Total Limbah	405	508

3. KONDISI OSEANOGRAFI

3.1. Kedalaman Perairan

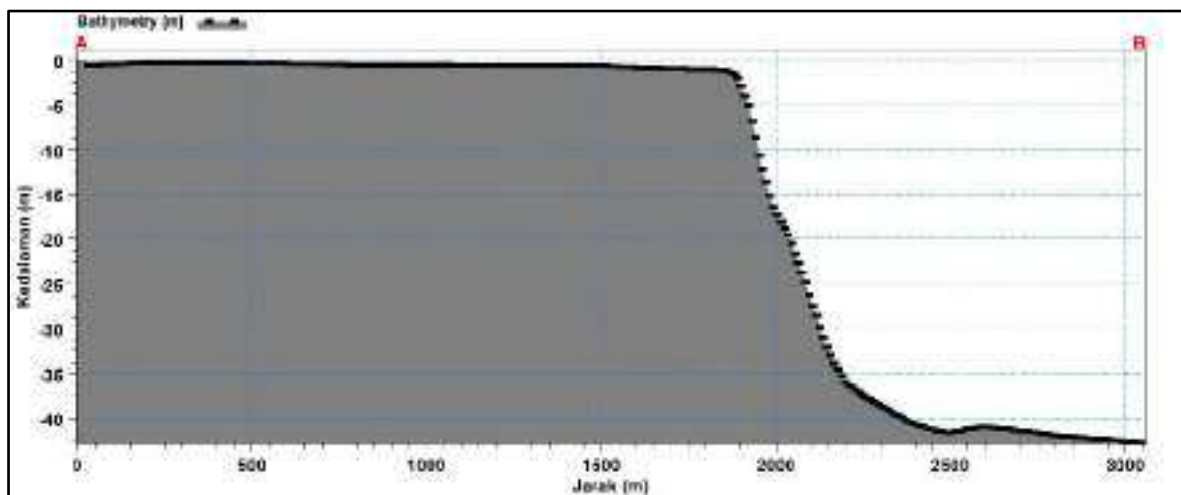
Kedalaman perairan merupakan salah satu paramater penting dalam kajian lingkungan perairan. Jika dikaitkan dengan suatu polutan atau limbah, maka kedalaman merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pengenceran limbah ketika memasuki suatu perairan. Umumnya semakin dalam perairan maka limbah akan mudah terencerkan, sebaliknya ketika perairan dangkal maka pengenceran akan lebih lambat, selain itu faktor hidrodinamika tentunya juga sangat berperan penting dalam pendistribusi dan pengencer limbah ketika masuk ke perairan.

Karakteristik kedalaman sekitar lokasi studi diperlihatkan dalam **Gambar 4** dan **Gambar 5**. Kedua gambar tersebut masing-masing adalah kontur kedalaman (*isodepth*) dengan satuan meter dalam bentuk dua dimensi dan profil melintang kedalaman (cross section) tegak lurus terhadap garis pantai ke arah tenggara (A-B). Pada profil gambar dua dimensi terbaca skala warna yang menunjukkan gradien kedalaman laut, mulai dari biru terang hingga biru gelap, biru terang menunjukkan perairan dangkal dan biru gelap menandakan bagian dari perairan yang lebih dalam. Kedalaman lingkungan perairan sekitar lokasi studi cukup bervariasi, dimana di sekitar wilayah kajian kedalaman mencapai 40-45 m, sementara di sekitar titik rencana pembuangan limbah (*outfall*) berkisar 4-6 m



Gambar 4. Karakteristik kedalaman sekitar lokasi studi

Profil melintang (*cross section*) kedalaman merupakan perubahan nilai kedalaman terhadap perubahan jarak. Berdasarkan **Gambar 5** terlihat perubahan kedalaman terhadap perubahan jarak ke laut lepas tergolong lambat, di mana pada jarak 1000 m ke arah laut lepas kedalaman yang terlihat tidak lebih dari 0.5 m, selanjutnya pada jarak 1800 m kedalaman baru meningkat hingga 1 m. Kedalaman mulai meningkat drastis ketika mencapai jarak 1900 m dari pantai, dimana kedalaman pada jarak 1900 m dan 1950 m masing-masing mencapai 3 m dan 10 m, selanjutnya pada jarak 2000 m kedalaman yang terlihat meningkat hingga 17 m. Pada jarak 3000 m kedalaman yang terlihat sudah mencapai 42 m. Dalam morfologi pantai, perubahan kedalaman yang relatif kecil terhadap perubahan jarak ke arah laut lepas ini dikatakan sebagai pantai yang landai, sebaliknya dikatakan terjal apabila perubahan kedalaman relative cepat. Secara kuantitatif kemiringan pantai dapat dihitung dengan cara mencari sudut perbandingan antara nilai kedalaman dengan perubahan jarak. Rata-rata hasil perhitungan kemiringan pantai di lokasi studi pada jarak 0-1900 m tergolong kecil yakni 0.05° , sedangkan pada jarak lebih besar dari 1900 m sebesar 7.8° . Berdasarkan kriteria yang dikemukakan oleh van Zuidam (1985) bahwa kemiringan pantai di bawah 2° merupakan pantai tergolong datar, sementara pada sudut kemiringan antara $4-8^\circ$ merupakan pantai yang terjal.

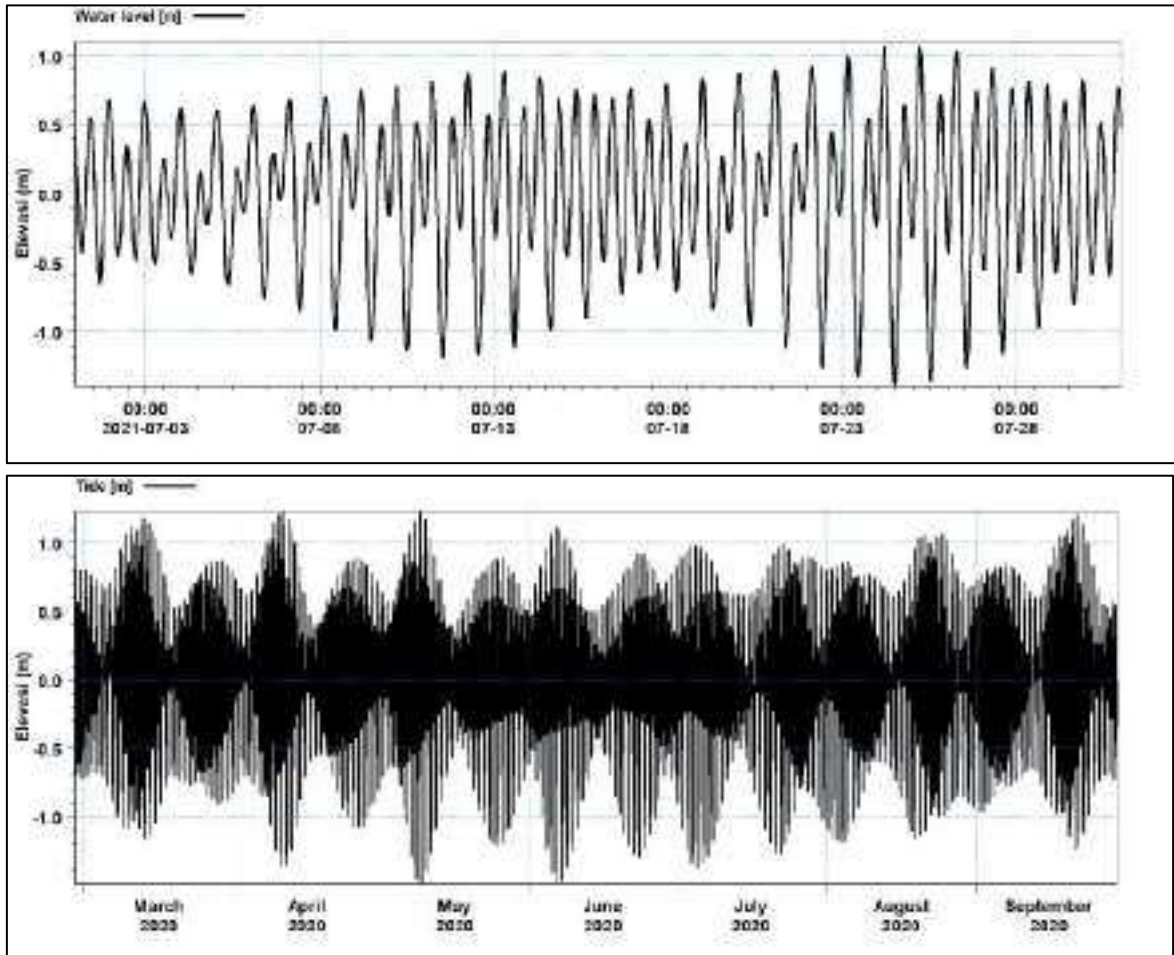


Gambar 5. Profil melintang (*cross section*) kedalaman dari pantai ke arah tenggara (A-B)

3.2. Pasang Surut

Pasang surut (pasut) adalah proses naik turunnya paras laut (sea level) secara berkala yang ditimbulkan oleh adanya gaya tarik dari benda-benda angkasa, terutama matahari dan bulan terhadap massa air laut di bumi. Selain untuk keperluan teknis perencanaan bangunan pantai dan navigasi, pasang surut merupakan salah satu parameter penting dalam kajian lingkungan akibat suatu kegiatan di perairan. Sebagai contoh jika ada suatu perairan karakter arusnya sangat dipengaruhi oleh pasang surut, maka suatu polutan yang masuk ke perairan tersebut karakter pergerakannya akan lebih mudah untuk diprediksi.

Data pasang surut di perairan lokasi studi diperoleh berdasarkan hasil pengukuran secara langsung di lapangan di dua stasiun berbeda, yakni di stasiun Saumlaki dan Stasiun OLNG (MS14-F-KP-170). Pengukuran data pasut stasiun Saumlaki dilakukan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) pada tanggal 1-31 Juli 2021 dengan interval data tiap 1 jam, sedangkan stasiun OLNG diukur oleh INPEX Masela LTD periode Februari-September 2020. Grafik series kedua data pasut pengukuran tersebut diperlihatkan dalam **Gambar 6**.



Gambar 6. Grafik fluktuasi pasang surut hasil pengukuran tanggal 1-31 Juli 2021 stasiun Saumlaki (atas) dan pengukuran Feburari-Spetember 2020 stasiun OLNG (bawah)

Selanjutnya data pasut yang diperoleh dianalisis dengan metode *least square* untuk memperoleh konstanta harmonis pasut yang diperlihatkan dalam **Tabel 3**. Berdasarkan tabel tersebut terlihat amplitudo komponen pasut ganda (semidiurnal) memperlihatkan nilai yang dominan dibandingkan dengan pasut tunggal (diurnal). Total amplitudo pasut ganda (S2, M2, N2 dan K2) di stasiun Saumlaki dan OLNG masing-masing mencapai 59.43% dan 64.36%, sedangkan pada pasut tunggal (K1, O1 dan P1) masing-masing sebesar 40.25% dan 35.35%. Sisanya merupakan pasut perairan dangkal (M4 dan MS4) yang persentasenya tergolong kecil, yakni pada stasiun Sumlaki sebesar 0.32% dan stasiun OLNG sebesar 0.29%. Berdasarkan tabel juga terlihat terdapat perbedaan nilai beda fase antara stasiun Saumlaki dan stasiun OLNG, dimana nilai beda fase komponen semidiurnal

(komponen dominan) stasiun OLANG terlihat lebih kecil dibandingkan stasiun Saumlaki. Hal ini menunjukkan kejadian pasang dan surut di stasiun OLANG terjadi terlebih dahulu dibandingkan stasiun Saumlaki.

Hasil perhitungan bilangan Formzhal yang berguna untuk menentukan tipe pasut di stasiun Saumlaki dan OLANG masing-masing diperoleh 0.69 dan 0.58. Berdasarkan kriteria *courtier range* kedua nilai tersebut termasuk dalam tipe pasang campuran harian ganda (*mixed semidiurnal tides*). Tipe pasut ini merupakan tipe pasut yang dalam satu hari terjadi dua kali air pasang dan dua kali air surut, akan tetapi terdapat perbedaan amplitudo.

Tabel 3. Konstanta pasut hasil analisis metode *least square* stasiun Saumlaki dan OLANG

Kontantan Pasut	Stasiun OLANG		Stasiun Saumlaki	
	Amplitudo (m)	Beda Fase (°)	Amplitudo (m)	Beda Fase (°)
S0	0.00		0.00	
M2	0.61	146	0.62	152
S2	0.20	206	0.16	224
K1	0.27	194	0.32	205
O1	0.21	188	0.21	187
N2	0.13	122	0.13	116
K2	0.06	202	0.04	224
P1	0.08	185	0.11	205
M4	0.002	36	0.003	84
MS4	0.003	110	0.003	195

Berdasarkan konstanta yang diperoleh selanjutnya ditentukan elevasi-elevasi penting pasut yang diperlihatkan pada **Tabel 4**. Tunggang pasut yang ddigunakan mengacu pada pada tinggi muka air laut rata-rata (MSL). Hasil perhitungan muka air tertinggi (HAT) untuk stasiun Saumlaki dan OLANG masing-masing diperoleh 1.6 m dan 1.57 m. Muka air tertinggi (HHWL) dan terendah (LLWL) pada saat purnama maupun bulan mati di stasiun Saumlaki masing-masing diperoleh 1.47 m dan -1.47 m, sedangkan pada stasiun OLANG masing-masing sebesar 1.43 m dan -1.43 m. Nilai tunggang pasut atau jarak antara pasang tertinggi dan surut terendah berdasarkan keseluruhan komponen di stasiun Saumlaki diperoleh 3.21 m, sedangkan di stasiun OLANG sebesar 3.14 m

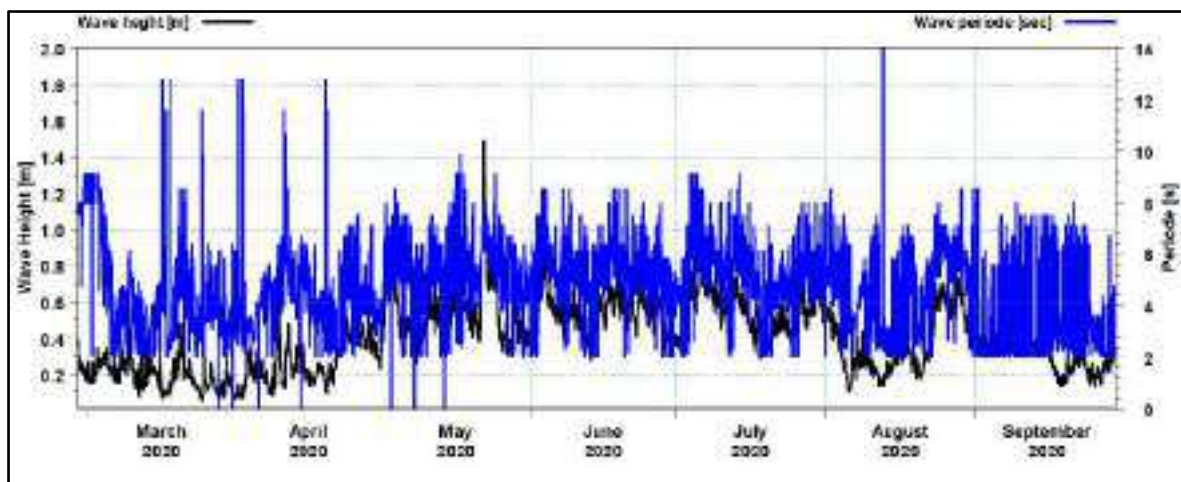
Tabel 4 Elevasi-elevasi penting pasang surut pada tipe pasut harian tunggal (*mixed semidiurnal tides*)

Design water level	Symbol	Calculation	Referensi MSL (m)	
			St. Saumlaki	St. OLANG
Highest Astronomical Tide	HAT	$Z_0 + (\text{all constituents})$	1.60	1.57
Higher High Water Level	HHWL	$Z_0 + (M_2 + S_2 + K_2 + K_1 + O_1 + P_1)$	1.47	1.43
High Water Spring	HWS	$Z_0 + (M_2 + S_2 + K_1 + O_1)$	1.32	1.30
Mean High Water Spring	MHWS	$Z_0 + (M_2 + S_2)$ or $Z_0 + (K_1 + O_1)$	0.78	0.82
Mean High Water Level	MHWL	$Z_0 + (M_2 + K_1 + O_1)$	1.15	1.09
Mean Sea Level	MSL	Z_0	0.00	0.00

Mean Low Water Level	MLWL	$Z_0-(M_2+K_1+O_1)$	-1.15	-1.09
Mean Low Water Spring	MLWS	$Z_0-(M_2+S_2)$ or $Z_0-(K_1+O_1)$	-0.78	-0.82
Chart Datum Level	CDL	$Z_0-(M_2+S_2+K_1+O_1)$	-1.32	-1.30
Lower Low Water Level	LLWL	$Z_0-(M_2+S_2+K_2+K_1+O_1+P_1)$	-1.47	-1.43
Lowest Astronomical Tide	LAT	$Z_0-(\text{all constituents})$	-1.60	-1.57

3.3. Gelombang

Informasi gelombang secara series di lokasi kajian diperoleh berdasarkan hasil pengukuran pada bulan Februari-September 2020 yang dilakukan oleh INPEX Masela LTD. Gelombang yang diukur terdiri dari 3 parameter, yakni tinggi, periode dan arah datang gelombang signifikan. Secara series tinggi dan periode gelombang hasil pengukuran tersebut disajikan dalam **Gambar 7**, sedangkan deskripsi statistik berdasarkan gambar tersebut diperlihatkan dalam **Tabel 5**. Tinggi dan periode gelombang signifikan hasil pengukuran cukup bervariasi, dimana selama pengukuran tinggi gelombang berkisar antara 0.05-1.49 m, sedangkan periodenya berkisar antara 2-14.22 detik. Rata-rata tinggi dan periode gelombang selama pengukuran masing-masing adalah 0.39 m dan 4.8 detik.



Gambar 7. Tinggi dan periode gelombang signifikan hasil pengukuran bulan Februari-September 2020

Tabel 5. Deskripsi statistik tinggi dan periode gelombang hasil pengukuran bulan Februari-September 2020

Musim	Bulan	Tinggi Gelombang (m)				Periode (detik)			
		Mean	St. Dev	Min	Max	Mean	St. Dev	Min	Max
Barat	Jan	-	-	-	-	-	-	-	-
	Feb	0.24	0.05	0.16	0.39	8.01	0.72	4.74	9.14
Peralihan I	Mar	0.19	0.08	0.05	0.67	4.55	2.05	2.00	12.80
	Apr	0.27	0.13	0.06	0.80	4.38	1.65	2.00	12.80
	Mei	0.53	0.17	0.26	1.49	5.50	1.44	2.00	9.85
Timur	Jun	0.54	0.10	0.27	0.91	5.38	1.21	2.00	8.53
	Jul	0.54	0.14	0.28	0.93	5.29	1.32	2.00	9.14

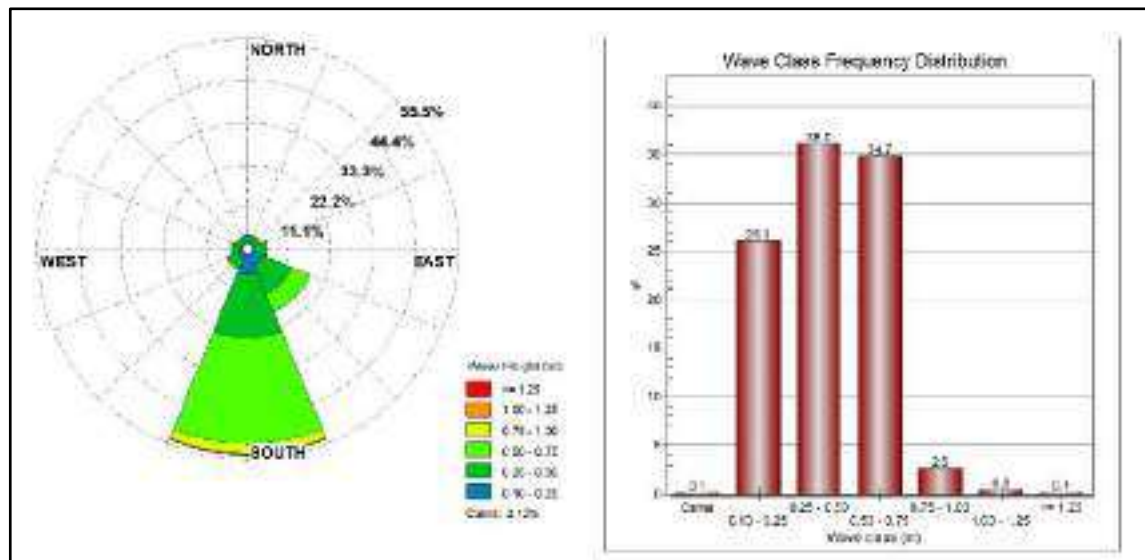
	Agust	0.37	0.16	0.10	0.74	4.67	1.71	2.00	14.22
Peralihan II	Sep	0.32	0.09	0.13	0.52	3.58	1.76	2.00	8.53
	Okt	-	-	-	-	-	-	-	-
	Nop	-	-	-	-	-	-	-	-
Barat	Des	-	-	-	-	-	-	-	-

Puncak gelombang tertinggi selama pengukuran terjadi pada bulan Mei (akhir musim peralihan I), dimana tinggi gelombang maksimum mencapai 1.43 m dan rata-rata sebesar 0.53 m. Selanjutnya tinggi gelombang tersebut terus menurun hingga titik terendah pada bulan Februari, dimana tinggi gelombang maksimum sebesar 0.39 m dan tinggi gelombang rata-rata sebesar 0.24 m.

Selain melihat deskripsi statistik umum tinggi dan periode gelombang di area kajian, analisis juga dilakukan terhadap persentase tinggi dan arah datang gelombang. Tujuannya adalah untuk melihat pada kisaran berapa dan arah dari mana saja gelombang sering terjadi. Persentase tinggi dan arah datang gelombang hasil pengukuran disajikan dalam **Tabel 6** dan divisualisasi dalam bentuk mawar gelombang (*waverose*) dan histogram disitribusi frekuensi yang diperlihatkan dalam **Gambar 8**. Berdasarkan tabel dan gambar tersebut terlihat tinggi gelombang dominan berada pada kisaran 0.25-0.5 m (35.98%) dan 0.5-0.75 m (34.72%). Arah datang gelombang lebih dari 60 % berasal dari selatan (54.18%) dan tenggara (17.98%).

Tabel 6. Persentase tinggi dan arah gelombang hasil pengukuran bulan Februari-September 2020

Arah [°]	Tinggi gelombang signifikan harian (m)						Total (%)
	0.1-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	>= 1.25	
Utara (337.5 - 22.5)	2.25	1.65	0.12	0.00	0.00	0.00	4.02
Timur Laut (22.5 - 67.5)	2.00	1.80	0.27	0.00	0.00	0.00	4.07
Timur (67.5 - 112.5)	2.81	2.33	0.33	0.02	0.00	0.00	5.49
Tenggara (112.5 - 157.5)	4.91	7.99	5.02	0.06	0.00	0.00	17.98
Selatan (157.5 - 202.5)	6.98	16.47	27.82	2.48	0.35	0.08	54.18
Barat daya (202.5 - 247.5)	2.99	2.48	0.56	0.00	0.00	0.00	6.03
Barat (247.5 - 292.5)	2.44	1.61	0.37	0.00	0.00	0.00	4.42
Barat Laut (292.5 - 337.5)	1.55	1.65	0.23	0.00	0.00	0.00	3.43
Sub-Total (%)	25.94	35.98	34.72	2.56	0.35	0.08	99.63
Missing/Incomplete data							0.37
Total							100.00

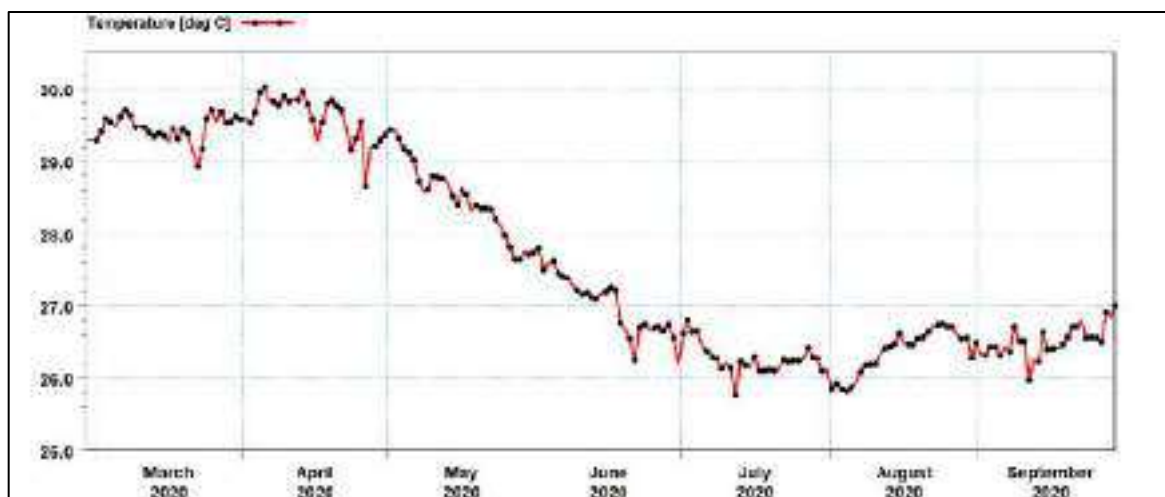


Gambar 8. Mawar gelombang (kiri) dan distribusi frekuensi tinggi gelombang (kanan) hasil pengukuran bulan Februari-September 2020

3.4. Suhu dan Salinitas

Data suhu dan salinitas diperoleh dari hasil kajian met-ocean yang dilakukan oleh INPEX Masela, LTD. Data suhu yang diperoleh merupakan data hasil pengukuran pada satu titik tetap (*mooring*) pada bulan Februari-September 2020, sedangkan data salinitas diperoleh berdasarkan hasil analisis sampel air 19 titik pada musim kemarau tahun 2019 dan musim hujan tahun 2020.

Grafik series suhu hasil pengukuran bulan bulan Februari-September 2020 diperlihatkan dalam **Gambar 9**, sedangkan deskripsi statistik berdasarkan gambar tersebut disajikan dalam **Tabel 7**. Secara keseluruhan karakter suhu air laut di lokasi kajian cukup bervariasi, dimana suhu terukur selama periode pengukuran berkisar antara 25.7-30.1 °C. Puncak tertinggi suhu terjadi pada saat musim peralihan I (April), dimana rata-rata suhu sebesar 29.54 °C dan suhu maksimum mencapai 30.1 °C. Memasuki akhir musim peralihan I tren suhu mulai menurun hingga titik terendah terjadi pada bulan Juli, rata-rata suhu pada bulan Juli sebesar 26.26°C, sedangkan suhu maksimum sebesar 26.92°C.



Gambar 9. Karakter suhu hasil pengukuran bulan Februari-September 2020

Tabel 7. Deskripsi statistik suhu hasil pengukuran bulan Februari-September 2020

Bulan	Temperature (°C)		
	Minimal	Maksimal	Rata-rata
Januari	-	-	-
Februari	29.19	29.39	29.31
Maret	28.57	29.83	29.43
April	27.79	30.10	29.54
Mei	27.30	29.54	28.45
Juni	25.96	27.88	27.03
Juli	25.72	26.92	26.26
Agustus	25.70	26.93	26.37
September	25.96	27.19	26.59
Oktober	-	-	-
November	-	-	-
Desember	-	-	-

Karakter salinitas hasil analisis sampel air laut di 18 titik stasiun (**Tabel 8**) tidak terlihat ada variasi yang signifikan, dimana kisaran salinitas pada musim kemarau antara 29.9-34.3 psu, sedangkan pada musim hujan antara 31.2-33.4 psu. Umumnya rata-rata salinitas pada musim kemarau terlihat lebih tinggi dibandingkan dengan musim hujan, yakni rata-rata salinitas musim kemarau dari 18 titik analisis diperoleh 33.67 psu, sedangkan pada musim hujan sebesar 32.53

Tabel 8. Salinitas berdasarkan hasil analisis sampel air laut 18 titik stasiun

Stasiun	Salinitas (psu)	
	Musim Kemarau	Musim Hujan
MWB 1	33.9	31.2
MWB 2	34.2	32.1
MWB 3	34.3	32.6
MWB 4	34.2	32.3
MWB 5	34.3	32.6
MWB 6	34.3	32.3
MWB 7	33.9	33.7
MWB 8	34.3	32.6
MWB 9	34.2	32.9
MWB 10	32	33

MWB 11	34.4	32.8
MWB 12	34.3	32.3
MWB 13	33.1	32.5
MWB 14	33.6	32.4
MWB 15	34.1	32.7
MWB 16	29.9	32.9
MWB 17	33.8	31.9
MWB 18	33.2	32.7
Rata-rata	33.67	32.53

3.5. Pola Arus

Informasi karakteristik arus di wilayah kajian diperoleh berdasarkan hasil pengukuran bulan Februari-September 2020 dan pemodelan numerik. Data arus hasil pengukuran merupakan data pengukuran pada satu titik tetap (*mooring*) yang belum mewakili pola arus spasial di area kajian, sehingga diperlukan data tambahan berupa pemodelan yang merepresentasikan secara spasial dan temporal kondisi arus di wilayah kajian. Data hasil pemodelan selanjutnya divalidasi dengan data hasil pengukuran, tujuannya adalah untuk mengetahui seberapa jauh kebenaran data hasil model yang telah disimulasikan.

3.5.1. Arus Pengukuran

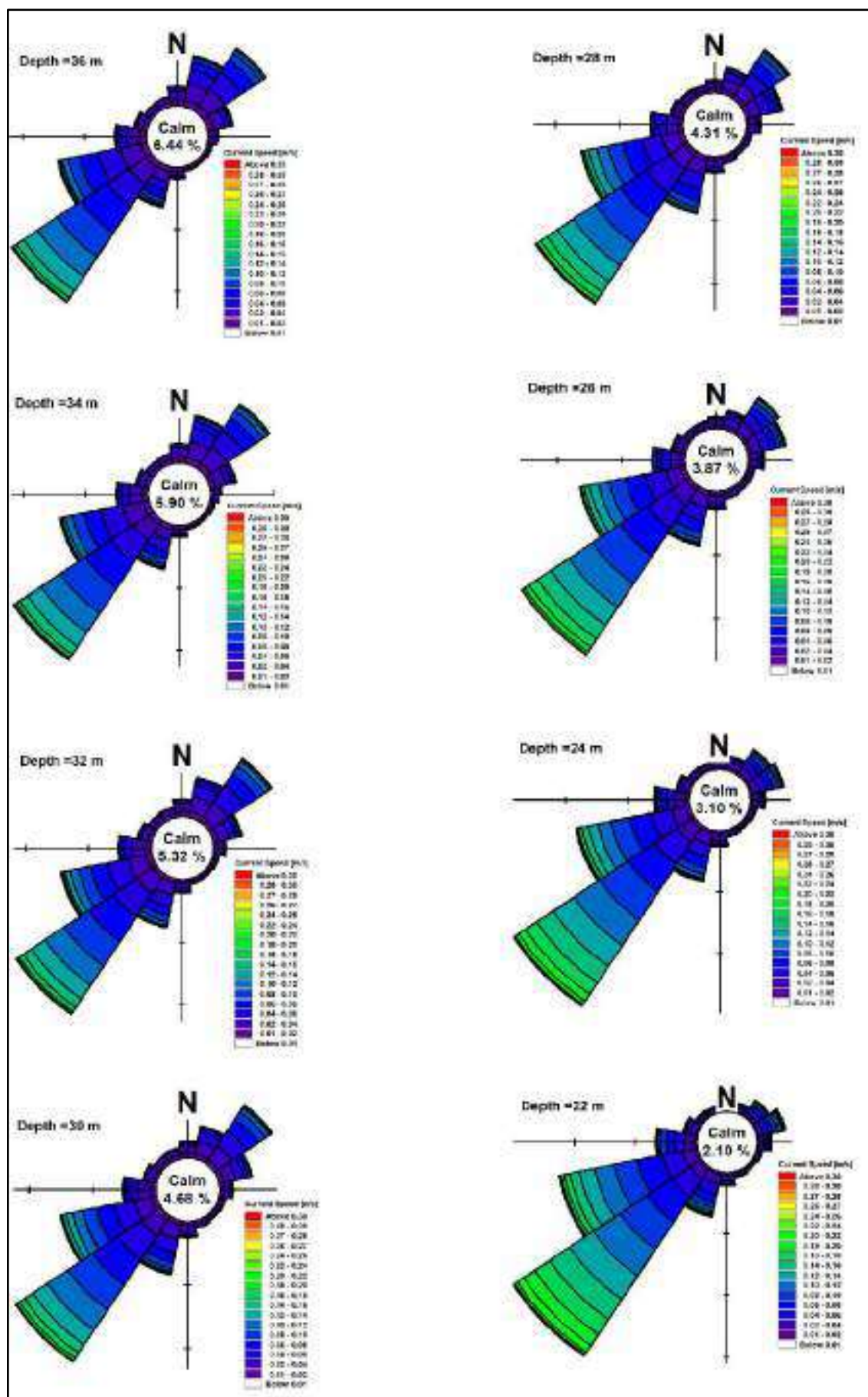
Data arus hasil pengukuran selama 8 bulan (Februari-September 2020) disajikan dalam bentuk mawar arus (*current rose*) yang diperlihatkan dalam **Gambar 8**, selanjutnya deskripsi statistik arah dan kecepatan arus selama pengukuran tersebut disajikan dalam **Tabel 9**. Berdasarkan gambar dan tabel tersebut terlihat arah pergerakan arus dominan hanya terlihat dua arah, yakni barat daya dan timur laut. Arah arus seperti ini merupakan tipikal arus teluk yang dipengaruhi oleh pasang surut, yakni ketika menuju pasang bergerak masuk ke teluk (timur laut), sementara ketika menuju surut bergerak keluar teluk (barat daya). Kecepatan arus hasil pengukuran pada bulan Februari-September 2020 pada keseluruhan layer kedalaman berkisar antara 0.001-0.32 m/det.

Kecepatan arus terlihat cukup bervariasi jika dilihat berdasarkan layer kedalaman maupun bulanan. Umumnya kecepatan arus di dekat dasar terlihat lebih lemah dibandingkan dengan kecepatan arus di kolom maupun permukaan. Pada layer kedalaman 36 m rata-rata kecepatan arus sebesar 0.05 m/det, sedangkan pada layer kedalaman 30 m dan 22 m kecepatan arus rata-rata masing-masing sebesar 0.06 m/det dan 0.09 m/det. Jika dilihat berdasarkan bulan kecepatan arus terkuat terjadi di bulan Juli, dimana rata-rata kecepatan arus pada keseluruhan layer kedalaman sebesar 0.075 m/det. Sementara itu rata-rata kecepatan arus terlemah terlihat saat bulan Februari, yakni rata-rata kecepatan arus pada keseluruhan layer kedalaman sebesar 0.05 m/det.

Tabel 9. Deskripsi statistik kecepatan arus hasil bulan Februari-September 2020

Bulan	Statistik	Kecepatan arus (m/s) berdasarkan kedalaman								Arah Dominan
		36 m	34 m	32 m	30 m	28 m	26 m	24 m	22 m	

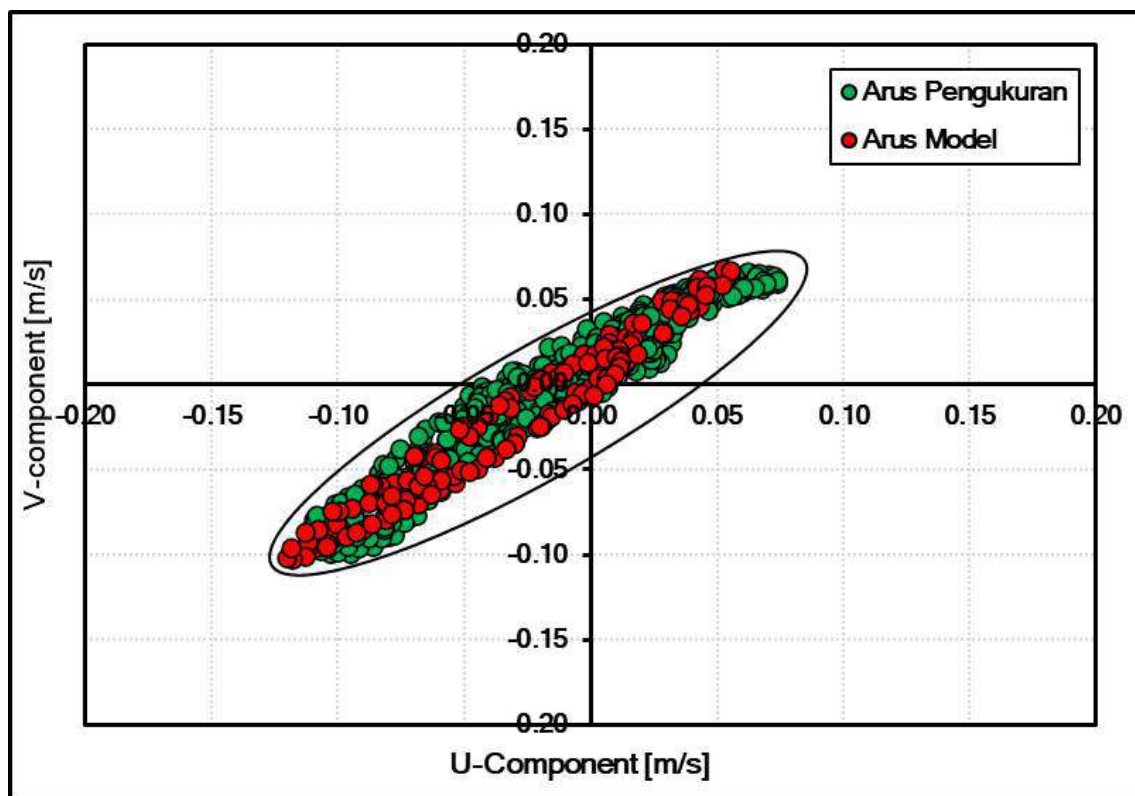
Februari	Min	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.12	0.11	0.28	0.10	0.10	0.11	0.13	0.14	
	Average	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	
Maret	Min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.22	0.24	0.25	
	Average	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	
April	Min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.20	0.21	0.22	0.24	0.24	0.28	0.30	0.33	
	Average	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	
Mei	Min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.22	0.21	0.23	0.23	0.26	0.29	0.27	0.30	
	Average	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.09	
Juni	Min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.23	0.23	0.27	0.24	0.25	0.26	0.27	0.29	
	Average	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.09	
Juli	Min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.28	0.28	0.28	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32	
	Average	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.10	
Agustus	Min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.21	0.23	0.27	0.24	0.27	0.29	0.32	0.29	
	Average	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	
September	Min	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	Barat daya dan Timur Laut
	Max	0.19	0.19	0.21	0.19	0.22	0.25	0.28	0.27	
	Average	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	



Gambar 10. Mawar arus (*current rose*) yang menunjukkan arah dan kecepatan arus

3.5.2. Arus Pemodelan

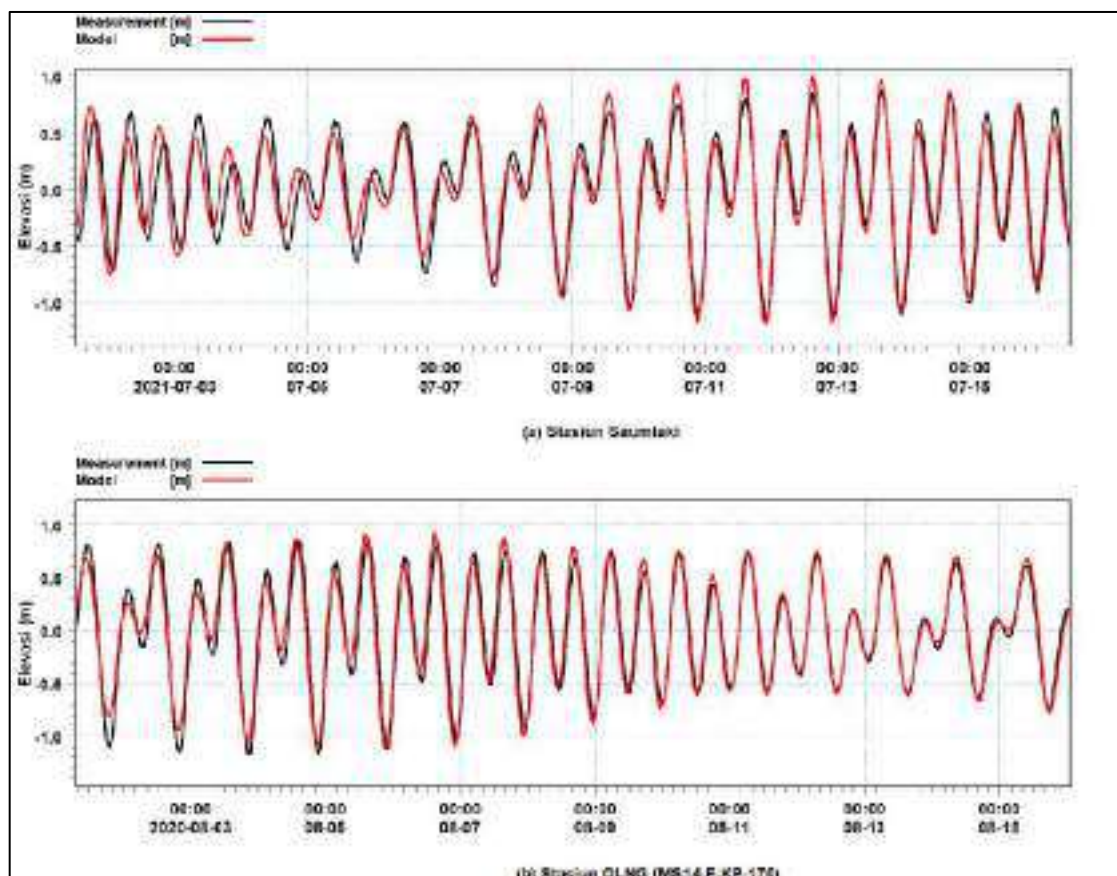
Pemodelan pola arus (hidrodinamika) dilakukan guna mengetahui karakter arus secara spasial dan temporal di lokasi studi. Luaran model hidrodinamika telah dilakukan uji validitas dengan tujuan untuk mengetahui sejauh mana kebenaran model yang telah disimulasikan. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan parameter data hasil model dengan hasil pengukuran. Komponen hidrodinamika hasil model yang divalidasi adalah komponen arus dan pasang surut. Validasi model untuk komponen arus hanya dilakukan terhadap arus pasang surut, untuk itu data arus hasil pengukuran sebelum digunakan untuk validasi terlebih dahulu dilakukan pemisahan antara arus pasut dan arus residu (arus non-pasut) dengan metode IOS method yang terdapat dalam perangkat lunak MIKE 21 Toolbox, sedangkan data pasut pengukuran dan hasil model sebelum dibandingkan dilakukan penyamaan datum atau Zo ke datum MSL (Mean Sea Level), dalam kajian ini MSL ditentukan sebesar 0 m. Hasil validasi model komponen arus tersaji dalam **Gambar 11**, sedangkan hasil verifikasi komponen pasut disajikan dalam bentuk grafik series yang tersaji dalam **Gambar 12**.



Gambar 11. Perbandingan pola arus hasil model dan pengukuran

Hasil validasi arus menunjukkan ada kesamaan pola antara arus hasil model dan hasil pengukuran, baik pada komponen zonal (u-component) maupun komponen meridional (v-component). Pola arus pasut hasil model maupun hasil pengukuran sama-sama dominan mengarah timur laut dan barat daya. Demikian juga yang terlihat pada hasil validasi pasut, fluktuasi pasut hasil model dan pasut pengukuran juga memiliki kesamaan

pola. Secara kuantitatif nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) dan persen kesalahan relative (*error percent*) juga menunjukkan kualitas yang cukup baik (**Tabel 10**), dimana nilai RMSE dan persen kesalahan untuk arus komponen zonal (U-component) masing-masing adalah 0.052 dan 2.61%, sedangkan untuk komponen meridional (V-component) masing-masing adalah 0.026 dan 2.63%. Nilai RMSE dan persen kesalahan untuk komponen pasang surut juga menunjukkan nilai yang cukup baik, yakni pada stasiun Saumlaki masing-masing diperoleh 0.135 dan 6.69% dan pada stasiun OLNG masing-masing diperoleh 0.1 dan 4.89%. Dengan melihat hasil verifikasi arus dan pasang surut yang menghasilkan kualitas yang baik, maka dapat disimpulkan bahwa hasil model hidrodinamika yang telah disimulasikan sudah mendekati kondisi yang sebenarnya.



Gambar 12. Perbandingan pasang surut hasil model dan pengukuran. (atas) Stasiun pasang Saumlaki dan (bawah) Stasiun Pasut OLNG

Tabel 10. Nilai RMSE (*root mean square error*) dan persen kesalahan relative (*error percent*) arus dan pasang surut hasil model dengan hasil pengukuran

Stasiun	Parameter		RMSE	Persen Error [%]
OLNG	Arus	U-Component	0.052	2.61
		V-Component	0.026	2.63
Saumlaki	Pasang Surut		0.135	6.69
OLNG	Pasang Surut		0.100	4.89

Pola arus hasil model tidak ditampilkan secara keseluruhan per lapisan kedalaman maupun tiap langkah waktu pemodelan, akan tetapi penyajiannya hanya berupa arus rata-

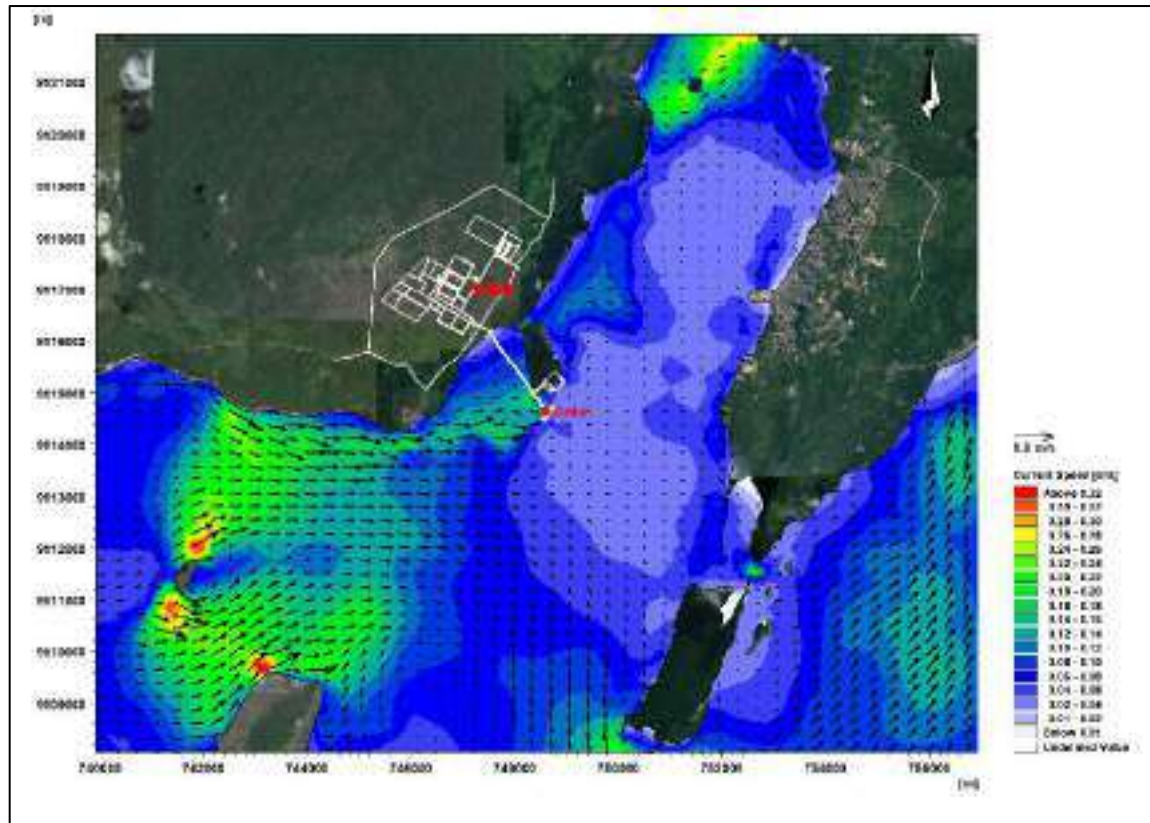
rata dan arus yang dicuplik pada empat kondisi pasang surut (menjelang pasang, saat pasang, menjelang surut dan saat surut). Arus rata-rata diharapkan bisa menggambarkan arus musiman atau arus residu, sedangkan arus yang dicuplik pada empat kondisi pasut bisa menjelaskan seberapa besar pengaruh pasut terhadap arus di wilayah kajian.

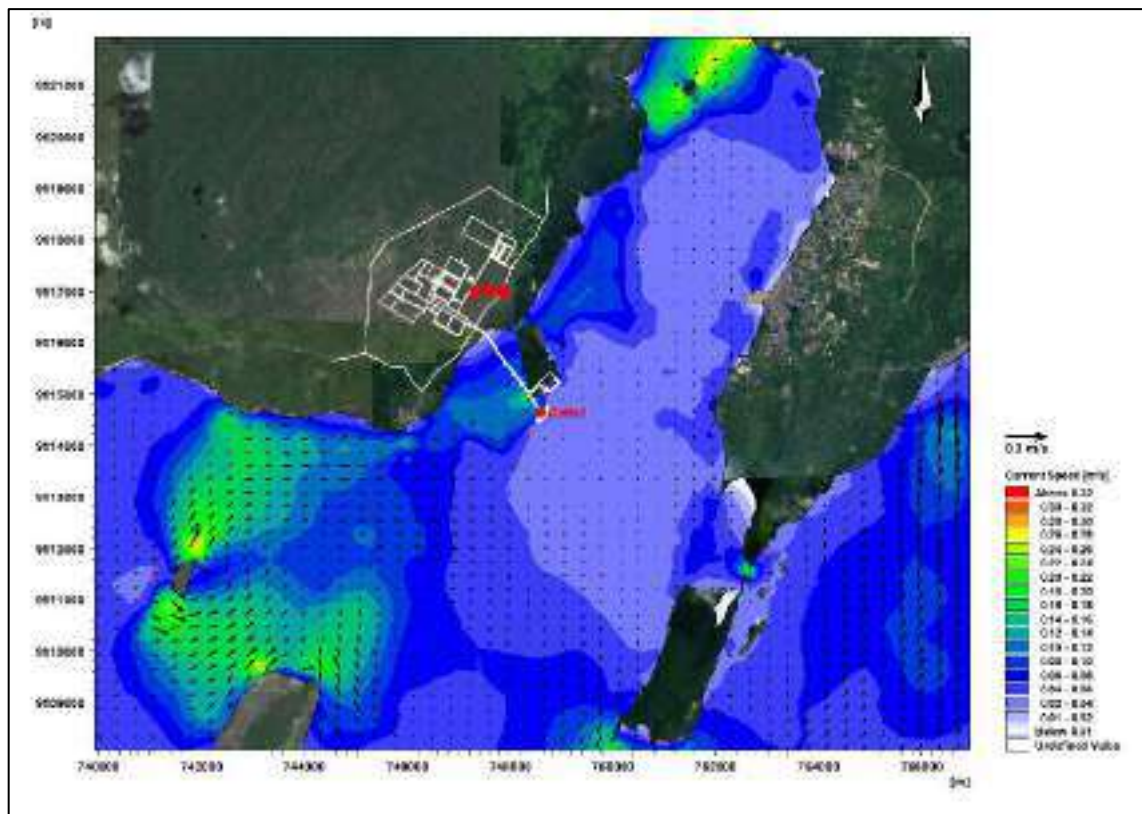
Pola arus rata-rata hasil simulasi selama 15 hari kondisi Musim Barat dan Musim Peralihan I diperlihatkan dalam **Gambar 13**, sedangkan hasil model Musim Timur dan Musim Peralihan II disajikan dalam **Gambar 14**. Secara umum berdasarkan kedua gambar tersebut terlihat terdapat dua karakter arah arus dominan di sekitar wilayah kajian, dimana pada saat Musim Barat dan Peralihan I arah arus dominan bergerak ke timur hingga timur laut, sebaliknya ketika Musim Timur dan Peralihan II arah arus bergerak ke barat hingga barat laut. Arah pergerakan ini diperkirakan karena faktor angin musiman yang berkembang di lokasi studi, yakni ketika Musim Barat dan Peralihan I arah angin dominan bergerak ke timur, sebaliknya ketika Musim Timur dan Peralihan II dominan menuju ke barat. Rata-rata kecepatan arus pada keseluruhan musim tidak terlihat ada perbedaan signifikan, khususnya di sekitar titik buangan. Rata-rata kecepatan arus di sekitar titik buangan pada Musim Barat mencapai 0.14 m/det, pada Musim Peralihan I terlihat melemah hingga 0.08 m/det, sedangkan pada Musim Timur dan Musim Peralihan II kembali meningkat hingga 0.18 m/det.

Arus rata-rata yang dijelaskan diatas merupakan arus periode panjang (musiman), sehingga belum menggambarkan arus periode pendek seperti arus jam-jaman hingga arus harian yang dipengaruhi oleh pasang surut. Untuk melihat karakter arus yang dipengaruhi oleh pasut, maka dilakukan penculikan arus hasil model pada empat kondisi pasut, yakni menjelang pasang, saat pasang, menjelang surut dan saat surut. Pola arus menjelang pasang pada musim barat dan peralihan I disajikan dalam **Gambar 15**, sedangkan pada musim timur dan peralihan II diperlihatkan dalam **Gambar 16**. Saat pasang tertinggi, pola arus musim barat dan peralihan I diperlihatkan dalam **Gambar 17**, sementara pada musim timur dan peralihan II tersaji dalam **Gambar 18**. **Gambar 19** dan **Gambar 20** masing-masing merupakan pola arus menuju surut musim barat-musim peralihan I dan musim timur-musim peralihan II. Pola arus pada surut terendah disajikan dalam **Gambar 21** (musim barat dan peralihan I) dan **Gambar 22** (musim timur dan peralihan II).

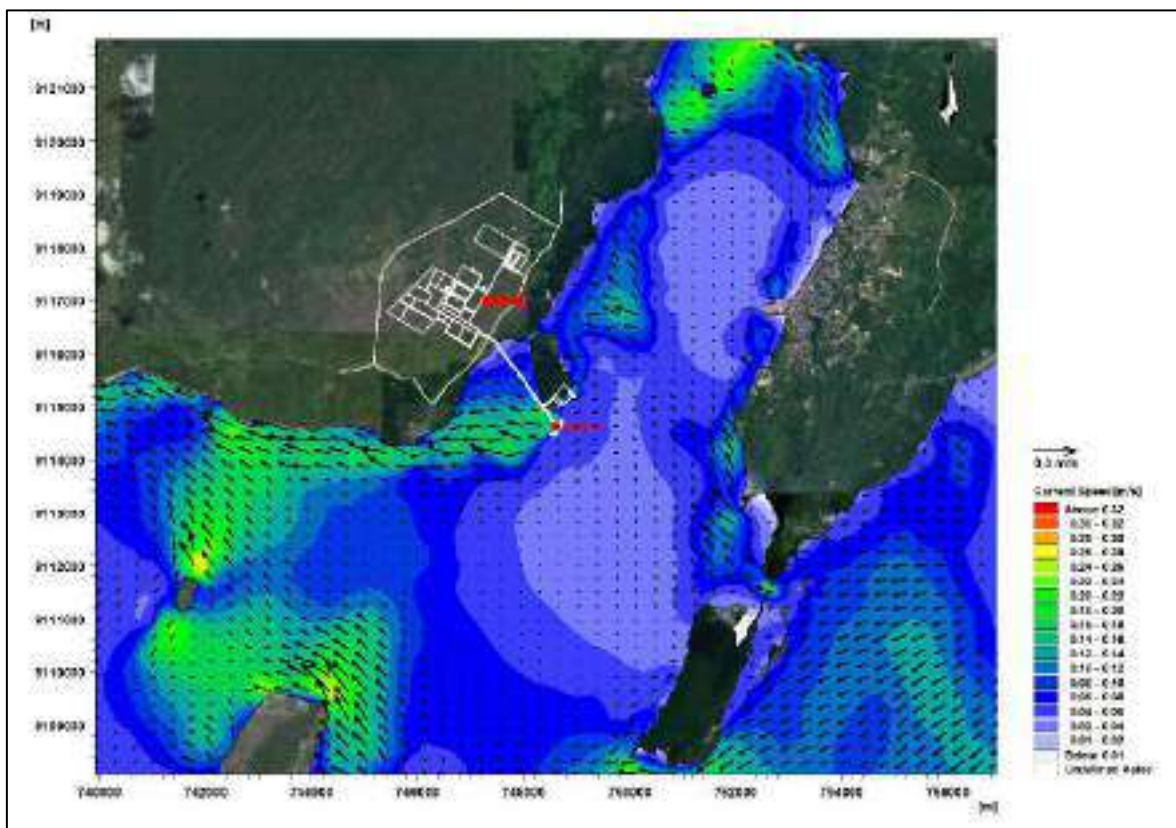
Secara keseluruhan berdasarkan gambar arus pasut keempat musim yang ditampilkan dalam **Gambar 15** hingga **Gambar 22** terlihat arah pergerakan arus hanya terdiri dari dua arah dominan, yakni masuk dan keluar teluk. Ketika menuju pasang hingga pasang arah arus bergerak masuk ke teluk (ke arah timur laut), selanjutnya ketika mendekat titik buangan (outfall) arah arus mengalami pembelokan menuju ke utara atau mendekati pantai. Ketika kondisi menuju surut hingga surut terendah arah arus bergerak keluar teluk (ke arah barat daya), selanjutnya sebagian besar berbelok ke arah barat. Kecepatan arus pada empat kondisi pasut tersebut cukup bervariasi, khususnya di sekitar titik buangan. Pada saat menuju pasang kecepatan arus di sekitar titik buangan pada musim barat dan peralihan I berkisar 0.12-0.14 m/det, sedangkan pada musim timur dan musim peralihan II berkisar 0.1-0.12 m/det. Ketika pasang tertinggi kecepatan arus pada keseluruhan musim cenderung melemah hingga kisaran 0.08-0.1 m/det. Kecepatan arus kembali menguat

ketika kondisi menuju surut, dimana pada keseluruhan musim berkisar antara 12-14 m/det. Pelemahan arus kembali terjadi saat surut terendah, dimana pada musim barat dan peralihan I berkisar 0.04-0.06 m/det, sedangkan musim timur dan peralihan II berkisar 0.08-0.1 m/det.

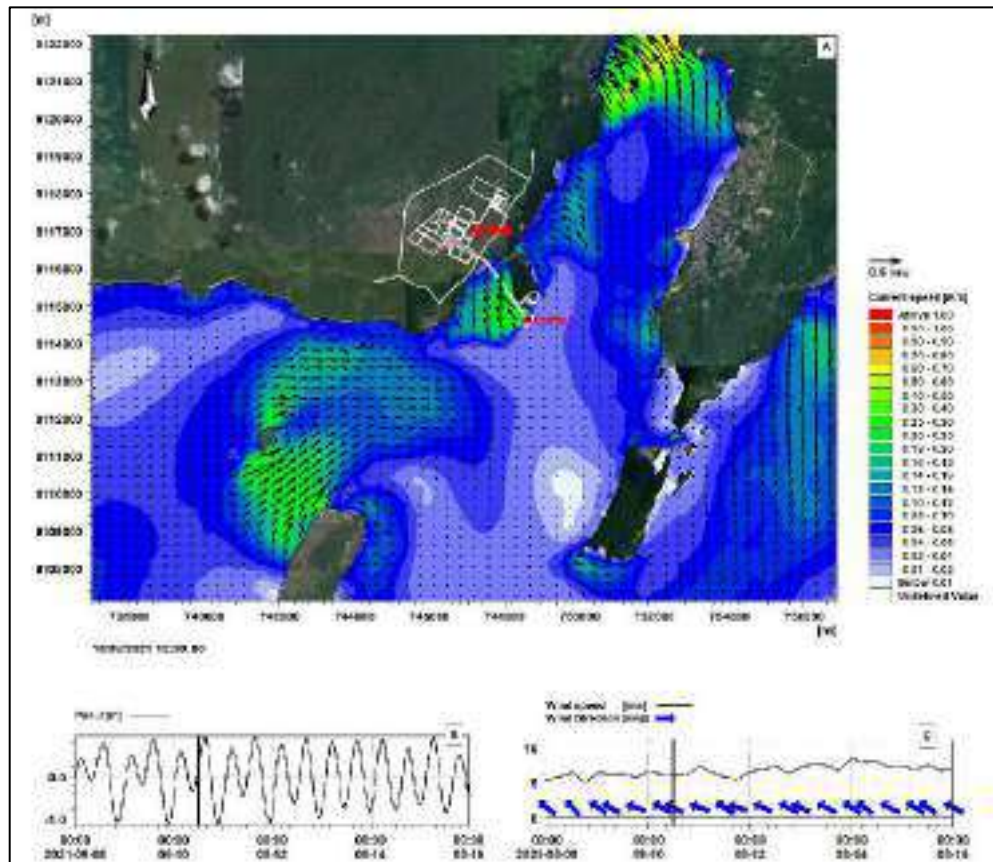


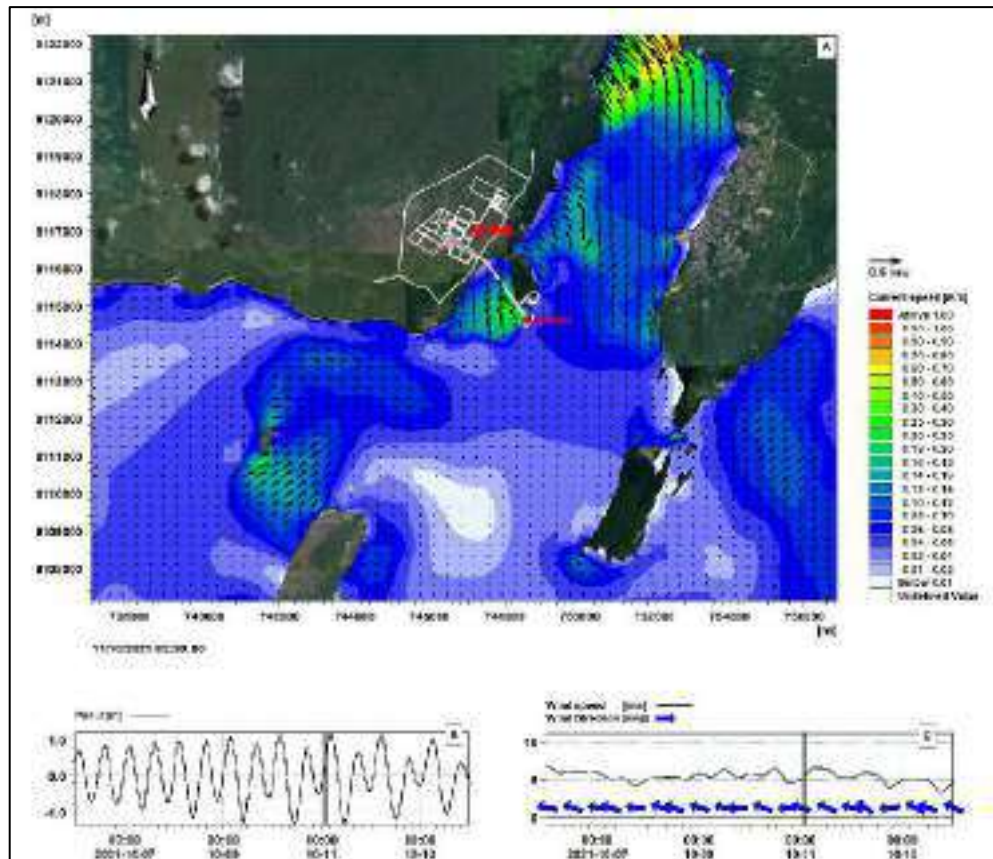


Gambar 13. Rata-rata pola arus permukaan hasil simulasi pada bula Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah)



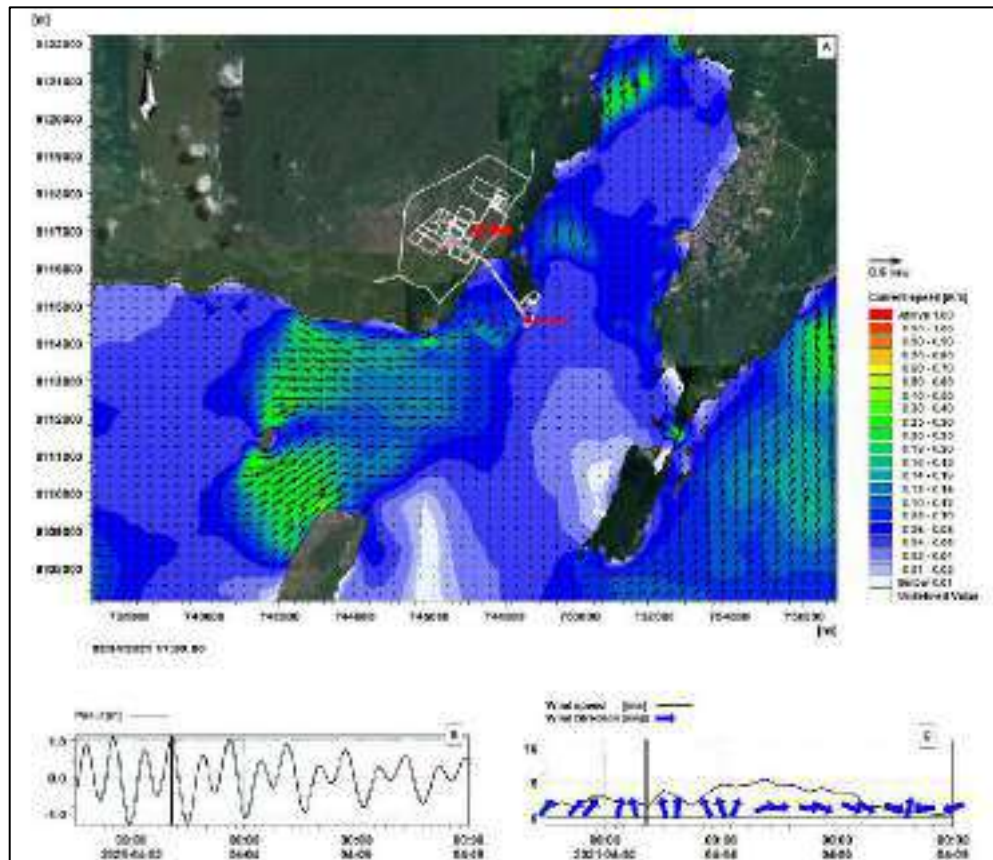
Gambar 15. Pola arus saat menjelang pasang kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) *overlay* vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

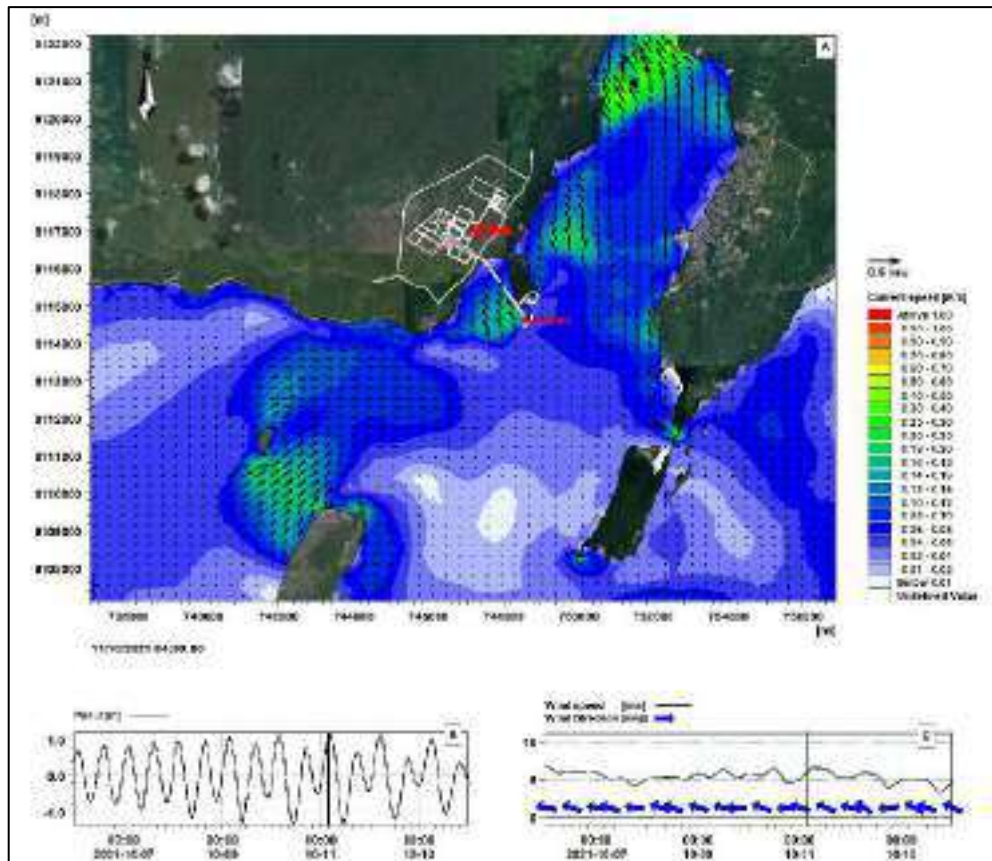




Gambar 16. Pola arus saat menjelang pasang kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) *overlay* vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

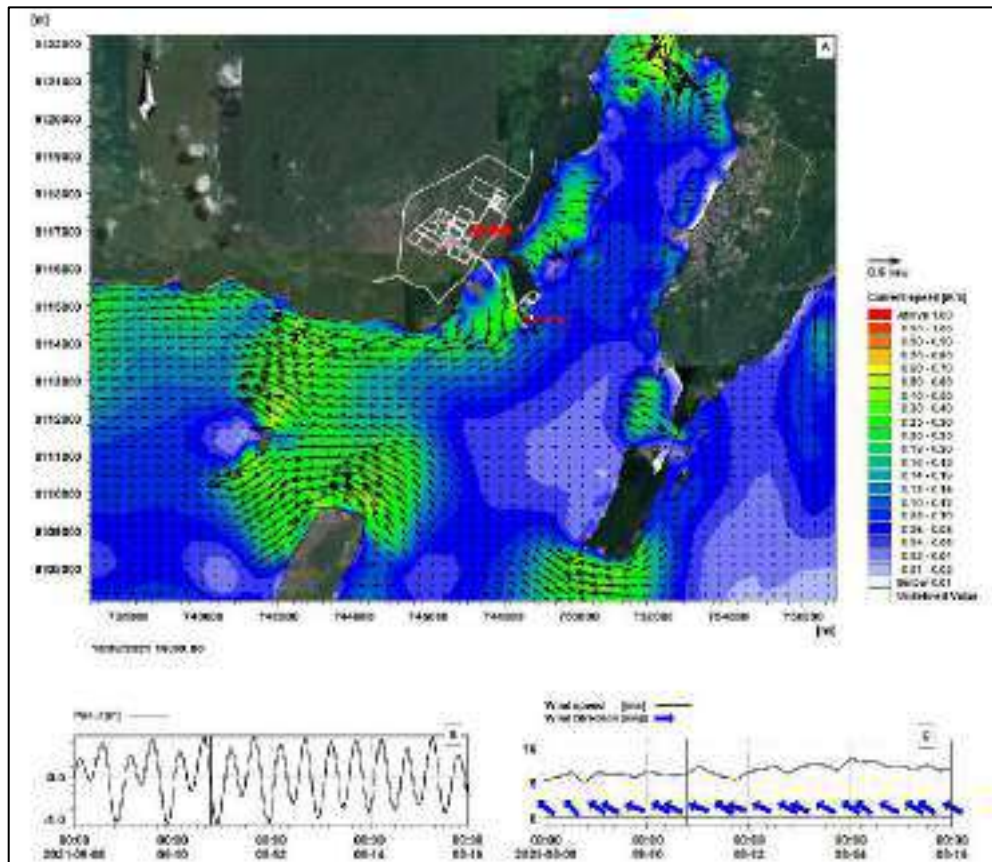
Gambar 17. Pola arus saat pasang kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) *overlay* vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

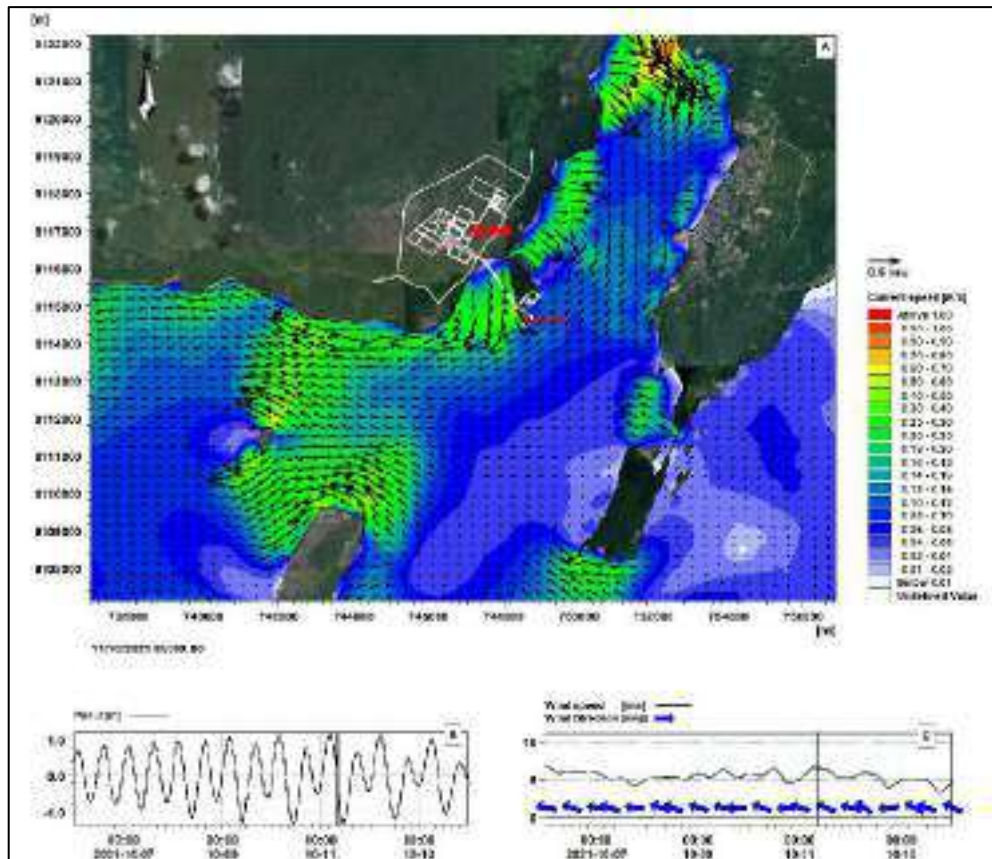




Gambar 18. Pola arus saat pasang kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) *overlay* vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

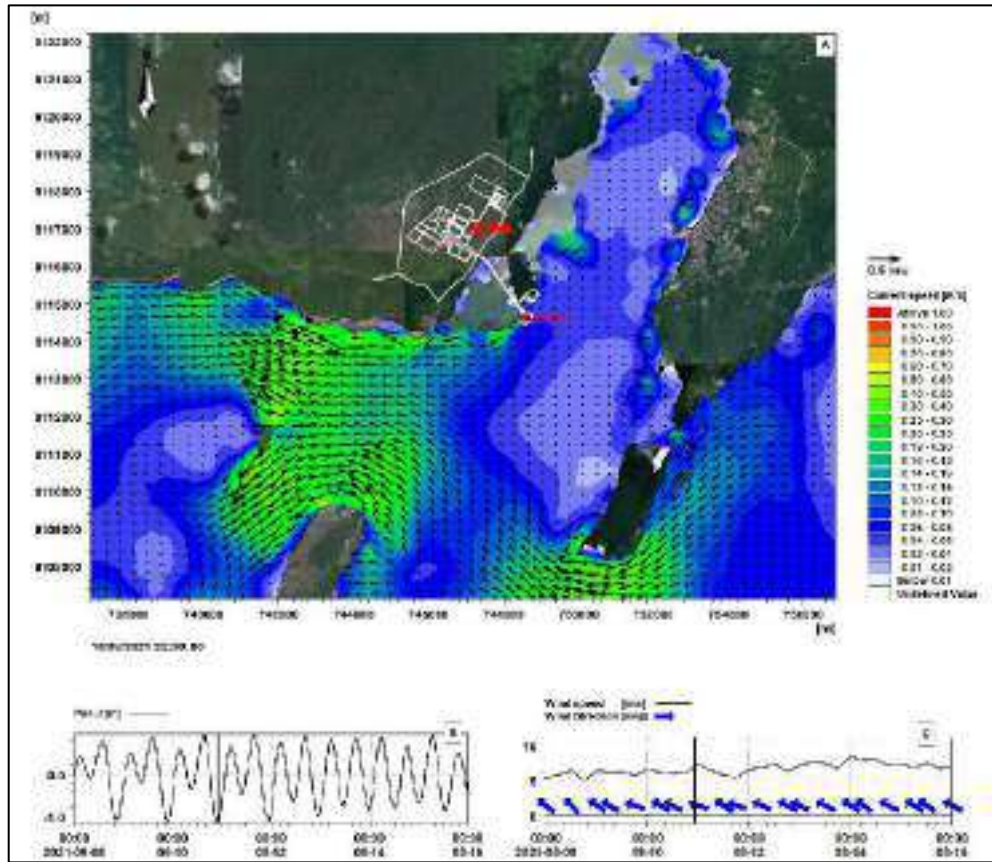
Gambar 19. Pola arus saat menjelang surut kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) overlay vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

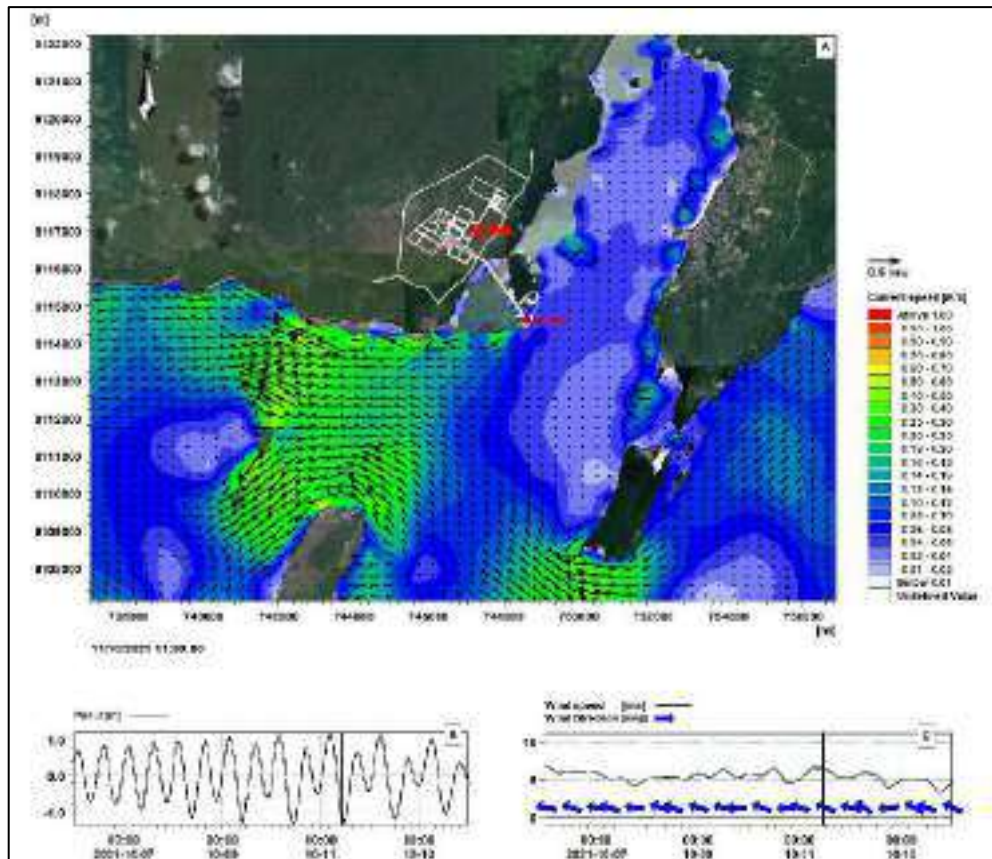




Gambar 20. Pola arus saat menjelang surut kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) *overlay* vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

Gambar 21. Pola arus saat surut kondisi Musim Barat (atas) dan Musim Peralihan I (bawah). (A) *overlay* vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

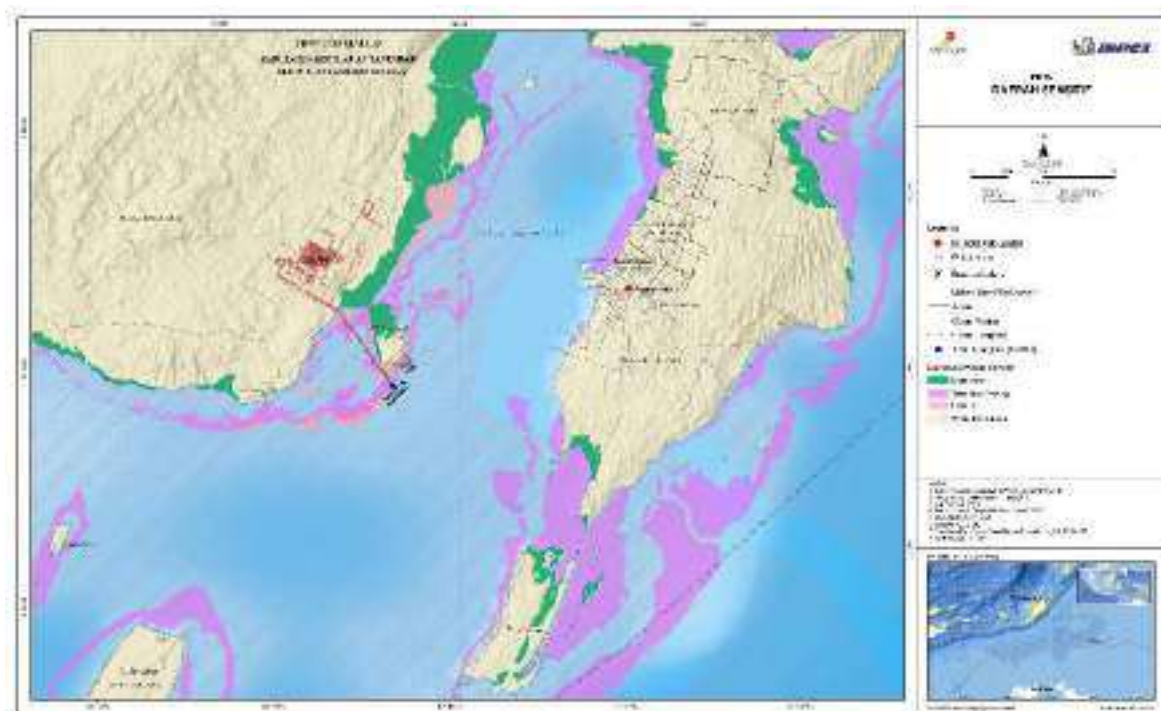




Gambar 22. Pola arus saat surut kondisi Musim Timur (atas) dan Musim Peralihan II (bawah). (A) overlay vektor arus dan citra; (B) Pasang surut sekitar lokasi studi; (C) Angin input model

4. AREA SENSITIF

Lokasi rencana pembuangan air limbah kegiatan OLNG berada di perairan teluk Saumlaki. Titik buangan (outfall) cukup dekat dengan daratan, yakni sekitar 335 m dari pulau Nustual. Identifikasi area sensitif sekitar aktivitas OLNG disajikan dalam peta yang diperlihatkan dalam **Gambar 23**, sementara jarak titik buangan terhadap area sensitif tersebut ditampilkan dalam **Tabel 11**



Gambar 23. Area sensitif sekitar aktivitas OLNG

Tabel 11. Jarak area sensitif dengan titik buangan aktivitas OLNG

No.	Peruntukan Laut	Jarak Terdekat dari Titik Pembuangan Air Limbah (Meter)	Keterangan
1.	Kawasan suaka alam laut	-	sampai dengan radius 13 Km tidak dijumpai
2.	Kawasan konservasi laut	-	sampai dengan radius 13 Km tidak dijumpai
3.	Taman nasional laut	-	sampai dengan radius 13 Km tidak dijumpai
4.	Taman wisata alam	-	sampai dengan radius 13 Km tidak dijumpai
5.	Sempadan pantai	335.0	Pulau Nustual
6.	Kawasan terumbu karang	0.0	perairan Pulau Nustual
7.	Kawasan mangrove	624.1	Pulau Nustual
8.	Kawasan padang lamun	8.7	perairan Pulau Nustual
9.	Kawasan budidaya perikanan	-	sampai dengan radius 13 Km tidak dijumpai
10.	Kawasan pembuatan garam rakyat	-	sampai dengan radius 13 Km tidak dijumpai

11.	Kawasan pemijahan dan pembiasaan (<i>Spawning & Nursery</i>)	-	sampai dengan radius 13 Km tidak dijumpai
-----	---	---	--

5. PARAMETER KUNCI DAN SEBARAN AIR LIMBAH

5.1. Parameter Kunci

Limbah cair dari kegiatan OLNG yang dibuang di perairan laut bersumber dari beberapa proses, yakni *Treated wastewater from AOC Drains Treatment package*, *Treated wastewater from COC Drains Treatment package*, *Treated wastewater from Chemically Contaminated Waste Treatment package*, *Treated wastewater from Leachate Treatment package*, *Treated sewage (sanitary water) from STP* dan *Brine water*. Keseluruhan limbah tersebut setelah melalui proses *treatment* dibuang melalui 6 (enam) titik *outlet* kemudian dialirkan melalui satu titik buangan (*outfall*). Titik koordinat beserta masing-masing debit dari keenam titik tersebut disajikan dalam **Tabel 12**. Dalam kajian ini simulasi pemodelan menggunakan dua skenario, yakni pada skenario-1 debit bersumber dari STP menggunakan 25 m³/jam (total debit 405 m³/jam) dan pada skenario-2 menggunakan 128 m³/jam (total debit 508 m³/jam).

Parameter limbah yang menjadi parameter kunci dalam kajian ini terdiri dari 16 parameter, yakni minyak dan lemak, total organic carbon, klorin residu, temperature, pH, BOD, COD, TSS, total nitrogen, mercury, cadmium, ammonia, total coliform, salinitas, fosfat dan nitrat. Untuk skenario terburuk nilai konsentrasi dari masing-masing parameter yang digunakan sebagai input pemodelan adalah nilai tertinggi (nilai baku mutu). Parameter beserta konsentrasi yang digunakan sebagai input pemodelan disajikan dalam **Tabel 13**

Tabel 12. Koordinat titik penataan dan titik buangan beserta masing-masing debit sumber limbah

No	Bujur	Lintang	Kode	Jenis Titik	Sumber Limbah	Debit [m3/jam] Skenario-1	Debit [m3/jam] Skenario-2
1	131°14'37.62"E	7°58'56.05"S	TP- 1A	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from AOC Drains Treatment package</i>	10	10
2	131°14'37.26"E	7°58'55.83"S	TP-1B	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from COC Drains Treatment package</i>	10	10
3	131°14'36.93"E	7°58'57.15"S	TP-1C	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from Chemically Contaminated Waste Treatment package</i>	10	10
4	131°14'36.58"E	7°58'55.49"S	TP-1D	Titik Penataan	<i>Treated wastewater from Leachate Treatment package</i>	50	50
5	131°14'36.18"E	7°58'55.27"S	TP-2	Titik Penataan	<i>Treated sewage (sanitary water) from STP</i>	25	128
6	131° 15' 14,98" 131° 15' 33,04"	08° 00' 26,64" 08° 00' 09,72"	TP-3A dan TP-3B	Titik Penataan	<i>Brine water</i>	300	300

7	131°15' 19.19" E	8°00' 12.64 " S	Outfall	Titik Buangan	Total Limbah	405	508
---	------------------	-----------------	---------	---------------	--------------	-----	-----

Tabel 13. Parameter dan konsentrasi limbah yang keluar dari masing-masing titik buangan

No	Parameter	Konsentrasi Titik Penaatan						Konsentrasi Maksimum
		TP-1A	TP-1B	TP-1C	TP-1D	TP-2	TP-3A dan 3B	Outfall
1	Oil and grease [mg/l]	15	25	25	-	5	-	25
2	Total Organic Carbon [mg/l]	110	-	-	-	-	-	110
3	Chlorine Residue [mg/l]	-	2	2	-	-	-	2
4	Temperature [oC]	-	45	45	-	-	-	45
5	pH	-	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9
6	BOD [mg/l]	-	-	-	150	30	-	150
7	COD [mg/l]	-	-	-	300	100	-	300
8	TSS [mg/l]	-	-	-	100	30	-	100
9	N-Total [mg/l]	-	-	-	60	-	-	60
10	Mercury [mg/l]	-	-	-	0.005	-	-	0.005
11	Cadmium [mg/l]	-	-	-	0.1	-	-	0.1
12	Ammonia [mg/l]	-	-	-		10	-	10
13	Total coliform [Jml/100 ml]	-	-	-		3000	-	3000
14	Salinity [o/oo]	-	-	-	-	-	43	43
15	P-PO4				2	2		2
16	N-NO3				60	60		60

5.2. Sebaran Air Limbah Model Skenario 1

Model skenario-1 adalah model sebaran limbah dengan skenario debit dari STP sebesar 25 m³/jam, sehingga total debit yang keluar dari outfall sebesar 405 m³/jam. Hasil model sebaran limbah tidak disajikan secara keseluruhan selama simulasi model, akan tetapi hanya disajikan kondisi maksimum (*worst case*) dari lama simulasi. Perlu diperhatikan bahwa nilai awal (*initial condition*) parameter yang dimodelkan di dalam badan air penerima di anggap nol, hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar nilai peningkatan konsentrasi limbah setelah masuk ke badan air tanpa bercampur dengan kondisi lingkungan, sehingga konsentrasi limbah hasil model merupakan nilai penambahan yang disebabkan oleh buangan limbah OLNG.

Hasil model skenario-1 berupa pola sebaran dan konsentrasi maksimum minyak dan lemak, total organic carbon, klorin residu, temperature, pH, BOD, COD, TSS, total nitrogen, mercury, cadmium, ammonia, total coliform, salinitas, fosfat dan nitrat berturut-turut disajikan dalam **Gambar 24** hingga **Gambar 87**. Secara umum berdasarkan keseluruhan gambar tersebut terlihat arah sebaran limbah pada keseluruhan musim tidak terlihat ada perbedaan signifikan, dimana pola sebaran hanya bergerak di sekitar titik buangan dan sedikit terdorong ke arah barat daya, timur laut hingga utara. Meskipun arah sebaran limbah terlihat sama, akan tetapi peningkatan konsentrasi pada masing-masing parameter dan musim terlihat bervariasi. Umumnya peningkatan konsentrasi limbah lebih tinggi terjadi

pada musim barat dan peralihan I, sementara pada musim timur dan peralihan II terlihat lebih rendah.

Peningkatan konsentrasi minyak dan lemak maksimum pada musim barat (**Gambar 24**) dan peralihan I (**Gambar 25**) sedikit lebih tinggi dibandingkan kedua musim lainnya, yakni maksimum mencapai 0.6 mg/L, sedangkan pada musim timur (**Gambar 26**) dan peralihan II (**Gambar 27**) hanya menecapai 0.4 mg/L. Baku mutu minyak dan lemak berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota laut adalah sebesar 1 mg/l, artinya hasil model peningkatan konsentrasi minyak dan lemak maksimum masih lebih rendah dari ketentuan baku mutu. Hasil analisis sampel air laut (rona awal) dari 18 stasiun sekitar lokasi buangan juga menunjukkan nilai yang tergolong kecil, yakni < 1 mg/l (di bawah deteksi limit). Jika dijumlahkan antara konsentrasi minyak dan lemak hasil model dan kondisi rona awal, maka nilainya masih tergolong kecil (di bawah baku mutu). Artinya pembuangan limbah minyak dan lemak ke laut dari aktivitas OLNG tidak menyebabkan peningkatan hingga melebihi baku mutu.

