

Pemodelan Sebaran dan Waktu Tinggal Limbah Panas di Teluk Bontang

Totok Suprijo

Laboratorium Oseanografi Pesisir, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Email: totok.suprijo@itb.ac.id

Francis Seravino Romawan

Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Email: francis.romawan26@gmail.com

Ashadi Arifin Nur

Korea-Indonesia MTCRC (Marine Technology Cooperation Research Center), Cirebon
Email: ashadi.fis08@gmail.com

Idris Mandang

Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman
Email: idris@fmipa.unmul.ac.id

Gandhi Napitupulu*

Program Studi Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Email: gandhinapitupulu88@gmail.com

Abstrak

Proses pertukaran massa air antara teluk dengan laut lepas dapat membilas limbah yang masuk ke teluk tersebut. Makalah ini membahas kajian pemodelan numerik dua dimensi tentang sebaran atau dispersi limbah air panas akibat proses hidrodinamika di Teluk Bontang dan kemampuan pembilasan yang terjadi di teluk ini. Model numerik yang digunakan adalah Delft3D. Data input model mencakup batimetri, elevasi muka air, debit penarikan dan pembuangan air laut, kecepatan angin, serta suhu limbah air panas yang dialirkan ke Teluk Bontang. Hasil pemodelan diverifikasi terhadap data observasi. Hasil verifikasi mengindikasikan galat elevasi muka air sebesar 0,07 m, sementara galat kecepatan arus sebesar 0,26 m/s. Hasil pemodelan dispersi limbah panas bersuhu 40°C yang dialirkan ke Teluk Bontang dengan debit 24,6 m³/s telah mengindikasikan peningkatan suhu lingkungan perairan teluk sebesar 1°C hingga 2°C, sehingga perubahan suhu lingkungan ini berpotensi memberikan dampak negatif terhadap ekosistem perairan. Area perairan teluk yang suhunya meningkat 1°C dan 2°C masing-masing melingkupi luasan sebesar 19,32 km² dan 7,26 km². Waktu tinggal limbah panas di perairan Teluk Bontang sebelum terbilas adalah 3 hari dan 12 jam.

Kata-kata Kunci: Dispersi termal, proses pertukaran, waktu tinggal, waktu bilas

Abstract

The water mass exchange process between a bay and an open sea can flush effluents or pollutants that enter the bay. This paper describes a two-dimensional numerical modelling study on thermal water dispersion due to hydrodynamic processes in The Bontang Bay and the bay flushing capability. The numerical model used is Delft3D. Model input data was including bathymetry, water elevation, discharge of seawater intake and outfall, wind speed, and temperature of the thermal water effluent discharged into Bontang Bay. The modelling results were verified with observation data. Verification results shows that error of water elevation is 0.07 m, while current speed error is 0.26 m/s. Dispersion modeling results indicate that 40°C thermal water discharged at a rate of 24.6 m³/s into Bontang Bay has increased the water temperature in the bay by 1°C to 2°C. This increase in temperature potentially has a negative impact on aquatic ecosystems. An increase in water temperature of 1°C and 2°C covers areas of 19.32 km² and 7.26 km² in the bay, respectively. The residence time of thermal water in Bontang Bay is 3 days and 12 hours before flushing.

