

BAB I

RONA AWAL BADAN AIR

1.1 Karakteristik Kimia

Outlet/luaran buangan limbah air terproduksi dan limbah air domestik PT. Gasindo berupa perairan estuari Pulau Bangkudulis, Kalimantan Utara yang berjarak kurang lebih 26 km dari pesisir pantai. Parameter yang diukur terdiri dari parameter fisika dan kimia pada badan air yang terdampak air buangan, kemudian divisualisasikan dalam bentuk model. Sebaran parameter kimia yang diamati yaitu amoniak, *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solid* (TSS), serta minyak dan lemak, sesuai dengan arahan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 19 Tahun 2010 tentang baku mutu air limbah eksplorasi dan produksi migas dan fasilitas lepas pantai (*off-shore*). Parameter fisika yang diamati terdiri dari suhu, salinitas, angin, curah hujan, dan debit muara sungai.

1.2 Hidro-Oseanografi

Hidro-oseanografi adalah suatu lingkup ilmiah laut yang secara khusus mengkaji sifat-sifat dari pergerakan air laut yang meliputi pasang surut, gelombang dan arus (Lolon dan Masinambow 2011). Selain parameter penggerak tersebut, karakteristik suatu batimetri perairan juga termasuk kedalam parameter hidro-oseanografi. Informasi karakteristik hidro-oseanografi suatu perairan dibutuhkan dalam mengamati sebaran dampak air buangan pada badan air.

1.2.1 Pasang Surut

Fenomena pasang surut merupakan salah satu gejala laut yang besar pengaruhnya terhadap biota laut (Wismadi & Handayani, 2014). Pasang surut merupakan fluktuasi muka air laut karena adanya gaya tarik benda-benda di langit, terutama matahari dan bulan terhadap massa air laut di bumi (Triatmodjo 2008; Nugroho *et al.* 2015). Gaya pembangkit pasang surut merupakan resultan dari gaya sentrifugal dan gaya gravitasi benda-benda luar angkasa seperti bulan dan matahari (Rosida *et al.* 2022). Fluktuasi muka air laut berubah-ubah secara periodik dalam suatu selang waktu tertentu atau sering disebut dalam satu siklus pasang surut. Karakteristik pasang surut di perairan dipengaruhi oleh letak geografis, morfologi pantai, maupun batimetri perairan. Akibat dari pengaruh faktor lokal tersebut pasang surut dapat dibedakan menjadi beberapa tipe. Penentuan tipe pasang surut dapat dilakukan dengan analisa data pasut menggunakan metode Admiralty sehingga akan didapatkan nilai Formzahl sebagai penentu tipe pasut di daerah yang dikaji (Nugroho *et al.* 2015). Fluktuasi pasang surut Muara Sungai Bangkudulis merupakan faktor utama penentu sebaran limbah air terproduksi dan memprediksi dampak limbah suatu kegiatan usaha terhadap badan air.

Akuisisi data pasang surut yang divisualisasikan adalah data pasang surut selama 30 hari, dengan interval waktu data yaitu 1 jam. Data pasang surut dibagi menjadi dua kondisi musim, yaitu kondisi pada saat Musim Barat yang diwakili oleh bulan November dan Musim Timur yang diwakili oleh bulan Juli. Tipe pasang surut dapat diketahui berdasarkan nilai amplitudo dan komponen harmonik yang dihitung menggunakan persamaan Formzahl yang ditunjukkan sebagai berikut (Rosida *et al.* 2022).

$$F = \frac{(O1+K1)}{(M2+S2)} \quad (1)$$

Keterangan :

F = Bilangan Formzhal

M2 = Konstanta yang dipengaruhi posisi bulan

S2 = Konstanta yang dipengaruhi posisi matahari

- O1 = Konstanta yang dipengaruhi deklinasi bulan
K1 = Konstanta yang dipengaruhi deklinasi bulan dan matahari

1.2.2 Batimetri

Batimetri diartikan sebagai metode pengukuran kedalaman perairan yang dapat menggambarkan tinggi rendahnya (morfologi) dasar perairan. Pengukuran batimetri dapat dilakukan secara konvensional menggunakan metode batu duga, yaitu kabel yang diberikan bandul (pemberat), namun seiring dengan perkembangan teknologi maka pengukuran dengan metode tersebut sudah ditinggalkan. Saat ini pengukuran batimetri sudah menggunakan teknologi *echosounder* dan satelit (Febrianto *et al.* 2015). Data batimetri yang digunakan bersumber dari Badan Informasi Geospasial (BIG) adalah data model *gridded* Batimetri Nasional. Data tersebut didapatkan dari pemodelan yang telah dikembangkan dimulai dari perhitungan data *free air gravity anomaly*, sampai menjadi data batimetri dengan menggunakan *Gravity-Geological Method* (GGM). Detil penggunaan model GGM dapat ditemukan pada Hsiao *et al.* (2016) dan lain-lain, dan metode asimilasi data pemeruman kedalam data batimetri, misalnya dalam Becker *et al.* (2009).

BAB II

DAMPAK PEMBUANGAN

2.1 Lokasi Studi

Pemodelan sebaran air limbah terproduksi dan limbah air domestik dilakukan di perairan Muara Sungai Bangkudulis, Provinsi Kalimantan Utara. Koordinat titik *outlet* adalah longitude 117.279412 BT dan latitude 3.485301 LU. Peta area kajian termasuk titik *outlet* limbah air dapat dilihat pada Gambar 1.

2.2 Deskripsi Model , Batimetri, dan Pasang Surut

Model yang divisualisasikan dalam laporan ini dibagi menjadi tiga kajian, yaitu sebagai berikut :

1. Model Hidrodinamika (Arus)
2. Model Sebaran Air Limbah (Terproduksi dan Domestik)

Model Hidrodinamika merupakan model penggerak yang mempengaruhi sebaran limbah air terproduksi dan domestik yang dibagi dalam dua kondisi musim yaitu Musim Barat dan Musim Timur. Selain arus, data hidrodinamika juga didukung oleh batimetri dan pasang surut.

2.2.1 Desain Model

Kondisi utama yang mendefinisikan model hidrodinamika adalah sebagai berikut:

- Langkah waktu yang dipilih adalah 60 detik dengan mempertimbangkan kestabilan CFL (*Courant Friedrich Lewy*) dan waktu durasi simulasi adalah 30 hari untuk mewakili musim.
- Jenis eddy viskositas horizontal telah dipilih untuk formulasi Smagorinsky dengan nilai konstan 0.28
- Jenis resistensi dasar dipilih ketetapan Manning dengan konstanta $0.4 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$.
- Panjang interval pelan di permulaan (*soft start*) untuk angin telah dipilih untuk 24 jam untuk menghindari efek *blow out*.
- Masukan presipitasi menggunakan jumlah rata-rata presipitasi per hari dari data BMKG Tarakan, yang merupakan stasiun terdekat pasang surut.
- Sumber *outlet* diambil dari koordinat Longitude 117.279412 BT dan Latitude 3.485301 LU.
- Batas tertutup (daratan) di berlakukan fluks normal nol untuk semua variabel.
- Data kedalaman laut yang digunakan sebagai input model diperoleh dari data kedalaman perairan BATNAS.
- Sebagai input model digunakan data elevasi pasang surut BIG.
- Tegangan permukaan berasal dari kecepatan dan arah angin rata-rata daerah pemodelan yang diperoleh dari BMKG Stasiun Klimatologi Tarakan tahun 2020-2022.
- Area Model terdiri dari hulu dan hilir Sungai Bangkudulis.

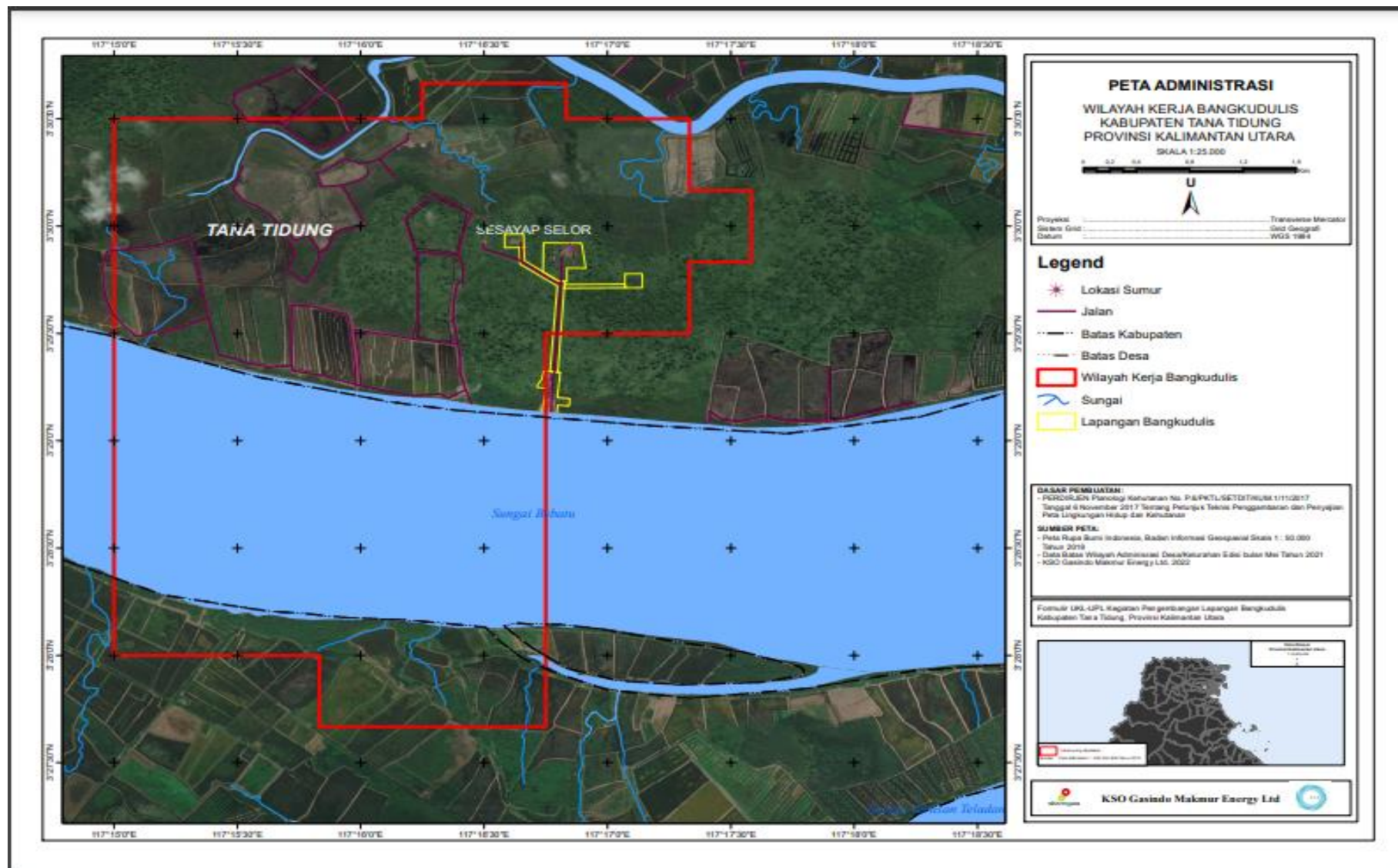
Kondisi umum yang didefinisikan pada model transport limbah cair adalah :

- Profil dasar laut diterapkan dengan tegangan geser kritis konstan 0.07 N/m^2 .
- Lapisan dasar digambarkan sebagai lapisan lumpur dengan koefisien erosi $5 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ dan tegangan geser kritis dari 0.1 N/m^2 . Kekuatan erosi memiliki nilai 8.3 dan kepadatan konstan 180 kg/m^3
- Untuk melihat dampak pembuangan limbah, sumber polutan dianggap hanya berasal dari outlet limbah dan badan air penerima dianggap netral/rata-rata ($\text{pH}=7$ dan $\text{suhu}=33.8$).

- Konsentrasi parameter yang terkandung dalam limbah cair dan konsentrasi yang dimasukkan dalam input model ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi Parameter dalam Limbah Cair dan *input* Model

No.	Parameter	Satuan	Input Model
1	Lemak Minyak	mg/l	50
2	BOD	mg/l	30
3	COD	mg/l	100
4	TSS	mg/l	30
5	Amoniak	mg/l	50



Gambar 1. Peta Lokasi Area Kajian

2.2.2 Persamaan Pemodelan Arus

Persamaan yang digunakan untuk analisa hidrodinamika menurut (DHI, 2012) dengan MIKE Zero adalah :

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] \quad (3)$$

$$-\Omega_q - fVV_x + + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] \quad (5)$$

$$-\Omega_p - fVV_y + + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial xy} (p_a) = 0 \quad (6)$$

Keterangan :

$h(x, y, t)$ = kedalaman perairan (m)

$d(x, y, t)$ = variasi kedalaman air terhadap waktu (m)

$\zeta(x, y, t)$ = *surface elevation* (m)

$p, q(x, y, t)$ = *flux density* pada arah -x dan -y ($m^3/s/m$) = (uh, vh) ; (u, v) = rata-rata kecepatan di tiap kedalaman

$C(x, y)$ = koefisien resisten Chezy ($m^{1/2}/s$)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

$f(V)$ = faktor friksi angin

$V, V_x, V_y(x, y, t)$ = kecepatan angin pada -x dan -y (m/s)

$\Omega(x, y)$ = parameter Coriolis, bergantung pada latitude ($s - 1$)

$P_a(x, y, t)$ = tekanan atmosfer ($kg/m/s^2$)

ρ_w = densitas air (kg/m^3)

t = variable waktu (s)

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = komponen *shear stress* efektif

Dimana persamaan (1) adalah persamaan kontinuitas, dan persamaan (2) dan (3) adalah persamaan momentum terhadap x dan terhadap y. Hasil pemodelan arus ditampilkan dalam dua musim berbeda yaitu Musim Timur dan Musim Barat.

BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pasang Surut

Hasil perhitungan Formzhal untuk Musim Barat dan Musim Timur, menunjukkan nilai Formzhal masing-masing yaitu 0.3422 dan 0.4065. Kedua nilai tersebut menunjukkan tipe pasang surut campuran condong harian ganda ($0.25 < F \leq 1.5$). Dalam satu hari terjadi dua kali air pasang dan dua kali air surut, tetapi tinggi dan periodenya berbeda. Kondisi pasang surut dibagi menjadi 4 periode, yaitu kondisi pasang tertinggi, surut terendah, pasang menuju surut, dan surut menuju pasang. Kondisi pasang surut dalam 4 periodik tersebut (pasang tertinggi, pasang menuju surut, surut menuju pasang, dan surut terendah) merupakan kondisi yang mempengaruhi sebaran limbah pada muara sungai menuju keluar teluk dan begitu sebaliknya.