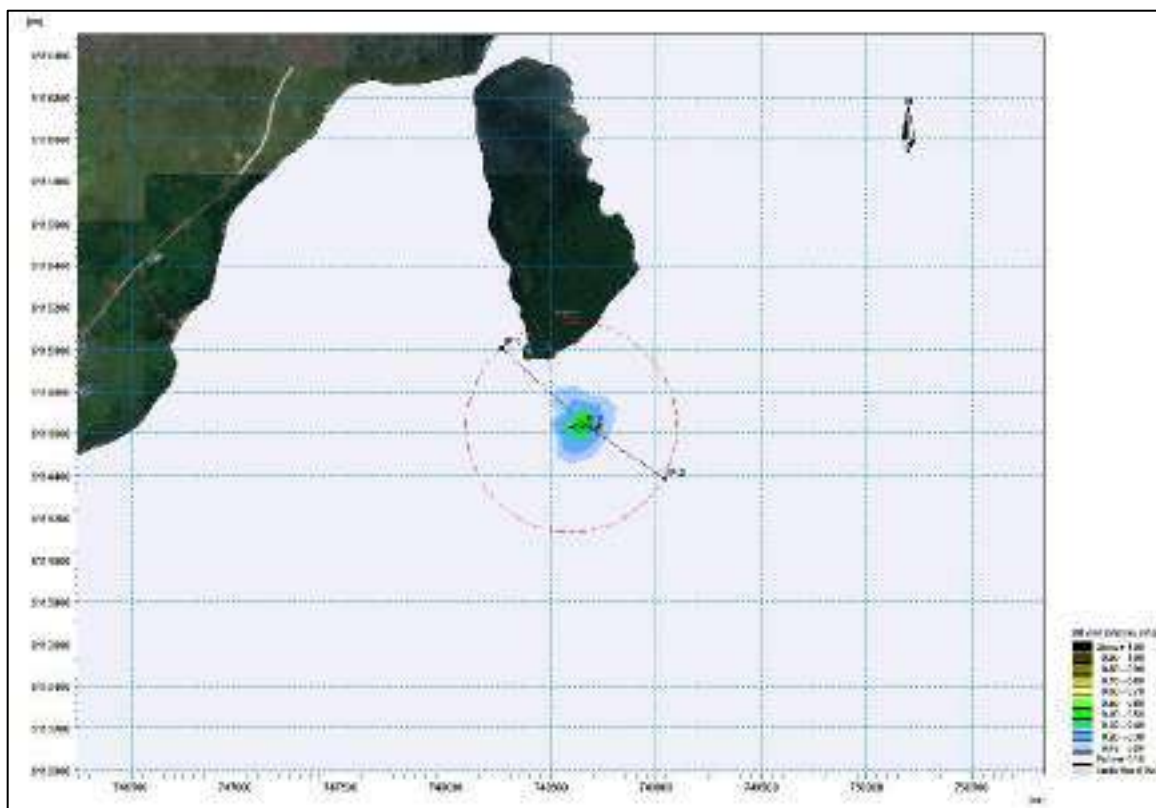
Parameter TOC merupakan parameter limbah bersumber dari *Treated wastewater from AOC Drains*. Peningkatan konsentrasi TOC maksimum pada musim barat (**Gambar 28**) dan peralihan I (**Gambar 29**) terlihat sama, yakni maksimum mencapai 2 mg/L, sementara hasil model musim timur (**Gambar 30**) dan peralihan II (**Gambar 31**) sedikit lebih kecil, yakni maksimum hanya 1.5 mg/L. Baku mutu menurut PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VI maupun Lampiran VIII tidak mensyaratkan TOC dalam parameter yang diatur, sehingga tidak terdapat rujukan atau pembandingan untuk menentukan besar atau kecilnya peningkatan konsentrasi hasil model.

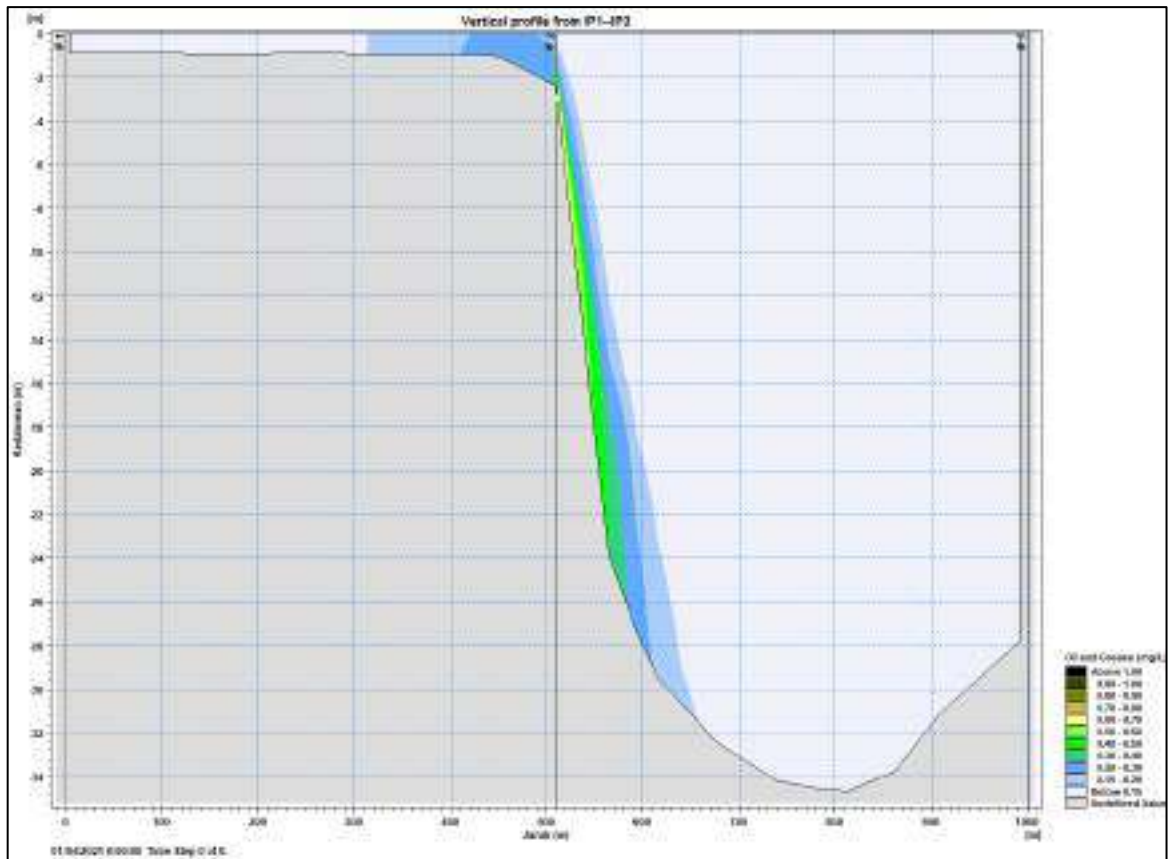
Peningkatan konsentrasi residu klorin maksimum setelah masuk ke perairan tergolong rendah, dimana konsentrasi tertinggi yang terlihat saat musim barat (**Gambar 32**) dan musim peralihan I (**Gambar 33**) hanya mencapai 0.04 mg/l, sedangkan pada musim timur (**Gambar 34**) dan peralihan II (**Gambar 35**) hanya mencapai 0.03 mg/l. Baku mutu air laut berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII tidak mempersyaratkan parameter klorin, baik peruntukan untuk pelabuhan maupun untuk biota air. Menurut Hutomo dan Arinardi (1992) kandungan klorin sebesar 0.25-0.75 mg/l dapat mengakibatkan kematian zooplankton hingga 50%, sementara pada konsentrasi 0.5–5 mg/l akan mengakibatkan kematian sekitar 85–100%. Dengan melihat kecilnya konsentrasi hasil model maka dapat dikatakan bahwa buangan limbah residu klorin dari kegiatan OLNG tidak berdampak signifikan terhadap lingkungan perairan.

Peningkatan pH maksimum baik kondisi musim barat (**Gambar 36**) dan peralihan I (**Gambar 37**) mencapai 0.025, pada musim timur (**Gambar 38**) sedikit lebih kecil, yakni maksimum hanya mencapai 0.016. Sementara itu pada musim peralihan II (**Gambar 39**) maksimum hanya mencapai 0.02. Berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII baku mutu pH untuk biota laut adalah berkisar 7-8.5, artinya pH diperbolehkan terjadi perubahan sampai dengan 1.5. Hasil analisis sampel air laut dari 18 titik sekitar lokasi kajian nilai pH rata-rata saat musim kemarau diperoleh 8.18, sementara pada musim hujan diperoleh 8.1. Jika dijumlahkan nilai pH rona awal dan pH hasil model, misalnya $8.18 + 0.025$ maka hanya diperoleh 8.20, artinya total nilai hasil penjumlahan masih dalam interval baku mutu. Hal ini

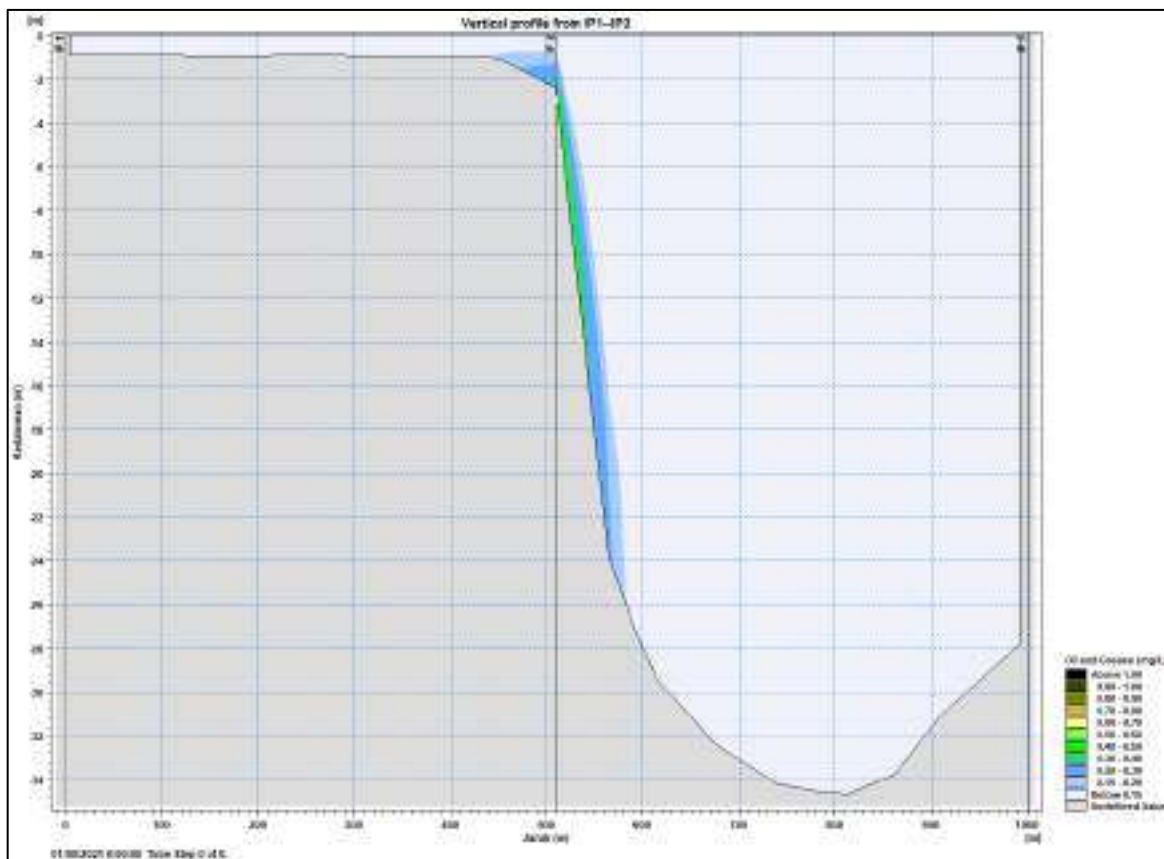
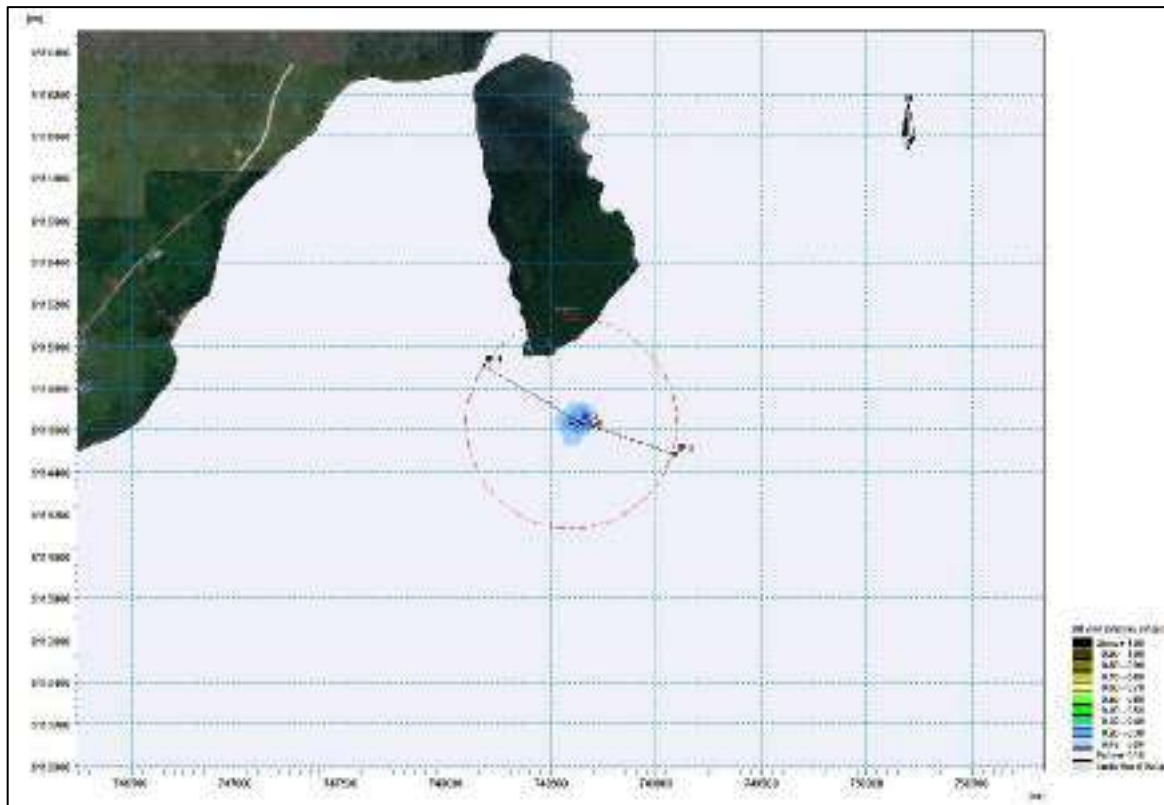
[illegible]

Gambar 24. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat

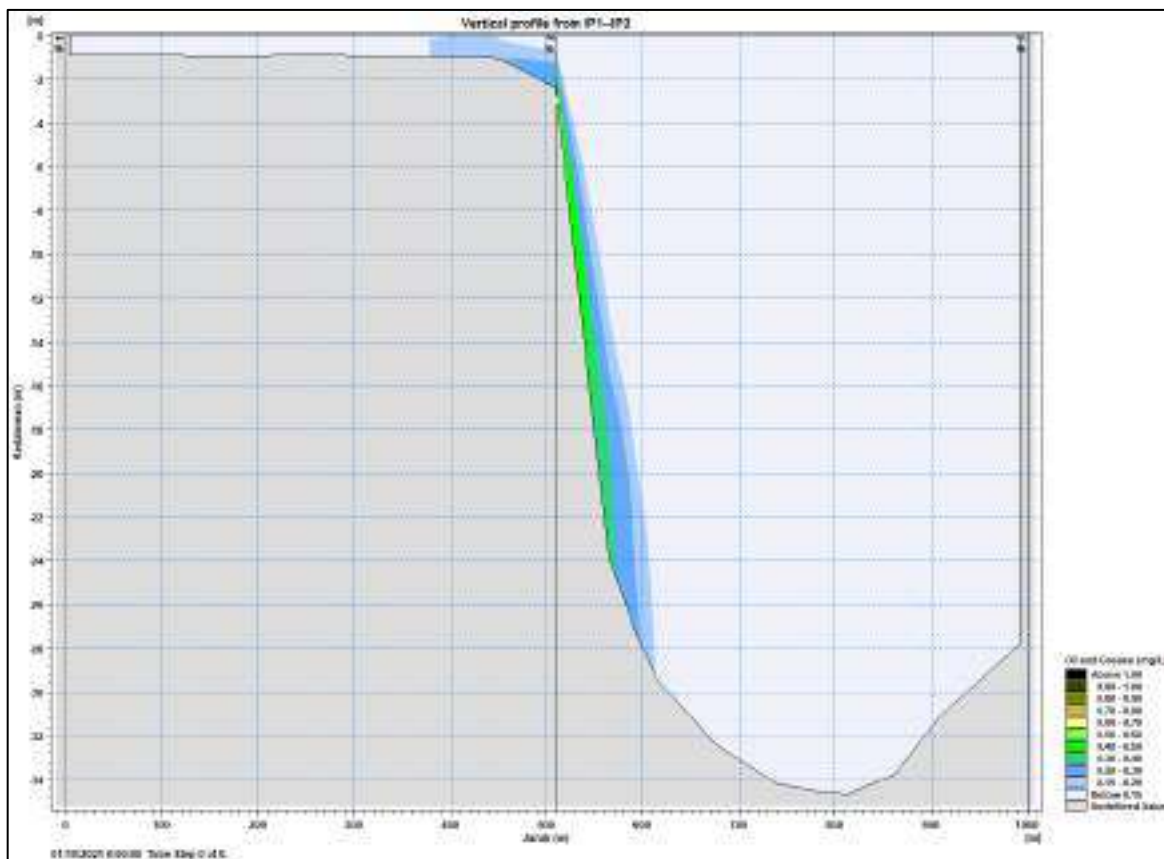
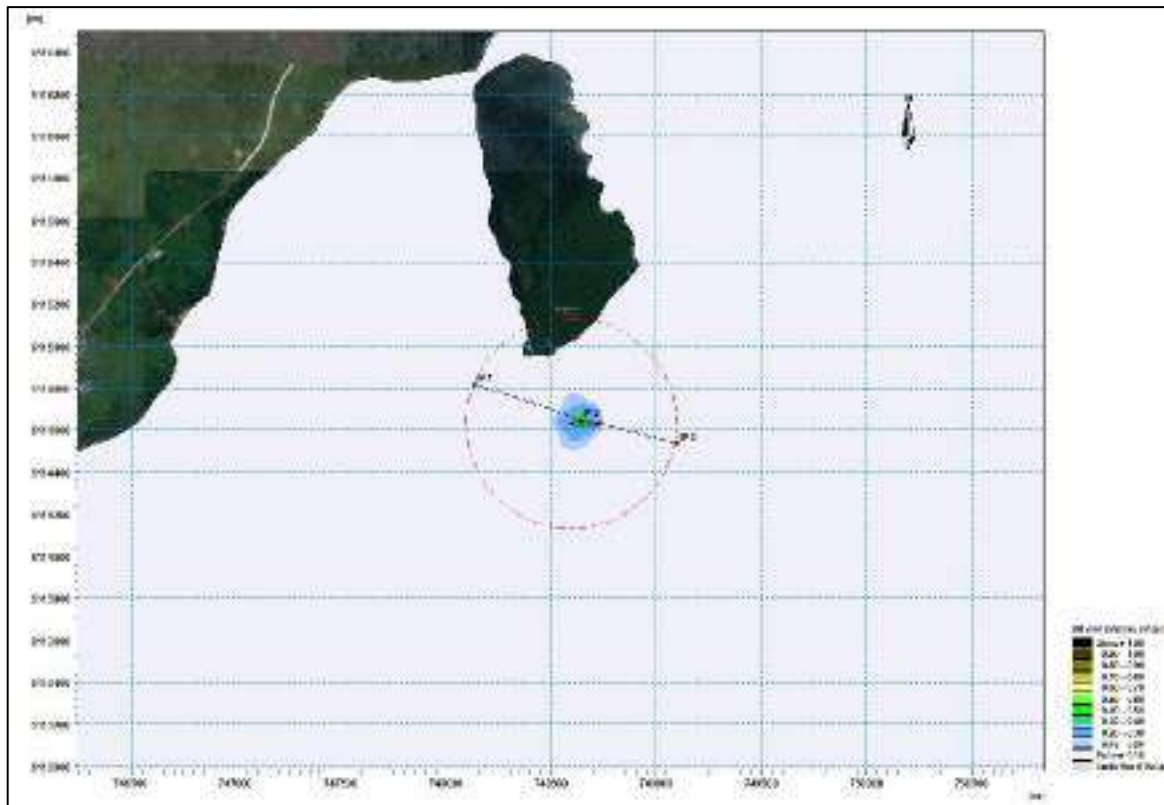




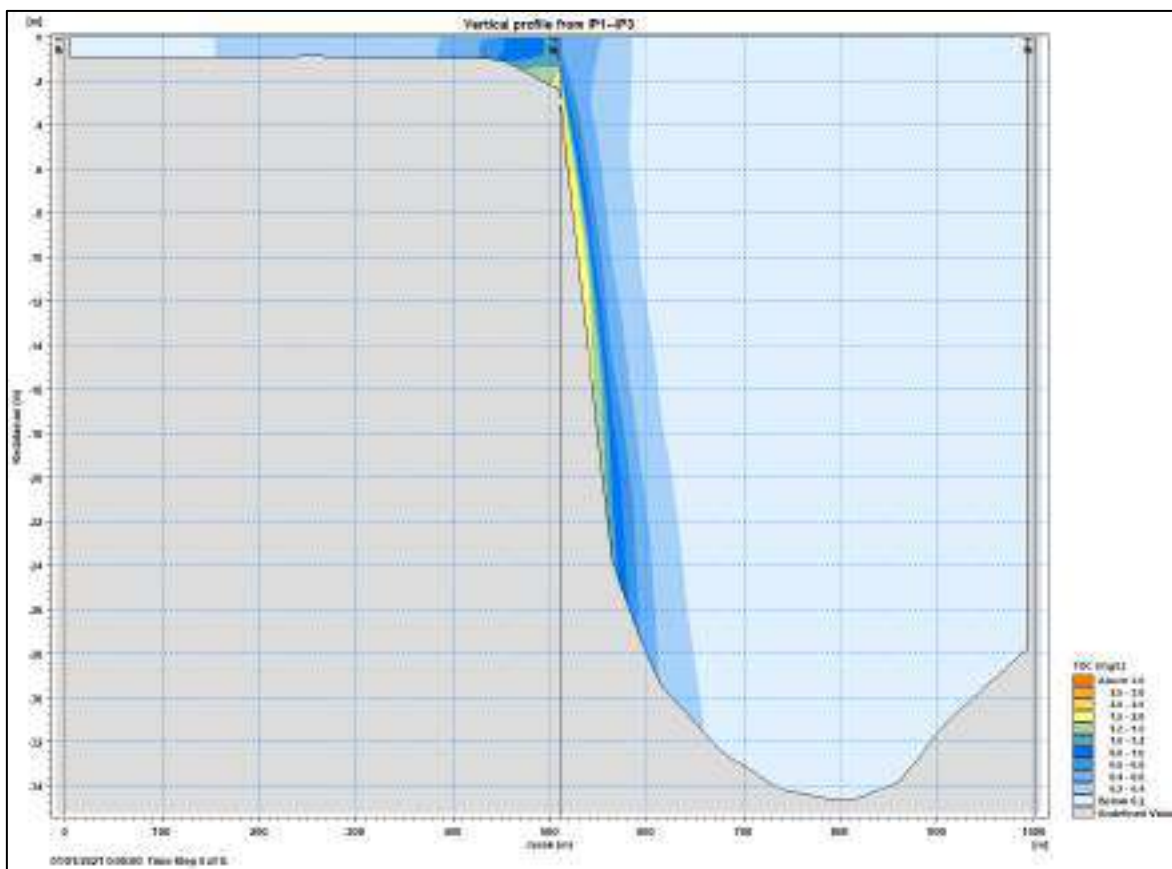
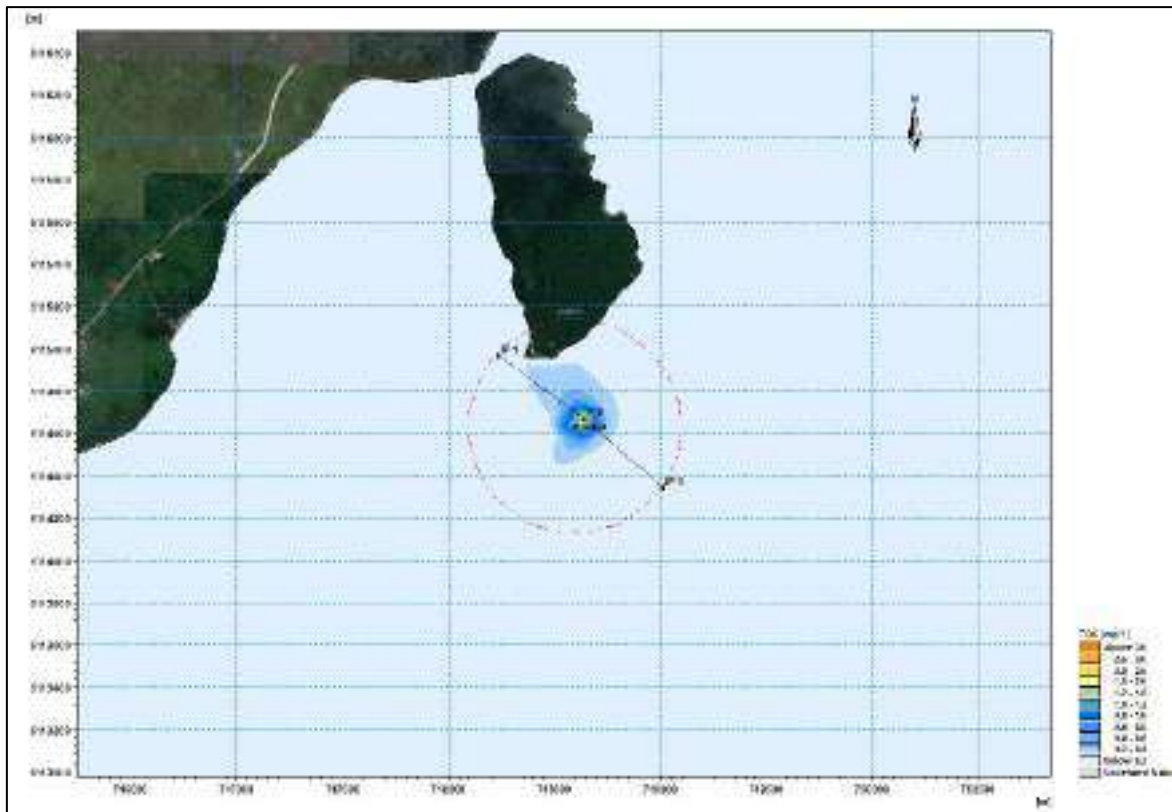
Gambar 25. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



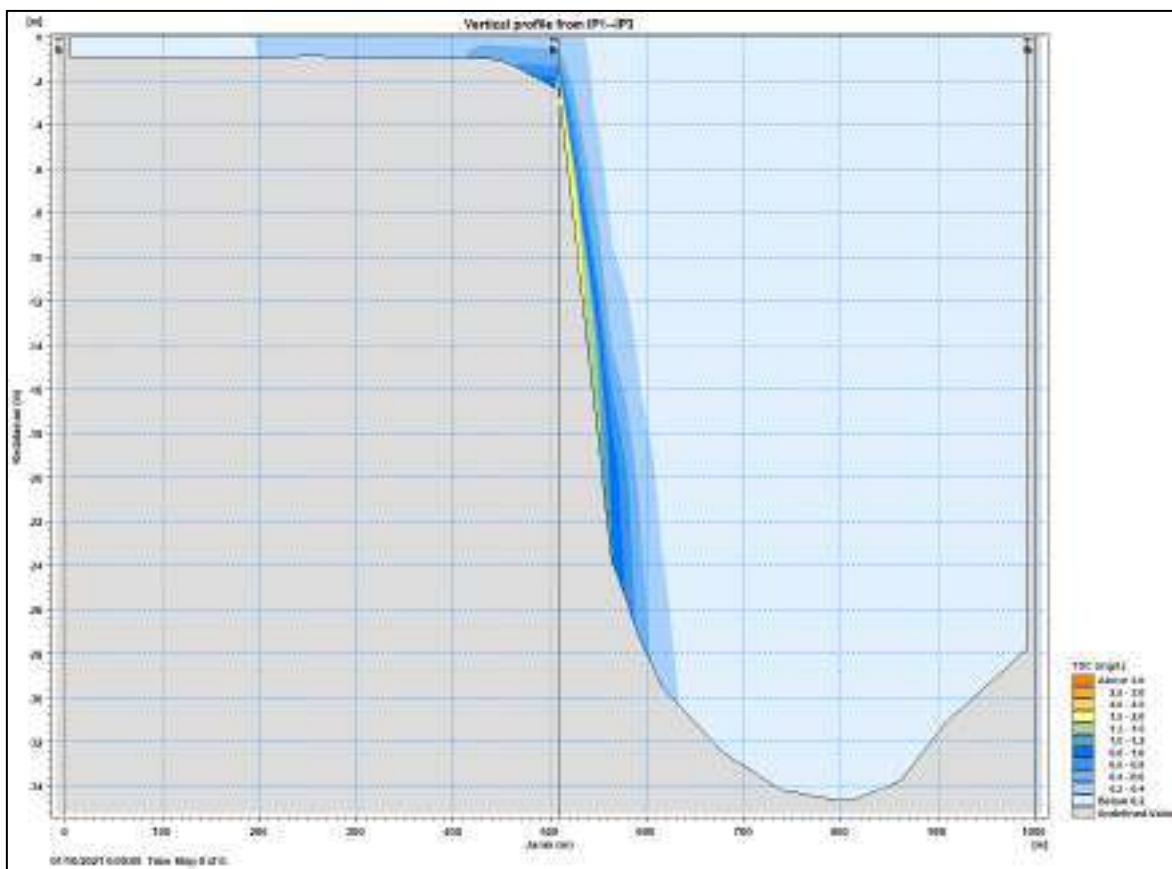
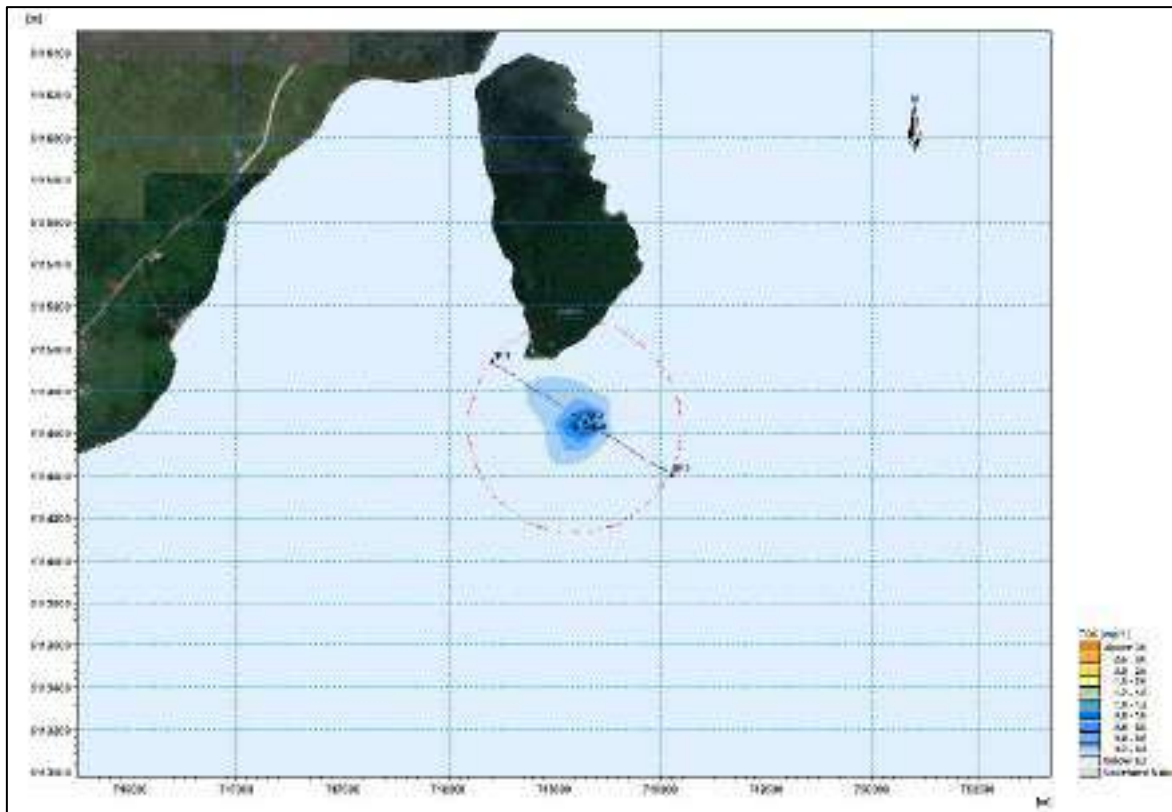
Gambar 26. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



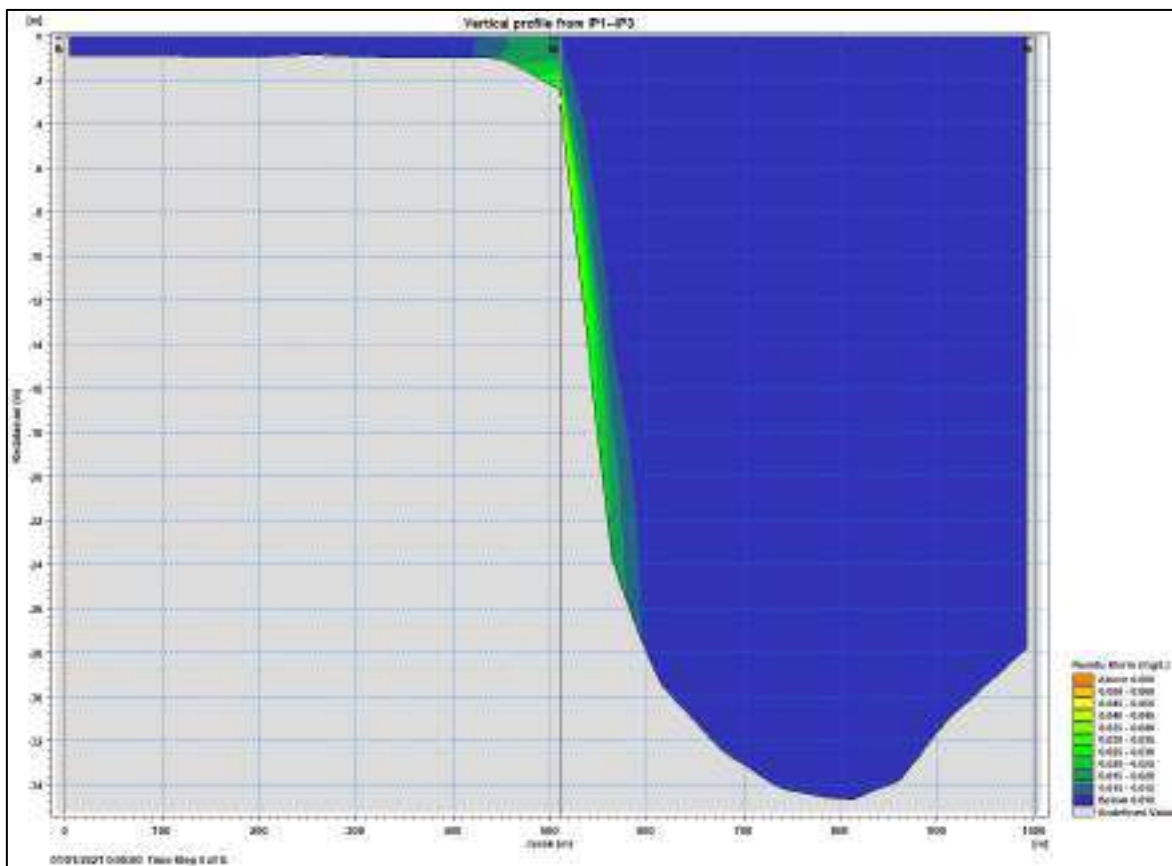
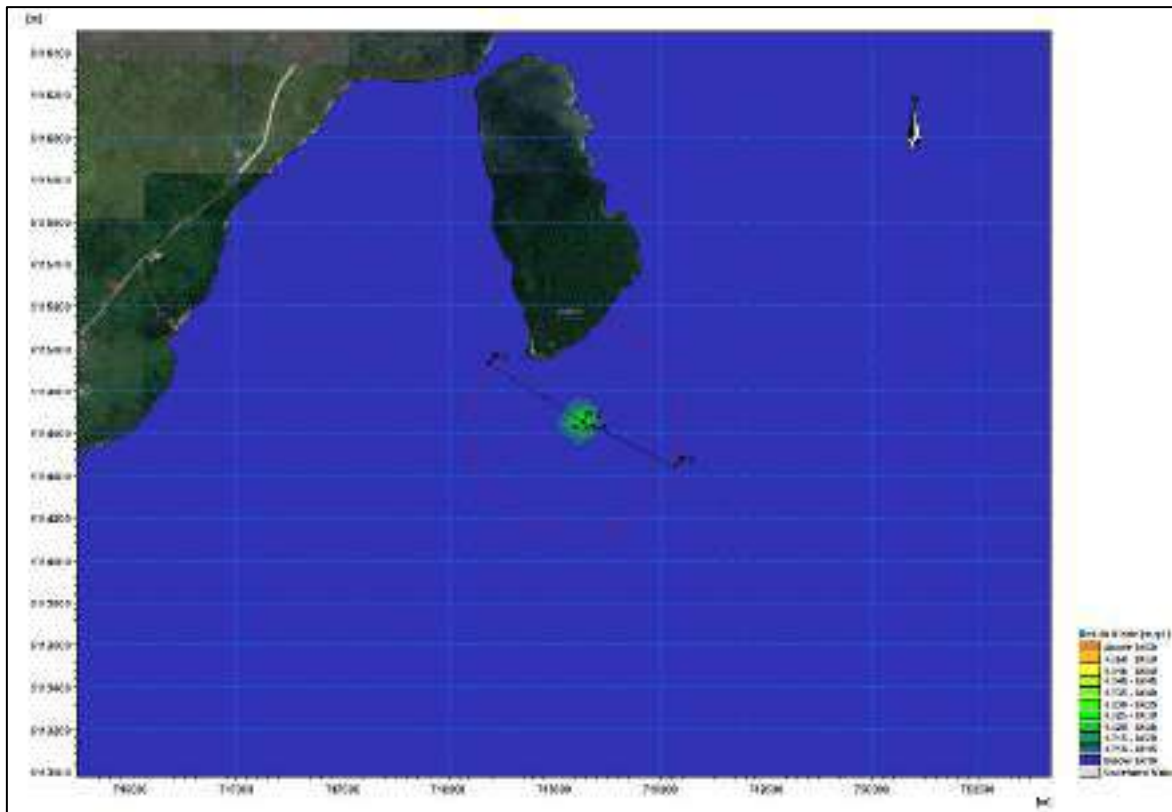
Gambar 27. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



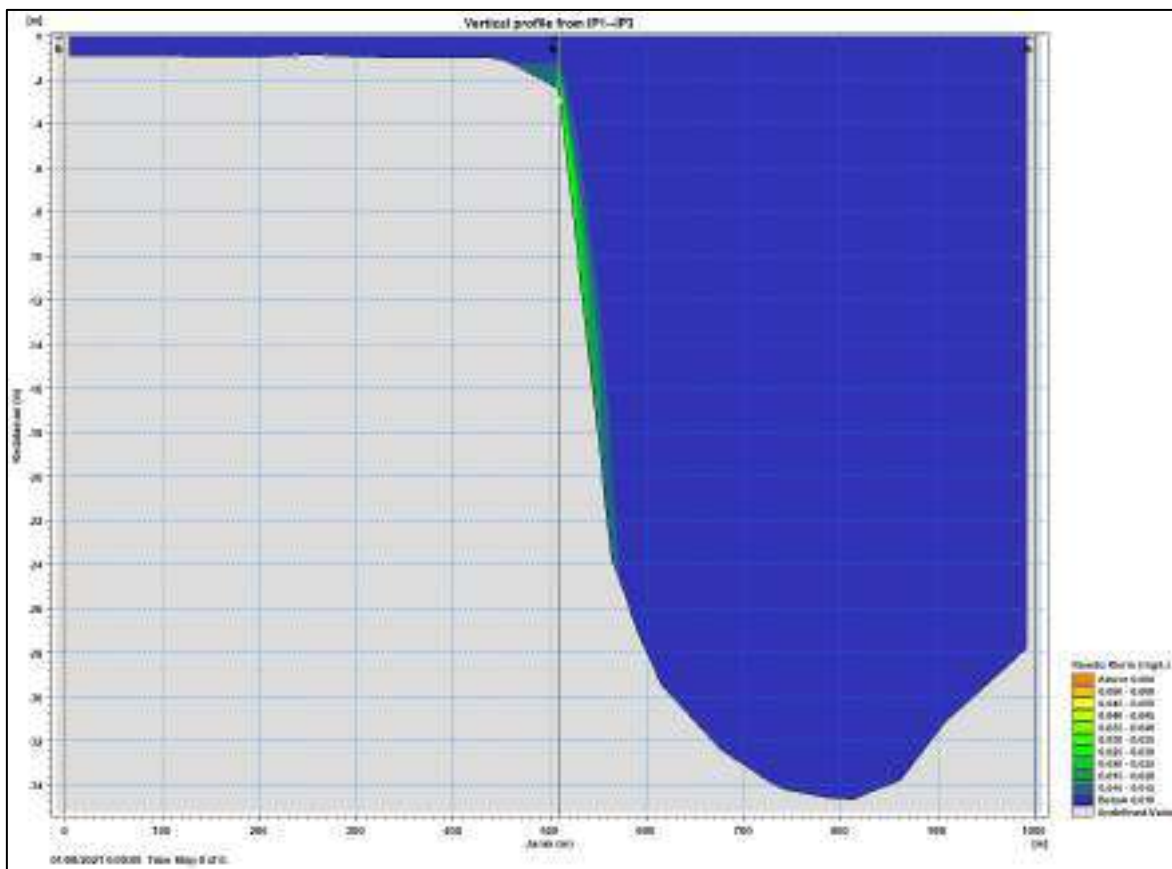
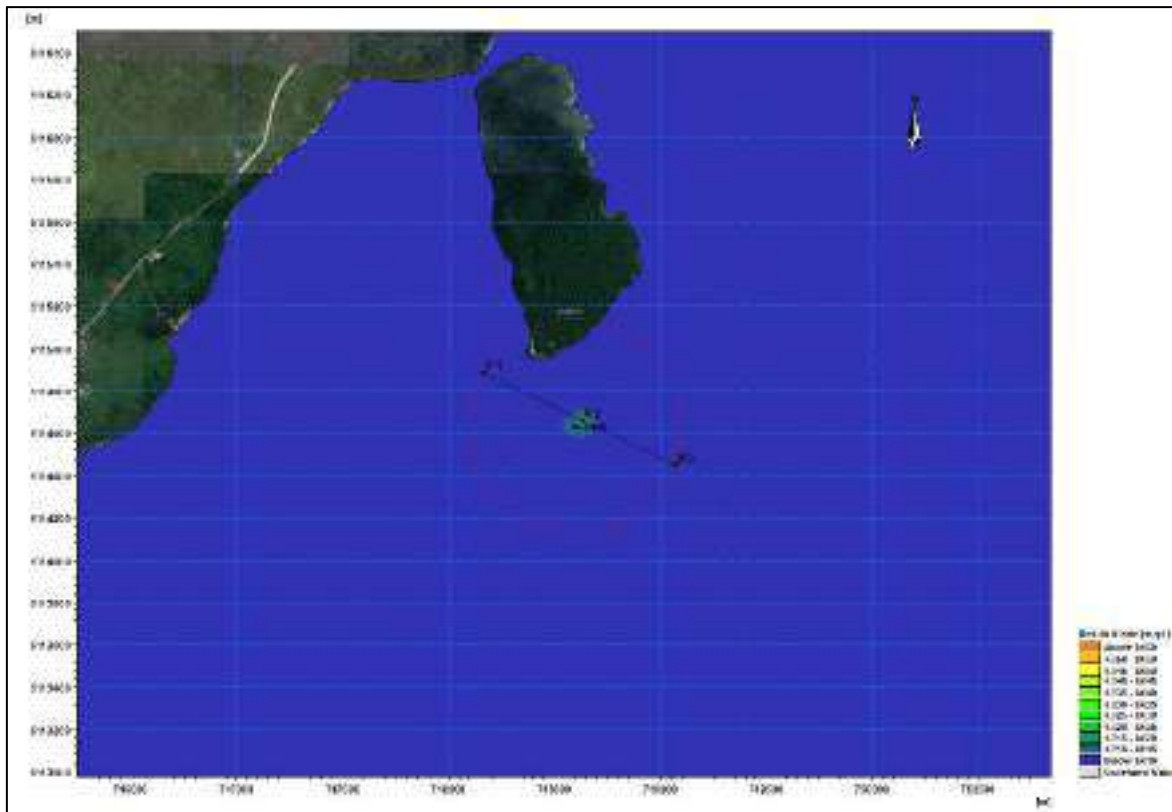
Gambar 28. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



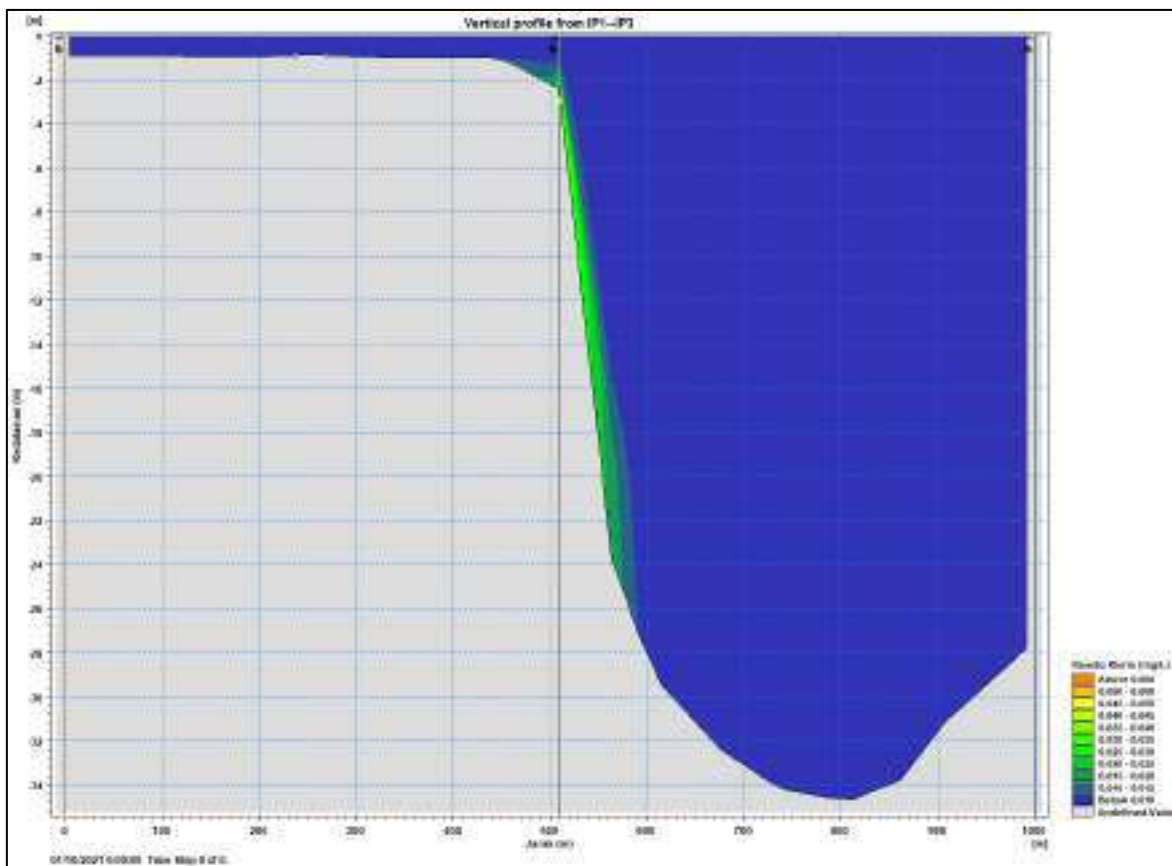
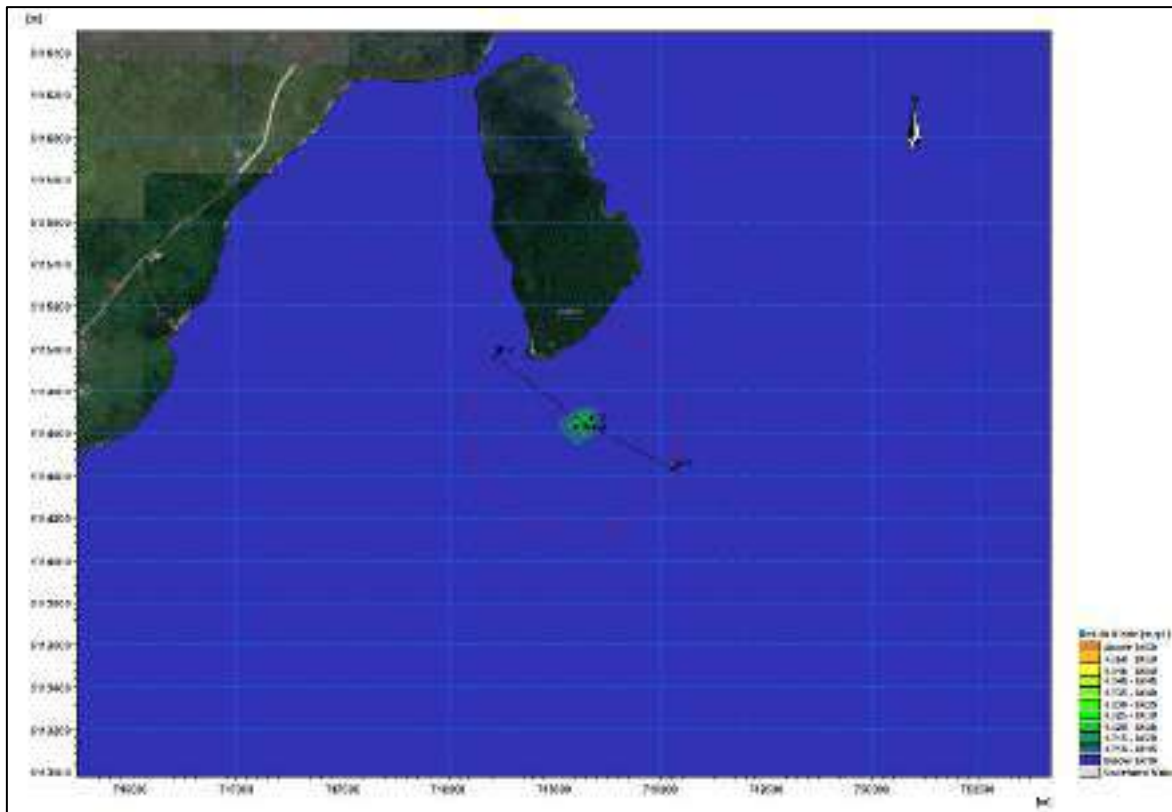
Gambar 31. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



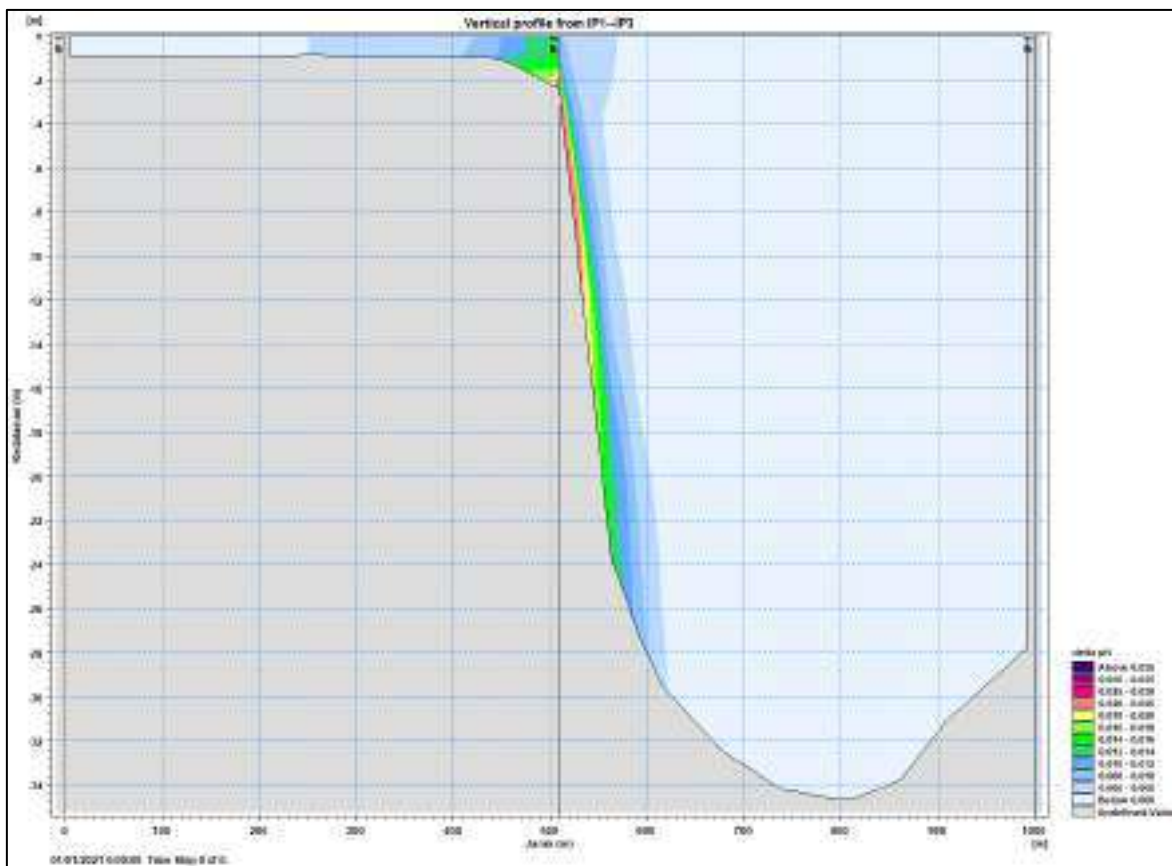
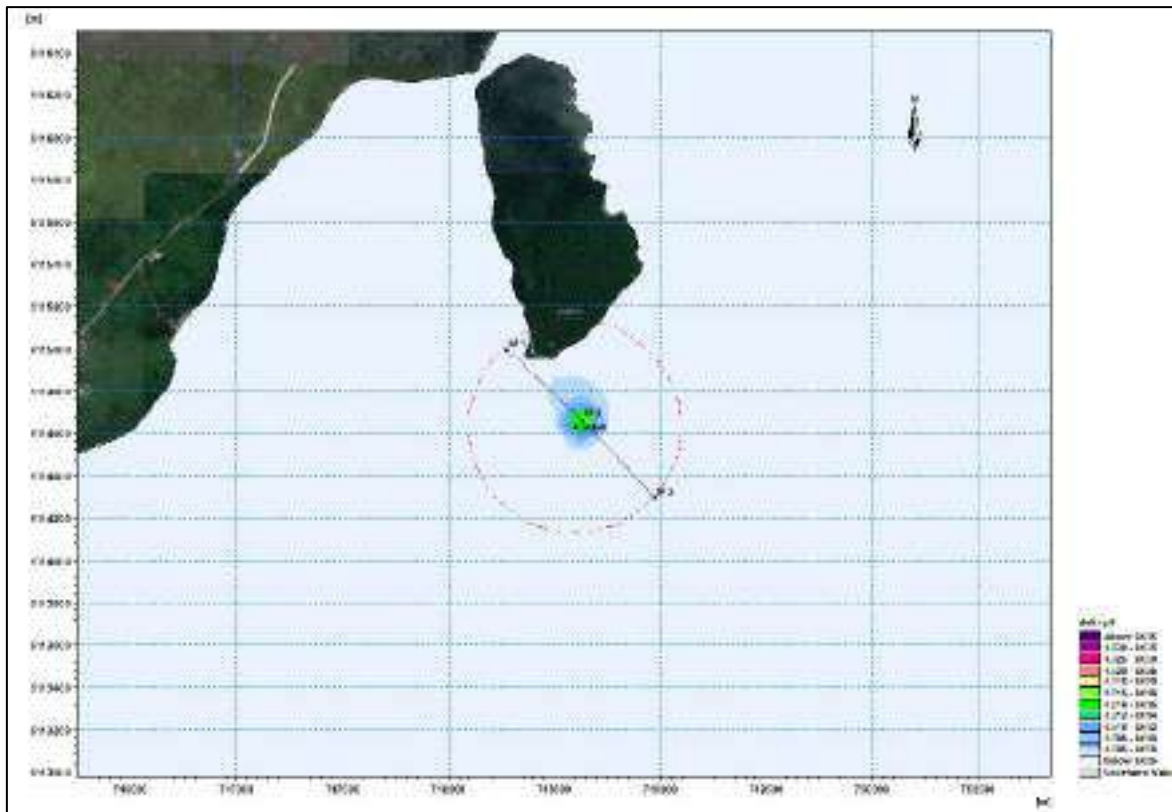
Gambar 32. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



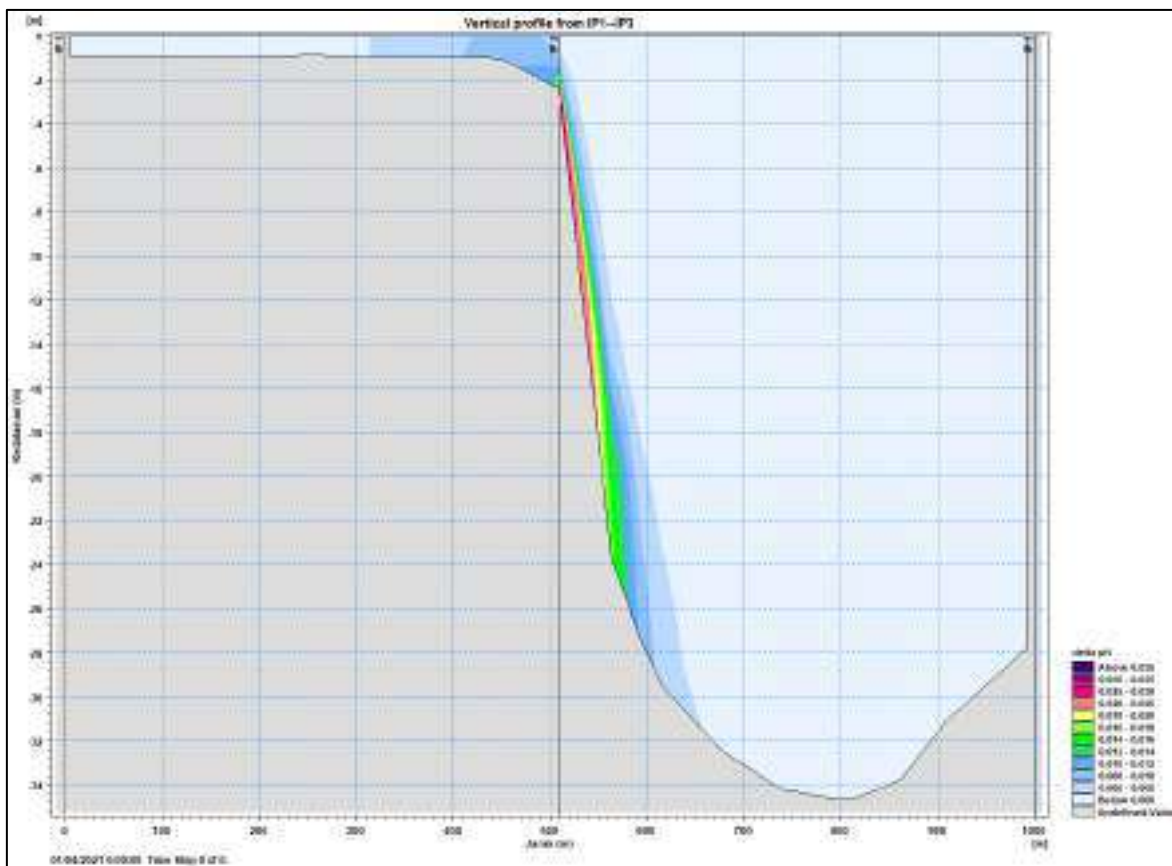
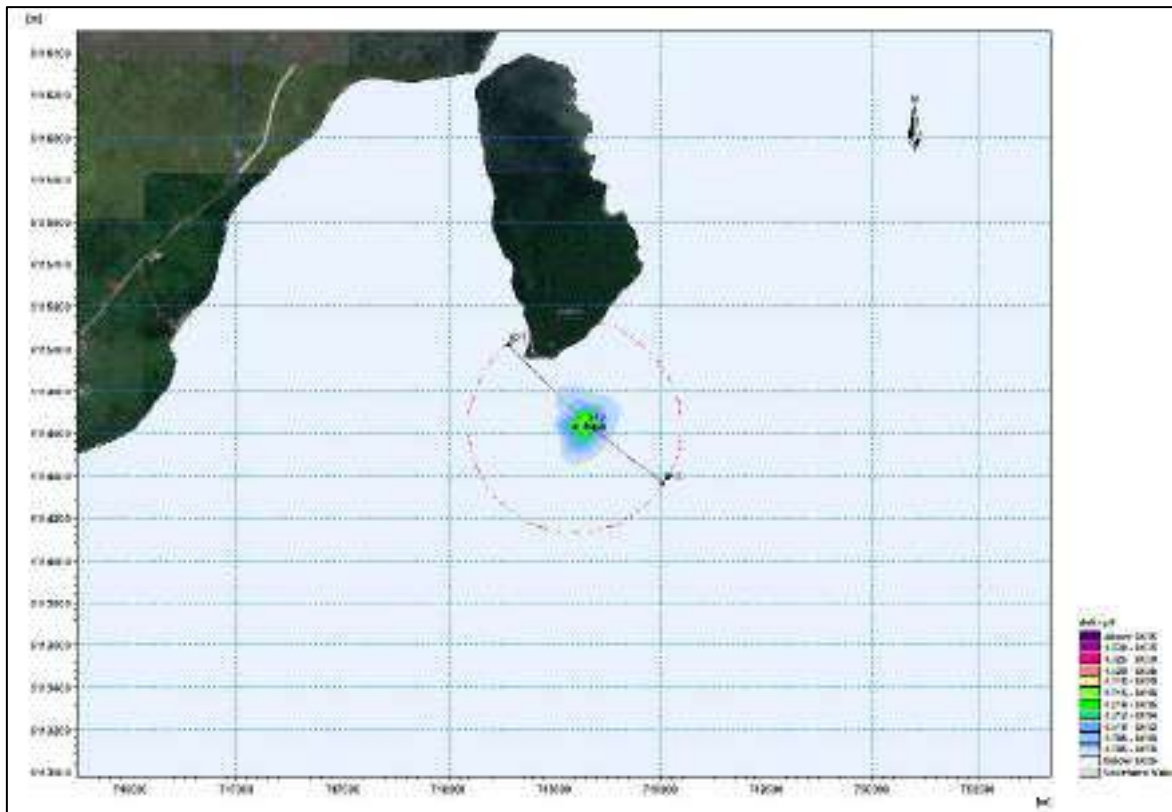
Gambar 34. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



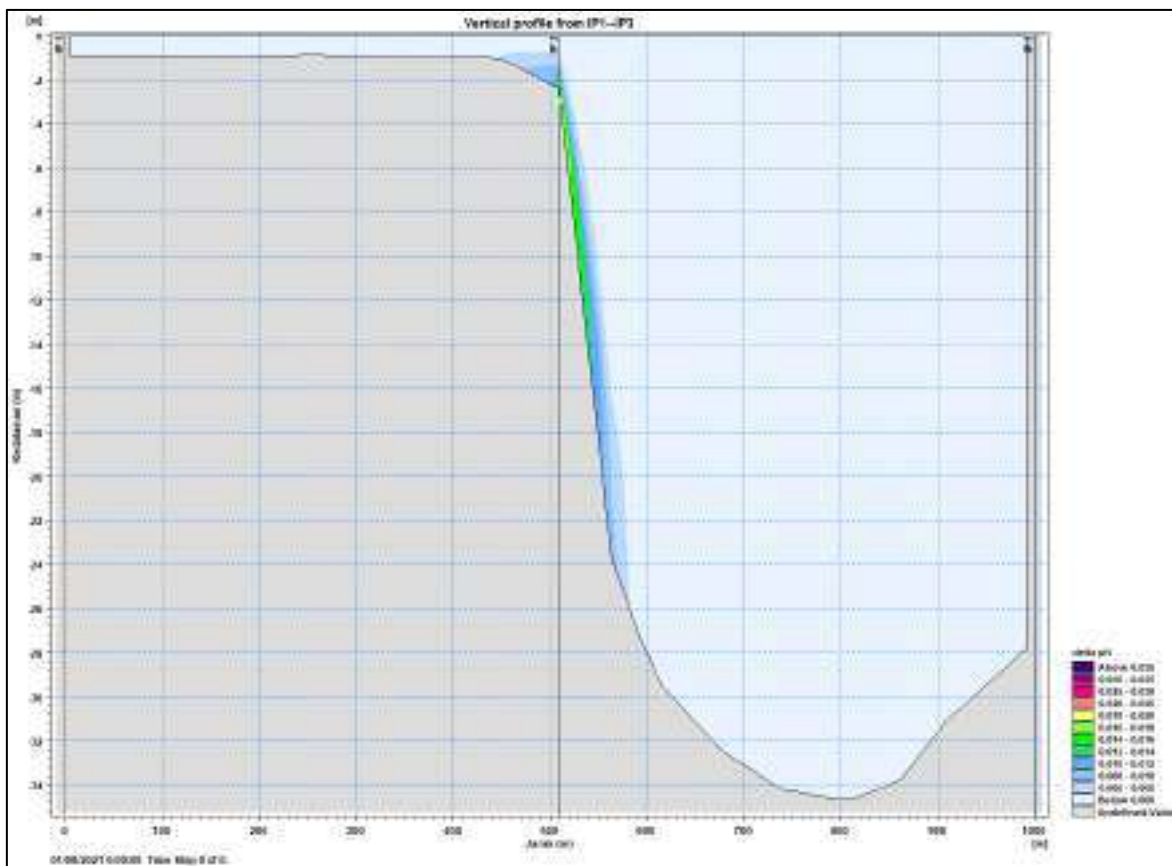
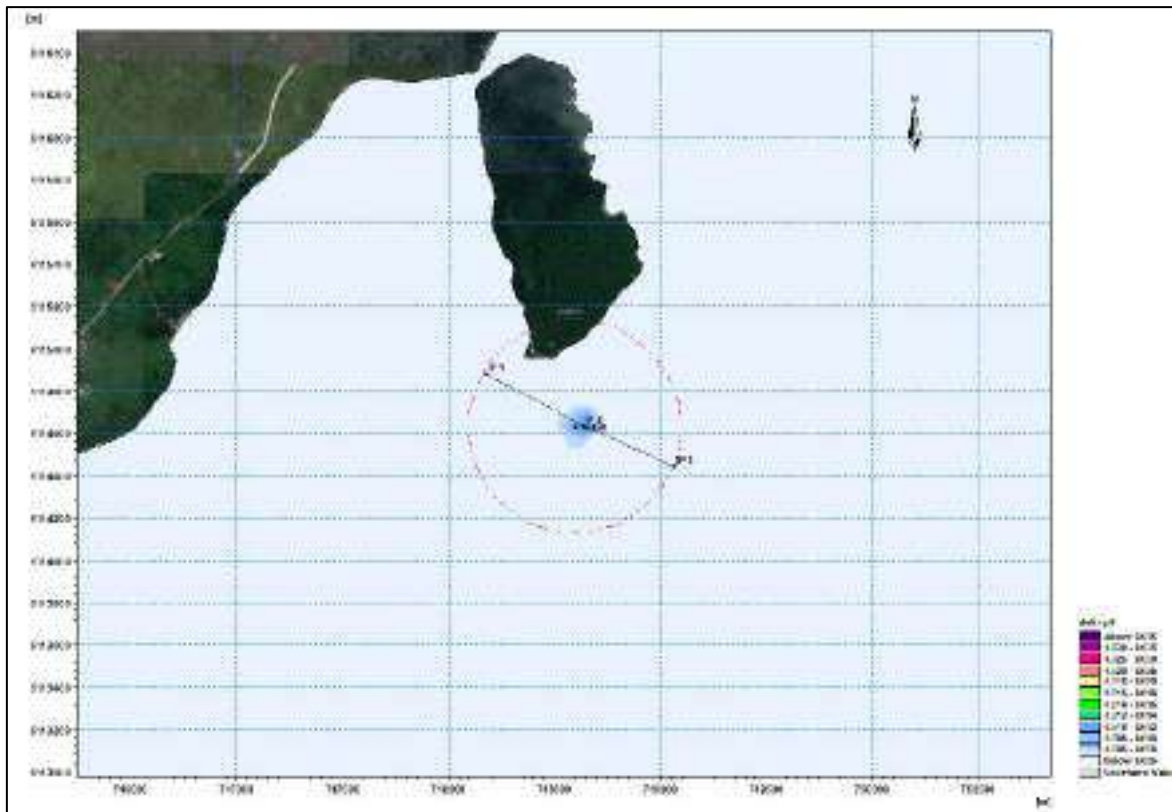
Gambar 35. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



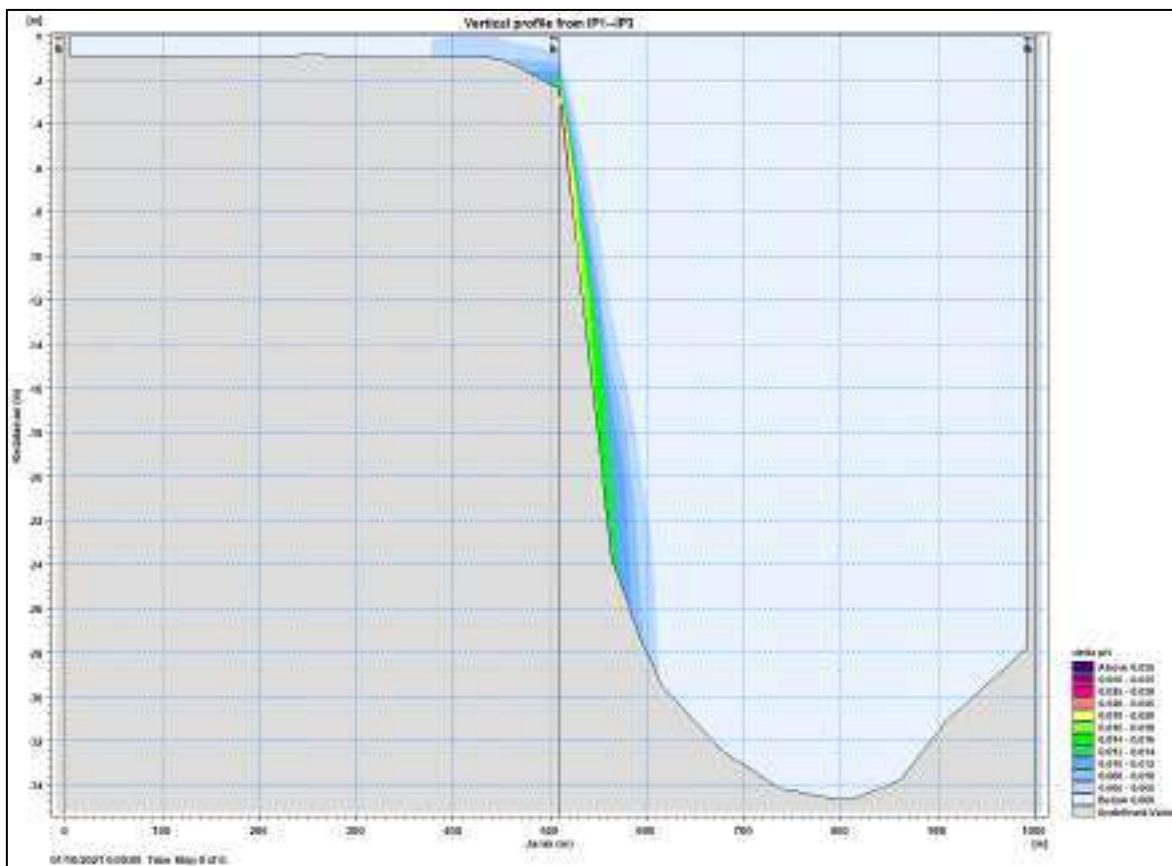
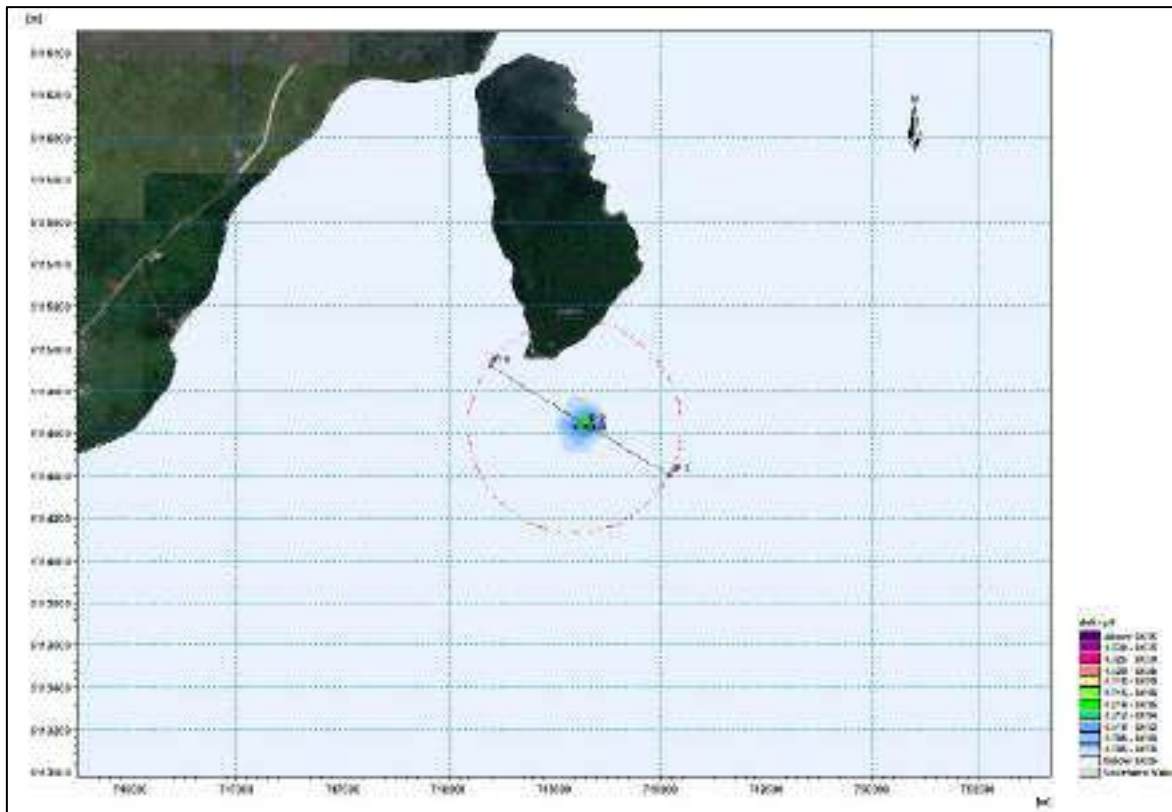
Gambar 36. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



Gambar 37. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



Gambar 38. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



Gambar 39. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II

Nilai parameter suhu yang dimodelkan dalam kajian ini adalah nilai selisih antara nilai suhu buangan limbah dan suhu alami atau sering disebut dengan delta suhu. Berdasarkan hasil pengukuran suhu bulan Februari-September 2020, rata-rata suhu alami badan air penerima pada musim barat (Februari) sebesar 29.31 °C, musim peralihan I (April) sebesar 29.54 °C, musim timur (Agustus) sebesar 26.26 °C dan musim peralihan II sebesar 26.59 °C, sementara limbah air bahang (effluent) sebesar 45 °C. Hasil perhitungan nilai delta temperature yang digunakan sebagai input pemodelan diperlihatkan dalam **Tabel 14**.

Tabel 14. Hasil perhitungan delta temperature yang digunakan sebagai input model

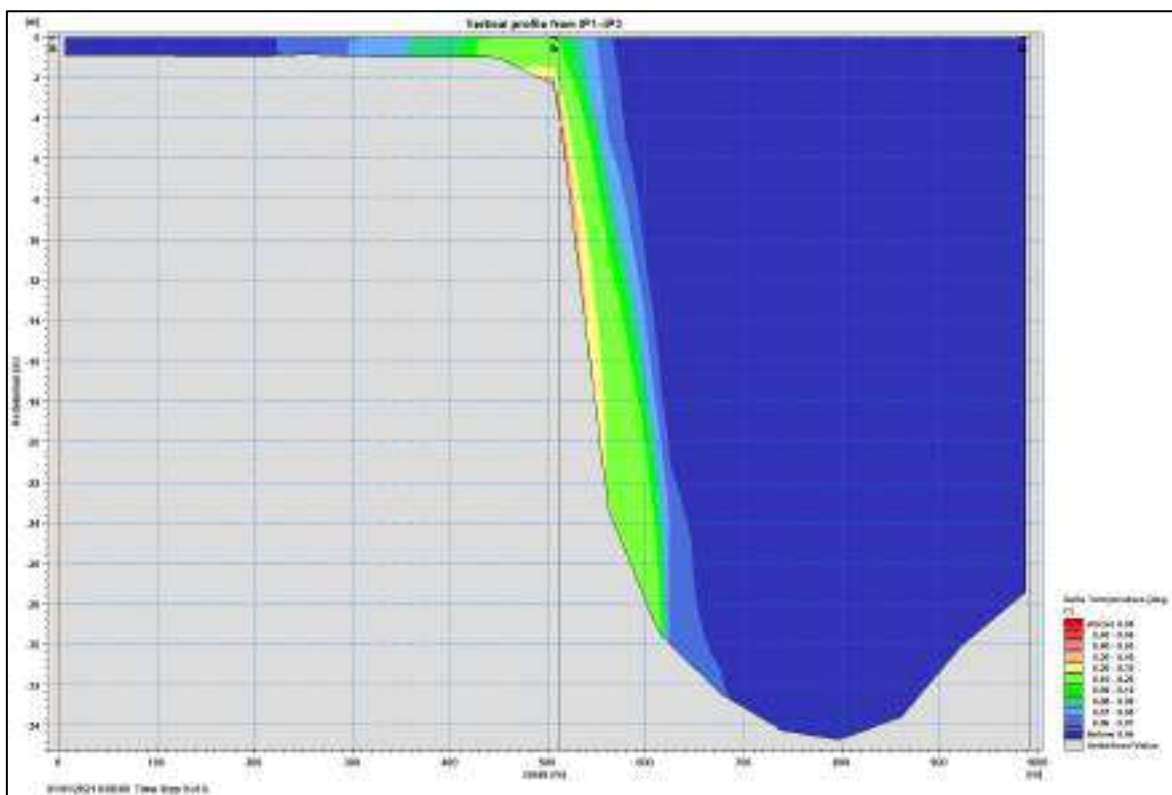
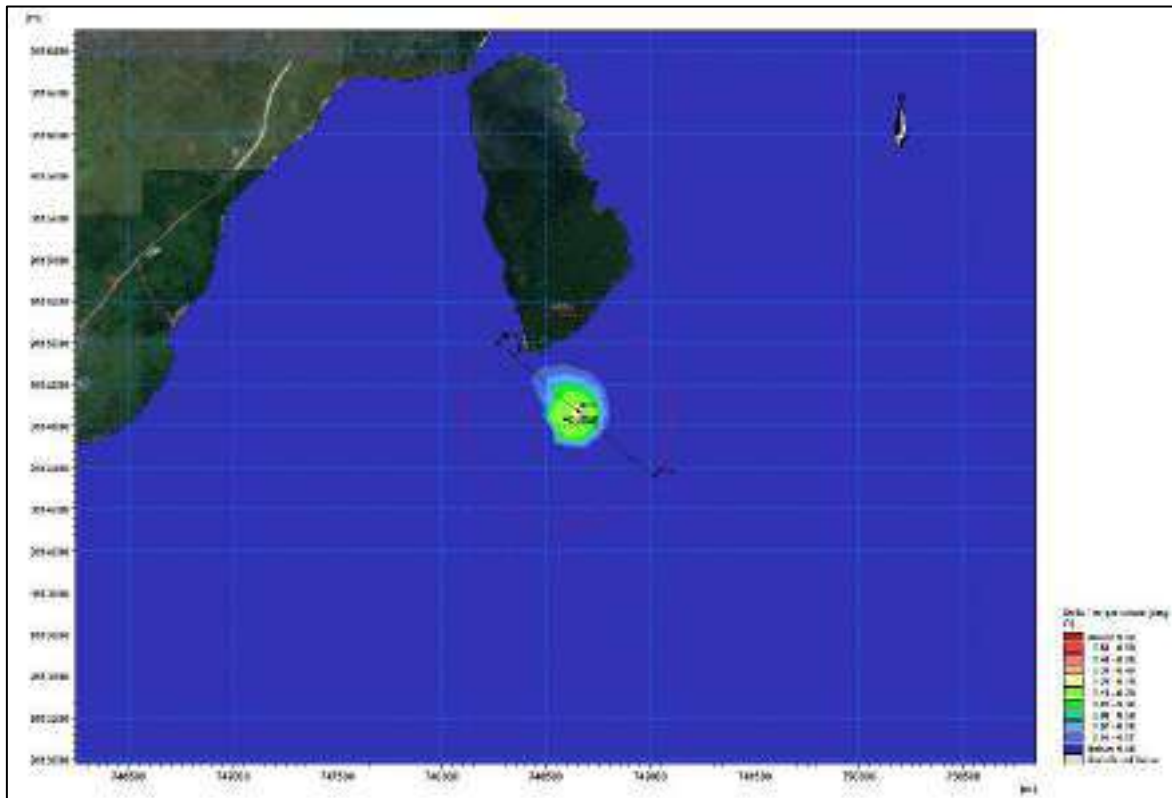
Musim	Temperature [°C]		Delta temperature [°C]
	existing	Effluent	
Barat (Februari)	29.31	45	15.69 ~ 16
Peralihan I	29.54	45	15.46 ~ 15
Timur	26.26	45	18.74 ~ 19
Peralihan II	26.59	45	18.41 ~ 18

Hasil model sebaran delta suhu maksimum pada keseluruhan musim terlihat rendah. Delta suhu maksimum pada musim barat (**Gambar 40**) dan musim peralihan I (**Gambar 41**) hanya mencapai 0.4°C, sementara pada musim timur (**Gambar 42**) dan musim peralihan II (**Gambar 43**) sedikit lebih kecil, yakni 0.3°C. Bila mengacu pada baku mutu PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII, nilai delta suhu hasil model tersebut tergolong rendah. Hal ini dikarenakan baku mutu perubahan suhu yang diperbolehkan berdasarkan peraturan tersebut adalah sebesar 2°C dari suhu alami, sedangkan perubahannya (delta suhu) mencapai 0.4°C dan 0.3°C.

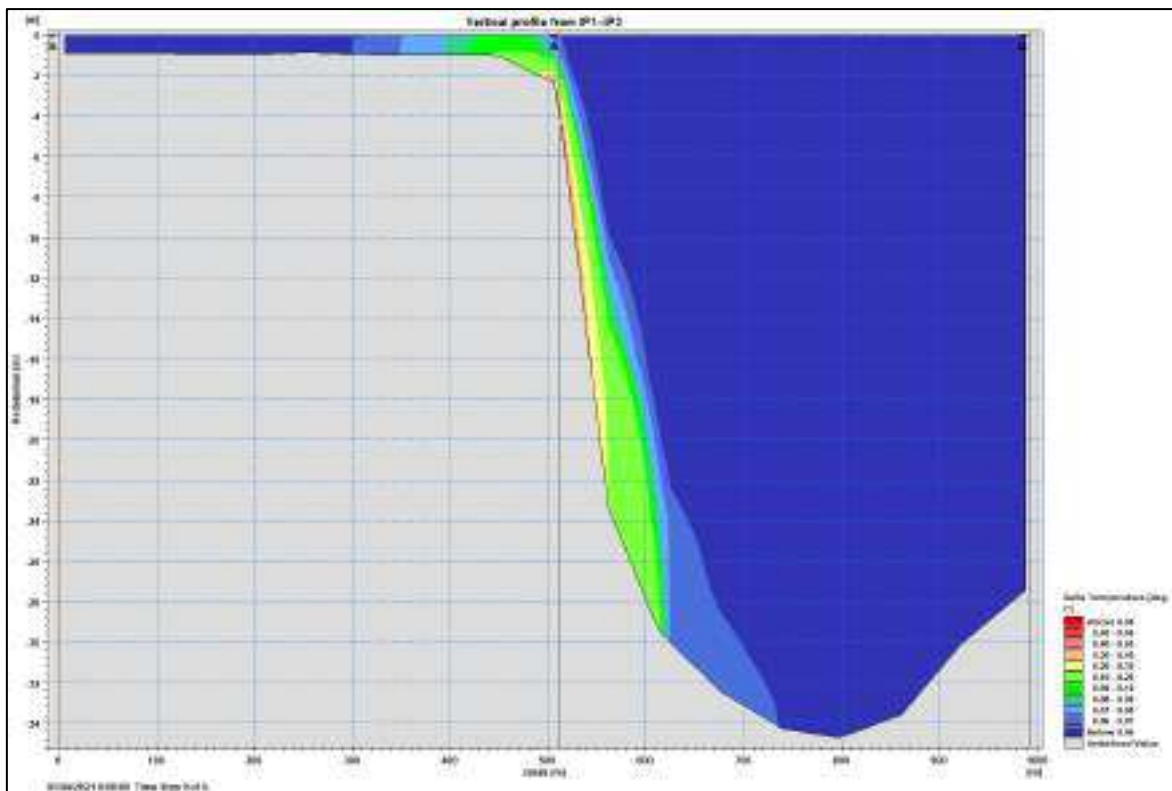
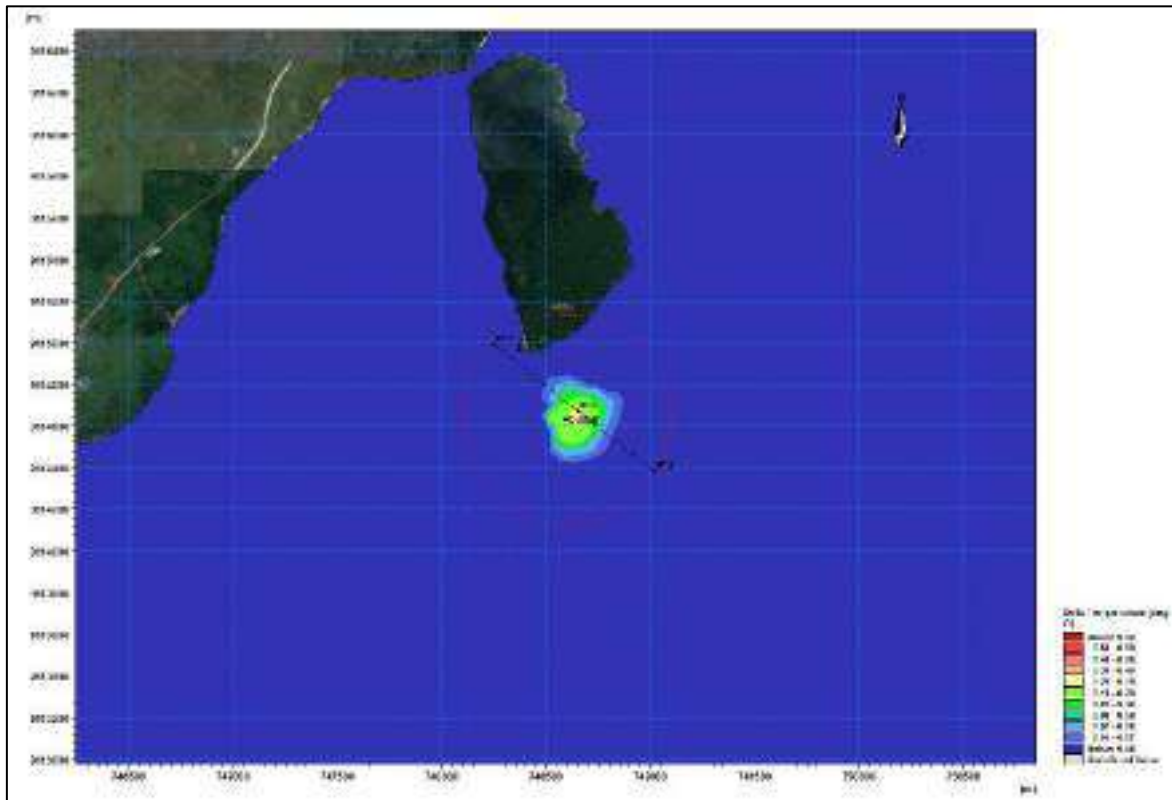
Peningkatan konsentrasi BOD maksimum pada keseluruhan musim (**Gambar 44** hingga **Gambar 47**) di sekitar titik buangan hanya mencapai 3 mg/L (musim barat dan peralihan I) dan 2.5 mg/L (musim timur dan peralihan II). Bila mengacu pada baku mutu BOD PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota sebesar 20 mg/l, maka konsentrasi maksimum BOD tersebut tergolong rendah (dibawah baku mutu). Hasil analisis sampel air laut dari 18 titik stasiun sekitar lokasi kajian tergolong rendah, yakni baik pada musim kemarau dan hujan tidak lebih dari 2 mg/L (< 2 mg/L). Artinya jika dijumlahkan konsentrasi BOD hasil model dan hasil pengukuran, maka nilai BOD total hasil penjumlahan tersebut masih lebih rendah dari ketetapan baku mutu. Hal ini menunjukkan pembuangan limbah BOD ke badan air penerima tidak mengakibatkan peningkatan BOD hingga melebihi baku mutu.