Keywords: Thermal dispersion, exchange process, residence time, flushing time

* Penulis Korespondensi: gandhinapitupulu88@gmail.com

1. Pendahuluan

Perairan Bontang merupakan bagian dari wilayah Kalimantan Timur yang terhubung secara langsung dengan Selat Makassar. Di Perairan Bontang ini terdapat industri pengolahan gas alam cair yang menggunakan Sistem Sirkulasi Pendingin Air Laut (SSPAL) sebagai bagian dari proses industrinya (Mazyan dkk., 2016). SSPAL pada dasarnya menghasilkan limbah dalam bentuk limbah air panas yang dapat menaikkan suhu di perairan tempat penyaluran limbah (Brough and Jouhara, 2020). Peningkatan suhu perairan berpotensi membahayakan biota laut yang tinggal di perairan tersebut maupun ekosistemnya. Peningkatan suhu sebesar 1°C dapat menciptakan stres pada polip karang (Fordyce dkk., 2017), dan apabila keadaan ini bertahan tiga sampai enam bulan, maka biota pada karang laut akan mulai mati (Weinnig dkk., 2020). Sementara jika suhu di perairan naik lebih dari 1°C atau sampai 5°C, biota laut yang terdampak tidak hanya karang-karang tetapi juga alga, krustasea dan ikan-ikan yang ada di perairan tersebut (Hughes dkk., 2020). Beberapa jenis alga mati jika suhu di perairan naik menjadi 32°C sampai 35°C diduga karena menurunnya kadar oksigen pada rentang suhu tersebut. Sementara itu beberapa jenis kepiting tertentu mati di rentang suhu yang sama, akibat meningkatnya penyerapan logam berat dalam organ tubuhnya (Han dkk., 2022). Meningkatnya suhu tidak hanya mempengaruhi kadar oksigen dalam air serta peningkatan logam berat dalam tubuh, akan tetapi peningkatan suhu juga membuat peningkatan aktivitas hewan-hewan laut. Beberapa jenis ikan karang dapat mengalami penurunan populasi jika kondisi suhu di perairan naik 2°C sampai 4°C dikarenakan meningkatnya suhu berdampak pada peningkatan aktivitas individu ikan tersebut, sehingga kegiatan untuk mencari makan dan bereproduksi menjadi berkurang (Audzijonyte dkk., 2020). Berdasarkan permasalahan tersebut, maka interaksi antara SSPAL dengan lingkungan perairan, dimana limbah SSPAL tersebut ditempatkan, menjadi hal yang penting dan patut untuk dipelajari.

Upaya-upaya yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan lingkungan akibat limbah SSPAL, yaitu (1) menetapkan peraturan yang membatasi suhu yang boleh dibuang ke perairan sekitar (Miller dkk., 2018), (2) menggunakan penutup sehingga mencegah limbah bertambah panas akibat terpapar oleh sinar matahari (Jay dkk., 2021), (3) membuat penampungan air panas sementara dan mengubah lokasi pembuangan (Chandra and Matuska, 2019), atau (4) dapat juga dengan membagi-bagi saluran pembuangan (Nagpal dkk., 2021). Metode-metode yang telah disebutkan sebelumnya merupakan metode dari segi teknis. Selain segi teknis, upaya lain yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan pemodelan hidrodinamika dan dispersi suhu dari perairan tersebut (Ramachandran dkk., 2017). Melakukan pemodelan merupakan langkah yang secara finansial lebih ekonomis untuk dilakukan dan langkah pemodelan dispersi suhu juga merupakan langkah awal yang seharusnya dilakukan sebelum melakukan upaya-upaya dari segi teknis. Oleh

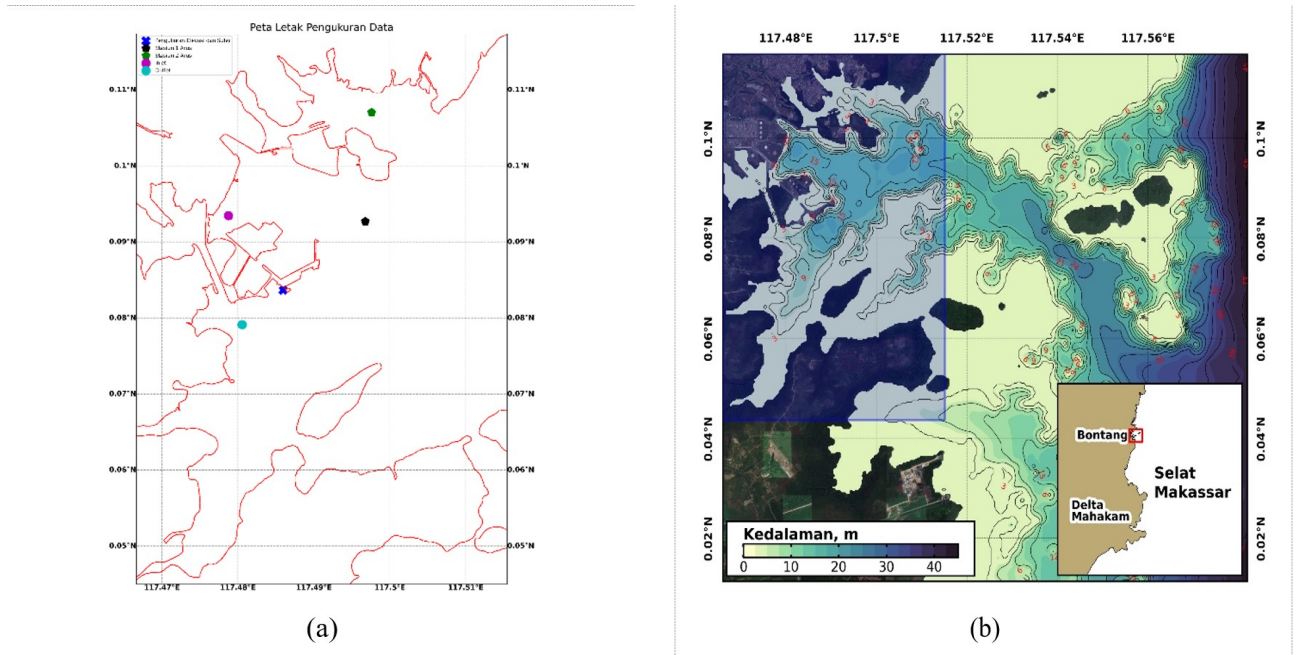
karena itu tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji kondisi hidrodinamika, menyimulasikan penyebaran limbah air panas, dan membahas prakiraan dampak buruk dari masuknya limbah air panas terhadap biota laut di Perairan Bontang ini.