Tabel 2. Nilai Komponen Pasang Surut Musim Timur

Komponen Pasut	M2	S2	O1	K1
A (m)	0.725	0.3013	0.1503	0.2669
g (°)	24.31	21.22	235.74	155.62

Tabel 3. Nilai Komponen Pasang Surut Musim Barat

Komponen Pasut	M2	S2	O1	K1
A (m)	0.7147	0.4577	0.1585	0.2427
g (°)	130.64	343.46	283.25	191.6

Nilai *Mean Sea Level* (MSL) pasang surut untuk pemodelan berikut adalah sama dengan 0 meter. Kondisi pasang tertinggi pada Musim Barat terjadi pada pukul 11.00 WIB tanggal 25 November 2022 yaitu 1.659 meter, dan kondisi surut terendah terjadi pada pukul 17.00 WIB tanggal 25 November 2022 yaitu -1.245 meter. Pada Musim Timur, pasang tertinggi yaitu 1.576 meter terjadi pada pukul 23.00 WIB, tanggal 14 Juli 2022, dan surut terendah terjadi pada pukul 06.00 WIB, tanggal 16 Juli 2022 yaitu sebesar -1.196 meter. Elevasi muka air untuk kondisi pasang menuju surut pada Musim Timur, terjadi pada pukul 03.00 WIB – 06.00 WIB (3 jam kedepan), tanggal 16 Juli 2022 dengan tinggi elevasi 0.046 meter sampai -1.196 meter yang merupakan elevasi surut terendah. Untuk kondisi surut menuju pasang pada musim Timur terjadi di pukul 20.00 WIB – 23.00 WIB (3 jam kedepan), tanggal 14 Juli 2022 dengan tinggi elevasi air sebesar 0.485 meter sampai 1.576 meter yang merupakan elevasi pasang tertinggi. Elevasi pada Musim Barat untuk kondisi pasang menuju surut terjadi pada pukul 14.00 WIB – 17.00 WIB (3 jam kedepan), tanggal 25 November 2022 dengan tinggi elevasi 0.144 meter sampai -1.245 meter yang merupakan elevasi surut terendah. Untuk kondisi surut menuju pasang pada Musim Barat terjadi di pukul 08.00 WIB – 11.00 WIB (3 jam kedepan), tanggal 25 November 2022 dengan tinggi elevasi air sebesar 0.599 meter sampai 1.659 meter yang merupakan elevasi pasang tertinggi.

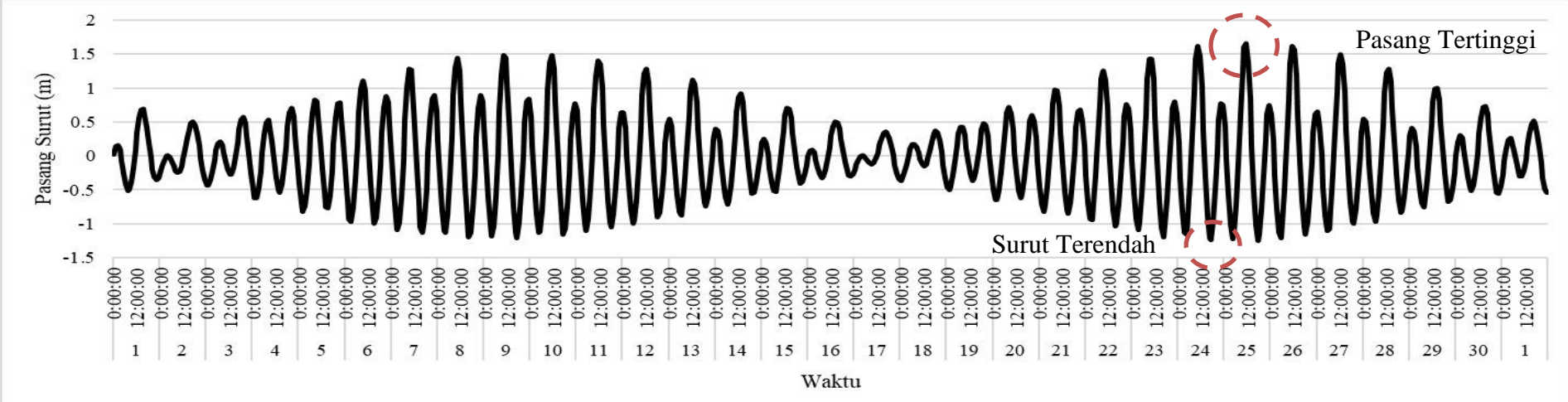
Tabel 4. Elevasi Muka Air Musim Timur

Musim Barat		
No	Elevasi Muka Muara Bangkudulis	Nilai Elevasi (m)
1	MLLW	-1.1159
2	MHLW	-1.1159
3	MLHW	0.6305
4	MHHW	1.1159
5	MLWS	-1.1724
6	MLWN	-0.257
7	MHWN	0.2570
8	MHWS	1.1724

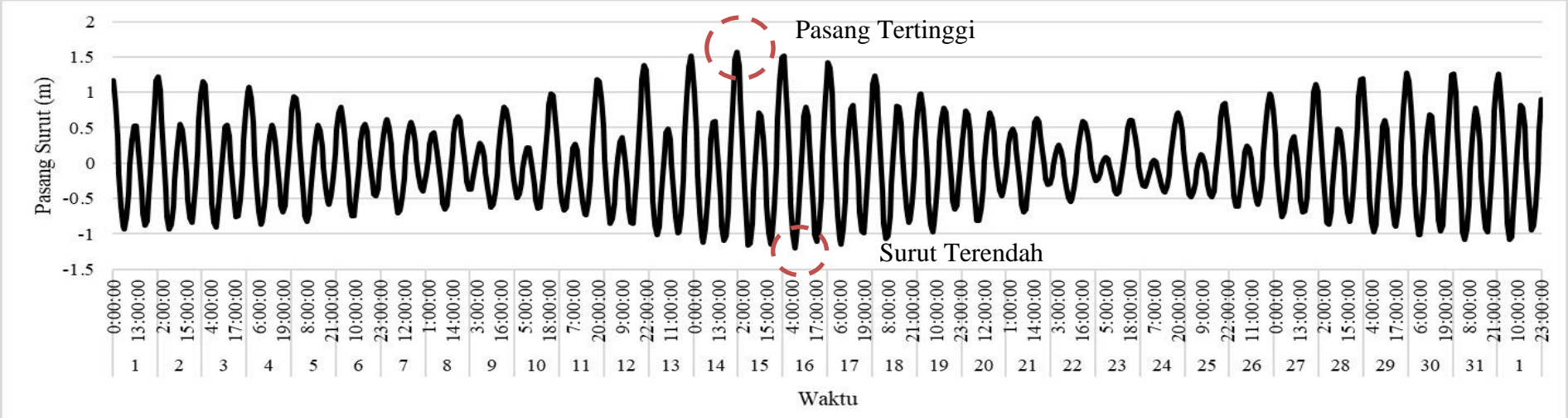
Tabel 5. Elevasi Muka Air Musim Timur

Musim Timur		
No	Elevasi Muka Muara Bangkudulis	Nilai Elevasi (m)
1	MLLW	-1.1422
2	MHLW	-1.1422
3	MLHW	0.6084
4	MHHW	1.1422
5	MLWS	-1.0263
6	MLWN	-0.4237
7	MHWN	0.4237
8	MHWS	1.0263

a)



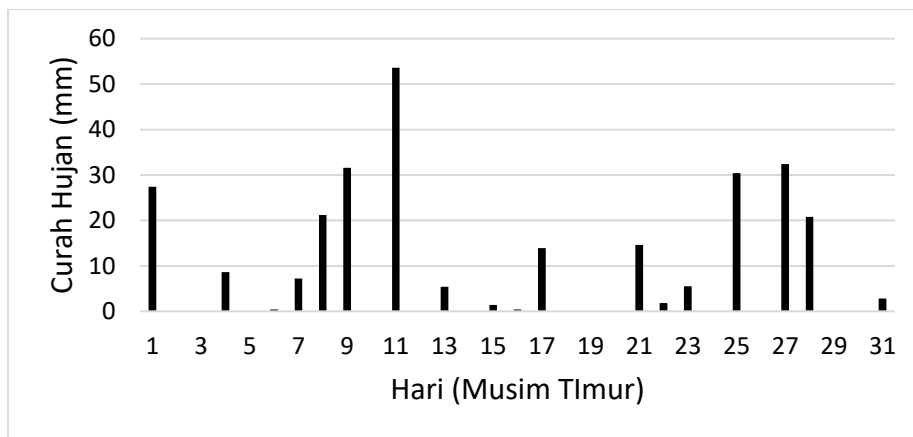
(b)



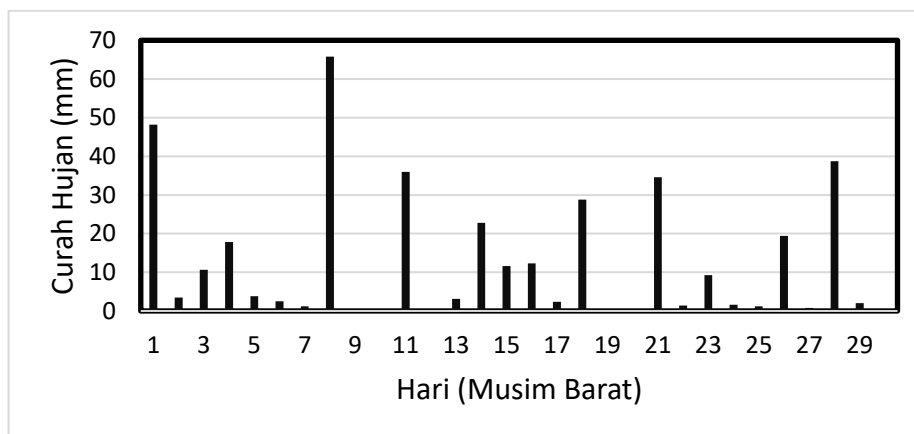
Gambar 2. Pasang surut pada area *outlet* pada a) Musim Barat dan b) Musim Timur

3.2 Curah Hujan

Variasi curah hujan dipengaruhi oleh faktor lokal, angin darat dan angin laut, aktivitas konveksi, arah aliran udara di permukaan, variasi sebaran aliran daratan dan lautan serta perilaku atmosfer global (Fadilla *et al.*, 2017). Pengaruh topografi yang kompleks seperti angin lembah, angin gunung, angin darat dan angin laut serta kondisi fisiografis seperti posisi koordinat, ketinggian, pola angin (angin pasat dan monsun), sebaran bentang darat dan perairan, serta pegunungan atau gunung-gunung yang tinggi memegang peranan penting dan berpengaruh terhadap pembentukan dan keragaman cuaca dan iklim di wilayah Indonesia, sehingga keunikan pola curah hujan juga dipengaruhi oleh karakteristik faktor-faktor tersebut (Tjasyono, 2004). Rata-rata curah hujan pada Musim Timur sebanyak 9.01 mm/hari, Sedangkan pada Musim Barat sebanyak 12.65 mm/hari. Fluktuasi curah hujan dapat dilihat pada Gambar 3 dan 4.



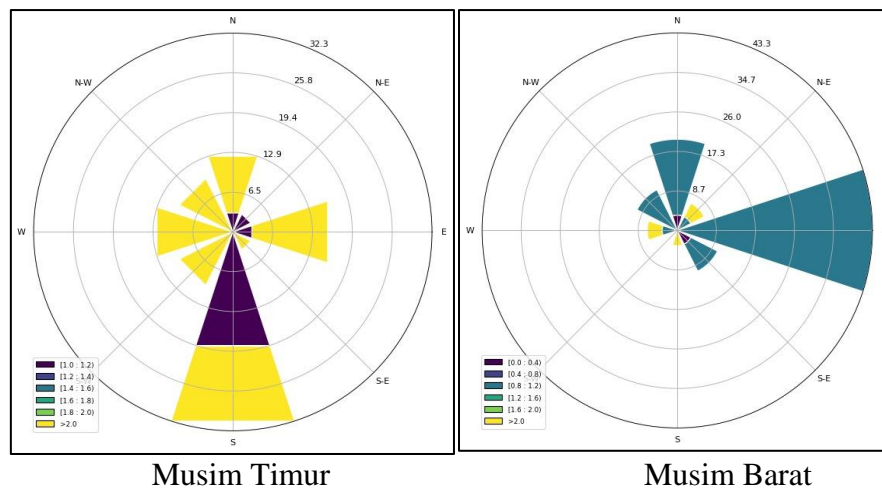
Gambar 3. Curah hujan pada Musim Timur



Gambar 4. Curah hujan pada Musim Barat

3.3 Angin

Karakteristik dan dinamika di perairan Sungai Bangkudulis sangat tergantung oleh musim. Untuk menggambarkan pola dan kecepatan angin digunakan data dari BMKG dengan interval data setiap satu hari. Data kecepatan dan arah angin ditampilkan dalam bentuk mawar angin (*wind rose*). Data kecepatan angin tahun 2020 - 2022 yang dianalisis berdasarkan dua kondisi musim di Indonesia. Pada Musim Timur, bertiup angin dominan dari arah selatan dengan kecepatan rata-rata 1 – 2 m/s. Pada Musim Barat berhembus angin dari Barat dengan kecepatan rata-rata 0.8 – 1.2 m/s. Pola angin rata-rata bulanan pada dua musim berbeda pada tahun 2020 s.d 2022 dapat dilihat pada Gambar 5.