Konsentrasi maksimum COD hasil model musim barat (**Gambar 48**) dan peralihan I (**Gambar 49**) juga relatif rendah, yakni hanya mencapai 8 mg/l. Kondisi tidak jauh berbeda juga diperlihatkan pada musim timur (**Gambar 50**) dan peralihan II (**Gambar 51**), dimana konsentrasi maksimum hanya mencapai 4 mg/l. Baku mutu air laut berdasarkan menurut PP Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VIII tidak mempersyaratkan parameter COD. Mengacu pada PP RI No. 82 tahun 2001 dalam Efendi (2003) terkait dengan kegiatan perikanan,

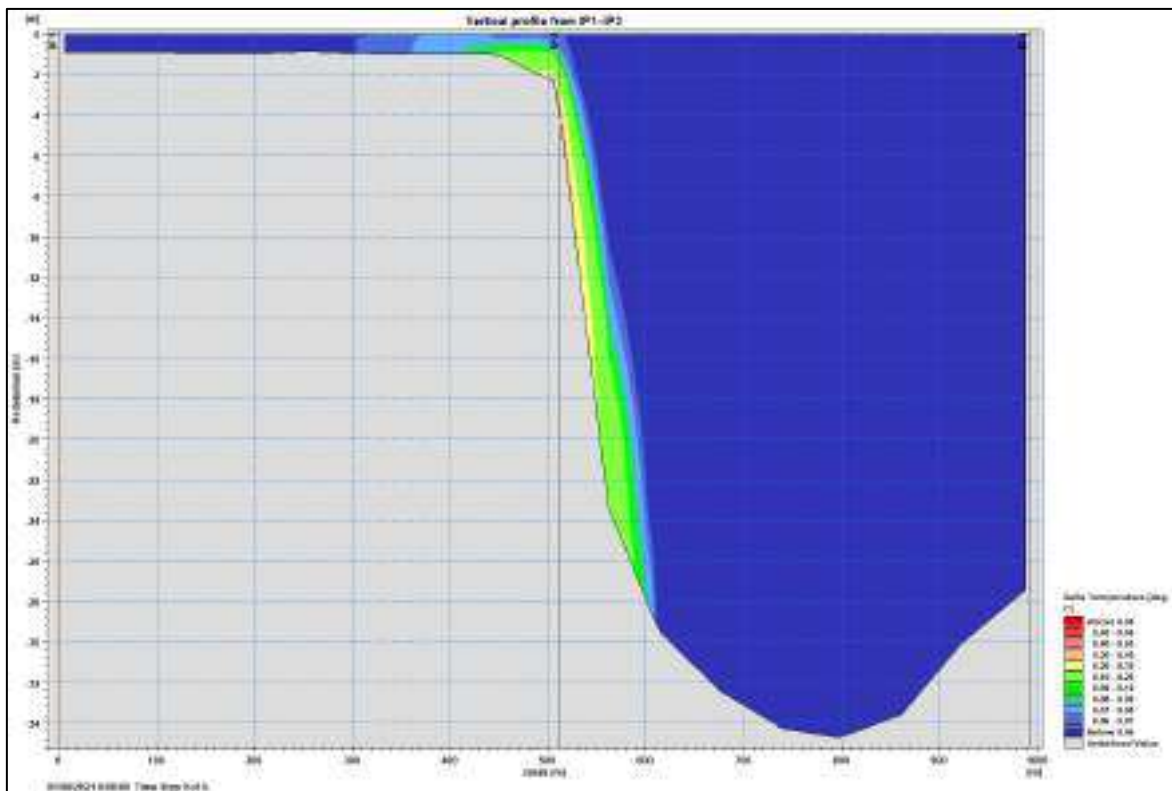
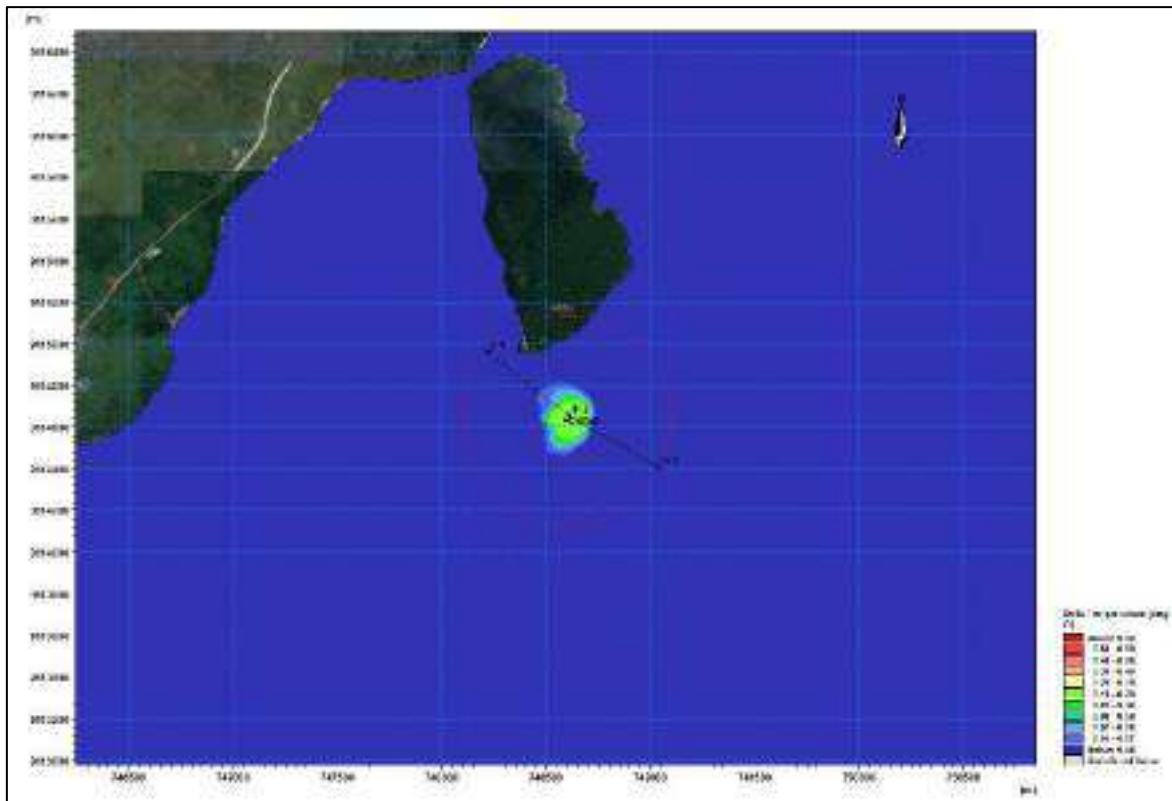
konsentrasi COD tersebut tergolong rendah, dimana batas maksimum COD yang diperbolehkan untuk kegiatan perikanan adalah sebesar 50 mg/l.



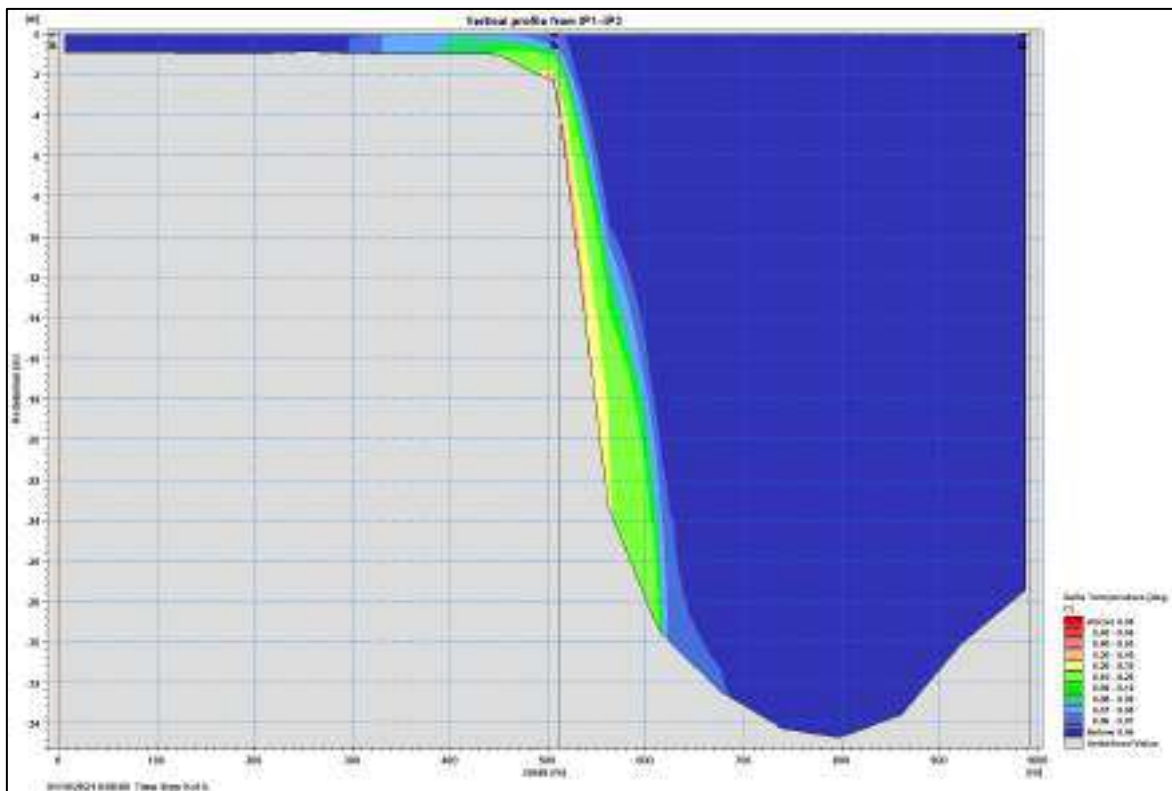
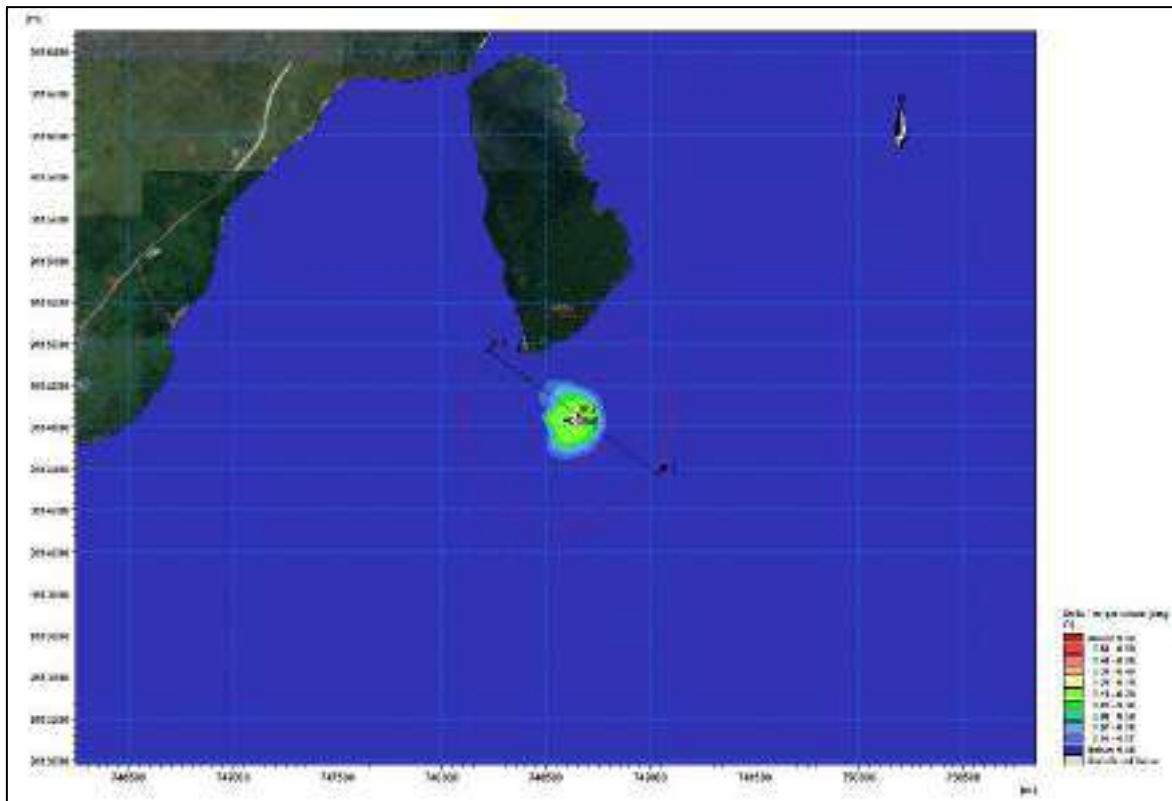
Gambar 40. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



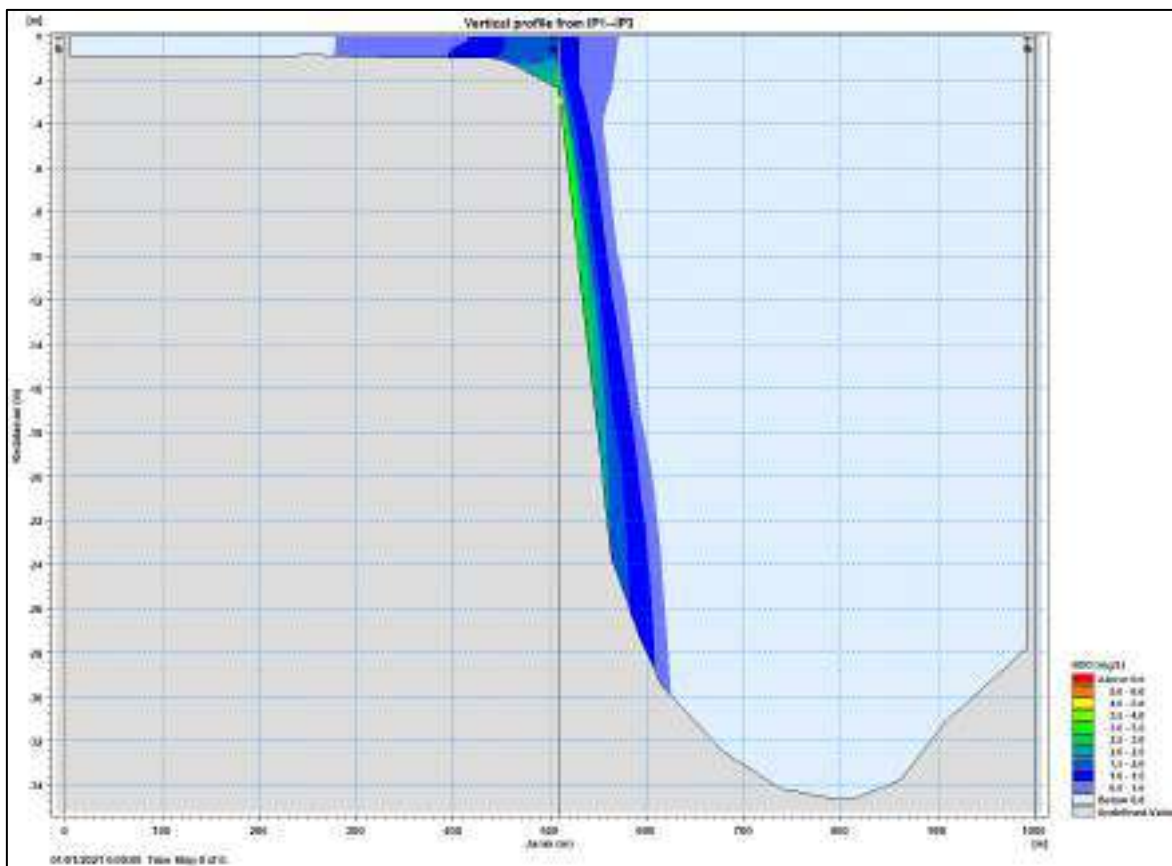
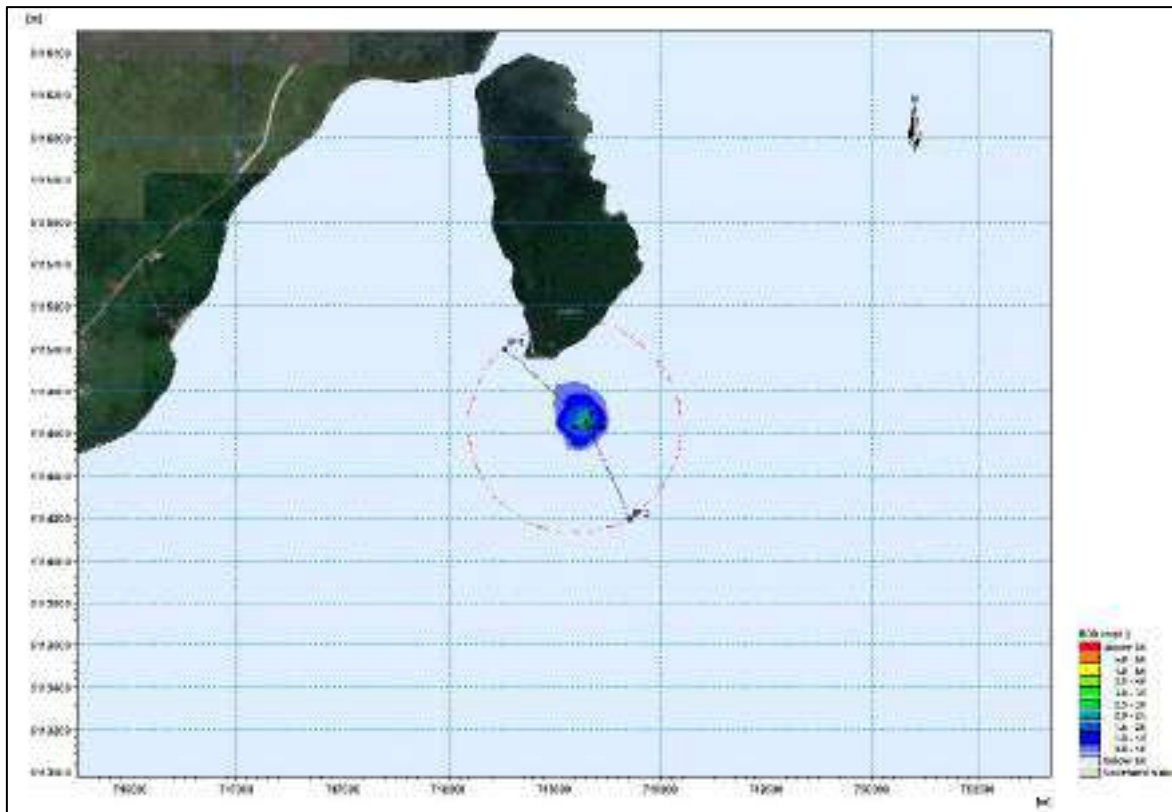
Gambar 41. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



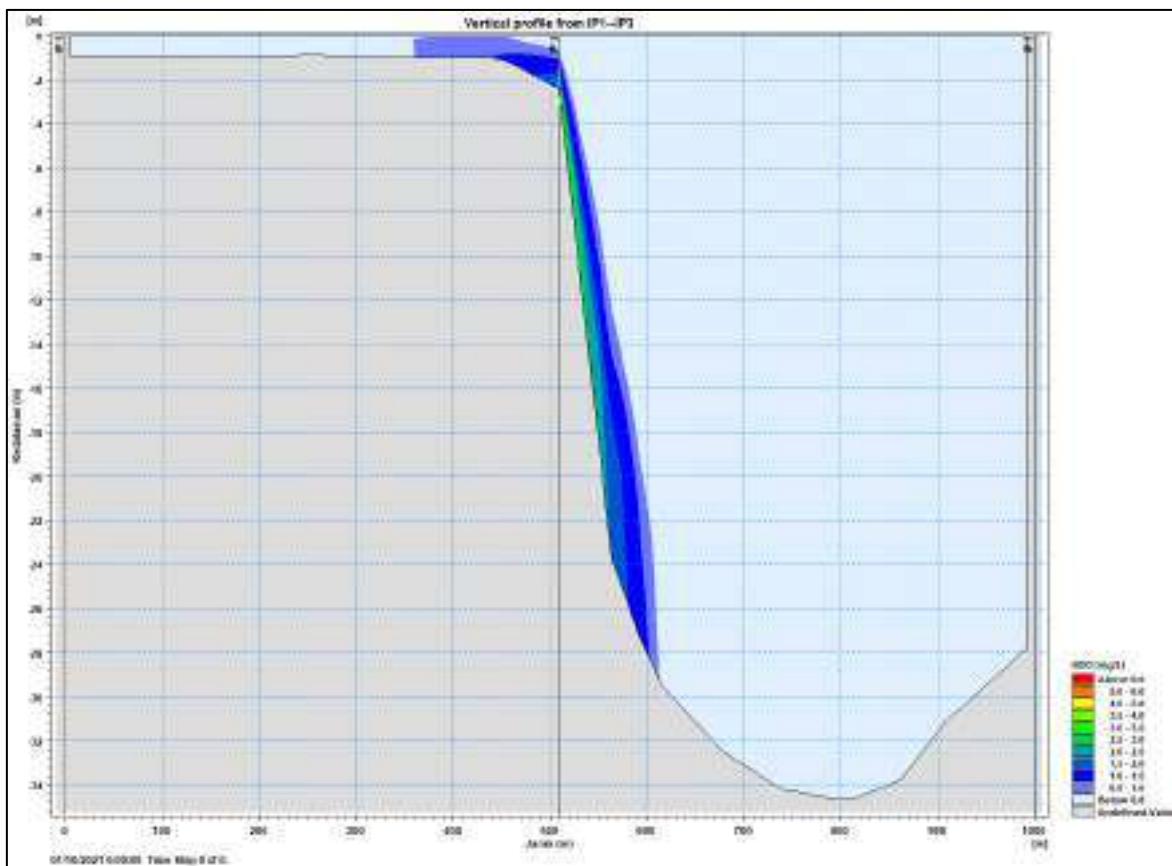
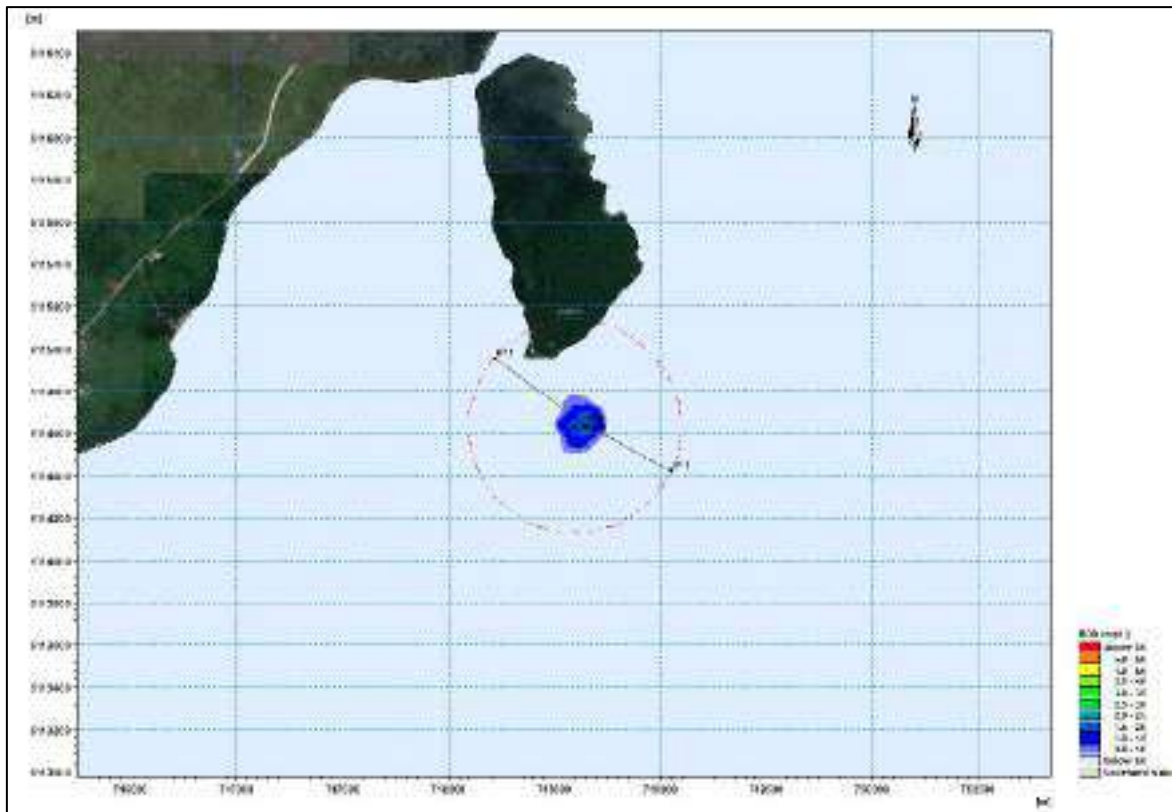
Gambar 42. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



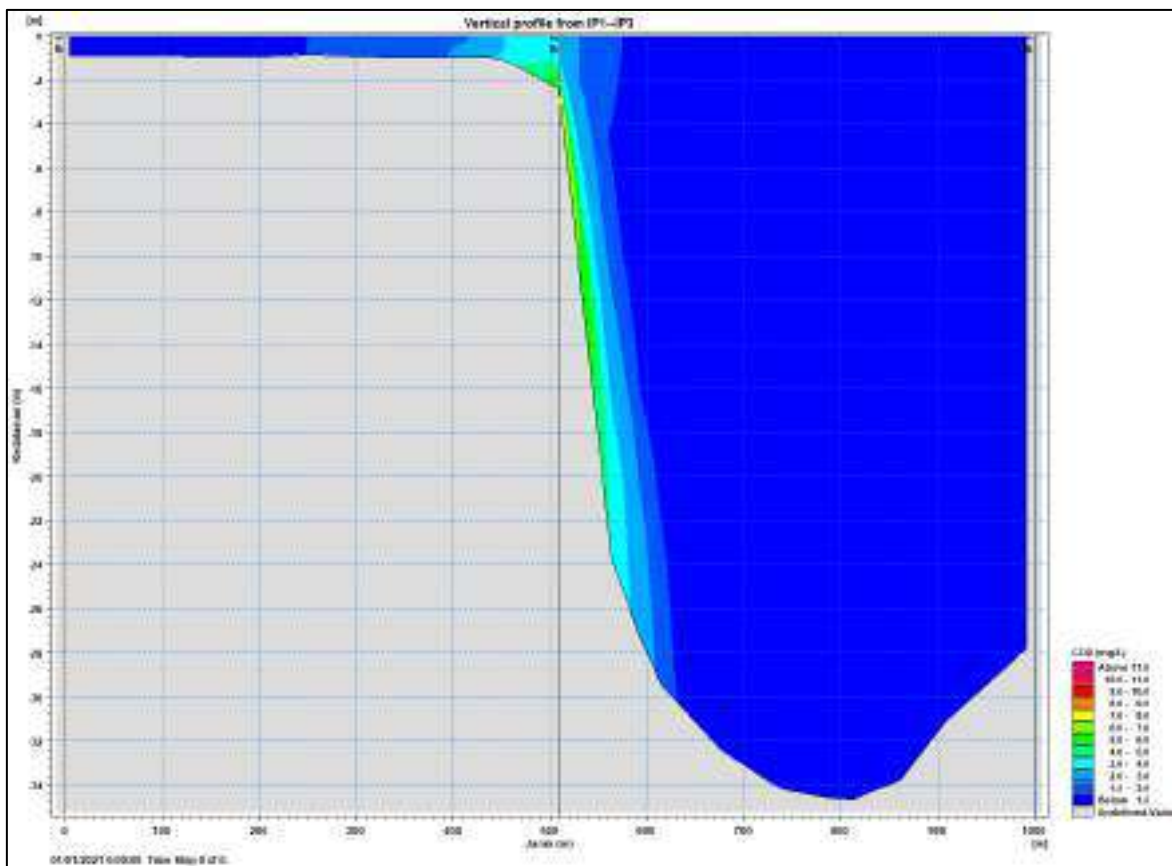
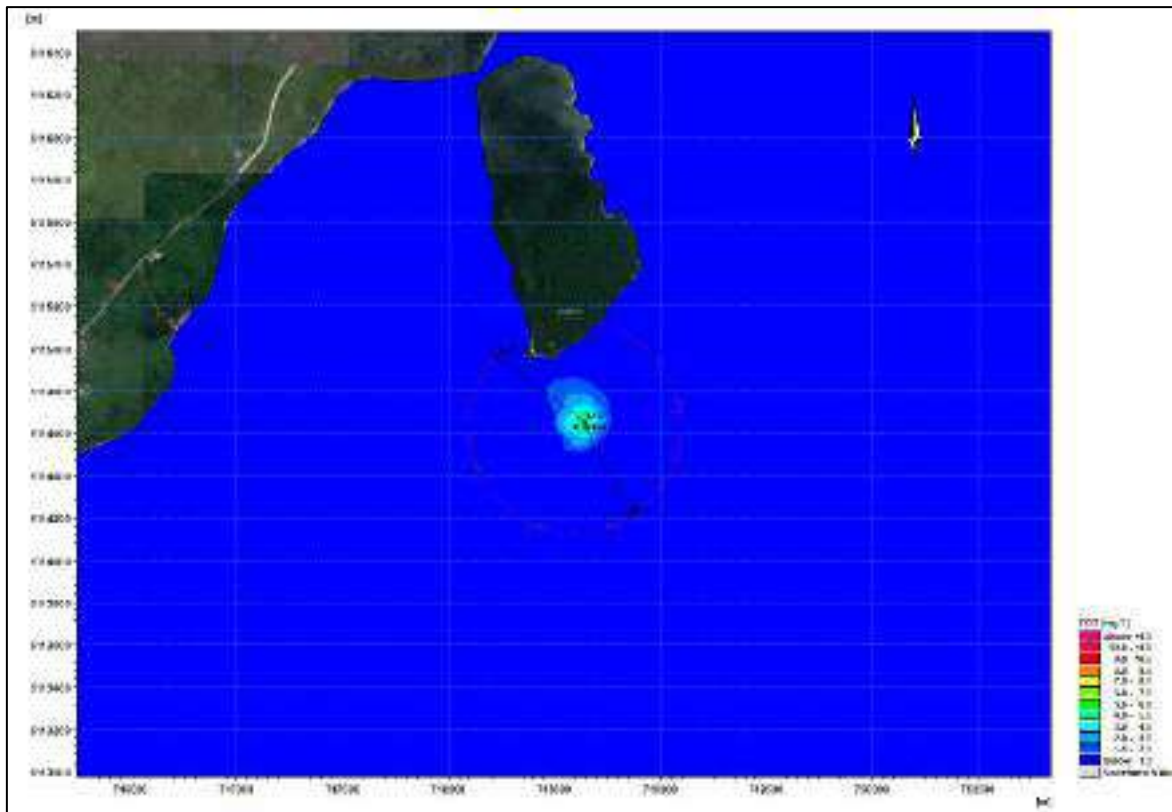
Gambar 43. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



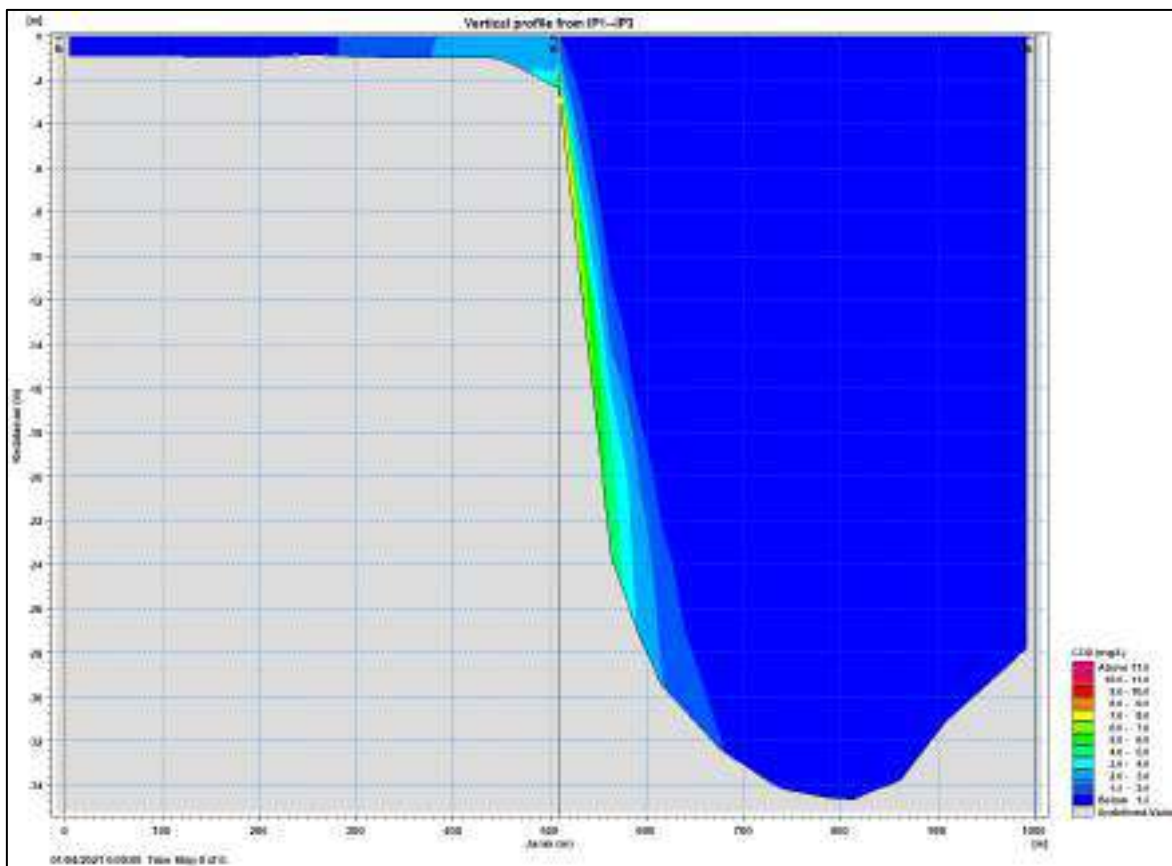
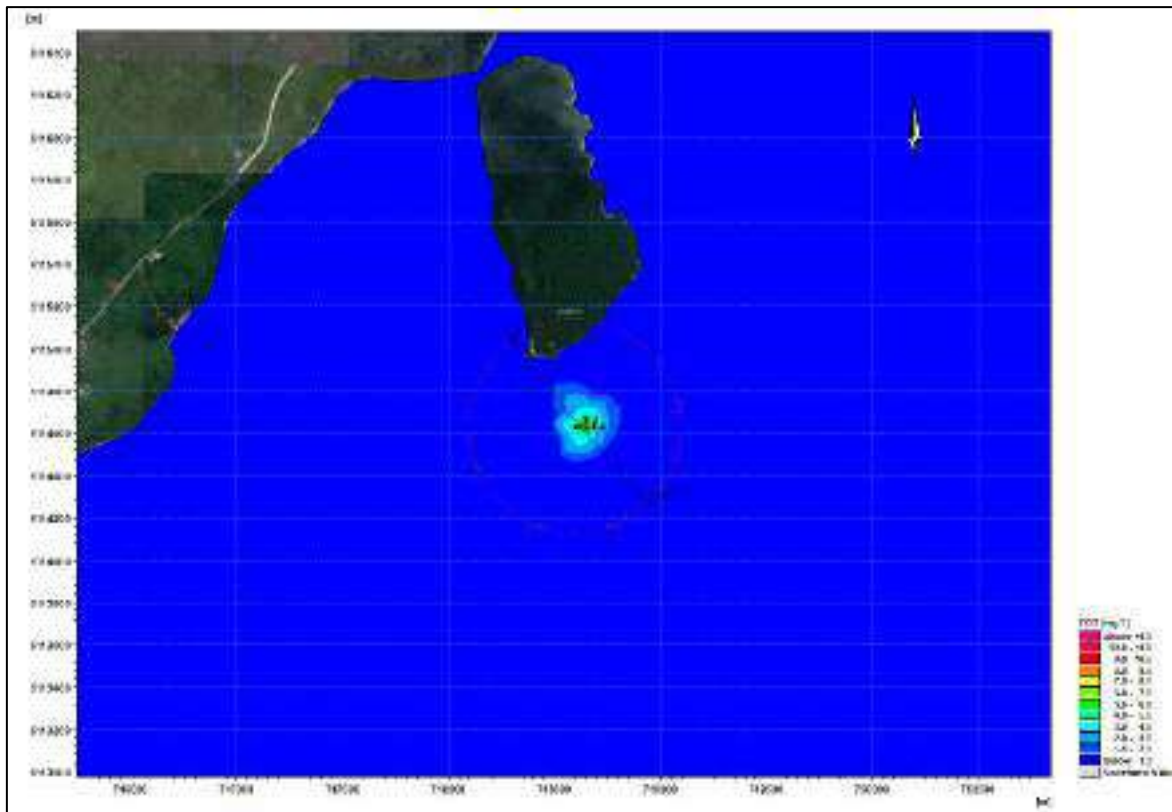
Gambar 44. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



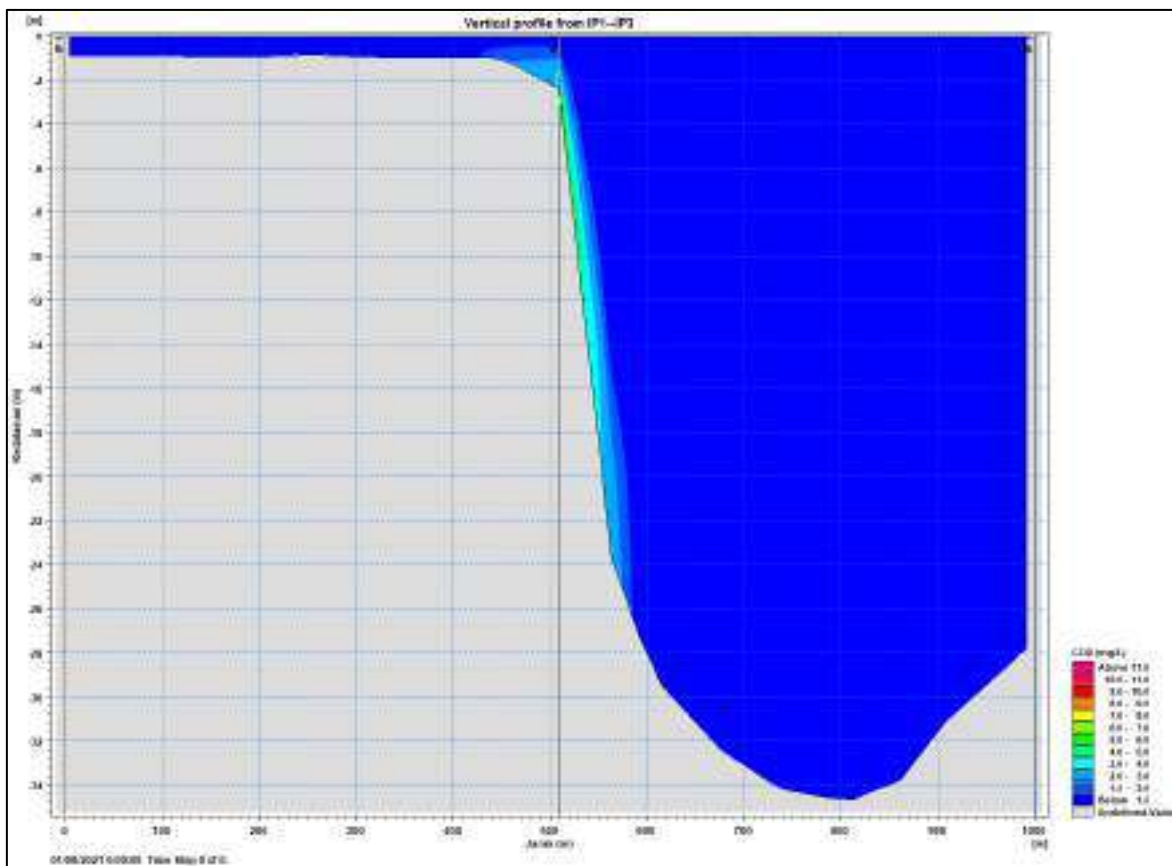
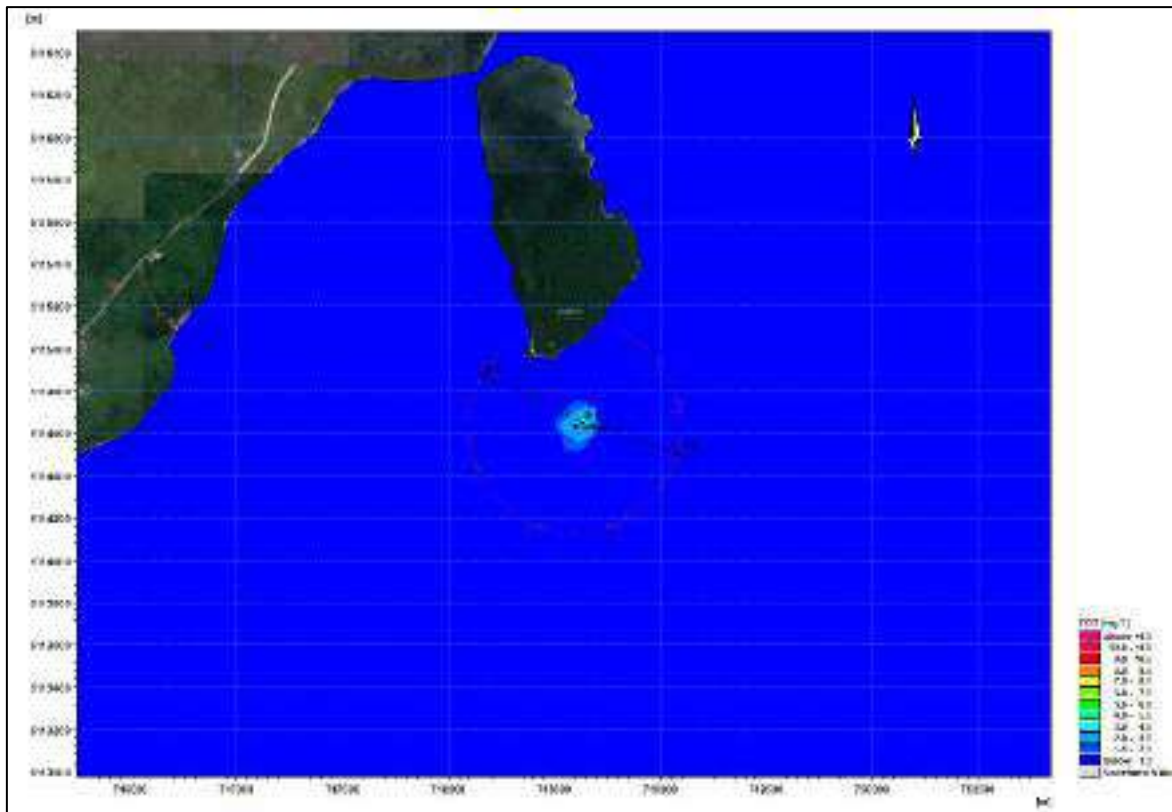
Gambar 47. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



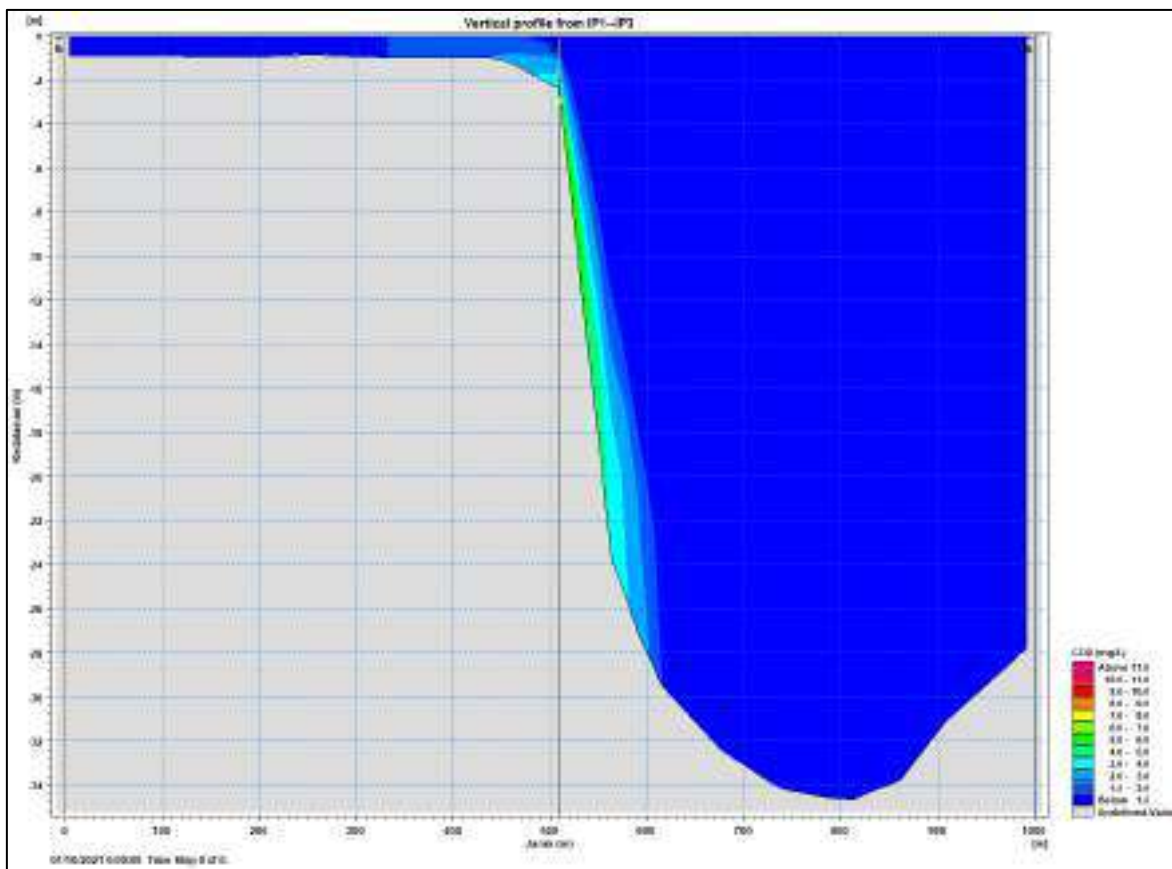
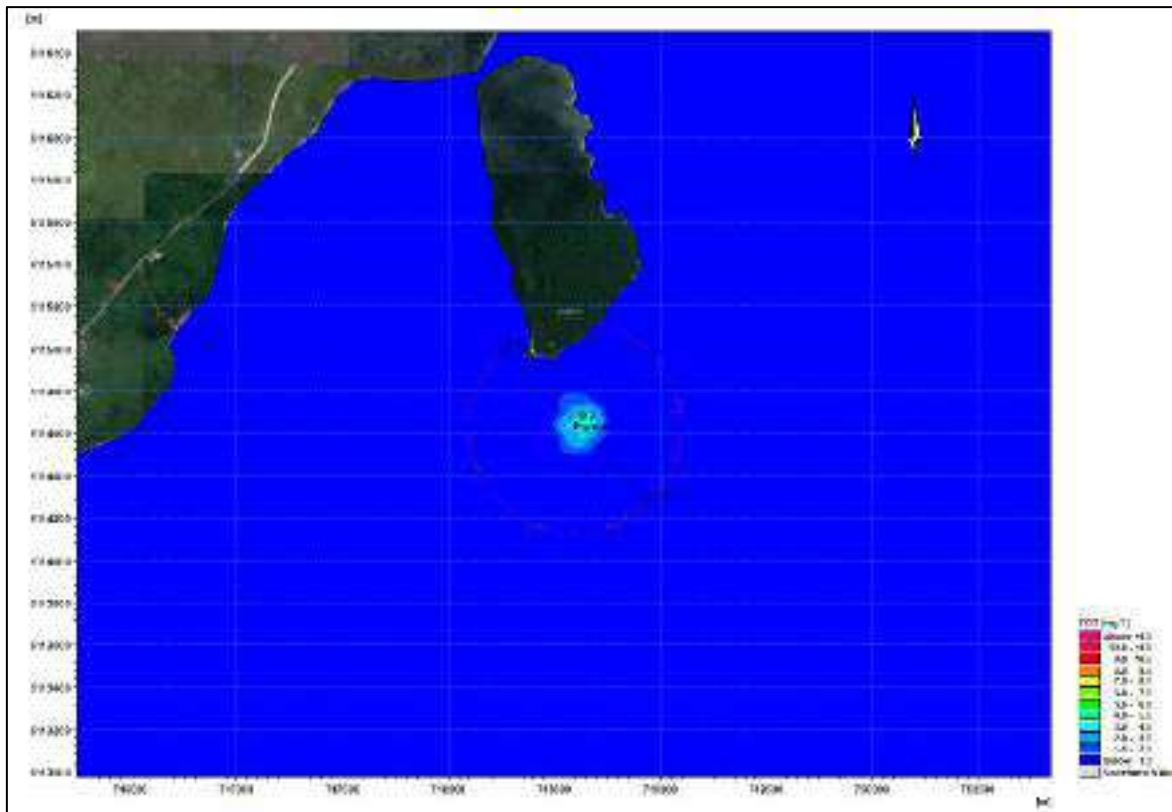
Gambar 48. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



Gambar 49. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



Gambar 50. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



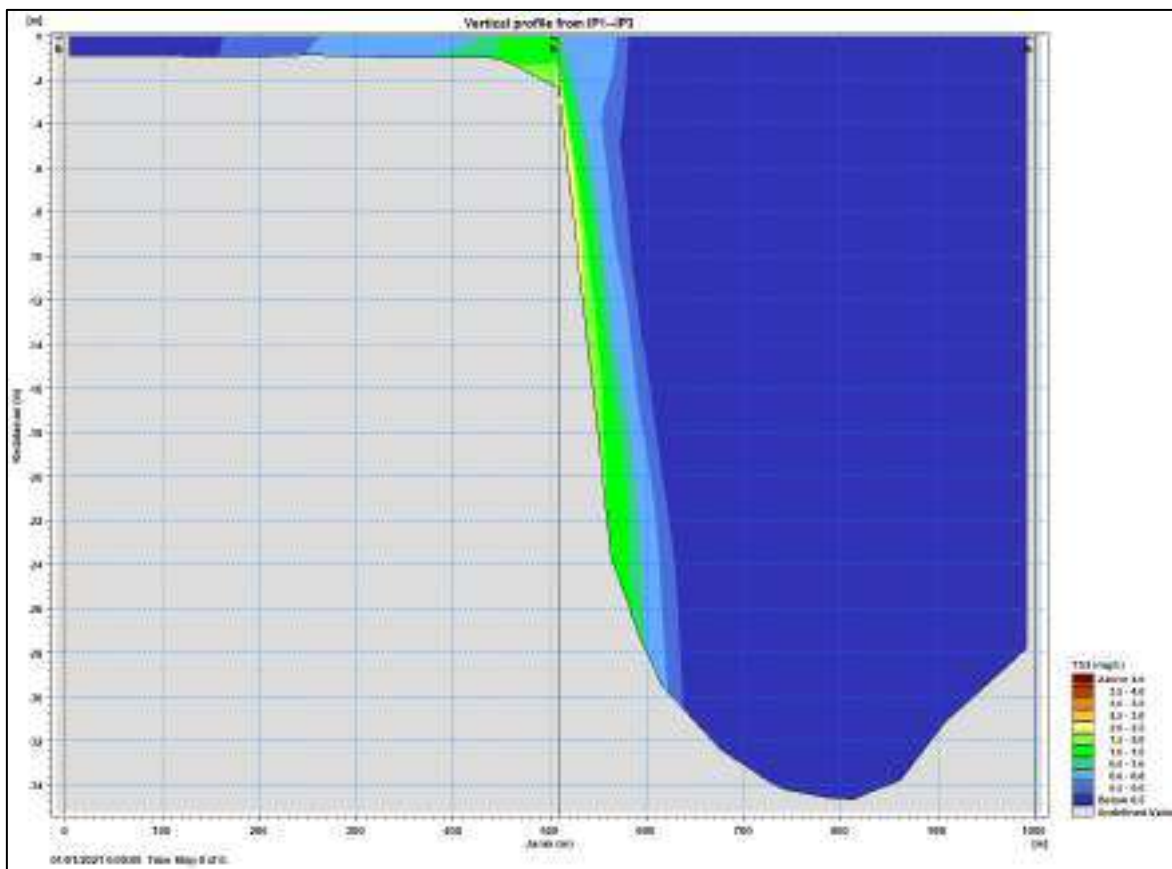
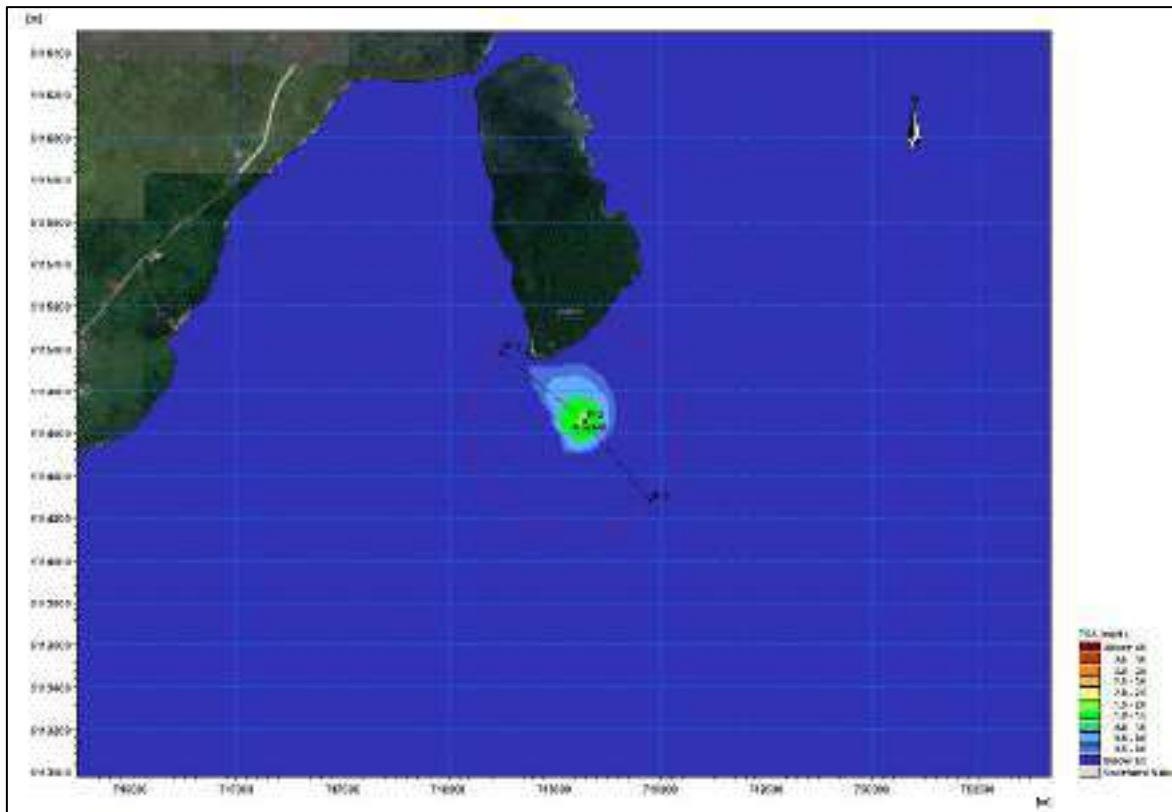
Gambar 51. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II

Peningkatan konsentrasi TSS maksimum hasil model keseluruhan musim (**Gambar 52** hingga **Gambar 55**) ketika masuk ke perairan tergolong rendah, yakni tertinggi hanya sebesar 2.5 mg/L (musim peralihan I). Konsentrasi TSS hasil model tersebut tergolong rendah bila dibandingkan dengan baku mutu PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota laut sebesar 20 mg/l. Konsentrasi TSS rata-rata hasil analisis sampel air laut 18 titik sekitar OLNG pada musim kemarau sebesar 2.67 mg/L dan pada musim hujan sebesar 3.5 mg/L (lebih kecil dari baku mutu). Jika dijumlahkan konsentrasi TSS hasil model dengan TSS di badan air, maka baik musim kemarau maupun musim hujan masing-masing diperoleh nilai 5.17 mg/L dan 6 mg/L (masih di bawah baku mutu). Hal ini berarti buangan limbah TSS dari kegiatan OLNG tidak berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi TSS di badan air penerima.

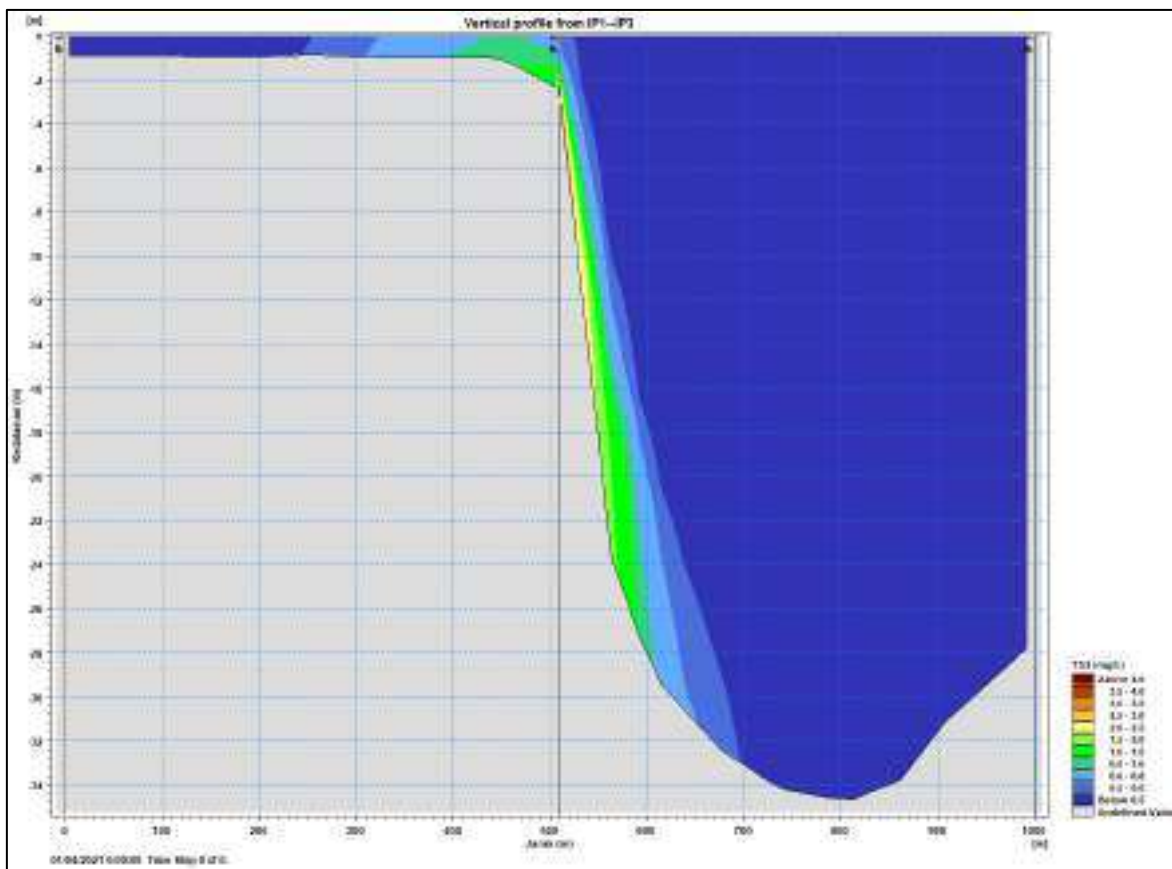
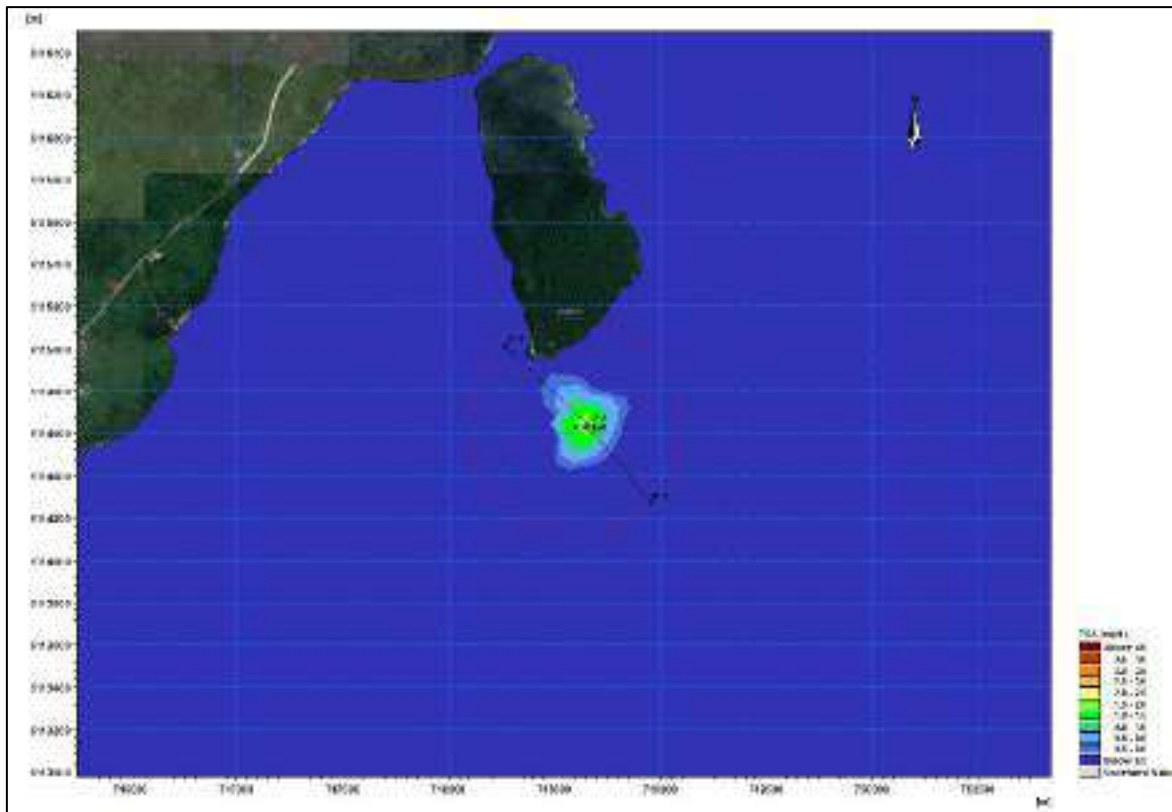
Parameter total nitrogen merupakan parameter limbah bersumber dari *Treated wastewater from Leachate Treatment package*. Peningkatan konsentrasi TOC maksimum pada musim barat (**Gambar 56**) dan peralihan I (**Gambar 57**) terlihat sama, yakni maksimum mencapai 1.5 mg/L, sementara hasil model musim timur (**Gambar 58**) dan peralihan II (**Gambar 59**) sedikit lebih kecil, yakni maksimum hanya 1.25 mg/L. Baku mutu menurut PP No 22 Tahun 2021 VIII tidak mensyaratkan total nitrogen dalam parameter yang diatur, sehingga tidak terdapat rujukan atau pembandingan untuk menentukan besar atau kecilnya peningkatan konsentrasi hasil model.

Hasil model sebaran dan konsentrasi merkuri (Hg) terlarut pada keseluruhan musim diperlihatkan dalam **Gambar 60** hingga **Gambar 63**. Berdasarkan gambar tersebut terlihat peningkatan konsentrasi maksimum kondisi musim barat dan peralihan I tidak terlihat ada perbedaan, yakni sebesar mencapai 0.00014 mg/L. Konsentrasi maksimum yang terlihat pada musim timur dan peralihan II sedikit lebih kecil, yakni 0.0001 mg/L. Baku mutu Hg terlarut berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 VIII untuk biota adalah 0.001 mg/L, sehingga hasil simulasi model keempat musim tersebut tidak terlihat ada yang melebihi baku. Hasil analisis sampel air 18 titik sekitar lokasi pembuangan limbah, baik musim kemarau dan musim hujan diperoleh nilai < 0.00005 mg/L (jauh di bawah baku mutu). Penjumlahan konsentrasi Hg hasil model dan Hg di perairan juga masih dibawah ketentuan baku mutu.

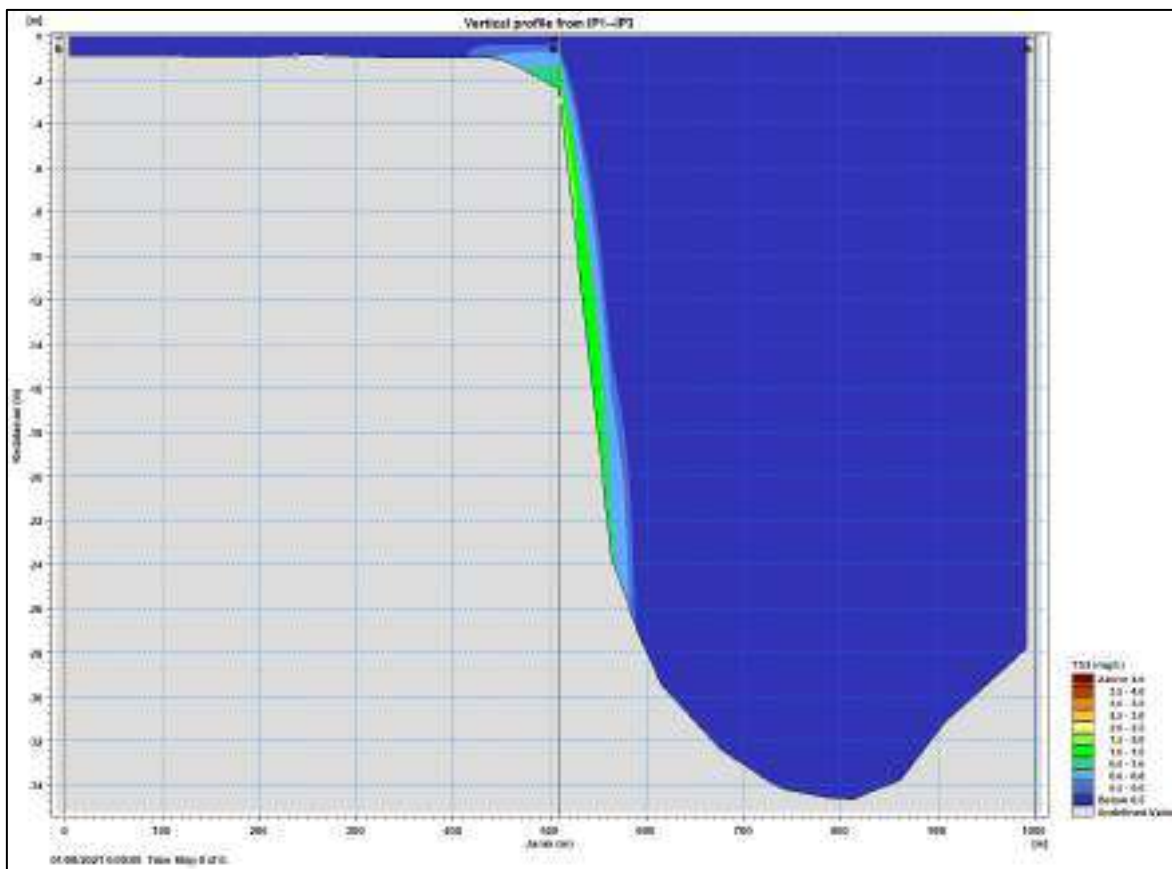
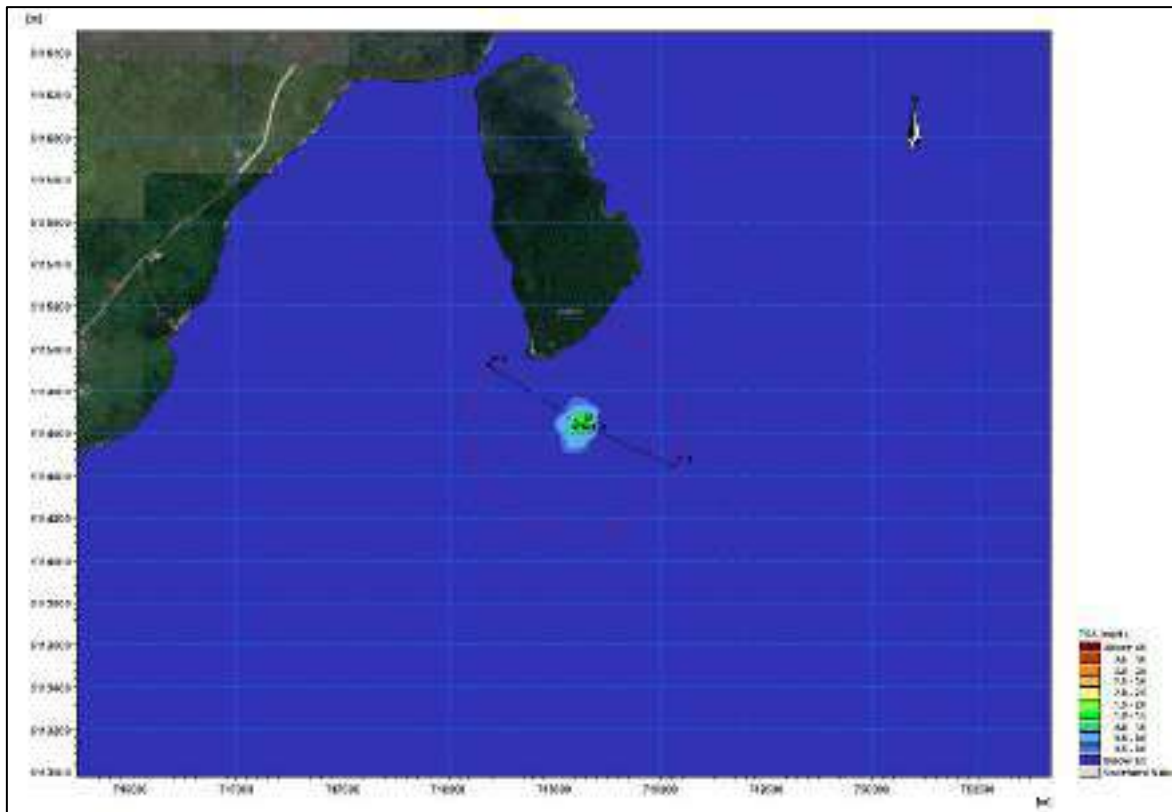
Peningkatan konsentrasi maksimum Cd terlarut (**Gambar 64** hingga **Gambar 67**) setelah masuk dan tercampur oleh air laut terlihat masih tinggi, dimana pada musim barat dan peralihan I mencapai 0.0025 mg/L, sedangkan pada musim timur dan peralihan II mencapai 0.0018 mg/L. Baku mutu Cd terlarut berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 VIII untuk biota adalah 0.001 mg/L, sehingga peningkatan konsentrasi model hasil model tersebut lebih besar dari ketentuan baku mutu. Meskipun melebihi baku mutu, jarak sebarannya relatif pendek dari titik buangan. Pada musim barat sebaran Cd yang melebihi baku mutu mencapai 162 m ke timur laut dan 70 m ke barat daya, saat musim peralihan I menyebarkan ke timur laut mencapai 161 m dan ke barat daya hingga 141 m. Sebaran ke arah timur laut dan barat daya pada musim timur masing-masing mencapai 113 m dan 77 m, sedangkan pada musim peralihan II mencapai 161 m dan 74 m.



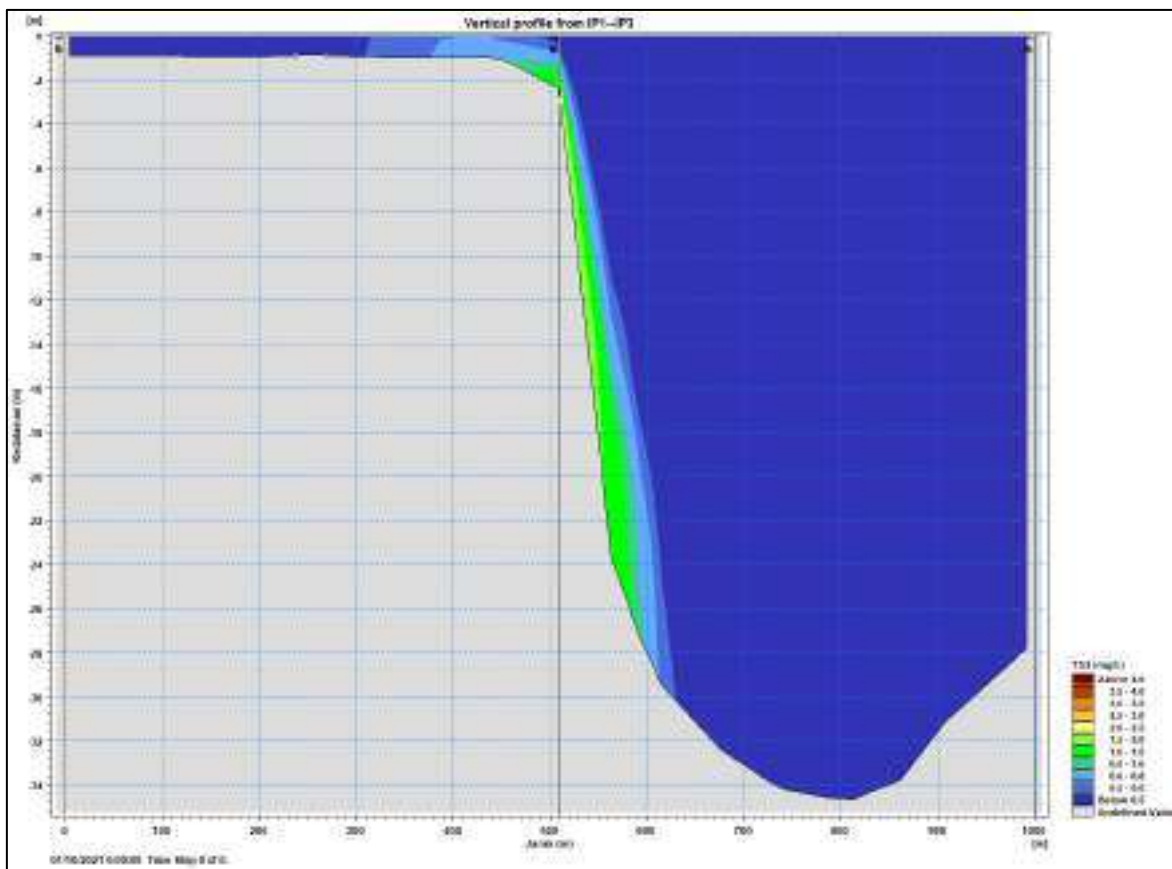
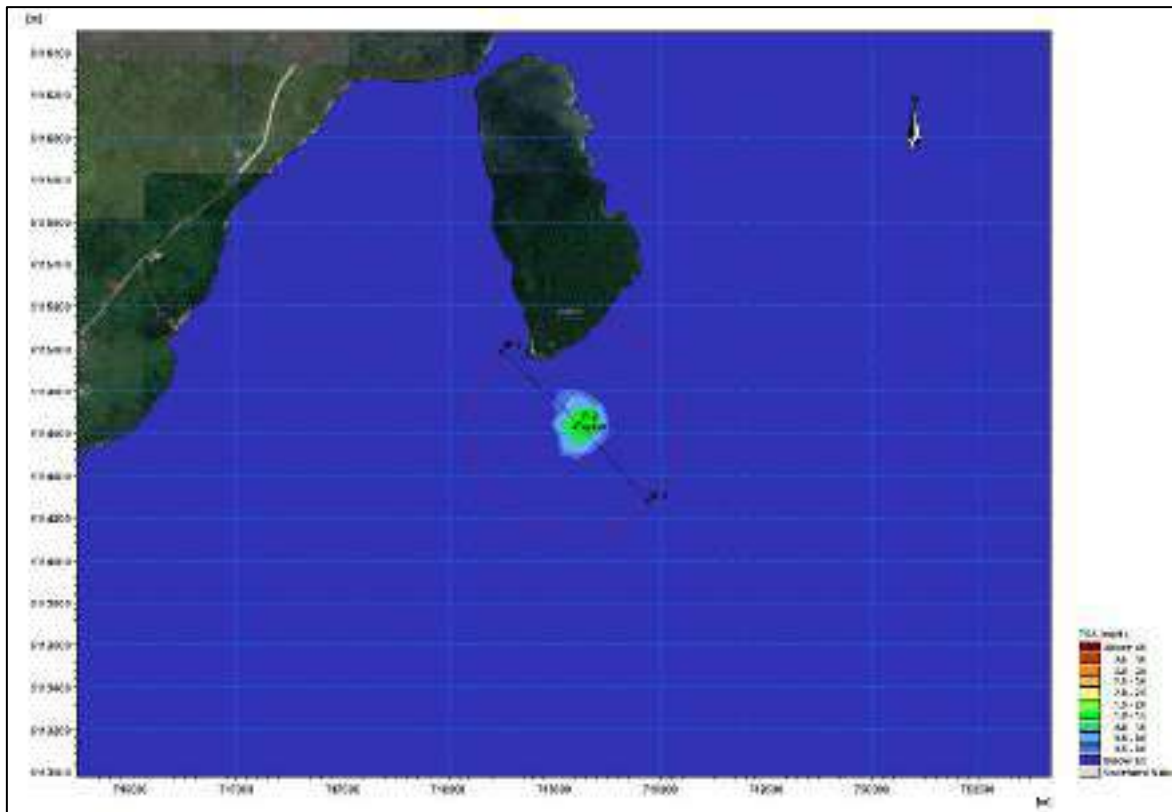
Gambar 52. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



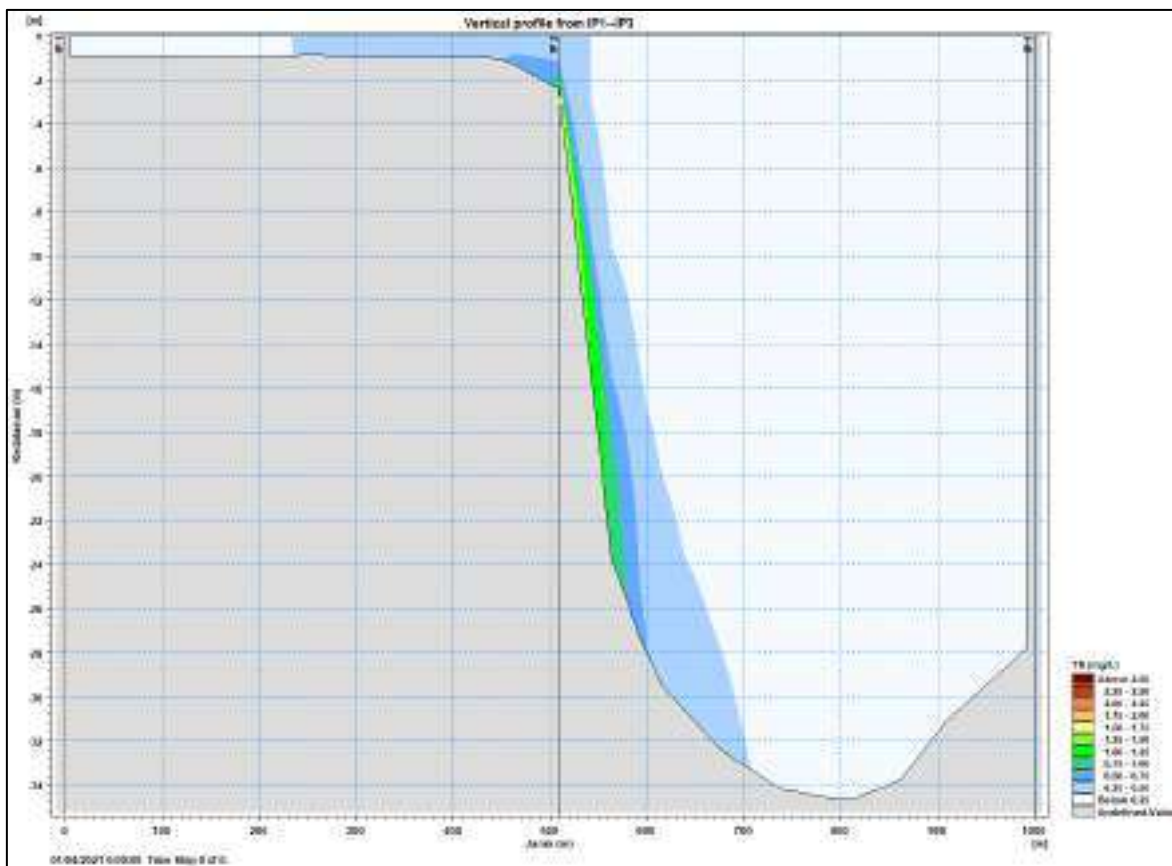
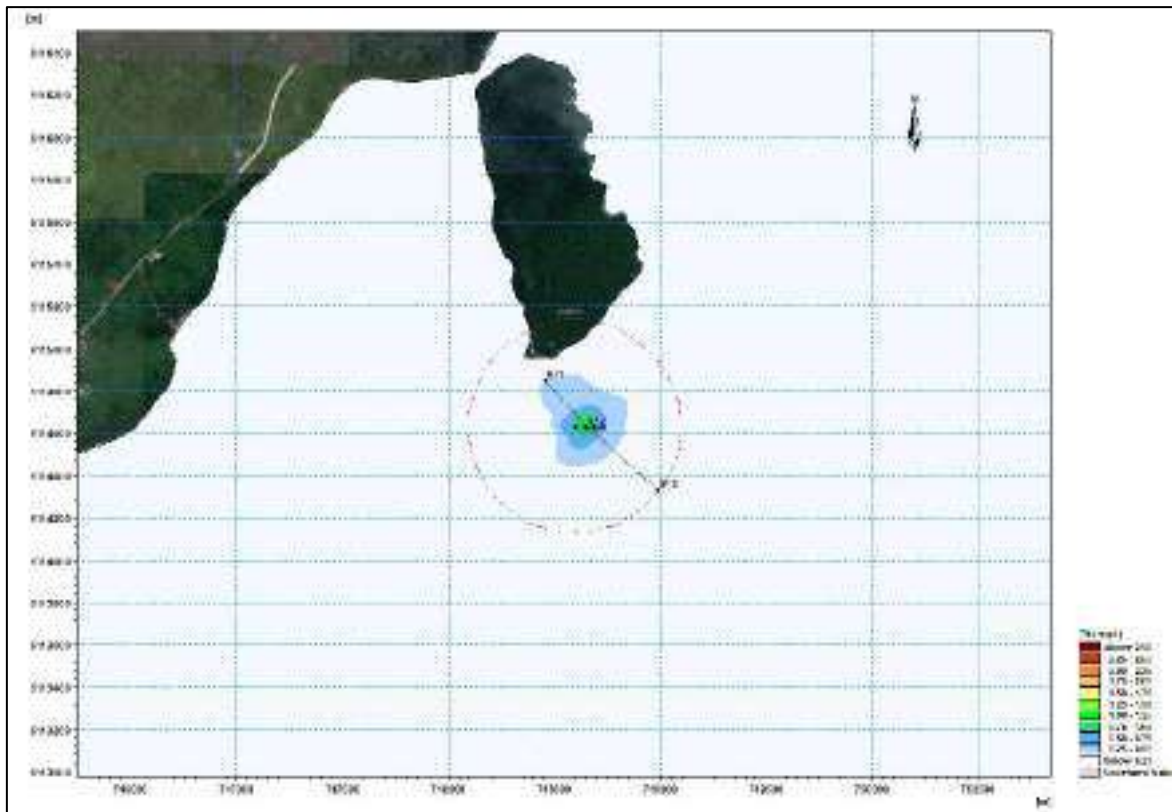
Gambar 53. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



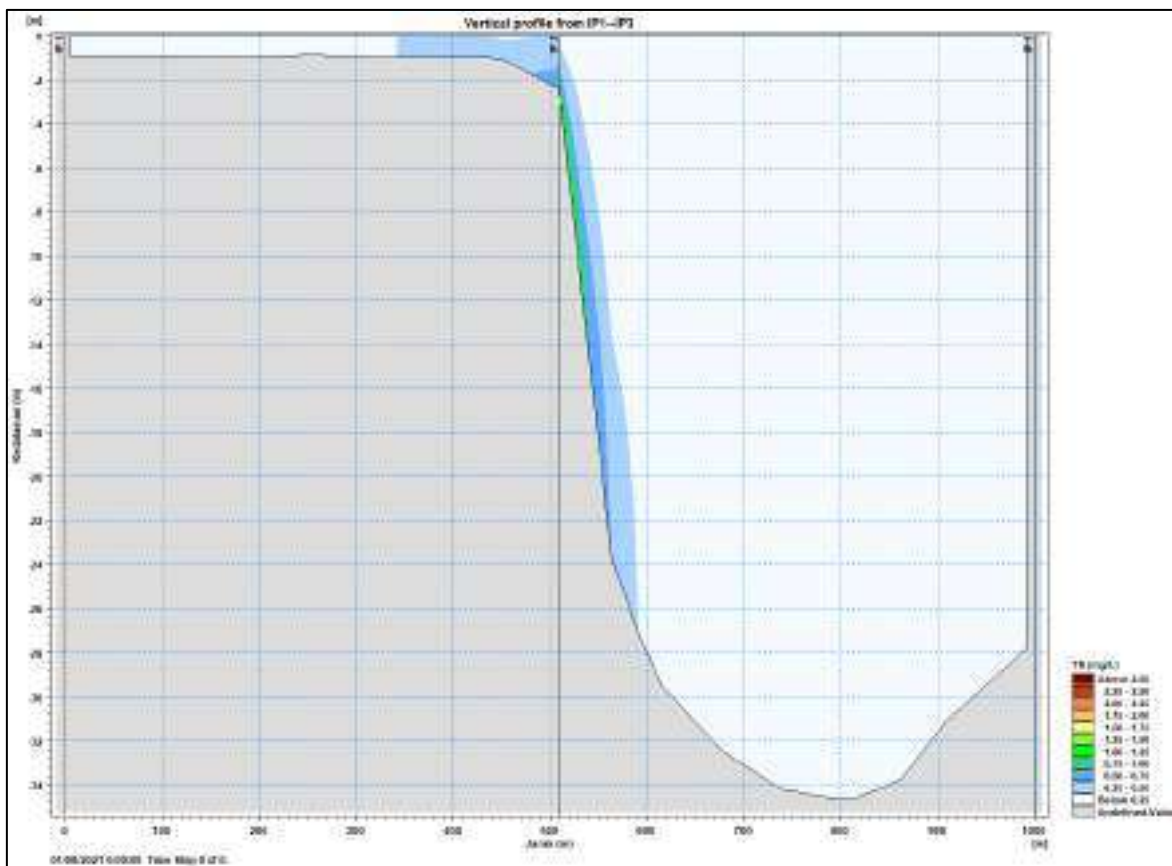
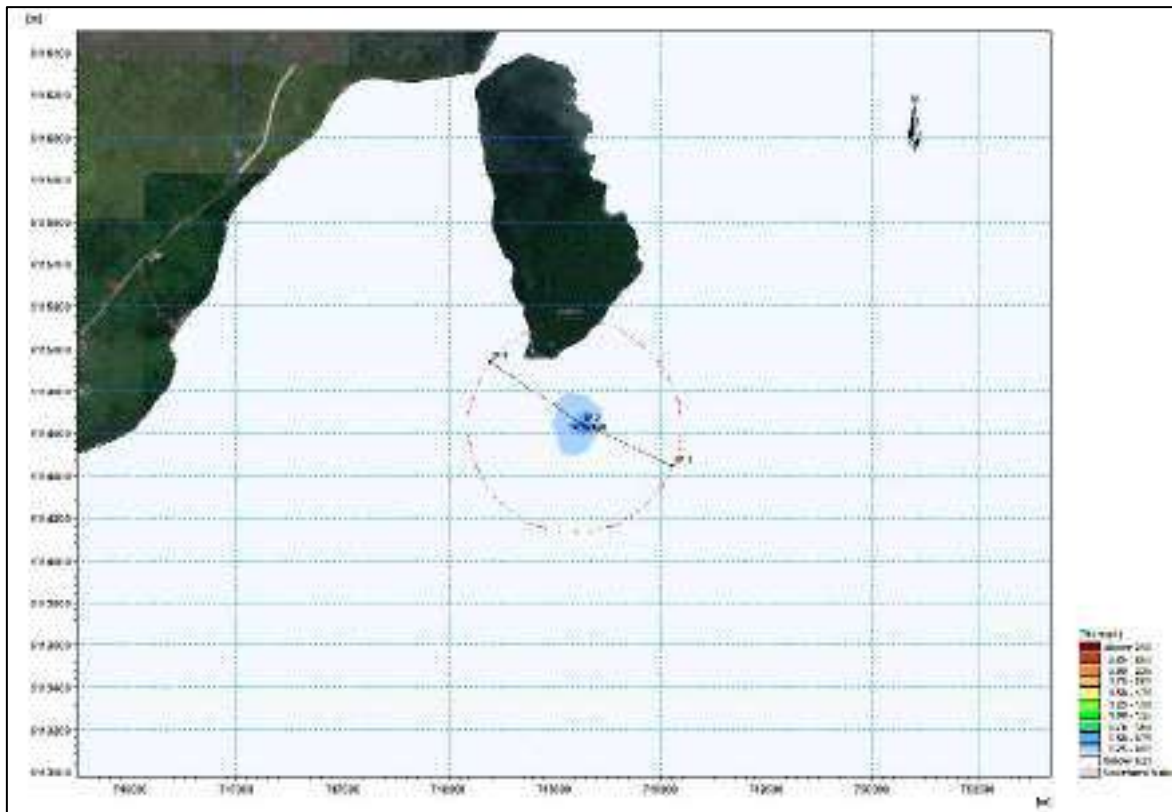
Gambar 54. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



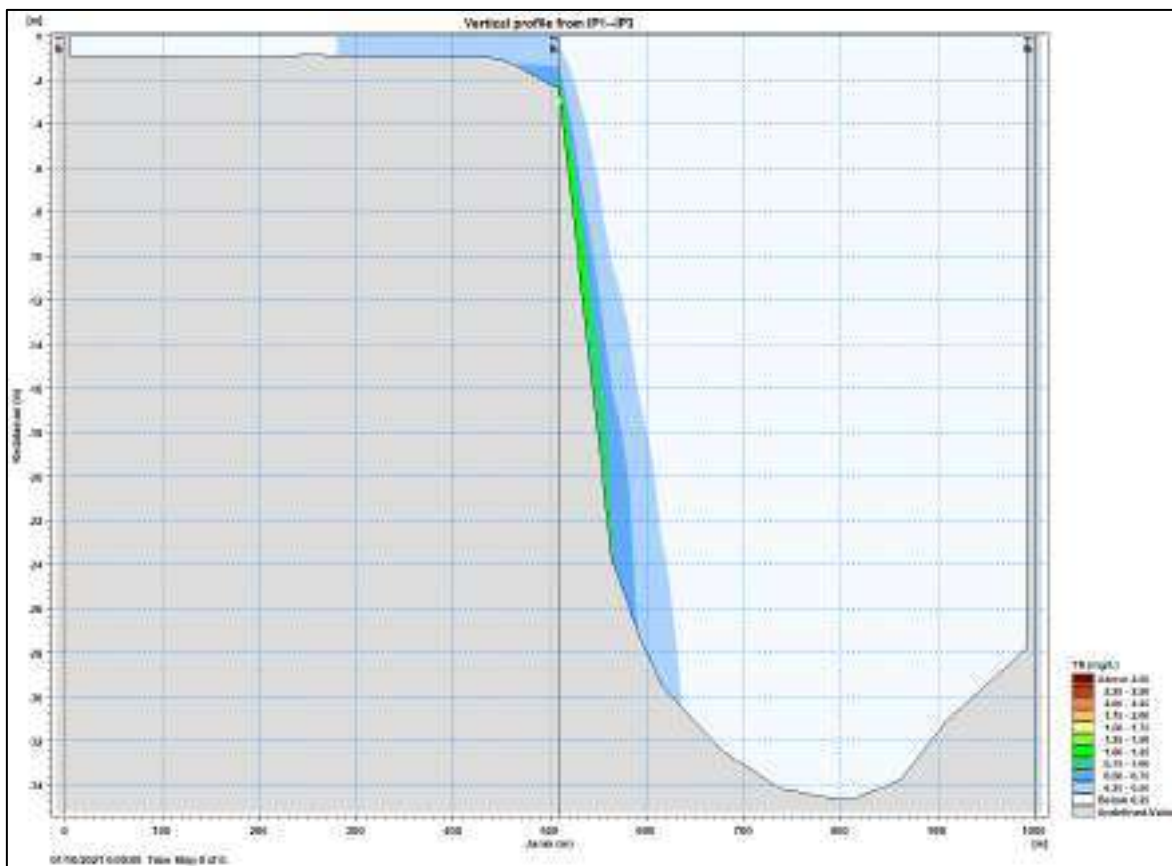
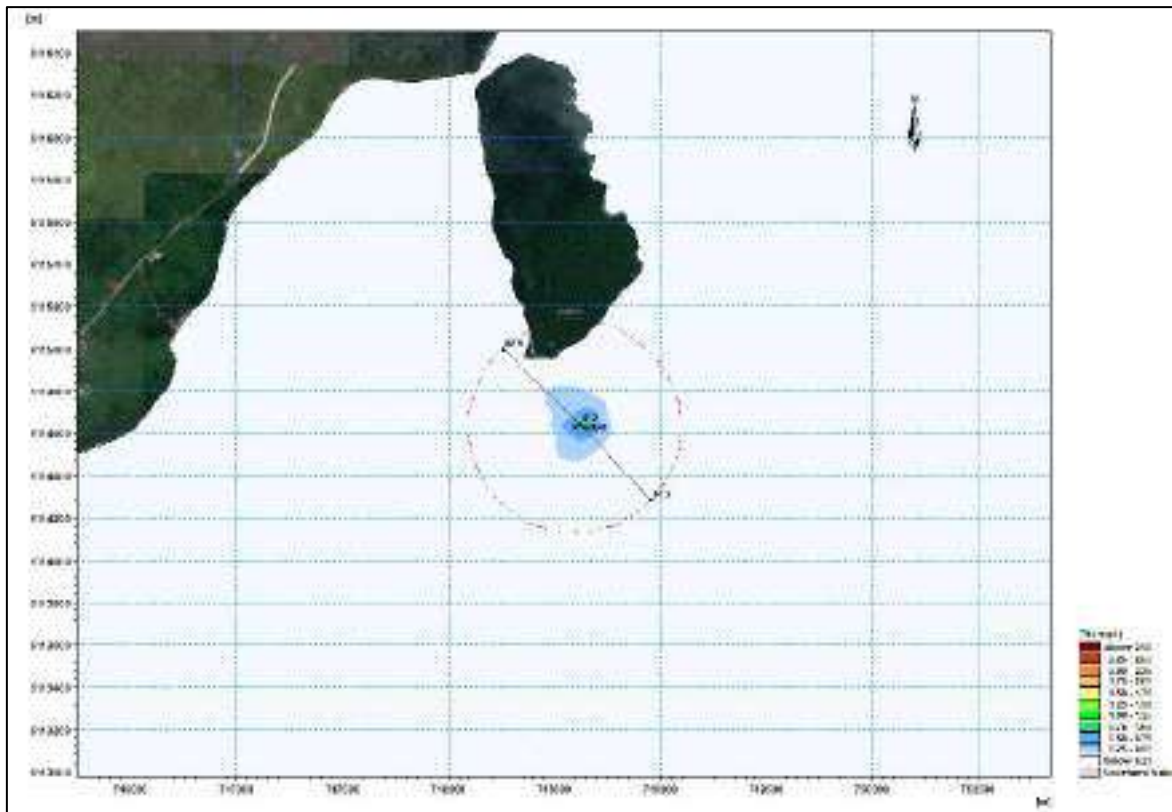
Gambar 55. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