Di saat limbah air panas dari SSPAL masuk ke suatu perairan, proses penyebarannya dipengaruhi oleh kondisi hidrodinamika yang terjadi di perairan tersebut. Jika terjadi peningkatan kecepatan arus di suatu perairan yang memiliki buangan limbah air panas, maka limbah tersebut dapat menyebar lebih luas (Martin dkk., 2018). Kondisi hidrodinamika tidak hanya mempengaruhi proses adveksi (perpindahan) dari limbah air panas itu sendiri tetapi juga difusi (proses penyebaran). Proses difusi membuat limbah air panas mengalami pengurangan suhu seiring bertambahnya jarak dari titik pembuangan (Manasrah dkk., 2019). Studi yang mengkaji sebaran limbah air panas di Perairan Bontang sebelumnya sudah dilakukan oleh Kasman dkk. (2012), tetapi yang menjadikan penelitian ini berbeda dengan studi sebelumnya adalah dimasukkannya pengaruh pertukaran panas antara air dengan udara, dilakukannya perhitungan estimasi luas sebaran limbah air panas yang terbentuk, dilakukannya model pelacak partikel untuk melihat kemampuan bilas Perairan Bontang, dilakukannya kajian terkait prakiraan dampak buruk dari limbah air panas ini terhadap biota laut, serta verifikasi model yang dilakukan pada studi ini yaitu elevasi muka air, kecepatan arus serta suhu air.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data

Daerah kajian penelitian ini berlokasi di Perairan Teluk Bontang, Kalimantan Timur (**Gambar 1b**). Data-data yang digunakan adalah data untuk masukan (*input*) model dan data verifikasi model. Data untuk masukan model berupa data batimetri Perairan Bontang yang didapatkan secara gratis dari situs Batimetri Nasional (BATNAS) dengan resolusi 6 *arc-second* dan datum yang digunakan adalah MSL, data elevasi muka air pasang surut dan data kecepatan arus tiap jam untuk bulan Juni 2017 yang didapat dari penelitian (Nur dkk., 2021), data kecepatan angin tiap 6 jam untuk bulan Juni 2017 dari situs *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), data debit air yang masuk dan yang dibuang dari SSPAL yang didapat dari studi Pamungkas (2004), dan data suhu perairan yang didapat dari pengukuran. Data verifikasi didapat dari pengukuran lapangan yang dilaksanakan pada bulan Juni 2017 dengan parameter yang diukur adalah elevasi pasang surut, kecepatan arus, serta suhu). Pengukuran elevasi pasang surut dan suhu air diukur secara bersamaan menggunakan *tide gauge* sementara pengukuran kecepatan arus diukur menggunakan *flow meter* (tanpa kompas), *float*er dan kompas penunjuk arah. Pengukuran debit air dilakukan sebanyak tiga kali setiap harinya selama periode 12-21 Juni 2017. Waktu pengukuran disesuaikan dengan siklus pasang surut untuk mendapatkan gambaran yang lebih akurat mengenai variasi debit akibat pengaruh pasang surut.