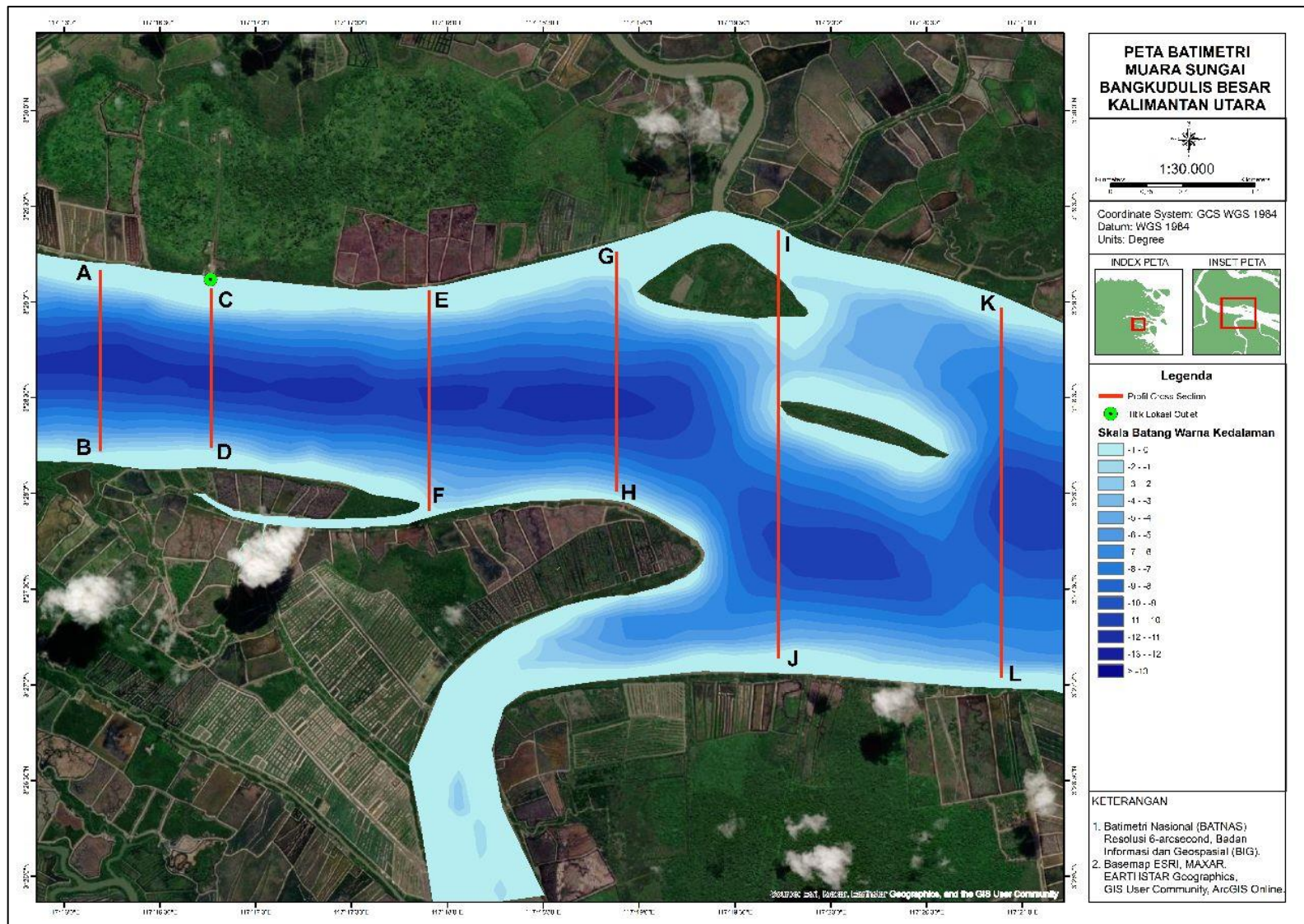


Gambar 5. Arah angin pada a) Musim Timur dan b) Musim Barat

3.4 Batimetri Sungai Muara Pulau Bangkudulis Besar

Faktor fisis yang terjadi pada kawasan muara sungai, dapat berdampak terhadap perubahan morfologi, perubahan yang dihasilkan adalah dampak dari suatu proses yang disebut sedimentasi. Menurut Komar (1998) di dalam Pangestu *et al.* (2020) sedimentasi yang terjadi di muara sungai umumnya terjadi akibat perpidahan sedimen dengan faktor fisis sebagai media transportnya. Widyanto *et al.* (2014) juga menyatakan terbentuknya morfologi dasar perairan dipengaruhi oleh besarnya arus dan transport sedimen yang terjadi di dasar perairan. Penggunaan data kedalaman atau batimetri adalah salah satu data acuan yang dapat digunakan dalam kajian mengenai lingkungan seperti analisis morfologi yang terjadi di muara sungai. Dengan dilakukannya pendekatan batimetri dalam suatu kajian hidrooseanografi dapat menjelaskan dinamika sifat massa air yang terjadi di dasar perairan. Aplikasi kajian hidrooseanografi yang memanfaatkan data batimetri adalah pemodelan hidrodinamika. Pembentukan model hidrodinamika sangat membutuhkan data batimetri untuk dalam proses pembuat distribusi air terproduksi dan air domestik. Faktor utama pentingnya data batimetri disebabkan oleh hubungan antara batimetri dengan kecepatan dan arah arus, pasang-surut dan sedimen. Selain itu bentuk morfologi hasil batimetri juga mempengaruhi hasil dari model yang dilakukan karena terdapat faktor kekasan dasar (*resistance*) yang juga digunakan dalam *input* model (Sianturi *et al.* 2013; Surinati dan Martafah 2019).

Hasil kajian batimetri berupa peta spasial (Gambar 6) menceritakan secara jelas bagaimana morfologi dasar perairan sungai di Muara Pulau Bangkudulis Besar. Pada peta dapat dilihat bagaimana perubahan kedalaman dari penampang sungai yang terbentuk. Daerah dasar perairan sungai secara keseluruhan memiliki daerah perairan dalam yang terletak di tengah Sungai dengan kedalaman paling dalam di area kajian adalah 15 meter. Area kajian pemodelan yaitu Sungai Muara Pulau Bangkudulis Besar adalah kawasan estuari. Daerah estuari yang berasal dari pertemuan air tawar sungai hulu dengan air laut tiga bagian yang berasal dari Samudera Pasifik, Laut Cina Selatan dan Laut Selat Makasar. Sehingga mempunyai potensi sumber daya hayati laut yang cukup tinggi karena adanya pengaruh dari Sungai Hulu dan sirkulasi pasang-surut yang mempunyai sumber unsur hara dan bahan organik yang menjadi sumber makanan dan ruaya ikan (Salim *et al.* 2019). Tipe substrat pada Kawasan estuari didominasi oleh substrat jenis lumpur. Bentuk kawasan yang dipenuhi oleh delta dan pulau-pulau kecil membuat morfologi dasar perairan sungai di muara sungai (hilir) berbentuk seperti bukit dan lembah.



Gambar 6. Peta Batimetri Area Kajian Pemodelan

Profil penampang melintang (*cross-section*) yang berada di depan *outlet* (Gambar 7a) memiliki karakteristik penampang curam pada kedua sisi sungai baik di sebelah Utara dan sebelah Selatan dengan kedalaman terdalam 12 meter. Penampang sungai terlihat berbentuk seperti segitiga dengan ujung yang tumpul. Karakteristik yang sama juga dijumpai pada penampang Sungai yang berjarak 2 kilometer di sebelah Barat dari *outlet* (Gambar 7b) yaitu berbentuk cekungan segitiga dengan ujung yang tumpul dengan kedalaman terdalam 13 meter dan ditemukan juga dengan karakteristik yang mirip terletak 2 kilometer di sebelah Timur (Gambar 7c) dimana terdapat perbedaan pada penampang sisi sebelah Selatan dengan adanya penampang landai dari kedalaman 2.5 meter hingga 3 meter dan kedalaman terdalam 12 meter. Berpindah menuju area yang lebih jauh ke Sebelah Timur, dapat ditemui adanya 2 (dua) delta besar/pulau di tengah sungai.

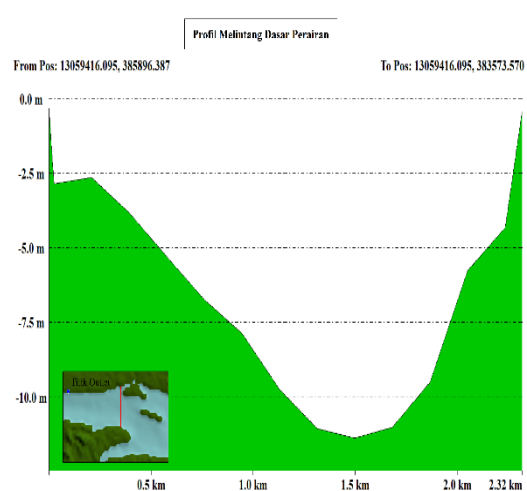
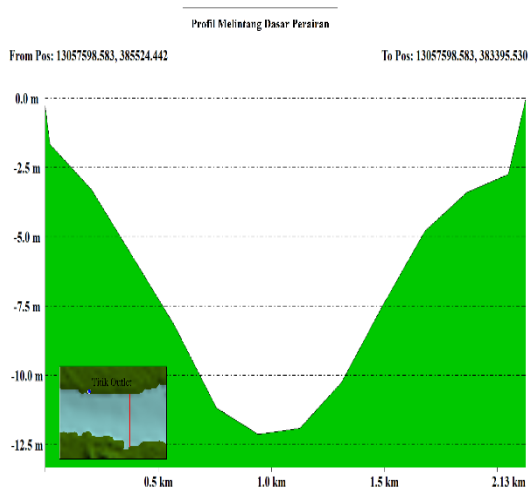
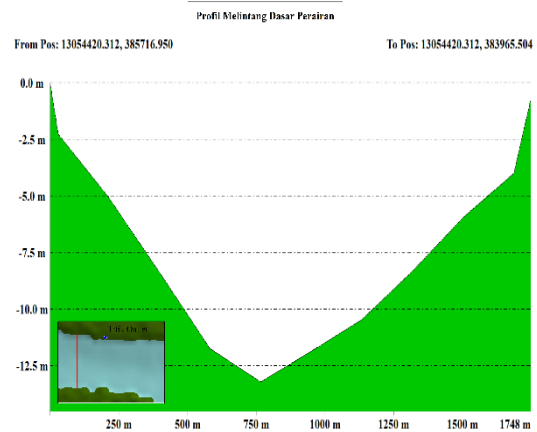
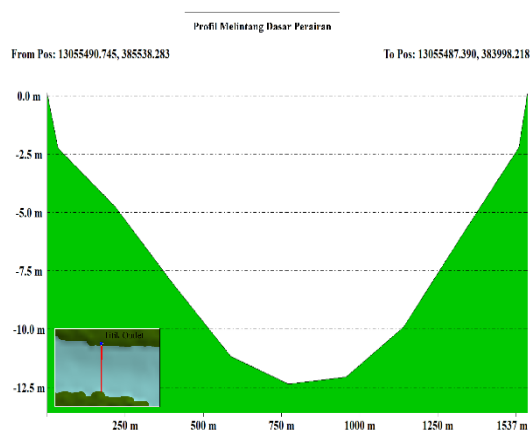
Tabel 6. Gambaran umum profil *cross section*

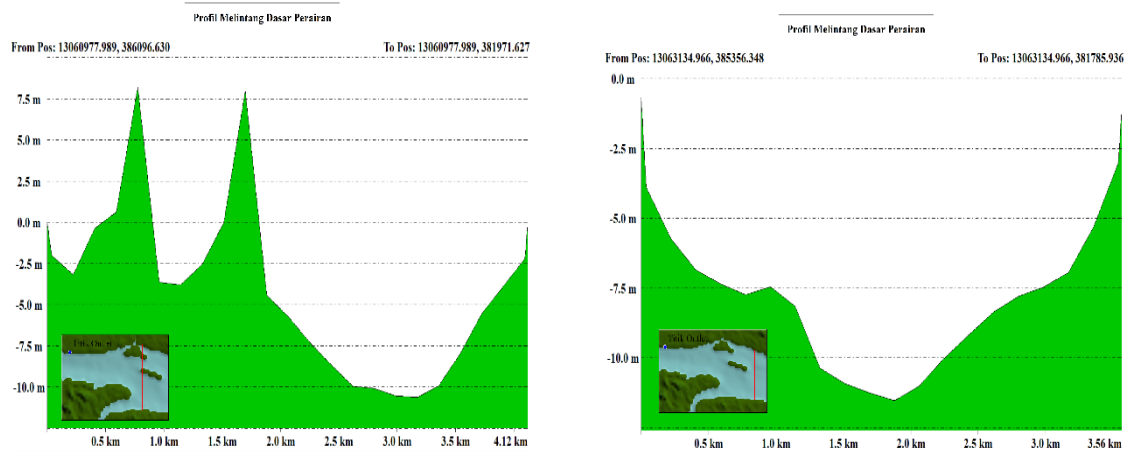
No	Profil Cross-Section	Gambaran Umum
1	A-B	<ul style="list-style-type: none"> Berjarak 2 kilometer ke arah Barat dari titik lokasi <i>outlet</i>. Karakteristik penampang curam pada kedua sisi, yaitu sisi Utara dan sisi Selatan. Kedalaman paling dalam adalah -13 meter berada di bagian tengah sungai. Bentuk penampang seperti segitiga terbalik dengan ujung tumpul.
2	C-D	<ul style="list-style-type: none"> Berada di depan titik <i>outlet</i>. Karakteristik penampang curam pada kedua sisi, yaitu sisi Utara dan sisi Selatan. Kedalaman paling dalam adalah -12 meter berada di bagian tengah sungai. Bentuk penampang seperti segitiga terbalik dengan ujung tumpul.
3	E-F	<ul style="list-style-type: none"> Berjarak 2 kilometer ke arah Barat dari titik lokasi <i>outlet</i> Karakteristik penampang curam pada sisi Utara dan curam disertai landai di kedalaman -2.5 meter hingga -3 meter pada sisi Selatan. Kedalaman paling dalam adalah -12 meter berada di bagian tengah sungai. Bentuk penampang seperti segitiga terbalik dengan ujung tumpul
4	G-H	<ul style="list-style-type: none"> Berada di sebelah Timur titik lokasi <i>outlet</i> dan berdekatan dengan delta/pulau kecil. Karakteristik penampang pada sisi Utara lebih curam dibandingkan sisi Selatan.

		<ul style="list-style-type: none"> • Kedalaman paling dalam adalah -13 meter berada di bagian tengah sungai. • Bentuk penampang seperti segitiga terbalik dengan ujung tumpul.
5	I-J	<ul style="list-style-type: none"> • Berada di sebelah Timur titik lokasi <i>outlet</i> dan memotong delta/pulau kecil. • Terdapat delta yang berjarak 500 meter dari sisi Utara muara sungai dengan elevasi tertinggi 7.5 meter dan lebar 600 meter ditutupi oleh vegetasi. • Terdapat pulau kecil yaitu Pulau Seram berjarak 900 meter dari sisi Utara muara sungai dan lebar pulau 400 meter ditutupi oleh vegetasi. • Perairan diantara sisi Utara dan delta besar memiliki kedalaman paling dalam -2.5 meter. • Perairan diantara delta besar dan Pulau Seram memiliki kedalaman paling dalam -4.5 meter. • Karakteristik penampang curam pada kedua sisi, yaitu sisi Utara dan sisi Selatan. • Perairan di sisi Selatan diantara Pulau Seram dan sisi Selatan muara sungai memiliki kedalaman paling dalam -10 meter.
6	K-L	<ul style="list-style-type: none"> • Berada di sebelah Timur titik lokasi <i>outlet</i>, delta besar dan Pulau Seram. • Karakteristik penampang curam pada kedua sisi, yaitu sisi Utara dan sisi Selatan. • Kedalaman paling dalam adalah -12.5 meter berada di bagian tengah sungai. • Bentuk penampang seperti segitiga terbalik dengan ujung tumpul.

Profil penampang yang berada di sebelah Barat (Gambar 7d) dari delta besar/pulau masih memiliki karakteristik penampang yang mirip dengan penampang yang ada di sebelah Barat, sebelah Timur, dan di depan Titik *outlet* dengan kedalaman terdalam 13 meter. Pada penampang yang memotong delta besar/pulau (Gambar 7e) dapat diketahui bahwa jarak dari sisi Utara sungai dengan delta besar adalah 500 meter dengan elevasi tertinggi 7.5 meter dan lebar delta besar 600 meter yang ditutupi oleh vegetasi. Semakin bergerak ke arah sisi Selatan, terdapat disebut Pulau Seram berjarak 400 meter dari delta besar dengan kedalaman perairan diantara delta besar dan Pulau Seram 4 meter hingga 4.5 meter, serta memiliki lebar 400 meter dan ditutupi oleh vegetasi. Perairan diantara Pulau Seram dan sisi Selatan sungai memiliki lebar 2.4 kilometer dengan kedalaman terdalam 10 meter. Kemudian, di sebelah Timur delta besar/pulau profil penampang dasar perairan (Gambar 7f) kembali mirip dengan profil

penampang sungai yang berada di sebelah Barat, sebelah Timur dan di depan *outlet*. Kedalaman terdalam pada penampang ini 12.5 meter dan terdapat dasar yang datar dengan lebar 300 meter pada jarak 800 meter dari sisi Utara sungai di kedalaman -7.5 meter. Karakteristik penampang sungai akan mempengaruhi debit sungai yang mengalir. Kelerengan penampang menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi debit sungai dimana perubahan luasan kelerengan akan linear positif dengan debit aliran (Wahid 2009). Debit sungai yang mengalir adalah sebesar 1498.95 m³/s dengan *flow* aliran 0.1 m/s.