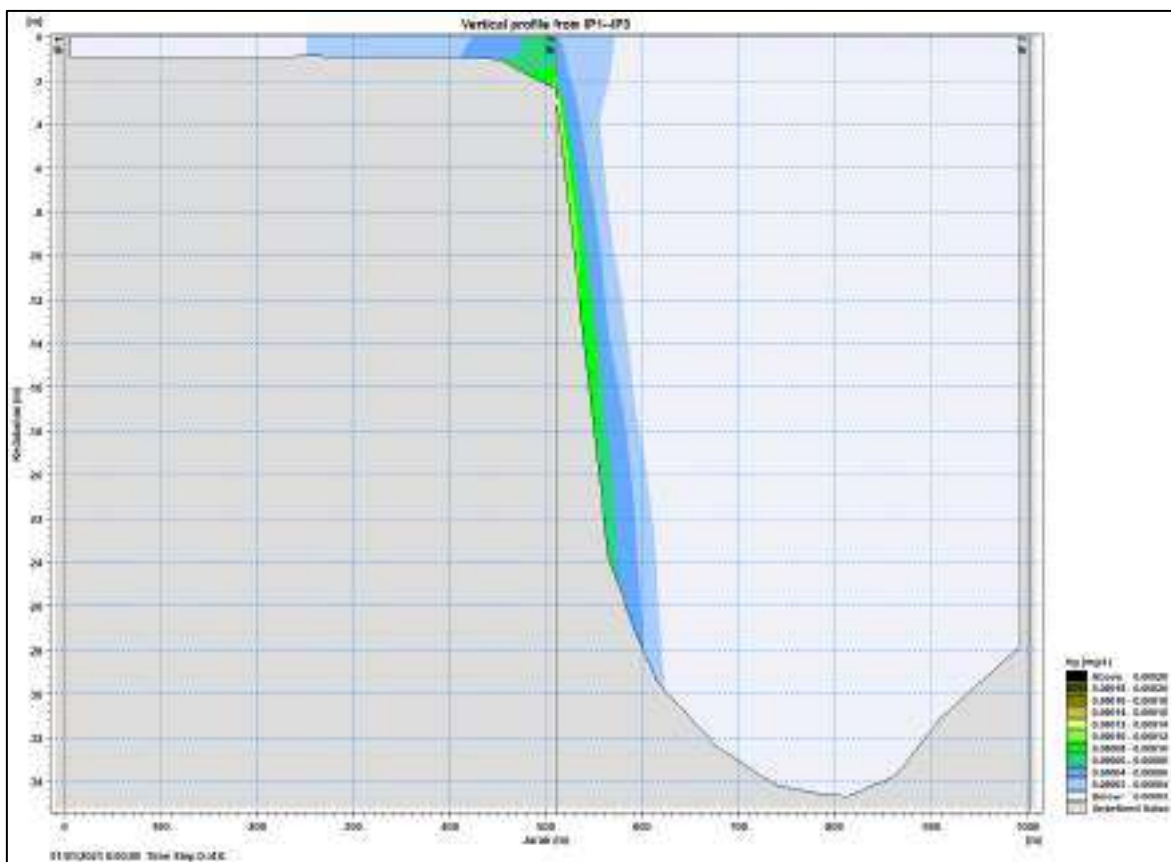
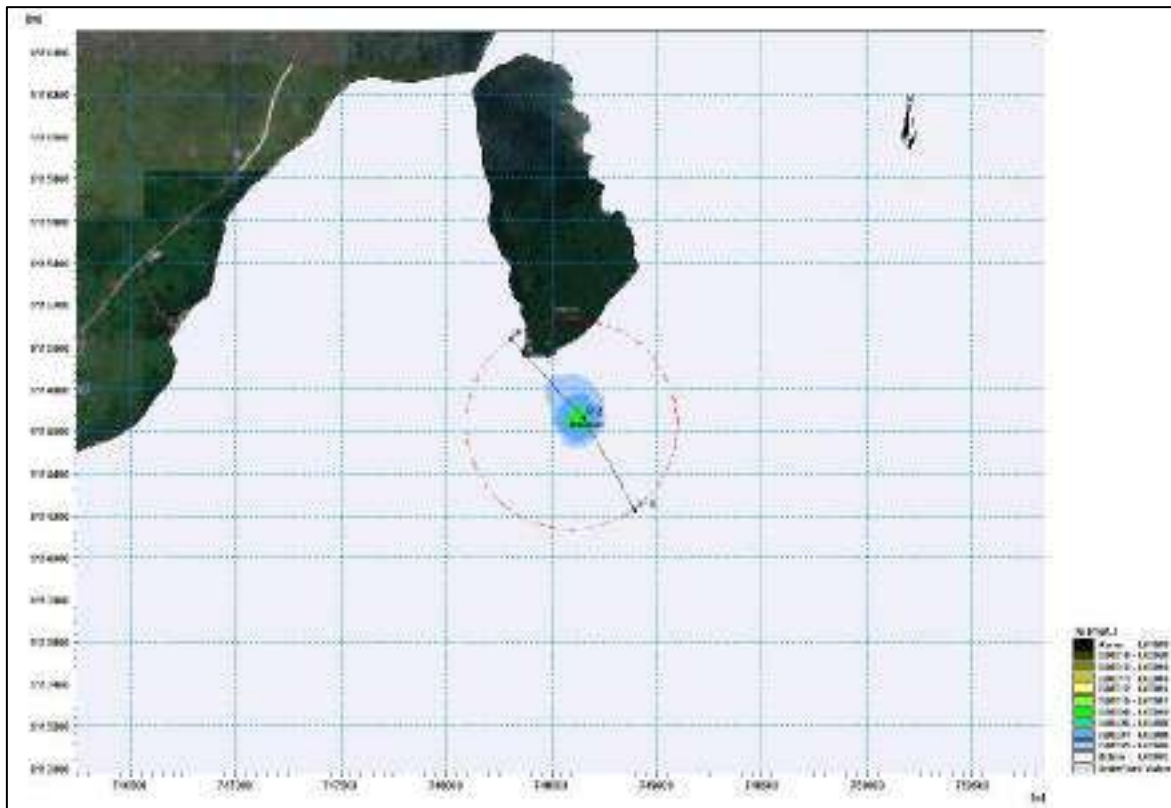
Gambar 57. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi musim skenario-1 kondisi peralihan I



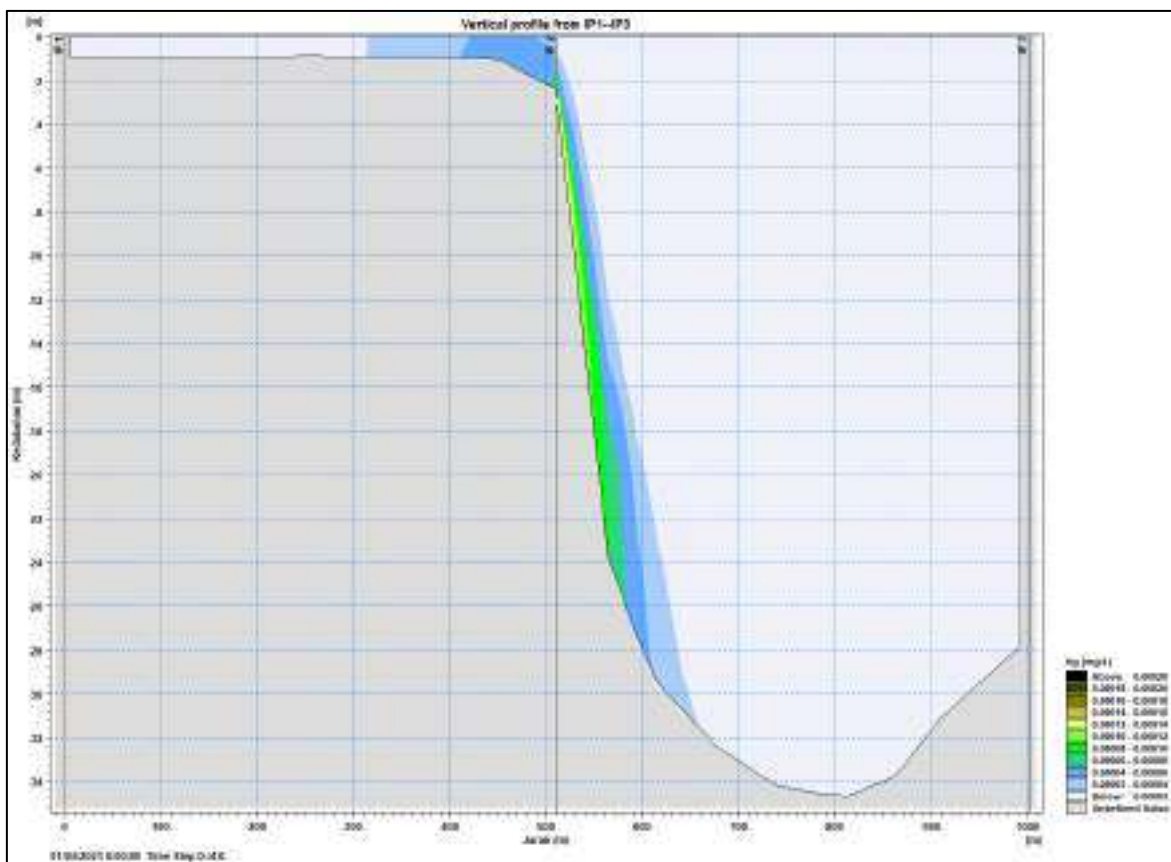
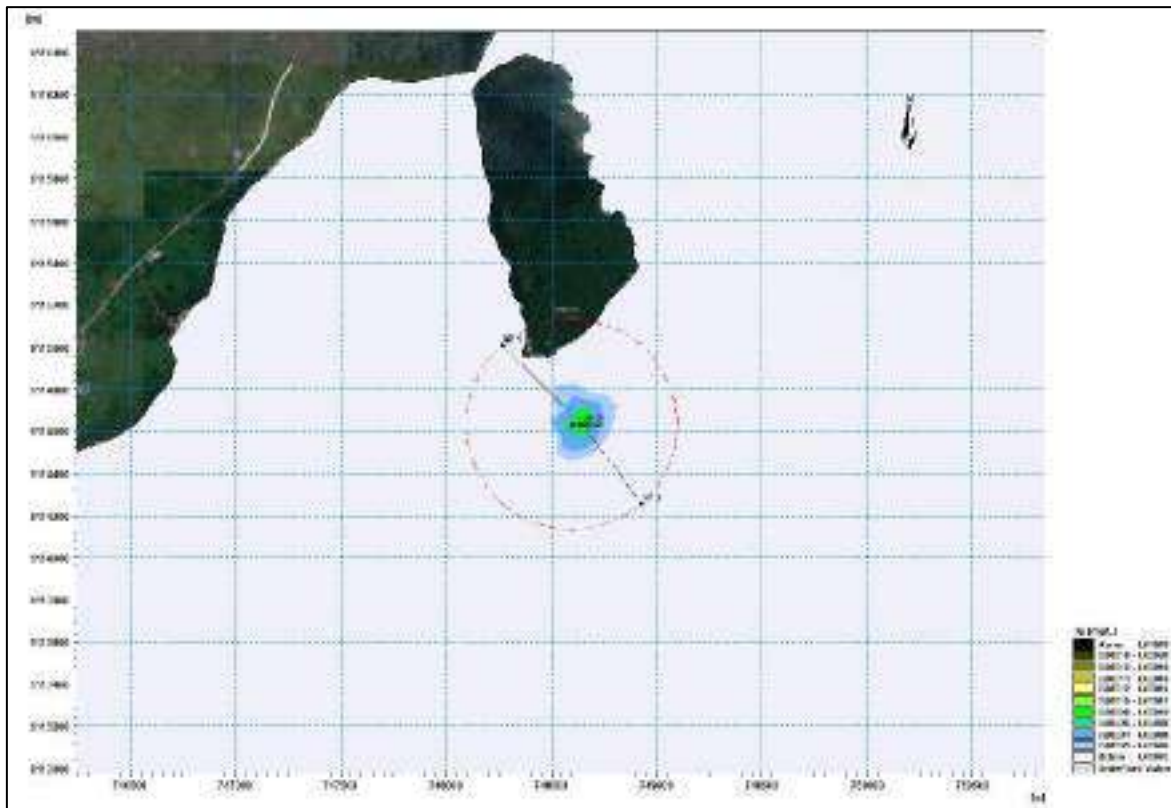
Gambar 58. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



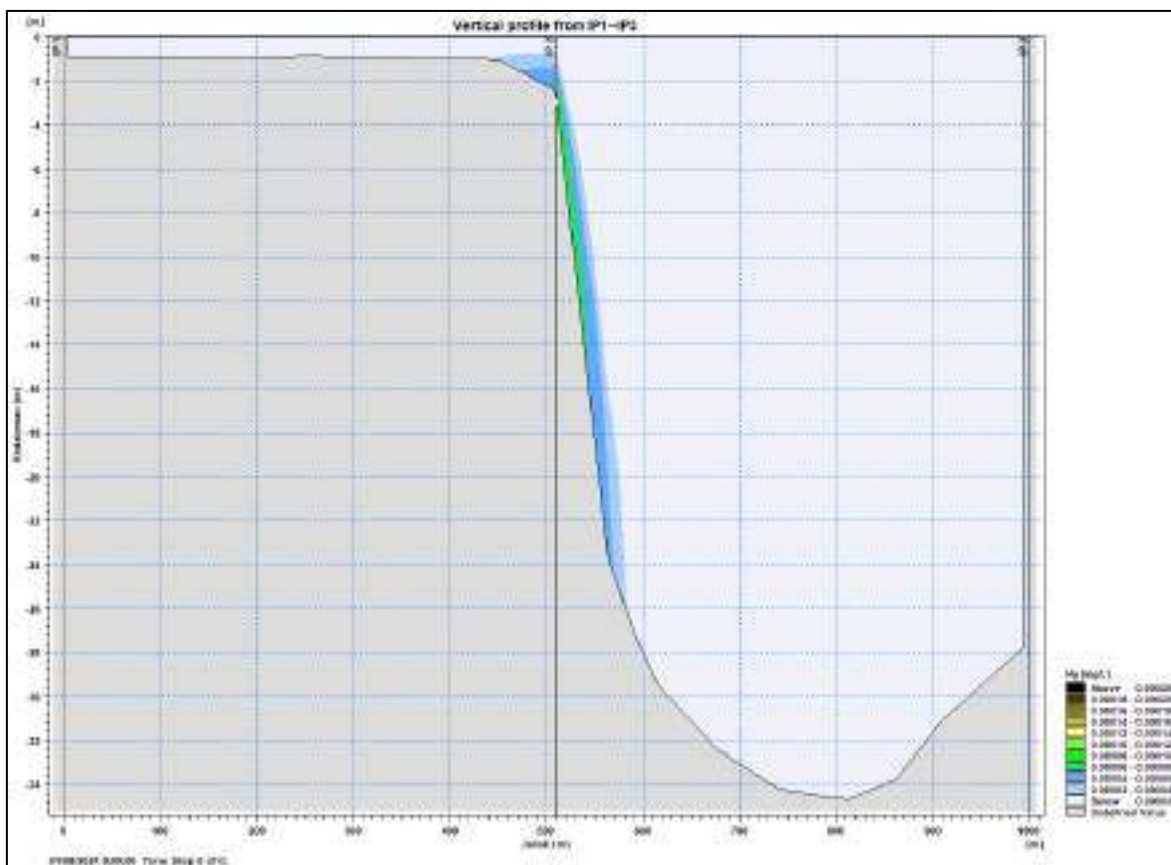
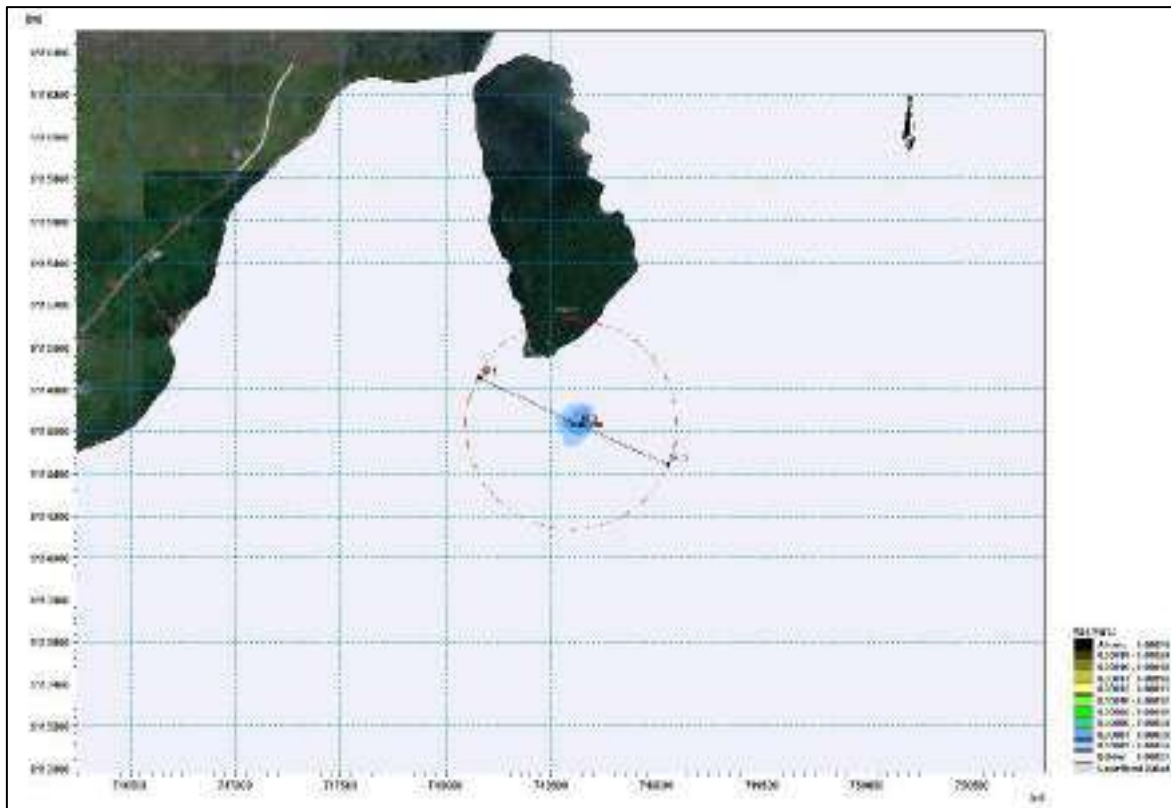
Gambar 59. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



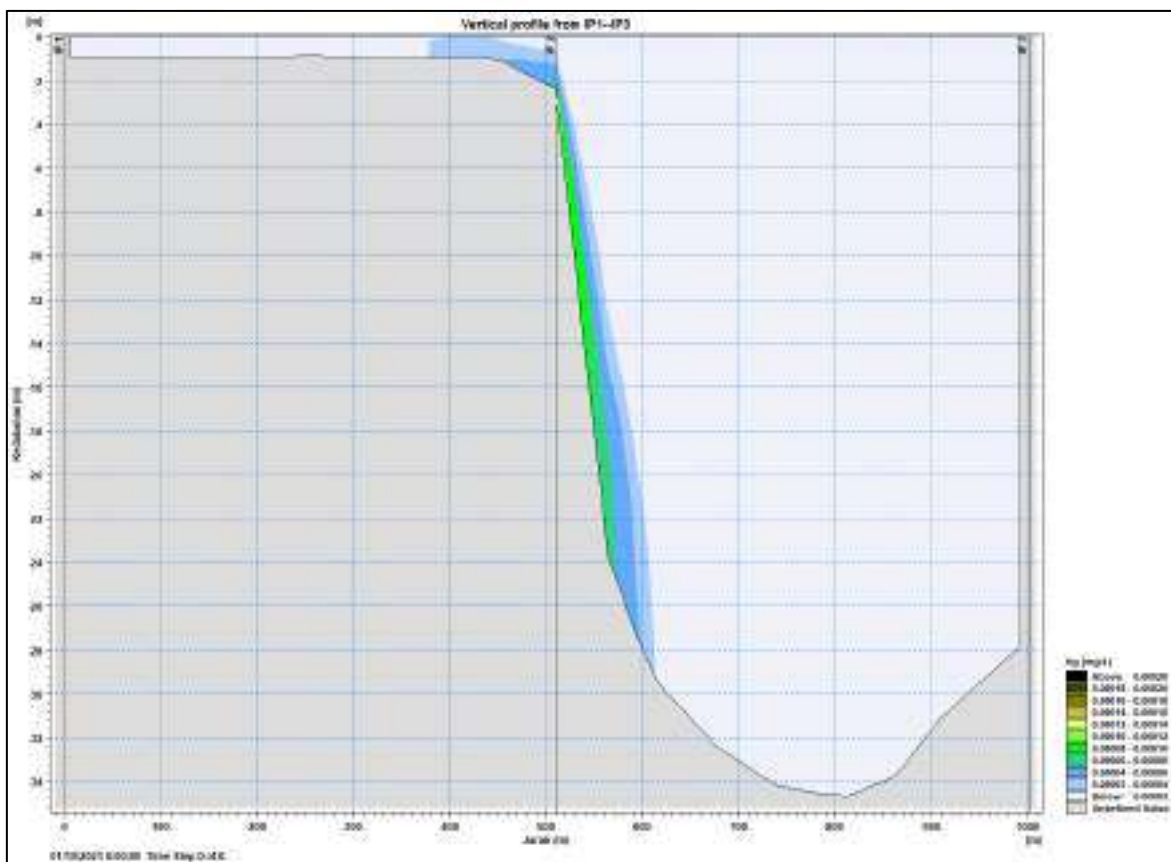
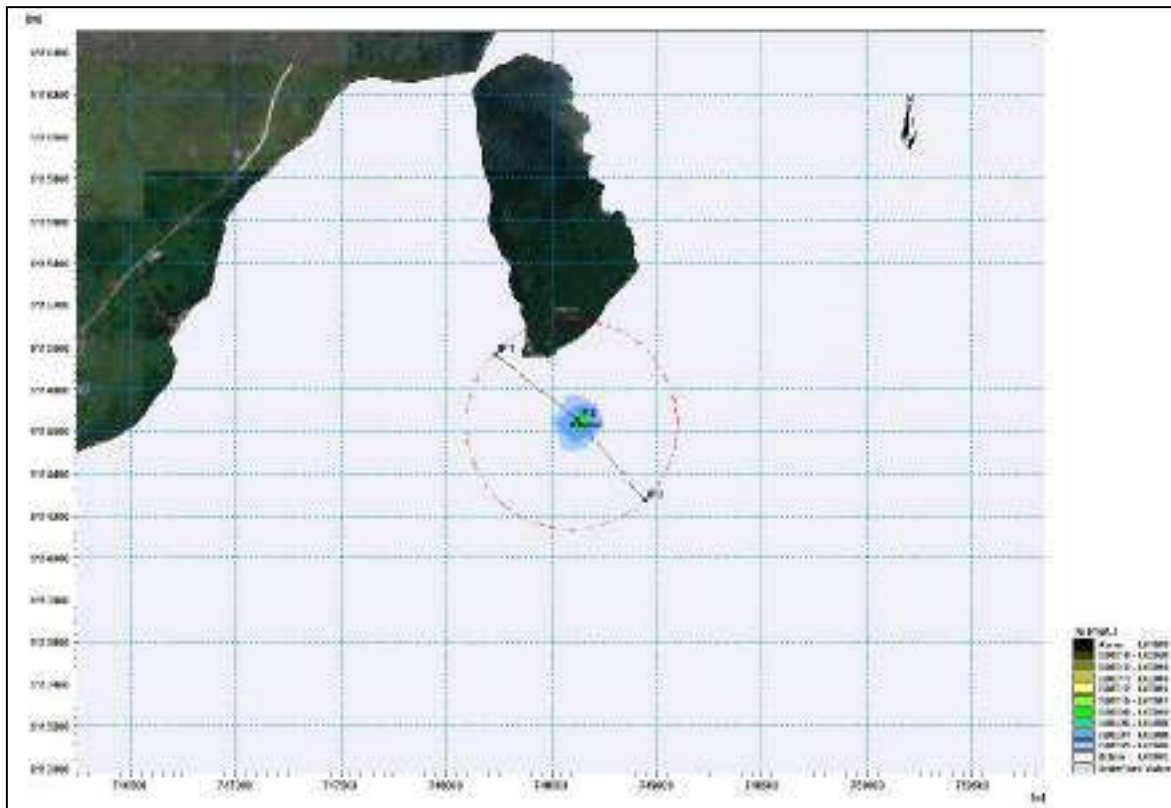
Gambar 60. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



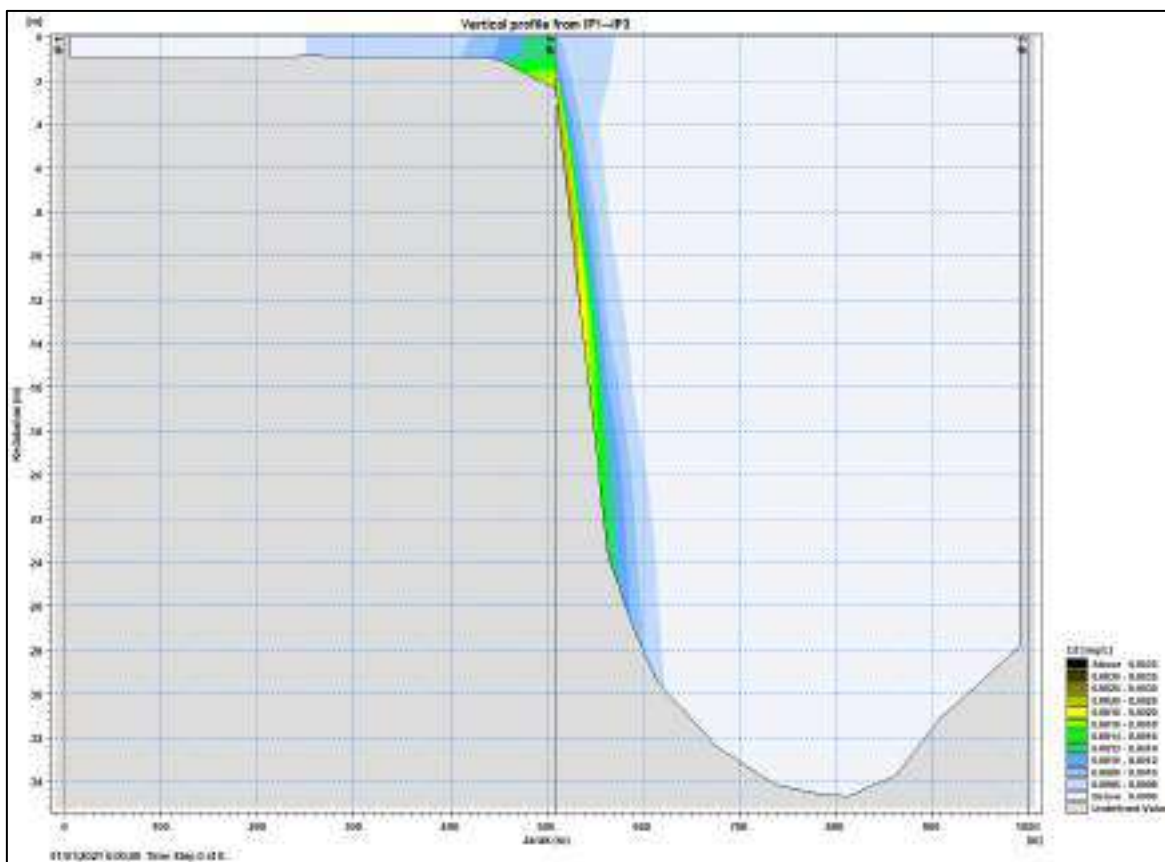
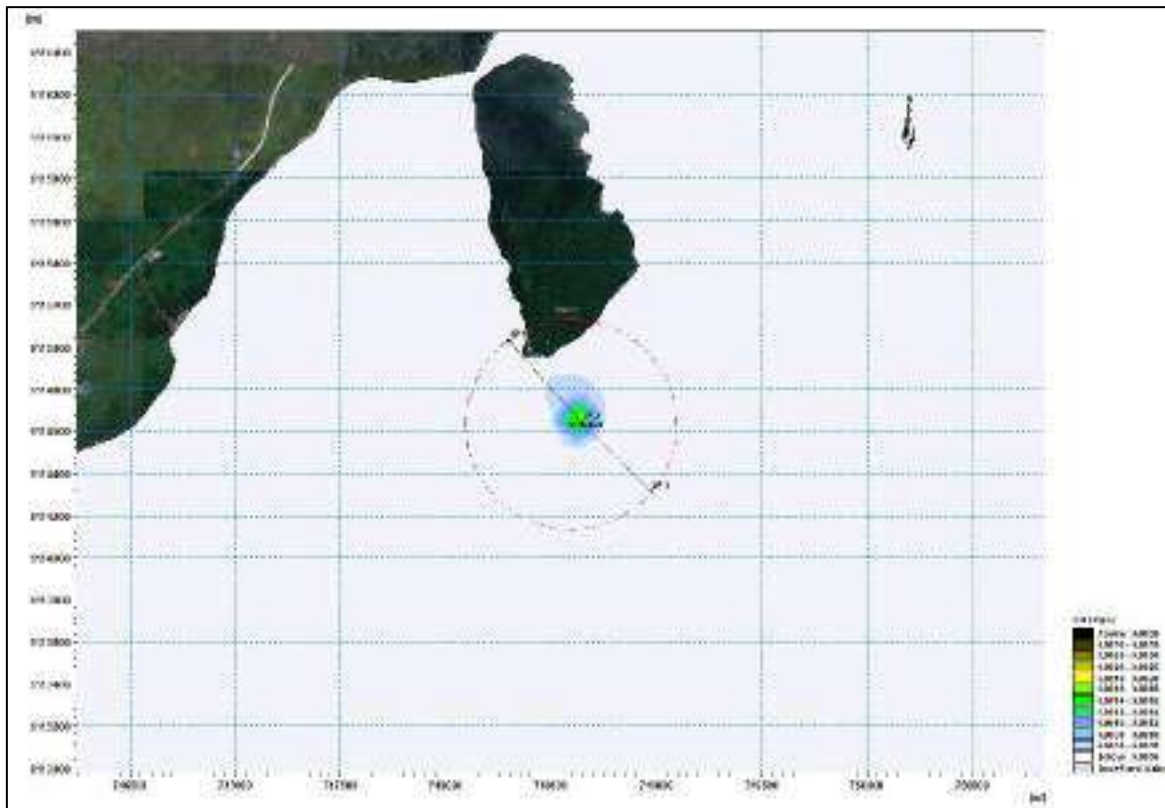
Gambar 61. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



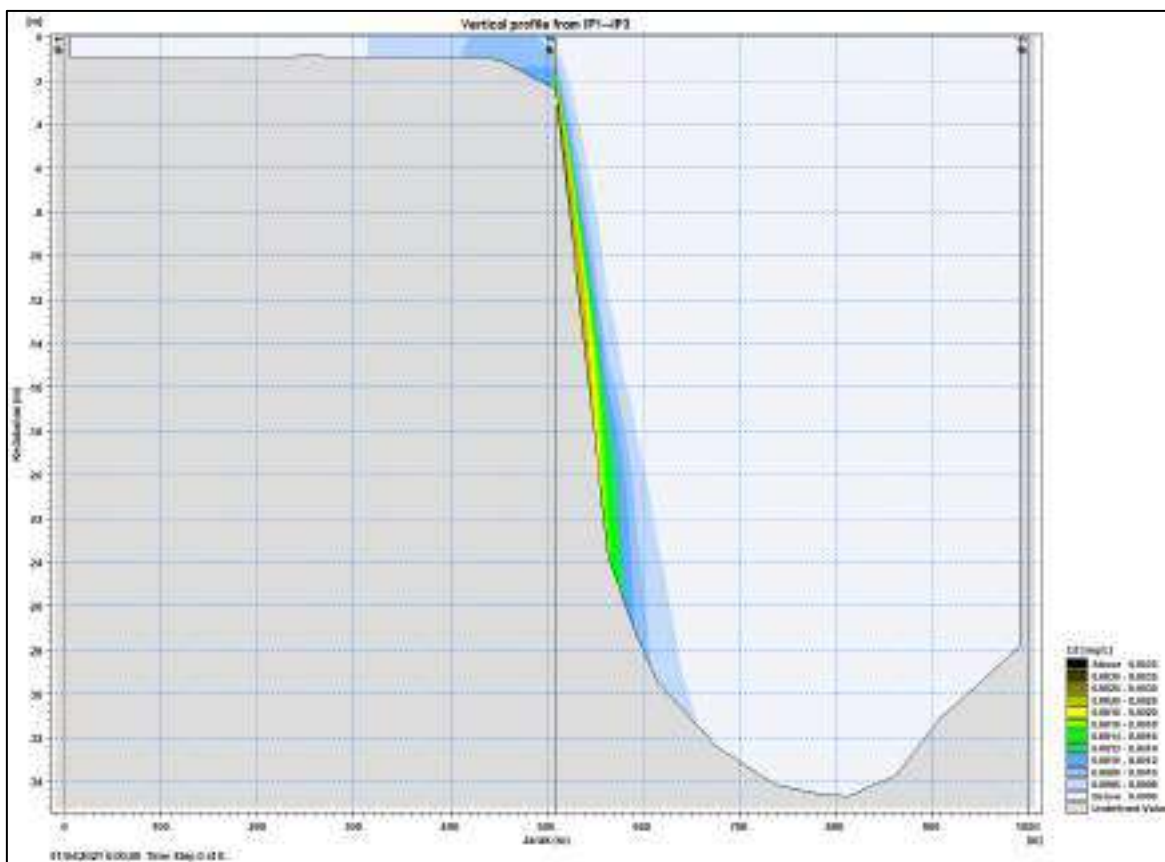
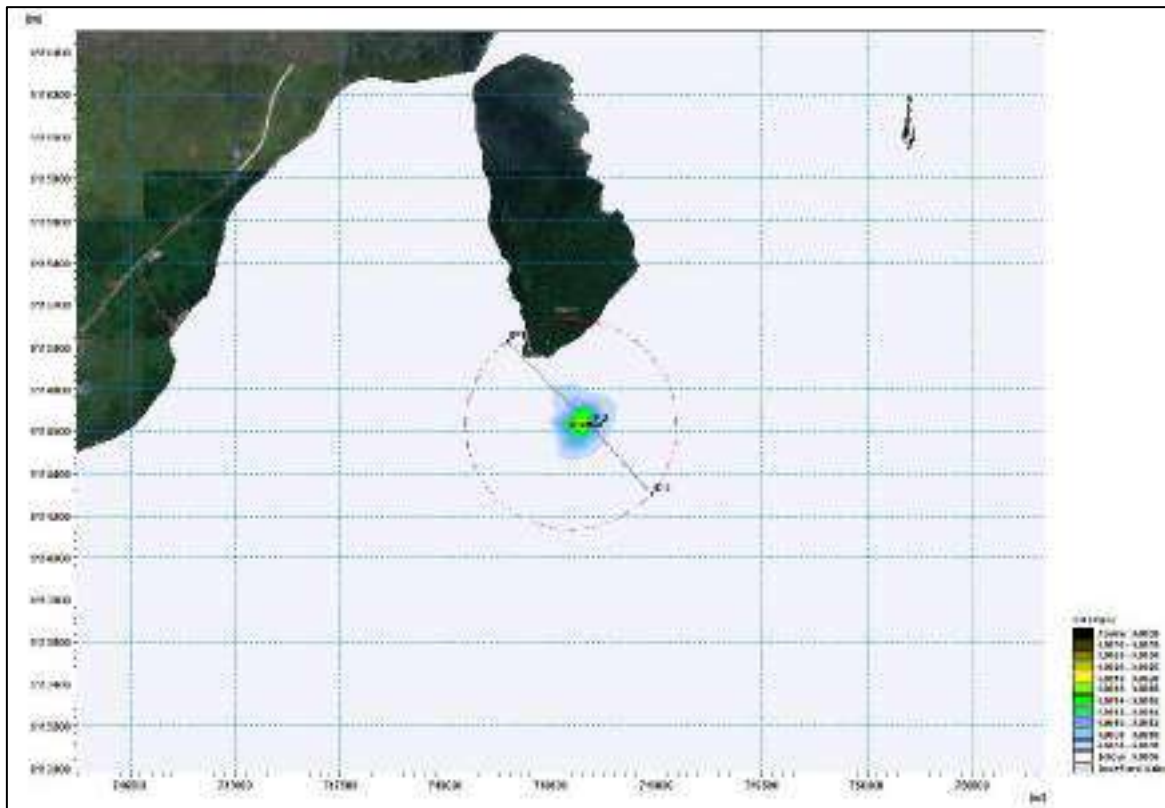
Gambar 62. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



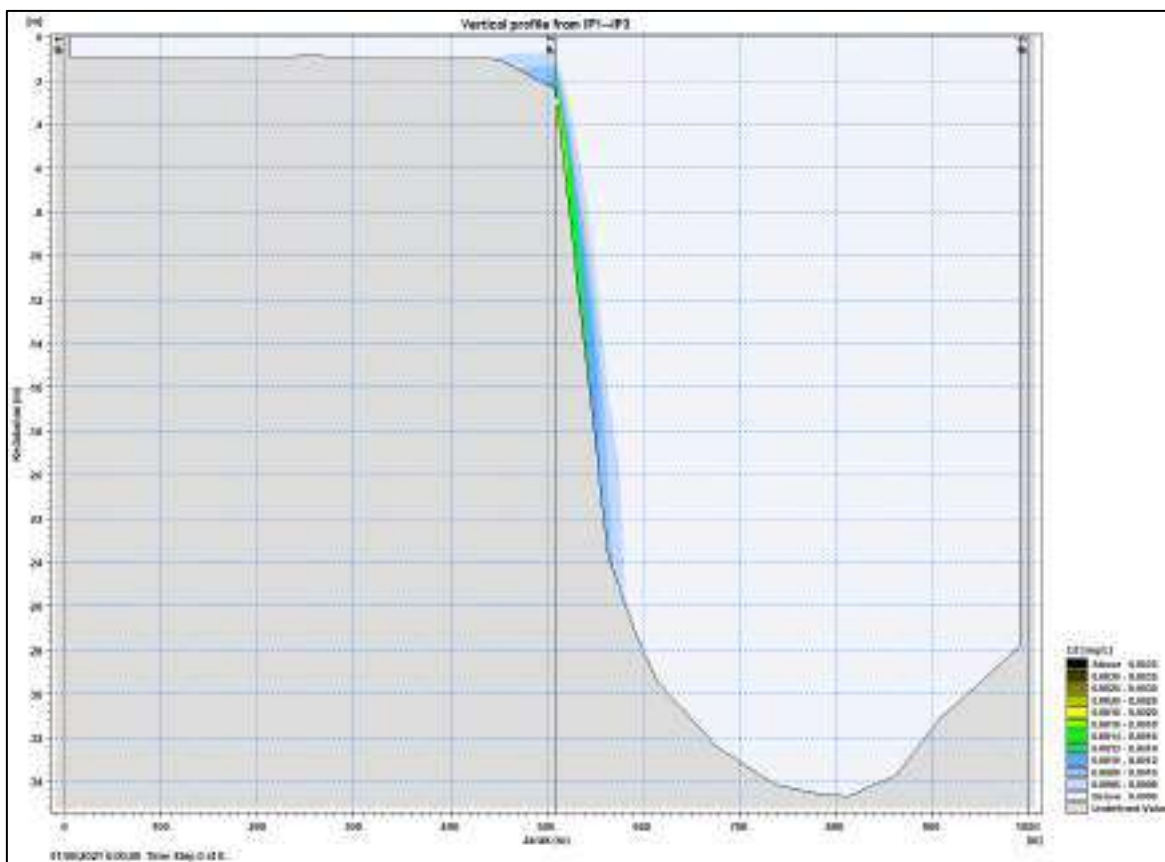
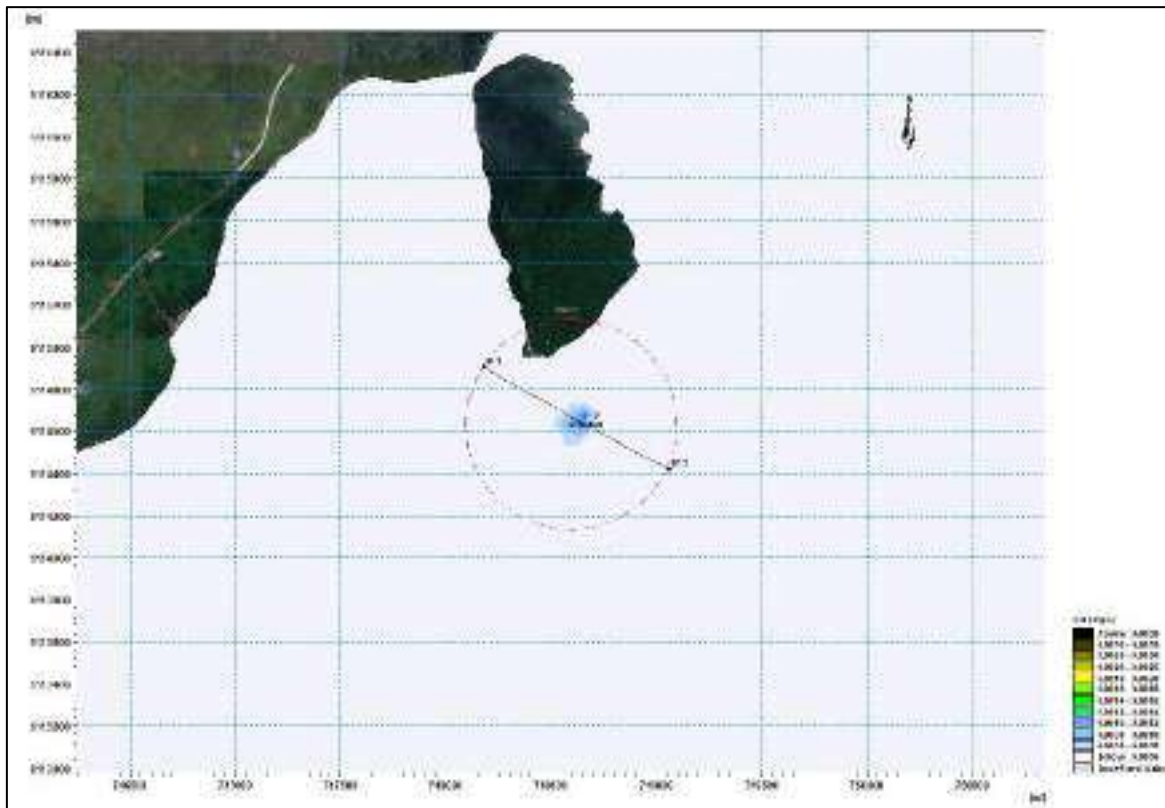
Gambar 63. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



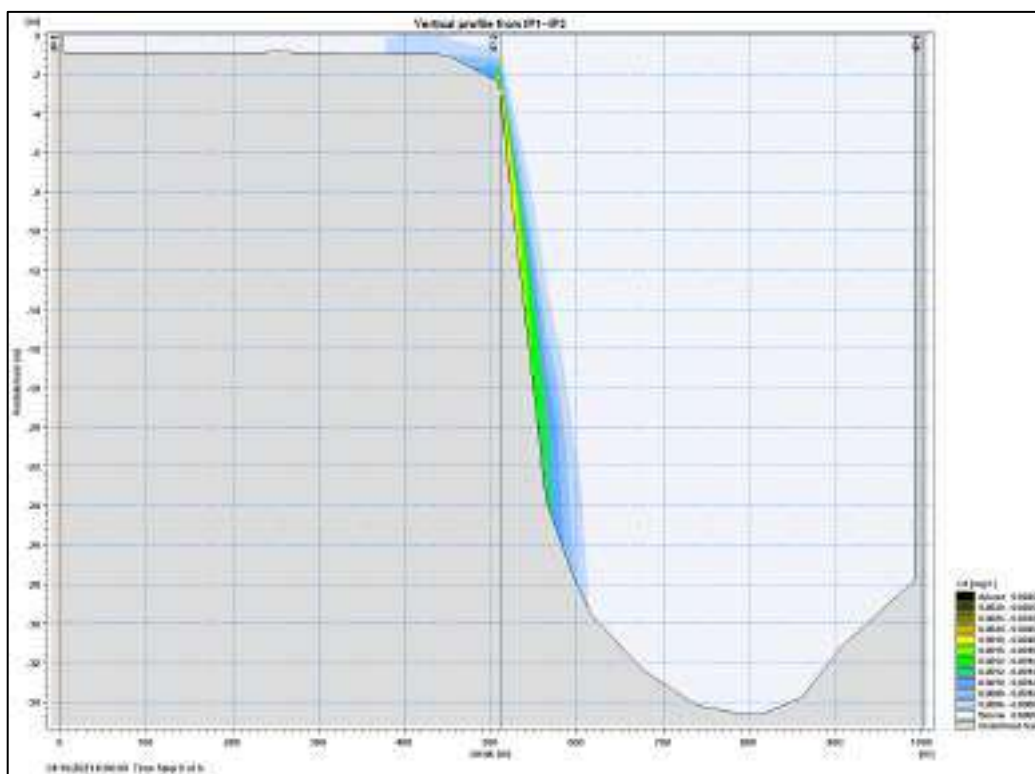
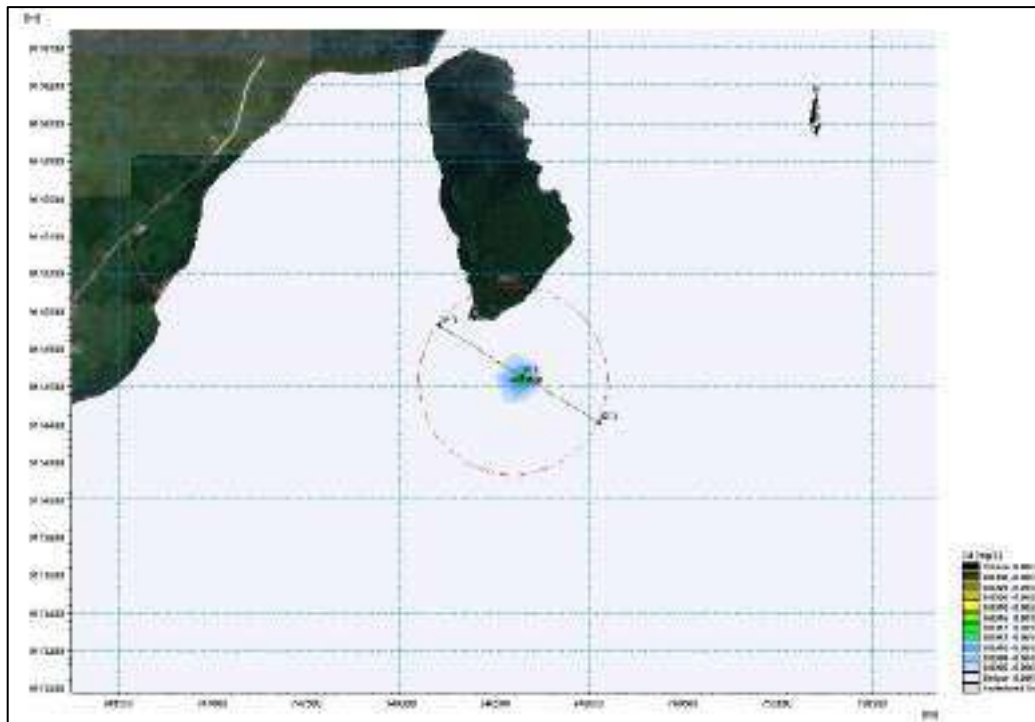
Gambar 64. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



Gambar 65. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



Gambar 66. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



Gambar 67. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II

Peningkatan konsentrasi amonnia (**Gambar 68** hingga **Gambar 71**) setelah masuk ke perairan tergolong rendah, dimana pada musim barat dan peralihan I peningkatan konsentrasi maksimum hanya mencapai 0.28 mg/L, sedangkan pada musim timur dan peralihan II 0.2 mg/L. Ketetapan baku mutu ammonia berdasarkan PP No 22 Tahun 2021

Lampiran VIII untuk biota adalah 0.3 mg/l, sehingga limbah amonnia setelah masuk dan terencerkan oleh perairan laut tergolong rendah. Hasil analisis sampel air laut dari 18 titik stasiun diperoleh nilai ammonia yang tergolong kecil, yakni baik musim kemarau maupun musim hujan tidak lebih dari 0.002 mg/L. Dengan demikian penjumlahan konsentrasi ammonia hasil model dan hasil analisis sampel air laut tidak akan diperoleh nilai ≥ 0.3 mg/L.

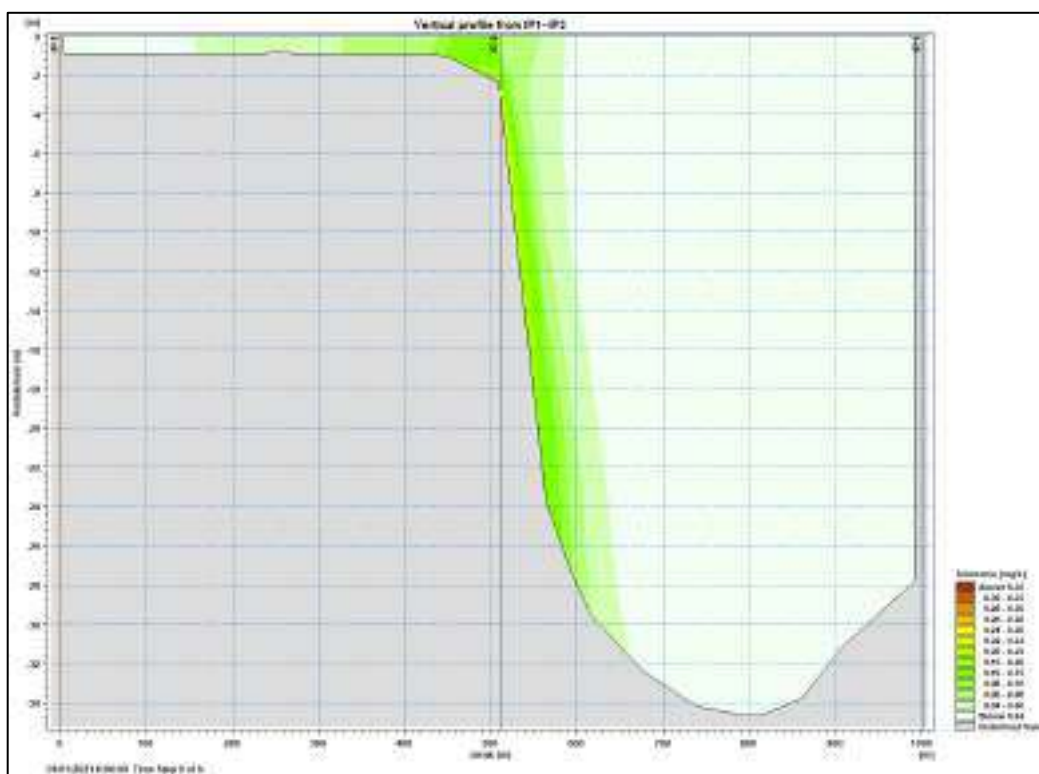
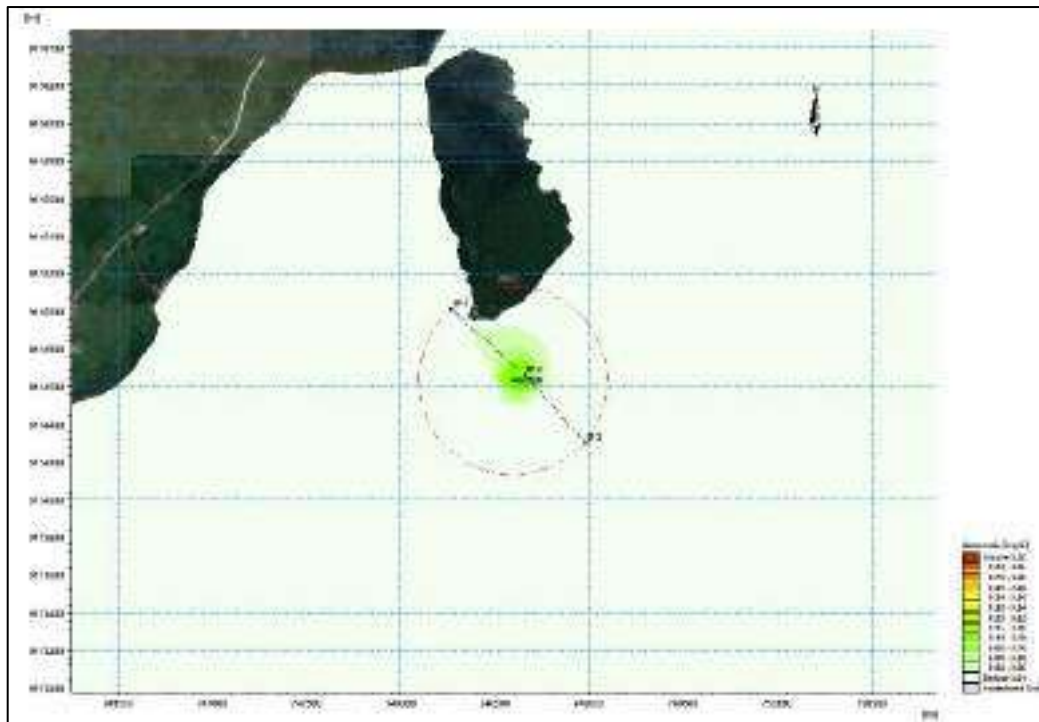
Berdasarkan hasil pemodelan parameter Total coliform (**Gambar 72** hingga **Gambar 75**), konsentrasi maksimum hasil model keseluruhan musim terlihat rendah, yakni pada musim barat dan peralihan I mencapai 80 MPN/100 mL, sedangkan pada musim timur dan peralihan II 60 MPN/100 mL. Jika dibandingkan dengan ketetapan baku mutu yang diperbolehkan maka konsentrasi hasil model keseluruhan musim tersebut terlihat rendah. Ketetapan baku mutu Total Coliform berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota laut adalah sebesar 1000 MPN/100 mL, sedangkan konsentrasi maksimum hasil model keempat musim tersebut jauh lebih kecil dari baku mutu.

Peningkatan konsentrasi salinitas akibat buangan limbah *brine water* tergolong rendah, dimana peningkatan konsentrasi tertinggi hasil model musim barat (**Gambar 76**) dan peralihan I (**Gambar 77**) hanya mencapai 0.25 psu, sedangkan hasil model musim timur (**Gambar 78**) dan peralihan II (**Gambar 79**) sebesar 0.2 psu. Mengacu pada baku mutu PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII bahwa salinitas diperbolehkan terjadi perubahan sampai dengan <5% dari salinitas rata-rata musiman. Berdasarkan data kualitas air 18 titik sekitar lokasi OLNG rata-rata salinitas permukaan pada musim kemarau sebesar 34.4 psu, sedangkan pada musim hujan 33.7 psu. Perubahan 5% dari salinitas rata-rata kedua musim tersebut adalah $5\% \times 34.4 \text{ psu} = 1.72 \text{ psu}$ dan adalah $5\% \times 33.7 \text{ psu} = 1.68 \text{ psu}$. Dengan demikian peningkatan salinitas akibat buangan limbah *brine water* masih tergolong rendah atau di bawah 5% dari salinitas rata-rata perairan badan air penerima.

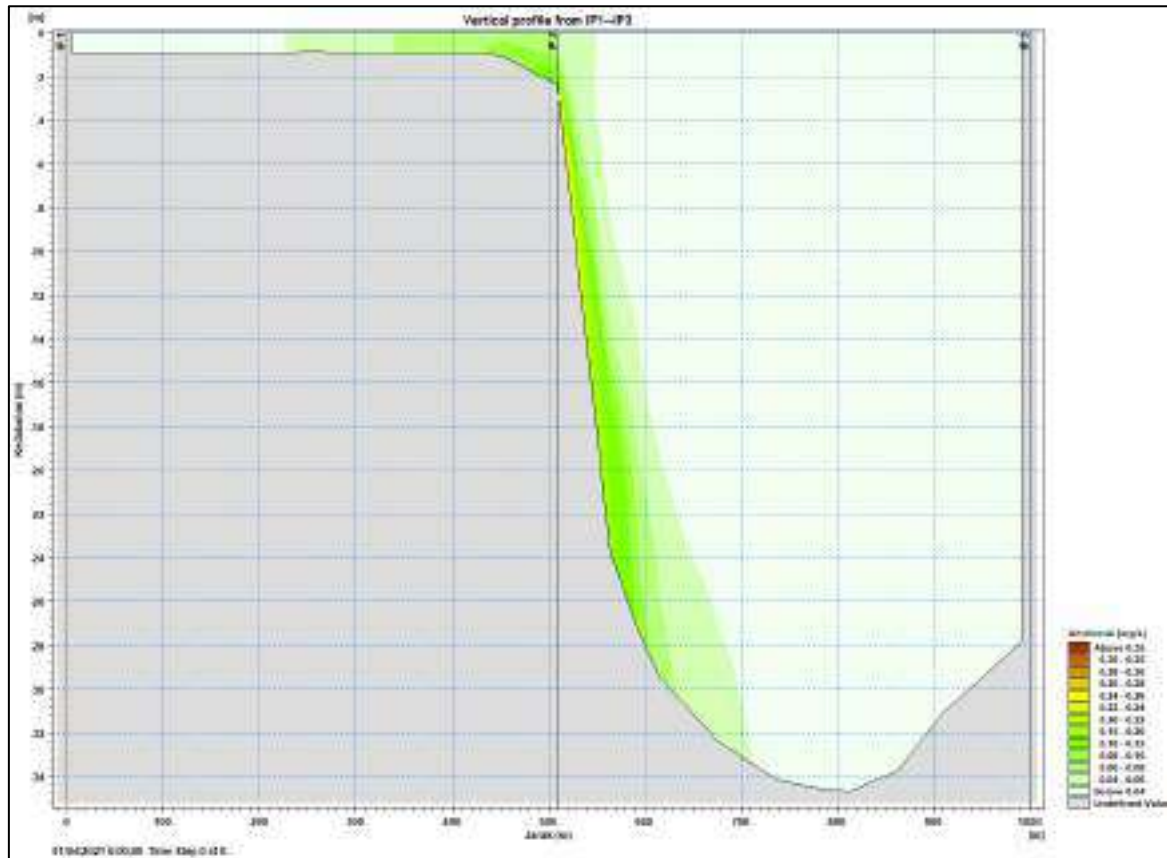
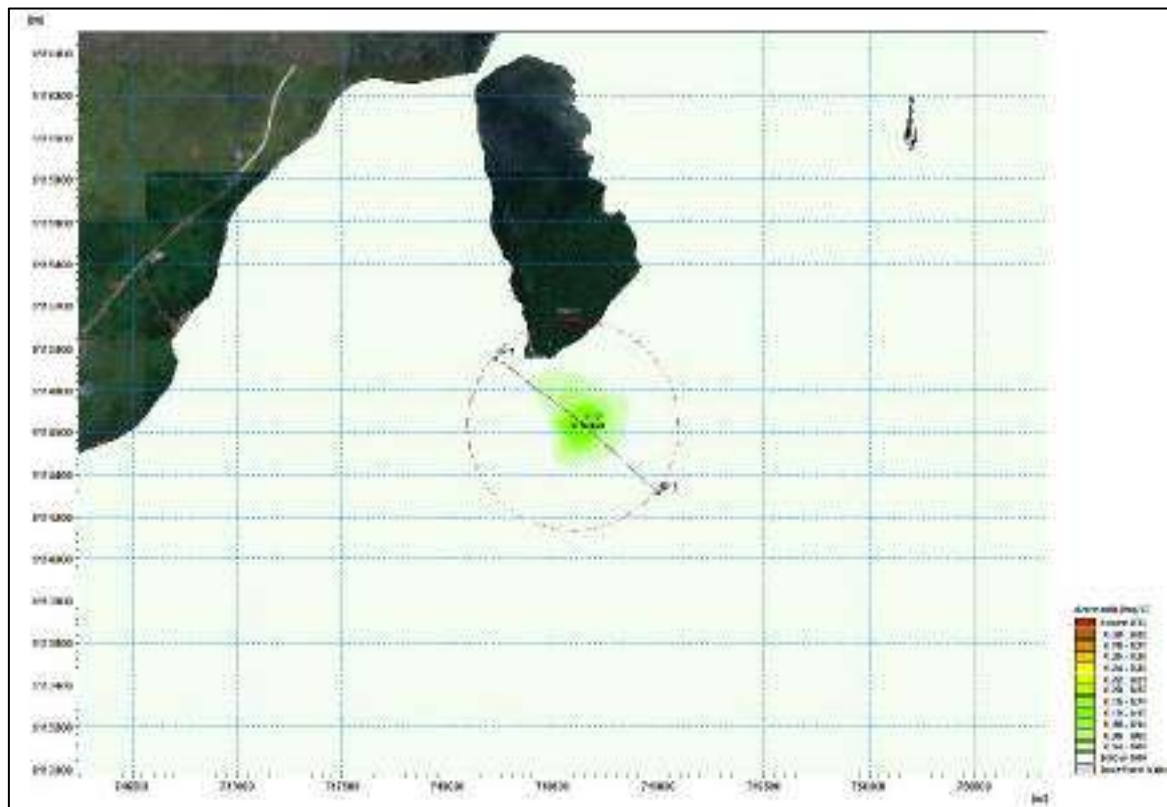
Karakter sebaran fosfat hasil model yang diperlihatkan dalam **Gambar 80** hingga **Gambar 83** tidak jauh berbeda dengan parameter lainnya, dimana sebarannya hanya di sekitar titik buangan. Peningkatan konsentrasi fosfat maksimum tergolong cukup tinggi, yakni pada musim barat dan peralihan I mencapai 0.05 mg/L, sedangkan musim timur dan peralihan II mencapai 0.04 mg/L. Baku mutu fosfat berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota tergolong ketat, yakni 0.015 mg/L, sehingga konsentrasi fosfat hasil model terlihat tinggi atau melampaui baku mutu. Jarak sebaran konsentrasi fosfat yang melebihi baku mutu pada musim barat mencapai 163 m ke timur laut dan 100 m ke barat daya, pada musim peralihan I ke arah timur laut dan barat daya masing-masing mencapai 170 m dan 136 m, saat musim timur mencapai 115 m dan 70 m, sedangkan pada musim peralihan II mencapai 163 m dan 101 m.

Pola sebaran nitrat yang ditampilkan dalam **Gambar 84** hingga **Gambar 87** sedikit berbeda dengan parameter lainnya, dimana pola sebarannya terlihat lebih jauh. Peningkatan konsentrasi setelah masuk ke perairan juga tergolong tinggi, dimana pada musim barat dan peralihan I mencapai 1.25 mg/L, sedangkan pada musim timur dan peralihan II mencapai 0.8 mg/L. Baku mutu nitrat berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota tergolong ketat, yakni 0.06 mg/L, sehingga hasil model pada keseluruhan musim tersebut tergolong tinggi atau melebihi baku mutu. Jarak sebaran nitrat

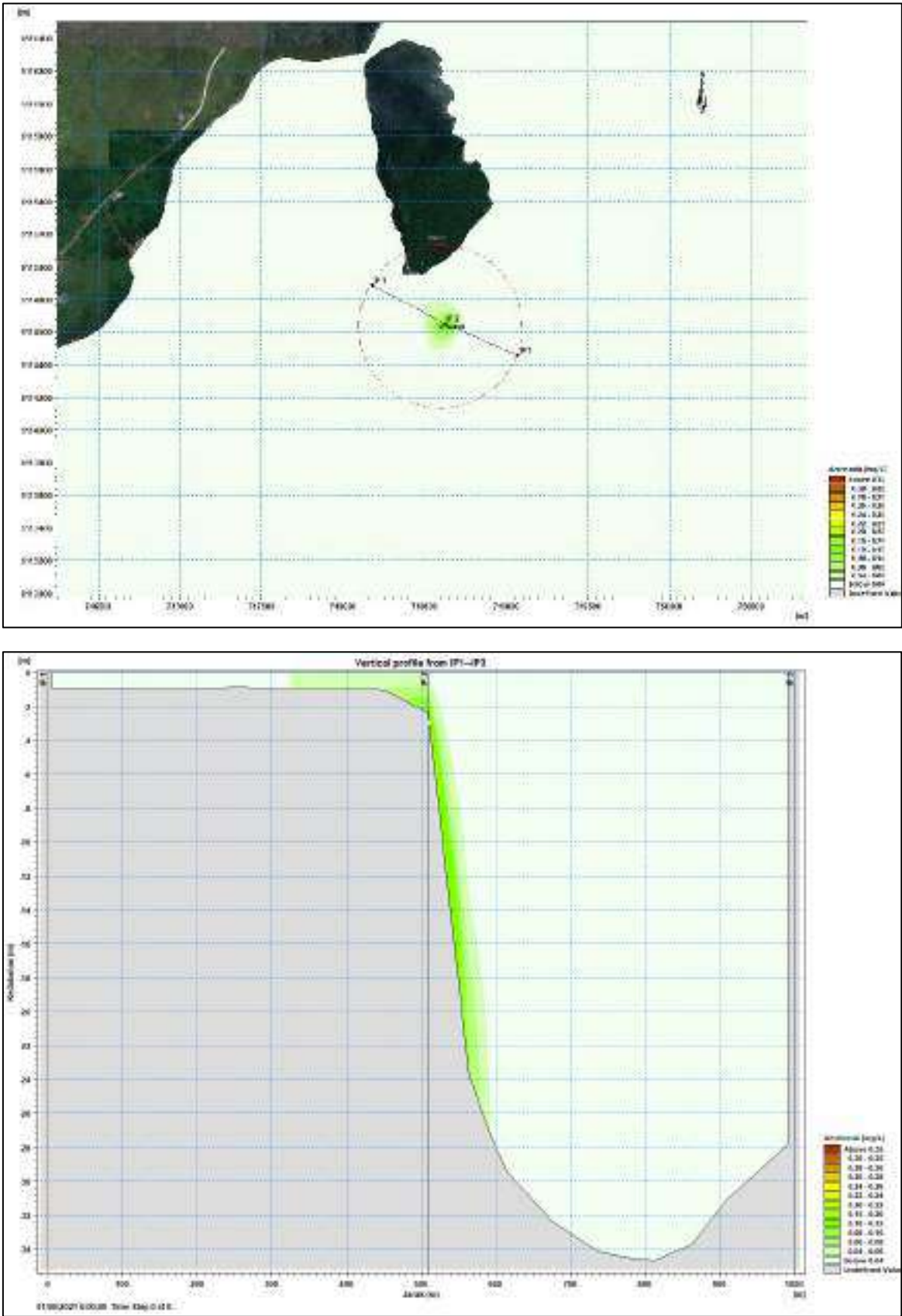
yang melebihi baku mutu pada musim barat mencapai 950 m ke timur laut, 390 m ke barat daya dan 1.6 km ke utara. Jarak sebaran ke timur laut, ke barat daya dan ke utara saat musim peralihan I masing-masing mencapai 905 m, 558 m dan 1.7 km, pada musim timur masing-masing mencapai 250 m, 388 m dan 1.4 km, sedangkan pada musim peralihan II masing-masing mencapai 345 m, 444 m dan 1.6 km.



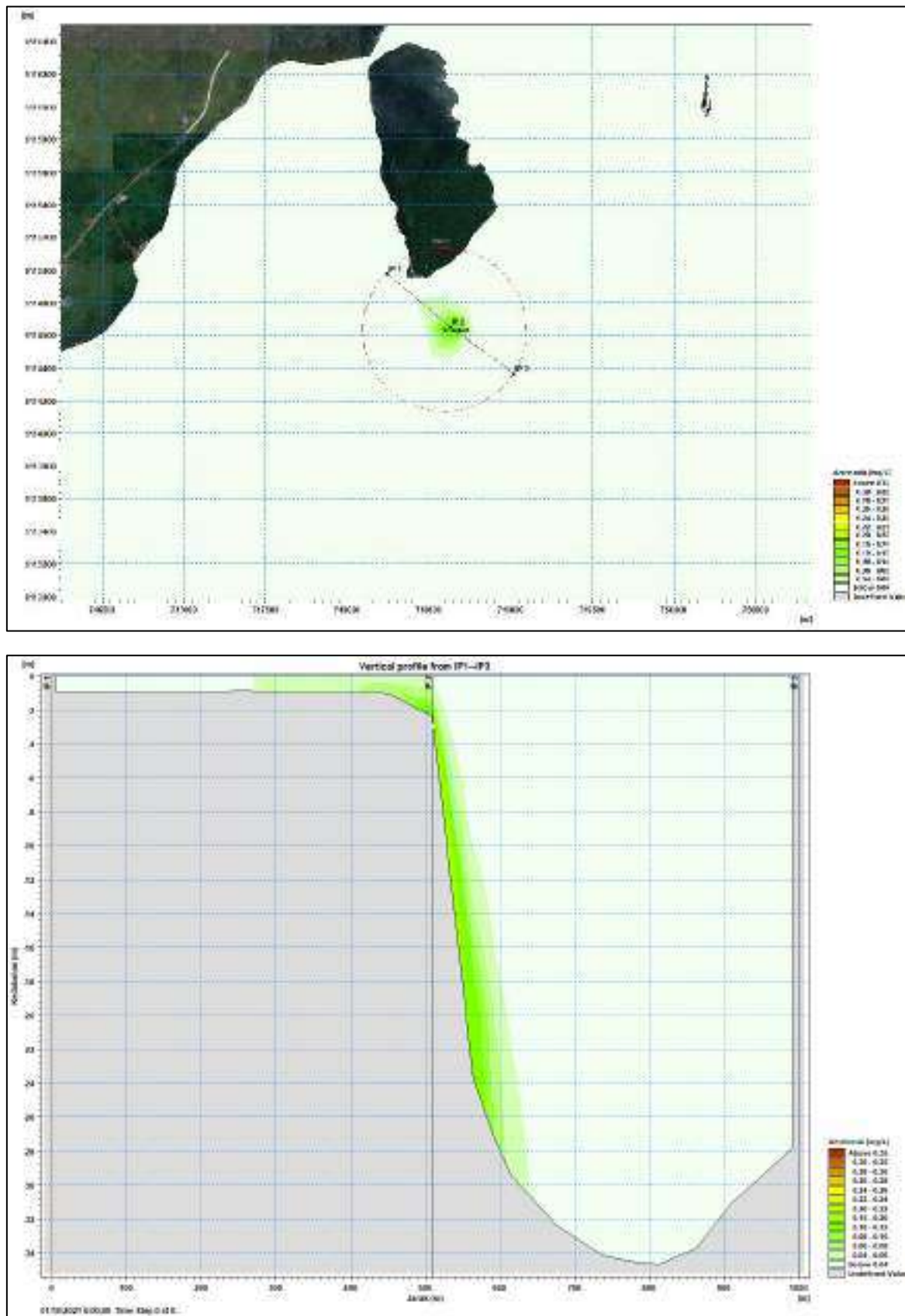
Gambar 68. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



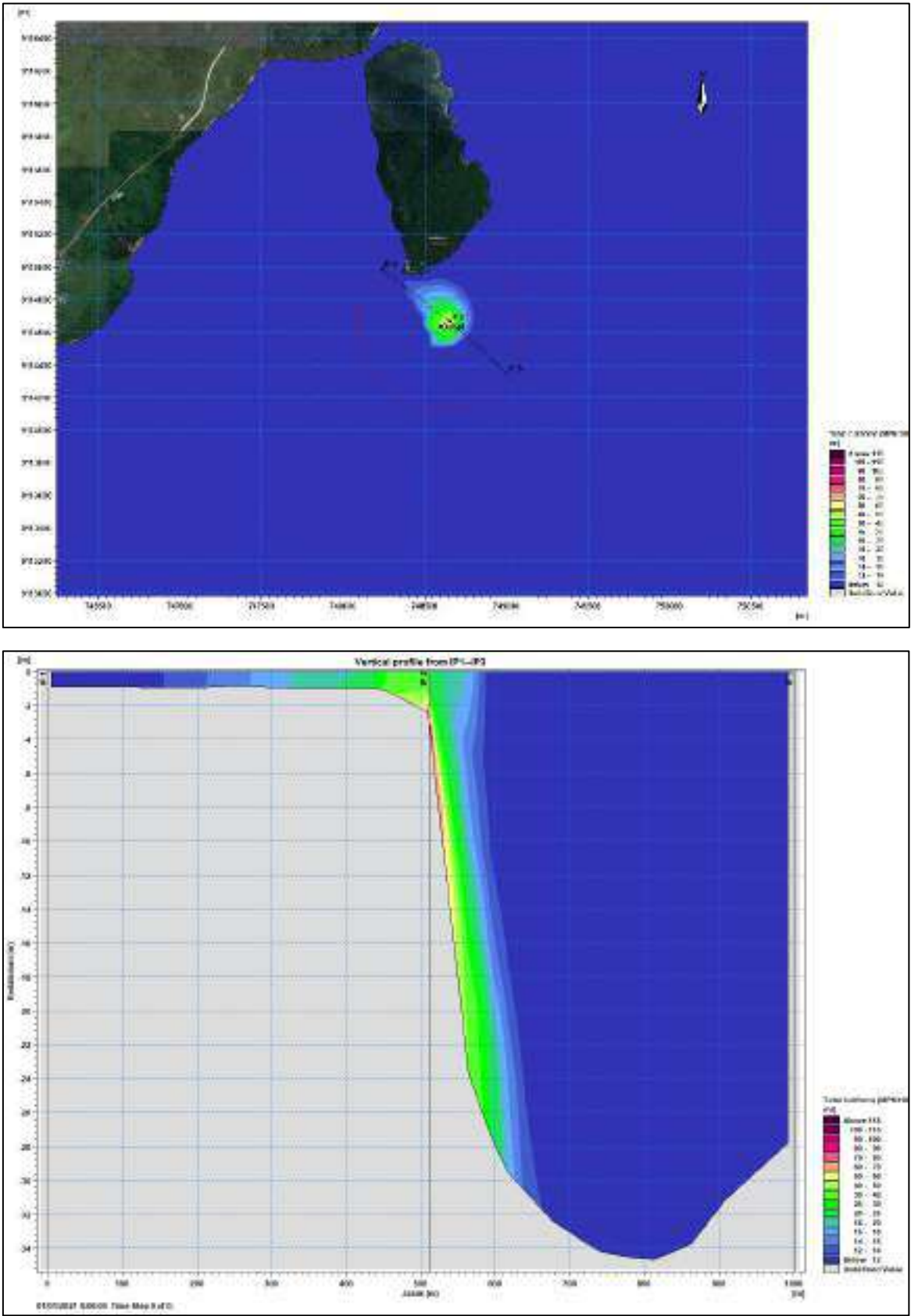
Gambar 69. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



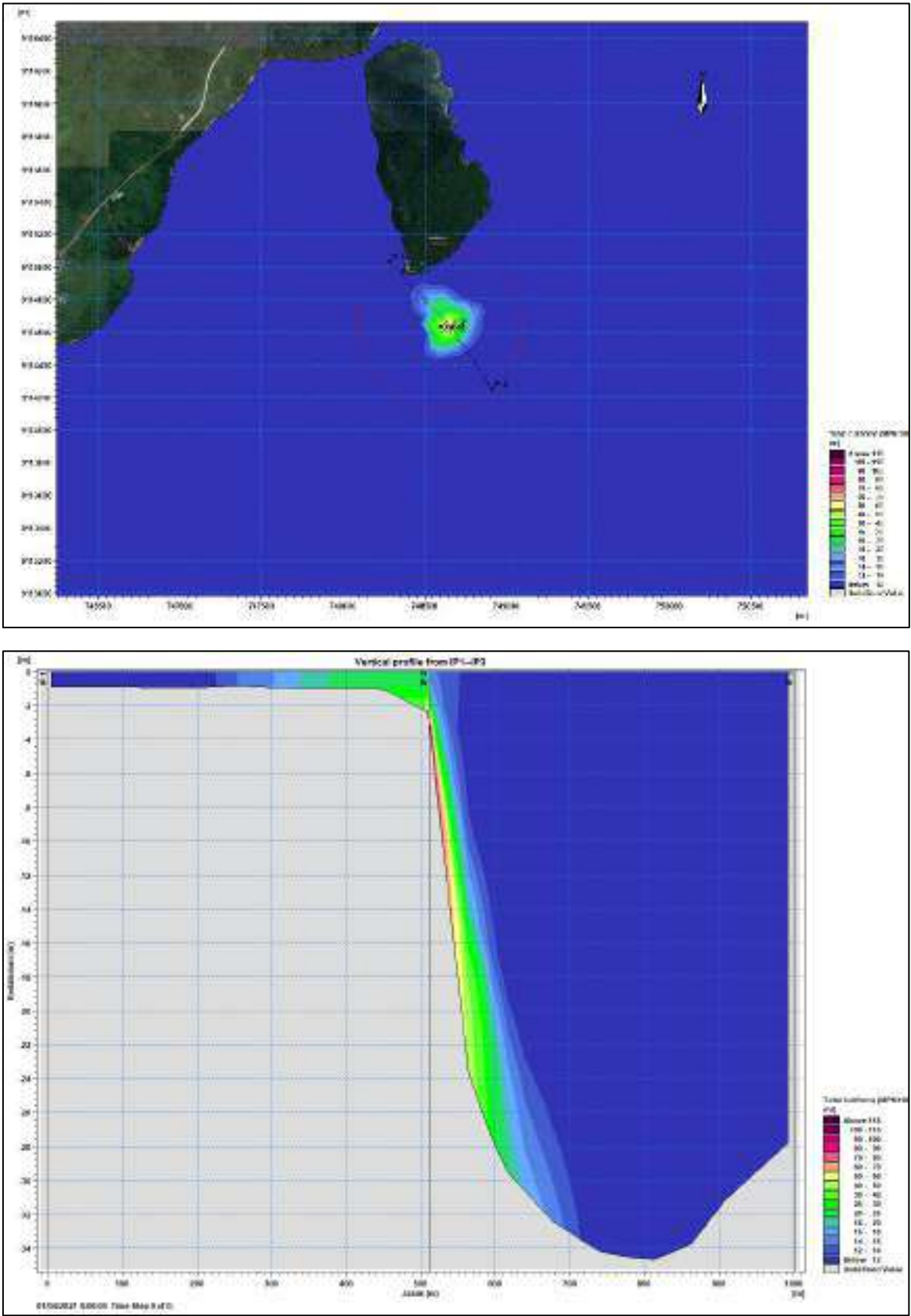
Gambar 70. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



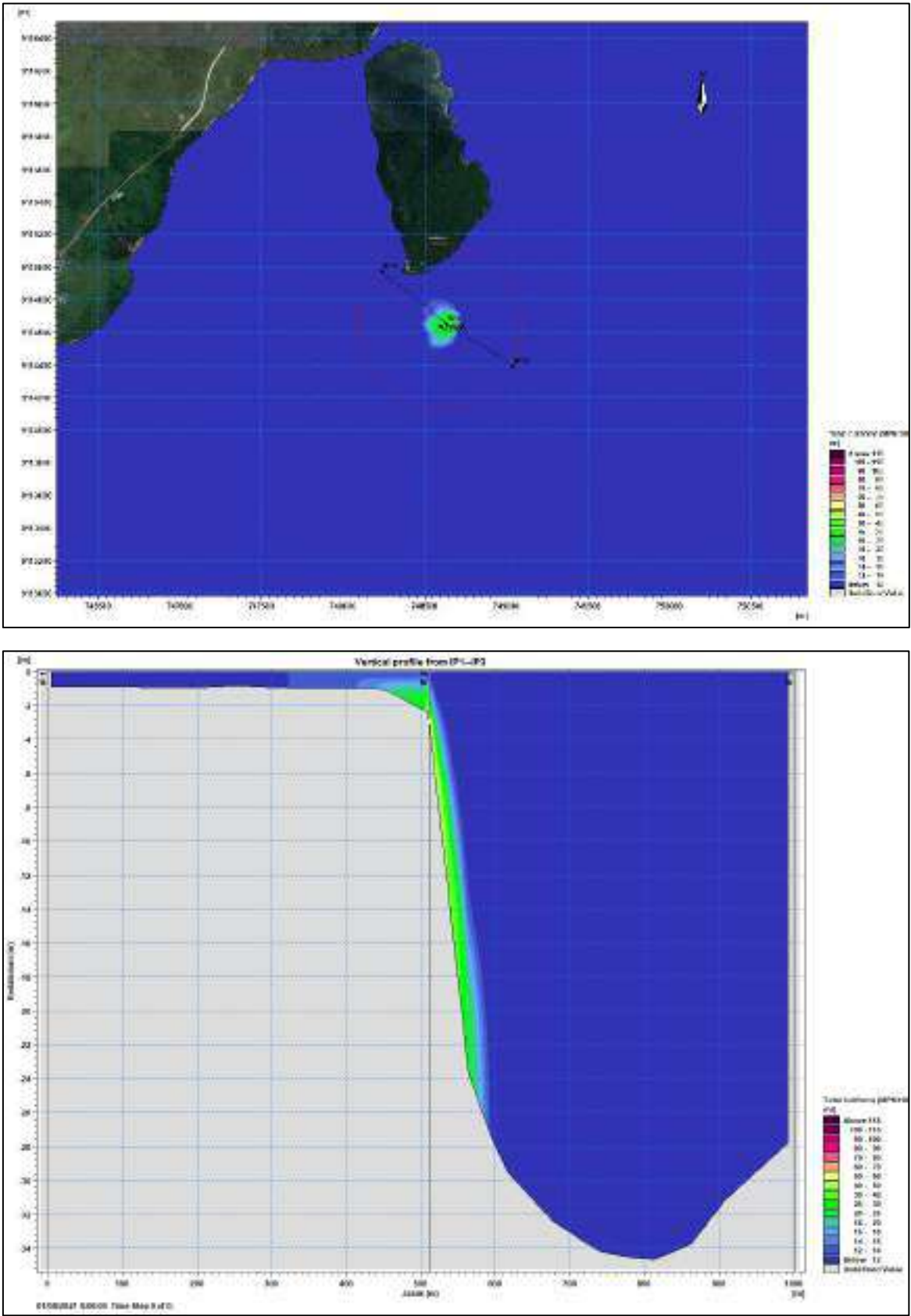
Gambar 71. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



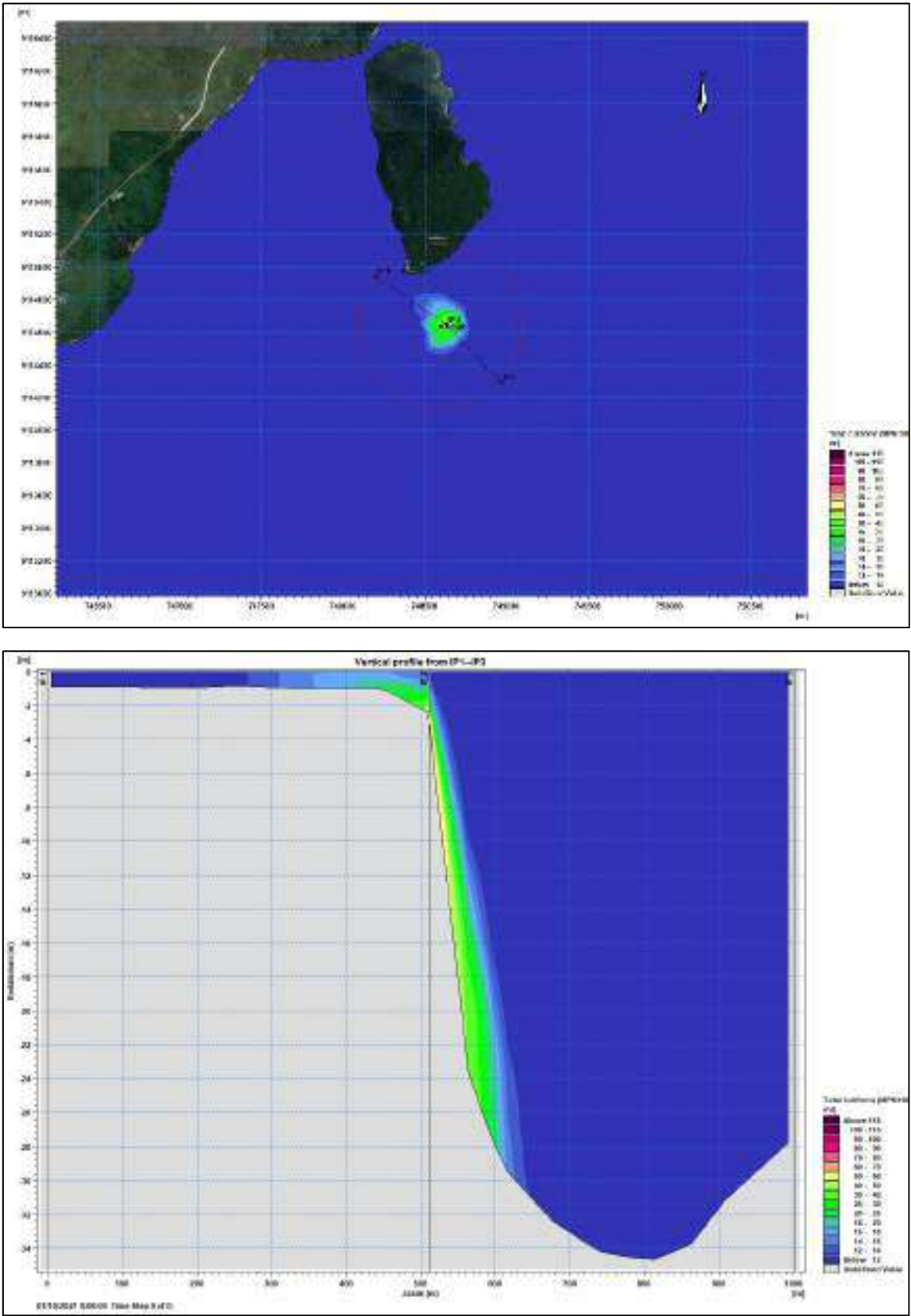
Gambar 72. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



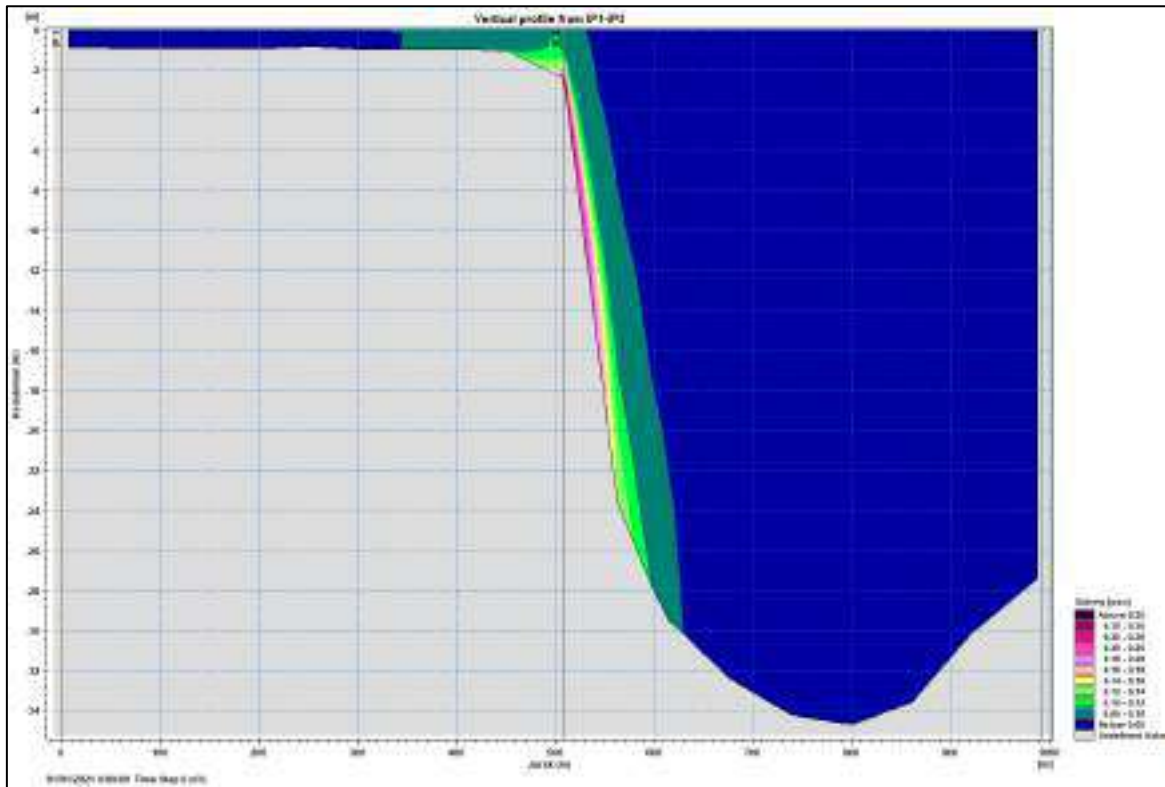
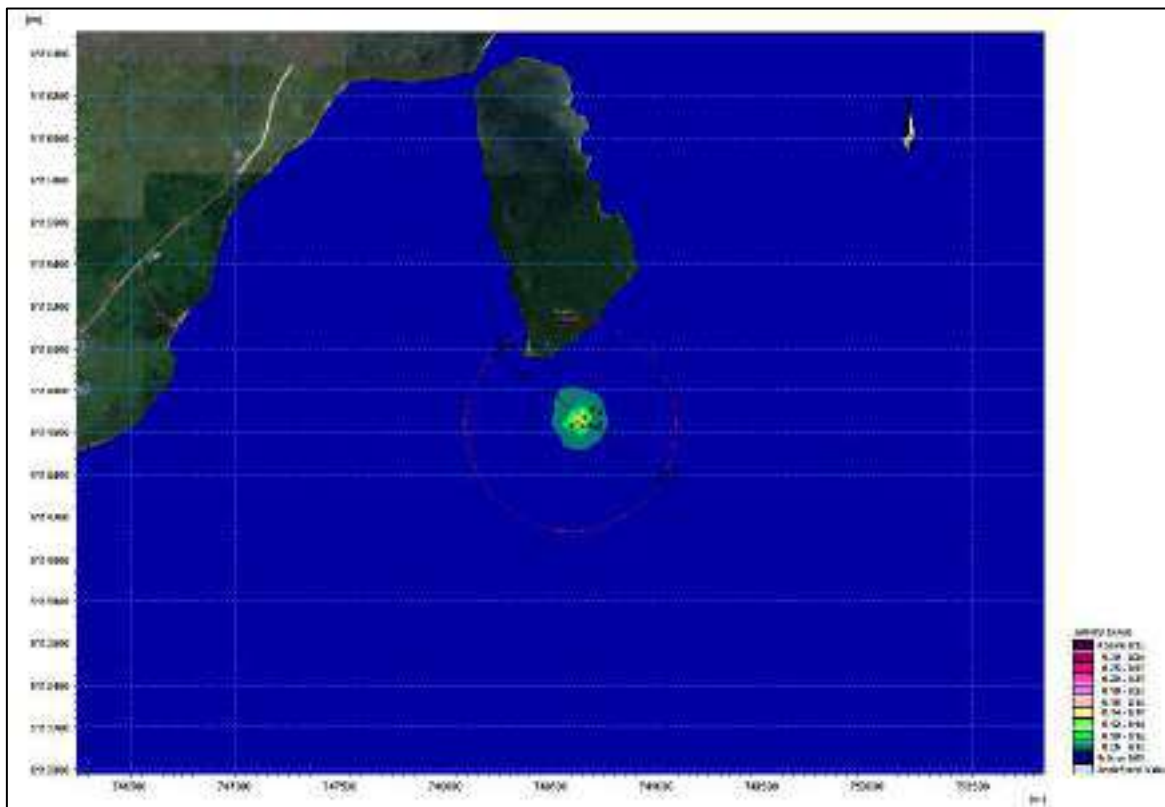
Gambar 73. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