Gambar 1. (a) Daerah kajian dan letak outlet, inlet dan pengukuran data lapangan. (b) Syarat batas bersarang (*nested grid*) model di Teluk Bontang.

Informasi detail pengamatan dapat dilihat pada penelitian Nur dkk. (2021). **Gambar 1a** memberikan informasi mengenai letak pengukuran data yang dijadikan sebagai verifikasi model serta lokasi dari titik penarikan air dan pembuangan limbah.

2.2. Model hidrodinamika

Hidrodinamika adalah ilmu yang mengkaji gerak fluida (Deltares, 2024; Le Mehaute, 1976). Model hidrodinamika digunakan untuk mensimulasikan arus yang mempengaruhi proses penyebaran air panas. Dalam ilmu hidrodinamika terdapat dua persamaan penting yaitu persamaan kontinuitas dan persamaan momentum. Persamaan kontinuitas dan momentum yang digunakan pada model numerik Delft3D-FLOW adalah persamaan yang dirata-ratakan terhadap kedalaman. Persamaan kontinuitas memiliki perumusan seperti di bawah ini.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial((d + \zeta)U)}{\partial x} + \frac{\partial((d + \zeta)V)}{\partial y} = Q \quad (1)$$

dengan x, y, t adalah koordinat kartesian dan waktu dalam satuan detik, ζ adalah elevasi muka air dalam satuan m, d adalah kedalaman perairan dalam satuan m, U dan V adalah suku yang menjelaskan adanya interaksi inlet dan outlet dalam satuan m/s. Penjabaran dari suku U dan V tertulis seperti di bawah ini.

$$U = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta u \, dz \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta v \, dz \quad (3)$$

sedangkan suku Q memiliki perumusan sebagai berikut.

$$Q = H \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) \, d\sigma \quad (4)$$

suku di ruas kanan menandakan penjumlahan tiap lapisan dari selisih air yang diambil dengan air yang dibuang yang mana berlaku jika model yang digunakan bersifat tiga dimensi. Tetapi dalam penelitian ini model yang digunakan bersifat dua dimensi sehingga peletakan titik *inlet* dan *outlet* berada di satu lapisan saja.

Kemudian persamaan momentum yang digunakan dalam penelitian ini memiliki bentuk dalam arah sumbu x dan sumbu y berturut-turut sebagai berikut.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho(d + \zeta)} + \nu_H \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho(d + \zeta)} + \nu_H \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right] \quad (6)$$

dengan g adalah percepatan gravitasi dalam satuan m/s^2 , adalah densitas air laut dalam satuan kg/m^3 , ν_H adalah koefisien viskositas Eddy horizontal dalam satuan m^2/s , τ_{sx} dan τ_{sy} adalah suku gesekan di lapisan permukaan akibat angin yang mana diabaikan dalam penelitian ini dikarenakan daerah kajian yang kecil, dan suku τ_{bx} dan τ_{by} adalah suku gesekan di lapisan dasar. Gaya Coriolis diabaikan pada penelitian ini dikarenakan Perairan Bontang memiliki kedalaman yang dangkal dengan rata-rata 3 m di bawah permukaan air sehingga gesekan dasar menjadi pengaruh yang dominan dan gaya Coriolis dapat diabaikan (Van Rijn, 2013). Kemudian suku gesekan dasar memiliki penjabaran tersendiri dengan persamaan di bawah ini.

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C_{2D}^2} \quad (7)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C_{2D}^2} \quad (8)$$

dengan suku C_{2D} adalah koefisien gesekan dasar Chézy yang nilainya berubah terhadap kedalaman perairannya (Lyu dan Zhu, 2018). Pendekatan ini relevan untuk Teluk Bontang, mengingat karakteristik geomorfologi dan variasi kedalaman perairan di lokasi penelitian yang memungkinkan koefisien gesek dasar untuk berubah seiring dengan kedalaman. Estimasi nilai C_{2D} sesuai dengan formula sebagai berikut

$$C_{2D} = \frac{H^{1/6}}{n} \quad (9)$$

adapun H adalah kedalaman perairan total dan n adalah koefisien Manning yang bernilai $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ (Zhou dkk., 2021). Nilai n selaras dengan kisaran normal untuk saluran terbuka yang bersih dan lurus, serta nilai tersebut menunjukkan resistensi yang rendah terhadap aliran (Wang dkk., 2023) nilai koefisien Manning diatas juga merupakan tipikal untuk lingkungan muara dengan karakteristik substrat dasar perairan homogen/seragam berupa pasir hingga kerikil (Manning, 1959).