Gambar 7. Profil penampang melintang sungai (a) 2 kilometer sebelah barat dari titik *outlet* (b) Tepat di depan titik *outlet* (c) 2 kilometer sebelah timur dari titik *outlet* (d) Sebelah Barat Pulau Serang (e) Tepat di tengah Delta dan Pulau Serang (f) Sebelah Timur

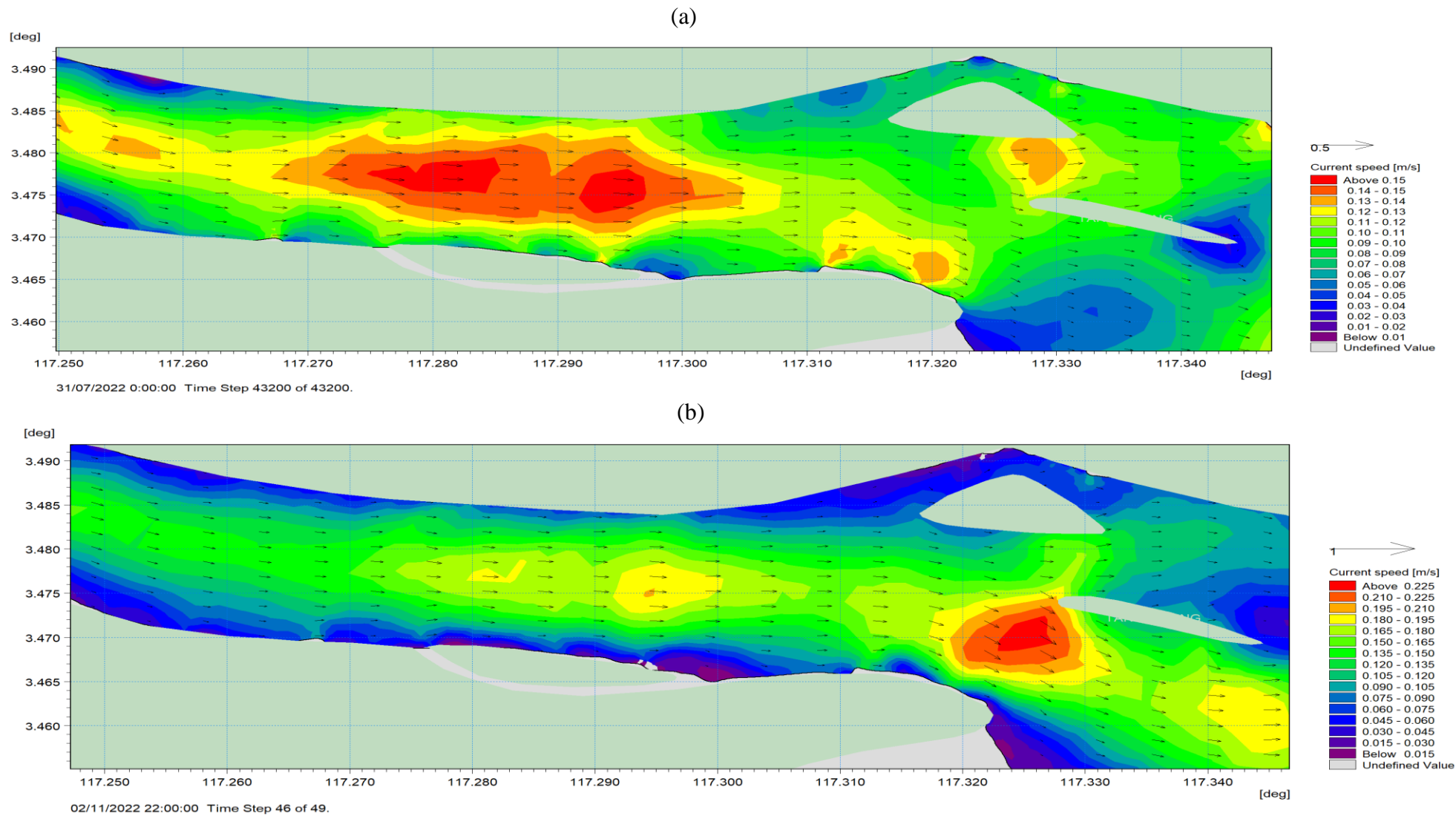
3.5 Arus Muara Sungai Pulau Bangkudulis Besar

Arus adalah aliran massa air yang disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu tiupan angin, perbedaan densitas, atau pergerakan gelombang panjang (Daruwedho *et al.* 2016). Data arus pada umumnya dapat diperoleh dengan melakukan pengukuran langsung dengan berbagai instrument seperti *Current Meter*. Semakin berkembangnya teknologi, saat ini data arus dapat diperoleh dalam skala luas menggunakan satelit altimetri. Satelit tersebut adalah satelit yang berfungsi untuk melakukan observasi mengenai fenomena laut serta dinamika yang terjadi di permukaan laut.

Muara sungai secara umum banyak memiliki kandungan material organik dan zat hara yang berfluktuasi (Montani *et al.* 1998). Faktor-faktor yang mempengaruhinya adalah *intake* oleh proses-proses biologi, adsorpsi, pelepasan dan pengendapan oleh partikel tersuspensi yang disertai masukan elemen dari darat melalui aliran sungai (Maslukah *et al.* 2014). Aktivitas antropogenik dan industri juga menjadi sumber dari masukan material limbah organik dan non-organik ke dalam sungai. Dampak ekologis yang diberikan akibat banyak masukan limbah ke dalam sungai adalah kematian massal ikan karena kekurangan oksigen akibat tinggi zat organik dan juga dapat disebabkan oleh timbulnya zat beracun seperti nitrit dan amonia. Distribusi material limbah di kolom air sangat dipengaruhi oleh arus yang dibangkitkan oleh pasang-surut. Pada saat kondisi surut arus akan bergerak menuju laut, sedangkan saat kondisi pasang arus akan bergerak menuju sungai dan mendorong massa air tawar. Pergerakan ini akan mempengaruhi distribusi pasokan material pencemar baik organik maupun non-organik di sungai. Pada saat surut, massa air sungai akan lebih dominan sehingga kandungan material pencemar akan lebih tinggi (Yin dan Harrison 2000; Maslukah *et al.* 2014). Hal ini memberikan suatu arahan, bahwa arus menjadi hal penting dalam pemodelan hidro-oseanografi dalam memodelkan distribusi air terproduksi dan air domestik di kawasan muara sungai. Dengan adanya peran dari arus, maka dapat diperkirakan bagaimana kecepatan dan jarak distribusi dari air terproduksi dan air domestik yang telah lepas di perairan.

Kecepatan angin pada Musim Barat cenderung lebih cepat dibandingkan Musim Timur. Kecepatan arus pada area muara Sungai Bangkudulis saat Musim Barat adalah berkisar ≤ 0.015 m/s - ≥ 0.225 m/s sedangkan pada Musim Timur berkisar 0.01 m/s - ≥ 0.15 m/s. Arus terlihat bergerak dominan menuju laut. Secara horizontal, kecepatan arus semakin lambat apabila semakin menuju daratan, dimana hal ini disebabkan karena profil dasar perairan yang landai dengan kedalaman yang dangkal (Gambar 7. Batimetri).

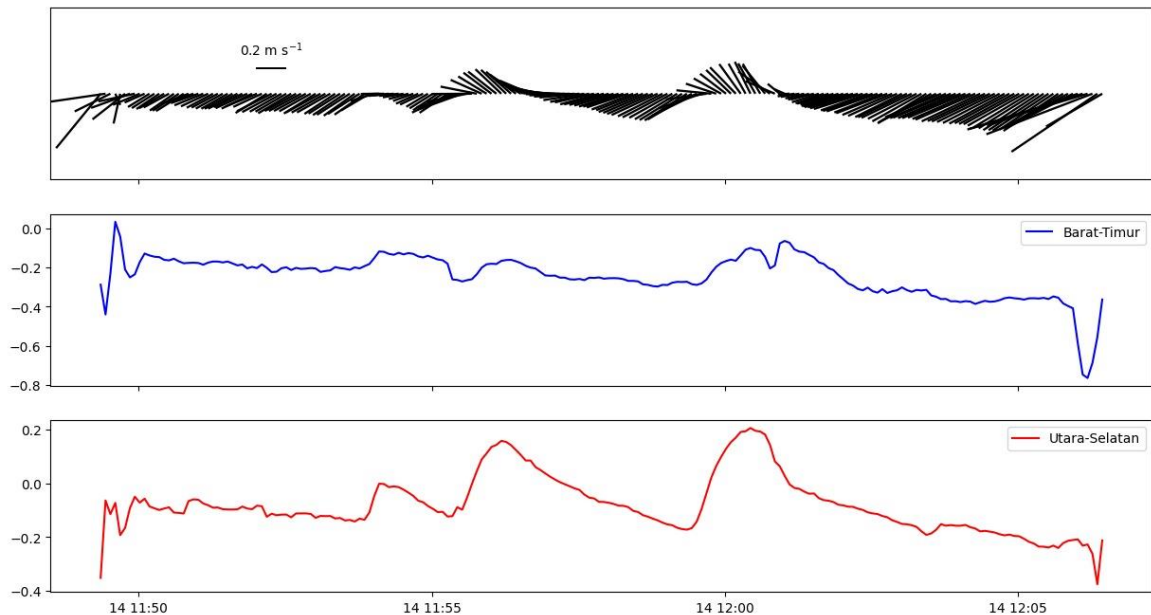
Perairan yang memiliki kedalaman yang lebih dalam memiliki kecepatan arus yang lebih cepat. Pola arus secara vertikal akan memiliki kecepatan yang semakin cepat di kedalaman yang lebih dalam, dimana hal ini terlihat pada sebaran arus Musim Barat dan Musim Timur. Hal sesuai dengan hasil penelitian Wardheni *et al.* (2014) yang menyatakan bahwa kecepatan arus pada kolom air permukaan memiliki kecepatan yang paling besar, dibandingkan dengan kecepatan arus pada kolom air dasar memiliki kecepatan paling kecil. Semakin dalam suatu kolom air makin kecepatan arus akan semakin berkurang karena adanya gaya gesek di dasar perairan. Han *et al.* (2008) menjelaskan bahwa arus selalu berhubungan dengan kedalaman, dimana pada perairan yang memiliki kedalaman yang lebih dalam gerakan air akan menjadi lambat. Berdasarkan penelitian Rukminasari (2011) arus dibagi menjadi beberapa kategori yaitu berarus sangat cepat (> 1 m/s), cepat ($0.51 - 1$ m/s), sedang ($0.251 - 0.5$ m/s), lambat ($0.11 - 0.25$ m/s) dan sangat lambat (< 0.1 m/s). Berdasarkan kategori tersebut, kecepatan arus pada Musim Barat dan Musim Timur termasuk kedalam kategori lambat.



Gambar 8. Visual spasial arus pada a) Musim Timur dan b) Musim Barat

3.6 Kecepatan Arus

Sirkulasi arus di Bangkudulis secara umum dipengaruhi oleh pasang surut (pasut). Arus terkuat terjadi pada saat menuju surut dengan pola yang sama dengan pada saat air surut terendah. Sirkulasi masuk sebagian besar dari Laut Sulawesi masuk ke kepulauan sekitar Pulau Tarakan ke arah muara sungai. Berikut merupakan stik plot arus hasil pengukuran di laut sekitar pulau Tarakan.



Gambar 9 *Stickplot* kecepatan dan arah arus di Bangkudulis

Stickplot arus di wilayah Bangkudulis menampilkan bahwa pola yang terbentuk mengikuti pola arus pasang surut dimana komponen utara selatan lebih besar magnitudenya dibandingkan komponen timur-barat sesuai dengan visualisasi. Kecepatan arus dominan yaitu berkisar pada nilai 0.1 – 0.3 m/s dengan total persentase sebesar 52.56%. Arah arus dominan yaitu pada arah Barat Daya dengan persentase sebesar 55.68% diikuti dengan Selatan, Tenggara, Barat dan Barat Laut. Tabel persentil arah dan kecepatan arus dapat dilihat pada Tabel 7.

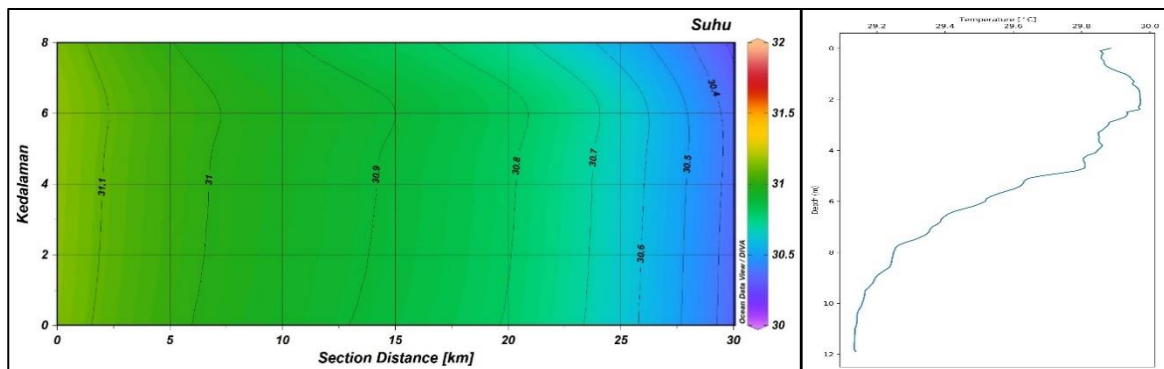
Arah	Kecepatan Arus (m/s)						Total (%)
	0 - 0.1	0.1 - 0.3	0.3 - 0.5	0.5 - 0.7	0.7 - 1.0	>= 1	
B	0	0.35	0	0	0	0	0.35
BD	0	19.81	34.7	1.18	0	0	55.68
BL	0.14	0	0	0	0	0	0.14
S	0.13	23.23	6	1.1	4.07	0	34.54
TG	0.12	9.17	0	0	0	0	9.29
Total	0.4	52.56	40.7	2.28	4.07	0	100

Tabel 7 Tabel persentil arah dan kecepatan arus di Bangkudulis

3.7 Stratifikasi

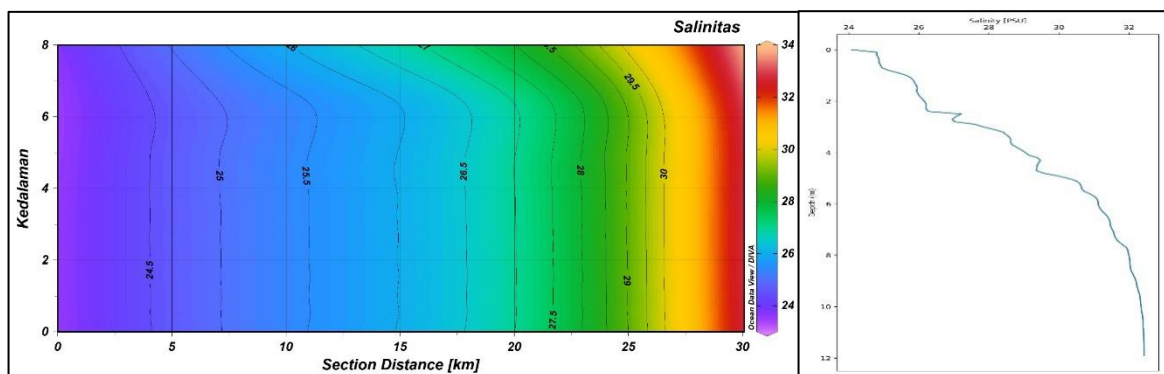
Informasi mengenai profil suhu, salinitas dan densitas air laut di lokasi kajian diperoleh dari dataset marine Copernicus yang diambil di titik yang sama dengan titik pengambilan data, alasan diambilnya di wilayah ini karena daerah merupakan dekat muara sungai yang keadaannya mendekati dengan wilayah model.