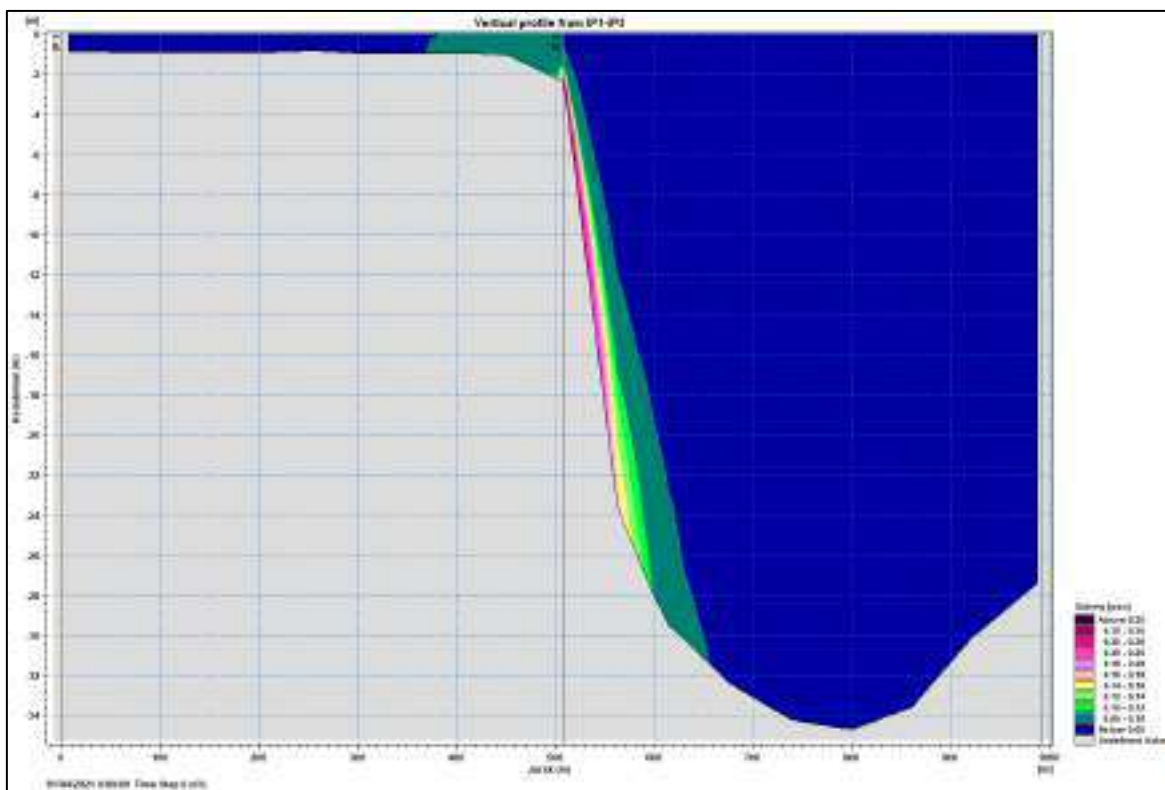
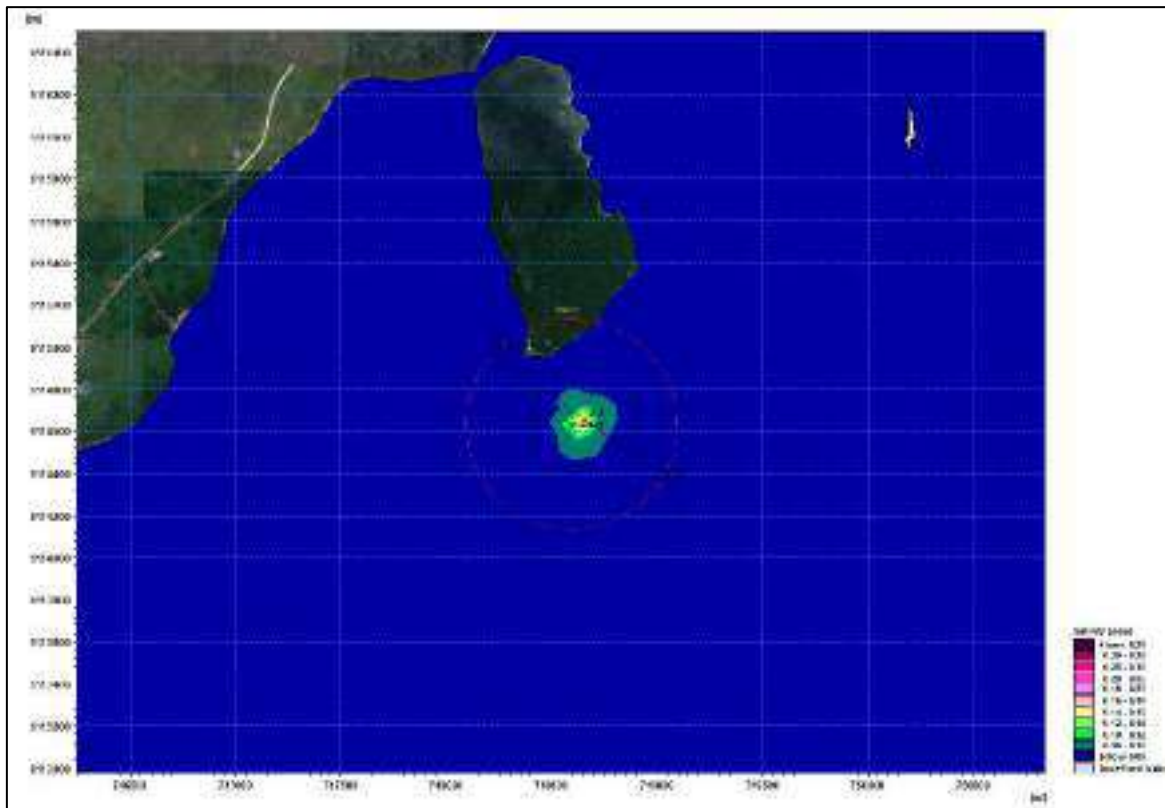
Gambar 74. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



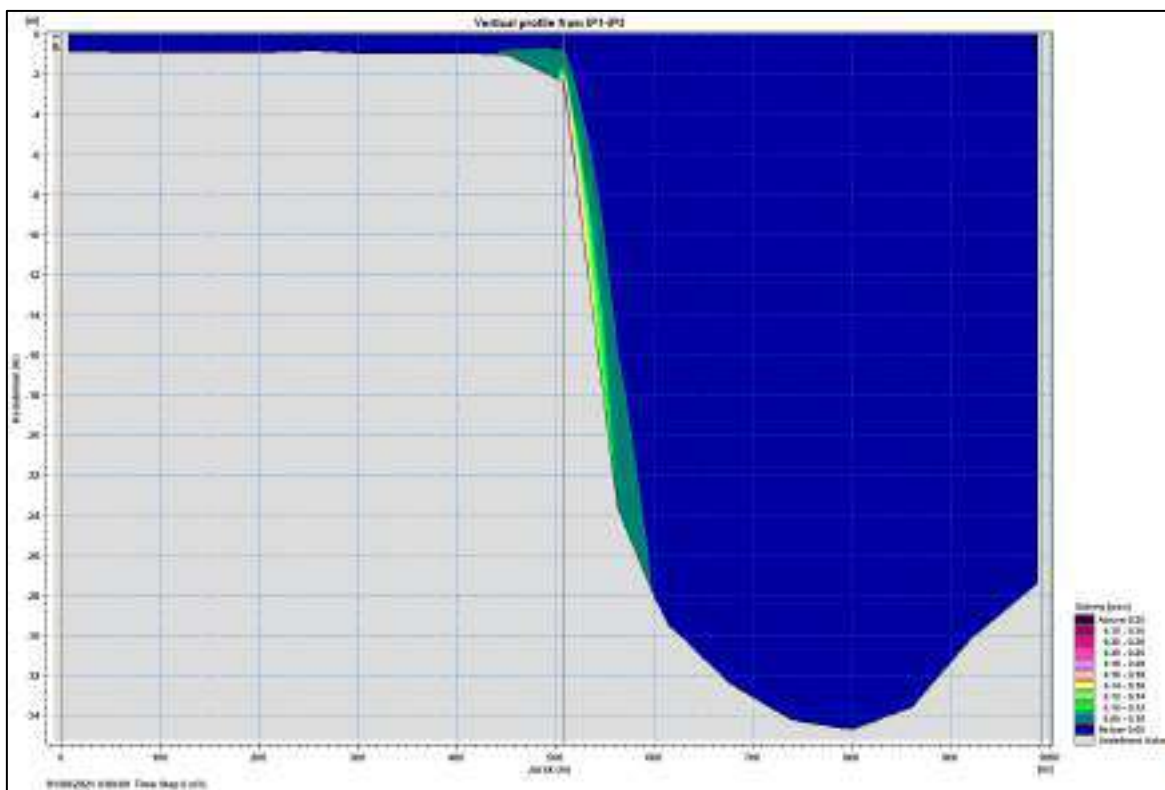
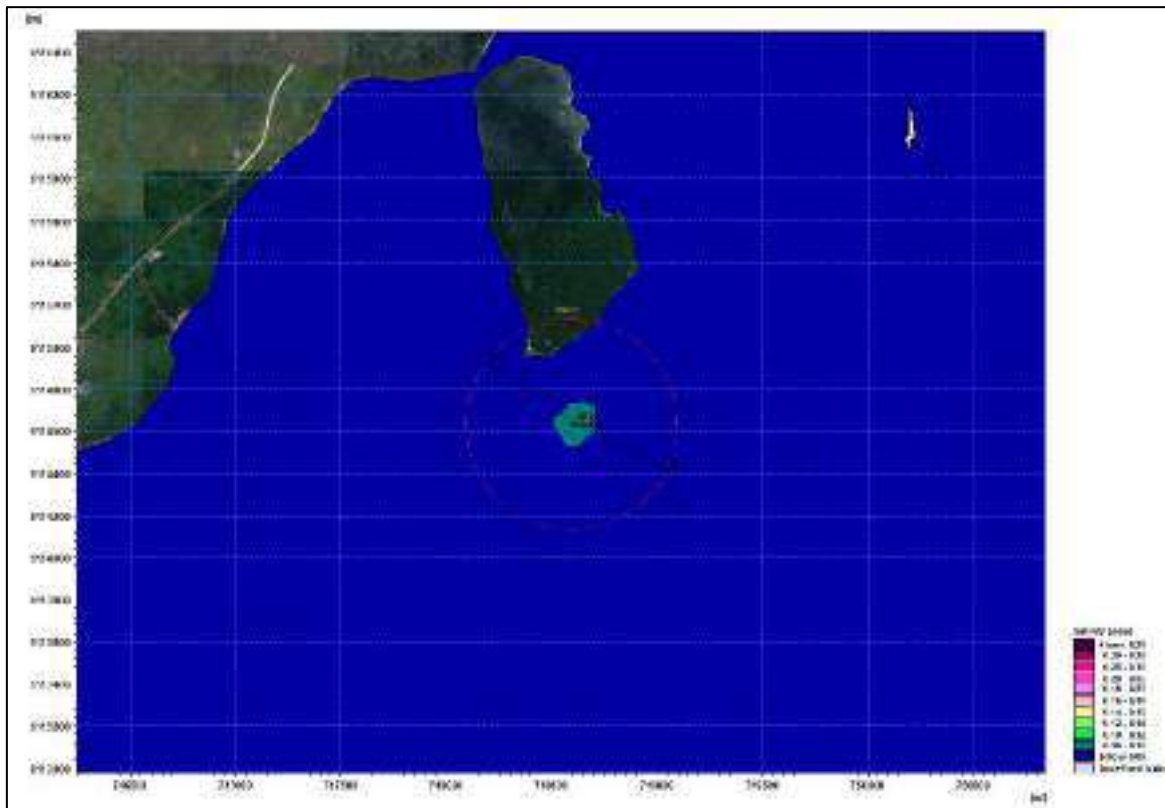
Gambar 75. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



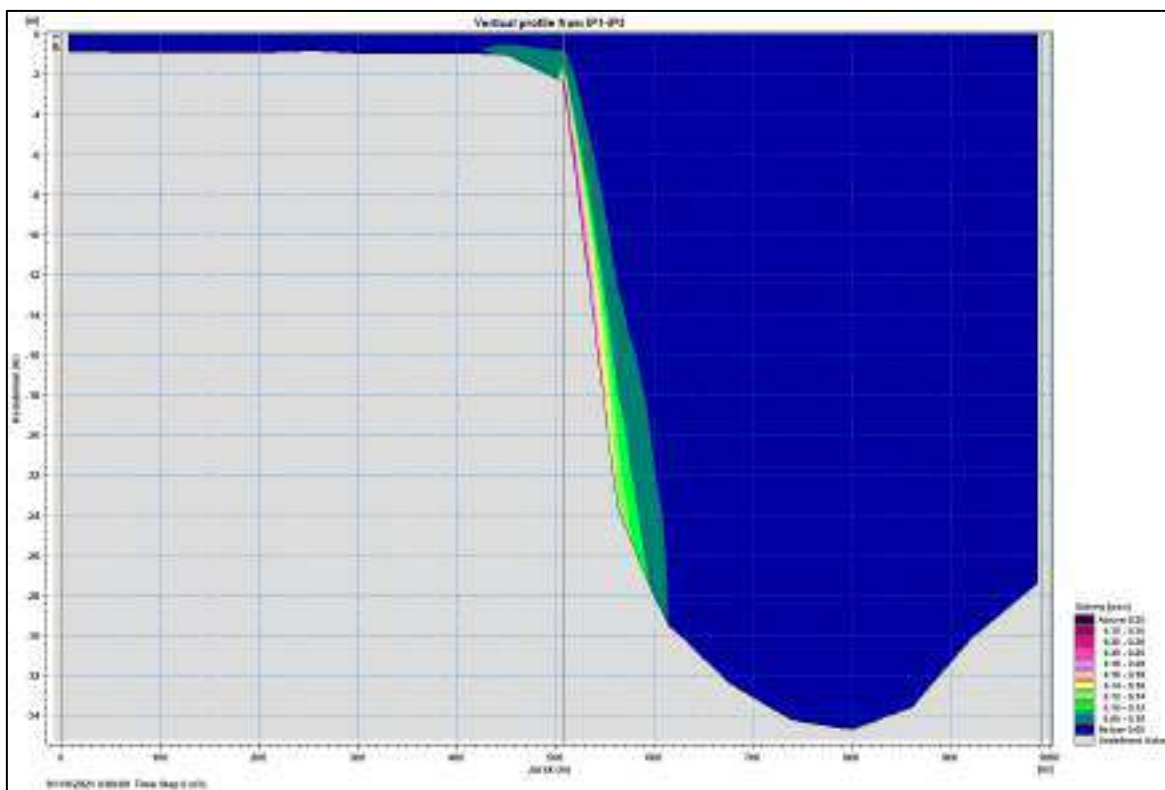
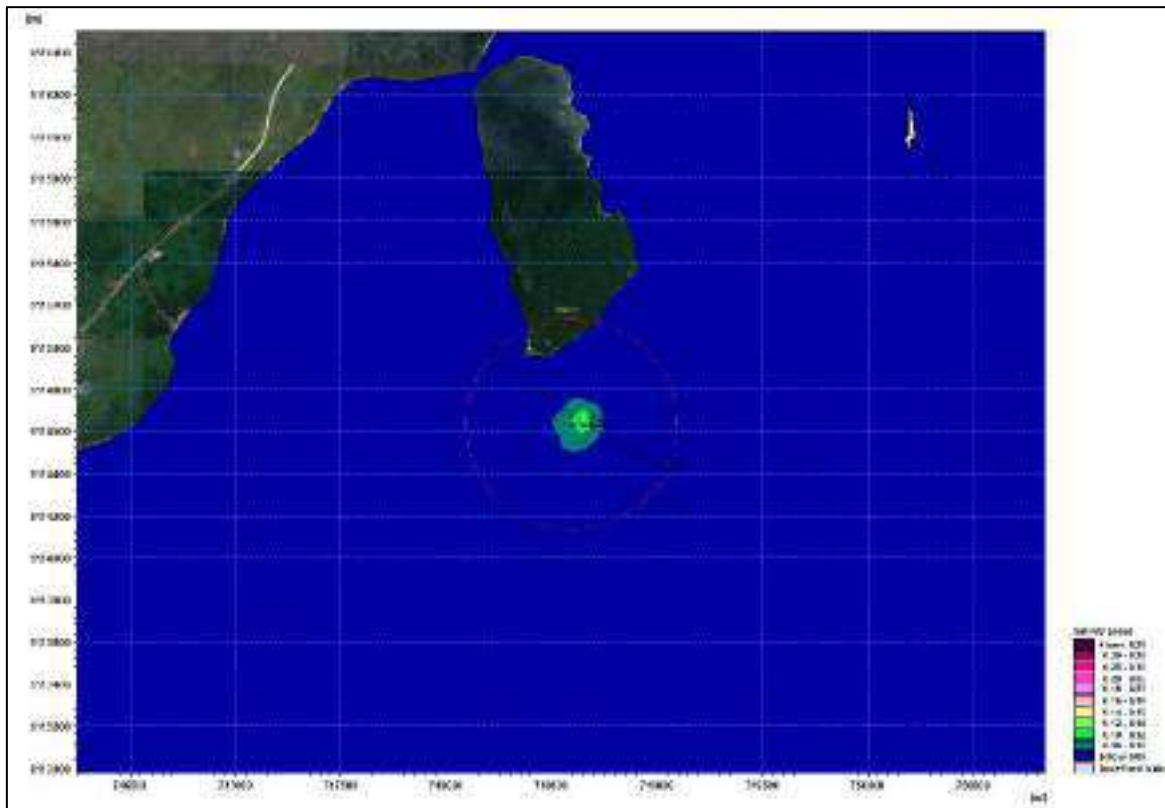
Gambar 76. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



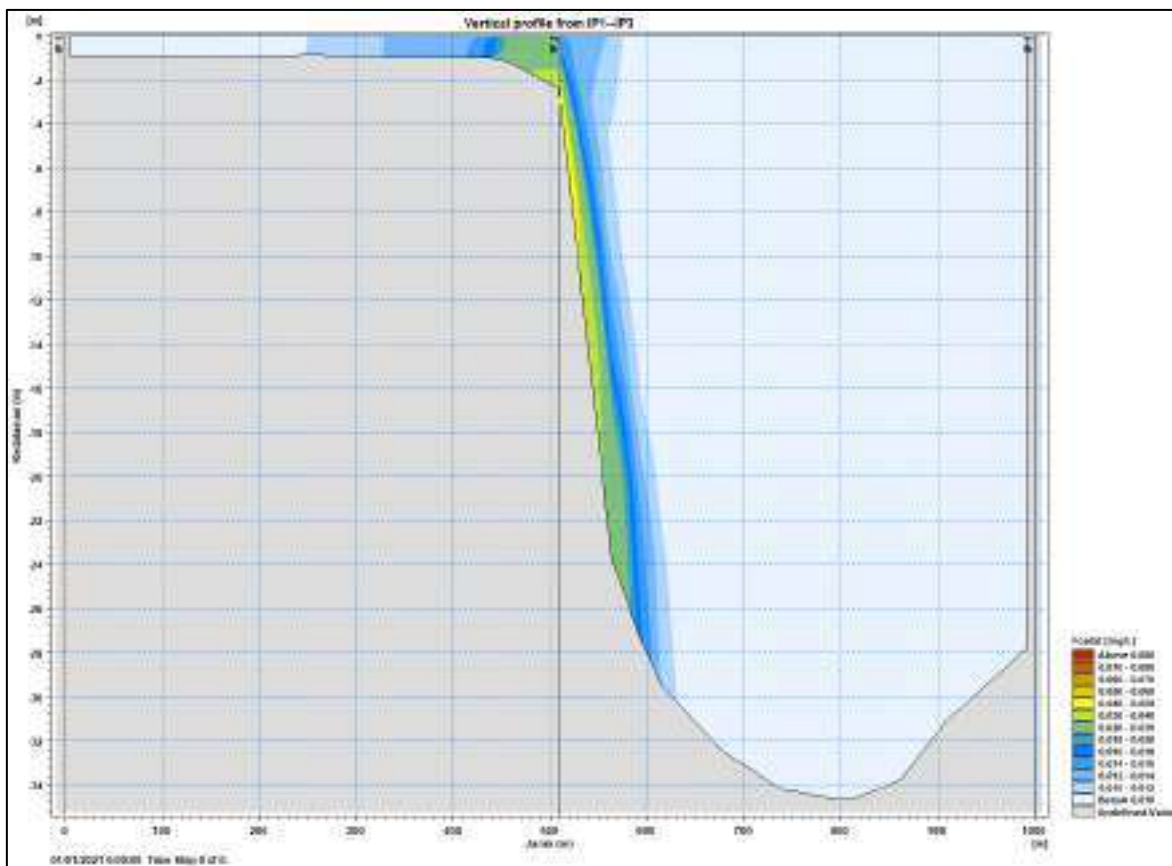
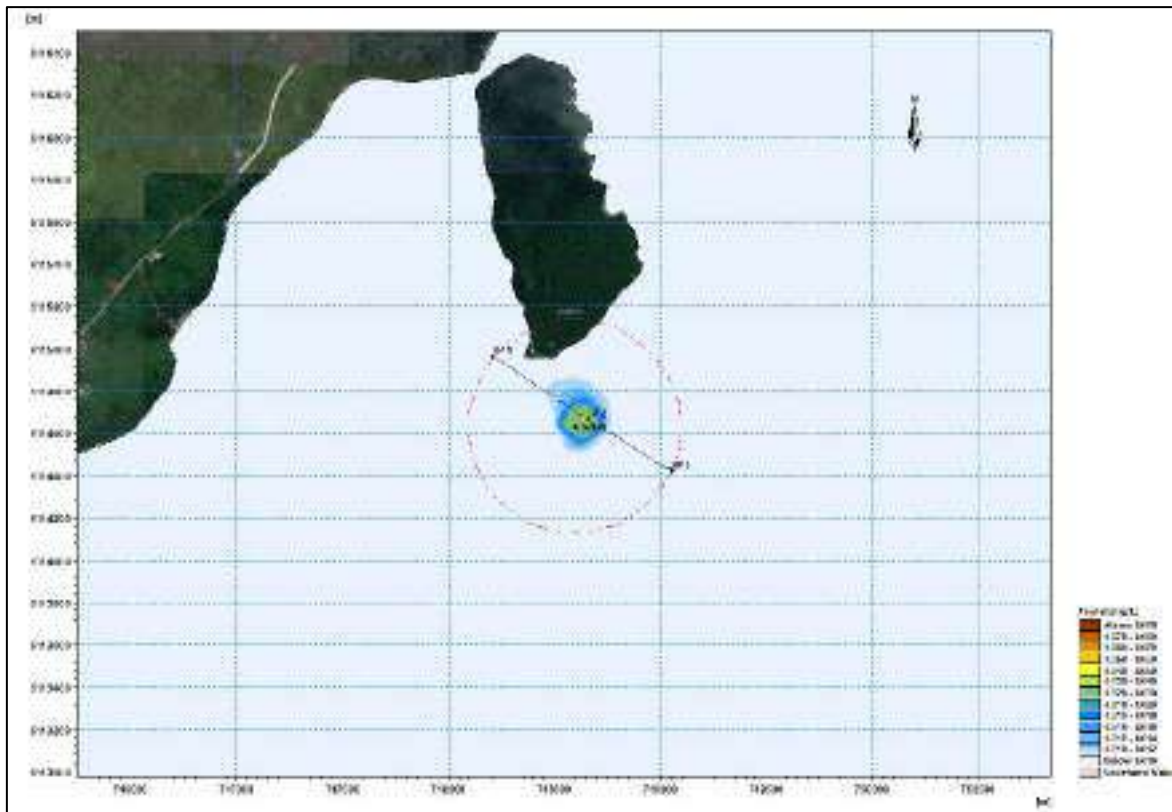
Gambar 77. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



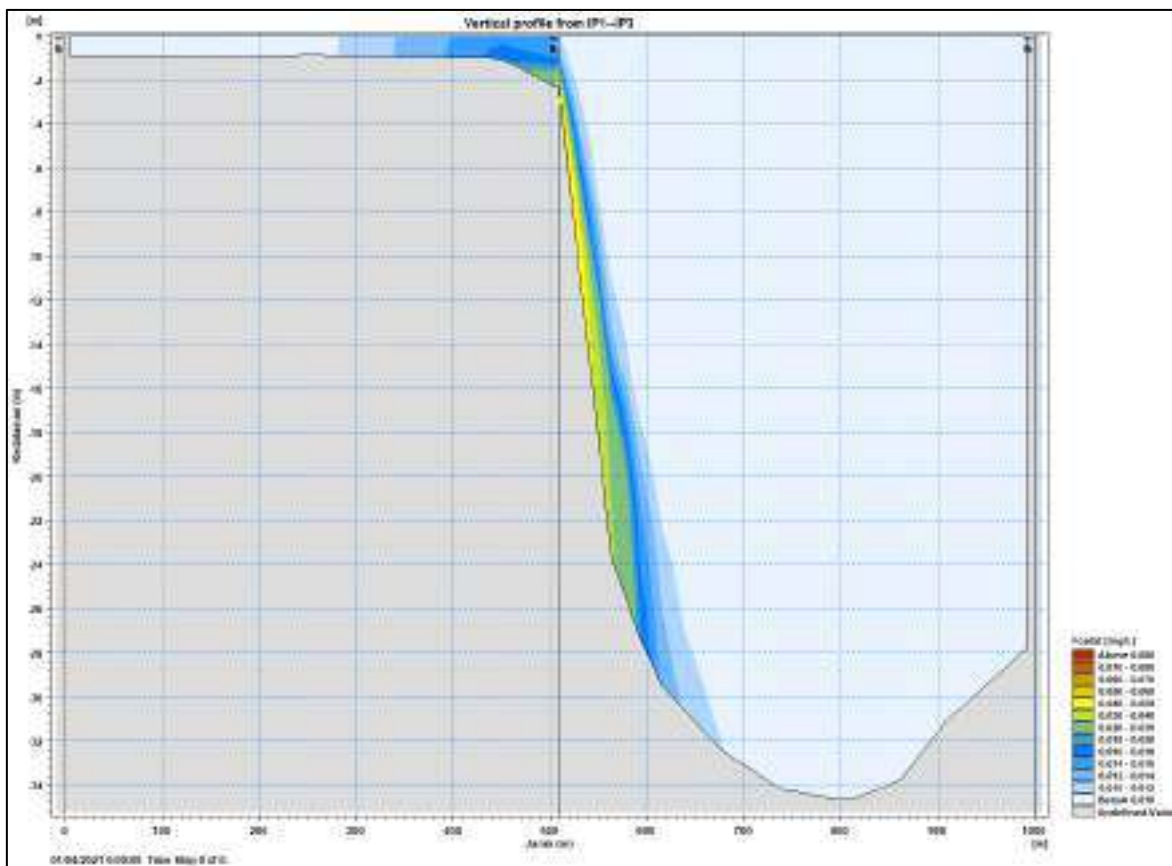
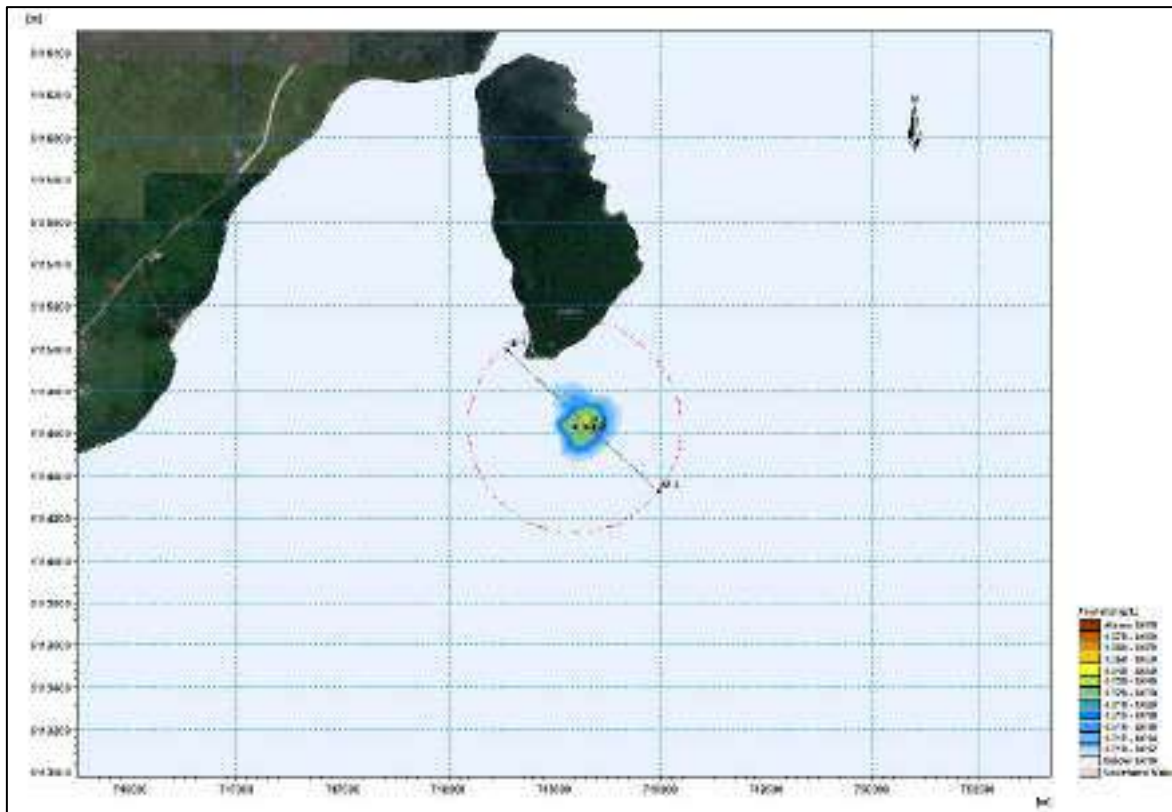
Gambar 78. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



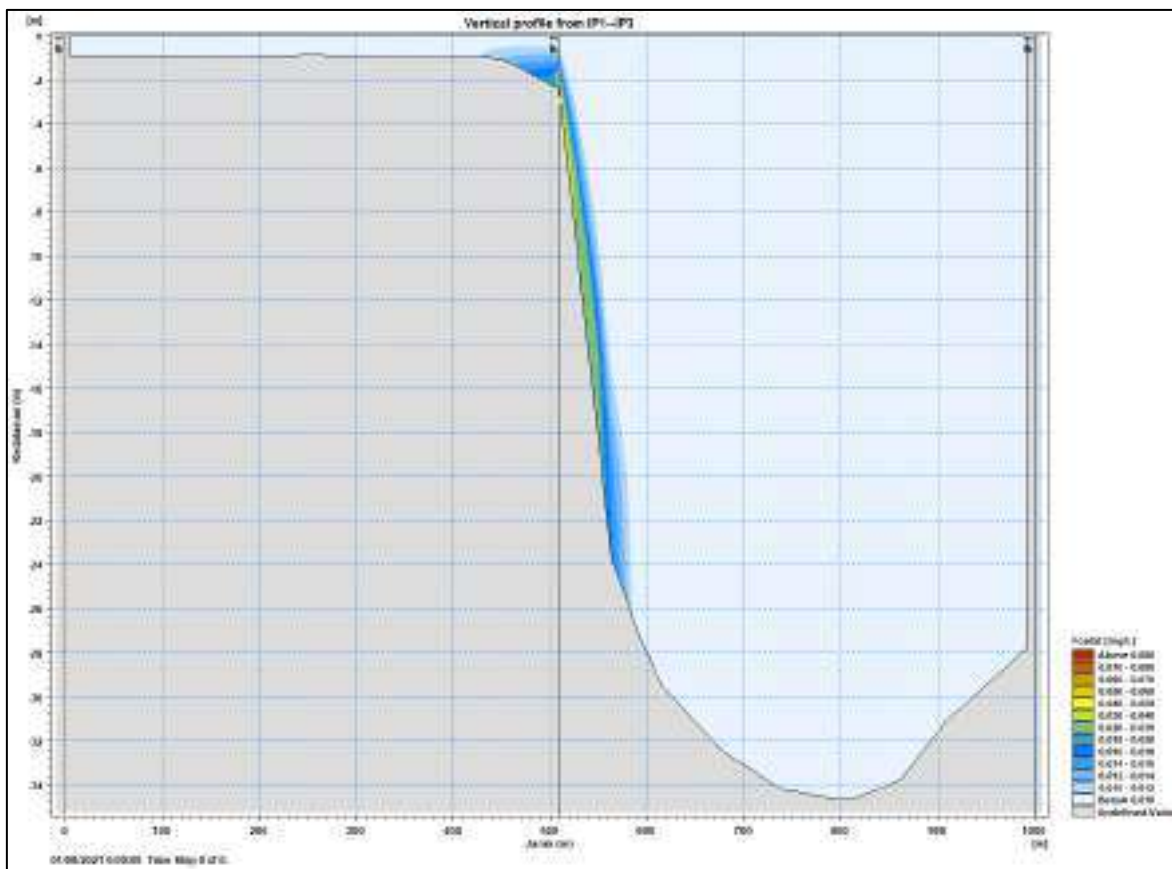
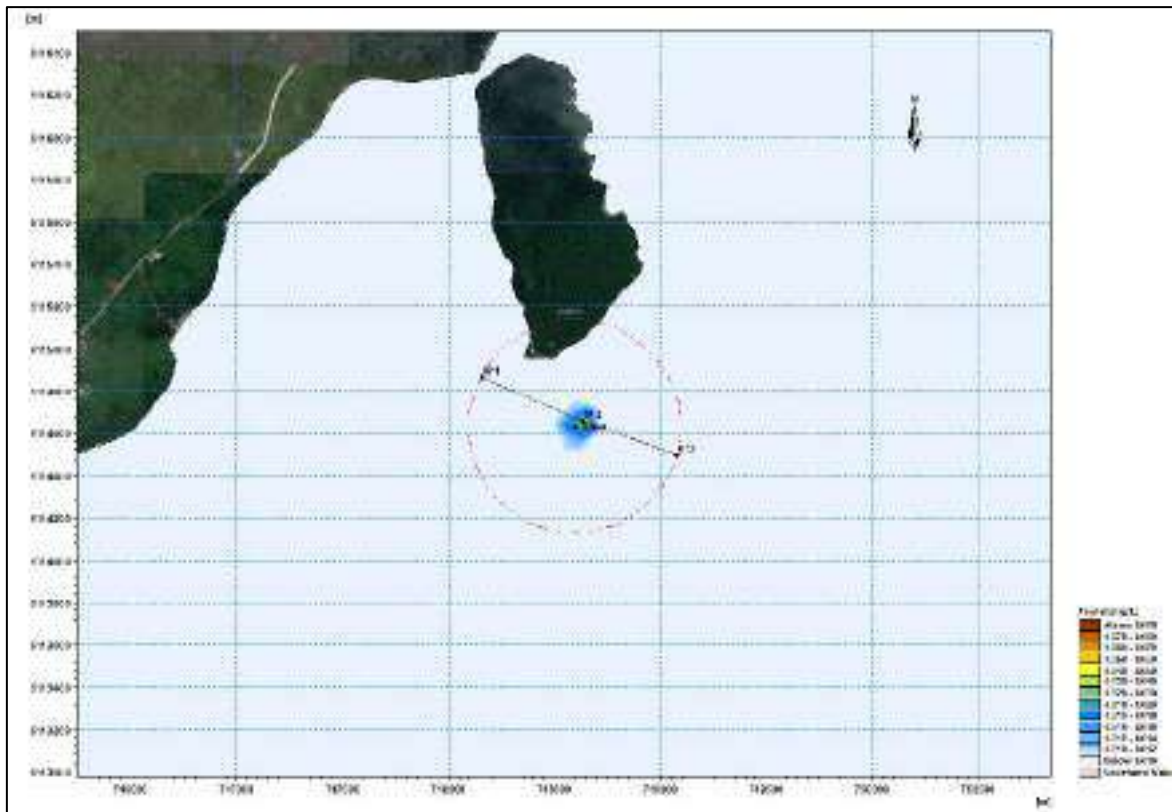
Gambar 79. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



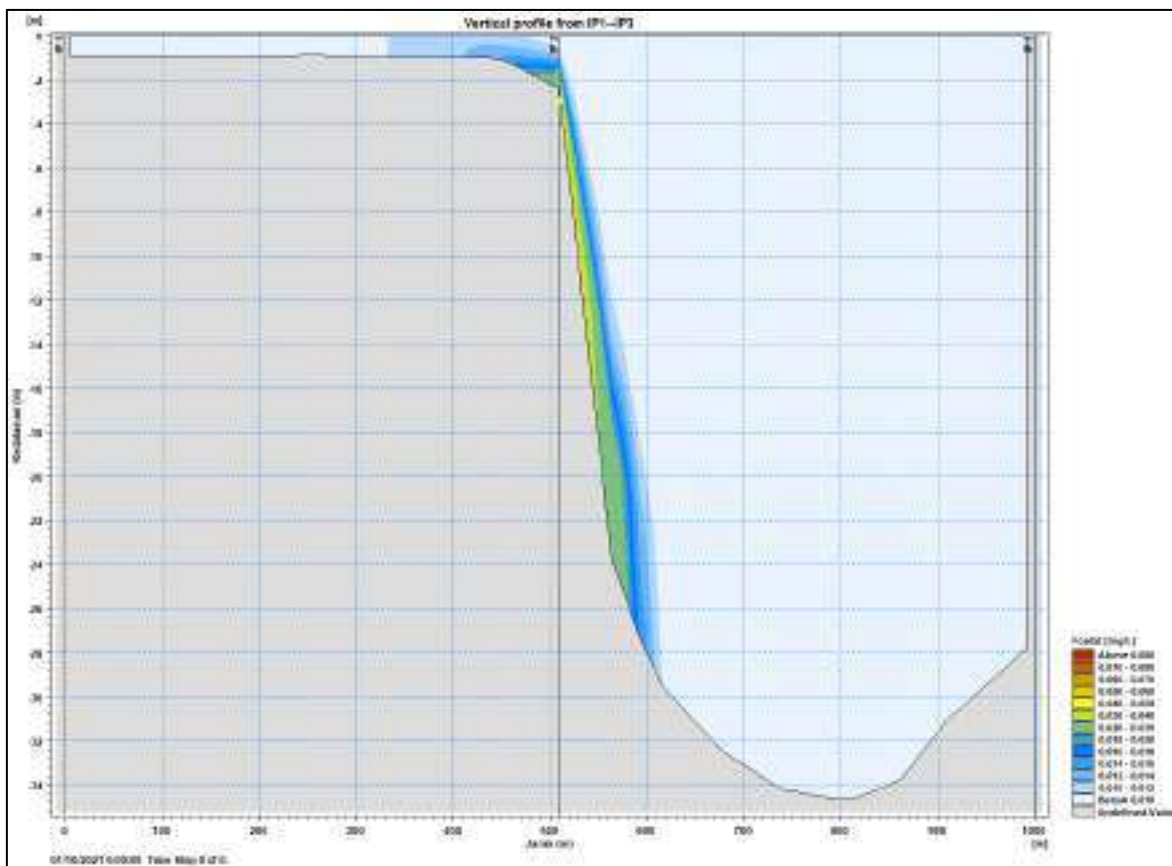
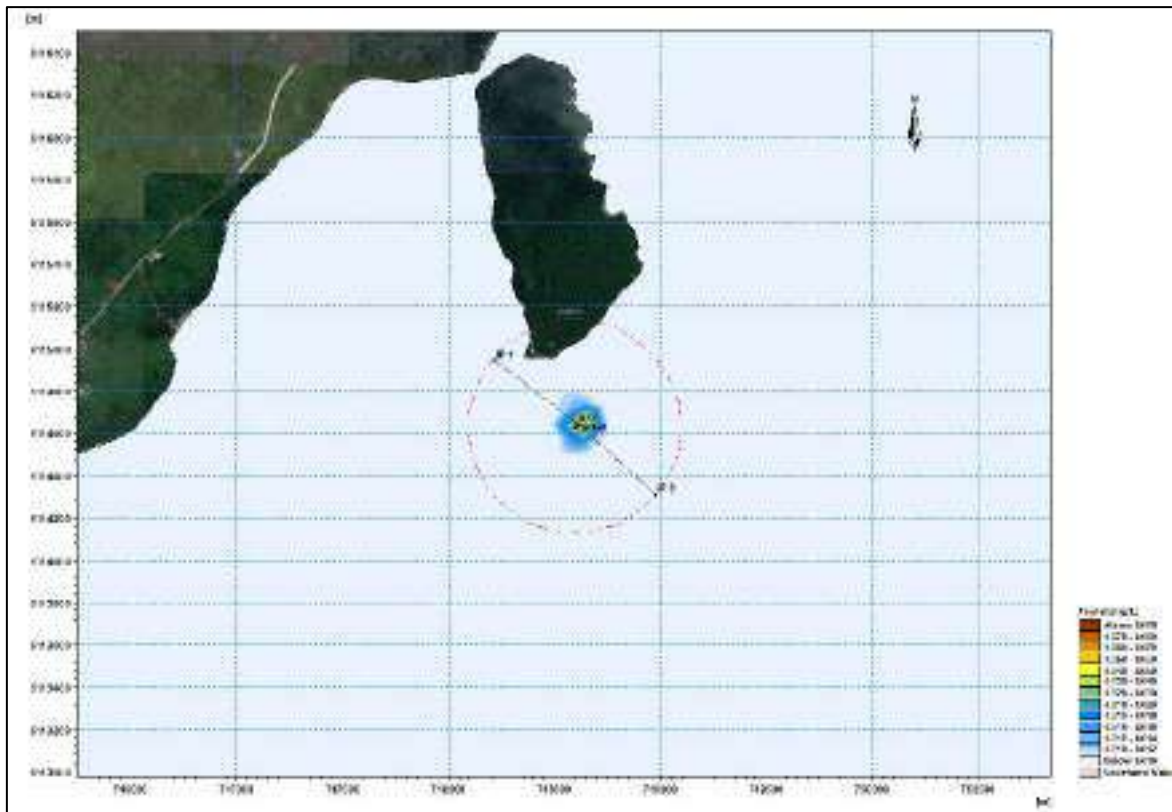
Gambar 80. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



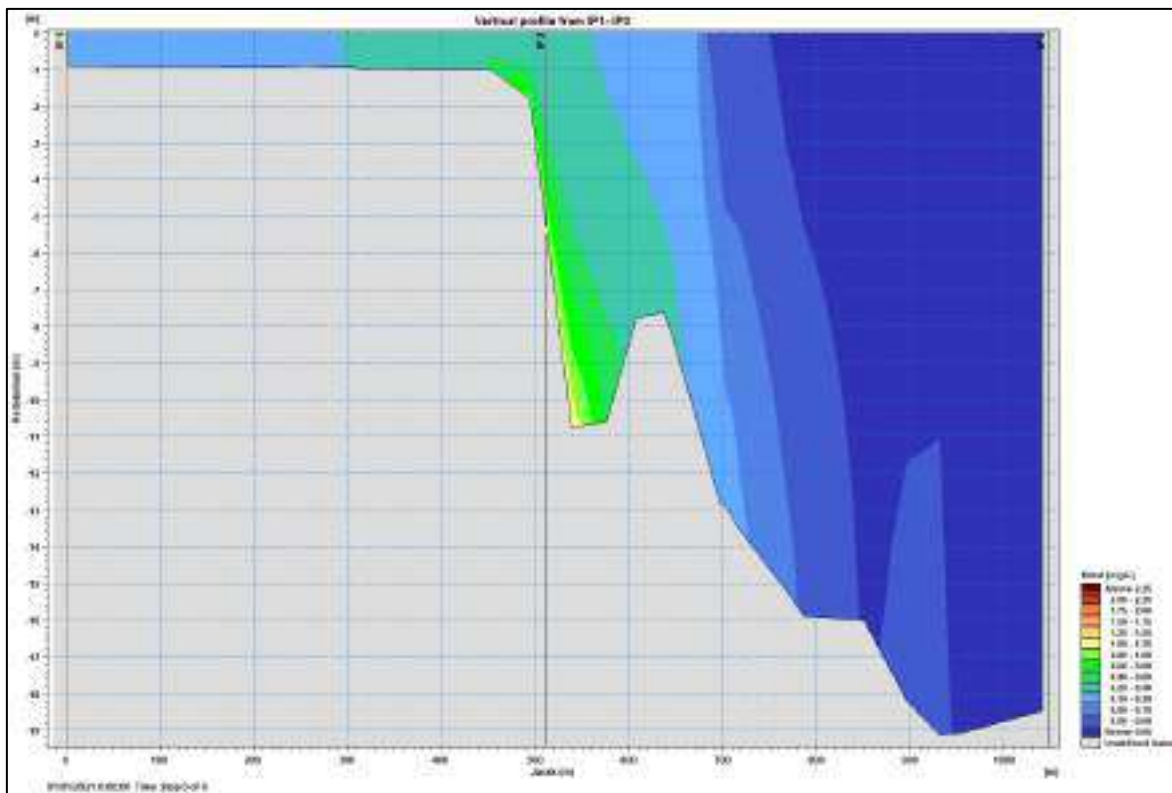
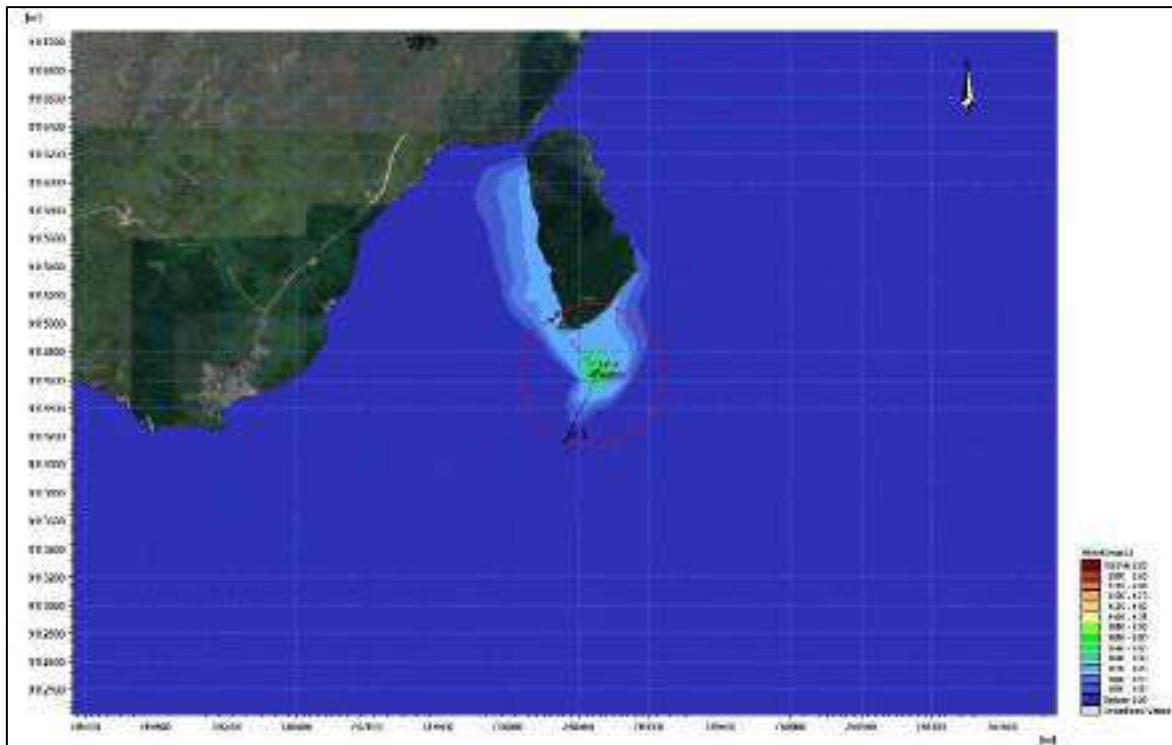
Gambar 81. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



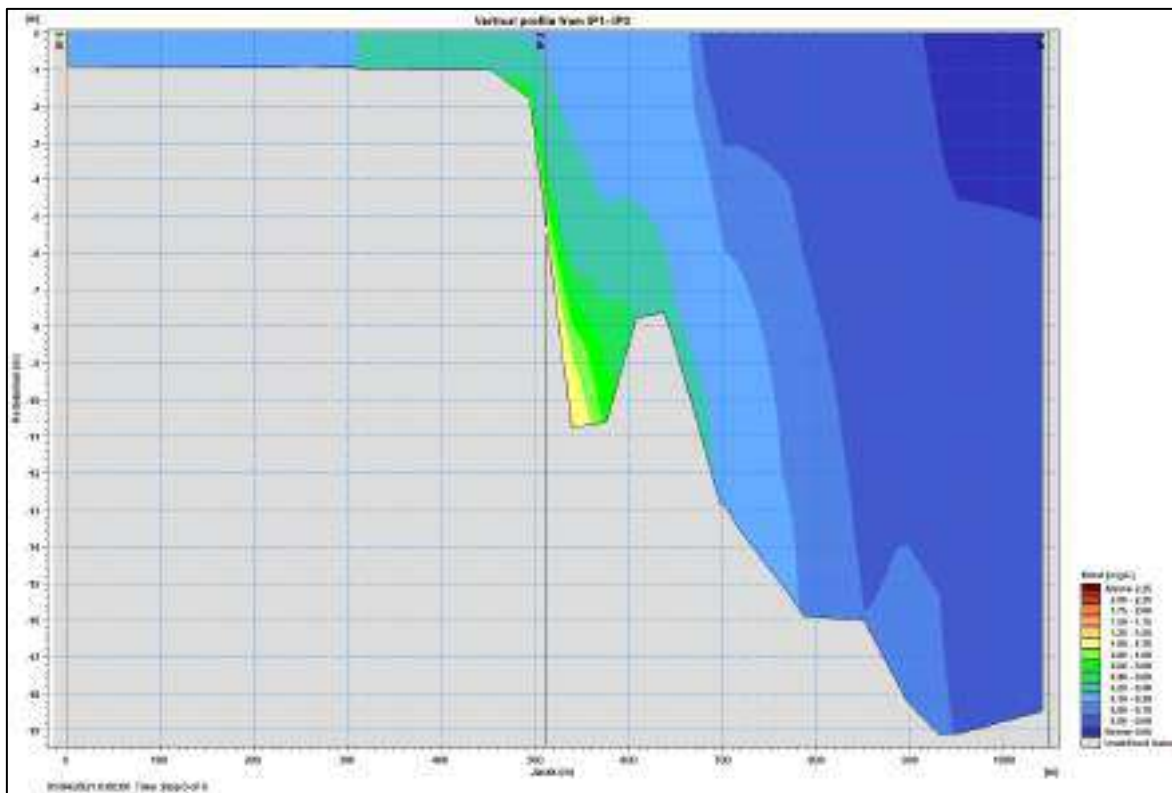
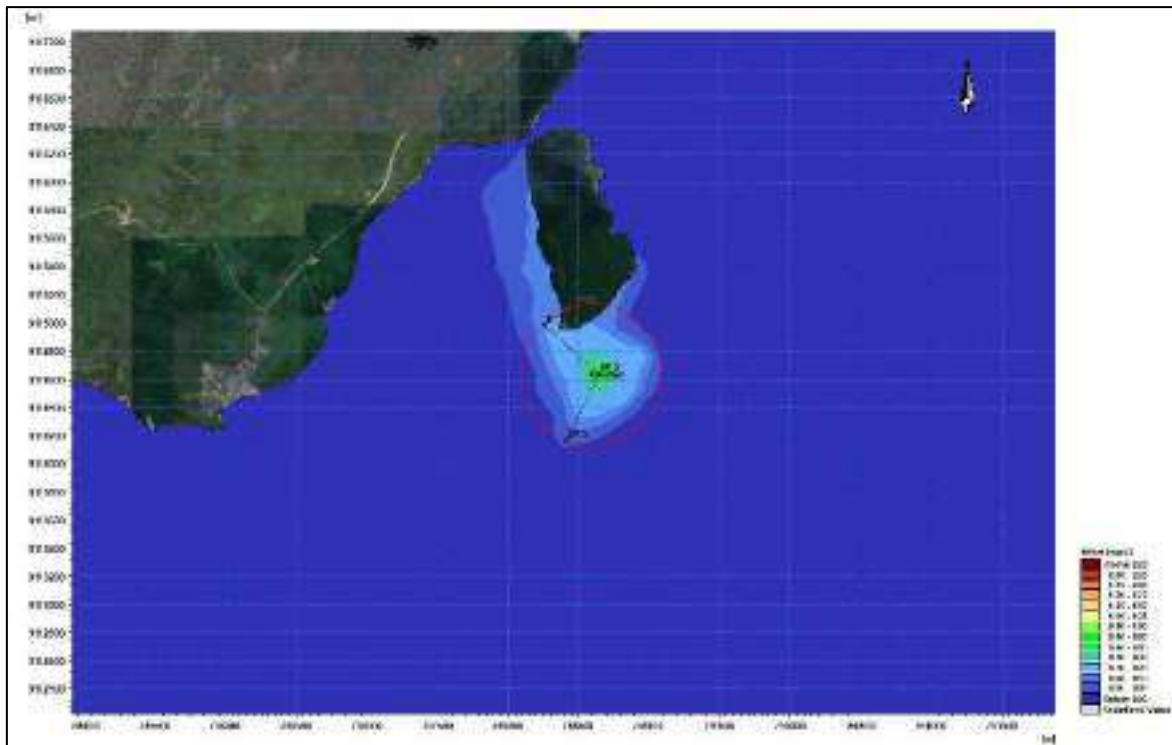
Gambar 82. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



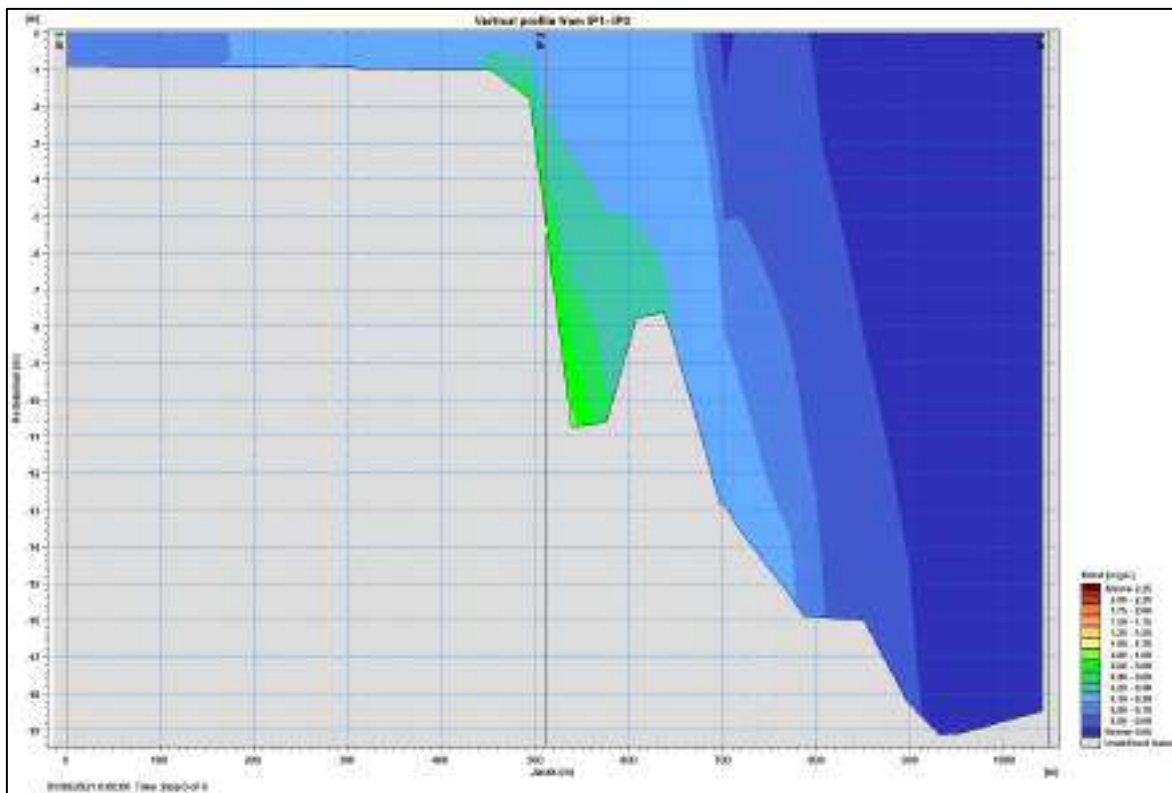
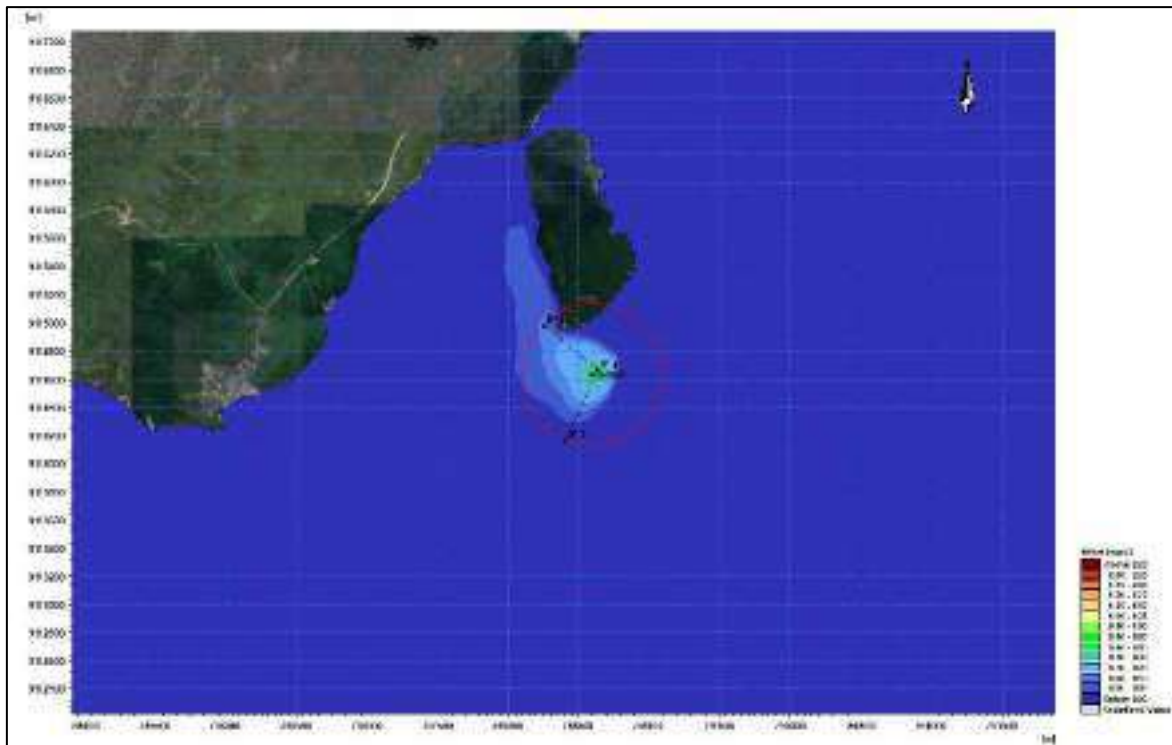
Gambar 83. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II



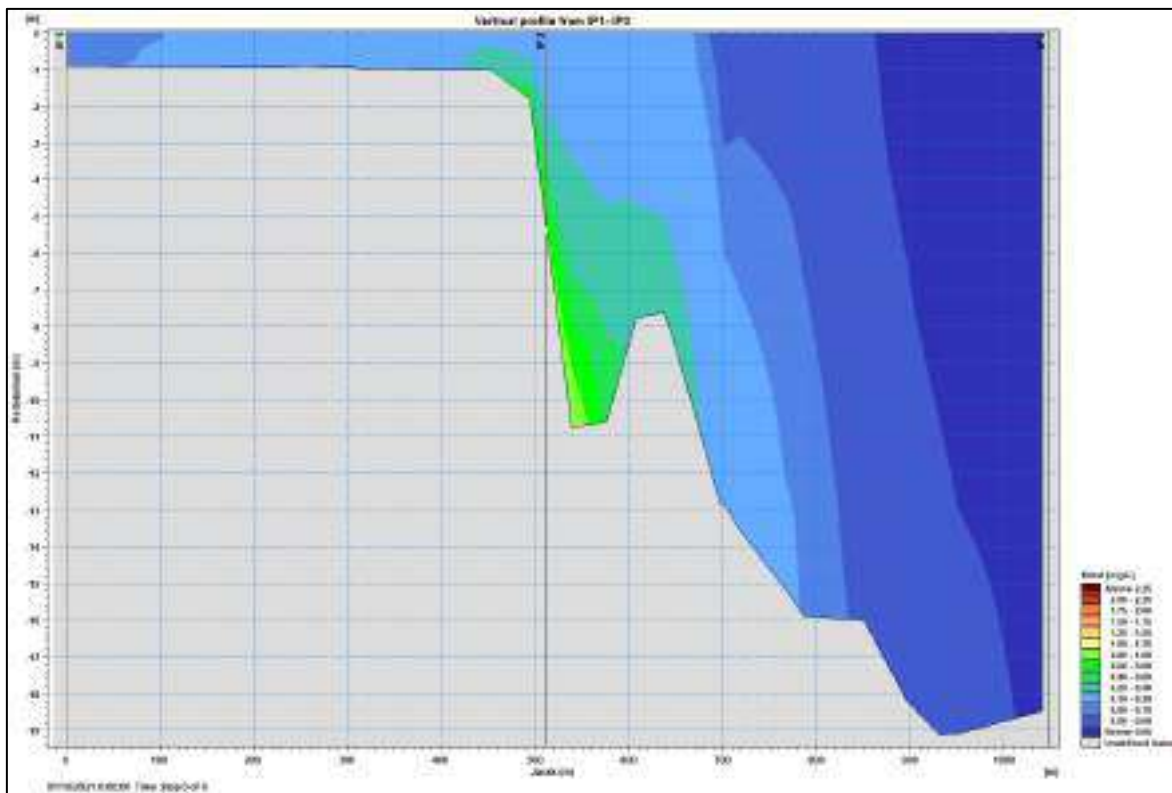
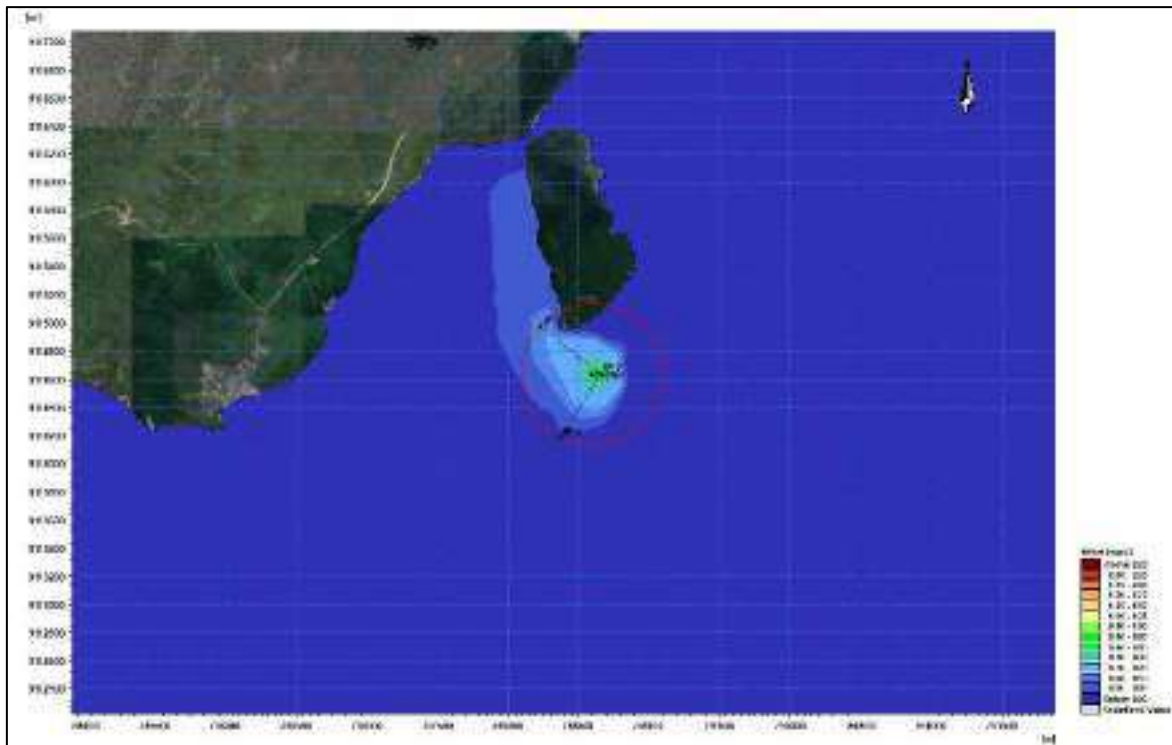
Gambar 84. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim barat



Gambar 85. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan I



Gambar 86. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim timur



Gambar 87. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Nitrat maksimum hasil simulasi skenario-1 kondisi musim peralihan II

5.3. Sebaran Air Limbah Model Skenario 2

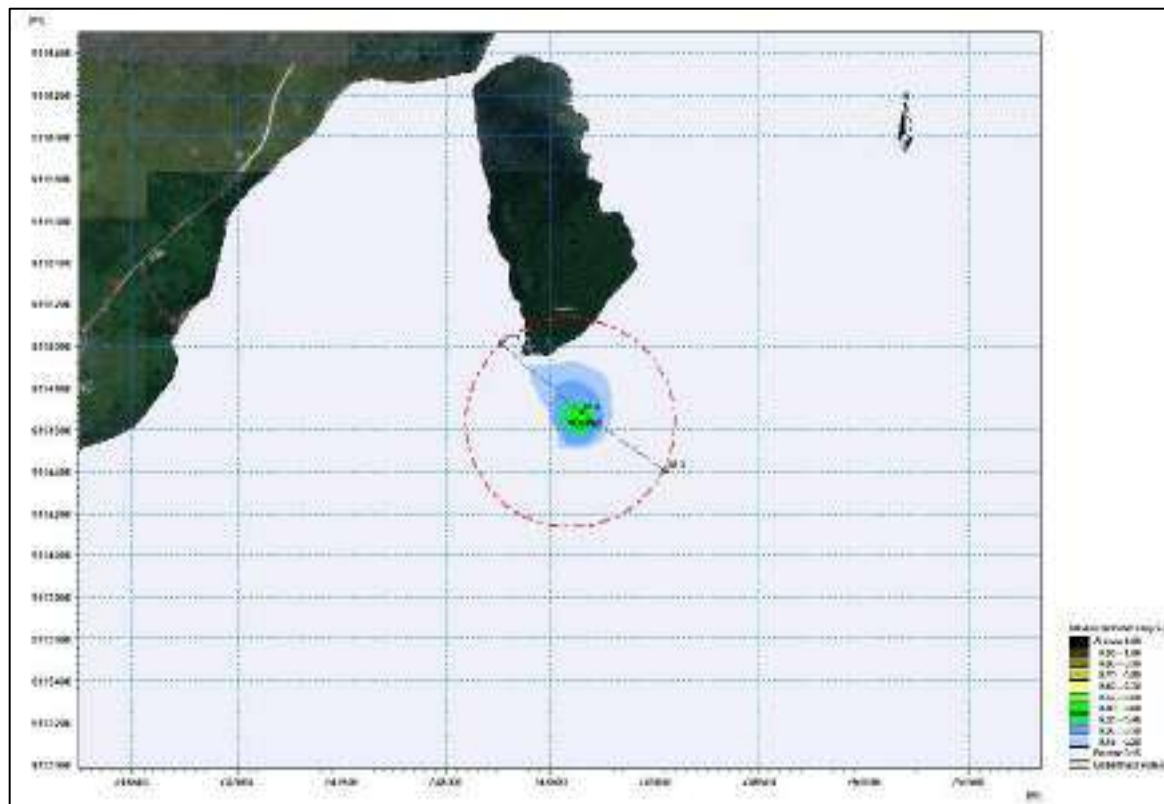
Model skenario-2 adalah model sebaran limbah dengan skenario debit dari STP sebesar 128 m³/jam, sehingga total debit yang keluar dari outfall sebesar 508 m³/jam. Hasil model sebaran limbah tidak disajikan secara keseluruhan selama simulasi model, akan tetapi hanya disajikan kondisi maksimum (*worst case*) dari lama simulasi. Perlu diperhatikan bahwa nilai awal (*initial condition*) parameter yang dimodelkan di dalam badan air penerima di anggap nol, hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar nilai peningkatan konsentrasi limbah setelah masuk ke badan air tanpa bercampur dengan kondisi lingkungan, sehingga konsentrasi limbah hasil model merupakan nilai penambahan yang disebabkan oleh buangan limbah OLNG.

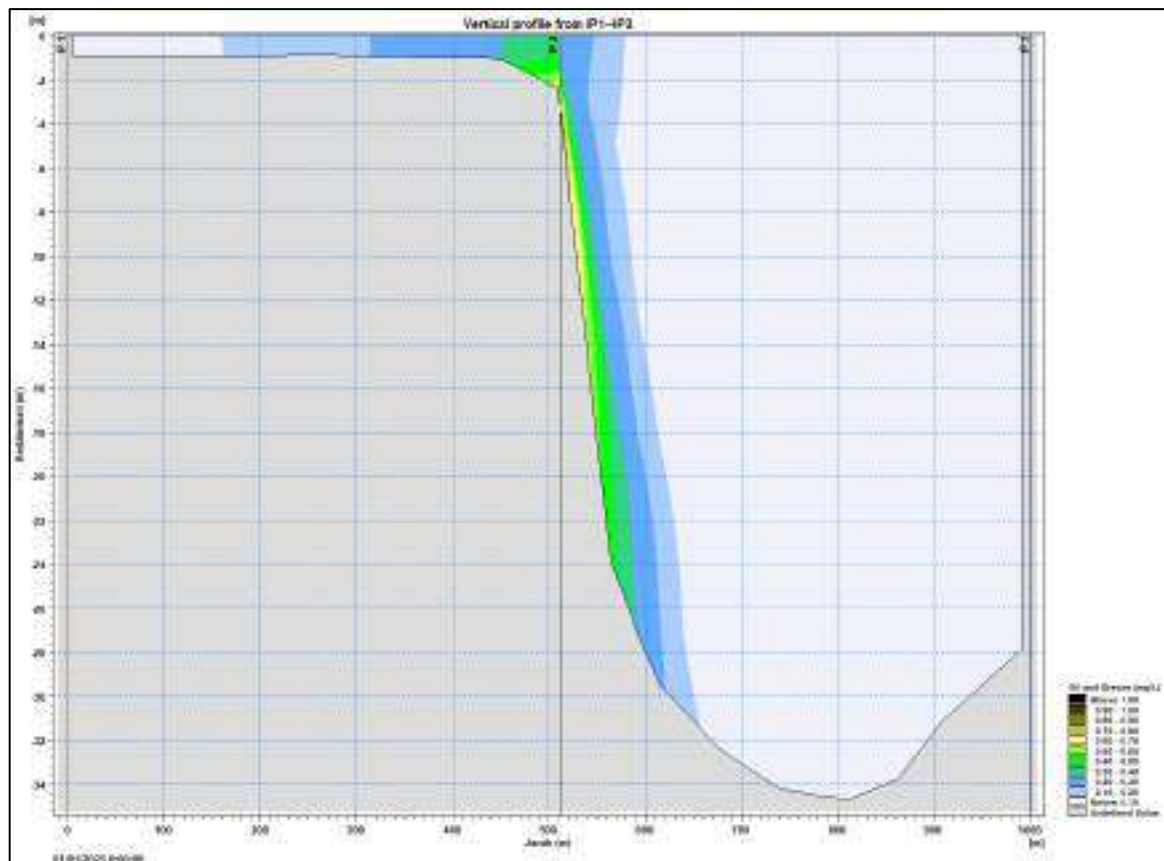
Hasil model skenario-2 berupa pola sebaran dan konsentrasi maksimum minyak dan lemak, total organic carbon, klorin residu, temperature, pH, BOD, COD, TSS, total nitrogen, mercury, cadmium, ammonia, total coliform, salinitas, fosfat dan nitrat berturut-turut disajikan dalam **Gambar 88** hingga **Gambar 151**. Secara umum berdasarkan keseluruhan gambar tersebut terlihat arah sebaran limbah pada keseluruhan musim tidak terlihat ada perbedaan signifikan, dimana pola sebaran hanya bergerak di sekitar titik buangan dan sedikit terdorong ke arah barat daya, timur laut hingga utara. Meskipun arah sebaran limbah terlihat sama, akan tetapi peningkatan konsentrasi pada masing-masing parameter dan musim terlihat bervariasi. Umumnya peningkatan konsentrasi limbah lebih tinggi terjadi pada musim barat dan peralihan I, sementara pada musim timur dan peralihan II terlihat lebih rendah.

Peningkatan konsentrasi minyak dan lemak maksimum pada musim barat (**Gambar 88** dan peralihan I (**Gambar 89**) sedikit lebih tinggi dibandingkan kedua musim lainnya, yakni maksimum mencapai 0.8 mg/L, sedangkan pada musim timur (**Gambar 90**) dan peralihan II (**Gambar 91**) hanya mencapai 0.7 mg/L. Baku mutu minyak dan lemak berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota laut adalah sebesar 1 mg/l, artinya hasil model peningkatan konsentrasi minyak dan lemak maksimum masih lebih rendah dari ketentuan baku mutu. Hasil analisis sampel air laut (rona awal) dari 18 stasiun sekitar lokasi buangan juga menunjukkan nilai yang tergolong kecil, yakni < 1 mg/l (di bawah deteksi limit). Jika dijumlahkan antara konsentrasi minyak dan lemak hasil model dan kondisi rona awal, maka nilainya masih tergolong kecil (di bawah baku mutu). Artinya pembuangan limbah minyak dan lemak ke laut dari aktivitas OLNG tidak menyebabkan peningkatan konsentrasi hingga melebihi baku mutu.

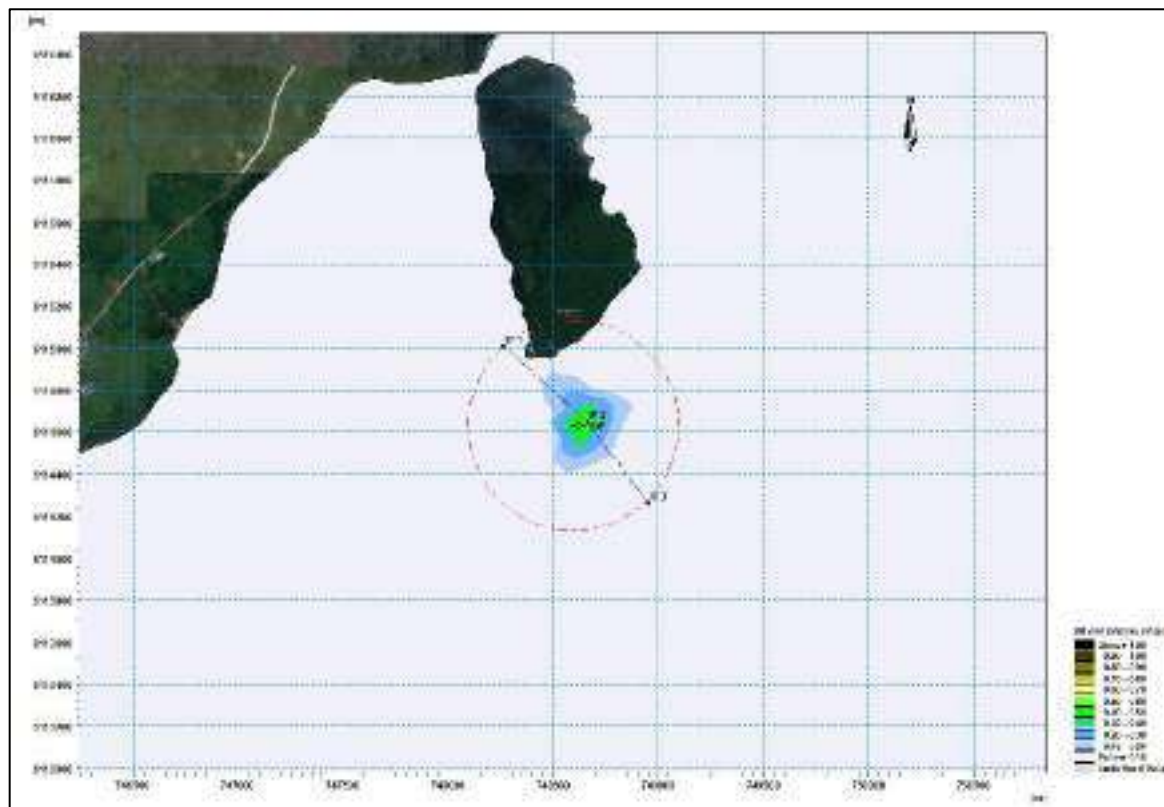
Parameter TOC merupakan parameter limbah bersumber dari *Treated wastewater from AOC Drains*. Peningkatan konsentrasi TOC maksimum pada musim barat (**Gambar 92**) dan peralihan I (**Gambar 93**) terlihat sama, yakni maksimum mencapai 3 mg/L, sementara hasil model musim timur (**Gambar 94**) dan peralihan II (**Gambar 95**) sedikit lebih kecil, yakni maksimum hanya 2 mg/L. Baku mutu menurut PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VI maupun Lampiran VIII tidak mensyaratkan TOC dalam parameter yang diatur, sehingga

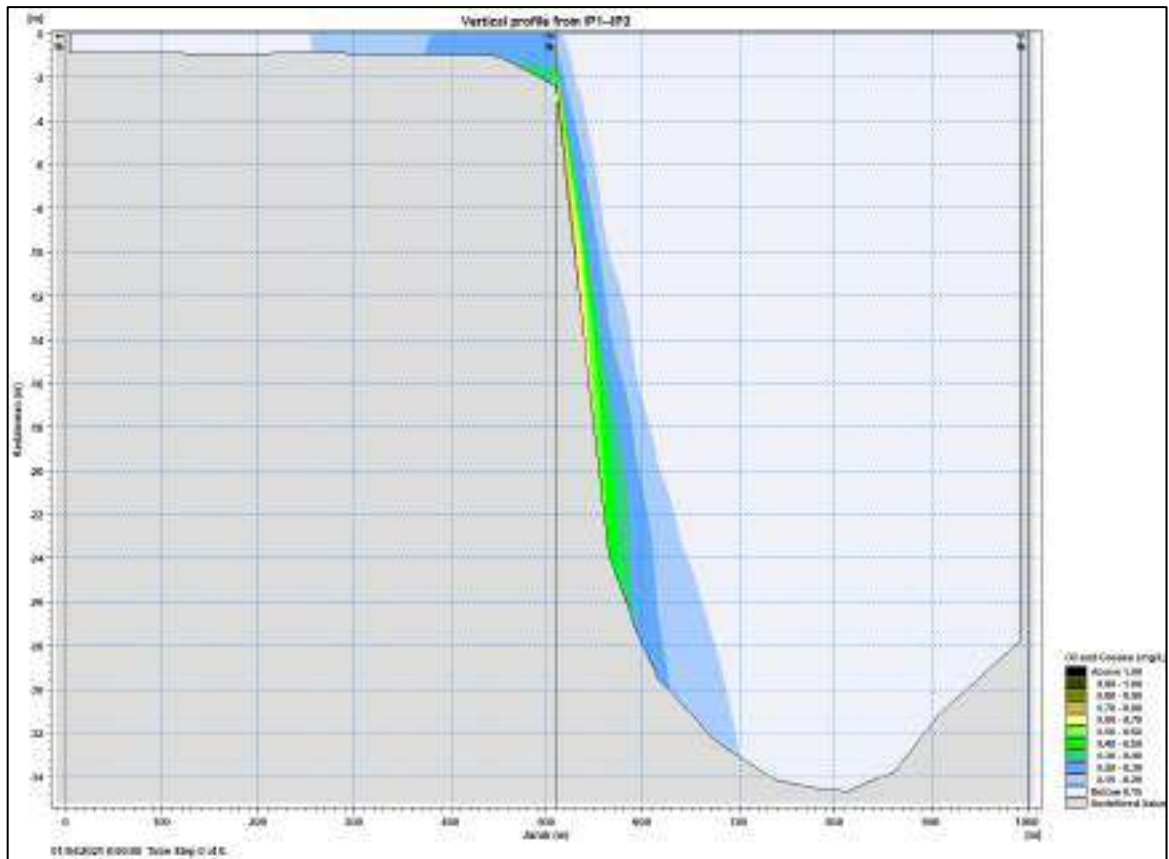
tidak terdapat rujukan atau pembanding untuk menentukan besar atau kecilnya peningkatan konsentrasi hasil model.



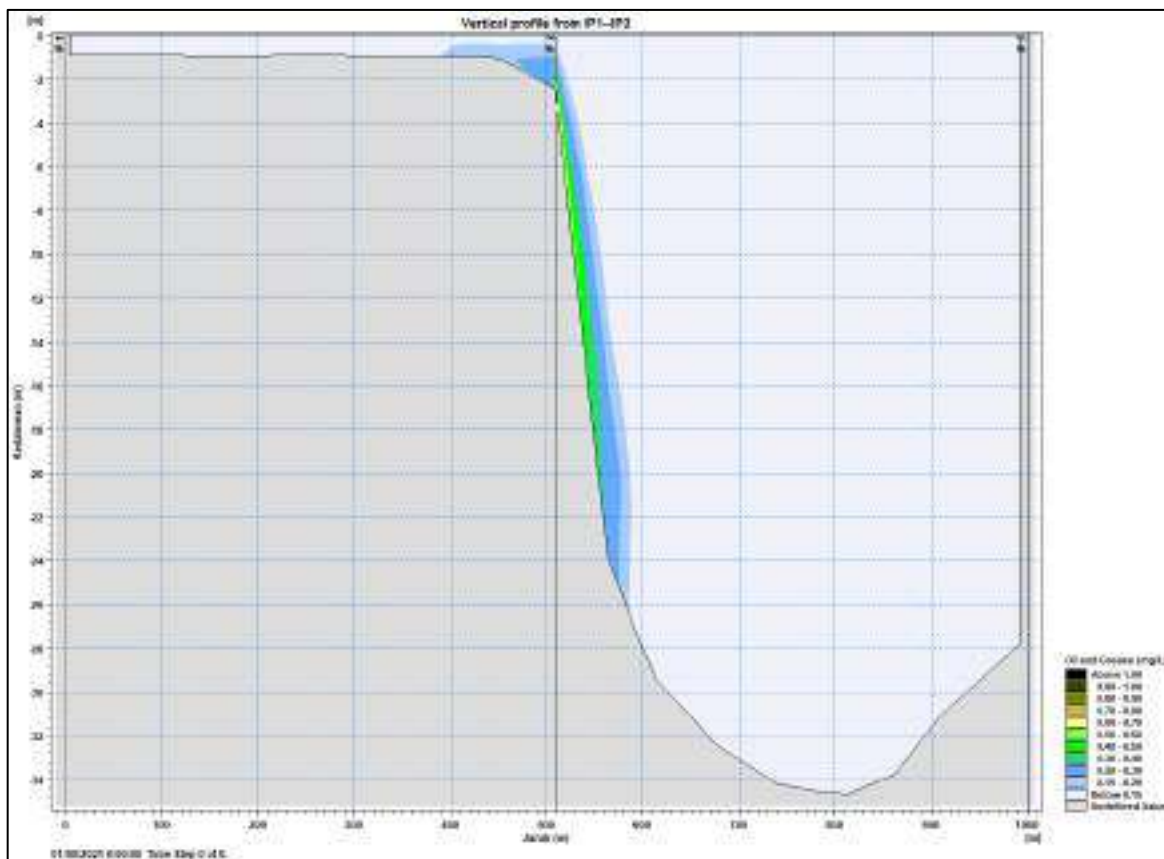
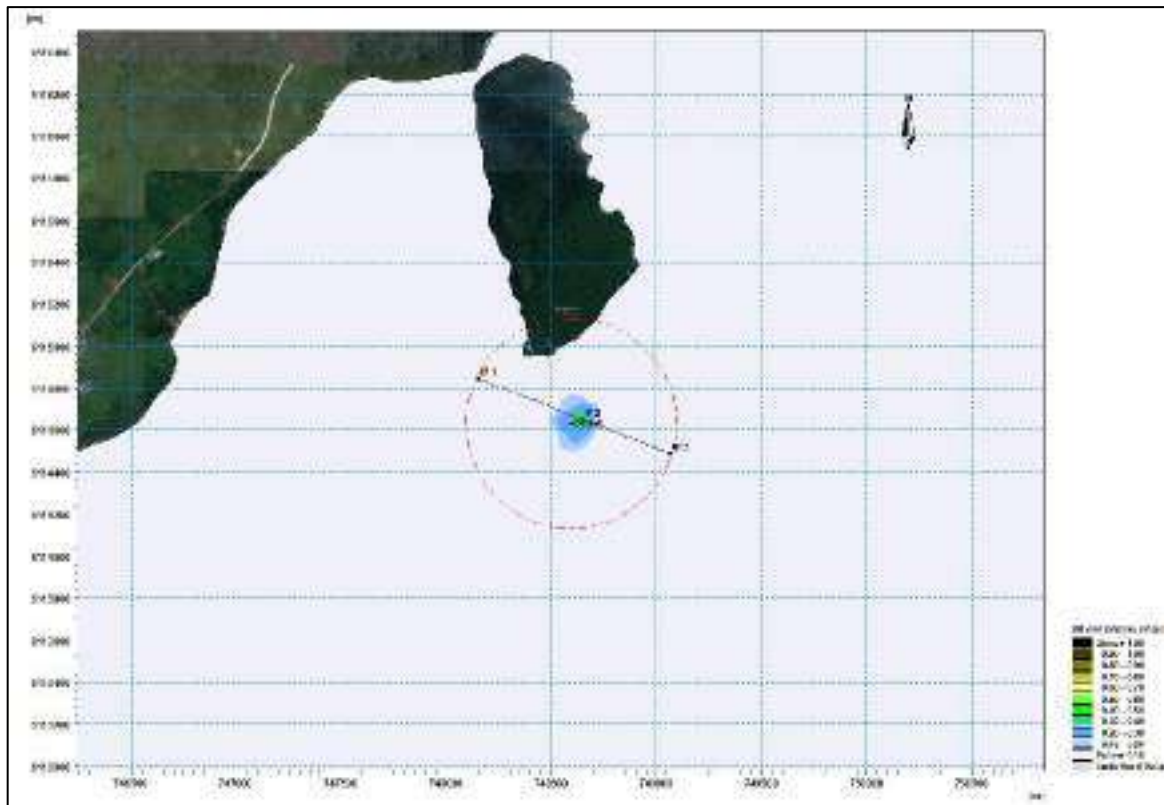


Gambar 88. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat

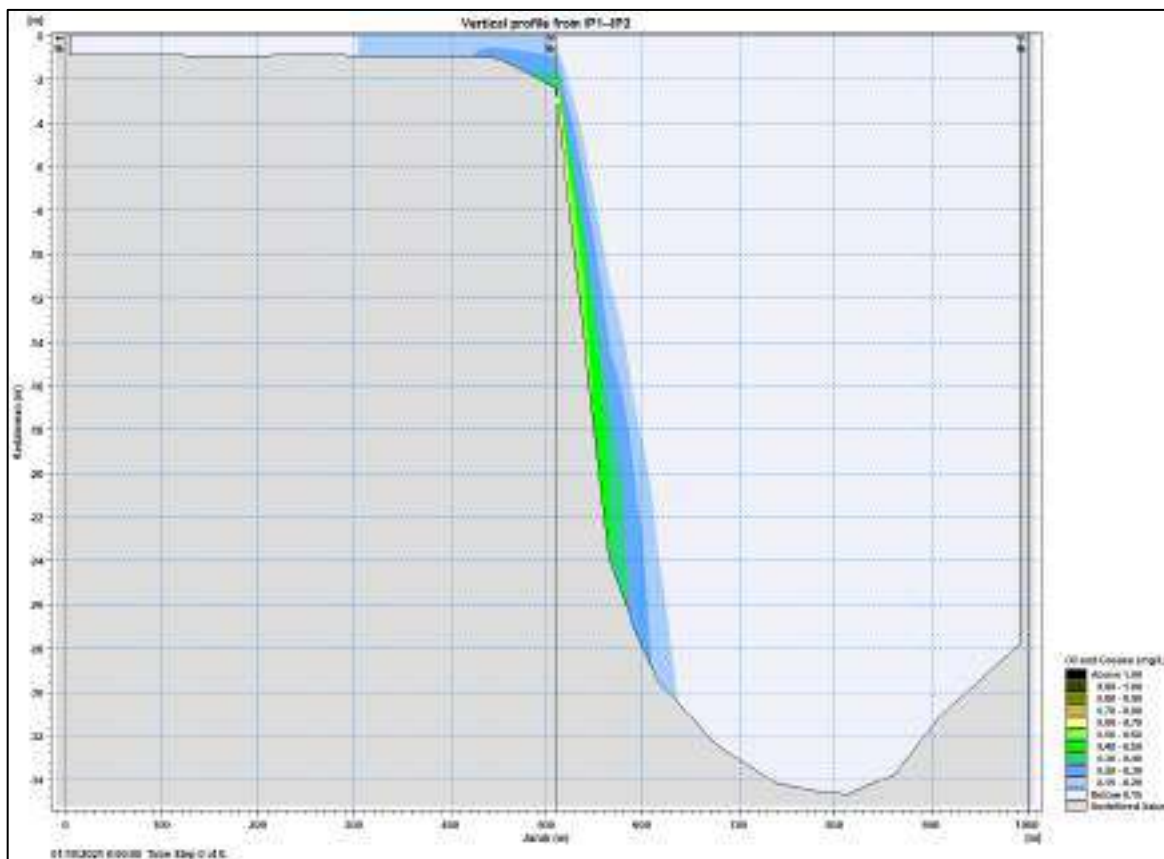
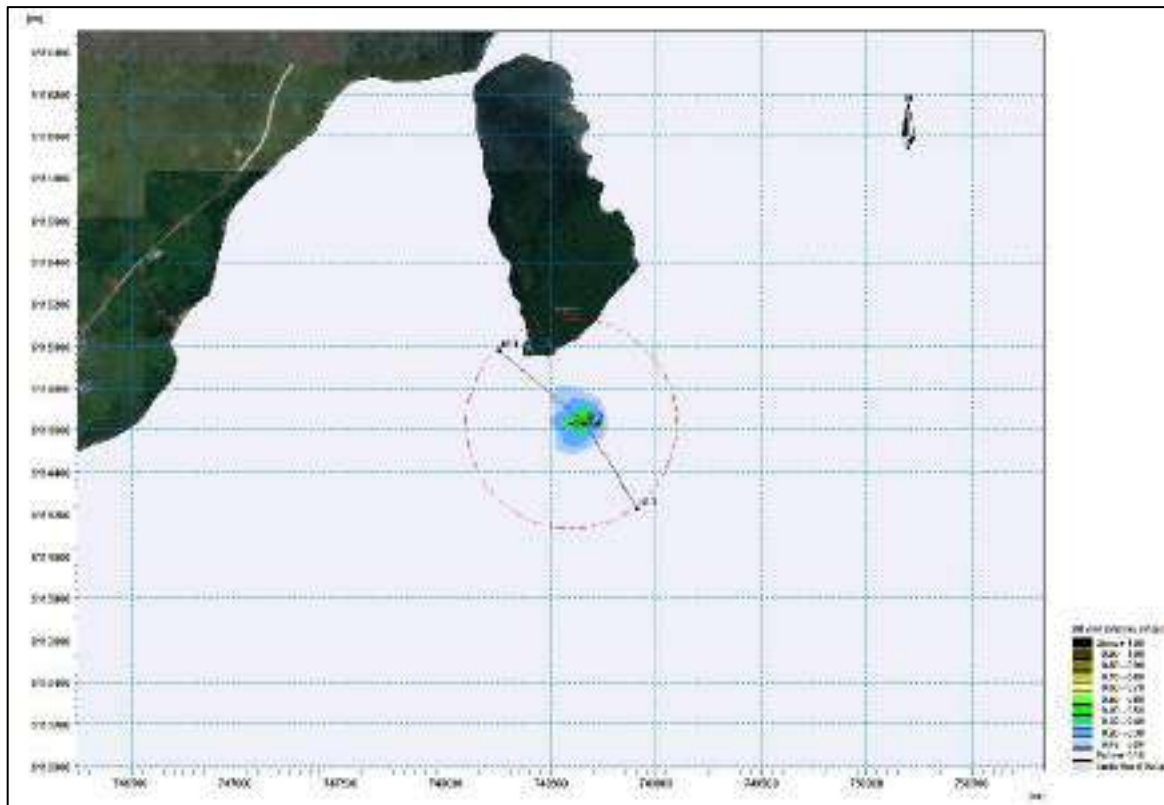




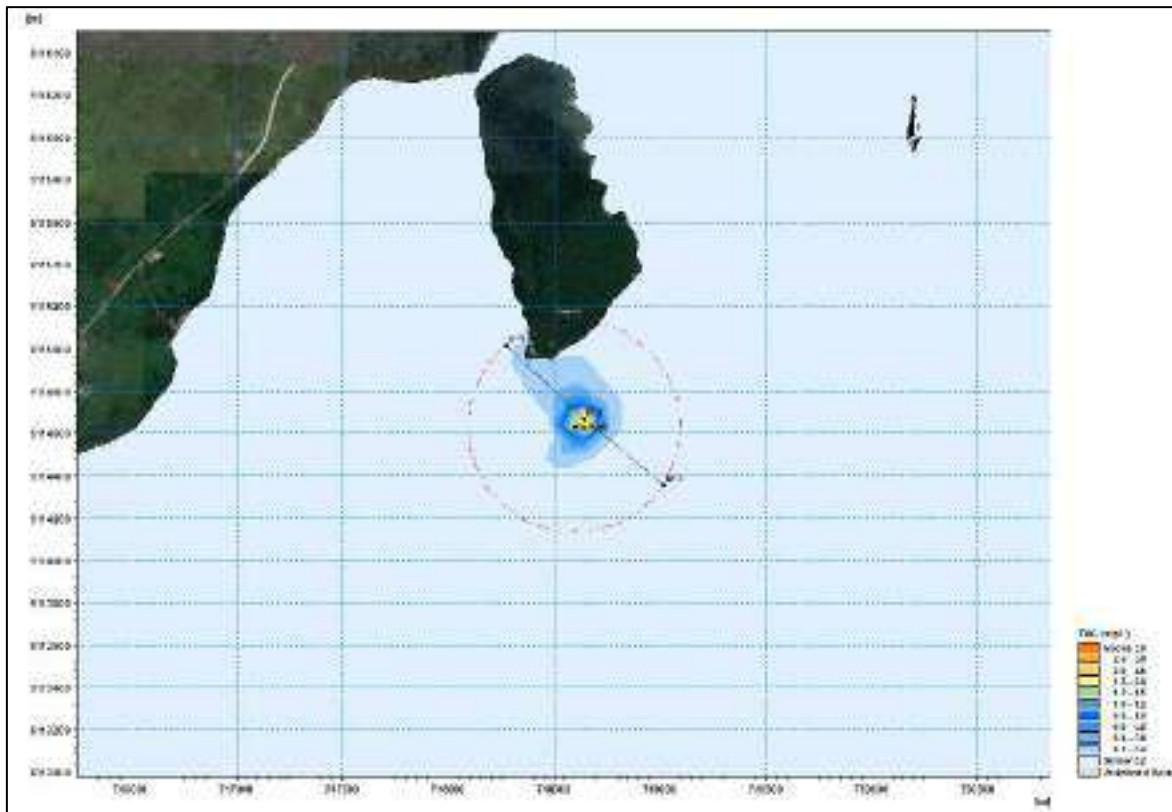
Gambar 89. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I

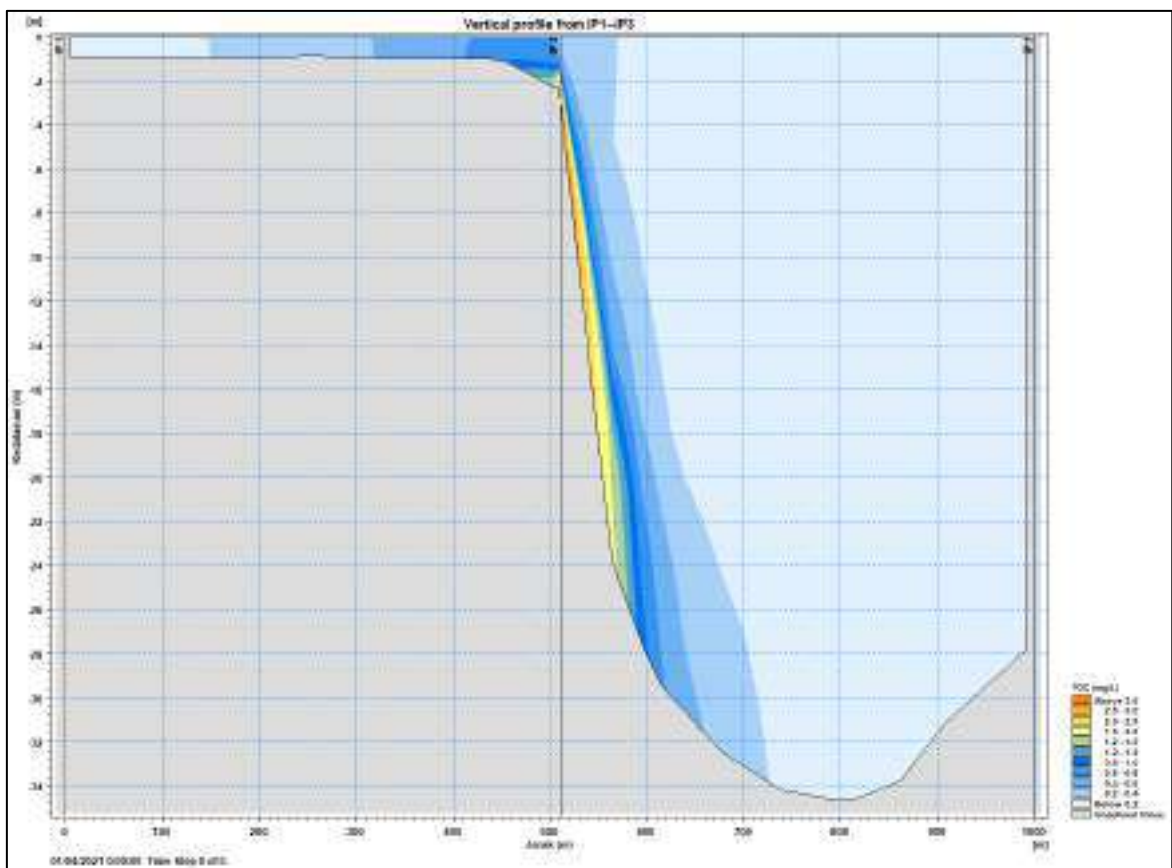
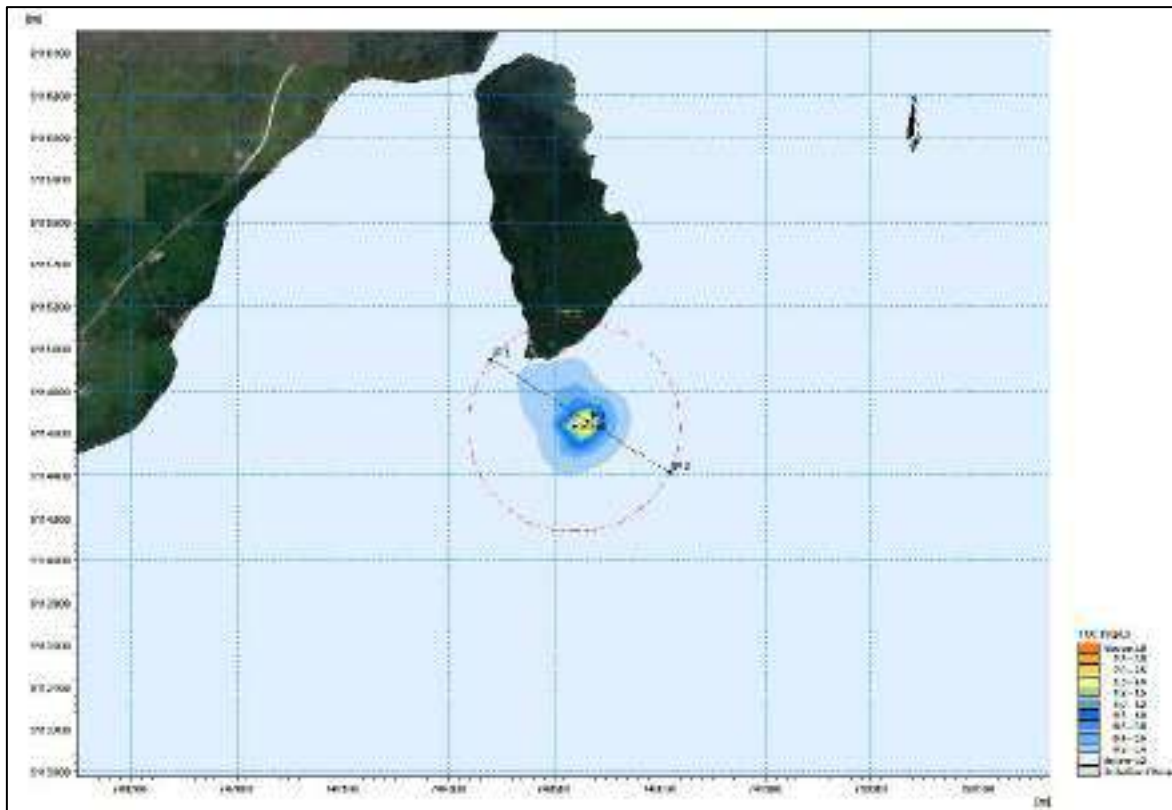


Gambar 90. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur

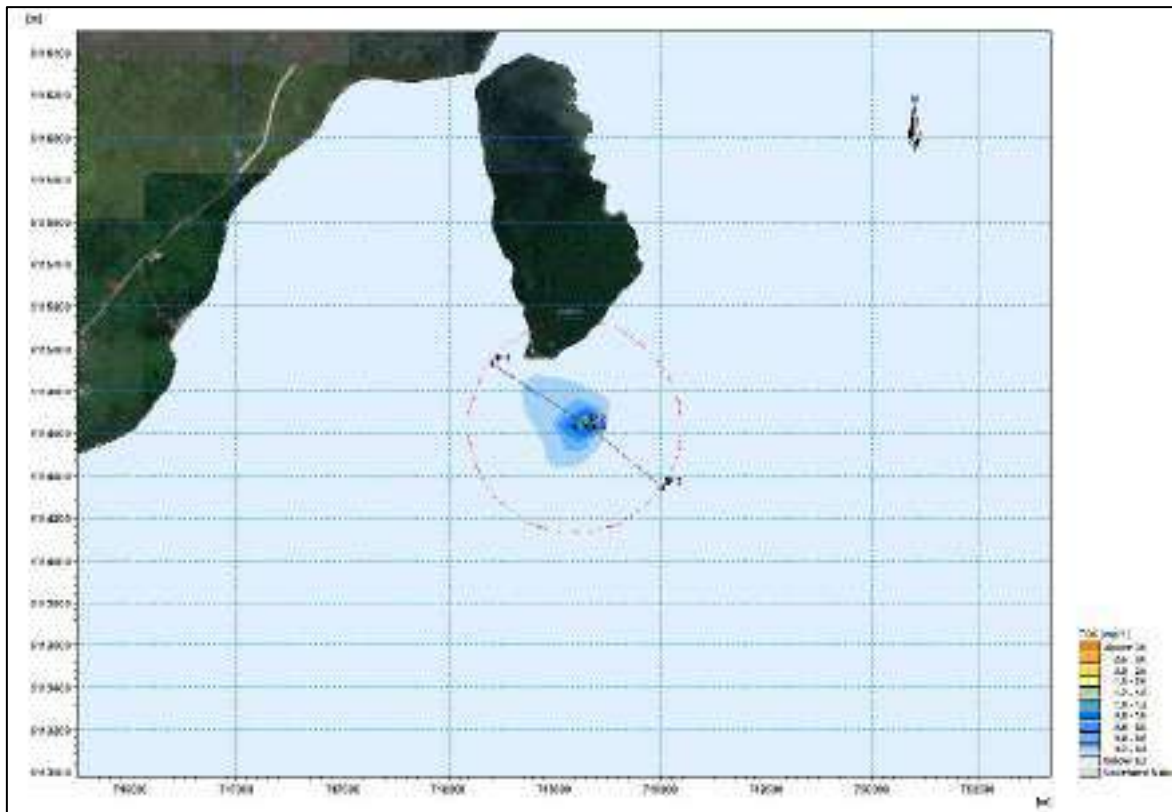


Gambar 91. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) minyak dan lemak maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II





Gambar 93. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TOC maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



Peningkatan konsentrasi residu klorin maksimum setelah masuk ke perairan tergolong rendah, dimana konsentrasi tertinggi yang terlihat saat musim barat (**Gambar 96**) dan musim peralihan I (**Gambar 97**) hanya mencapai 0.05 mg/l, sedangkan pada musim timur (**Gambar 98**) dan peralihan II (**Gambar 99**) hanya mencapai 0.04 mg/l. Baku mutu air laut berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII tidak mempersyaratkan parameter klorin, baik peruntukan untuk pelabuhan maupun untuk biota air. Menurut Hutomo dan Arinardi (1992) kandungan klorin sebesar 0.25-0.75 mg/l dapat mengakibatkan kematian zooplankton hingga 50%, sementara pada konsentrasi 0.5–5 mg/l akan mengakibatkan kematian sekitar 85–100%. Dengan melihat kecilnya konsentrasi hasil model maka dapat dikatakan bahwa buangan limbah residu klorin dari kegiatan OLNG tidak berdampak signifikan terhadap lingkungan perairan.