2.3. Model pelacak partikel

Model pelacak partikel (*particle tracking*) adalah sebuah model yang melepas satu atau beberapa partikel di tempat-tempat tertentu di lapisan permukaan air, dan partikel-partikel tersebut akan berpindah posisi tiap waktunya akibat adanya arus yang hadir. Model ini kemudian dapat memetakan jalur dari partikel-partikel tersebut selama proses adveksi berlangsung (Cardenas dkk., 2023). Model pelacak partikel mempunyai persamaan dasar sebagai berikut.

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t U(t)dt \quad (10)$$

$$y(t) = y(t_0) + \int_{t_0}^t V(t)dt \quad (11)$$

dengan $x(t_0)$ dan $y(t_0)$ adalah posisi partikel di waktu sebelumnya dan $x(t)$ dan $y(t)$ adalah posisi partikel di waktu yang baru.

2.4. Model transpor panas

Proses-proses yang terlibat dalam pergerakan panas di air laut adalah proses adveksi, difusi, dan proses pertukaran panas antara air dengan udara. Secara lengkap, persamaan transpor panas yang terjadi di badan air mengikuti persamaan berikut (Liu dkk., 2020; Plawsky, 2020).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{V})T = k \nabla^2 T + \frac{J_{tot}}{\rho_w C_p H} \quad (12)$$

dengan suku pertama di ruas kiri menyatakan perubahan suhu air terhadap waktu di suatu titik dan suku kedua di ruas kanan adalah suku adveksi yang berbicara mengenai kemampuan air dalam membawa panas dari suatu tempat ke tempat lain dengan adalah vektor kecepatan arus yang terdiri dari u dan v . Sementara suku pertama di ruas kiri adalah suku difusi yang berbicara mengenai berkurangnya suhu air akibat terbaginya suhu ke perairan sekitar, dengan k adalah koefisien difusifitas horizontal Eddy, dan suku kedua

di ruas kiri menyatakan pengaruh pertukaran panas antara air dengan udara. Suku ρ_w adalah densitas air laut dalam satuan kg/m^3 , C_p adalah kapasitas panas air laut dalam satuan $\text{J kg}^{-1} \text{K}$, H adalah kedalaman perairan, dan J_{tot} adalah total energi panas hasil pertukaran panas antara air dengan udara. Suku J_{tot} yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan formula yang disebut sebagai model panas selisih suhu atau *excess temperature model* yang memiliki arti bahwa pertukaran panas antara air dengan udara terjadi sebagai akibat dari adanya gradien atau perbedaan suhu antara air dan udara sehingga panas dilepas dari air ke udara atau sebaliknya dan besarnya panas yang ditransfer dari air ke udara diperkuat oleh kecepatan angin yang ada.

Persamaan dari suku pertukaran panas berjalan sebagai berikut (Liu dkk., 2020).

$$J_{tot} = -\lambda_w (T_s - T_{back}) \quad (13)$$

dengan T_s adalah suhu dipermukaan air dalam Celcius, adalah suhu alami air yang tidak dipengaruhi oleh limbah panas dan merupakan nilai tengah suhu harian (mean daily temperature) dalam satuan Celcius, dan λ_w adalah koefisien pertukaran panas yang merupakan fungsi dari suhu di permukaan air dan kecepatan angin di ketinggian 10 m yang ditulis dalam persamaan di bawah ini.

$$\lambda_w = 4,48 + 0,049T_s + f(U_{10}) (1,12 + 0,018T_s + \dots 0,00158T_s^2) \quad (14)$$

dengan $f(U_{10})$ adalah fungsi dari kecepatan angin di ketinggian 10 m dan luas area perairan yang berinteraksi dengan udara. Perumusan $f(U_{10})$ berjalan sebagai berikut.

$$f(U_{10}) = (3,5 + 2,0U_{10}) \left(\frac{5 \times 10^6}{S_{area}} \right)^{0,05} \quad (15)$$

dengan S_{area} adalah area air yang terbuka dengan udara (m^2).