Sebaran suhu di perairan Bangkudulis menunjukkan perairan yang homogen dengan rentang suhu berada pada 30 – 31 °C. Suhu perairan menurun menuju ke laut lepas dan meningkat menuju ke arah muara. Pada grafik menegak suhu, terlihat suhu berkisar pada nilai 29 – 30 °C. Pada kedalaman 2 m, suhu mulai menurun sampai pada kedalaman 12 m. Profil melintang dan menegak suhu dapat dilihat pada Gambar 10.



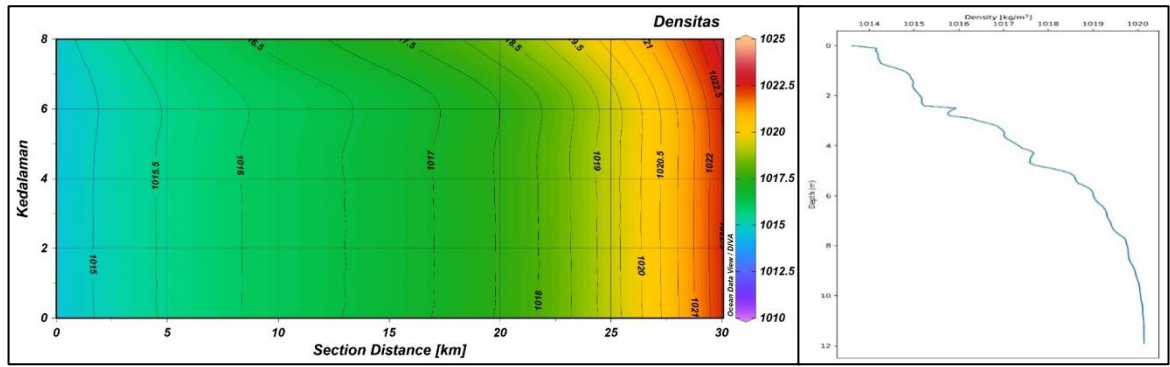
Gambar 10 Sebaran melintang dan menegak suhu di perairan Bangkudulis

Sebaran salinitas di perairan Bangkudulis menunjukkan perbedaan yang terlihat jelas dari arah muara ke laut lepas dengan rentang salinitas berada pada 24 – 34 psu. Salinitas perairan meningkat menuju ke laut lepas dan menurun menuju ke arah muara. Hal ini dikarenakan adanya masukin air tawar dari muara sungai Bangkudulis. Terlihat pada jarak 20 – 30 km salinitas perairan meningkat dari 28 – 34 psu. Pada grafik menegak salinitas terlihat salinitas meningkat seiring dengan kedalaman. Salinitas terus meningkat seiring dengan kedalaman dari permukaan sampai pada kedalaman 12 m dengan rentang salinitas 24 – 32 psu. Profil melintang dan menegak salinitas dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11 Sebaran melintang dan menegak salinitas di perairan Bangkudulis

Sebaran densitas di perairan Bangkudulis menunjukkan perbedaan yang terlihat dengan rentang nilai densitas 1015 – 1025 kg/m³. Densitas perairan Bangkudulis meningkat ke laut lepas dan menurun ke arah muara dengan densitas pada jarak 25 – 30 km berkisar antara 1020 – 1025 kg/m³. Pada grafik menegak densitar terlihat densitas terus meningkat seiring dengan kedalaman dengan rentang 1014 – 1020 kg/m³ dan rentang kedalaman sampai 12 m. Profil melintang dan menegak densitas dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12 Sebaran melintang dan menegak densitas di perairan Bangkudulis

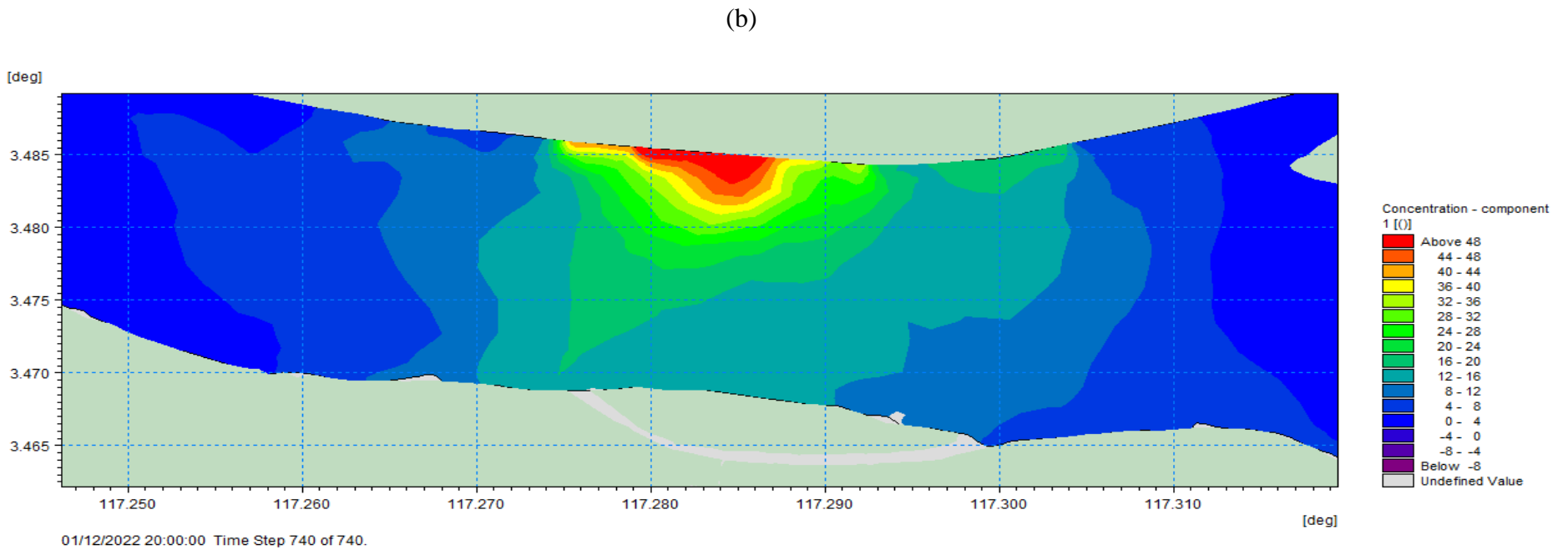
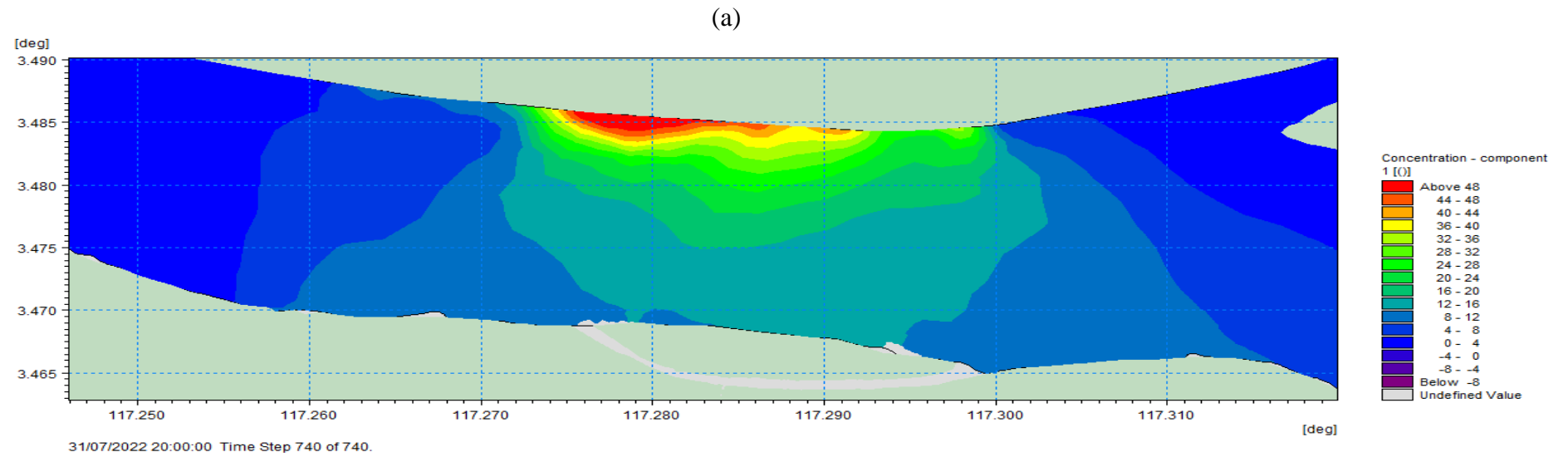
3.8 Limbah Air Terproduksi

Salah satu hasil samping dari pengolahan minyak dan gas bumi (migas) yang termasuk limbah cair adalah air terproduksi. Air terproduksi merupakan *brine* yang mengandung hidrokarbon yang dibawa ke atas permukaan. Karakteristik dari air terproduksi akan berbeda-beda sesuai dengan sumber, kondisi lapangan, bahan kimia yang digunakan pada proses produksi minyak bumi, ataupun kedalaman reservoir (Effendi *et al.* 2020). Menurut Nandari *et al.* (2018) dalam penelitian Effendi *et al.* (2020), limbah air terproduksi banyak mengandung bahan-bahan berbahaya seperti logam-logam dengan kandungan tinggi, material terlarut organik yang *volatile*, bahan toksik yang terikut dengan produk hidrokarbon, dan padatan terlarut dalam kandungan tinggi, sehingga tidak dapat dimanfaatkan dan dibuang secara langsung karena yang dapat mengganggu keseimbangan lingkungan. Berdasarkan hal tersebut, perlu diketahui sebaran dan indeks parameter lingkungan pada air terproduksi, yaitu lemak minyak yang diharapkan dapat memenuhi standar baku mutu lingkungan yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 19 Tahun 2010 tentang baku mutu air limbah dari fasilitas eksplorasi dan produksi migas di lepas pantai (*off-shore*).

3.8.1 Lemak Minyak

Limbah air terproduksi yang dihasilkan oleh industri dan dapat berbahaya pada kadar tinggi di perairan adalah lemak minyak. Pada air terproduksi, lemak minyak sudah terlarut dalam air sehingga pada saat dibuang di perairan penting ada dilakukannya pemodelan persebarannya. Pemodelan persebaran parameter lemak minyak air terproduksi pada Musim Timur dapat diketahui dari Gambar 11. Hasil model menunjukkan persebaran parameter lemak minyak tersebar sampai hingga sisi di seberang titik *outlet*. Kadar konsentrasi sebaran lemak minyak lebih tinggi disekitar titik *outlet* dan semakin jauh dari titik *outlet* maka konsentrasinya semakin rendah. Rentang konsentrasi lemak minyak di titik *outlet* adalah 40 – 48 mg/L, bergerak semakin menjauh dari titik *outlet* maka rentangnya berkisar 4 – 8 mg/L dan dapat mencapai 0 mg/L. Secara spasial jangkauan sebaran lemak minyak mencapai jarak 4 (empat) km dari titik *outlet* ke arah kanan dan kiri. Secara vertikal terhadap kedalaman, konsentrasi lemak minyak juga lebih tinggi di perairan dangkal disekitar titik *outlet*. Pola persebaran lemak minyak terlihat lebih mendominasi ke arah laut. Pada saat pasang, massa air dibawa oleh arus pasang memasuki muara sungai. Energi arus pasang yang lebih tinggi dari energi arus muara sungai dan flow *outlet*, mendorong massa air tawar dan massa air dari *outlet* ke arah hulu.

Pada Musim Barat, persebaran parameter lemak minyak yang telah dimodelkan (Gambar 13) dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan dari bentuk pola sebaran. Hasil pemodelan Musim Barat terjadi pada kondisi surut. Massa air yang didominasi adalah massa air dari muara sungai. Energi *flow* dari *outlet* lebih besar dari pada energi arus di Muara Sungai. Hal ini menyebabkan bentuk pola persebaran akan dipengaruhi lebih besar dari *flow outlet*, akibatnya bentuk pola sebaran berbentuk *spherical* dan menyebar secara merata dari titik *outlet* sejauh 4 (empat) km ke arah kiri dan kanan dari titik *outlet*.



Gambar 13 Sebaran Lemak Minyak limbah air terproduksi pada a) Musim Timur dan b) Musim Barat

3.9 Limbah Air Domestik

Besaran limbah air domestik yang dihasilkan bergantung pada ukuran proses produksi yang dilakukan suatu industri. Dalam jumlah yang besar limbah air berpotensi tinggi untuk mengganggu fungsi kelestarian lingkungan. Hal menjadikan industri yang menghasilkan limbah air diharuskan memiliki instalasi pengolahan air limbah sehingga parameter-parameter kualitas air limbah seperti, *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), kadar amonia (NH₃) dan *Total Suspended Solid* (TSS) pada limbah air domestik yang dibuang ke lingkungan dapat memenuhi baku mutu air limbah domestik.