Nilai parameter suhu yang dimodelkan dalam kajian ini adalah nilai selisih antara nilai suhu buangan limbah dan suhu alami atau sering disebut dengan delta suhu. Berdasarkan hasil pengukuran suhu bulan Februari-September 2020, rata-rata suhu alami badan air penerima pada musim barat (Februari) sebesar 29.31 °C, musim peralihan I (April) sebesar 29.54 °C, musim timur (Agustus) sebesar 26.26 °C dan musim peralihan II sebesar 26.59 °C, sementara limbah air bahang (effluent) sebesar 45 °C. Hasil perhitungan nilai delta temperature yang digunakan sebagai input pemodelan diperlihatkan dalam **Tabel 14**.

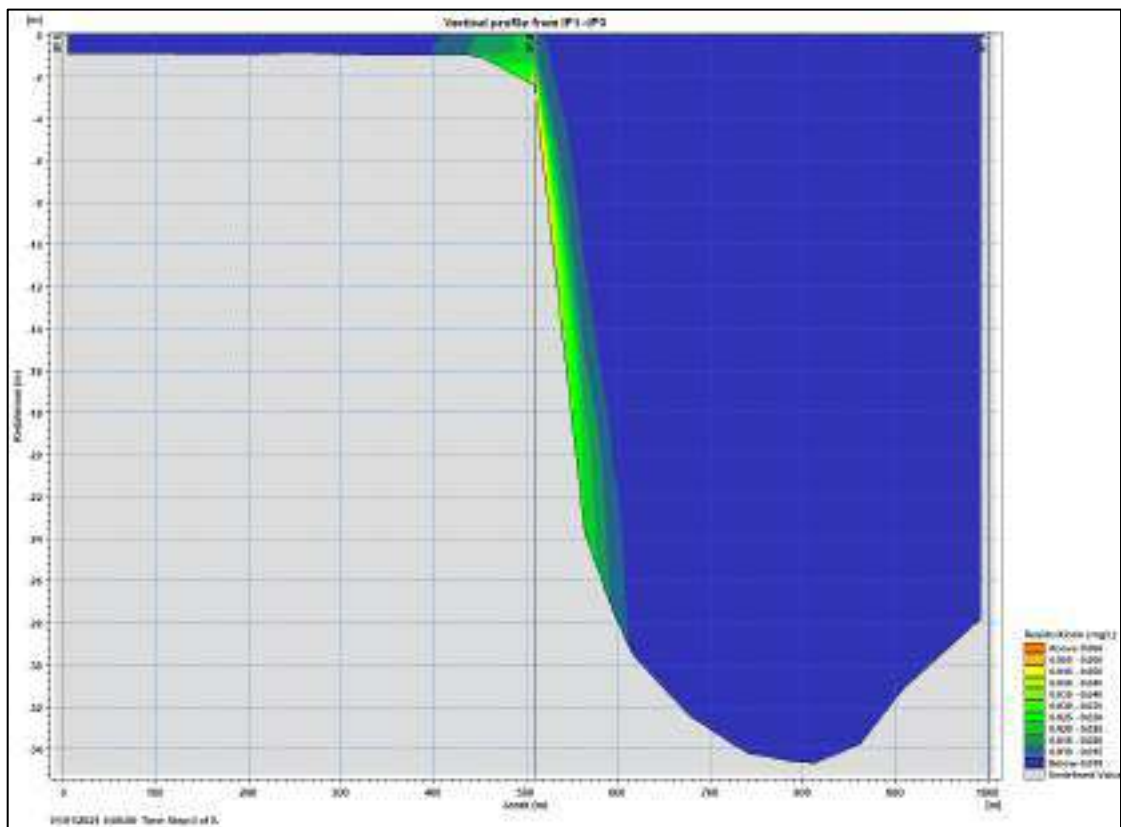
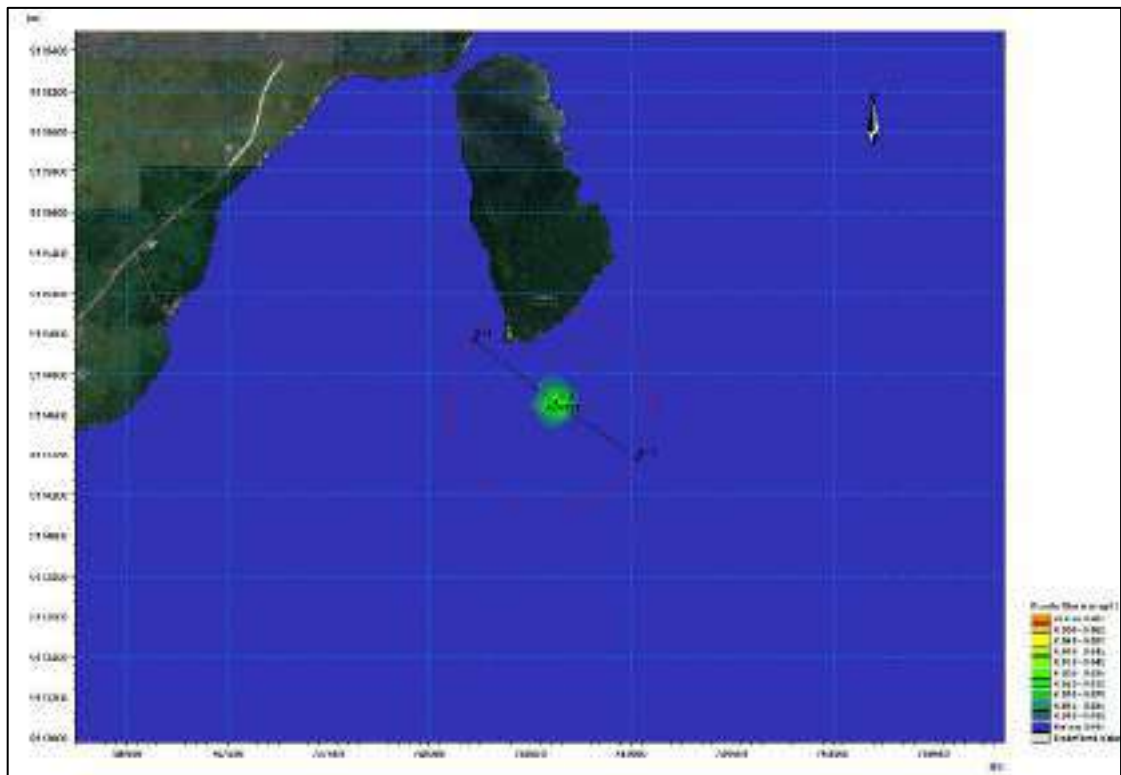
Tabel 15. Hasil perhitungan delta temperature yang digunakan sebagai input model

Musim	Temperature [°C]		Delta temperature [°C]
	existing	Effluent	
Barat (Februari)	29.31	45	15.69 ~ 16
Peralihan I	29.54	45	15.46 ~ 15
Timur	26.26	45	18.74 ~ 19
Peralihan II	26.59	45	18.41 ~ 18

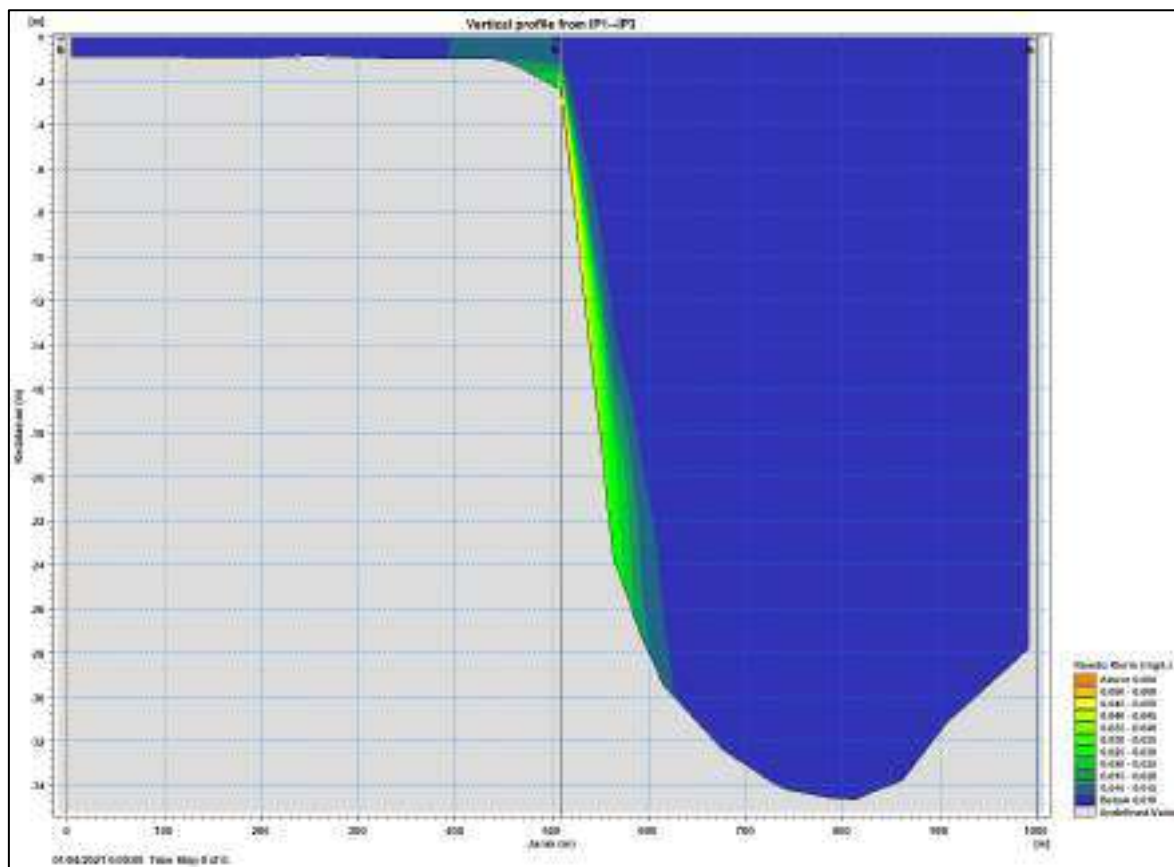
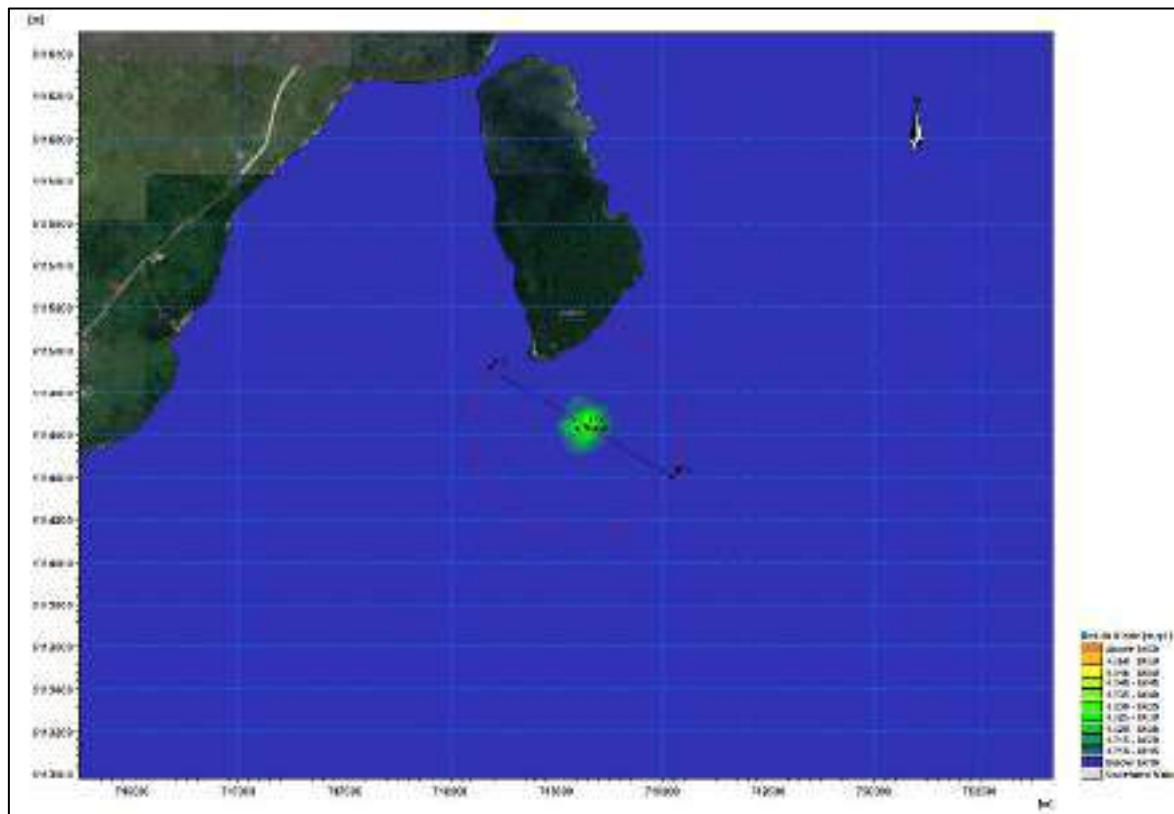
Hasil model sebaran delta suhu maksimum pada keseluruhan musim terlihat rendah. Delta suhu maksimum pada musim barat (**Gambar 100**) dan musim peralihan I (**Gambar 101**) hanya mencapai 0.6°C, sementara pada musim timur (**Gambar 102**) dan musim peralihan II (**Gambar 103**) sedikit lebih kecil, yakni 0.5°C. Bila mengacu pada baku mutu PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII, nilai delta suhu hasil model tersebut tergolong rendah. Hal ini dikarenakan baku mutu perubahan suhu yang diperbolehkan berdasarkan peraturan tersebut adalah sebesar 2°C dari suhu alami, sedangkan perubahannya (delta suhu) mencapai 0.6°C dan 0.4°C

Peningkatan pH maksimum baik kondisi musim barat (**Gambar 104**) dan peralihan I (**Gambar 105**) mencapai 0.035, pada musim timur (**Gambar 106**) sedikit lebih kecil, yakni maksimum hanya mencapai 0.02. Sementara itu pada musim peralihan II (**Gambar 107**) maksimum hanya mencapai 0.025. Berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII baku mutu pH untuk biota laut adalah berkisar 7-8.5, artinya pH diperbolehkan terjadi perubahan sampai dengan 1.5. Hasil analisis sampel air laut dari 18 titik sekitar lokasi kajian nilai pH rata-rata saat musim kemarau diperoleh 8.18, sementara pada musim hujan diperoleh 8.1.

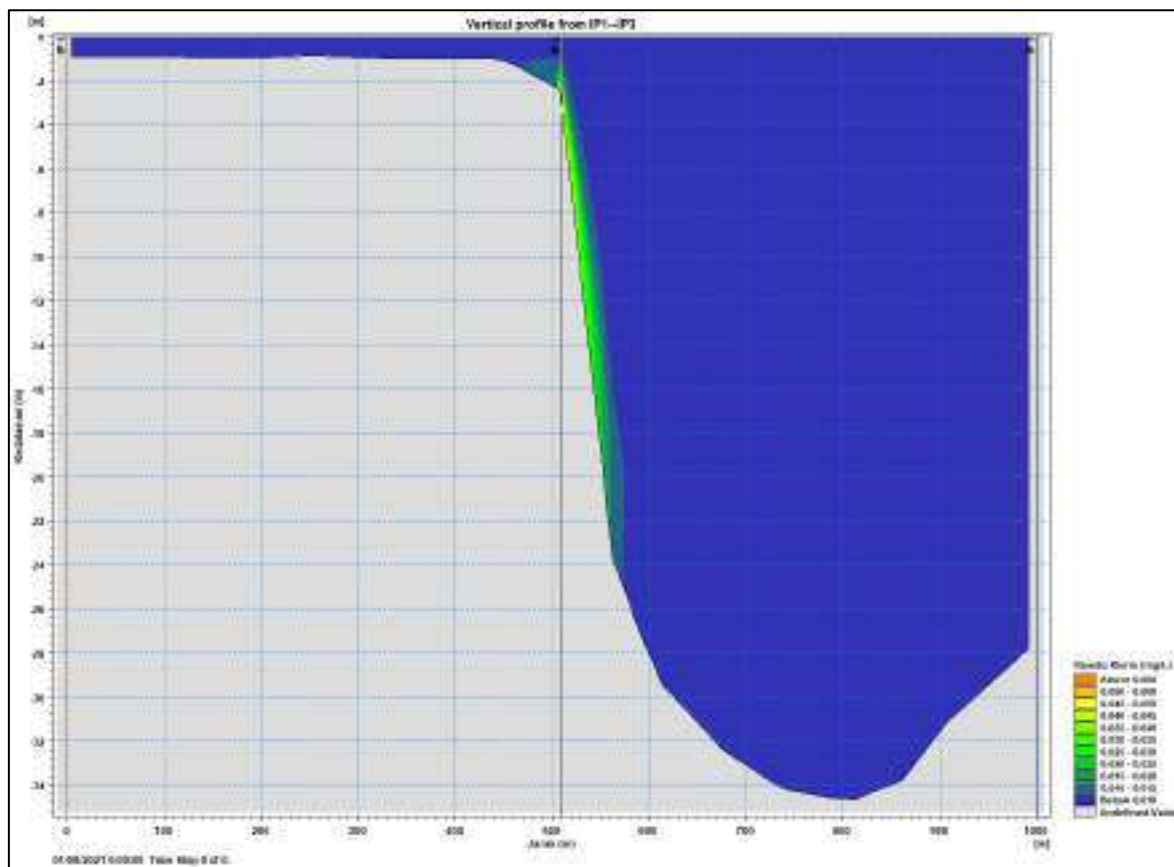
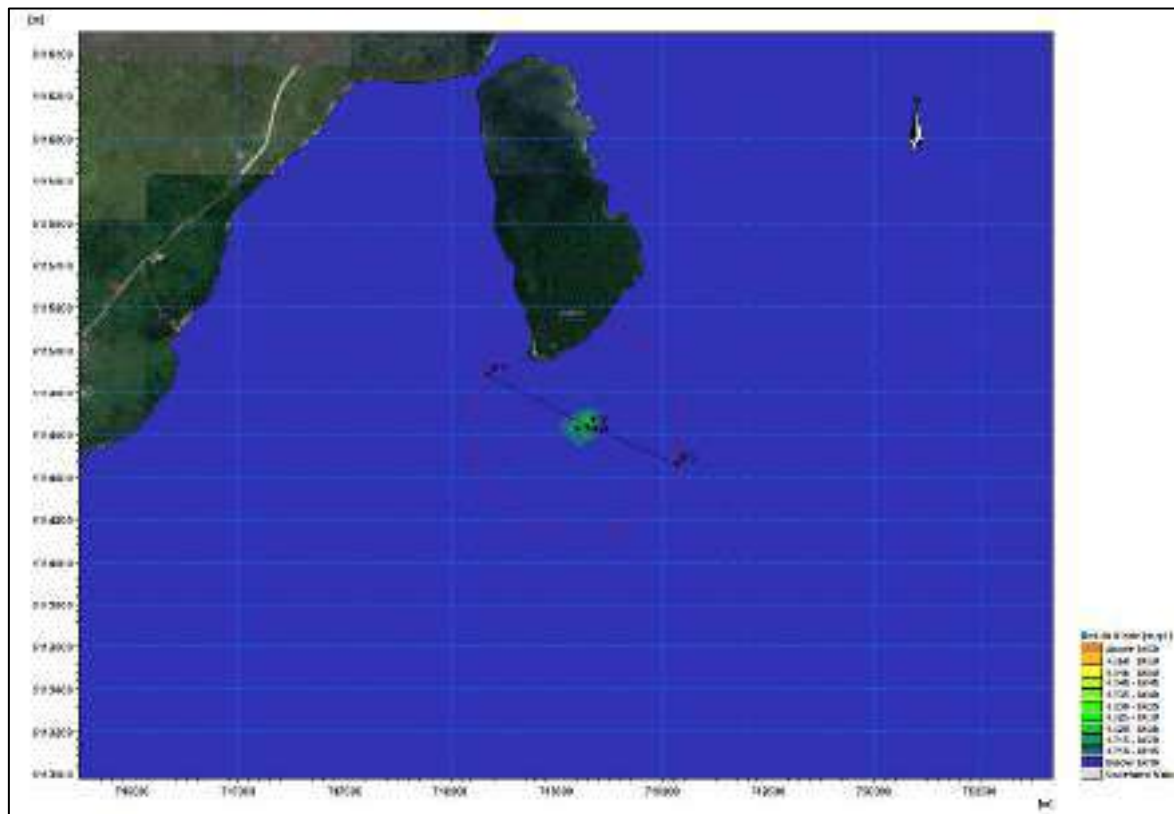
Jika dijumlahkan nilai pH rona awal dan pH hasil model, misalnya $8.18+0.035$ maka hanya diperoleh 8.21, artinya total nilai hasil penjumlahan masih dalam interval baku mutu. Hal ini menunjukkan nilai pH buangan dari limbah setelah masuk ke perairan tergolong rendah atau tidak menyebabkan nilai di badan air meningkat hingga melebihi baku mutu



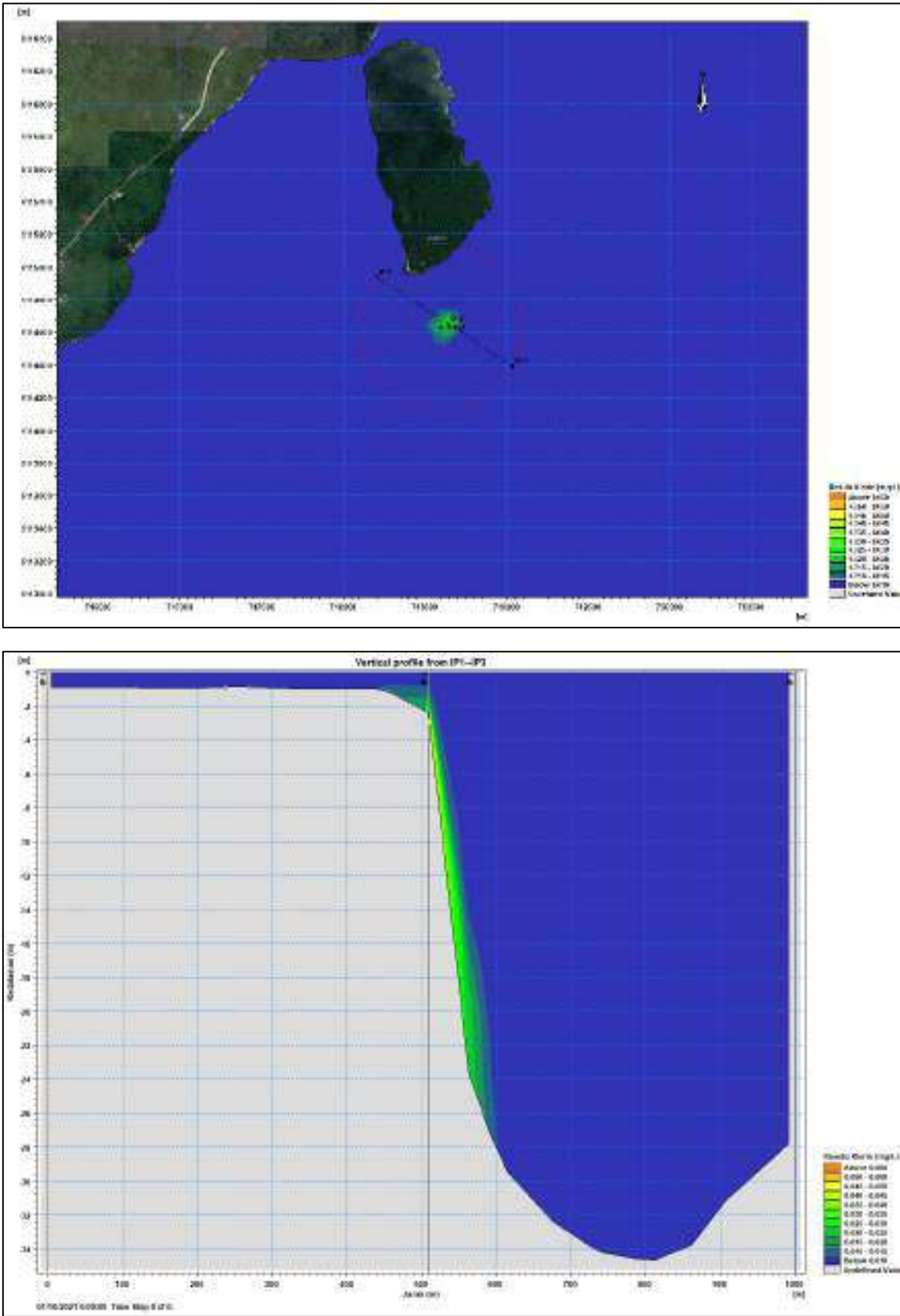
Gambar 96. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



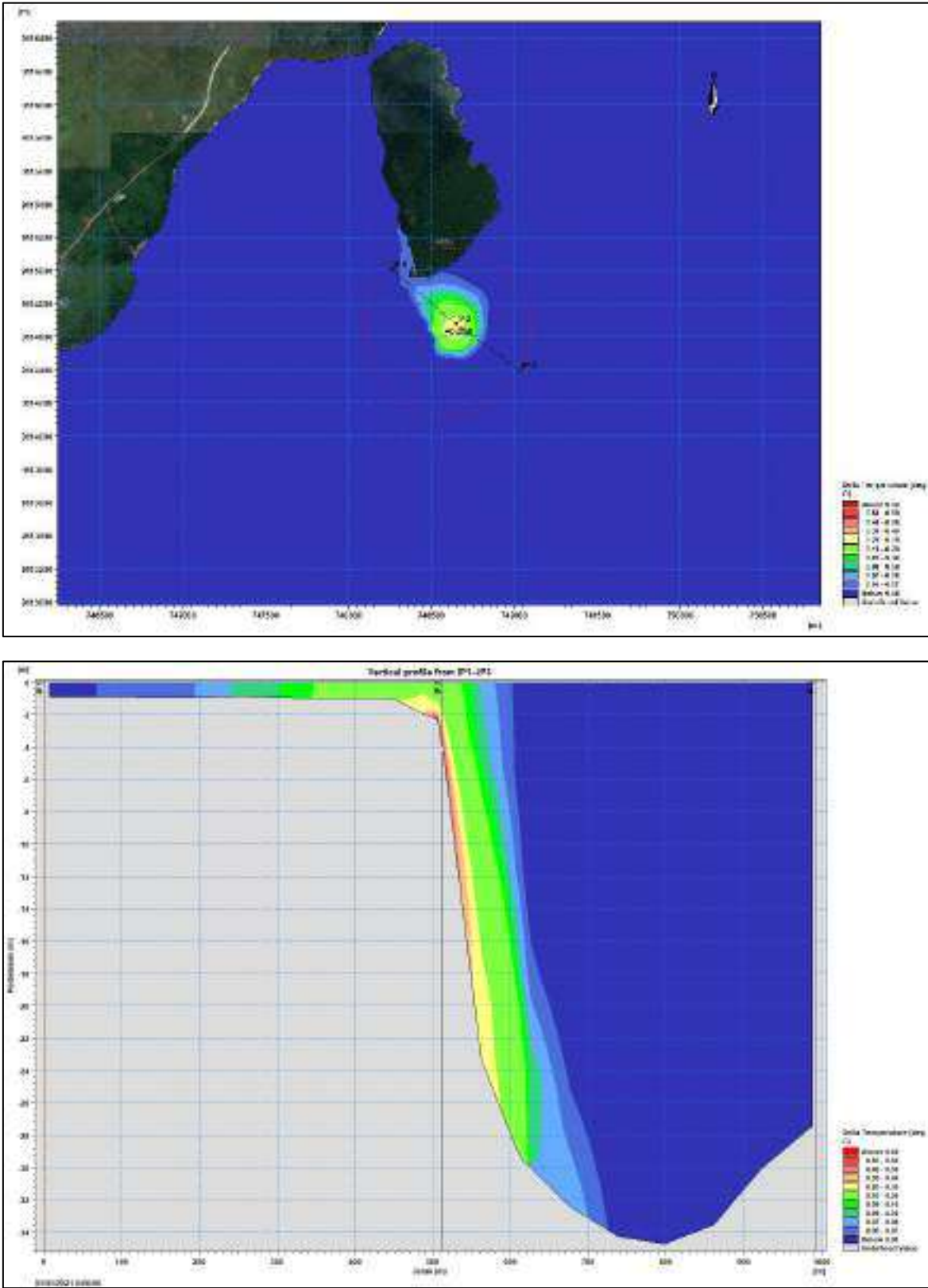
Gambar 97. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



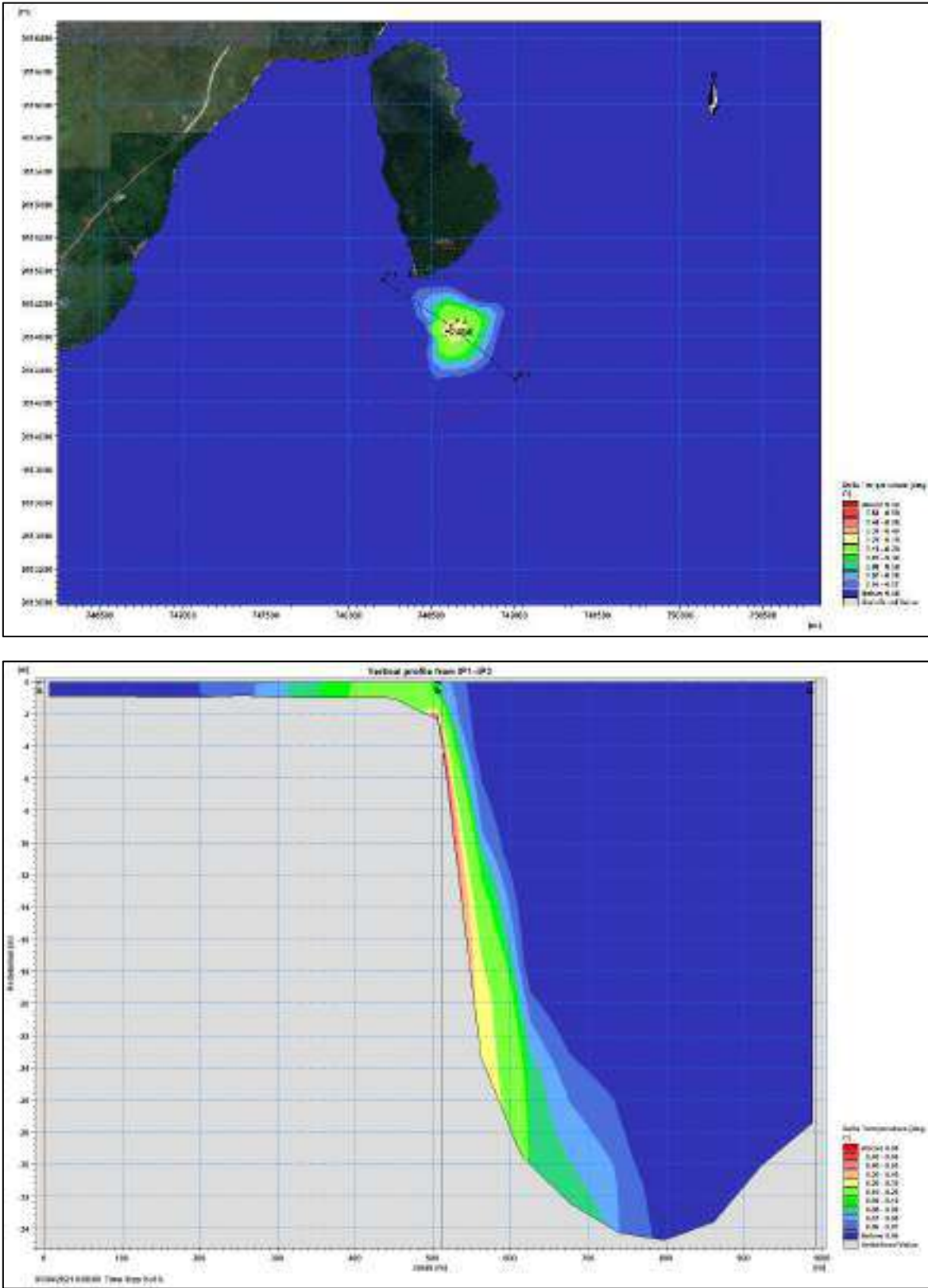
Gambar 98. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



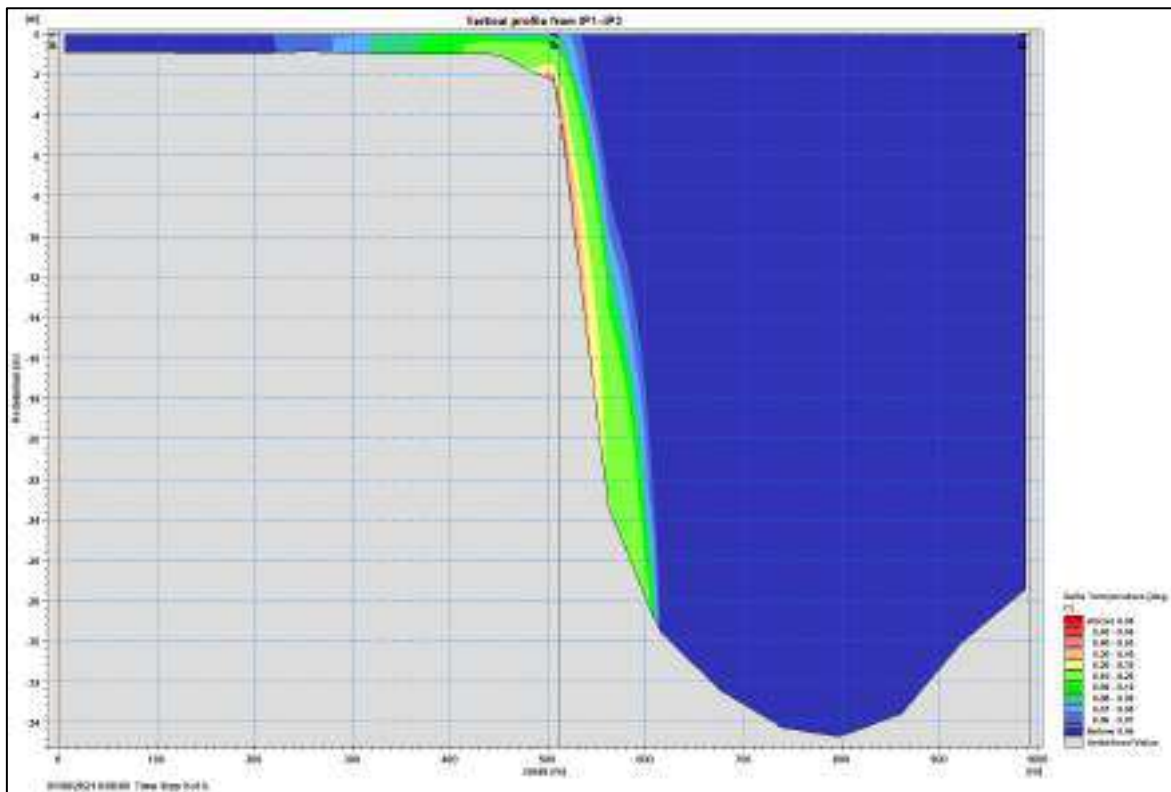
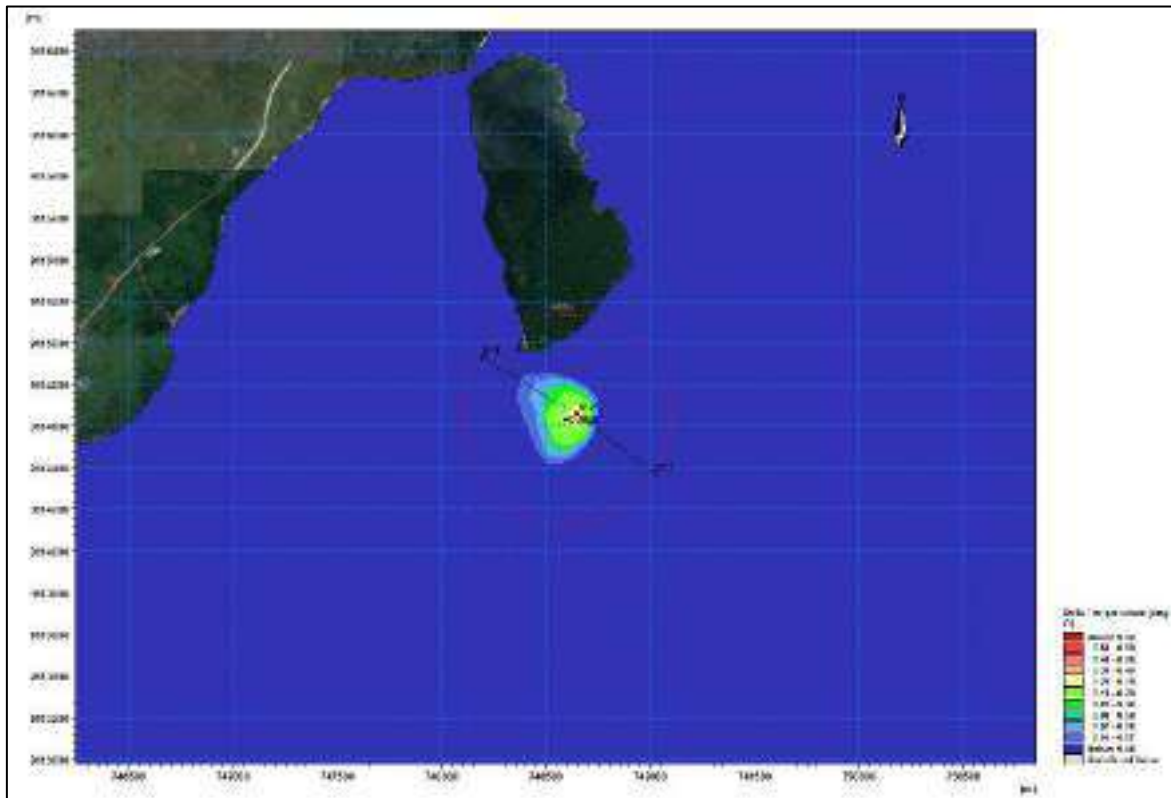
Gambar 99. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) klorin residu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II



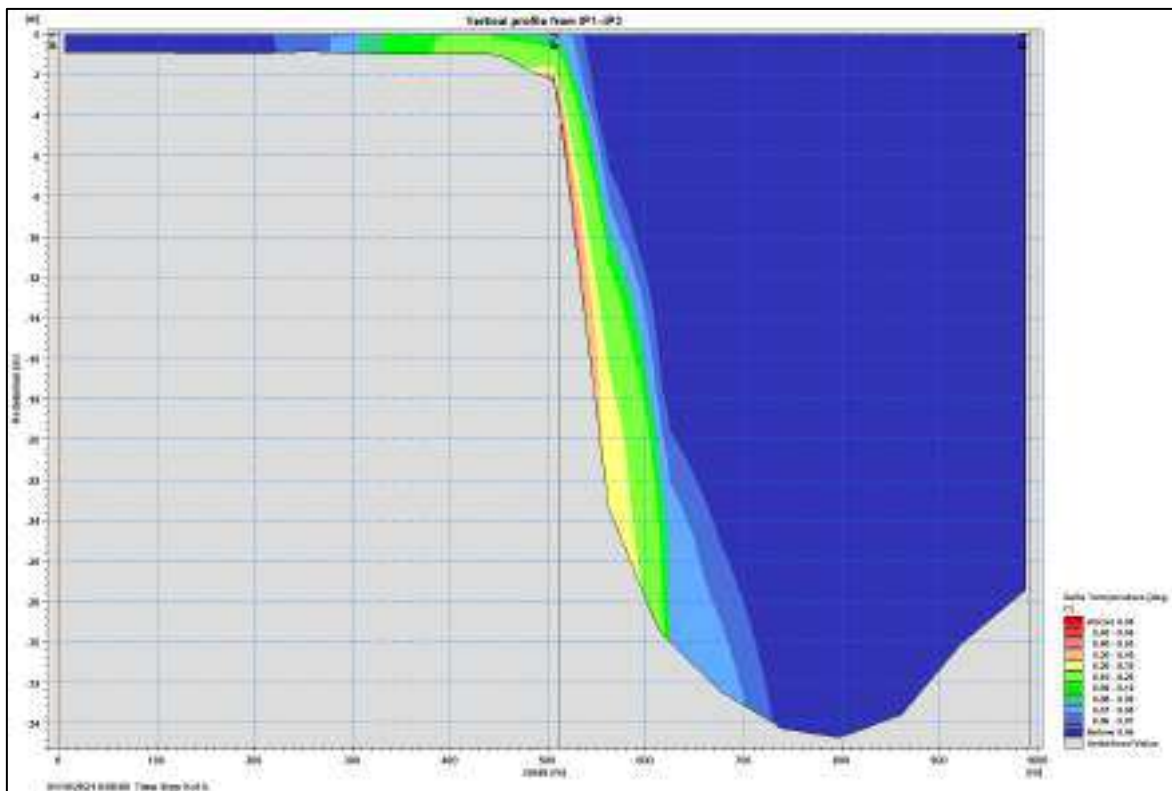
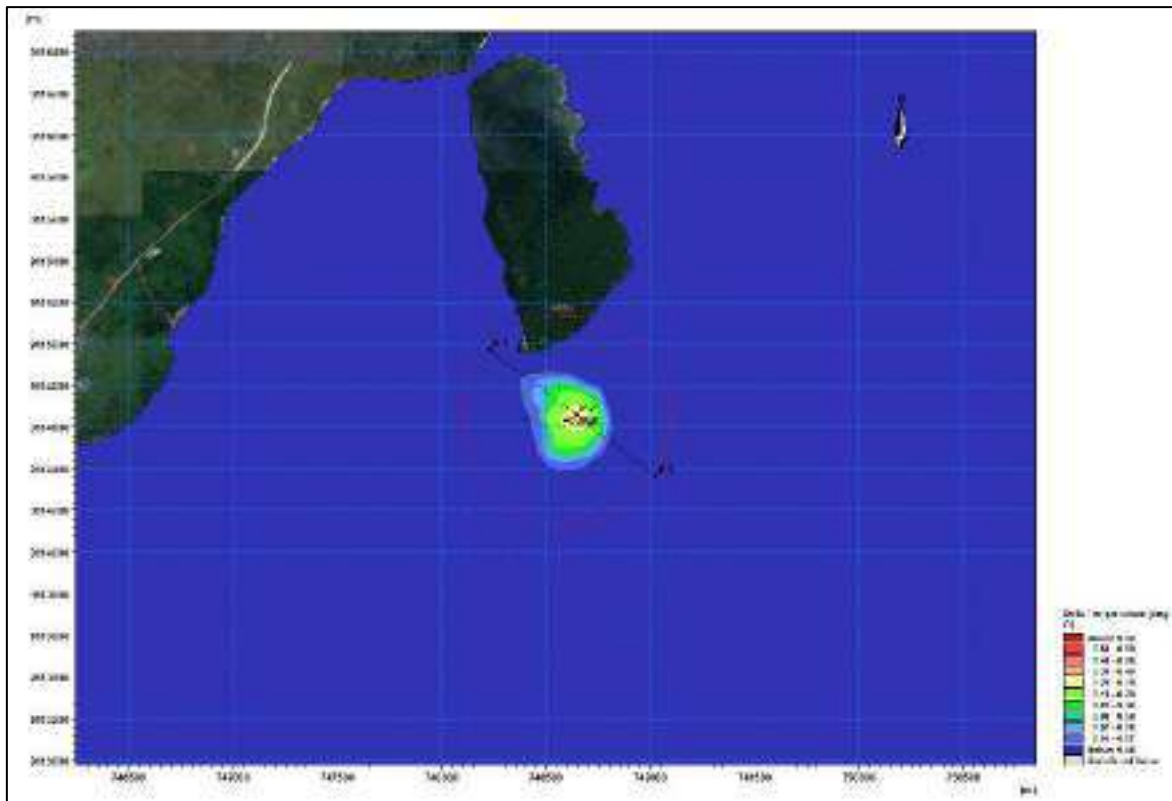
Gambar 100. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



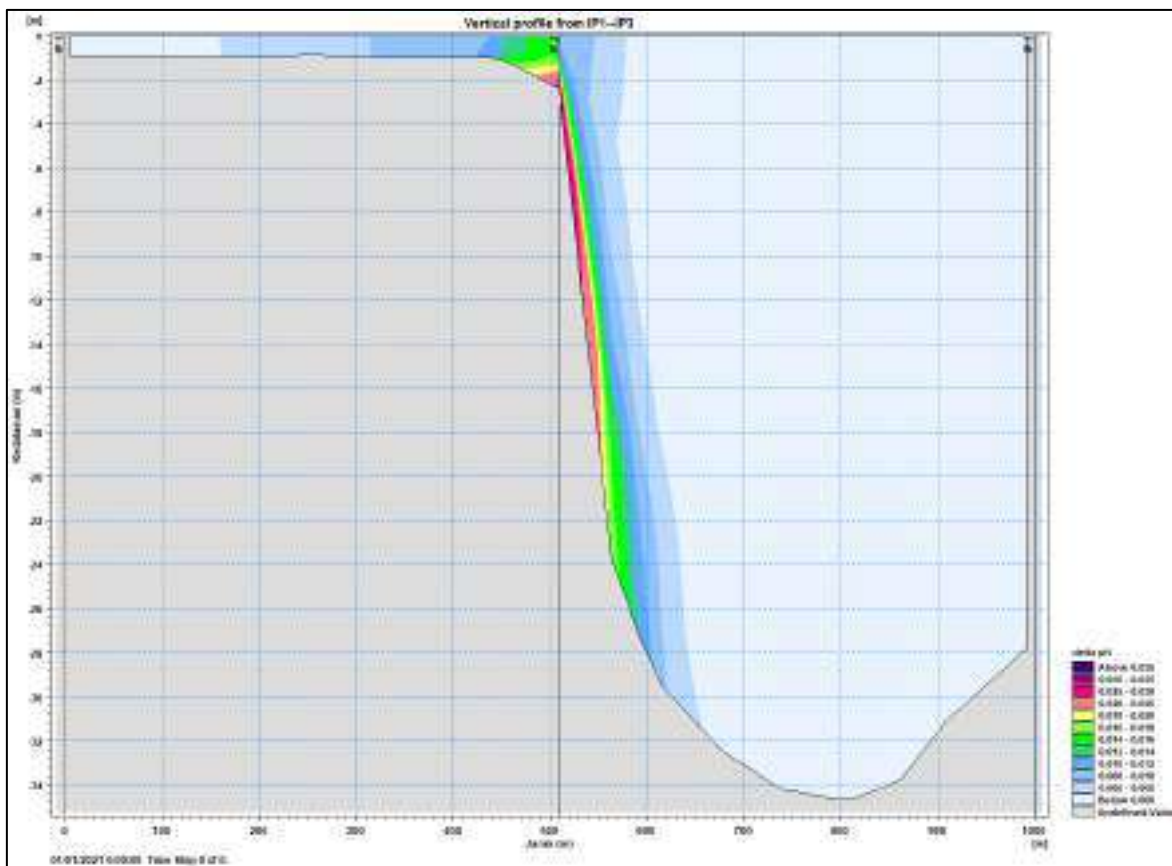
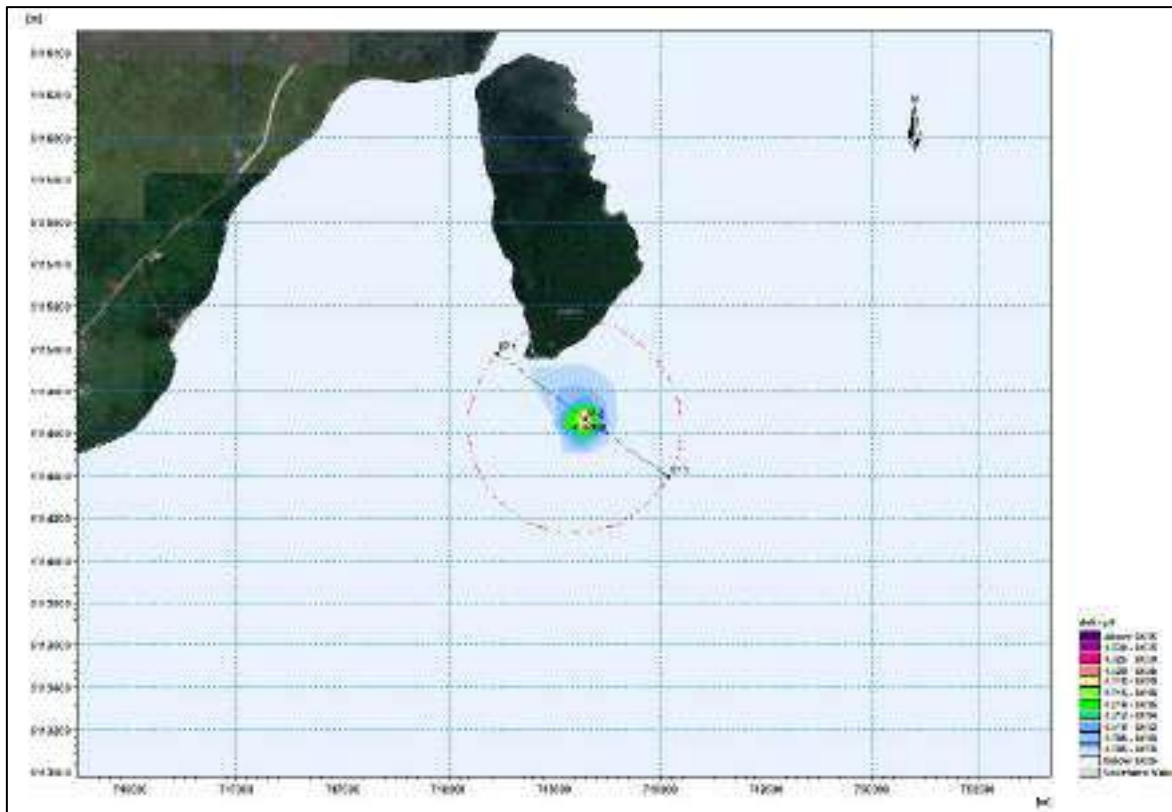
Gambar 101. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



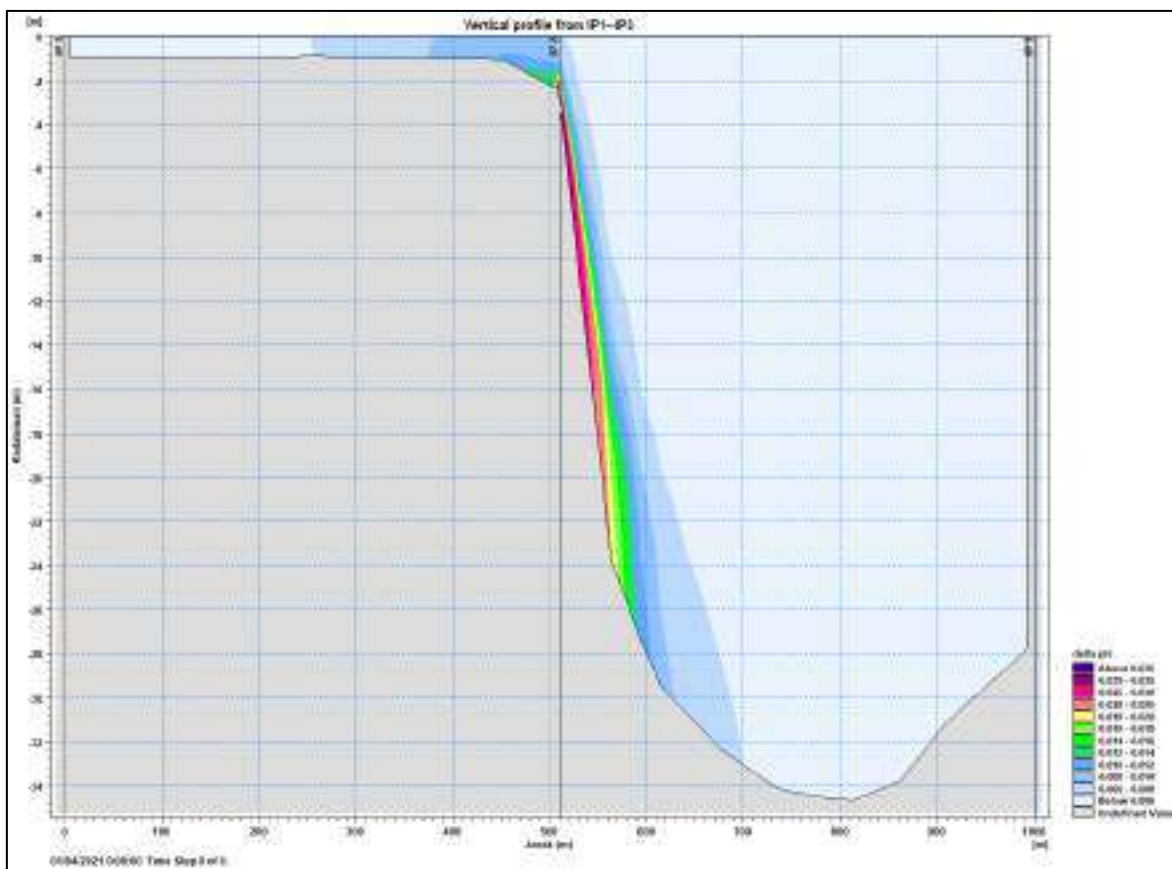
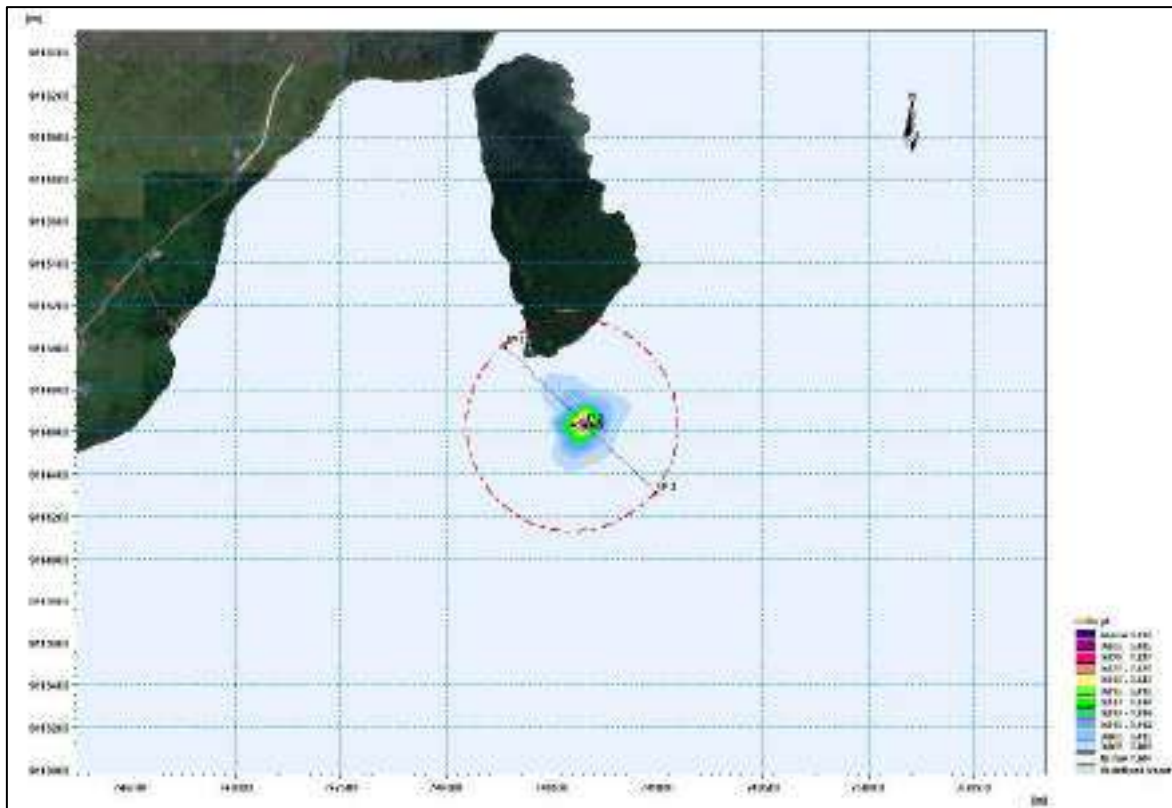
Gambar 102. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



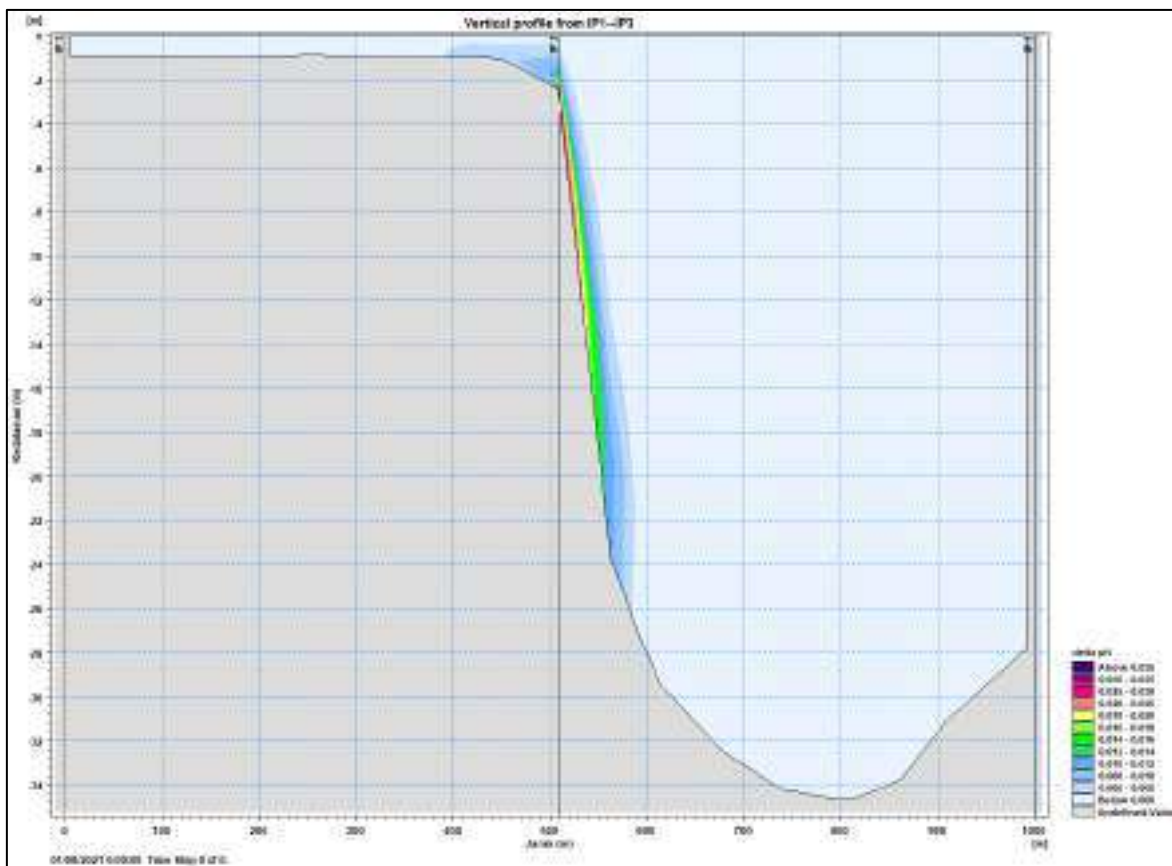
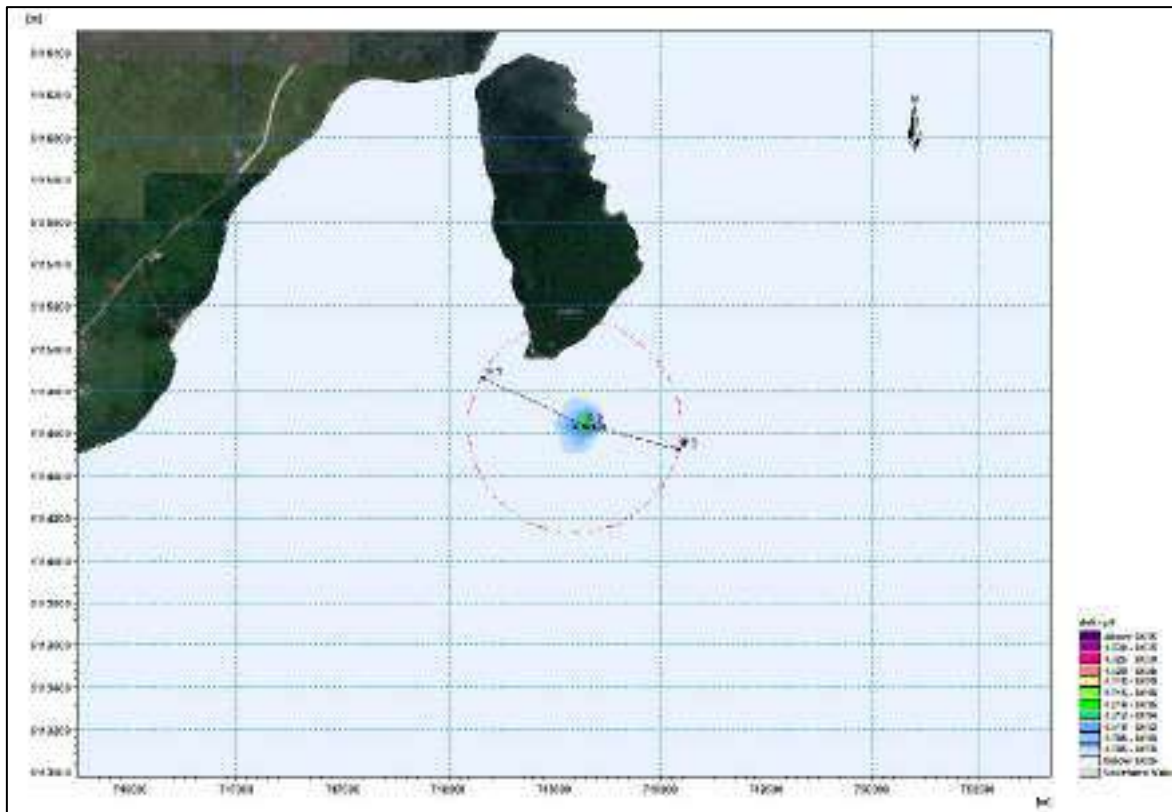
Gambar 103. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) delta suhu maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II



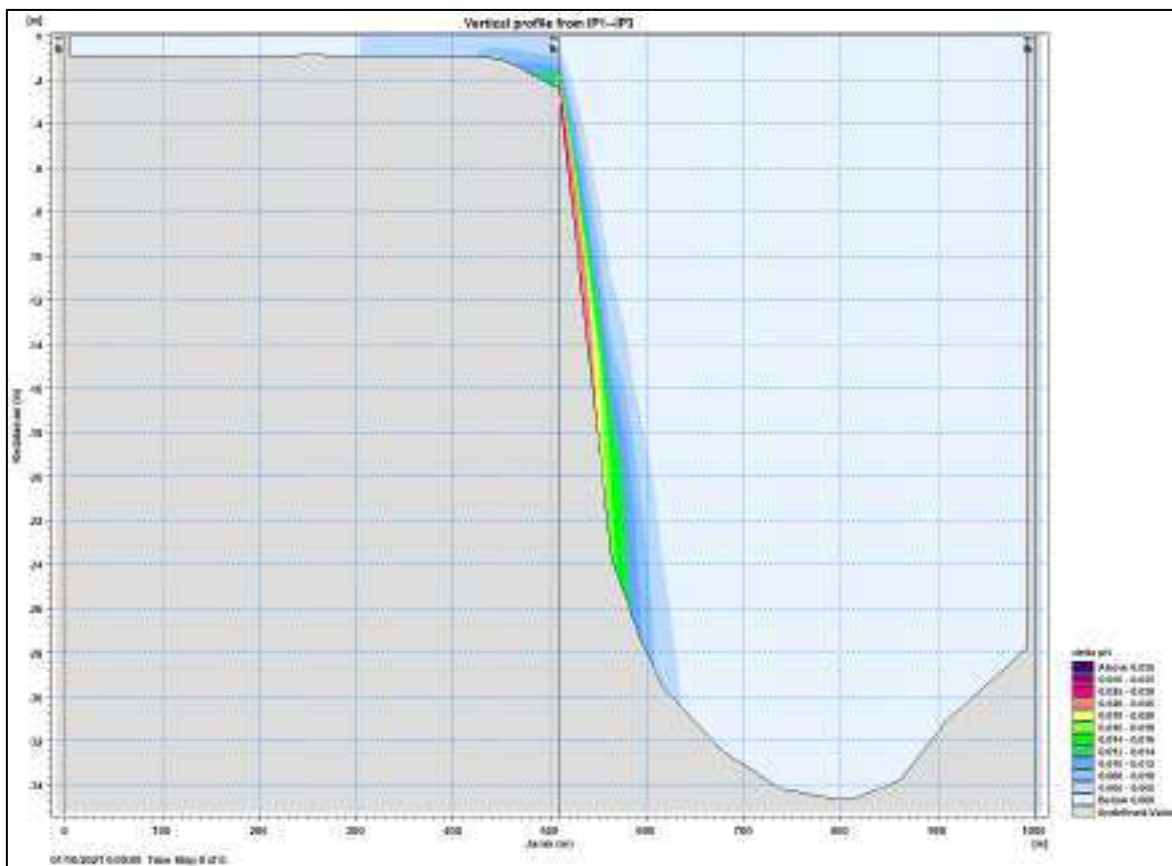
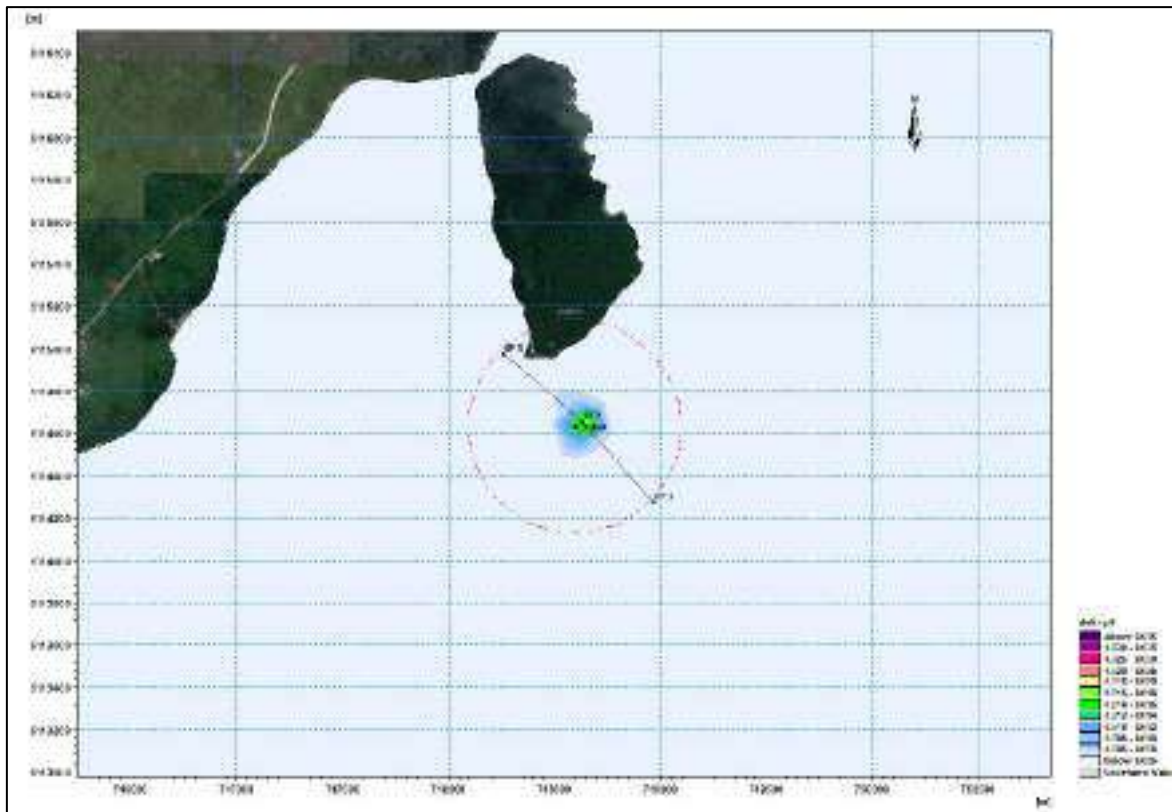
Gambar 104. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



Gambar 105. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



Gambar 106. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



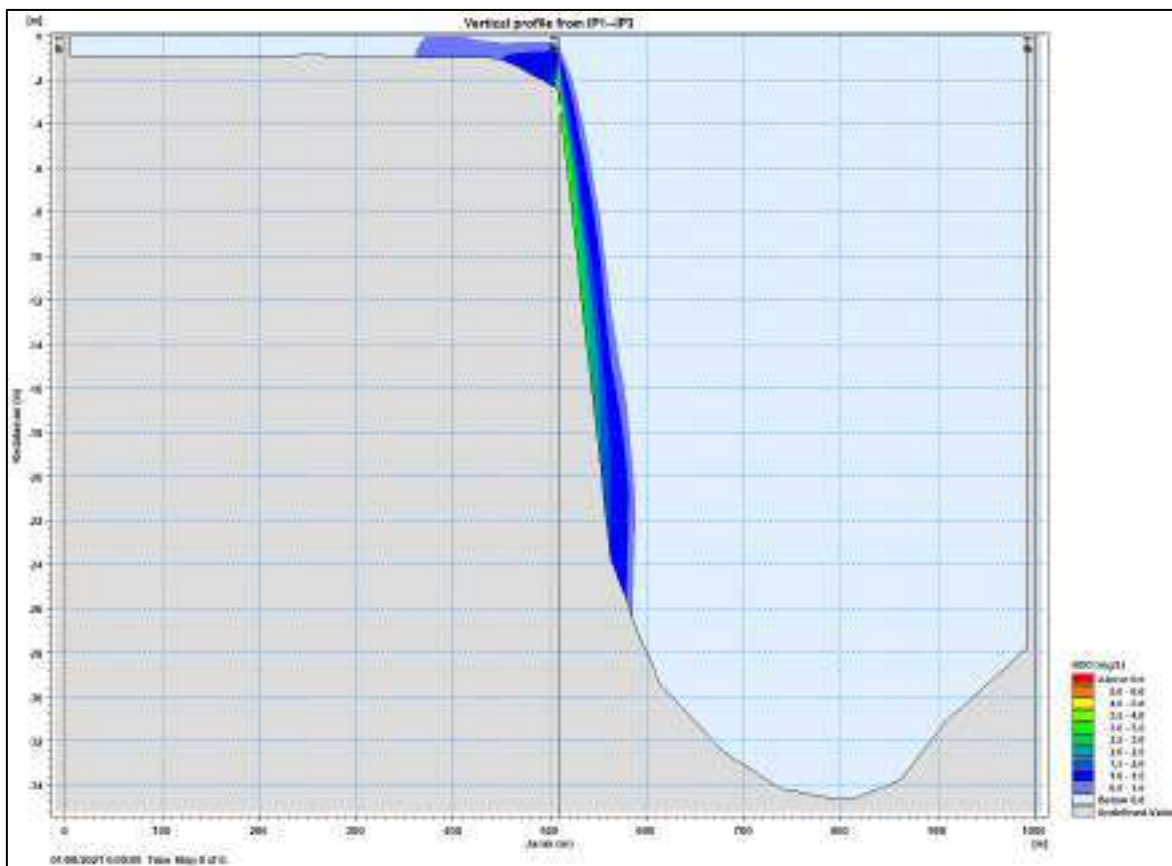
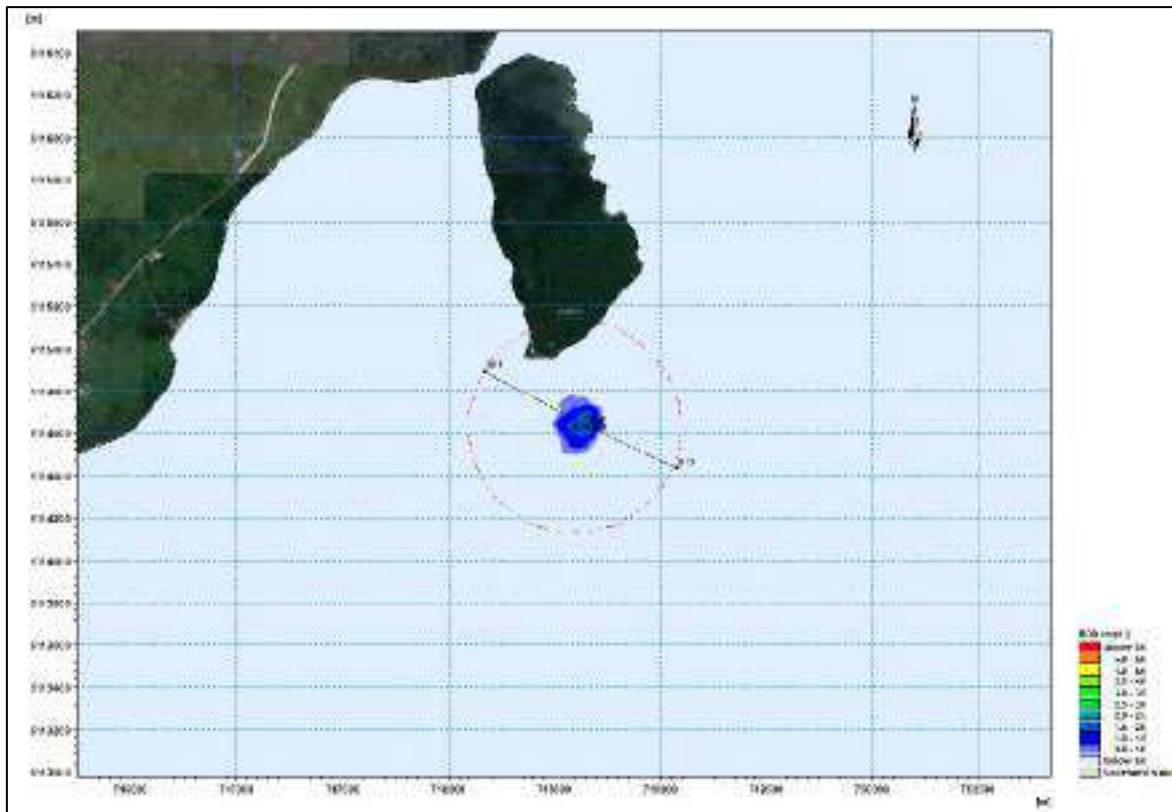
Gambar 107. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) pH maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II

Peningkatan konsentrasi BOD maksimum pada keseluruhan musim (**Gambar 108** hingga **Gambar 111**) di sekitar titik buangan hanya mencapai 5 mg/L (musim barat dan peralihan I) dan 3.5 mg/L (musim timur dan peralihan II). Bila mengacu pada baku mutu BOD PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota sebesar 20 mg/l, maka konsentrasi maksimum BOD tersebut tergolong rendah (dibawah baku mutu). Hasil analisis sampel air laut dari 18 titik stasiun sekitar lokasi kajian tergolong rendah, yakni baik pada musim kemarau dan hujan tidak lebih dari 2 mg/L (< 2 mg/L). Jika dijumlahkan konsentrasi BOD hasil model dan hasil pengukuran, maka nilai BOD hasil penjumlahan tersebut masih lebih rendah dari ketetapan baku mutu. Hal ini menunjukkan pembuangan limbah BOD ke badan air penerima tidak mengakibatkan peningkatan BOD hingga melebihi baku mutu.

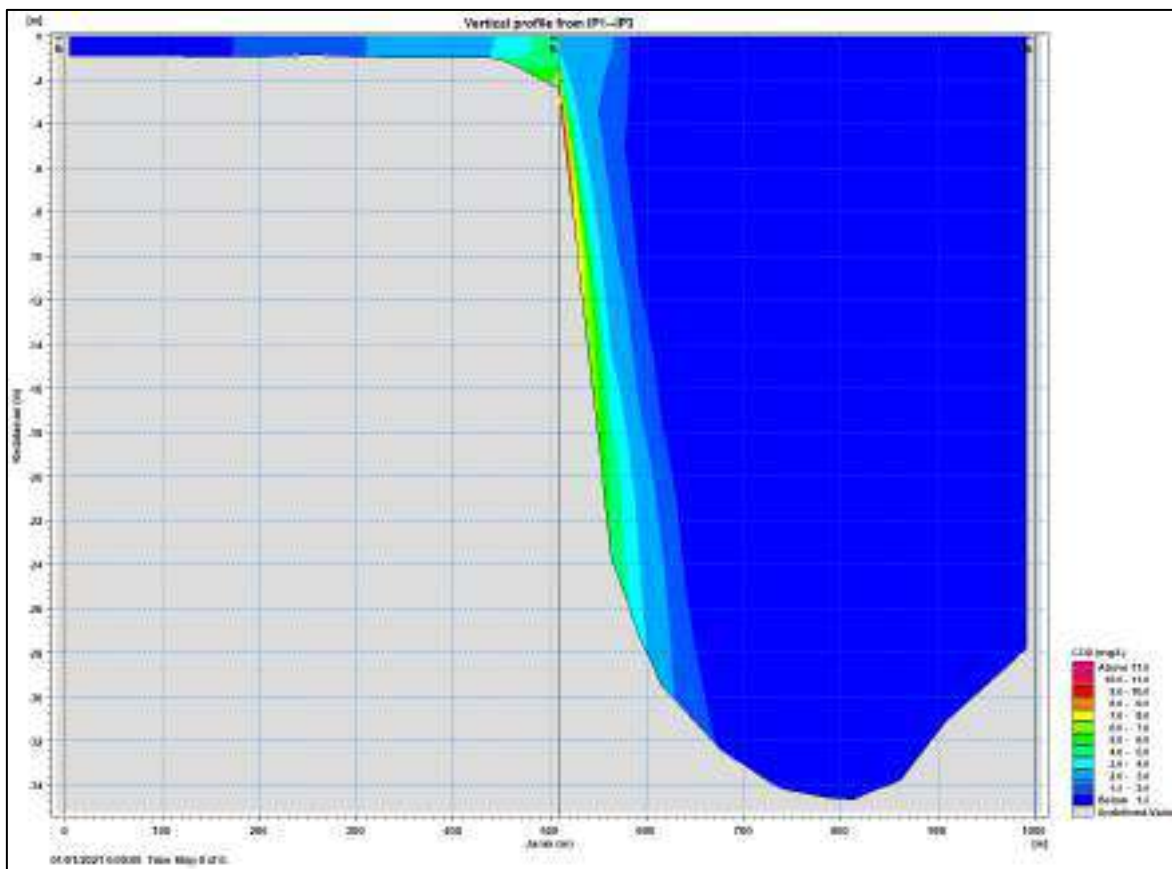
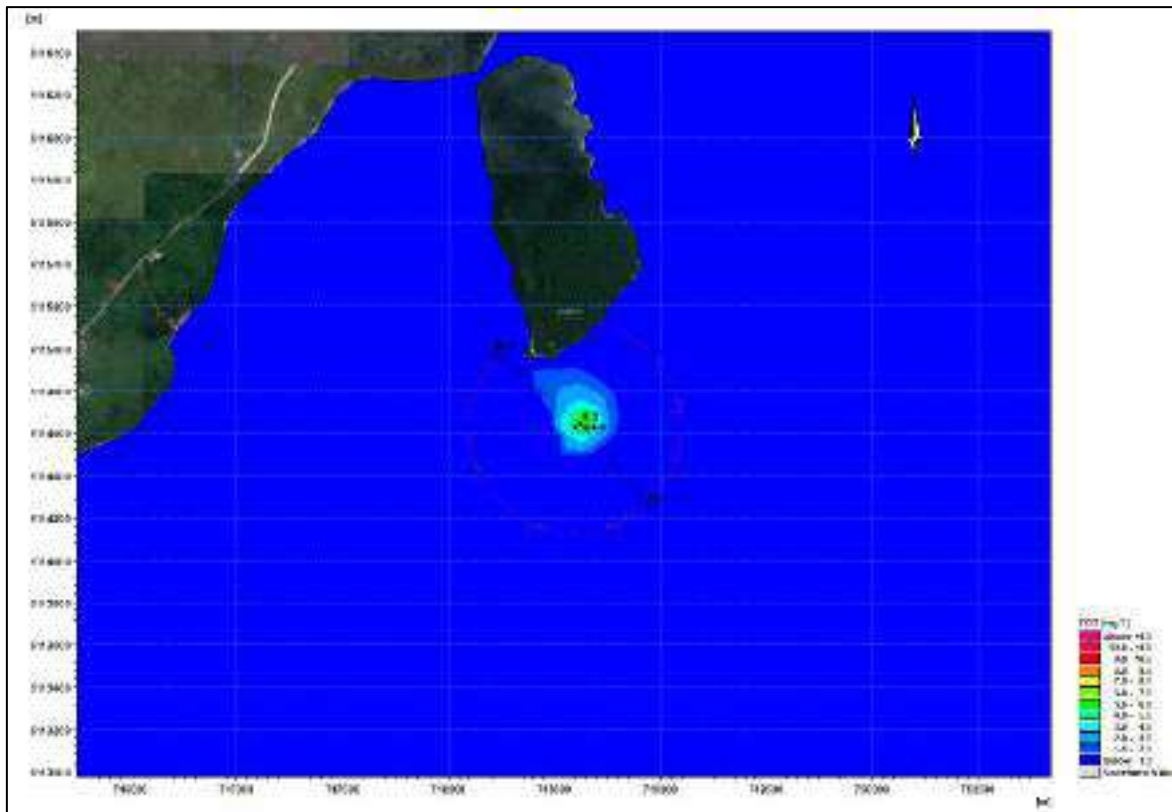
Konsentrasi maksimum COD hasil model musim barat (**Gambar 112**) dan peralihan I (**Gambar 113**) juga relatif rendah, yakni hanya mencapai 10 mg/l. Kondisi tidak jauh berbeda juga diperlihatkan pada musim timur (**Gambar 114**) dan peralihan II (**Gambar 115**), dimana konsentrasi maksimum hanya mencapai 8 mg/l. Baku mutu air laut berdasarkan menurut PP Nomor 22 Tahun 2021 Lampiran VIII tidak mempersyaratkan parameter COD. Mengacu pada PP RI No. 82 tahun 2001 dalam Efendi (2003) terkait dengan kegiatan perikanan, konsentrasi COD tersebut tergolong rendah, dimana batas maksimum COD yang diperbolehkan untuk kegiatan perikanan adalah sebesar 50 mg/l

Peningkatan konsentrasi TSS maksimum hasil model keseluruhan musim (**Gambar 116** hingga **Gambar 119**) ketika masuk ke perairan tergolong rendah, yakni tertinggi hanya sebesar 3.5 mg/L (musim peralihan I). Konsentrasi TSS hasil model tersebut tergolong rendah bila dibandingkan dengan baku mutu PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota laut sebesar 20 mg/l. Konsentrasi TSS rata-rata hasil analisis sampel air laut 18 titik sekitar OLNG pada musim kemarau sebesar 2.67 mg/L dan pada musim hujan sebesar 3.5 mg/L (lebih kecil dari baku mutu). Jika dijumlahkan konsentrasi TSS hasil model dengan TSS di badan air, maka baik musim kemarau maupun musim hujan masing-masing diperoleh nilai 6.17 mg/L dan 7 mg/L (masih di bawah baku mutu). Hal ini berarti buangan limbah TSS dari kegiatan OLNG tidak berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi TSS di badan air penerima.