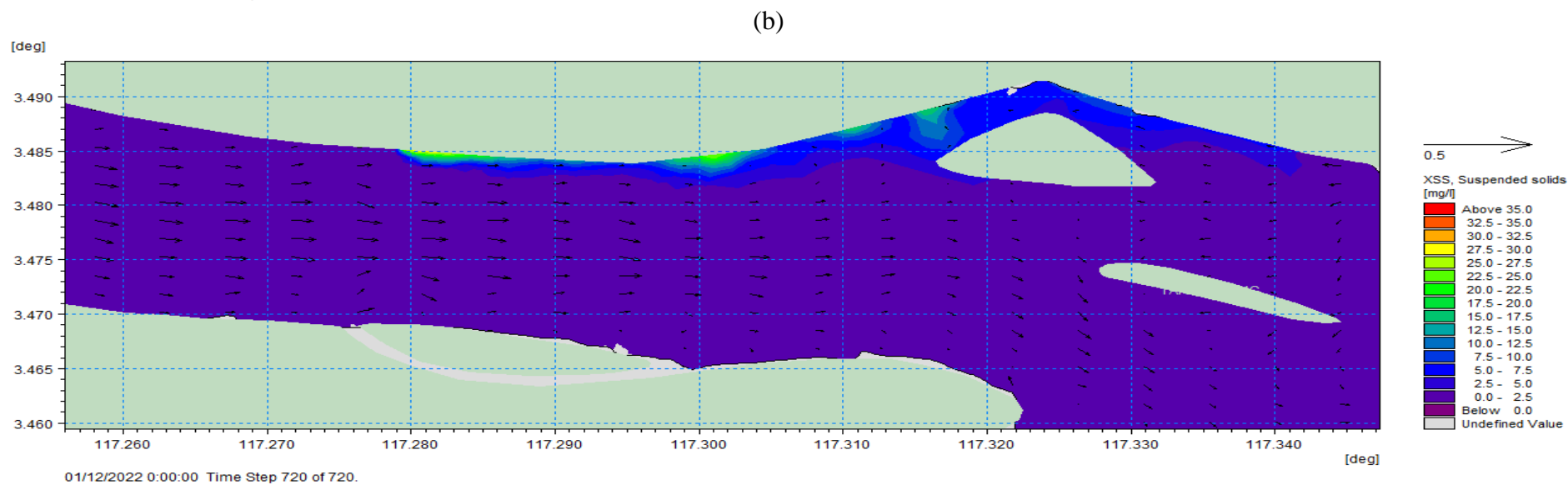
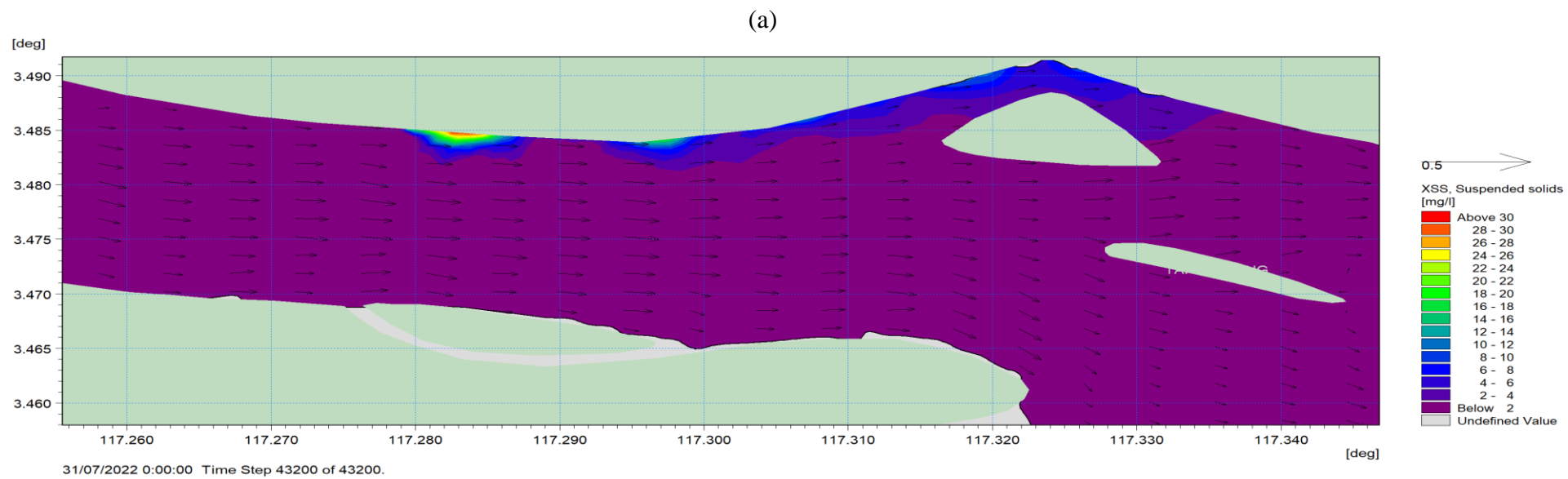
3.9.1 *Total Suspended Solid* (TSS)

Total Suspended Solid (TSS) merupakan salah satu parameter penting di dalam air limbah yang disebabkan oleh adanya lumpur, jasad renik, dan pasir halus yang semuanya memiliki ukuran $< 1 \mu\text{m}$ (Asmadi dan Suharno 2012). Menurut Kristanto (2013), padatan tersuspensi pada air limbah akan menghalangi masuknya sinar matahari ke dalam lapisan air, sehingga mengakibatkan terganggunya proses fotosintesis oleh mikroorganisme. Sebaran konsentrasi TSS di perairan termasuk di laut dipengaruhi oleh aktifitas antropogenik dan iklim/musim di Indonesia. Selain itu, parameter fisika seperti kedalaman (kontur dasar perairan), pasang surut, arus, dan kemiringan morfologi darat dapat memengaruhi sebaran TSS pada suatu perairan.

Gambar 12 menunjukkan sebaran TSS pada Musim Timur dan Musim Barat di area kajian. Nilai konsentrasi TSS tertinggi terjadi pada Musim Barat dengan kisaran konsentrasi TSS yaitu 2.5 mg/L – 35 mg/L. Nilai konsentrasi pada Musim Timur, yaitu sebesar 2 – 0.30 mg/L. Nilai konsentrasi TSS yang tinggi di perairan dapat dipengaruhi oleh curah hujan. Penelitian Nadida *et al.* (2018) menjelaskan bahwa pada Musim Barat, Indonesia memiliki curah hujan yang tinggi, sedangkan pada saat musim timur memiliki curah hujan yang rendah. Berdasarkan hal tersebut, dapat dilihat pada Musim Barat konsentrasi TSS lebih tinggi, dimana hal ini juga dijelaskan dalam penelitian Abidin *et al.* (2019) bahwa kondisi curah hujan berpengaruh besar terhadap penambahan TSS pada air sungai. Selain itu, Ahmad (2009) dalam penelitian Abidin *et al.* (2019) menyatakan bahwa terjadi peningkatan nilai TSS yang lebih besar pada saat musim hujan dibanding pada kondisi normal. Pada Musim Barat dan Musim Timur konsentrasi TSS yang tinggi terdapat dibagian sisi badan muara sungai.

Konsentrasi TSS yang tinggi di bagian sisi badan muara (dekat daratan) pada Musim Barat terjadi karena merupakan daerah yang menjadi titik keluarnya air domestik yang mengandung padatan tersuspensi (TSS), dimana pada Musim Timur merupakan Musim yang memiliki curah hujan rendah, sehingga TSS akan cenderung mengendap di titik *outlet* sebelum akhirnya dibawa oleh arus menuju sungai. Menurut Arifelia *et al.* (2017), konsentrasi TSS akan semakin rendah menuju laut lepas, dan hal ini sesuai dengan pola sebaran konsentrasi TSS pada Gambar 14. Kondisi ini juga dipengaruhi oleh pasang surut, dimana pada Gambar 12 merupakan kondisi pasang menuju surut. Hal ini mengakibatkan arah vektor arus terlihat dominan ke arah laut. Menurut Ardana dan Mahendra (2009) serta Risuana *et al.* (2017) dalam penelitian Kamajaya *et al.* (2021), pada kondisi pasang menuju surut, arah arus akan membawa konsentrasi TSS pada muara sungai menuju keluar teluk, sehingga konsentrasi disekitar tengah dan mulut teluk memiliki konsentrasi yang tinggi karena adanya pengenceran polutan.

Berbeda dengan kondisi pada saat Musim Barat yang merupakan musim dengan curah hujan tinggi, dimana masukan TSS dari sungai akan langsung menyebar ke badan muara menuju laut. Ahmad (2009) dalam penelitian Abidin (2019) menyatakan bahwa nilai TSS akan mengalami peningkatan yang lebih besar pada saat musim hujan dibanding pada kondisi normal. Pada saat musim hujan, substrat dasar perairan yang merupakan lumpur akan naik ke permukaan karena terjadi pengadukan dari permukaan air sampai ke dasar perairan. Hal ini juga dipengaruhi pergerakan pasang surut, dimana pada Musim Barat terjadi kondisi surut menuju pasang. Kondisi ini menyebabkan naiknya muka air laut dan berpengaruh terhadap penumpukan material padatan tersuspensi (Gusman *et al.* 2013) di bagian tengah badan air muara. Berdasarkan standar baku mutu lingkungan yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 68 Tahun 2016 Mengenai Baku Mutu Air Limbah Domestik, konsentrasi sebaran TSS area outlet ke badan perairan berada pada kisaran >30 mg/L sehingga masih memenuhi standar baku mutu tersebut.



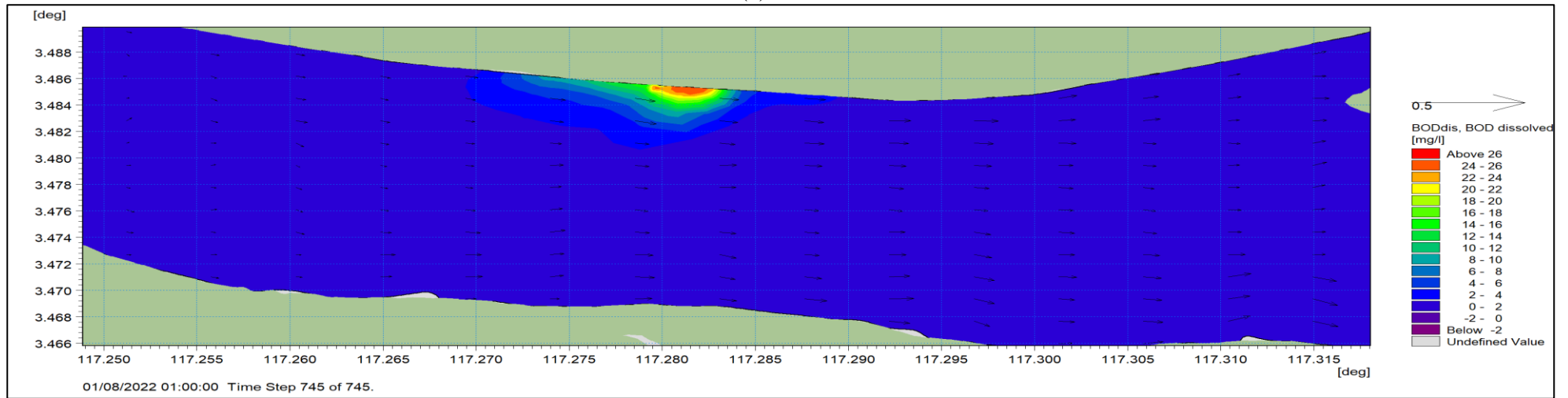
Gambar 14 Sebaran TSS pada a) Musim Timur dan b) Musim Barat

3.9.2 *Biological Oxygen Demand (BOD) 30 mg/L*

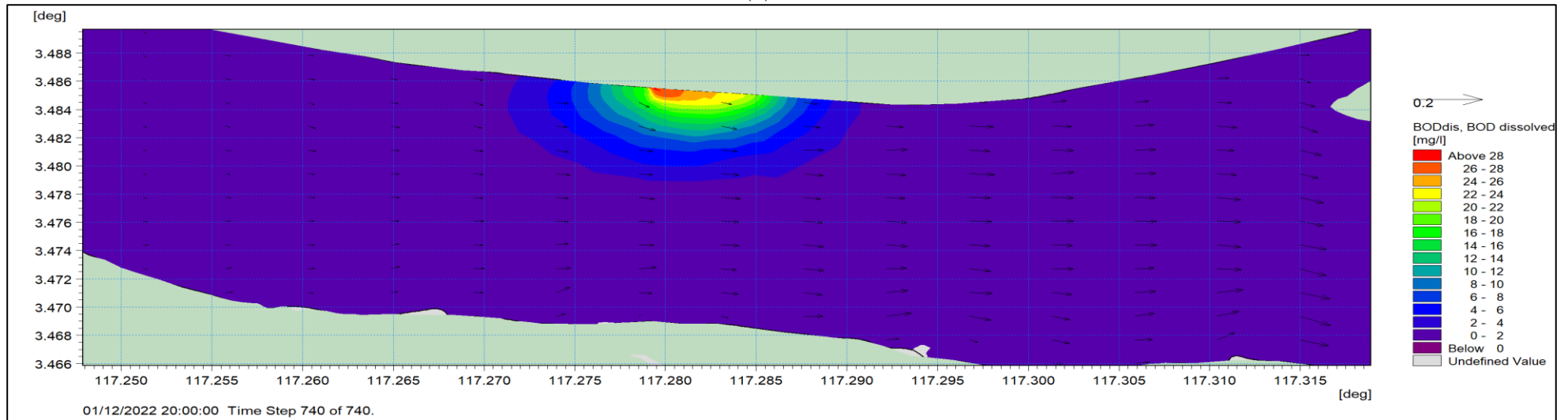
Biological Oxygen Demand (BOD) merupakan parameter yang menunjukkan jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan oleh mikroorganisme (pada umumnya bakteri) untuk mendekomposisi bahan organik yang terdapat pada limbah dalam kondisi aerobik (Santoso 2018; Habiba *et al.* 2021). Nilai BOD yang semakin tinggi menunjukkan jumlah bahan organik yang semakin bertambah dan sebaliknya (Habiba *et al.* 2021). Nilai BOD juga dapat menggambarkan bahan organik yang mudah diurai (*biodegradable*) yang ada dalam air atau perairan yang bersangkutan (Atima, 2015). Pemodelan persebaran parameter limbah adalah langkah penting untuk mengetahui bagaimana persebaran unsur-unsur limbah yang akan keluar dari *outlet* suatu industri. Pemodelan persebaran parameter BOD pada Musim Timur dapat dilihat pada Gambar 13. Persebaran BOD secara spasial dapat dilihat tersebar ke arah sisi kanan dan kiri, tetapi tetap masih berada hanya di salah satu sisi muara sungai terutama disekitar titik *outlet*. Rentang konsentrasi BOD di titik *outlet* adalah 24 – 26 mg/L dan berpotensi melebihi, semakin bergerak menjauhi titik *outlet* konsentrasi BOD berkisar 24 – 22 mg/L. Konsentrasi BOD semakin berkurang seiring bergerak menjauhi titik *outlet* hingga rentang 20 – 2 mg/L dan jangkauan persebaran parameter BOD tersebar sejauh 4 (empat) km ke arah kanan dan kiri dari titik *outlet*. Pada hasil pemodelan dapat diketahui bahwa pada Musim Timur, persebaran parameter BOD cenderung terdorong ke arah hulu. Hal ini disebabkan karena pada saat Musim Timur yang ditampilkan adalah hasil yang terjadi pada saat kondisi pasang. Kondisi ini menyebabkan air laut masuk ke arah muara dibawa oleh arus pasang dan mendorong massa air tawar. Energi arus pasang lebih tinggi dari pada energi *flow* dari *outlet* dan muara sungai, sehingga persebaran terdorong ke arah hulu. Secara vertikal atau persebaran terhadap kedalaman, konsentrasi parameter BOD lebih tinggi di perairan dangkal, terutama disekitar titik *outlet*.

Pada Musim Barat, persebaran parameter BOD yang telah dimodelkan berdasarkan Gambar 13. dapat dilihat bahwa pola persebaran sedikit berbeda dengan yang terjadi di Musim Timur. Jangkauan penyebaran parameter BOD tersebar sejauh 4 (empat) km ke arah kanan dan kiri dari titik *outlet*, namun dengan pola berbeda. Rentang konsentrasi BOD di titik *outlet* adalah 24 – 26 mg/L dan berpotensi melebihi, semakin bergerak menjauhi titik *outlet* konsentrasi BOD berkisar 24 – 22 mg/L. Konsentrasi BOD semakin berkurang seiring bergerak menjauhi titik *outlet* hingga rentang 20 – 2 mg/L dan dapat mendekati 0 mg/L. Secara spasial dapat dilihat bahwa persebaran parameter berbentuk lebih *spherical* dibandingkan dengan Musim Timur. Perbedaan bentuk dari pola sebaran secara spasial ini dapat dipengaruhi oleh kondisi fisik yaitu pasang-surut. Pada Musim Timur, pemodelan yang dilakukan terjadi pada kondisi pasang, sedangkan pada Musim Barat pemodelan yang dilakukan terjadi pada kondisi surut. Akibatnya tidak ada massa air laut yang mendorong massa air tawar. Faktor lain yang mungkin terjadi sehingga pola sebaran tidak tersebar condong ke arah laut juga dapat disebabkan oleh Arus. Arus yang ada di muara sungai termasuk kategori arus lambat/lemah. Jika energi *flow* dari *outlet* lebih besar dari Arus Muara Sungai, maka pola sebaran parameter BOD akan dipengaruhi oleh *flow* dari *outlet*. Secara vertikal terhadap kedalaman persebaran konsentrasi BOD sama dengan yang terjadi pada Musim Timur dimana lebih tinggi pada perairan dangkal. Luas area persebaran pada kondisi Musim Barat lebih luas dibandingkan pada Musim Timur.

(a)



(b)



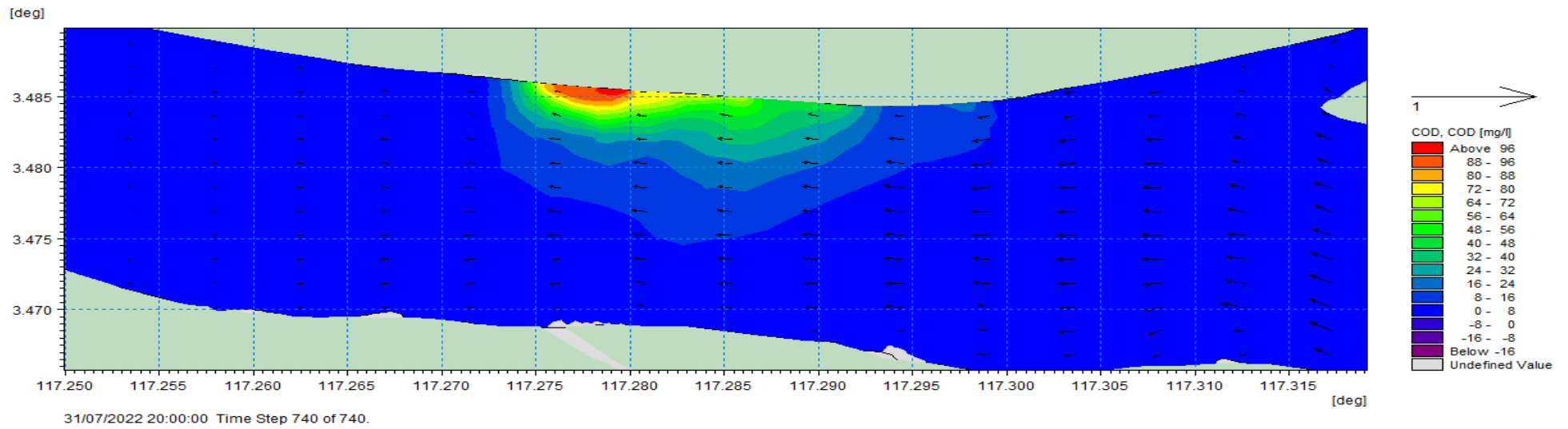
Gambar 15 Sebaran BOD limbah air terproduksi sebanyak 30 mg pada a) Musim Timur dan b) Musim Barat

3.9.3 Chemical Oxygen Demand (COD) 100 mg/l

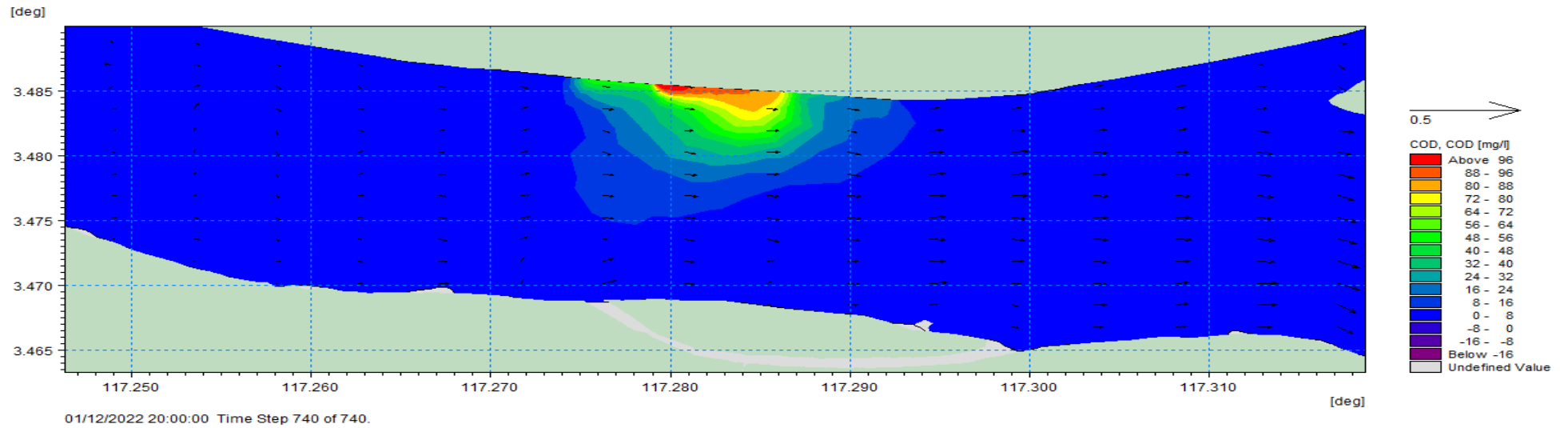
Chemical Oxygen Demand (BOD) adalah jumlah oksigen (MgO_2) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik secara kimiawi, baik yang dapat didegradasi secara biologi (*biodegradable*) maupun yang sukar didegradasi (*non-biodegradable*) menjadi CO_2 dan H_2O dalam satu liter sampel air. Penguraian bahan organik secara kimia dilakukan dengan menggunakan oksidator kuat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) dalam suasana asam dan panas menggunakan oksidator perak sulfat sebagai katalisator kemudian dipanaskan beberapa waktu tertentu (Fadzry *et al.* 2020). Pemodelan persebaran parameter limbah adalah langkah penting untuk mengetahui bagaimana persebaran unsur-unsur limbah yang akan keluar dari *outlet* suatu industri. Pemodelan persebaran parameter COD pada Musim Timur dapat dilihat pada Gambar 14. Persebaran COD secara spasial dapat dilihat tersebar ke arah sisi kanan dan kiri, tetapi tetap masih berada hanya di salah satu sisi muara sungai terutama disekitar titik *outlet*. Rentang konsentrasi COD di titik *outlet* adalah 88 – 96 mg/L dan berpotensi melebihi, semakin bergerak menjauhi titik *outlet* konsentrasi COD berkisar 24 – 64 mg/L. Konsentrasi COD semakin berkurang seiring bergerak menjauhi titik *outlet* hingga rentang 0 – 16 mg/L dan jangkauan persebaran parameter COD tersebar sejauh 4 (empat) km ke arah kanan dan kiri dari titik *outlet*. Pada hasil pemodelan dapat diketahui bahwa pada Musim Timur, persebaran parameter COD cenderung terdorong ke arah laut. Secara vertikal atau persebaran terhadap kedalaman, konsentrasi parameter COD lebih tinggi di perairan dangkal, terutama disekitar titik *outlet*.

Pada Musim Barat, persebaran parameter COD yang telah dimodelkan berdasarkan Gambar 14. dapat dilihat bahwa pola persebaran sedikit berbeda dengan yang terjadi di Musim Timur. Jangkauan penyebaran parameter COD tersebar sejauh 4 (empat) km ke arah kanan dan kiri dari titik *outlet*, namun dengan pola berbeda. Rentang konsentrasi COD di titik *outlet* adalah 88 – 96 mg/L dan berpotensi melebihi, semakin bergerak menjauhi titik *outlet* konsentrasi COD berkisar 24 – 22 mg/L. Konsentrasi BOD semakin berkurang seiring bergerak menjauhi titik *outlet* hingga rentang 32 – 72 mg/L dan dapat mendekati 0 mg/L. Secara spasial dapat lihat bahwa persebaran parameter berbentuk lebih *spherical* dibandingkan dengan Musim Timur. Perbedaan bentuk dari pola sebaran secara spasial ini dapat dipengaruhi oleh kondisi fisik yaitu pasang-surut. Pada Musim Timur, pemodelan yang dilakukan terjadi pada kondisi pasang, sedangkan pada Musim Barat pemodelan yang dilakukan terjadi pada kondisi surut. Akibatnya tidak ada massa air laut yang mendorong massa air tawar. Faktor lain yang mungkin terjadi sehingga pola sebaran tidak tersebar condong ke arah laut juga dapat disebabkan oleh Arus. Arus yang ada di muara sungai termasuk kategori arus lambat/lemah. Jika energi *flow* dari *outlet* lebih besar dari Arus Muara Sungai, maka pola sebaran parameter COD akan dipengaruhi oleh *flow* dari *outlet*. Secara vertikal terhadap kedalaman persebaran konsentrasi COD sama dengan yang terjadi pada Musim Timur dimana lebih tinggi pada perairan dangkal. Luas area persebaran pada kondisi Musim Barat lebih luas dibandingkan pada Musim Timur.

(a)



(b)



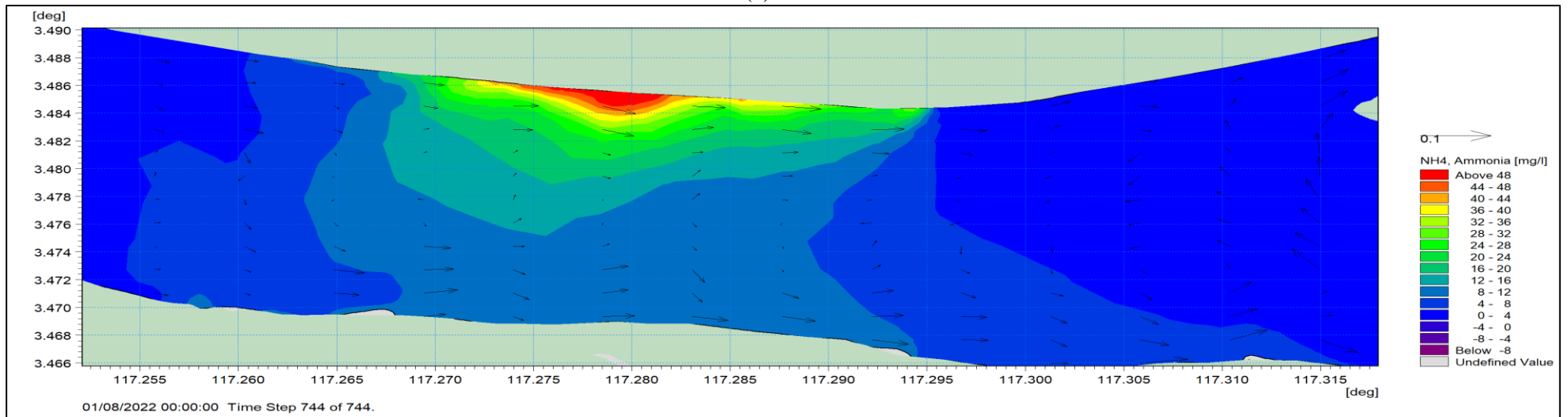
Gambar 16 Sebaran COD limbah air terproduksi sebanyak 30 mg pada a) Musim Timur dan b) Musim Barat

3.9.4 Amoniak

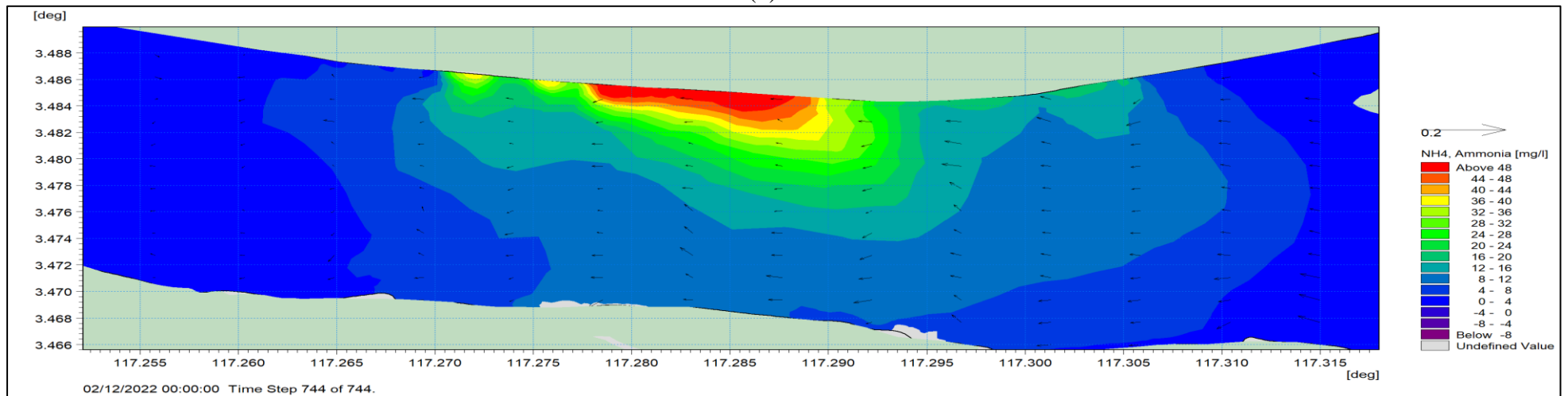
Pengelolaan limbah industri di lingkungan tidak sebatas limbah air terproduksi. Pada pengelolaannya, sumber limbah lainnya di perairan yang harus juga diperhitungkan adalah limbah air domestik. Salah satu parameter yang menjadi ukuran pencemaran dari limbah air domestik adalah senyawa amonia. Hasil pemodelan senyawa amonia pada air domestik dapat dilihat pada Gambar 13. Hasil pemodelan persebaran senyawa amoniak pada Musim Timur tersebar hingga ke sisi seberang titik *outlet*. Jarak penyebaran senyawa amonia tersebar secara spasial sejauh 4 (empat) km ke arah kiri dan kanan dari titik *outlet* dan sangat tinggi di sekitar titik *outlet* dan semakin berkurang dengan semakin menjauhnya jarak dari titik *outlet* dengan rentang konsentrasi senyawa amonia berkisar 0.4 – 0.8 mg/L. Konsentrasi senyawa amonia secara vertikal terhadap kedalaman menunjukkan tingginya konsentrasi yang tinggi di perairan dangkal disekitar titik *outlet*. Pola bentuk sebaran pada Musim Timur menunjukkan adanya pola sebaran yang dominan bergerak ke arah hulu. Hal ini disebabkan karena pengaruh kondisi pasang yang membawa massa air laut memasuki Kawasan muara sungai. Sehingga mendorong persebaran senyawa ammonia di muara sungai.