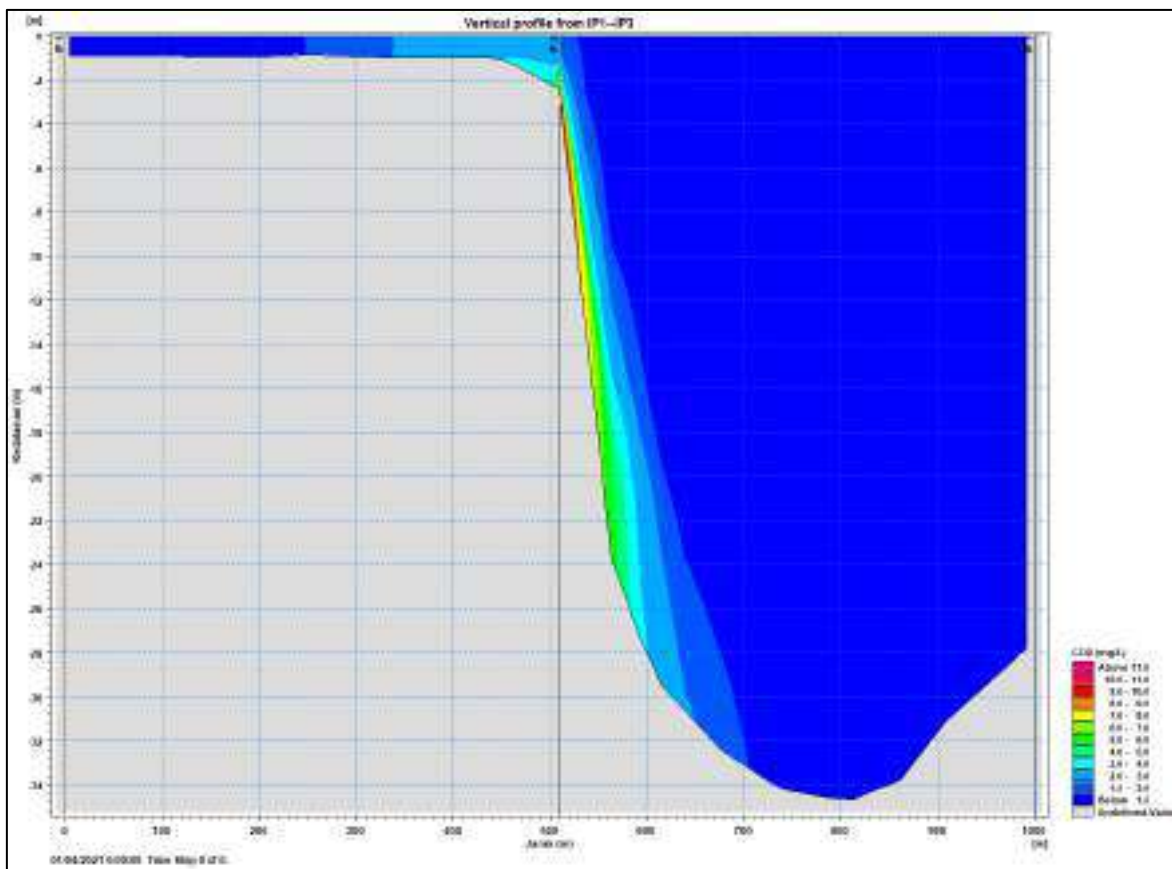
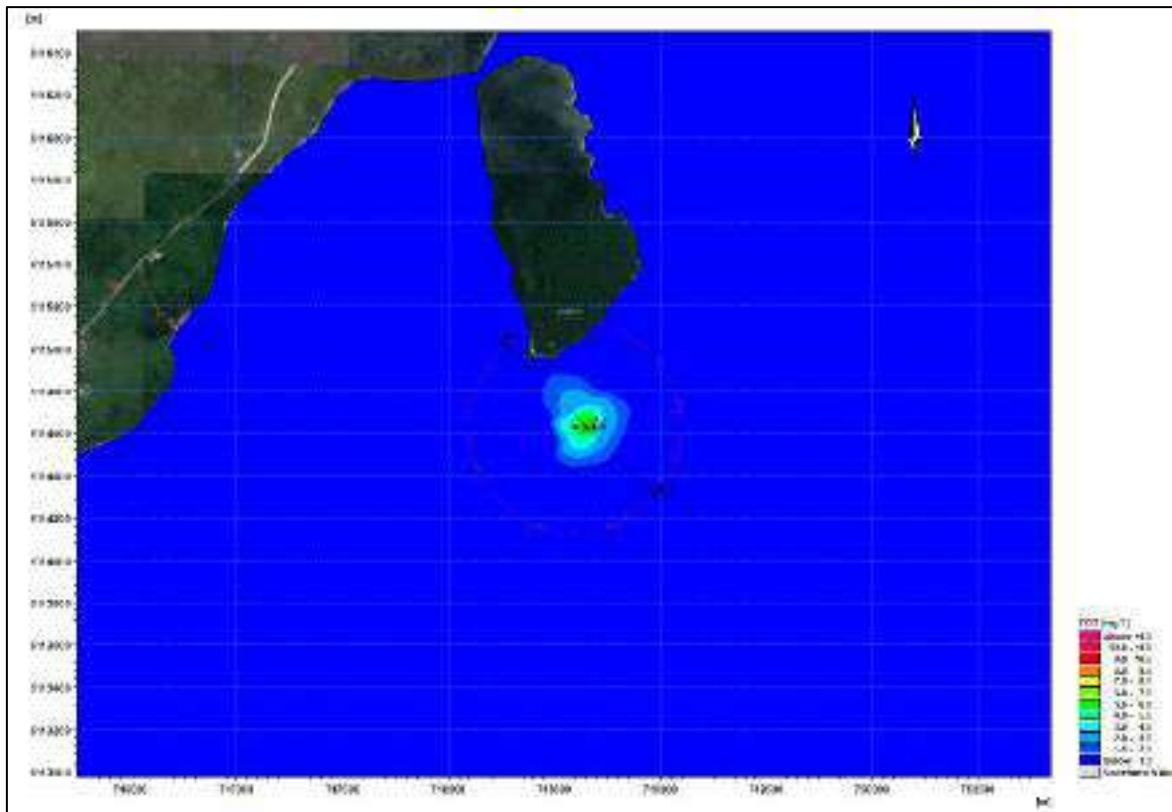
Parameter total nitrogen merupakan parameter limbah bersumber dari *Treated wastewater from Leachate Treatment package*. Peningkatan konsentrasi TOC maksimum pada musim barat (**Gambar 120**) dan peralihan I (**Gambar 121**) terlihat sama, yakni maksimum mencapai 2 mg/L, sementara hasil model musim timur (**Gambar 122**) dan peralihan II (**Gambar 123**) sedikit lebih kecil, yakni maksimum hanya 1.75 mg/L. Baku mutu menurut PP No 22 Tahun 2021 VIII tidak mensyaratkan total nitrogen dalam parameter yang diatur, sehingga tidak terdapat rujukan atau pembandingan untuk menentukan besar atau kecilnya peningkatan konsentrasi hasil model.



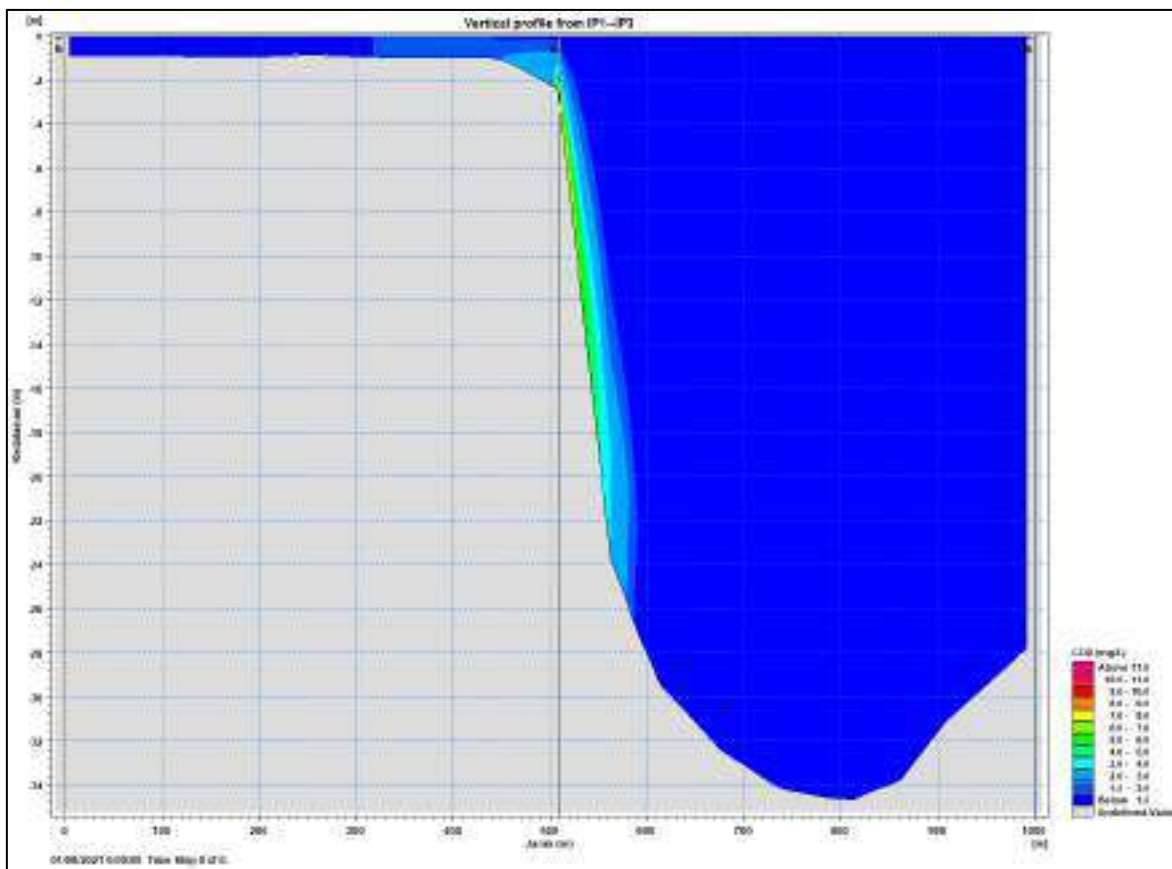
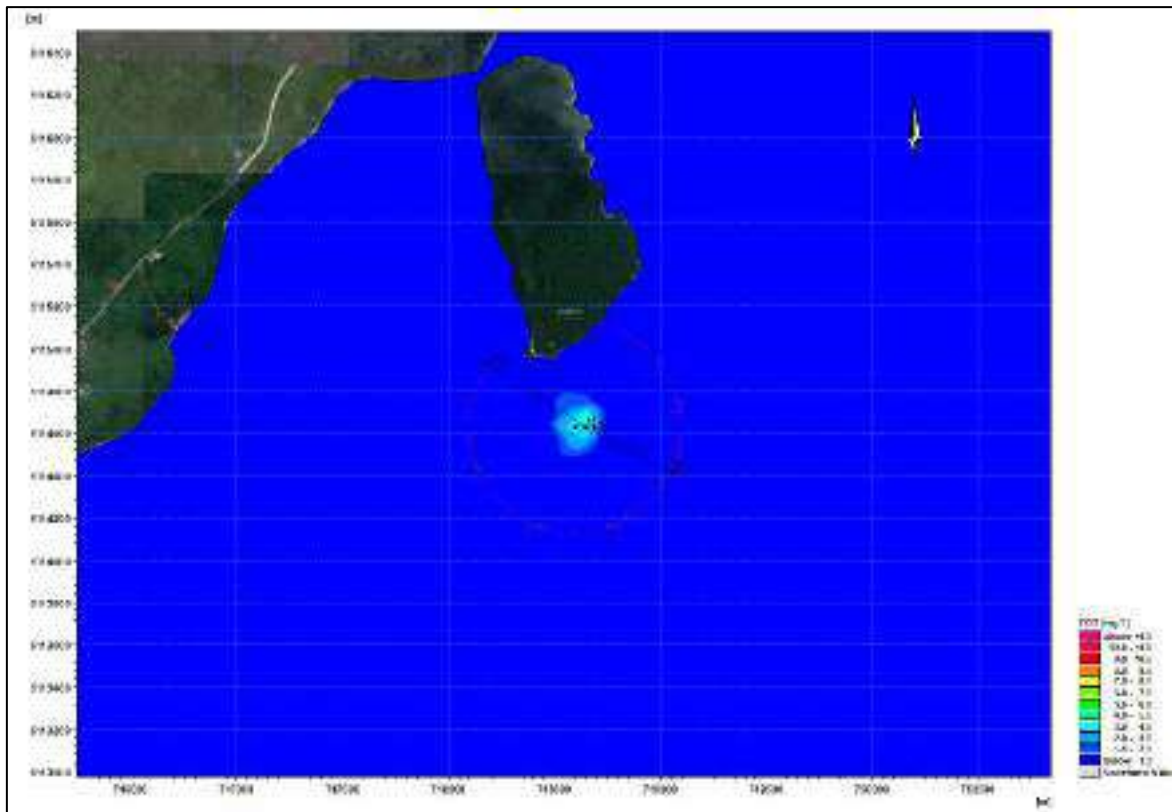
Gambar 110. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) BOD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



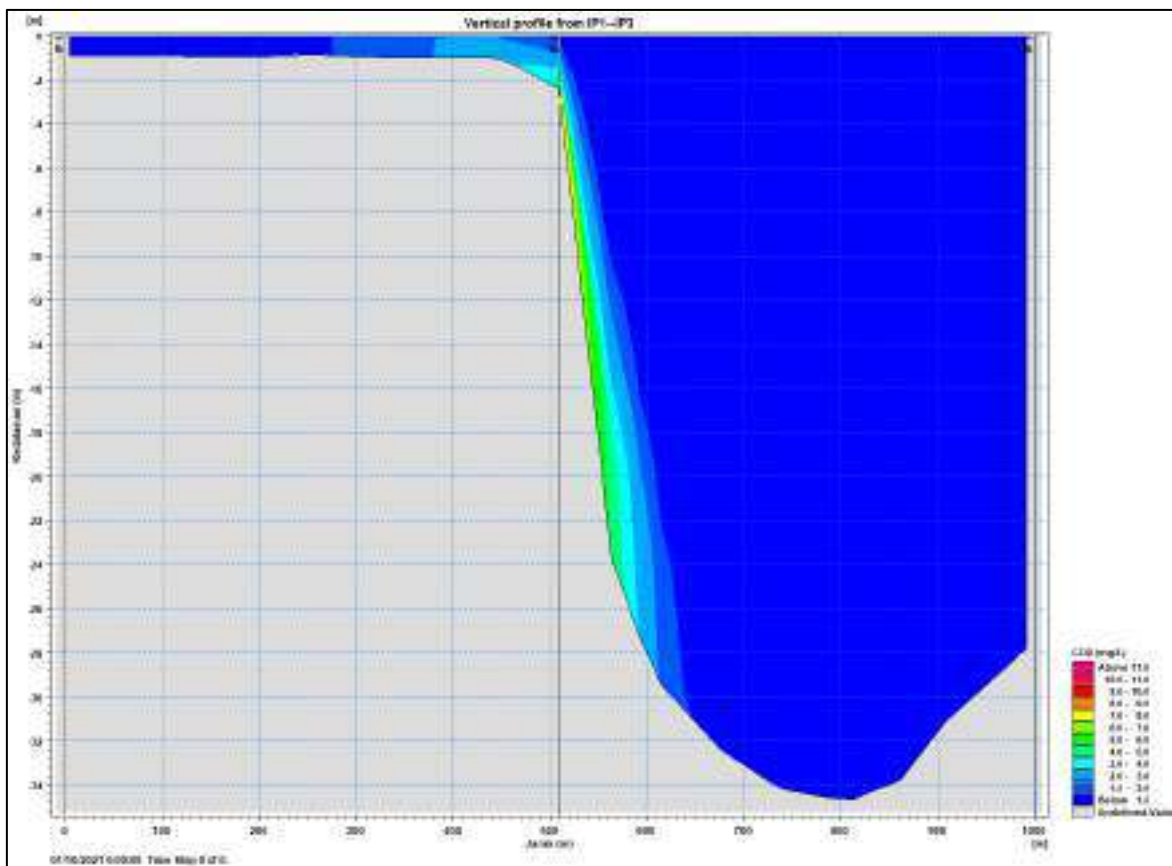
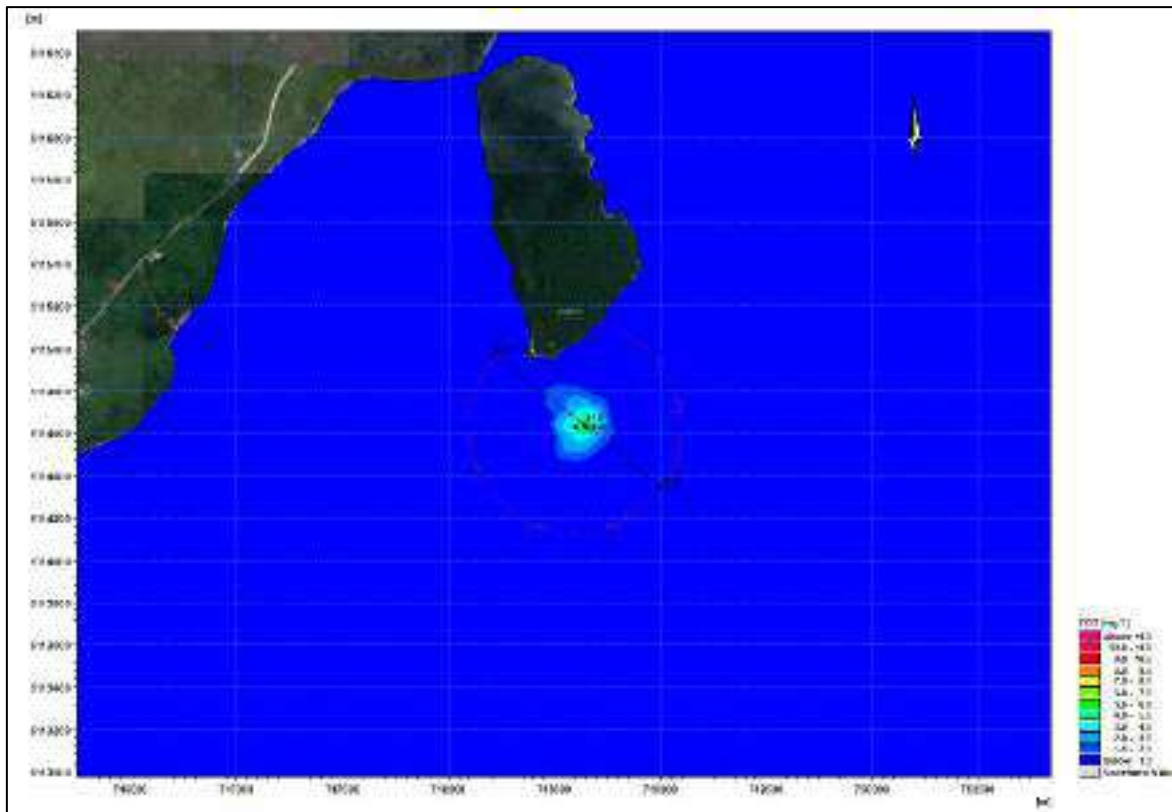
Gambar 112. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



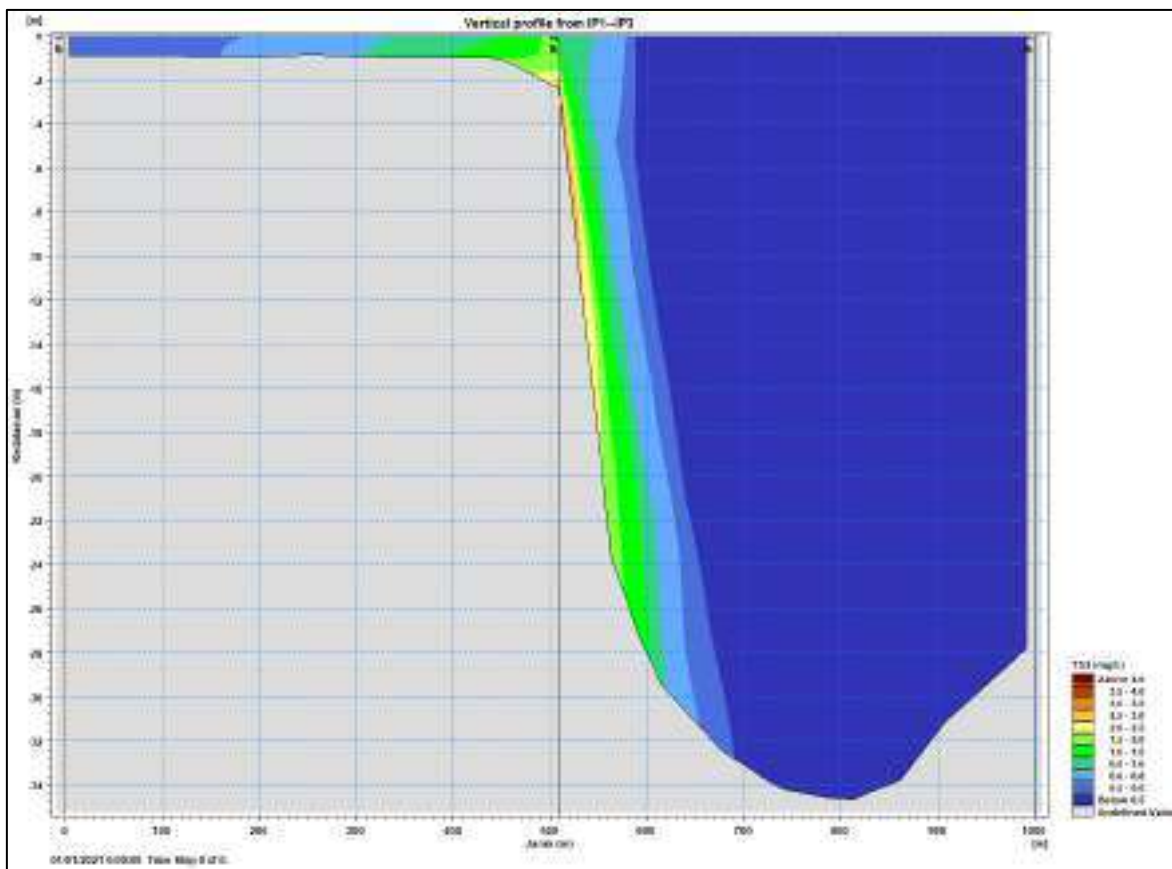
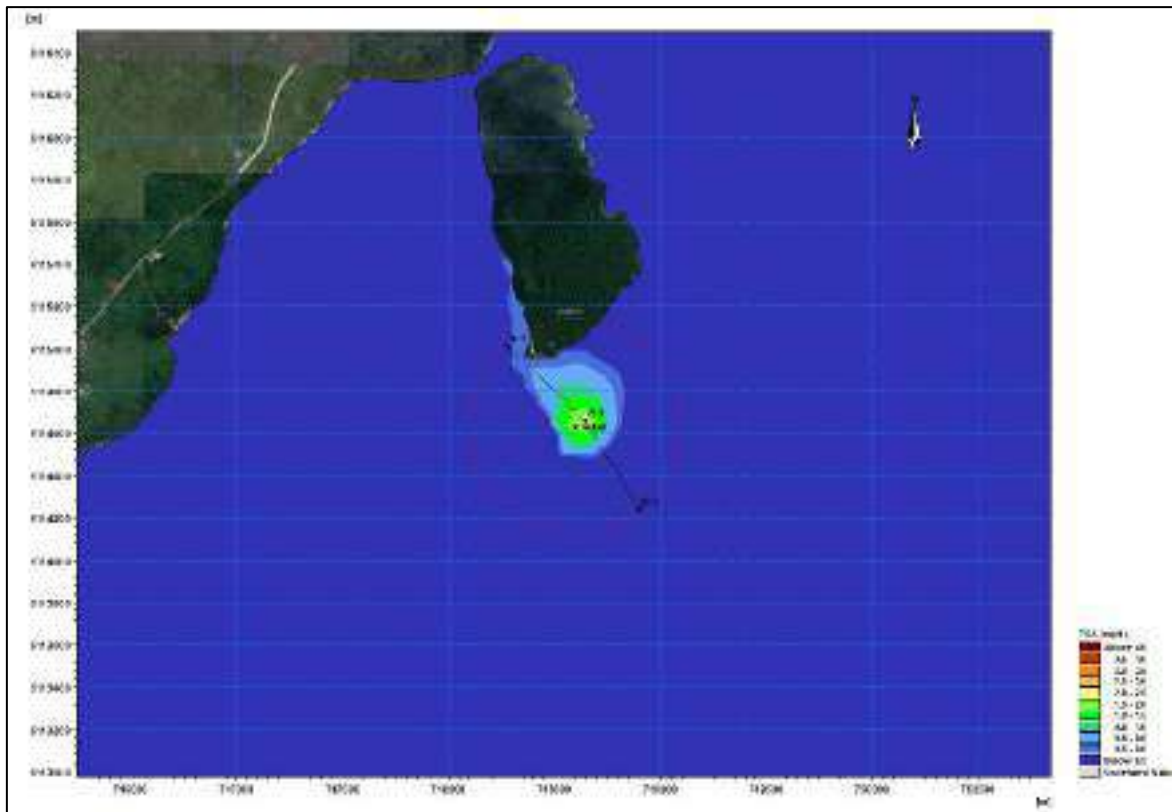
Gambar 113. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



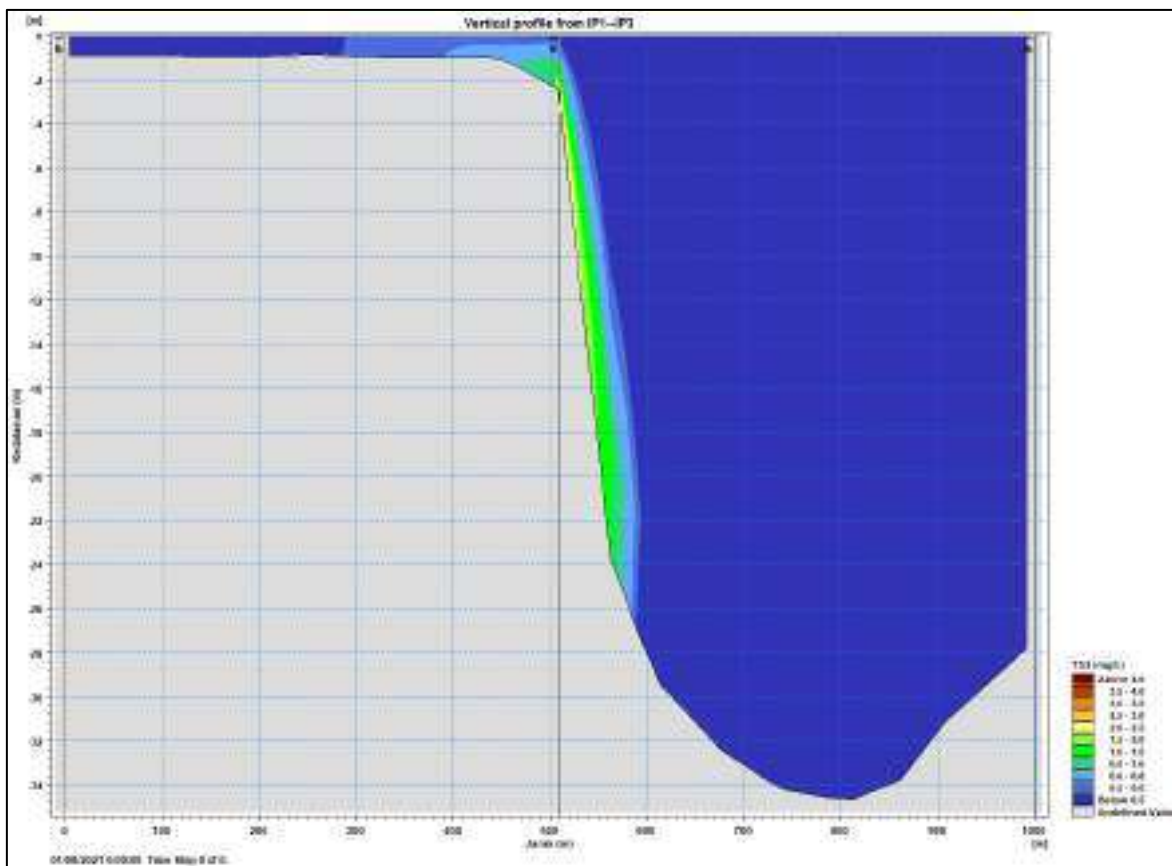
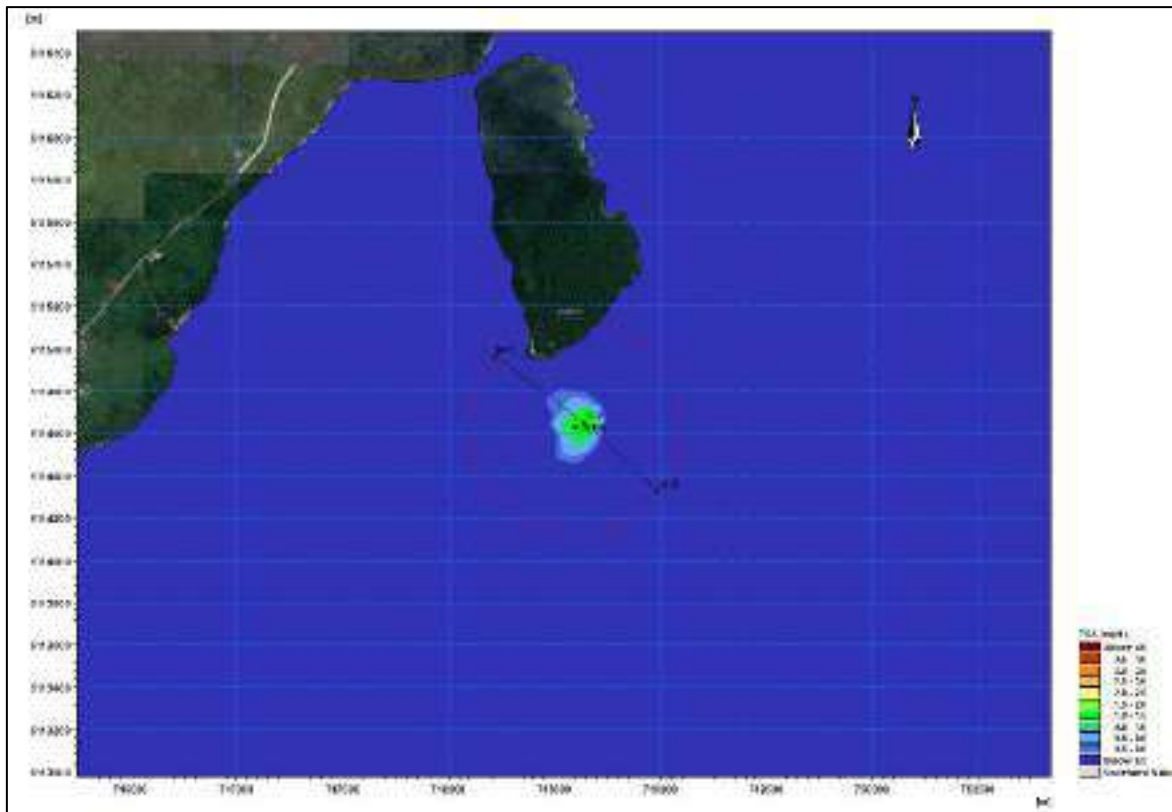
Gambar 114. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



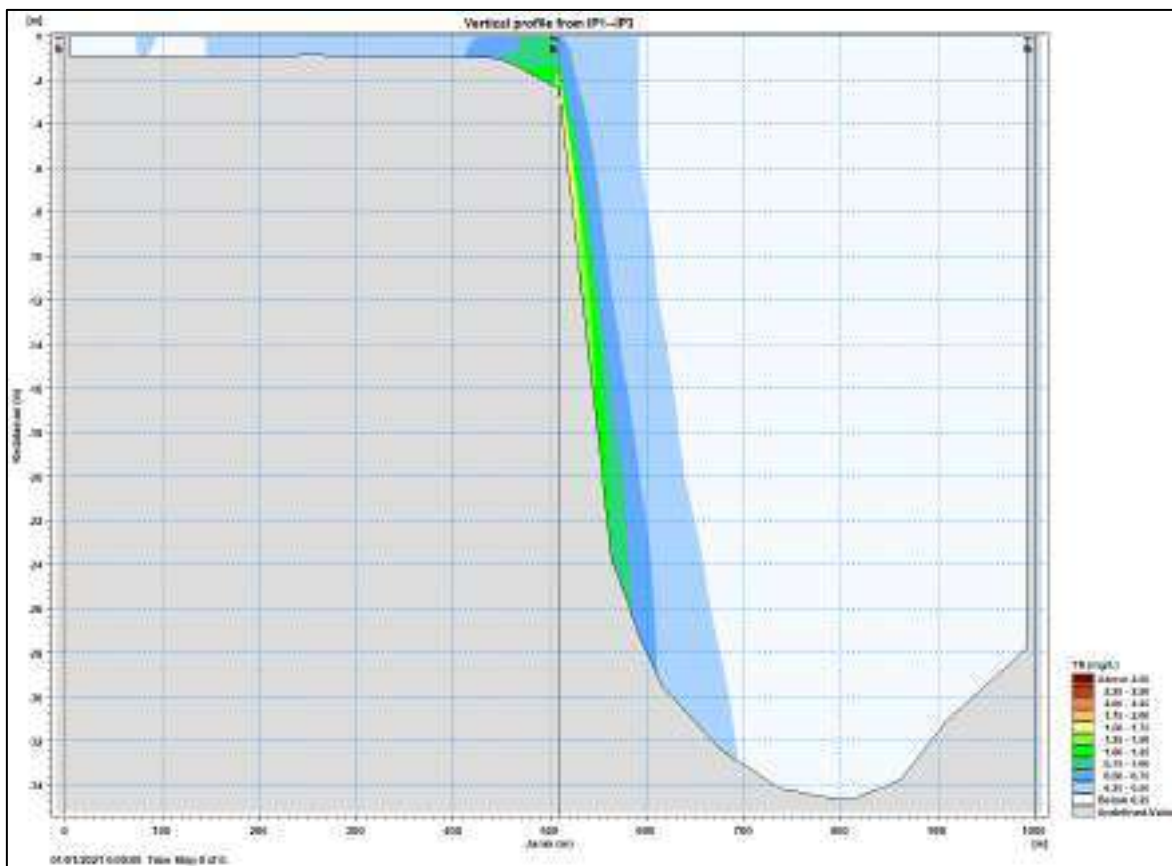
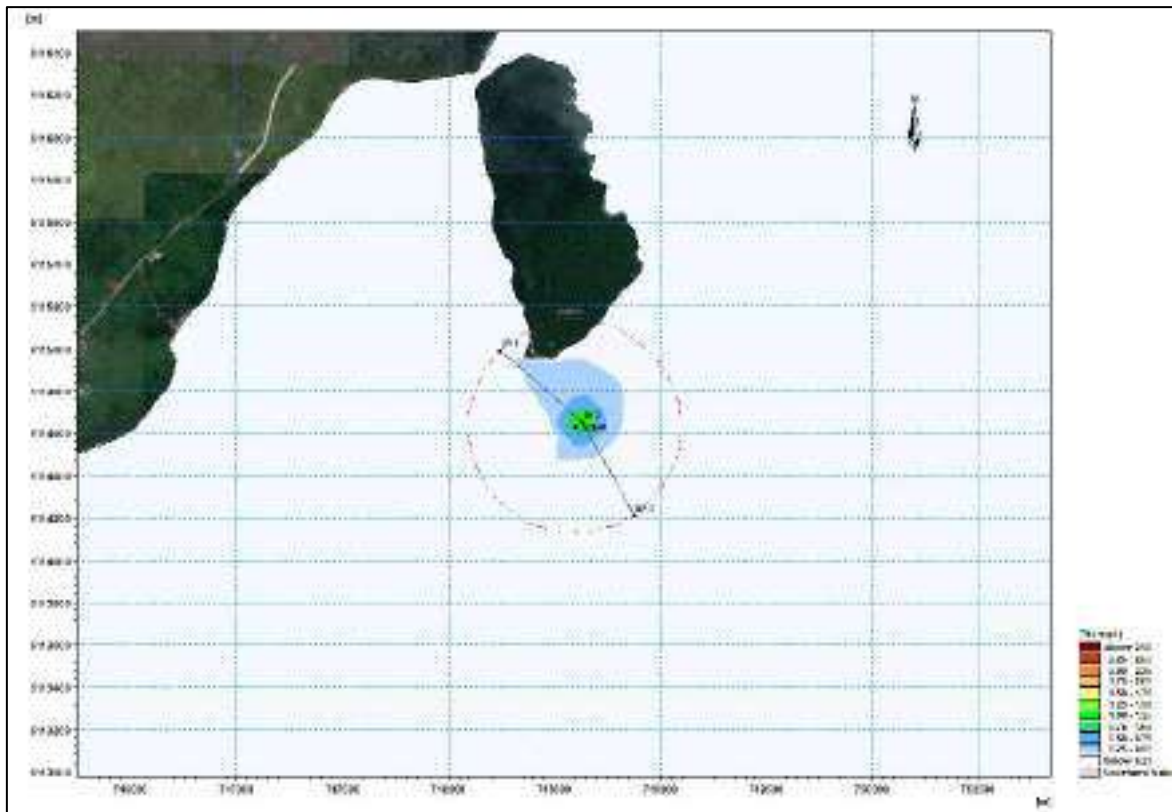
Gambar 115. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) COD maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II



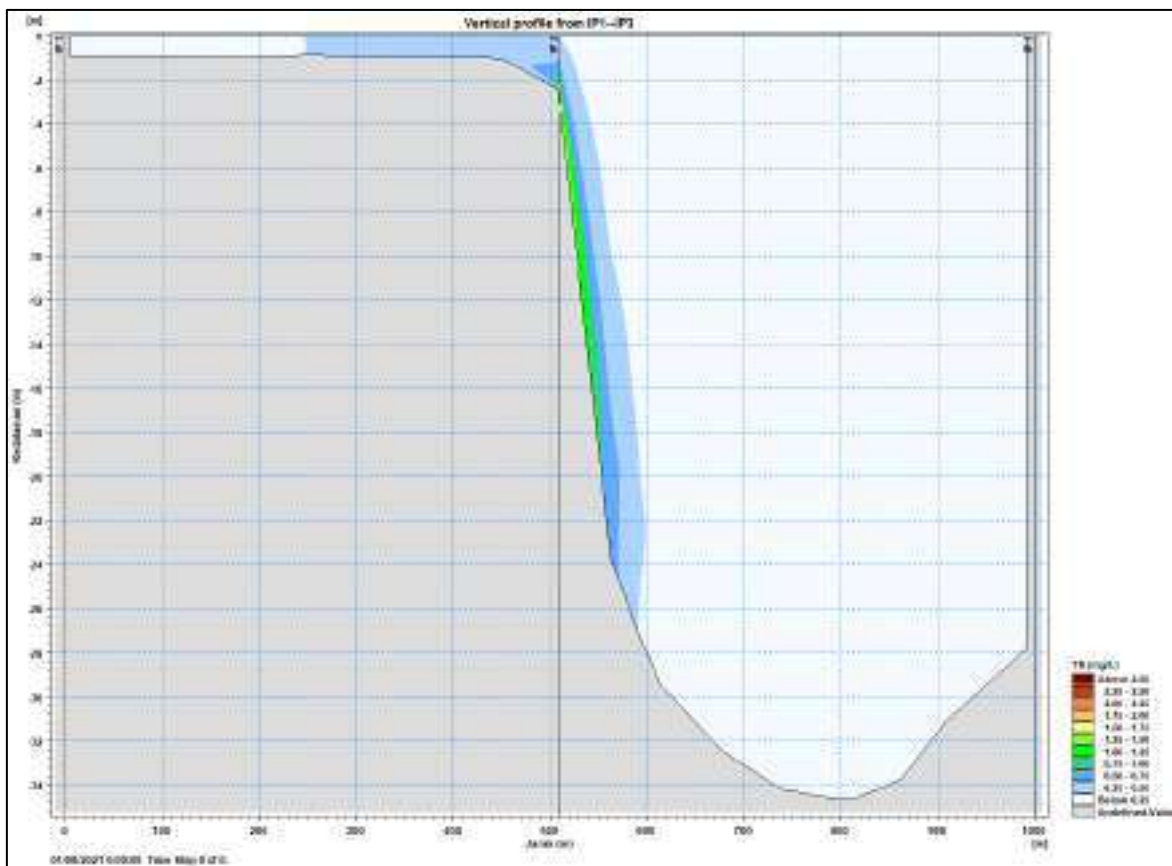
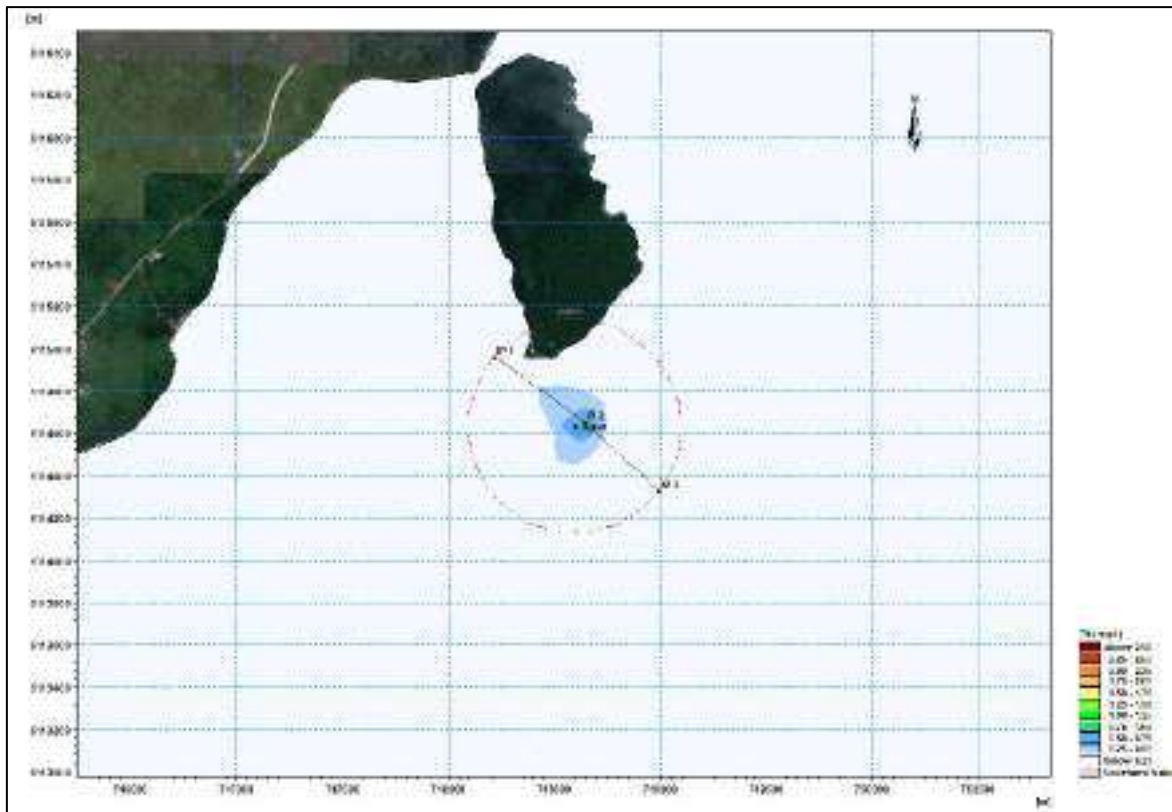
Gambar 116. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



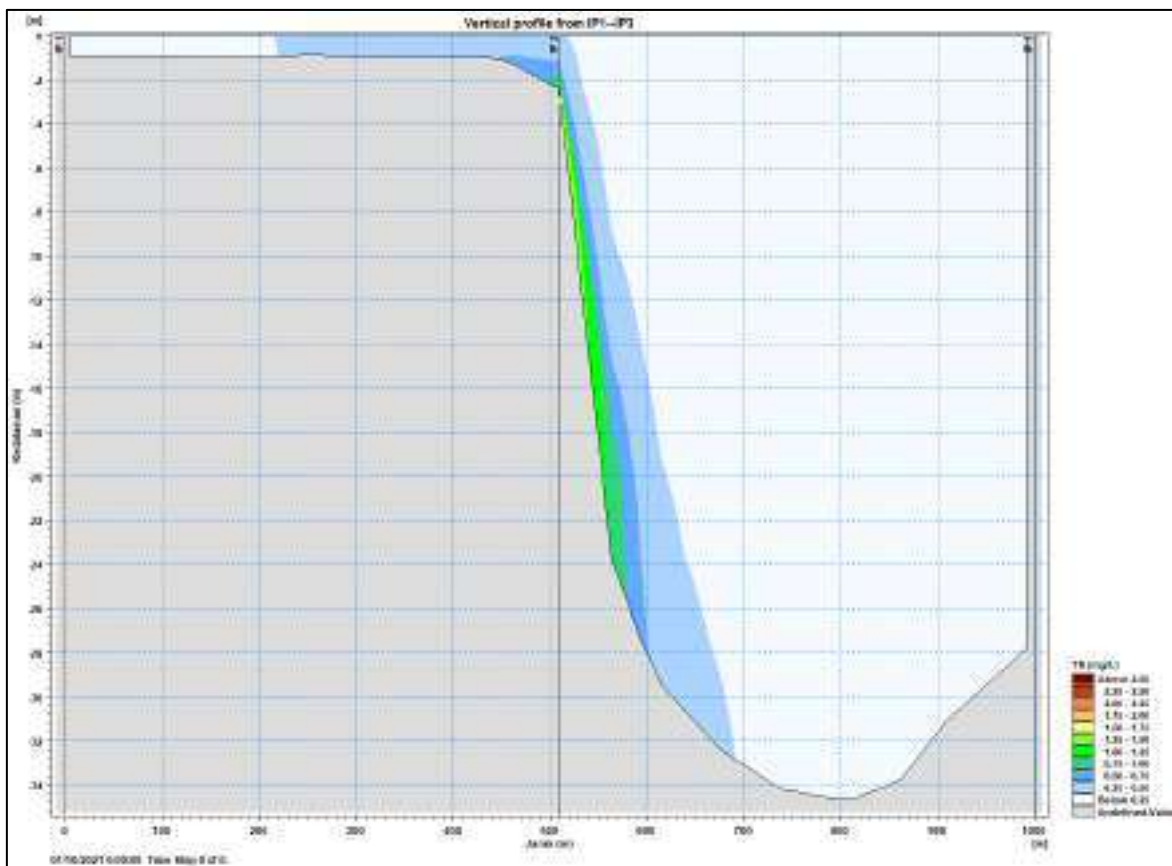
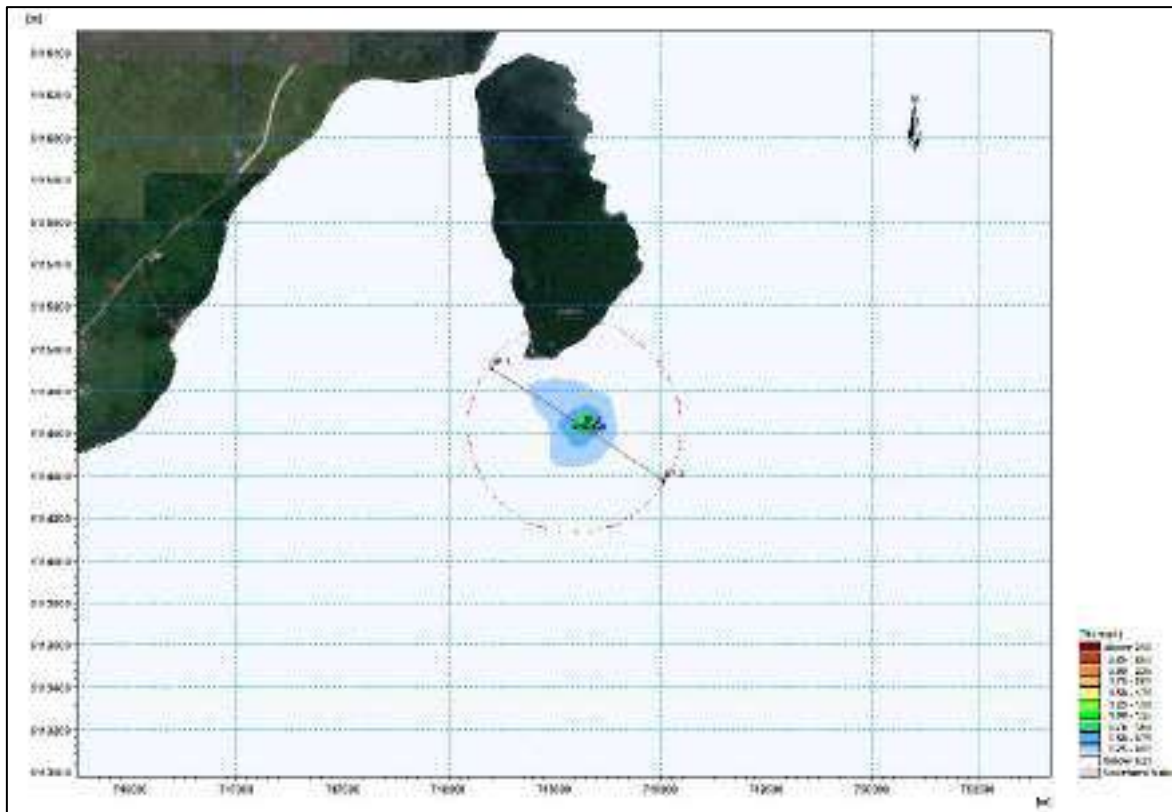
Gambar 118. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TSS maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



Gambar 120. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



Gambar 122. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



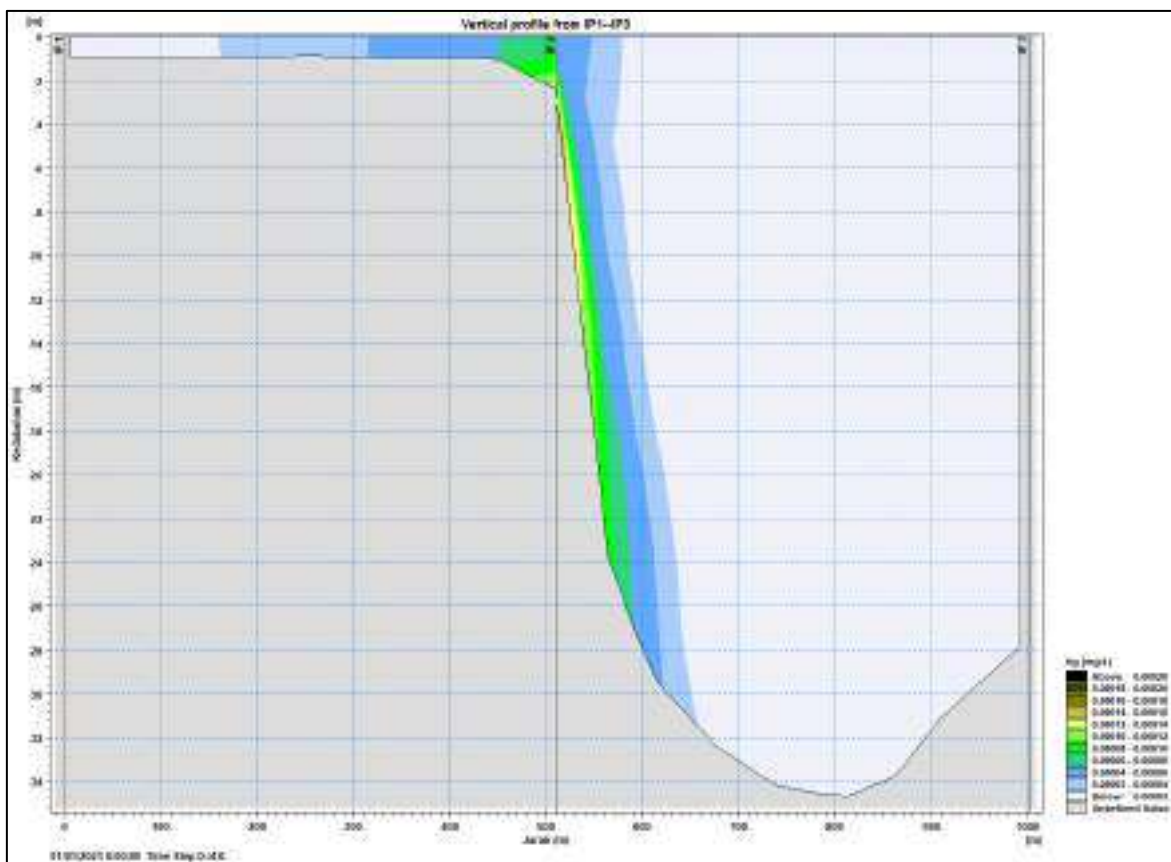
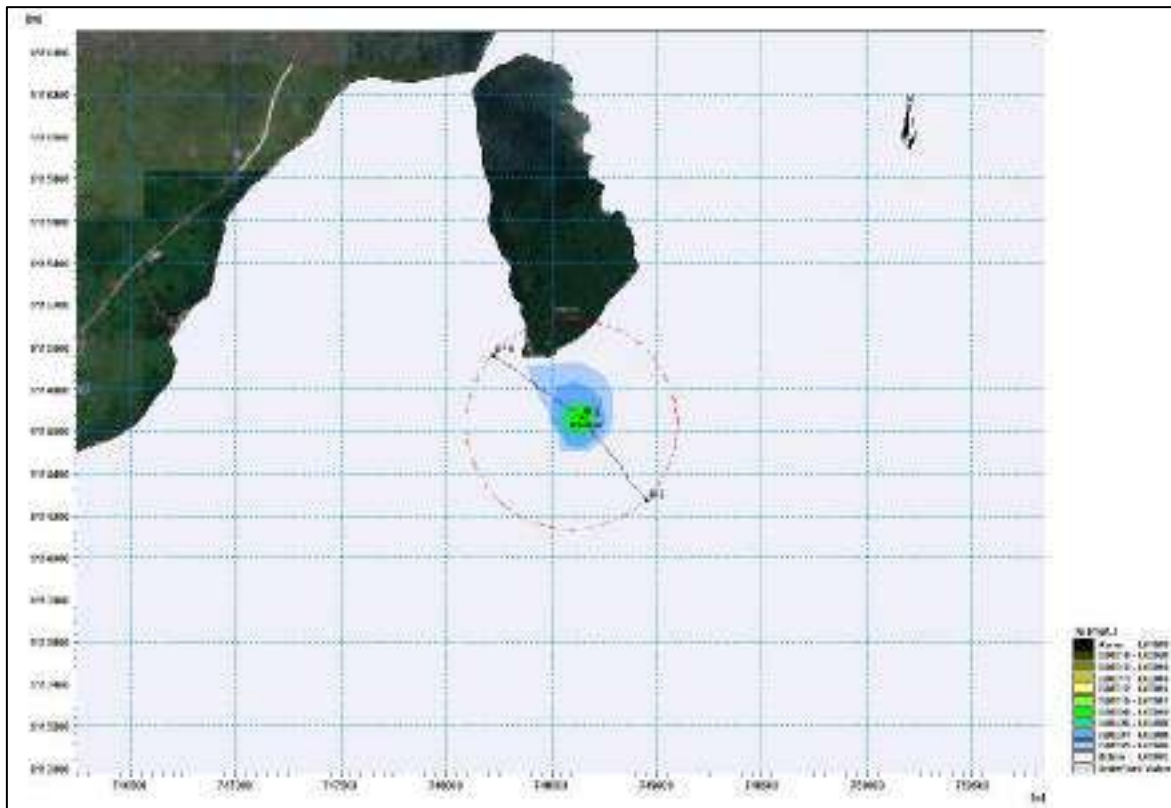
Gambar 123. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) TN maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II

Hasil model sebaran dan konsentrasi merkuri (Hg) terlarut pada keseluruhan musim diperlihatkan dalam **Gambar 124** hingga **Gambar 127**. Berdasarkan gambar tersebut terlihat peningkatan konsentrasi maksimum kondisi musim barat dan peralihan I tidak terlihat ada perbedaan, yakni sebesar mencapai 0.00016 mg/L. Konsentrasi maksimum yang terlihat pada musim timur dan peralihan II sedikit lebih kecil, yakni 0.00014 mg/L. Baku mutu Hg terlarut berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 VIII untuk biota adalah 0.001 mg/L, sehingga hasil simulasi model keempat musim tersebut tidak terlihat ada yang melebihi baku. Hasil analisis sampel air 18 titik sekitar lokasi pembuangan limbah, baik musim kemarau dan musim hujan diperoleh nilai < 0.00005 mg/L (jauh di bawah baku mutu). Penjumlahan konsentrasi Hg hasil model dan Hg di perairan juga masih dibawah ketetapan baku mutu.

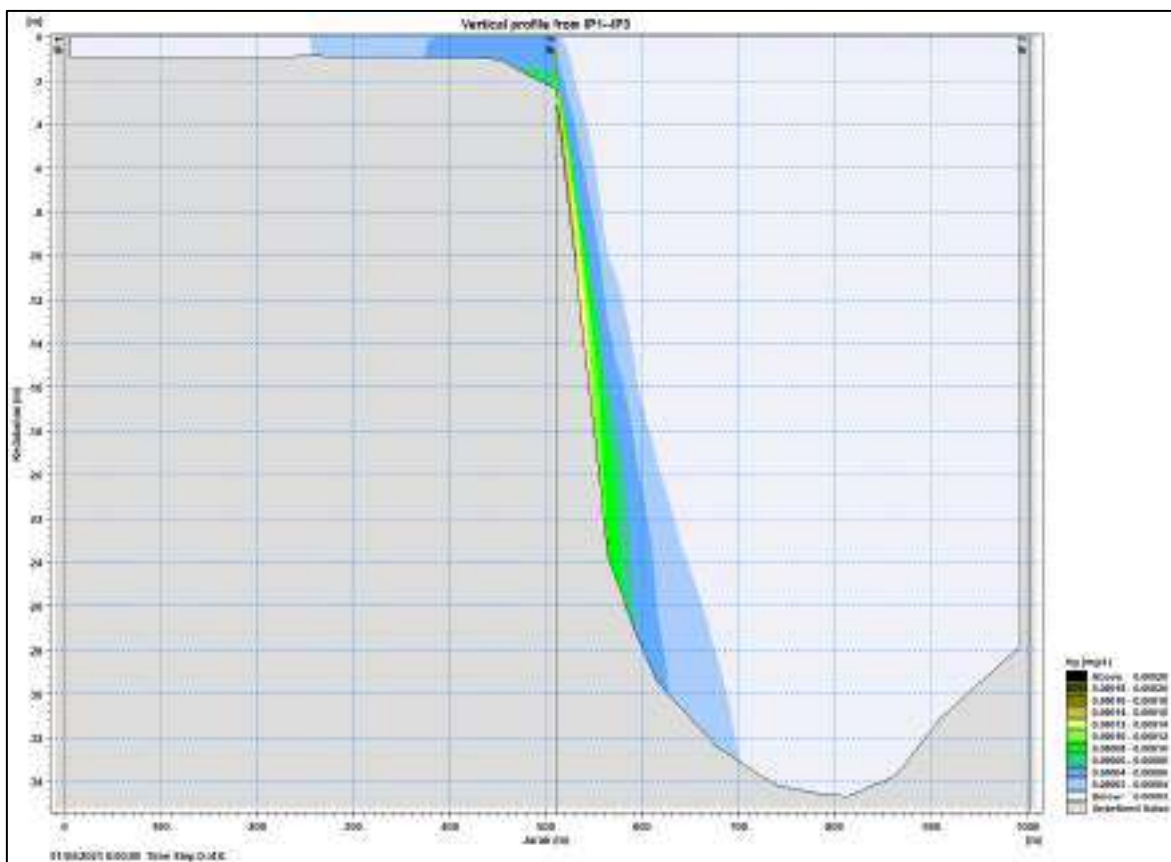
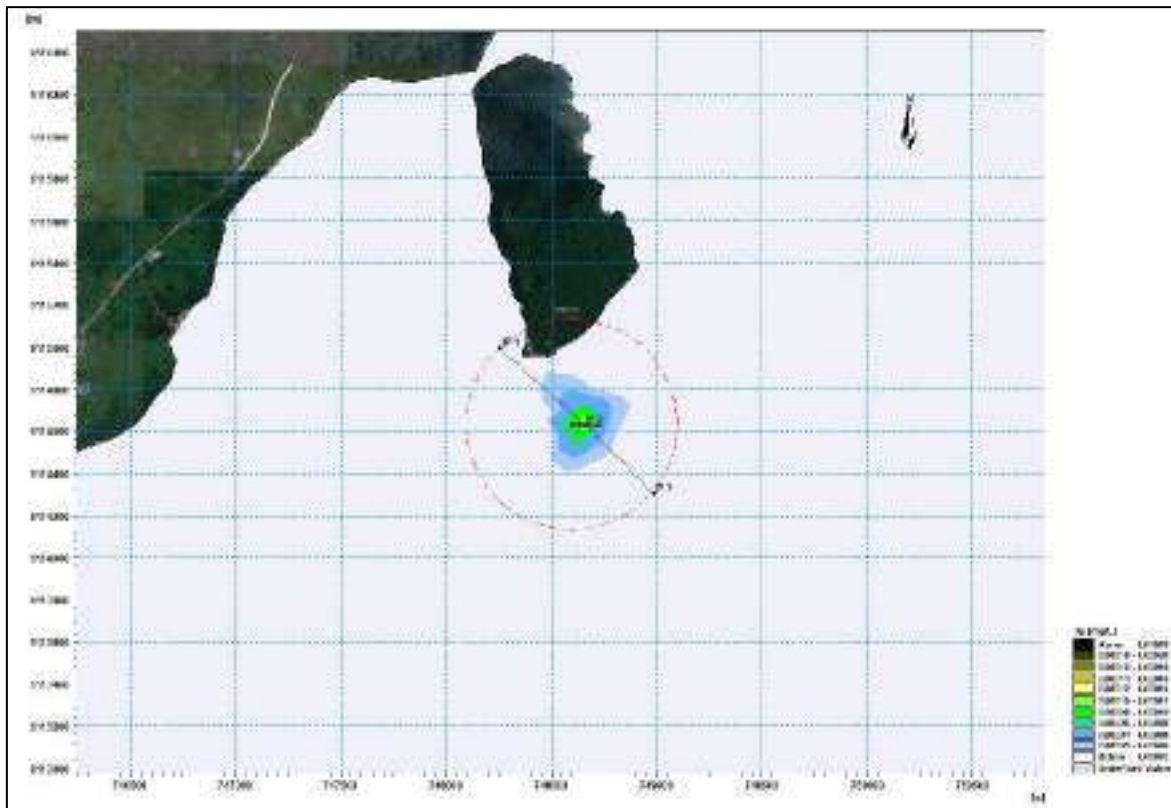
Peningkatan konsentrasi maksimum Cd terlarut (**Gambar 128** hingga **Gambar 131**) setelah masuk dan tercampur oleh air laut terlihat masih tinggi, dimana pada musim barat dan peralihan I mencapai 0.0035 mg/L, sedangkan pada musim timur dan peralihan II mencapai 0.003 mg/L. Baku mutu Cd terlarut berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 VIII untuk biota adalah 0.001 mg/L, sehingga peningkatan konsentrasi model hasil model tersebut lebih besar dari ketetapan baku mutu. Meskipun melebihi baku mutu, jarak sebarannya relatif pendek dari titik buangan. Pada musim barat sebaran Cd yang melebihi baku mutu mencapai 166 m ke timur laut dan 105 m ke barat daya, saat musim peralihan I menyabar ke timur laut mencapai 171 m dan ke barat daya hingga 141 m. Sebaran ke arah timur laut dan barat daya pada musim timur masing-masing mencapai 115 m dan 76 m, sedangkan pada musim peralihan II mencapai 161 m dan 105 m

Peningkatan konsentrasi amonia (**Gambar 132** hingga **Gambar 135**) setelah masuk ke perairan khususnya pada musim barat dan peralihan I sedikit lebih tinggi dari baku mutu, yakni mencapai 0.35 mg/L, sedangkan pada musim timur dan peralihan II hanya 0.26 mg/L. Ketetapan baku mutu ammonia berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota adalah 0.3 mg/L, sehingga limbah ammonia setelah masuk dan terencerkan oleh perairan laut khususnya saat musim barat dan peralihan I sedikit lebih tinggi dari baku mutu. Sebaran ammonia yang melebihi baku mutu tersebut hanya mencapai radius 70 m. Hasil analisis sampel air laut dari 18 titik stasiun diperoleh nilai ammonia yang tergolong kecil, yakni baik musim kemarau maupun musim hujan tidak lebih dari 0.002 mg/L.

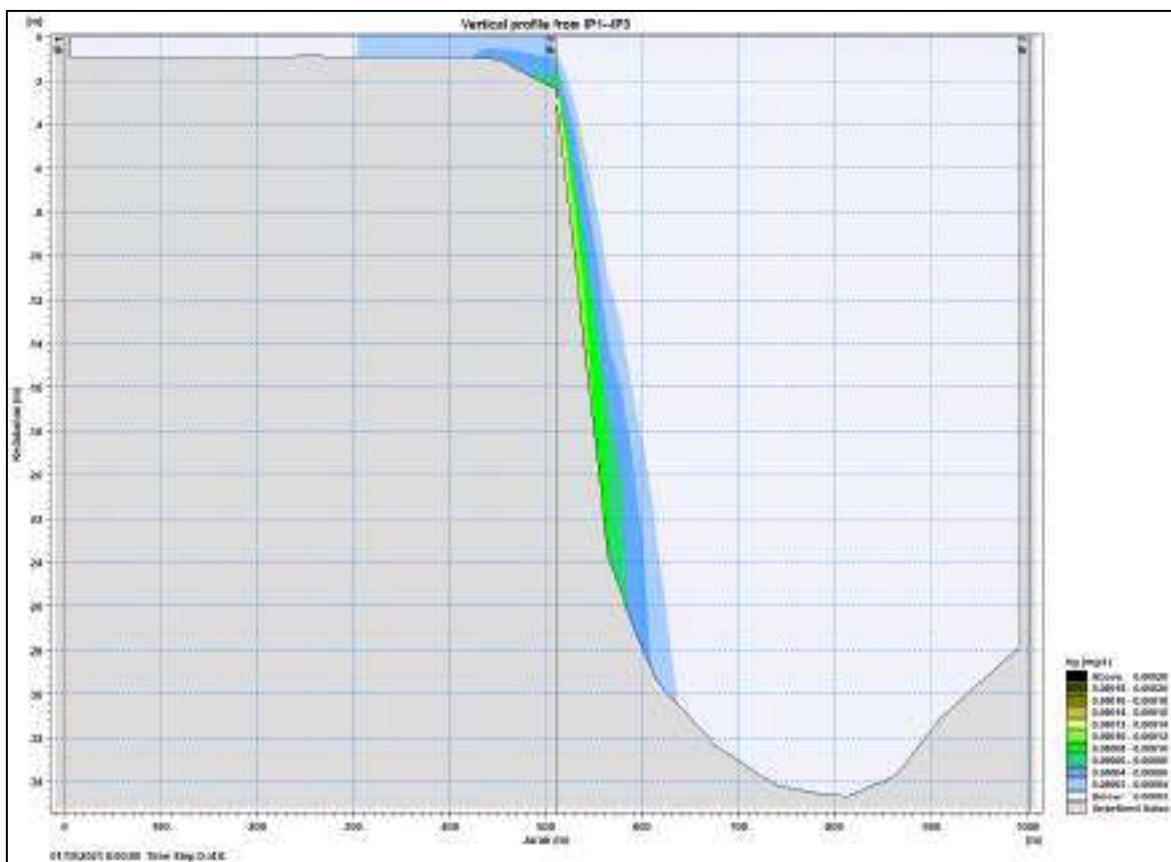
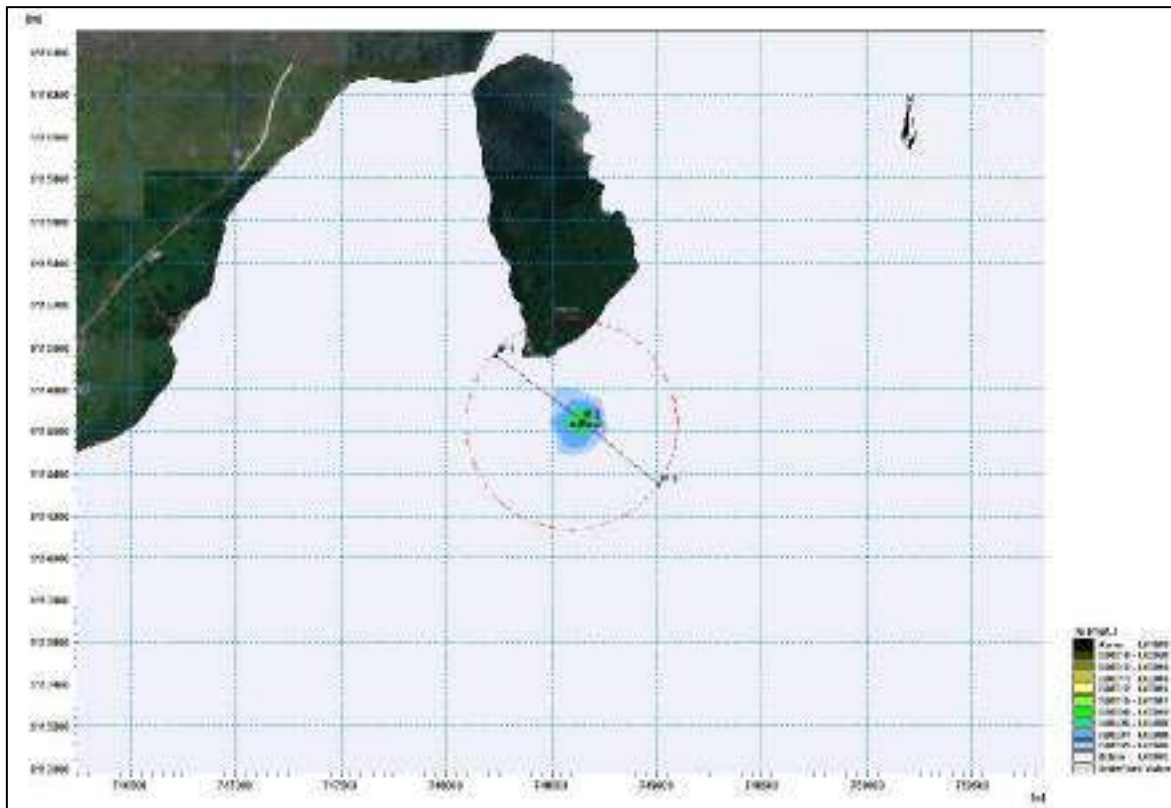
Berdasarkan hasil pemodelan parameter Total coliform (**Gambar 136** hingga **Gambar 139**), konsentrasi maksimum hasil model keseluruhan musim terlihat rendah, yakni pada musim barat dan peralihan I mencapai 90 MPN/100 mL, sedangkan pada musim timur dan peralihan II 80 MPN/100 mL. Jika dibandingkan dengan ketetapan baku mutu yang diperbolehkan maka konsentrasi hasil model keseluruhan musim tersebut terlihat rendah. Ketetapan baku mutu Total Coliform berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota laut adalah sebesar 1000 MPN/100 mL, sedangkan konsentrasi maksimum hasil model keempat musim tersebut jauh lebih kecil dari baku mutu.



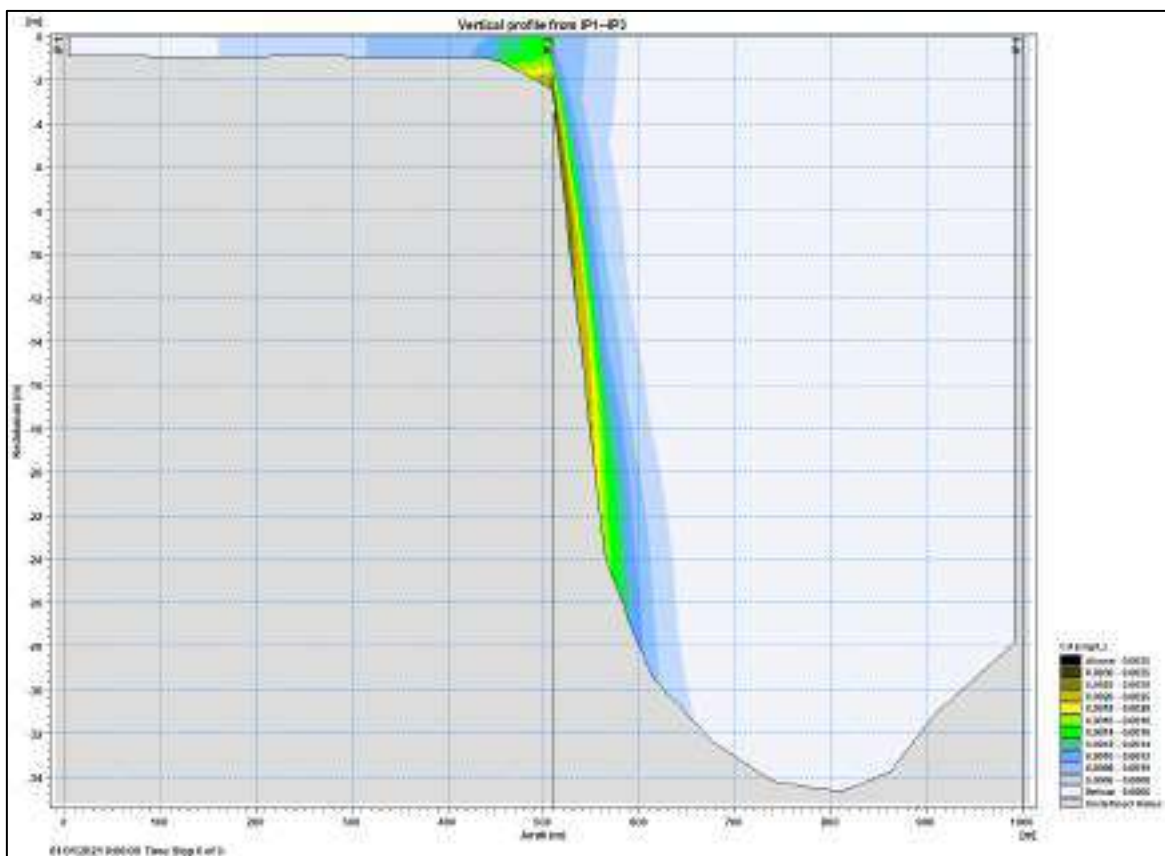
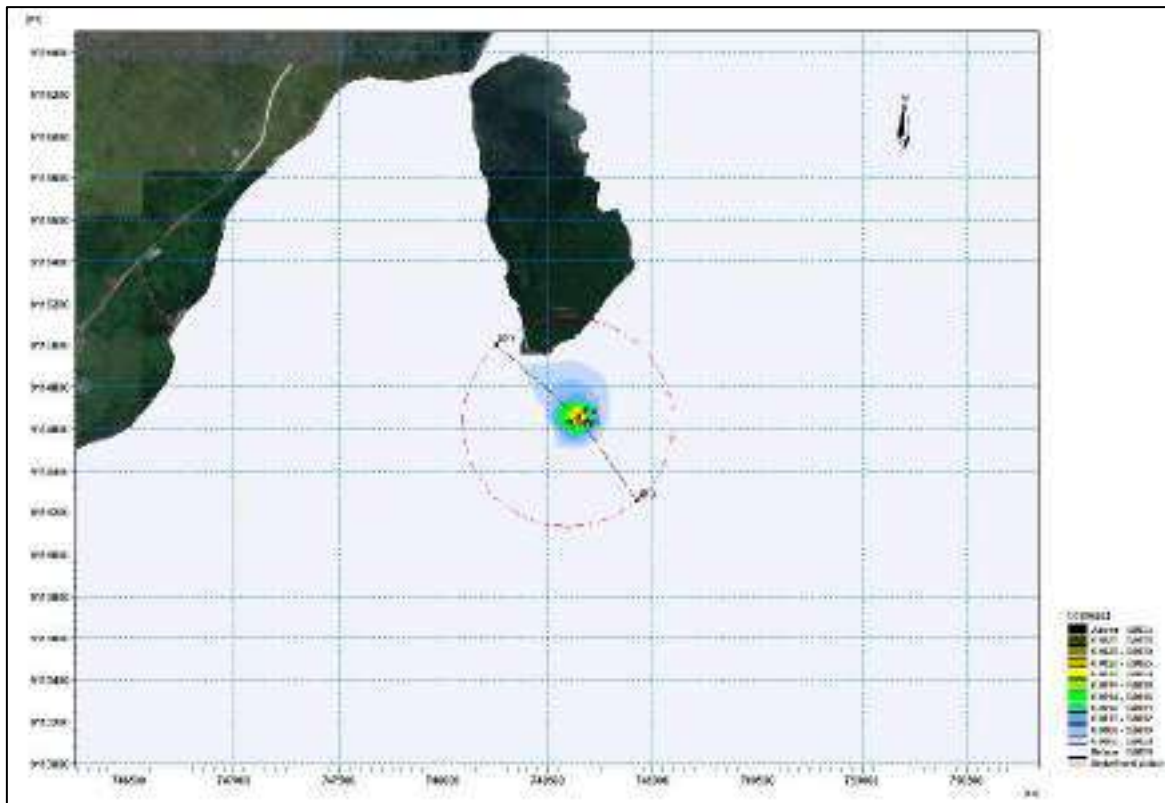
Gambar 124. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



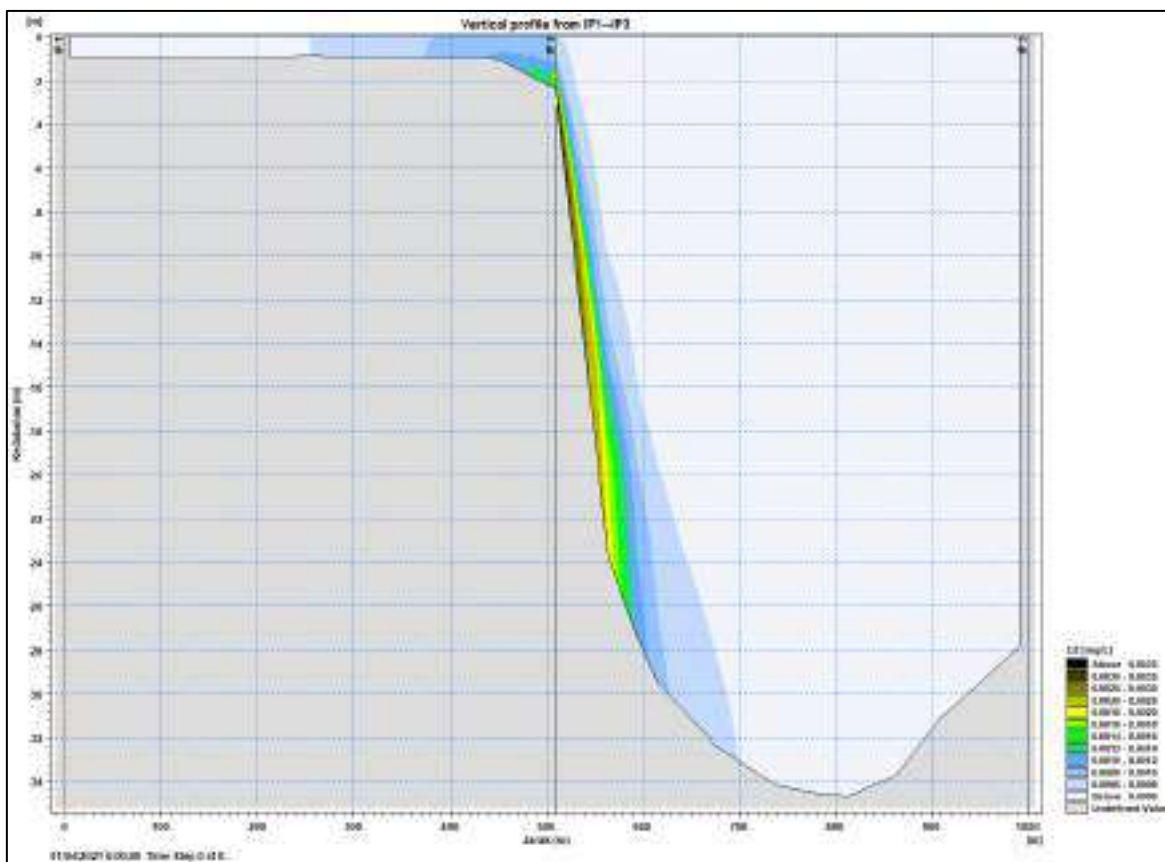
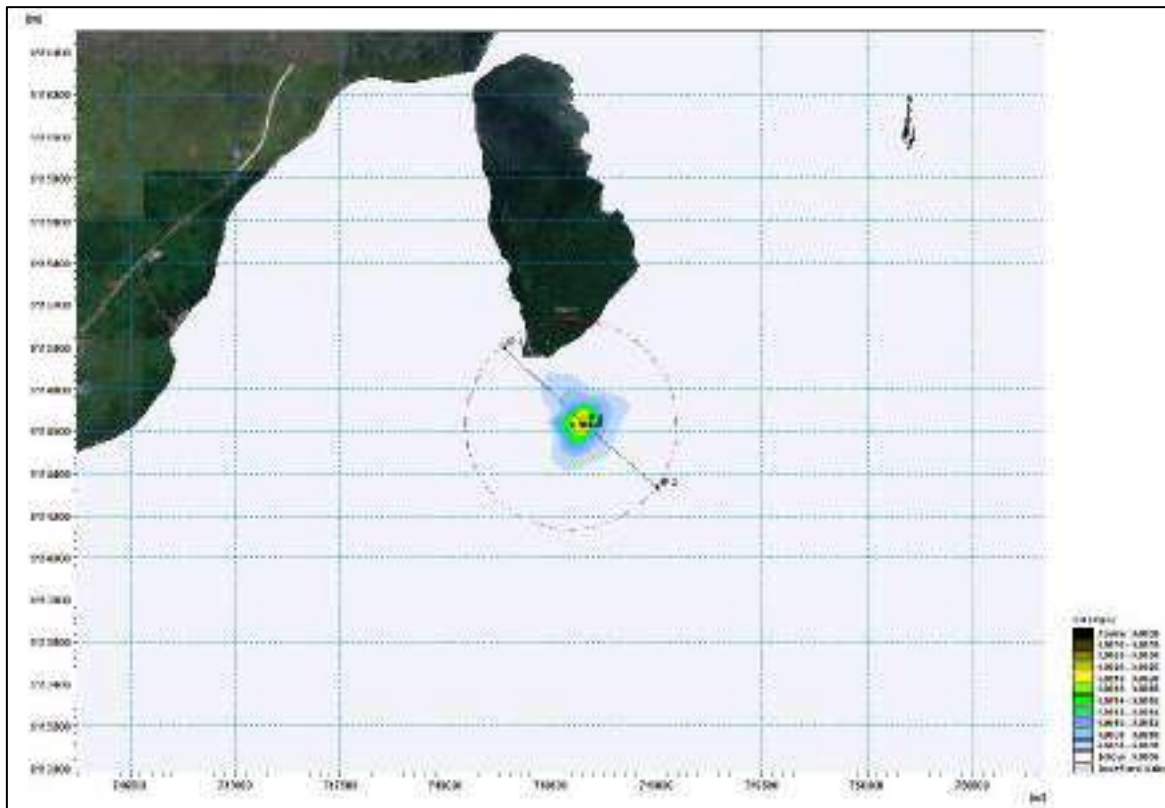
Gambar 125. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



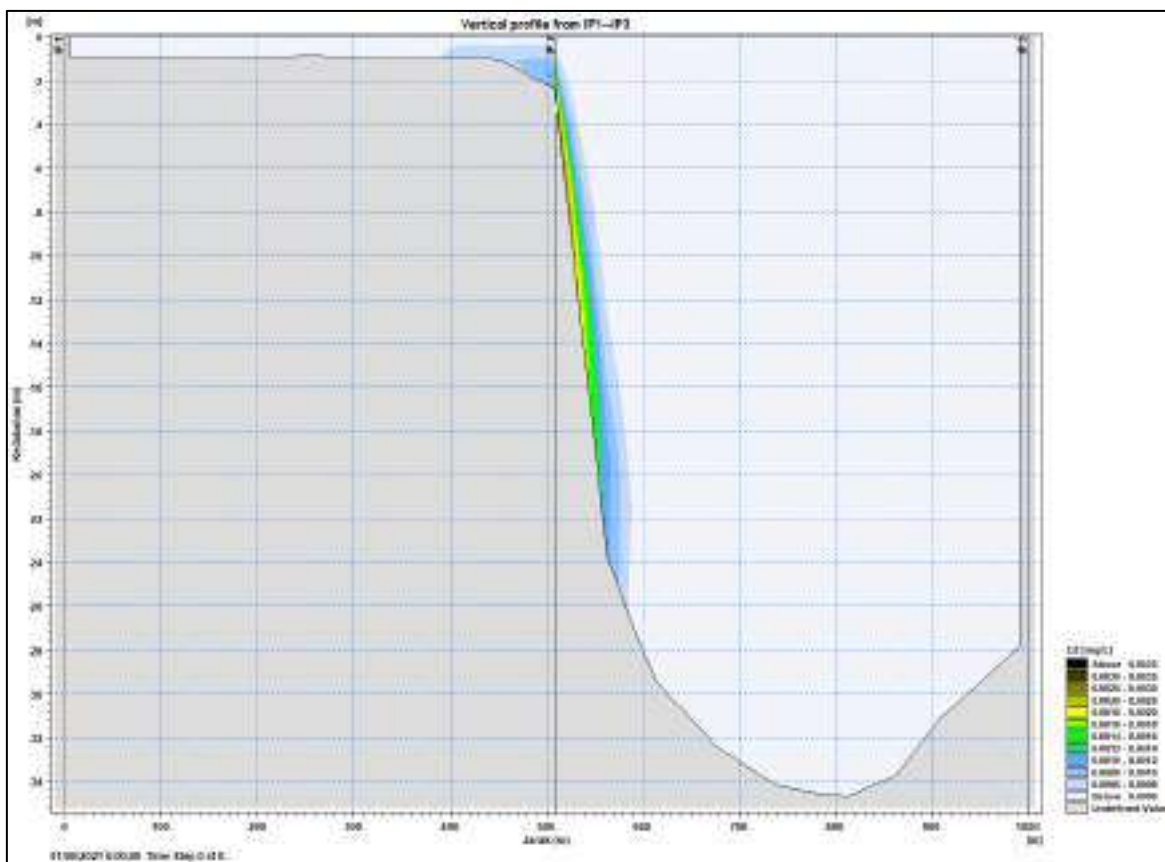
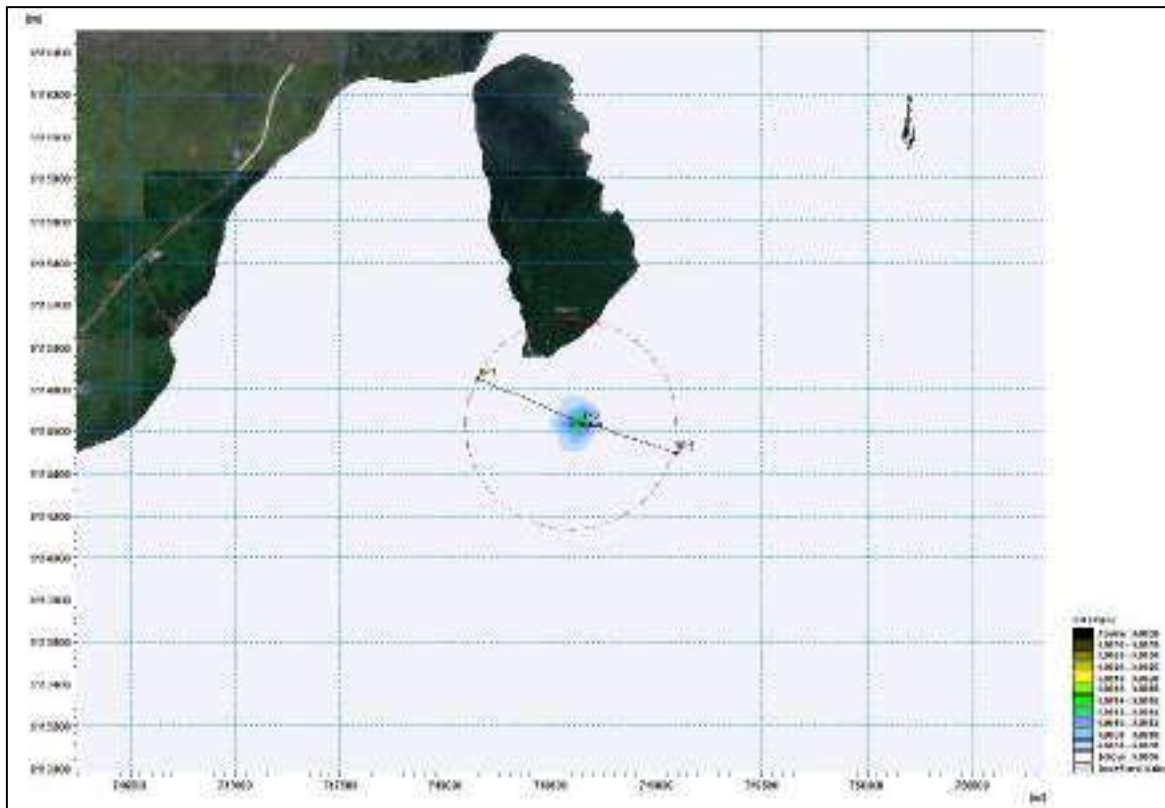
Gambar 127. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Hg maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II