Pada Musim barat, persebaran senyawa ammonia yang ditunjukkan oleh Gambar 15 menjelaskan bahwa pola sebaran berbeda dengan yang terjadi di Musim Timur. Secara spasial sebaran konsentrasi senyawa amonia tersebar sejauh 4 km ke arah kiri dan kanan. Secara vertikal terhadap kedalaman, konsentrasi senyawa amonia lebih tinggi perairan dangkal dengan rentang 2.4 – 5.6 mg/L. Luas area sebaran amoniak di Musim Barat lebih luas dari Musim Timur. Bentuk pola sebaran pada Musim Barat lebih mencondong ke arah laut. Hal ini disebabkan karena sedang terjadi surut, sehingga energi *flow* didominasi oleh *flow* dari *outlet* dan dari hulu sungai.

(a)



(b)

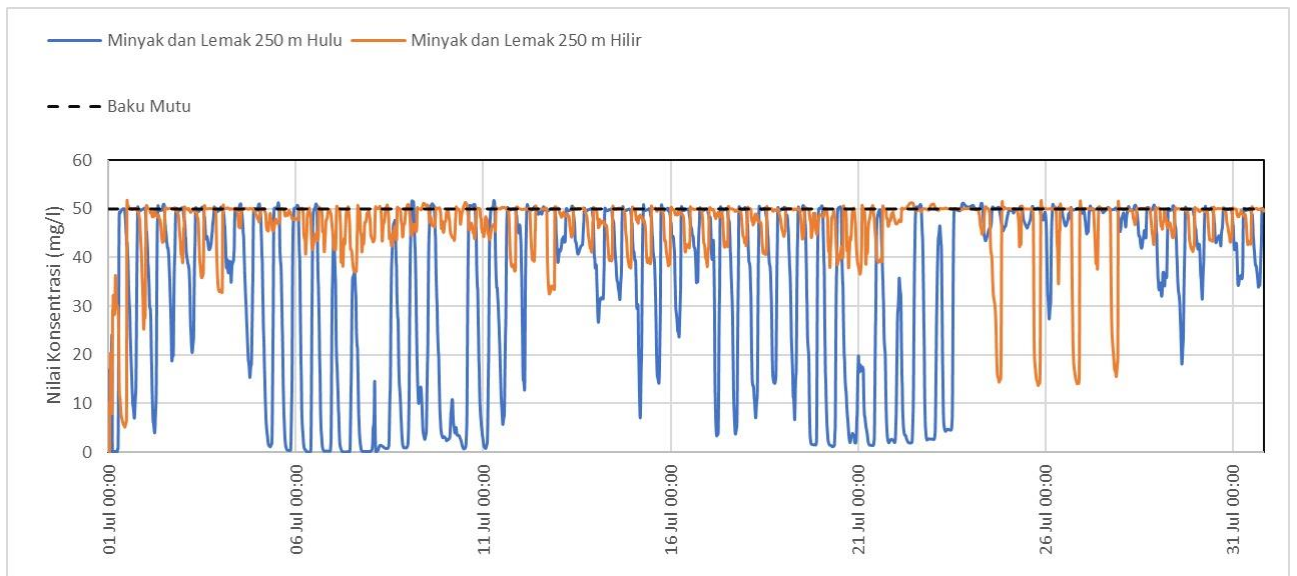


Gambar 17 Sebaran Amoniak limbah air domestik pada a) Musim Timur dan b) Musim Barat

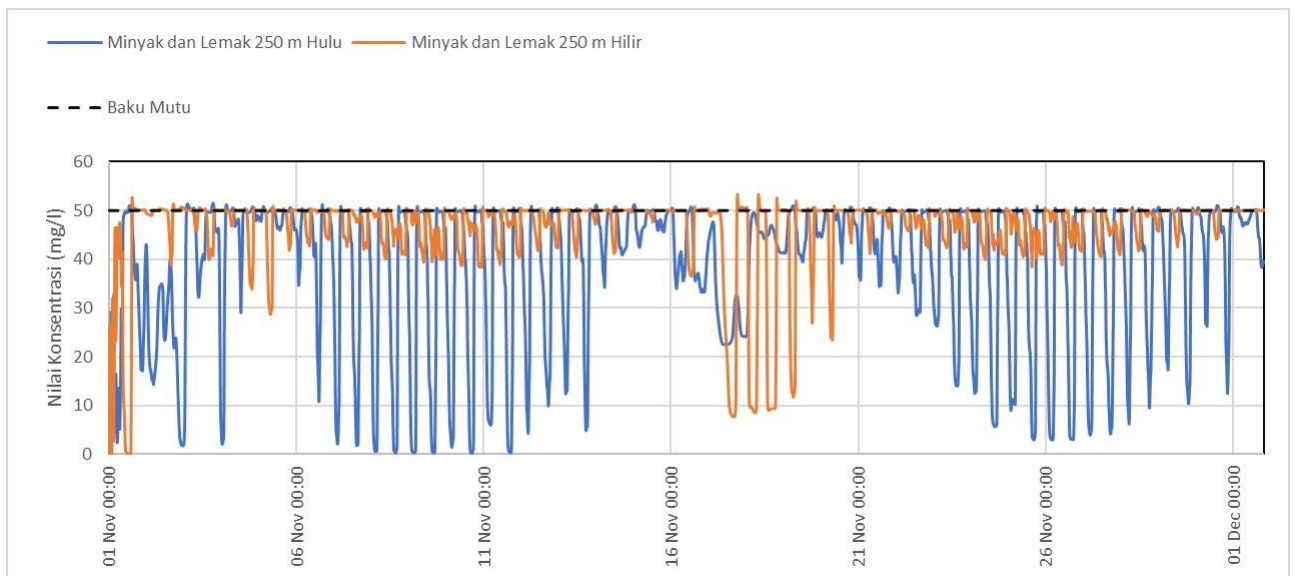
3.10 Zone of Initial Dillution

Zone of Initial Dillution adalah suatu zona dimana perairan dapat terpapar oleh pencemar dengan konsentrasi yang melebihi baku mutu air secara terus menerus. Prediksi sebaran limbah air terproduksi menggunakan pemodelan sejauh mana sebaran air limbah untuk parameter kunci dan debit air limbah yang dibuang pada kondisi hidrodinamik laut pasang surut musim barat dan musim timur. Pemodelan sebaran limbah air terproduksi ditentukan *Zone of initial Dillution* (ZID) yang merupakan yang diperkirakan terkena dampak pembuangan air limbah (MLHK 2021). Penentuan hasil ZID dalam studi ini adalah berdasarkan hasil model yang ketika parameter limbah air terproduksi masuk ke perairan konsentrasinya masih melampaui baku mutu dan sebarannya paling jauh diantara parameter lainnya. Baku mutu yang digunakan adalah baku mutu Lemak dan Minyak berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No 19 Tahun 2010 tentang baku mutu air limbah terproduksi dari fasilitas eksplorasi dan produksi migas di lepas pantai (*off-shore*). Berdasarkan simulasi yang dilakukan, tidak ada parameter yang melebihi baku mutu. Pada parameter Lemak dan Minyak, terdapat perubahan konsentrasi di wilayah kajian dari outlet ke laut. Parameter ZID dilakukan pada parameter lemak dan minyak. Setelah dilakukan pencuplikan titik untuk parameter lemak dan minyak pada berapa titik dengan radius 250 m dari sumber buangan menuju ke arah dalam muara dan ke arah laut lepas menunjukkan ada yang melebihi baku mutu pada musim barat dan timur yang bisa dilihat pada Gambar 16. Titik pemantauan dapat dilakukan di area dengan konsentrasi tertinggi.

(a)



(b)



Gambar 18 Konsentrasi lemak minyak selama 1 bulan hasil simulasi model di wilayah Bangkudulis pada (a) Musim Timur dan (b) Musim Barat

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin F, Millang S, Arsyad U. 2019. Kualitas Air Sungai pada Berbagai Tipe Penutupan Lahan pada Sub-sub DAS di DAS Latuppa. *Jurnal Hutan Dan Masyarakat*. 11(1): 59-72.
- Ahmad, R.Z. 2009. Cemaran Kapang pada Pakan dan Pengendaliannya. *Jurnal Litbang Pertanian*. Volume 28 (1), 2009. Hal : 15-22.
- Ardana K, Mahendra MS. 2009. Study of Pollutant Distribution in Benoa Bay Using Numerical Simulation and Satellite Data. *Jurnal Echotropic – Universitas Udayana*. 3 (2): 81 – 86.
- Asmadi dan Suharno. 2012. Dasar-Dasar Teknologi Pengolahan Air Limbah. Pontianak : Gosyen Publishing
- Arifelia DR, Diansyah G, Surbakti H. 2017. Analisis kondisi perairan ditinjau dari konsentrasi total suspended solid dan sebaran klorofil-a di Muara Sungai Lumpur, Sumatra Selatan. 9(2): 95-104.
- DHI, (2012a), *Mike 21 Flow Model: Hydrodynamic Module-Scientif Documentation*, DHI, Denmark.
- Daruwedho H, Sasmito B, Janu FA. 2016. Analisis pola arus laut permukaan perairan Indonesia dengan menggunakan satelit altimetri JASON-2 tahun 2010-2014. *Jurnal Geodesi Undip* 5(2):147-157.
- Fadilla, L., Subiyanto, S., & Suprayogi, A. (2017). Analisis Pengaruh Fenomena El Nino dan La Nina Terhadap Curah Hujan Tahun 1998- 2016 Menggunakan Indikator ONI (Oceanic Nino Index) (Studi Kasus : Provinsi Jawa Barat). Analisis Arah Dan Prediksi Persebaran Fisik Wilayah Kota Semarang Tahun 2029 Menggunakan Sistem Informasi Geografis Dan CA Markov Model, 6.
- Fadzy N, Hidayat H, Eniati E. 2020. Analisis COD, BOD dan DO pada Instansi Pengelolaan Air Limbah (IPAL) Balai Pengelolaan Infrastruktur Air Limbah dan Air Minum Perkotaan Dinas PUP-ESDM Yogyakarta. *IJCR- Indonesian Journal of Chemical Research* 5(2):89-89.
- Febrianto T, Hestirianoto T, Agus SB. 2015. Pemetaan batimetri di perairan dangkal Pulau Tunda, Serang, Banten menggunakan Singlebeam Echosounder. *Jurnal Teknologi Perikanan dan Kelautan* 6(2):139-147.
- Gusman DV, Widada S, Satriadi A. 2013. Pengaruh arus terhadap sebaran material padatan tersuspensi di Pantai Sigandu, Kabupaten Batang. *Jurnal Oseanografi*. 2(1): 66-72.
- Kamajaya GY, Putra IDNN, Putra ING. 2021. Analisis sebaran total suspended solid(TSS) berdasarkan citra landsat 8 menggunakan tiga algoritma berbeda di perairan Teluk Benoa, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*. 7(1): 18-24
- Kinanti TES, Rudiyanti, Purwanti F. 2014. Kualitas Perairan Sungai Bremsi Kabupaten Pekalongan Ditinjau Dari Faktor Fisika Kimia Sedimen dan Kelimpahan Hewan Makrobentos. Diponegoro. *Journal of Maquares* 3(1):16-167.
- Komar PD. 1998. *Beach Proseses and Sedimentation*, 2nd Ed. Prince Hall. New Jersey. 539p.
- Kristanto, P. 2013. Ekologi Industri. Yogyakarta : Cv. Andi Offset.
- Maslukah L, Indrayanti E, Rafai A. 2014. Sebaran material organik dan zat hara oleh arus pasang surut di Muara Sungai Demaan, Jepara. *Ilmu Kelautan* 19(4):189-194.

- Montani S, Magni P, Shimamoto M, Abe N, Okutani K. 1998. The effect of a tidal cycle on the dynamics of nutrients in a tidal estuary in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr* 54:65-76.doi:10.1007/BF02744382.
- Nadida P, Mubarak M, Efriyeldi E. 2018. Seasonal distribution total suspended solid in rangsang barat coastal waters meranti island regency riau province. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Perikanan dan Ilmu Kelautan*. 5(2): 1-13.
- Nugroho A, Ismunarti DH, Rochaddi B. 2015. Studi karakteristik dan co-range Pasang Surut di Teluk Lembar Lombok Nusa Tenggara Barat. *Journal of Oceanography*. 4(1): 93-99.
- Pangestu NJ, Kushadiwijayanto AA, Nurrahman YA. 2020. Studi batimetri dan morfologi Sungai Mempawah Kabupaten Mempawah, Kalimantan Barat. *Jurnal Laut Khatulistiwa* 3(2):69-76.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 68 Tahun 2016
- Riswana, IGS, Hendrawan IG, Suteja, Y. 2017. Distribusi Spasial Total Padatan Tersuspensi Puncak Musim Hujan Di Permukaan Perairan Teluk Benoa, Bali. *Journal of Marine Sciences*. 3(2), 223-232.
- Rosida LA, Anwar MS, Sholeh OM, Mushofa AS, Prayogo LM. 2022. Penerapan Metode Least Square untuk Analisis Harmonik Pasang Surut Air Laut di Kabupaten Tuban, Jawa Timur. *EL-JUGHRAFIYAH*. 2(2): 67-74.
- R A Dwi, Sukojo BM, Jaelani ML.2011. Studi perubahan suhu permukaan laut menggunakan satelit AQUA MODIS. *Jurnal GEOID*. 7(1).73-78.
- Salim G, Firdaus M, Alvian MF, Indarjo A, Soejarwo PA, Daengs AGS, Prakoso LY. 2019. Analisis sosial ekonomi dan keramahan lingkungan alat tangkap sero (set net) di perairan Pulau Bangkudulis Kabupaten Tana Tidung, Kalimantan Utara. *Buletin Ilmiah "MARINA" Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan* 5(2):85-94.
- Siswanto AD. 2015. Sebaran Total Suspended Solid (TSS) pada profil vertikal di perairan Selat Madura Kabupaten Bangkalan. *Jurnal Kelautan*. 8(1): 26-32 .
- Surinati D, Martafah MR. 2019. Pengaruh factor hidrodinamika terhadap sebaran limbah air panas di laut. *Oseana* 44(1):26-37
- Schröder, J. F., Holbourn, A., Kuhnt, W., & Küssner, K. (2016). Variations in sea surface hydrology in the southern Makassar Strait over the past 26 kyr. *Quaternary Science Reviews*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.10.018>
- Tjasyono, B. H. (2004). *Klimatologi Umum*. In Penerbit ITB Bandung
- Triatmodjo B. 2008. *Teknik Pantai*. Beta Offset. Yogyakarta
- Wahid A. 2009. Analisis factor-faktor yang mempengaruhi debit sungai mamasa. *Jurnal SMARTek* 7(3):204-218.
- Widyanto P, Muslim, Suseno H, Makmur M. 2014. Pengaruh batimetri perairan terhadap distribusi plutonium-239/240 ($^{239/240}\text{Pu}$) dalam sedimen di perairan Gresik. *Jurnal Oseanografi* 3(3):448-453.
- Wismadi T. Handayani S. 2014. Karakteristik pasang surut laut di Raja Ampat, Indonesia. *GEOMATIKA*. 20(1)
- Yin K, Harrison PJ. 2000. Influences of flood and ebb tides on nutrient fluxes and chlorophyll on intertidal flat. *Mar. Ecol* 196:75-85. doi:10.3354/meps196075.