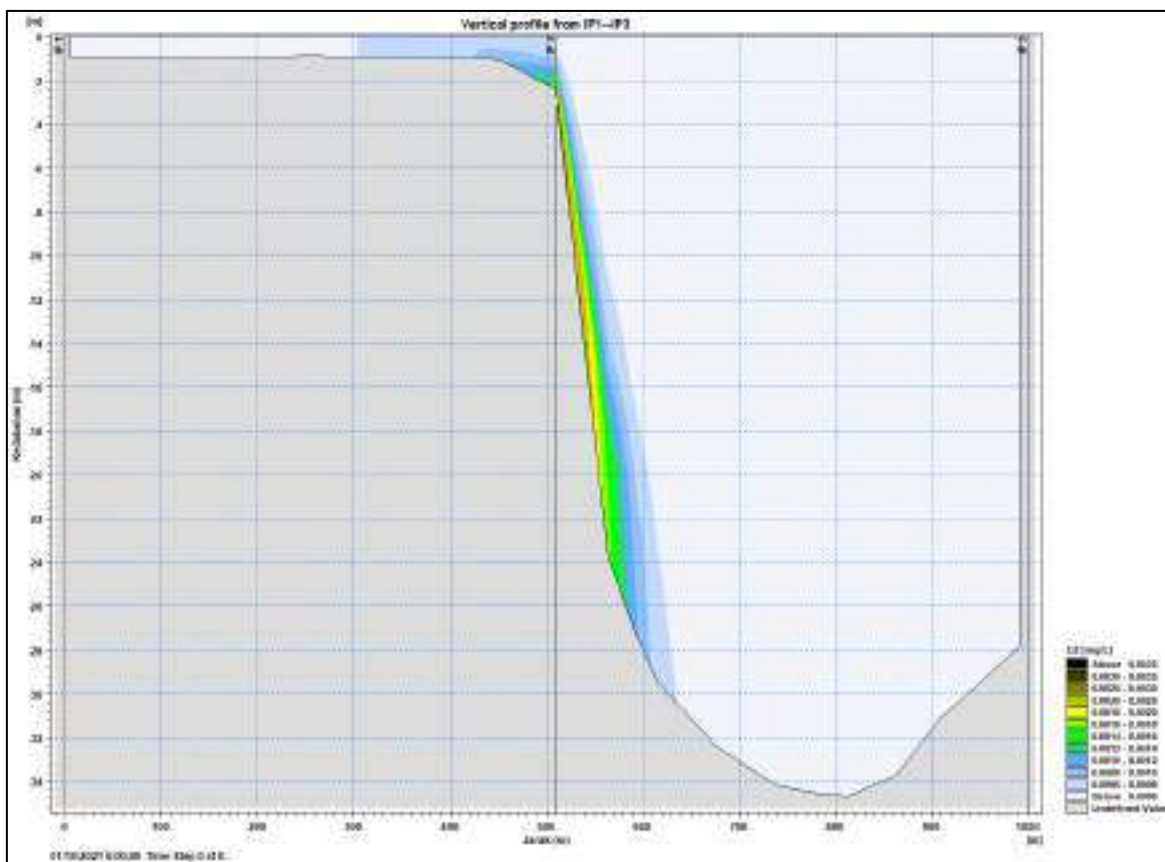
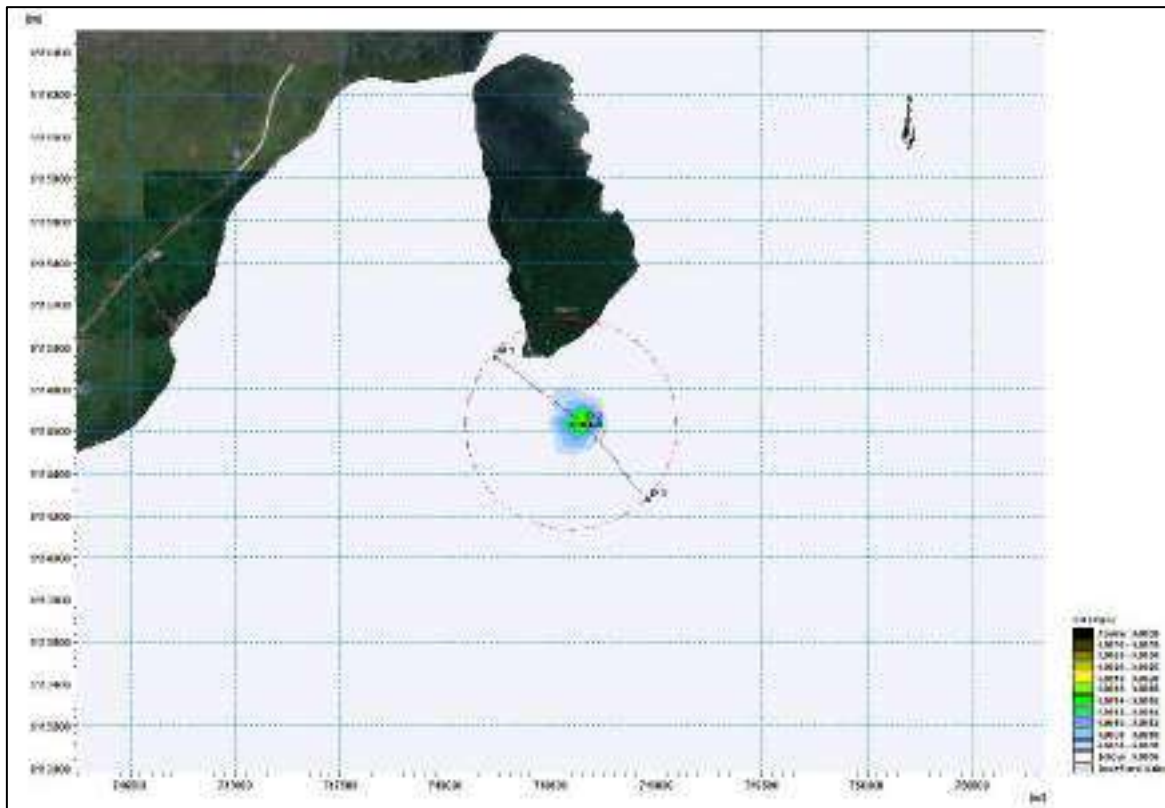
Gambar 128. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



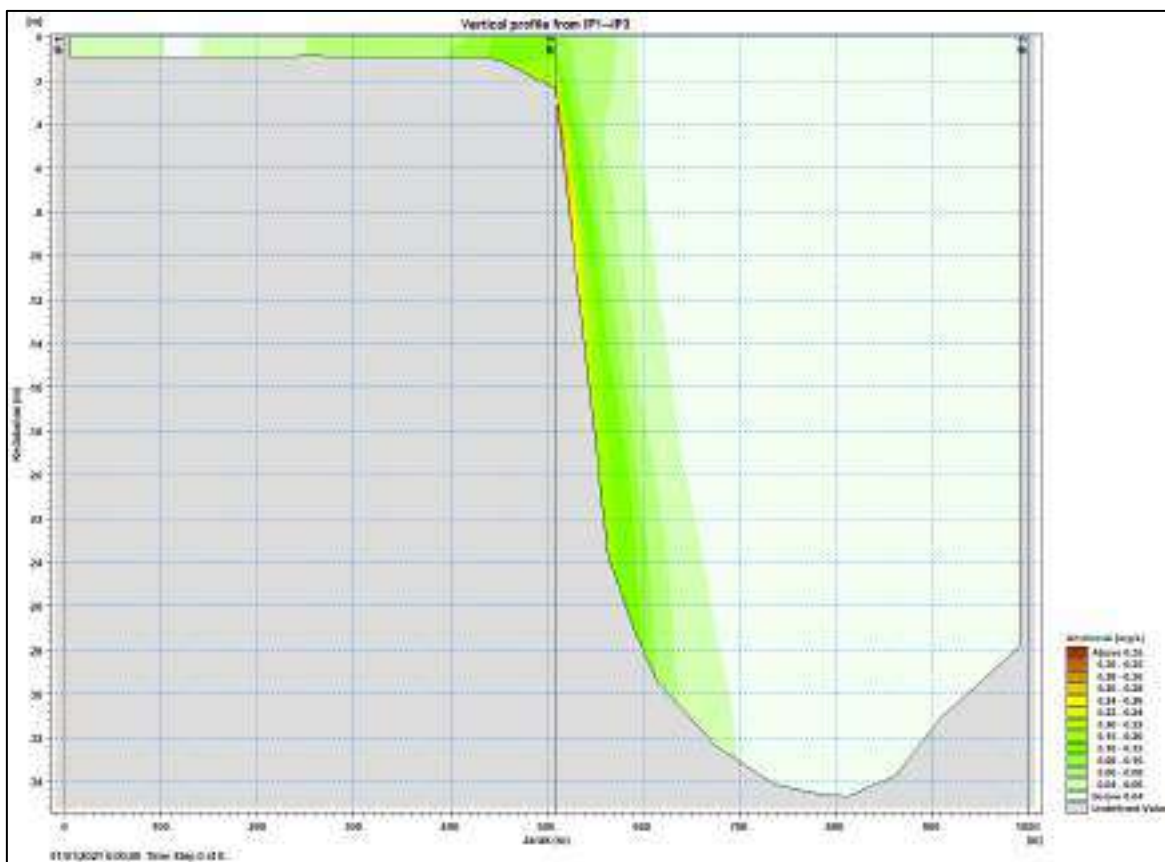
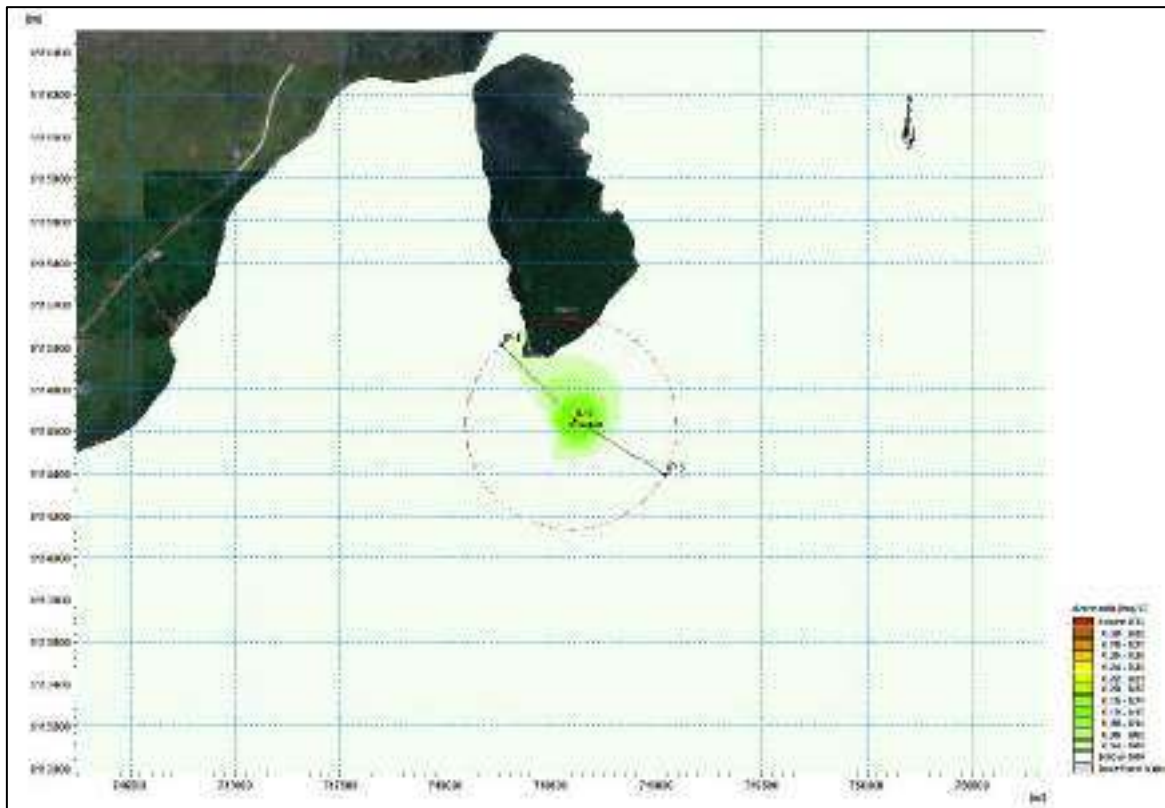
Gambar 129. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



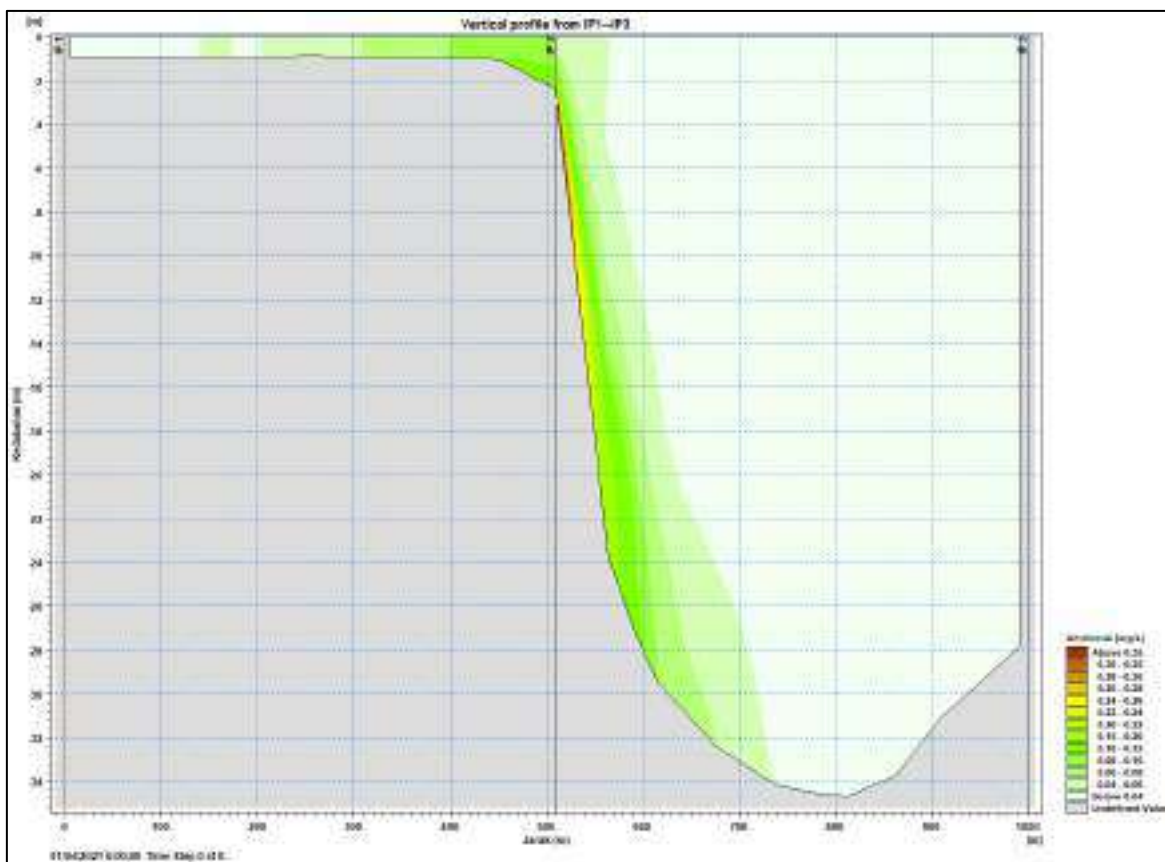
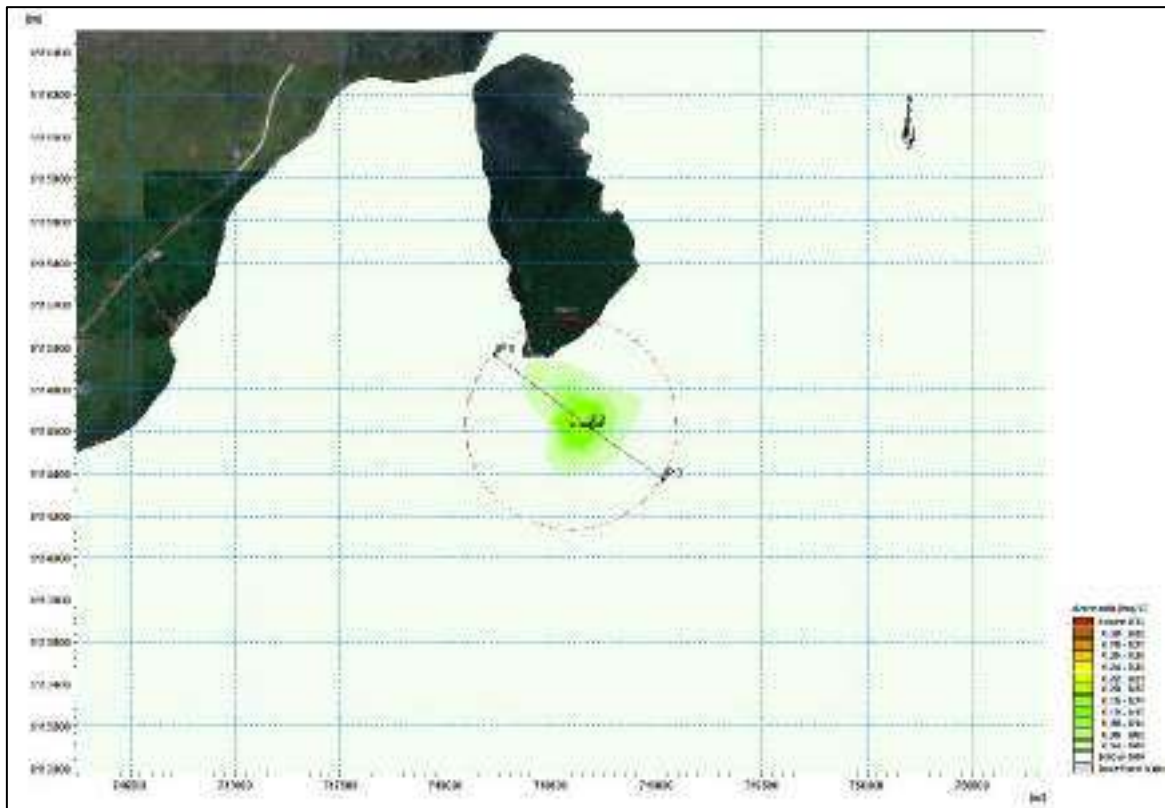
Gambar 130. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



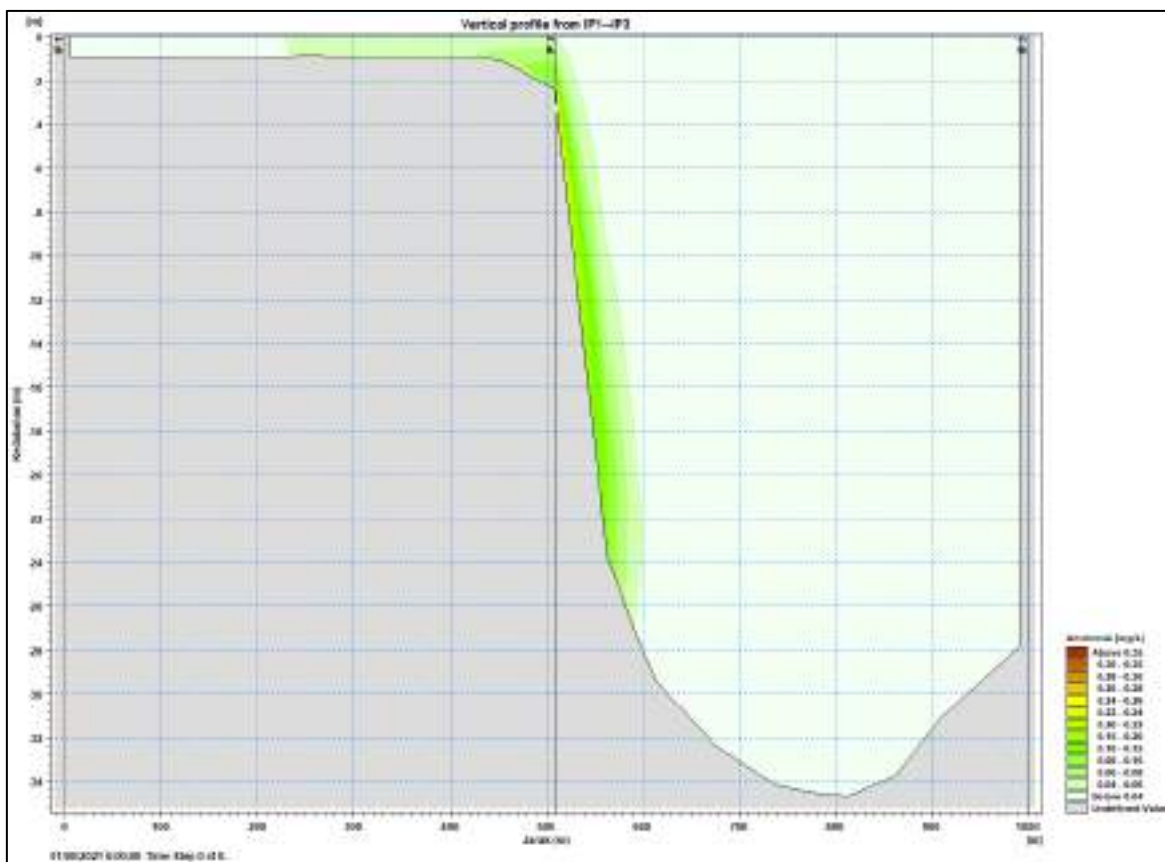
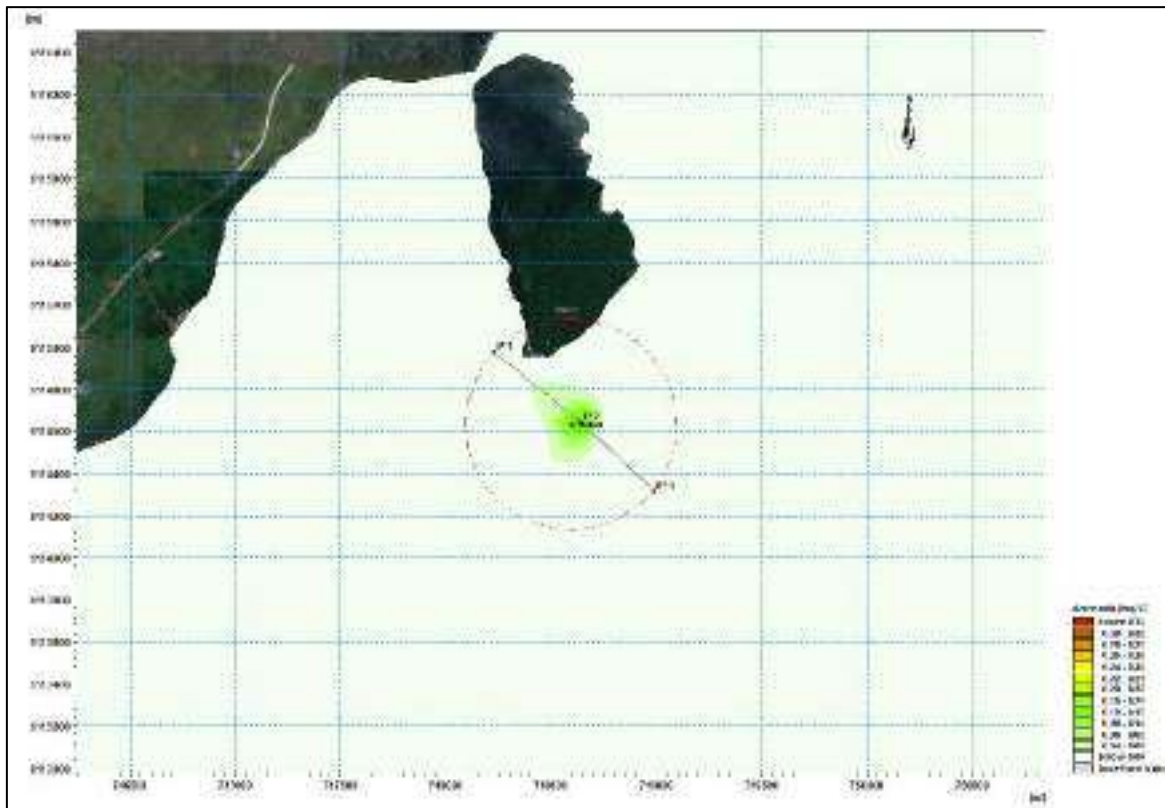
Gambar 131. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Cd maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II



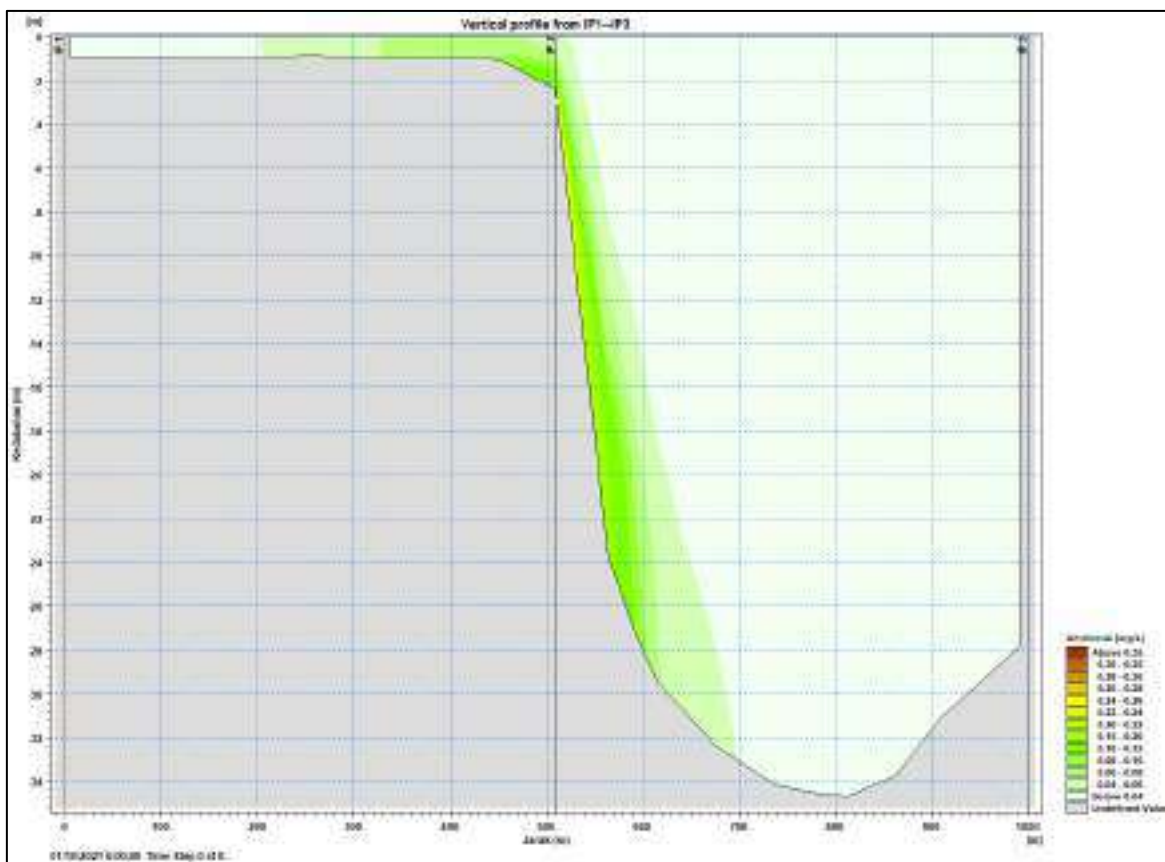
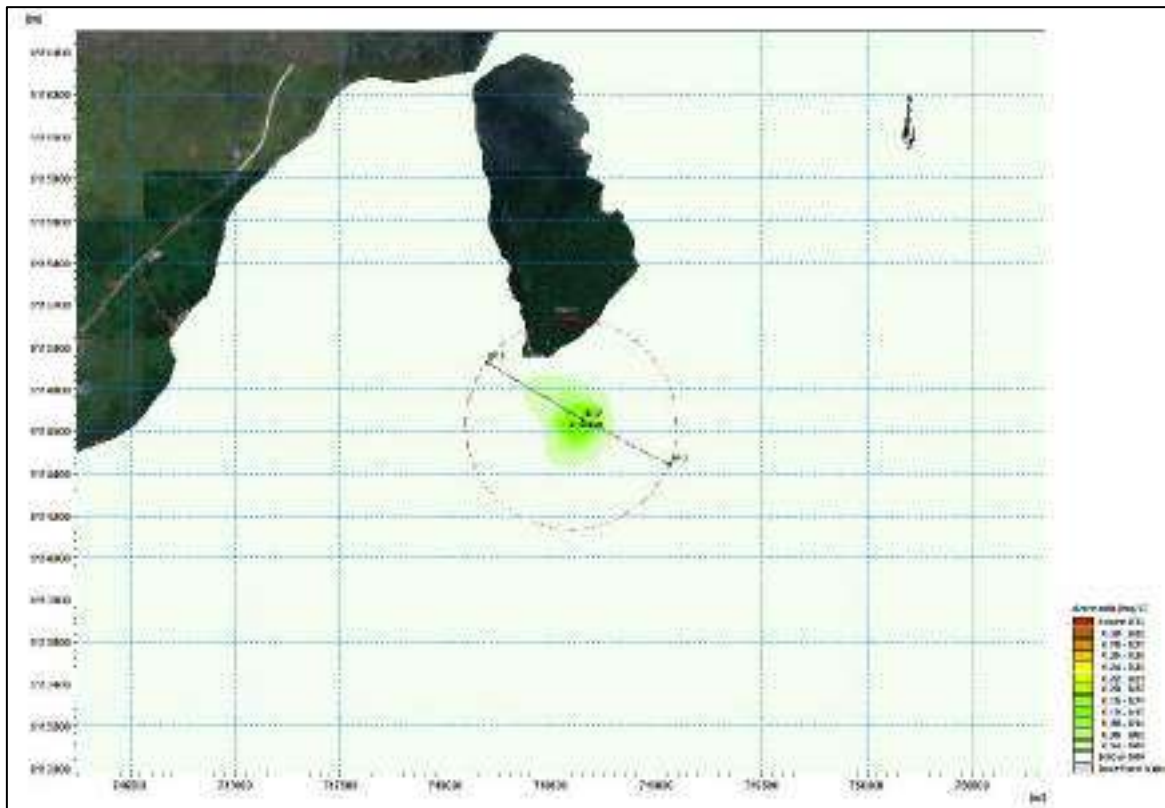
Gambar 132. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



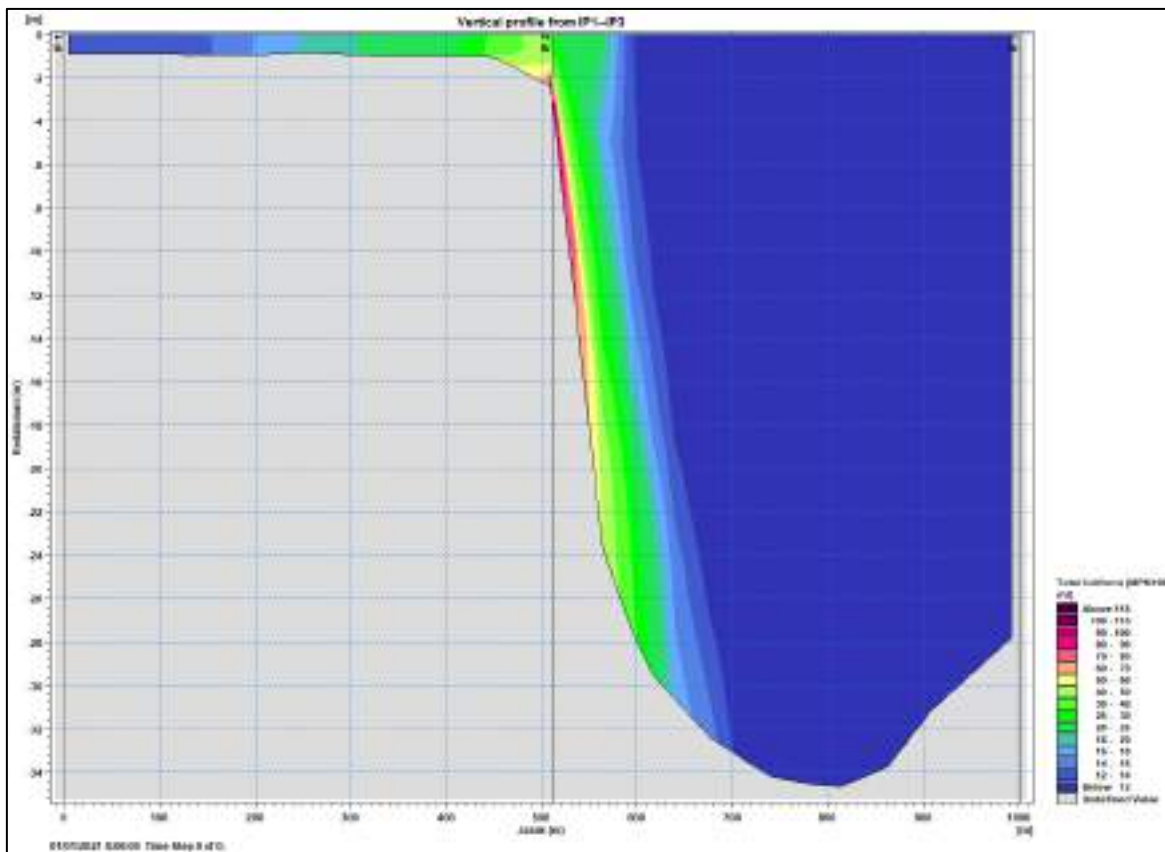
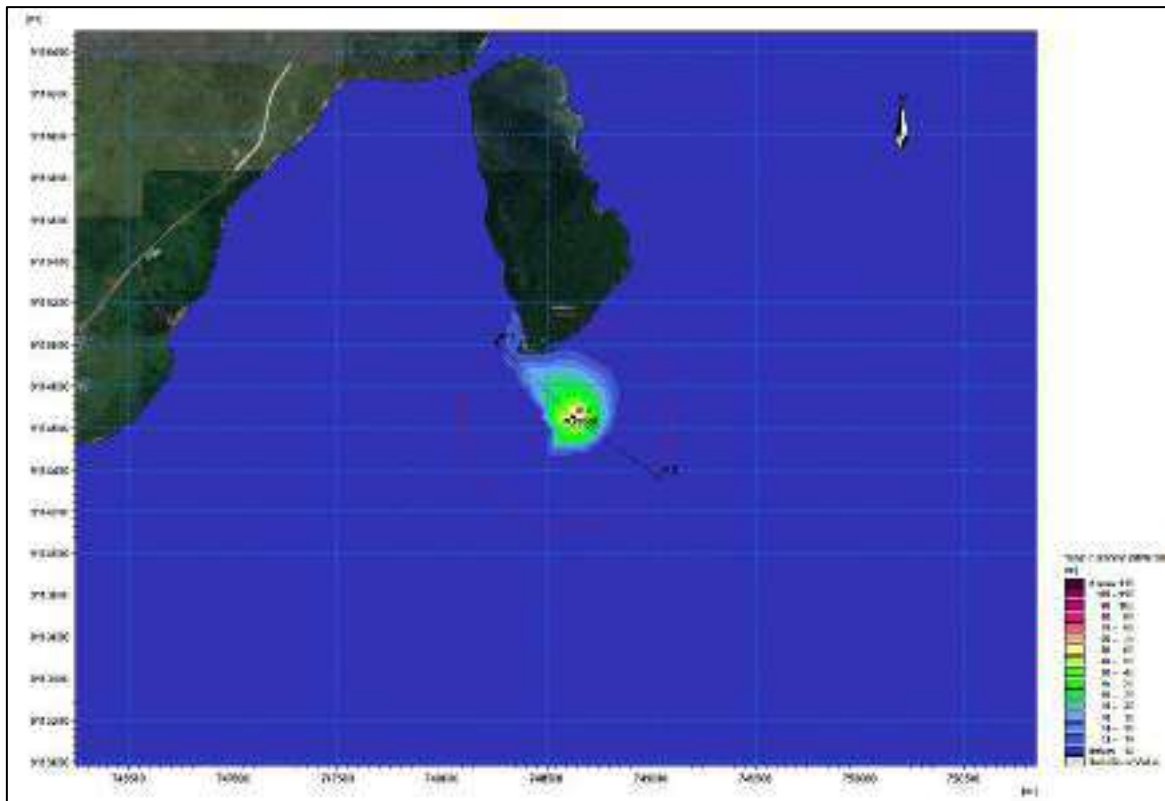
Gambar 133. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



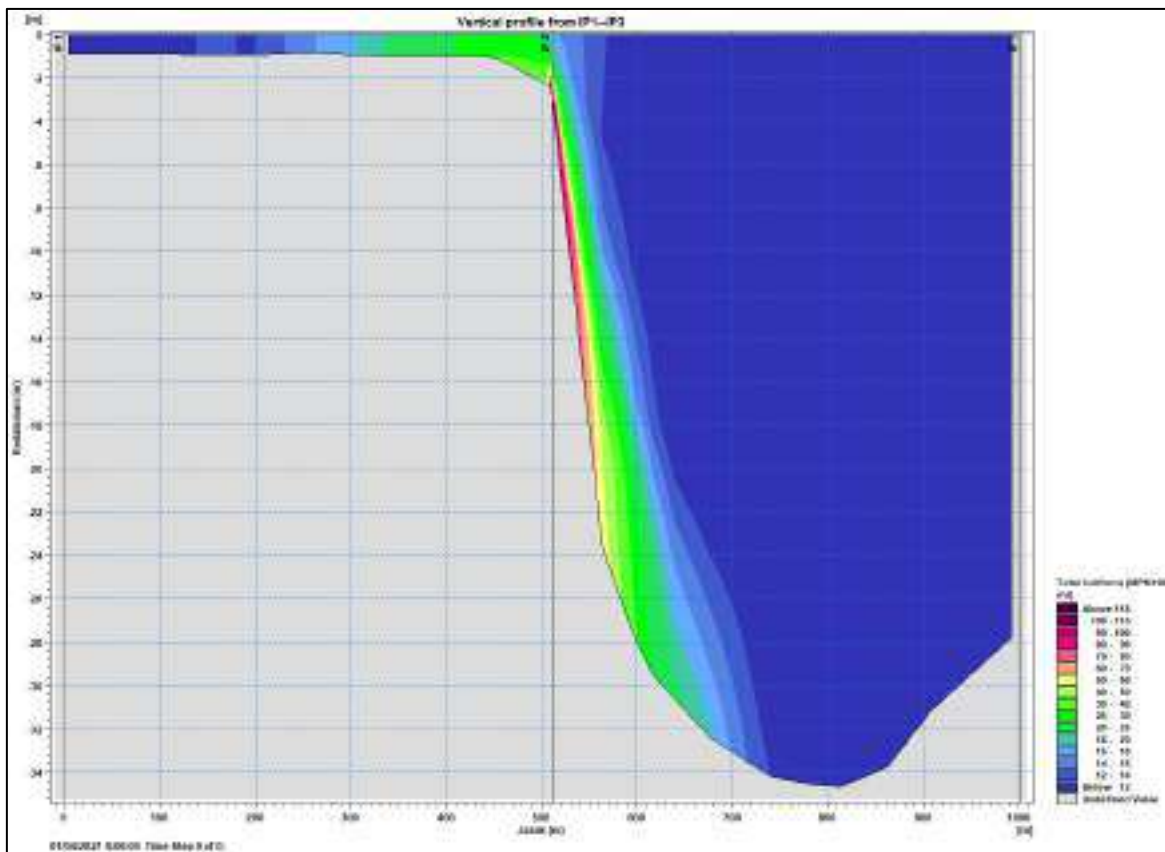
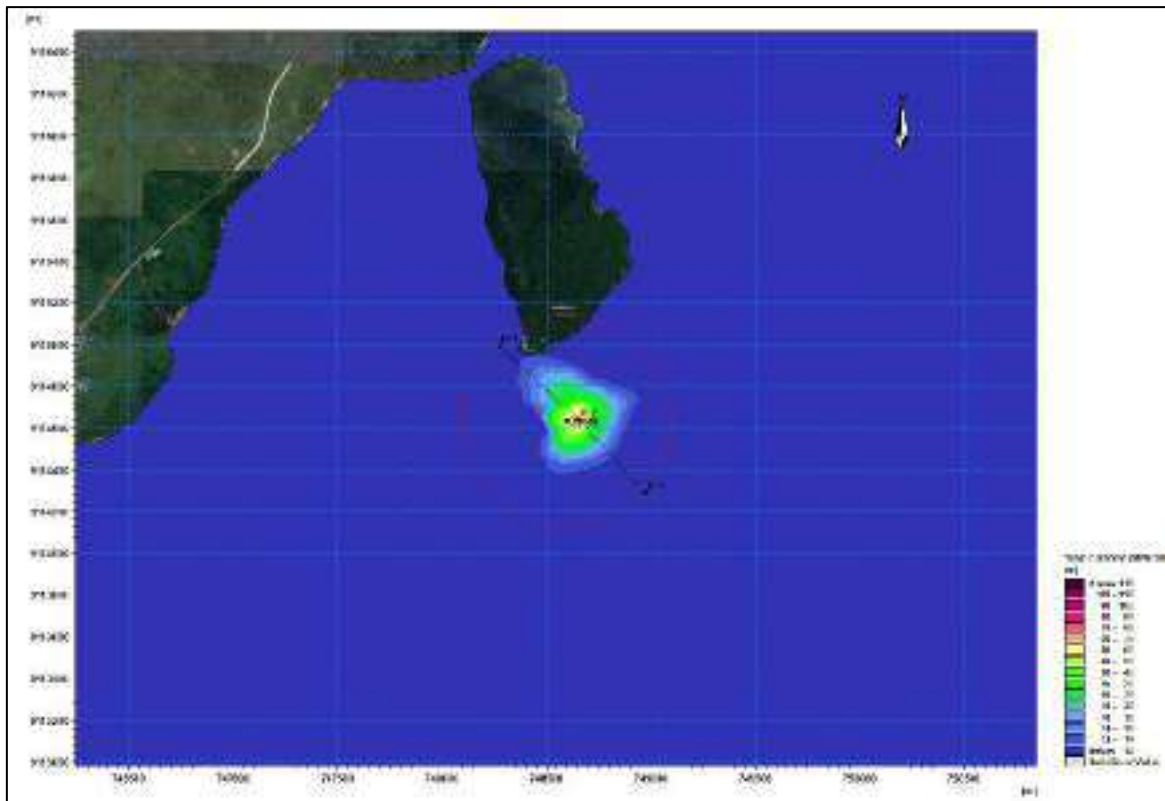
Gambar 134. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



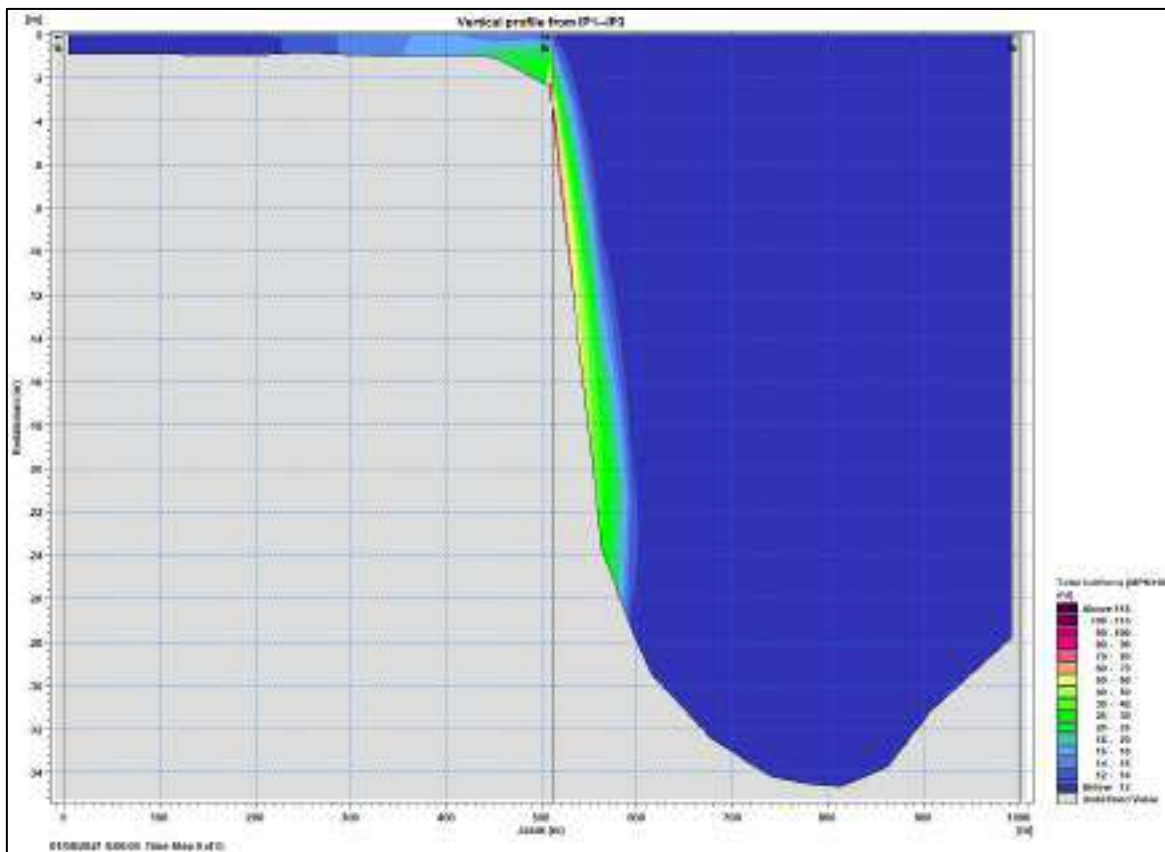
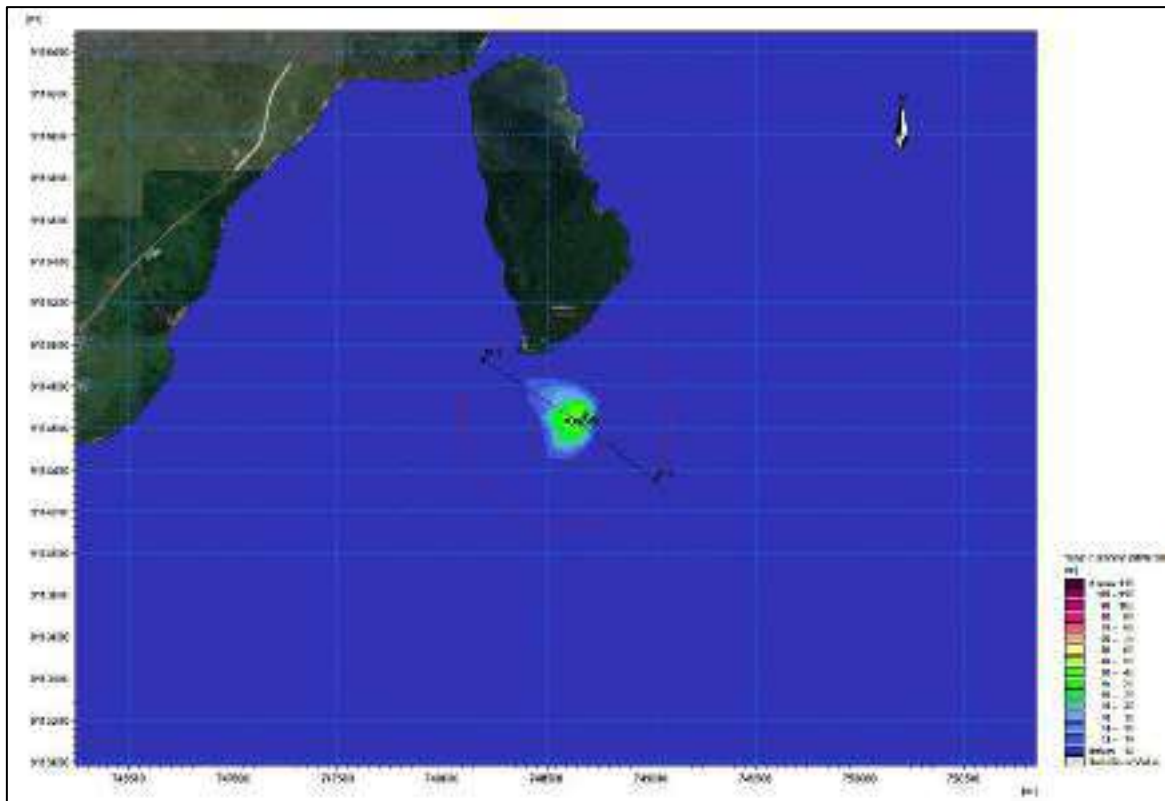
Gambar 135. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Ammonia maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II



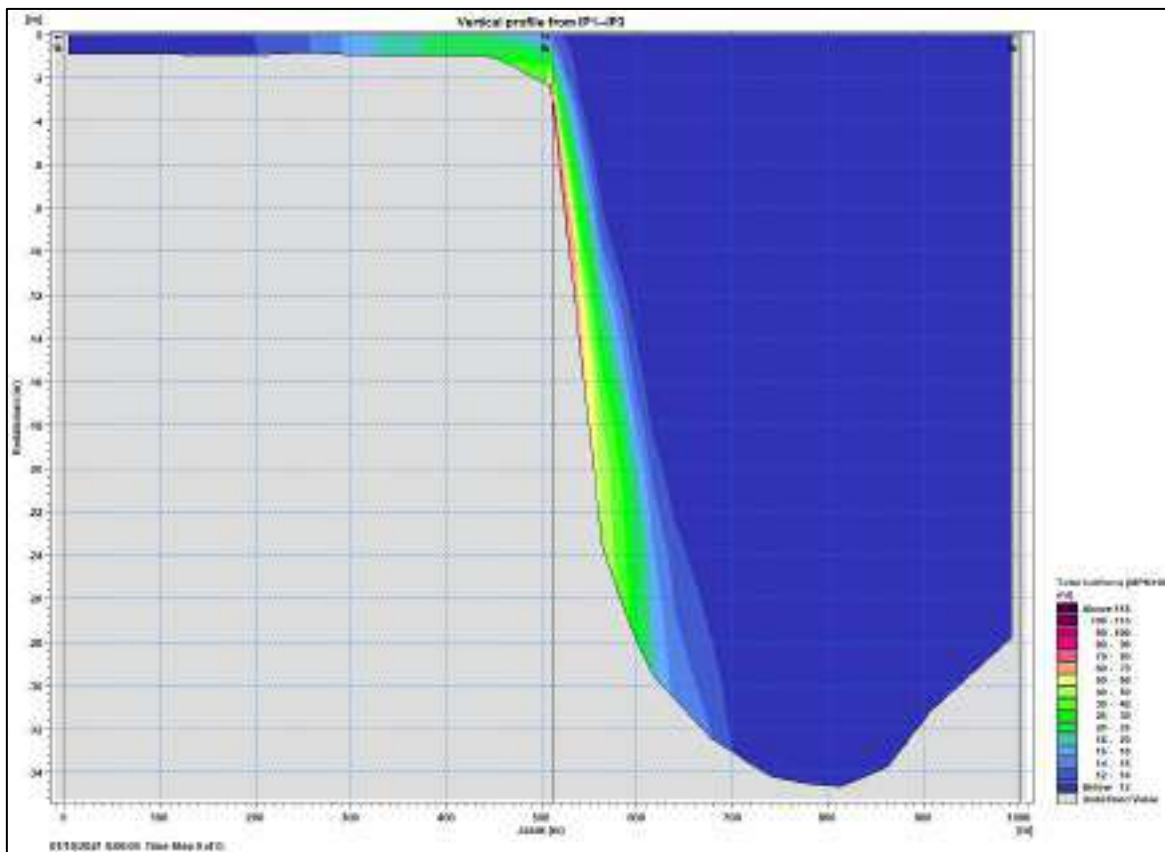
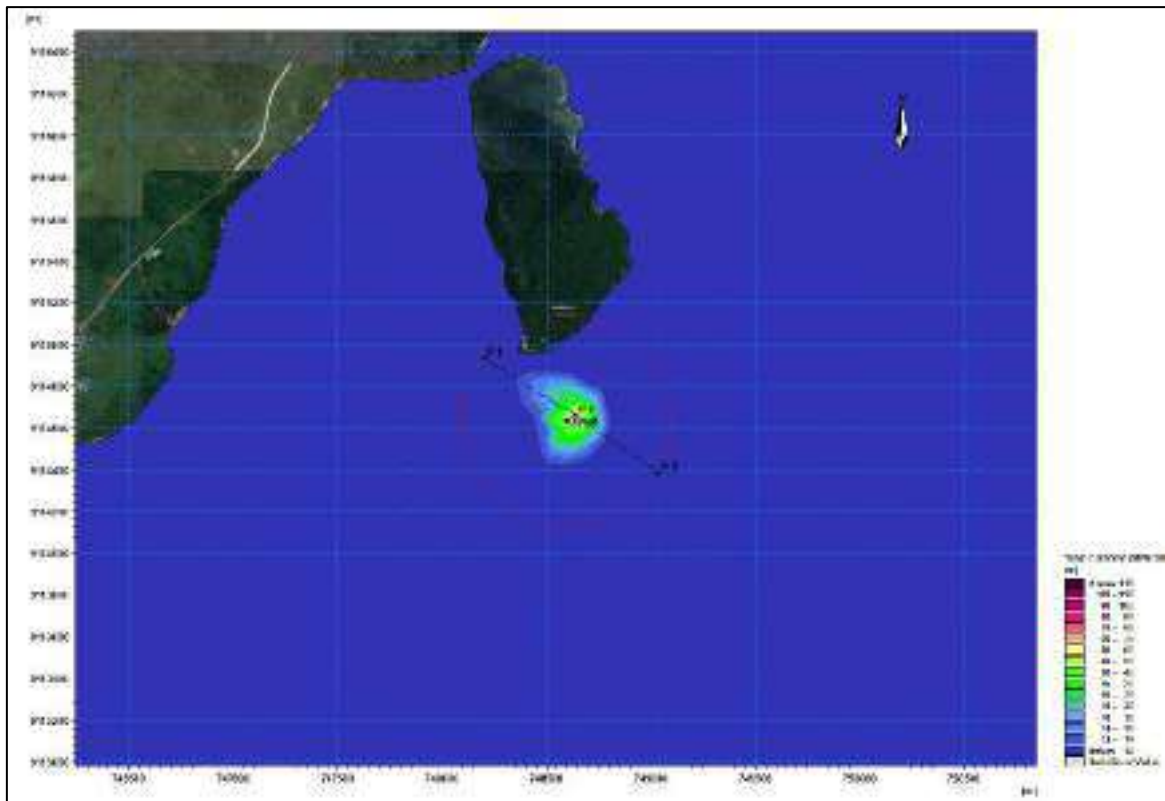
Gambar 136. Sebaran horizontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



Gambar 137. Sebaran horizontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



Gambar 138. Sebaran horizontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur

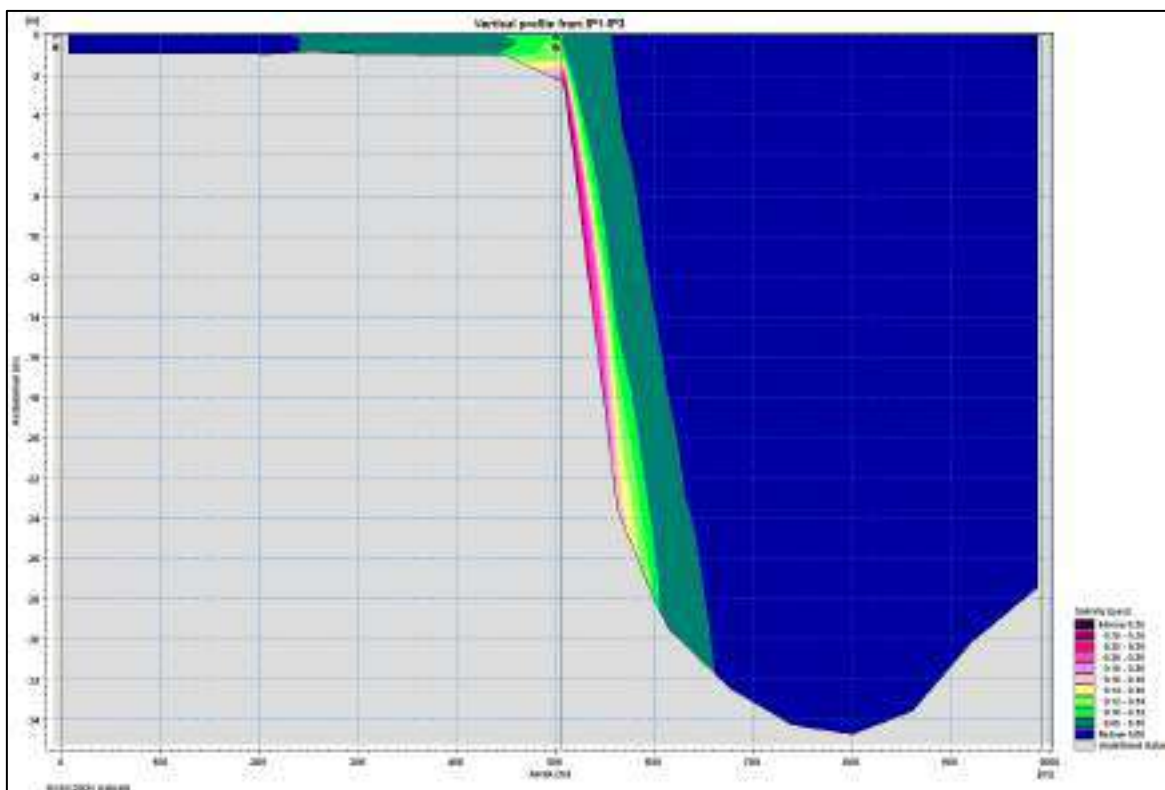
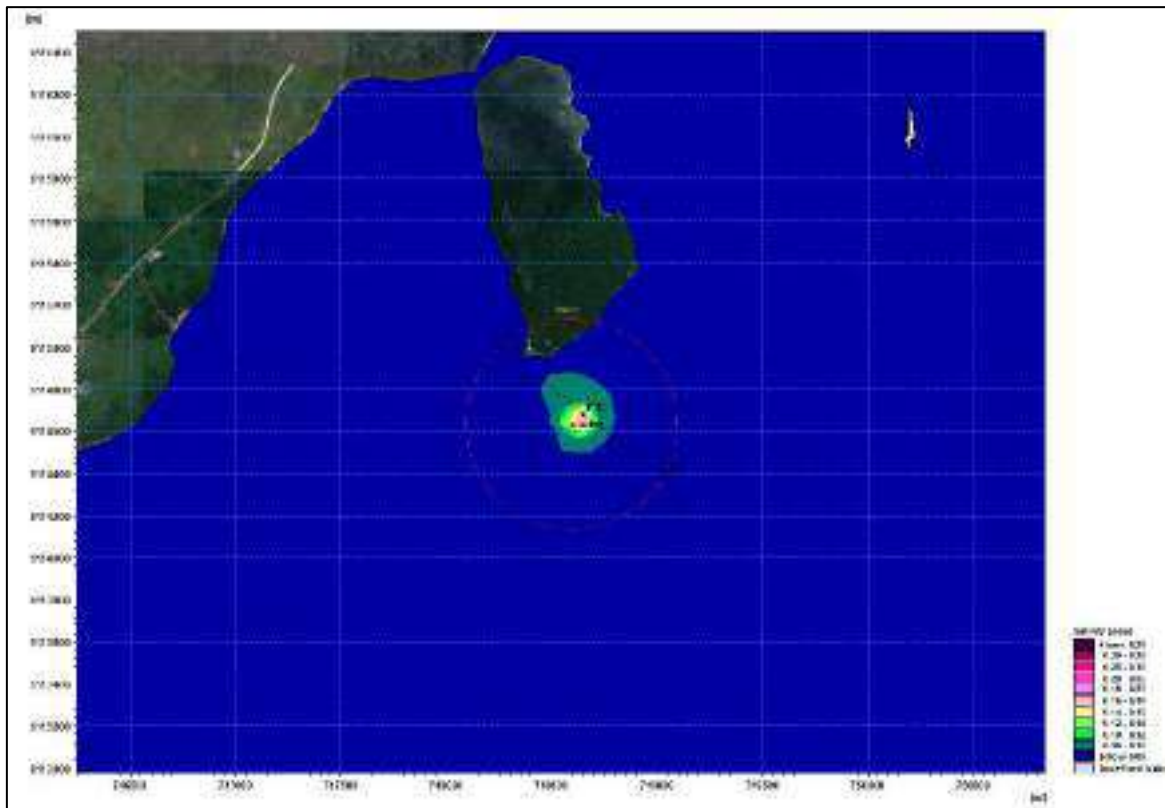


Gambar 139. Sebaran horizontal (atas) dan melintang (bawah) Total Coliform maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II

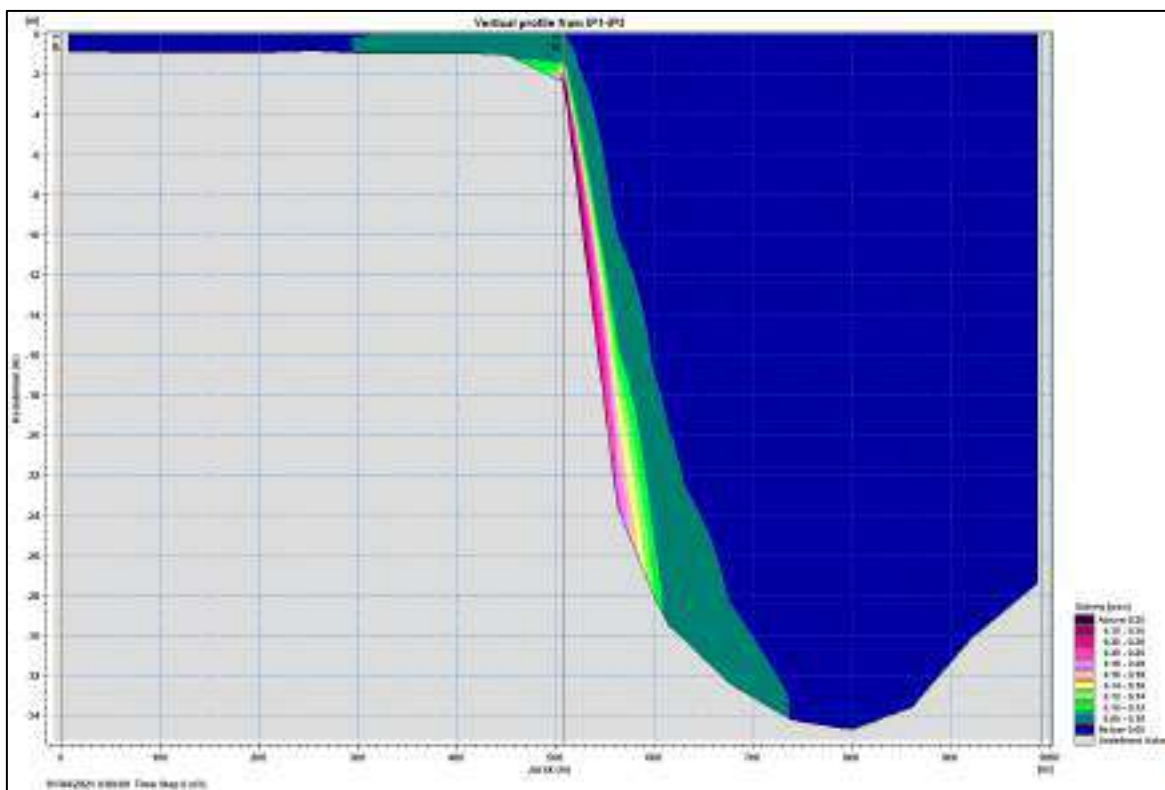
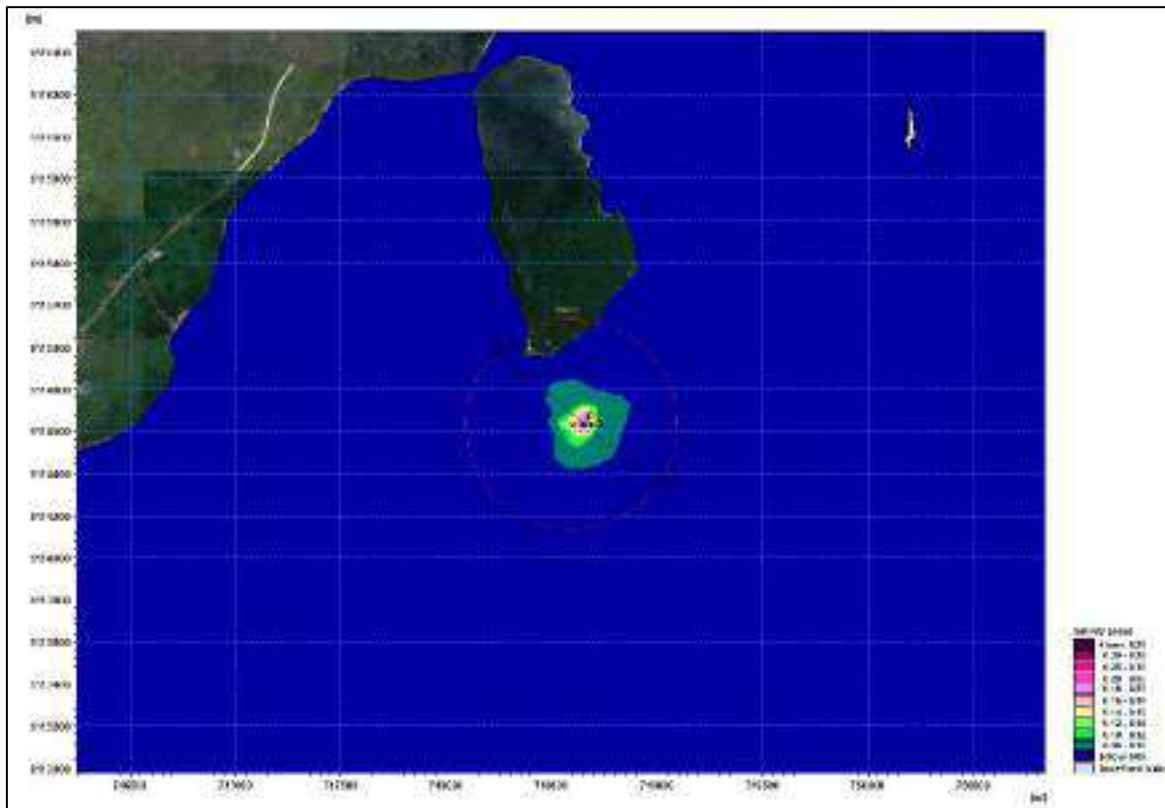
Peningkatan konsentrasi salinitas akibat buangan limbah *brine water* tergolong rendah, dimana peningkatan konsentrasi tertinggi hasil model musim barat (**Gambar 140**) dan peralihan I (**Gambar 141**) hanya mencapai 0.35 psu, sedangkan hasil model musim timur (**Gambar 142**) dan peralihan II (**Gambar 143**) sebesar 0.3psu. Mengacu pada baku mutu PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII bahwa salinitas diperbolehkan terjadi perubahan sampai dengan <5% dari salinitas rata-rata musiman. Berdasarkan data kualitas air 18 titik sekitar lokasi OLNG rata-rata salinitas permukaan pada musim kemarau sebesar 34.4 psu, sedangkan pada musim hujan 33.7 psu. Perubahan 5% dari salinitas rata-rata kedua musim tersebut adalah $5\% \times 34.4 \text{ psu} = 1.72 \text{ psu}$ dan adalah $5\% \times 33.7 \text{ psu} = 1.68 \text{ psu}$. Dengan demikian peningkatan salinitas akibat buangan limbah *brine water* masih tergolong rendah atau di bawah 5% dari salinitas rata-rata perairan badan air penerima.

Karakter sebaran fosfat hasil model yang diperlihatkan dalam **Gambar 144** hingga **Gambar 147** tidak jauh berbeda dengan parameter lainnya, dimana sebarannya hanya di sekitar titik buangan. Peningkatan konsentrasi fosfat maksimum tergolong cukup tinggi, yakni pada musim barat dan peralihan I mencapai 0.07 mg/L, sedangkan musim timur dan peralihan II mencapai 0.06 mg/L. Baku mutu fosfat berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota tergolong ketat, yakni 0.015 mg/L, sehingga konsentrasi fosfat hasil model terlihat tinggi atau melampaui baku mutu. Jarak sebaran konsentrasi fosfat yang melebihi baku mutu pada musim barat mencapai 170 m ke timur laut dan 108 m ke barat daya, pada musim peralihan I ke arah timur laut dan barat daya masing-masing mencapai 180 m dan 142 m, saat musim timur mencapai 162 m dan 104 m, sedangkan pada musim peralihan II mencapai 163 m dan 140 m.

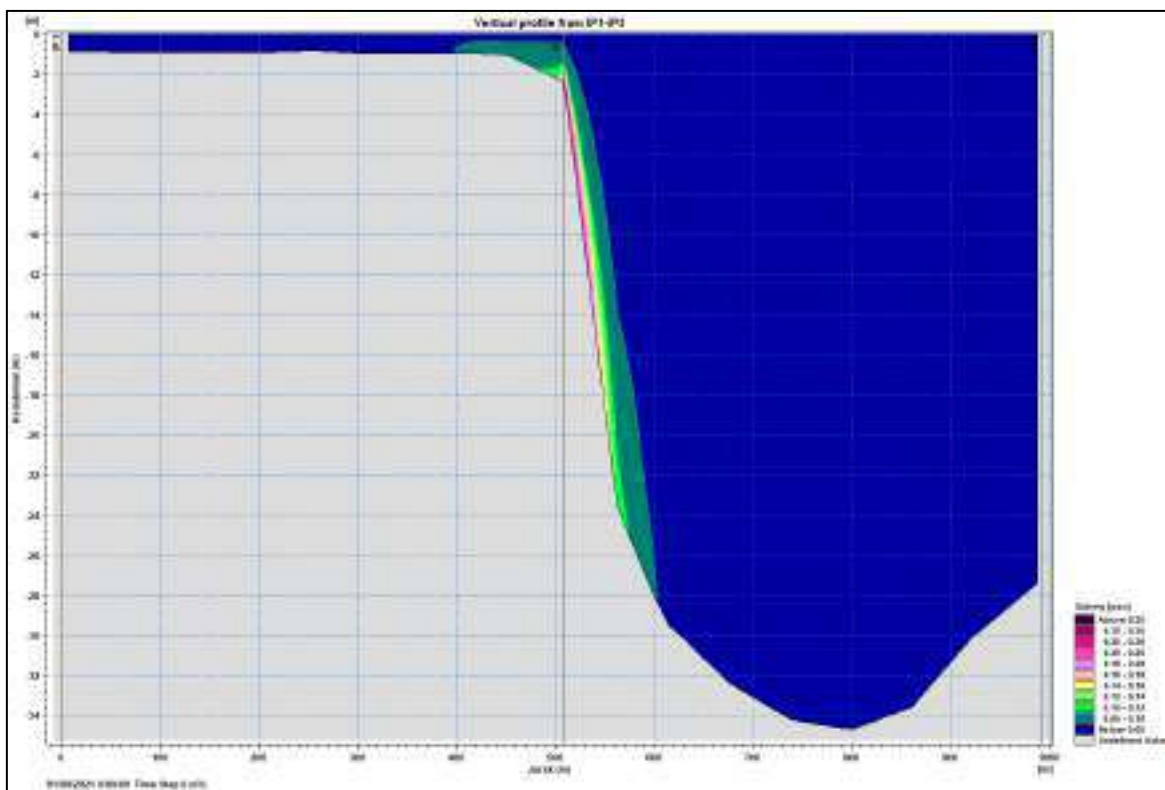
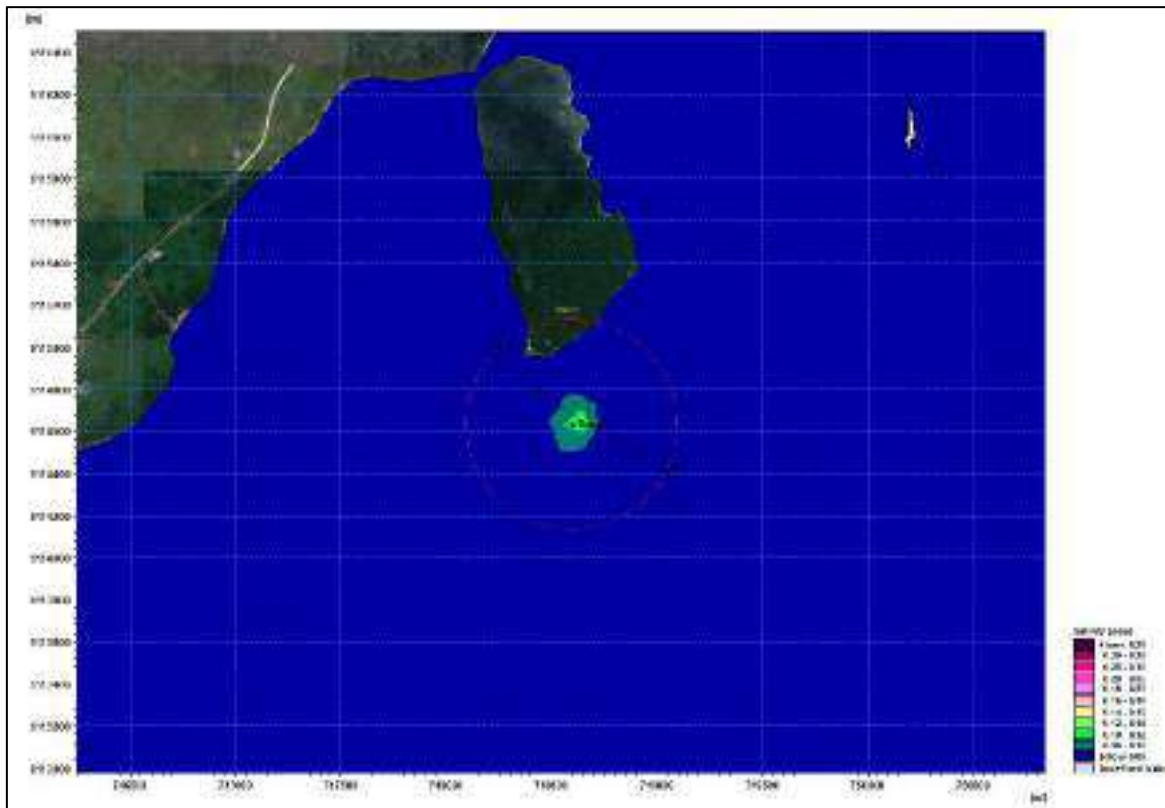
Pola sebaran nitrat yang ditampilkan dalam **Gambar 148** hingga **Gambar 151** sedikit berbeda dengan parameter lainnya, dimana pola sebarannya terlihat lebih jauh. Peningkatan konsentrasi setelah masuk ke perairan juga tergolong tinggi, dimana pada musim barat dan peralihan I mencapai 1.75 mg/L, sedangkan pada musim timur dan peralihan II mencapai 1.25 mg/L. Baku mutu nitrat berdasarkan PP No 22 Tahun 2021 Lampiran VIII untuk biota tergolong ketat, yakni 0.06 mg/L, sehingga hasil model pada keseluruhan musim tersebut tergolong tinggi atau melebihi baku mutu. Jarak sebaran nitrat yang melebihi baku mutu pada musim barat mencapai 1 km ke timur laut, 450 m ke barat daya dan 1.7 km ke utara. Jarak sebaran ke timur laut, ke barat daya dan ke utara saat musim peralihan I masing-masing mencapai 1000 m, 680 m dan 1.8 km, pada musim timur masing-masing mencapai 265 m, 524 m dan 1.6 km, sedangkan pada musim peralihan II masing-masing mencapai 345 m, 524 m dan 1.6 km



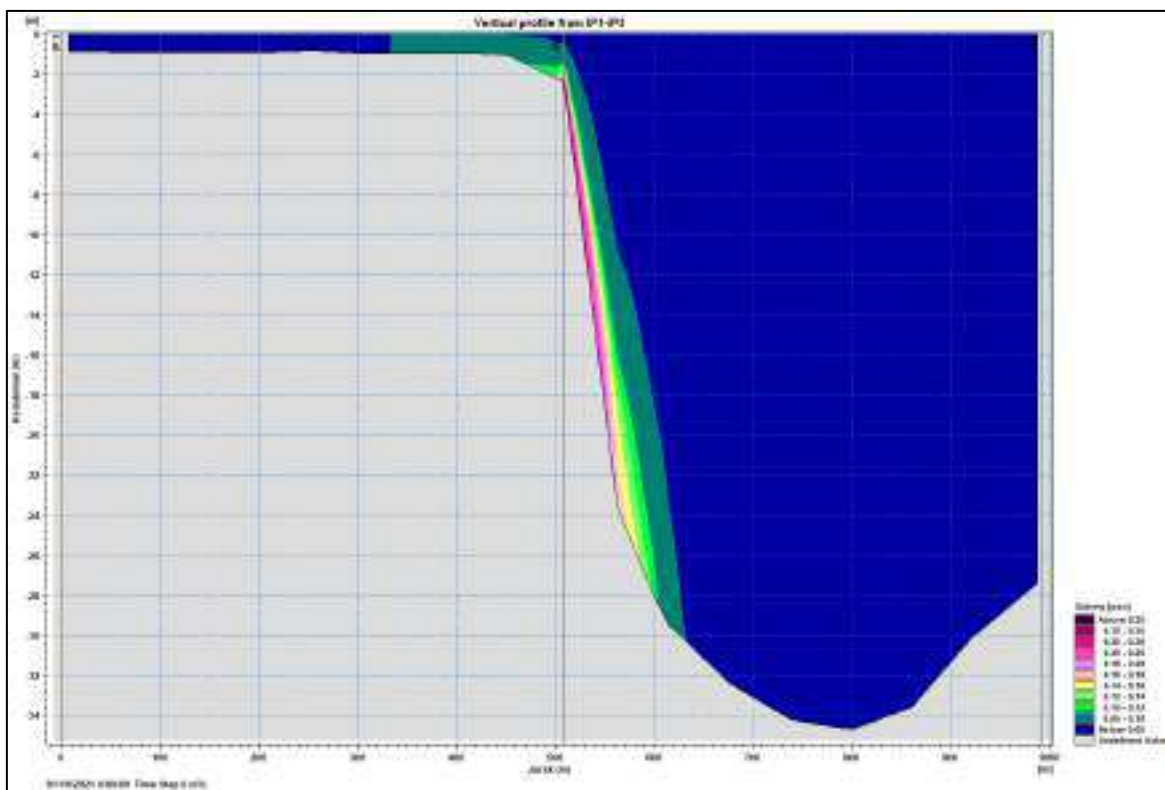
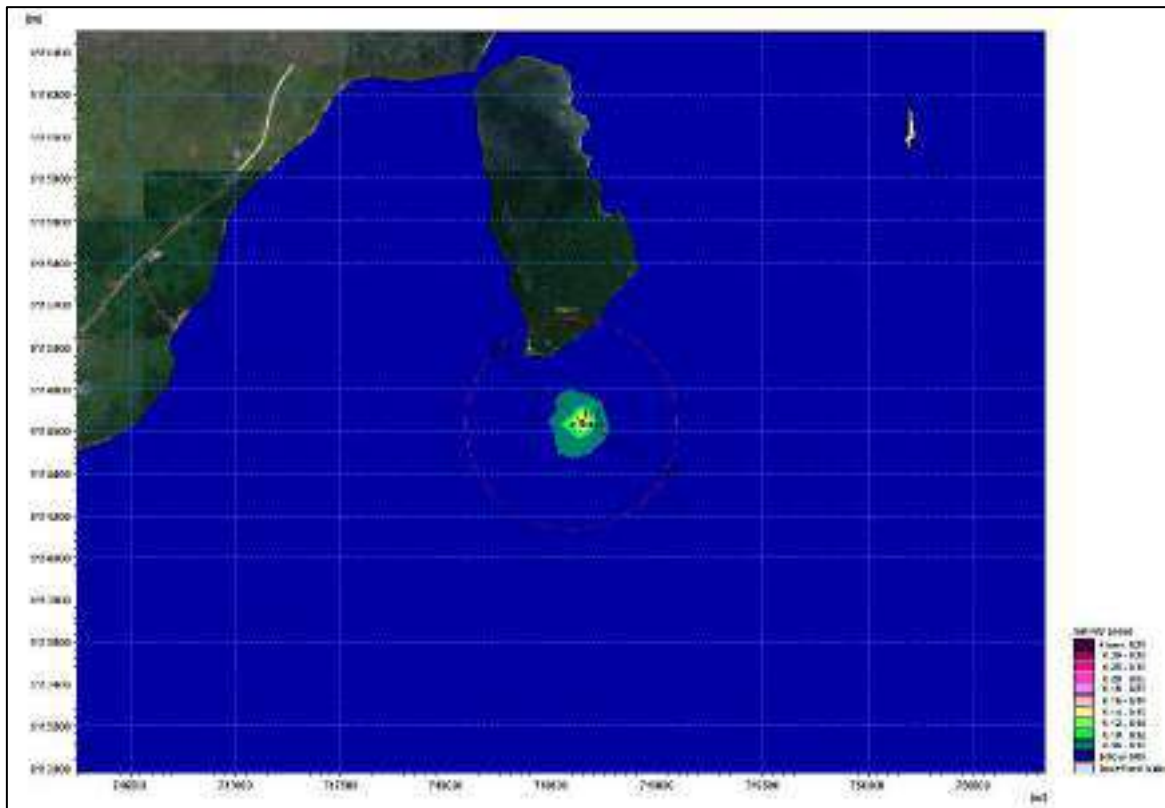
Gambar 140. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



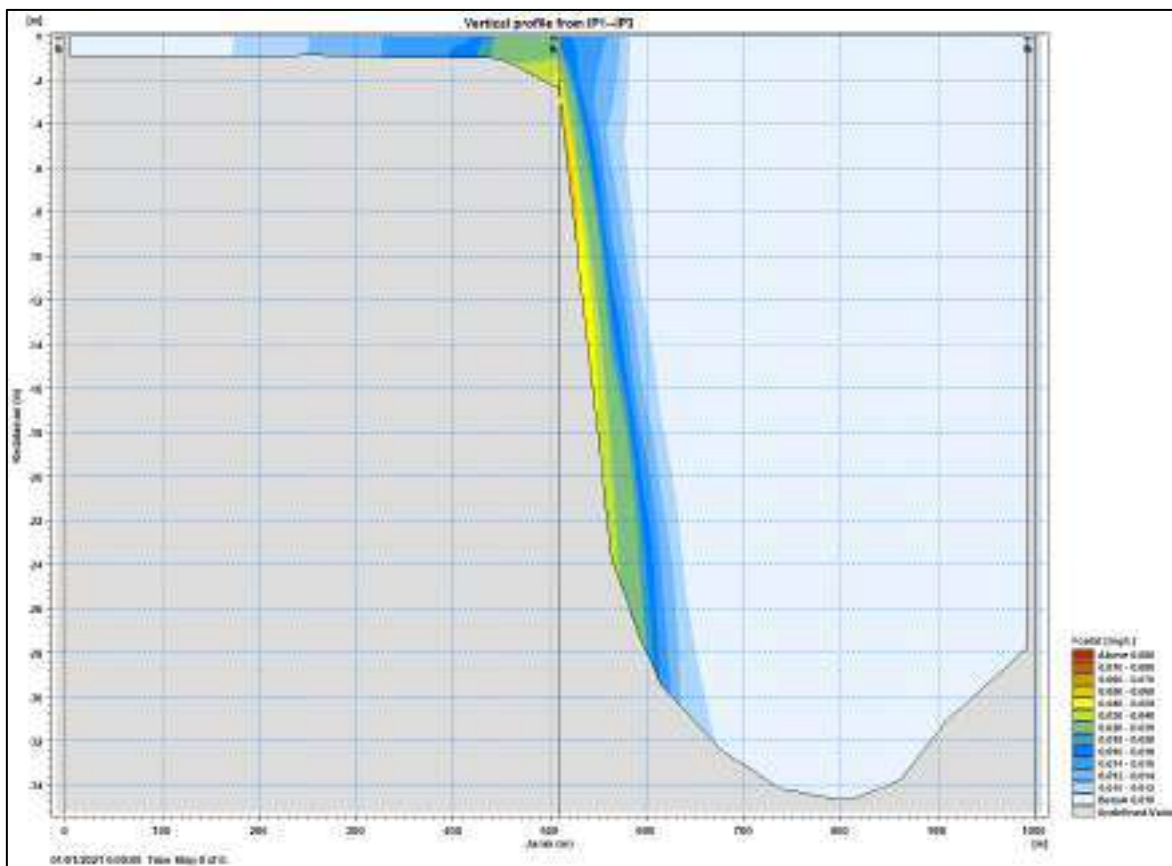
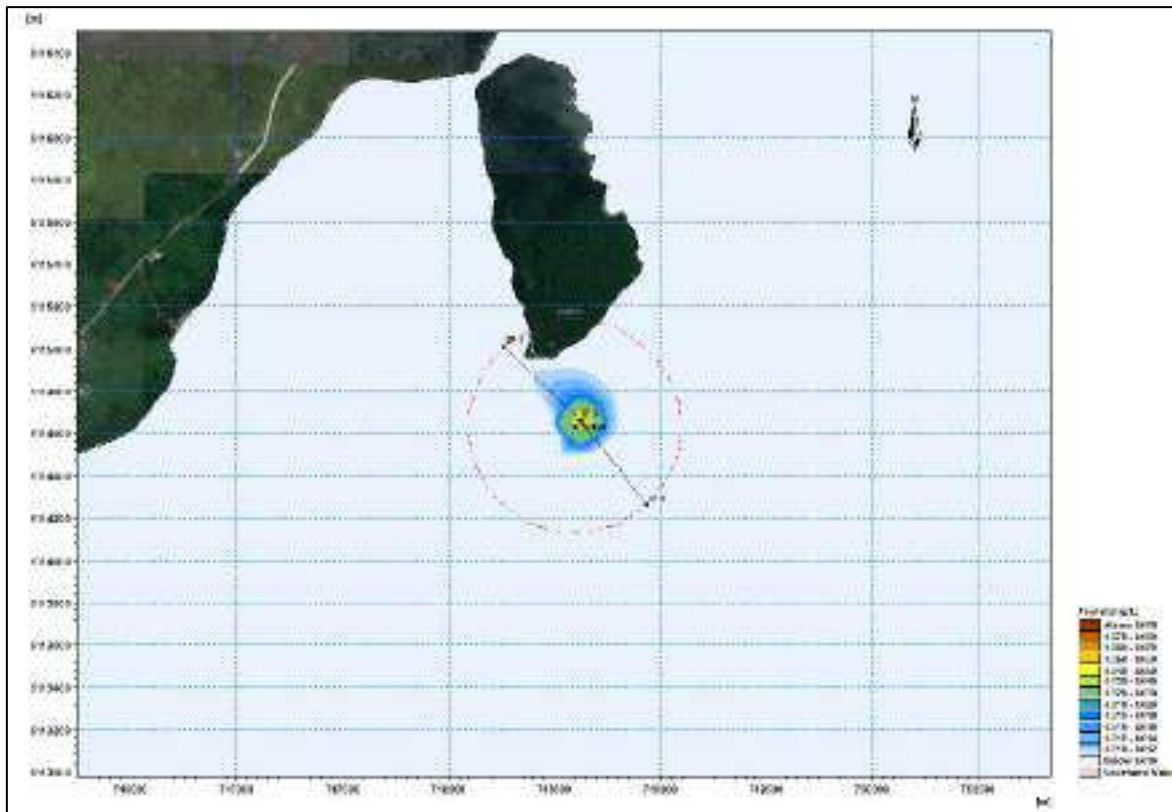
Gambar 141. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I



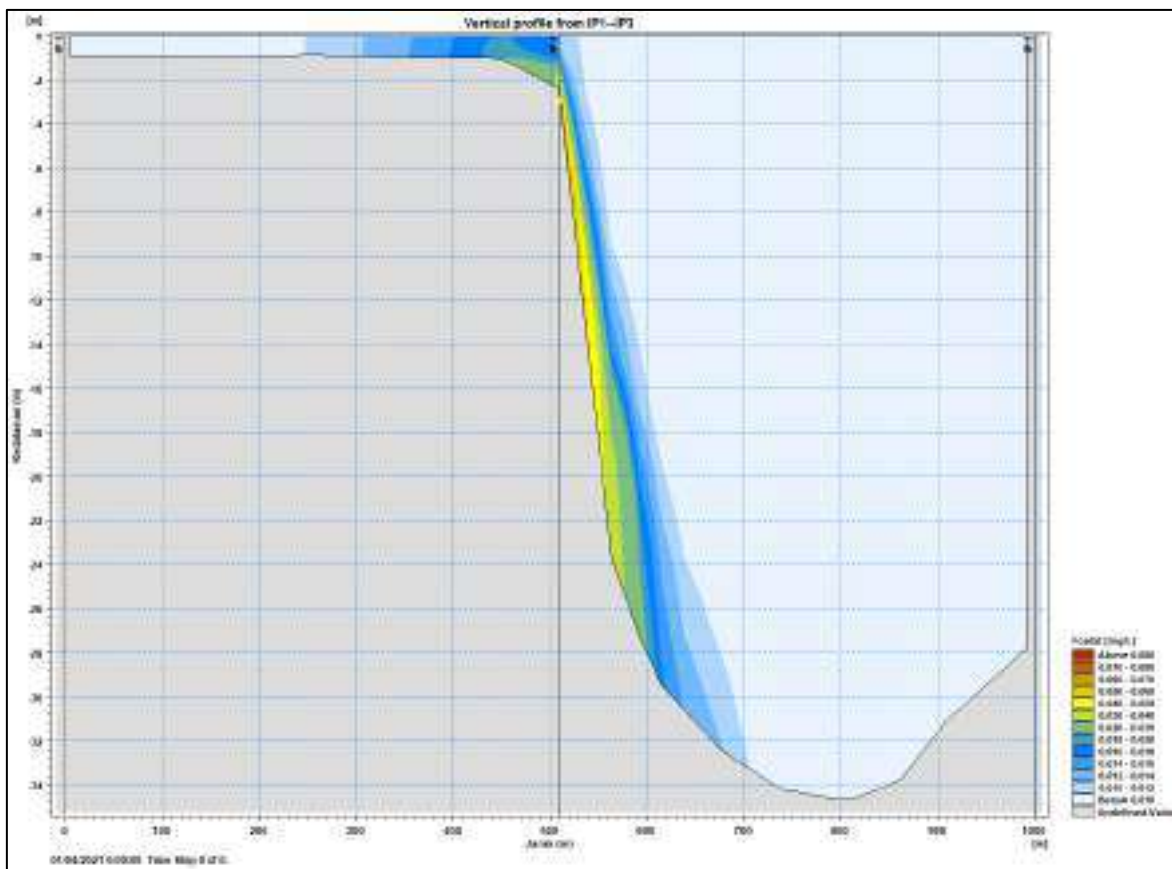
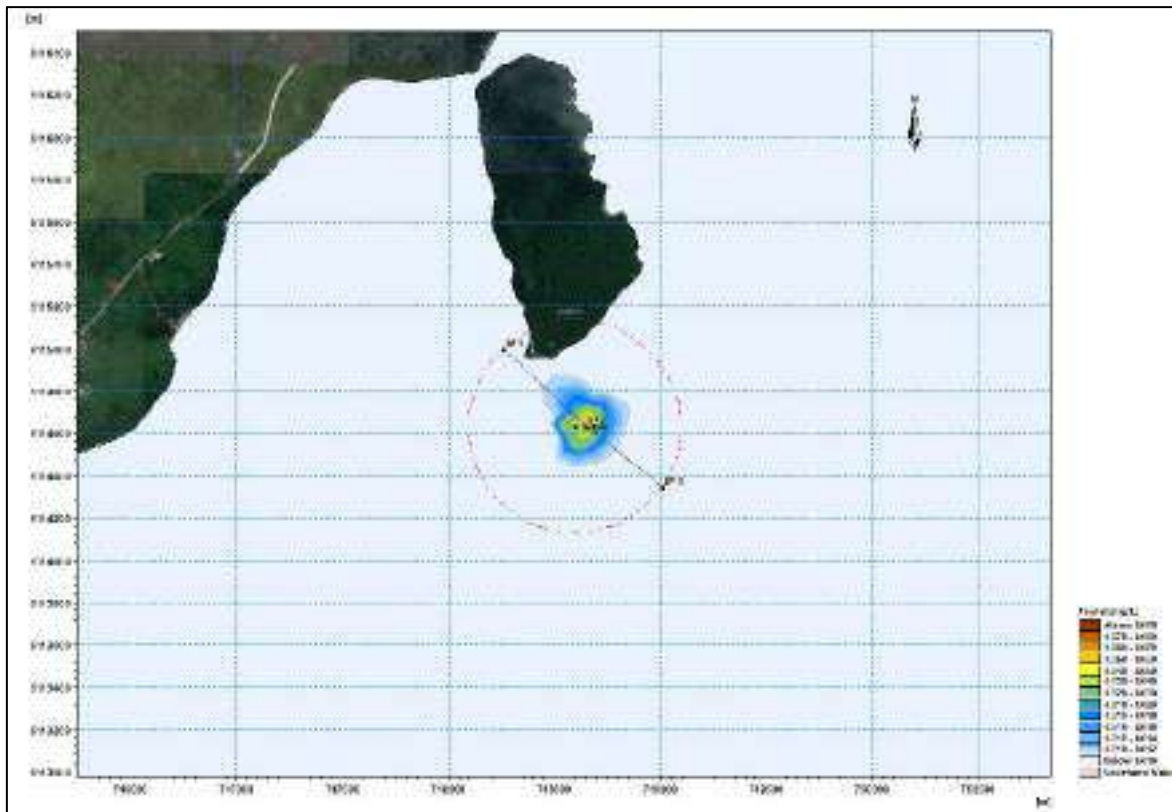
Gambar 142. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim timur



Gambar 143. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Salinitas maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan II



Gambar 144. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim barat



Gambar 145. Sebaran horisontal (atas) dan melintang (bawah) Fosfat maksimum hasil simulasi skenario-2 kondisi musim peralihan I