2.5. Desain dan skenario model

Persamaan-persamaan pada model diselesaikan menggunakan metode diskritisasi beda hingga. Metode diskritisasi beda hingga yang digunakan terdapat dua metode yaitu metode *Alternating Direction Implicit* (ADI) digunakan untuk menyelesaikan perhitungan terhadap waktu dan metode yang terdiri dari kombinasi antara beda hingga pusat orde dua dan *upwind* orde tiga digunakan khusus untuk menyelesaikan suku adveksi horizontal.

Ukuran dari model dapat dilihat pada **Gambar 2**. Syarat batas dari model yaitu syarat batas terbuka yang terletak dari koordinat $117,5151^\circ\text{E}$ dan $0,0692^\circ\text{N}$ sampai $117,5151^\circ\text{E}$ dan $0,1164^\circ\text{N}$ dan syarat batas tertutup berupa daratan (**Gambar 1b**). Syarat batas terbuka menggunakan syarat batas bersarang (*nested grid*) dengan domain besar Selat Makassar yang dilakukan oleh Nur dkk. (2021). Adapun terdapat daerah perairan yang ditutup menjadi daratan dengan tujuan untuk menurunkan tingkat kompleksitas model. Model memiliki

grid sebanyak 52 arah barat-timur dan 80 grid arah utara-selatan dengan jarak antar grid sebesar 100 m. Langkah waktu simulasi yang dipakai sebesar 12 detik, yang didapat dari menghitung kestabilan langkah waktu metode ADI untuk mode barotropik yang memiliki geometri kompleks (Deltares, 2024). Simulasi berjalan dari 2 Juni 2017 waktu 00.00 sampai 21 Juni 2017 waktu 23.00 dengan kondisi perairan di awal simulasi adalah diam.

Urutan simulasi yang dijalankan adalah simulasi hidrodinamika, simulasi pelacak partikel, kemudian simulasi model panas. Simulasi hidrodinamika dibagi menjadi dua skenario yaitu Skenario 1 yang berisi gaya pembangkit elevasi muka air dan kecepatan arus di syarat batas terbuka, dan Skenario 2 yang memiliki kondisi seperti Skenario 1 tetapi ditambah pengaruh SSPAL berupa air yang diambil di titik *in3let* dan air yang dibuang di titik *outlet*. Lokasi titik *inlet* dan *outlet* dan pengaturan debit aliran di kedua titik dapat dilihat pada **Tabel 1**. Pengaturan dalam Skenario 2 ini belum memasukkan suhu air yang diambil dan suhu air yang dibuang. Tujuan dari pembagian skenario untuk simulasi hidrodinamika adalah untuk melihat pengaruh SSPAL terhadap pola arus di Perairan Bontang. Kemudian simulasi selanjutnya adalah simulasi pelacak partikel dengan pengaturan sama seperti simulasi hidrodinamika Skenario 2. Sebanyak 7 partikel yang dilepas di lokasi-lokasi tertentu dari tanggal 4 Juni 2017 waktu 00.00 dan pelacak berhenti dijalankan pada akhir waktu simulasi. Lalu terakhir adalah simulasi model panas yang dibagi menjadi dua skenario. Secara pengaturan, simulasi model panas memiliki kondisi yang sama seperti simulasi hidrodinamika Skenario 2 hanya saja sudah mempertimbangkan suhu air yang dibuang dan dimasukkan pengaruh angin. Dimasukkannya pengaruh angin dikarenakan perhitungan model panas membutuhkan parameter kecepatan angin. Adapun suhu awal perairan diatur memiliki nilai 29,23°C di seluruh lokasi dan koefisien difusifitas horizontal Eddy bernilai 25 m²/s. Pembagian skenarionya yaitu Skenario *no flux* dan Skenario *excess temperature*. Skenario *no flux* digunakan untuk menggambarkan kondisi perairan yang mana panas yang dilepas dari air ke udara bernilai kecil sekali sehingga dapat dikatakan tidak terjadi pelepasan panas sama sekali, sementara Skenario *excess temperature* digunakan untuk melihat kondisi perairan yang mendekati kondisi nyata yaitu terjadinya pelepasan panas dari air ke udara atau sebaliknya secara terus menerus.

2.6. Perhitungan luas sebaran limbah panas

Sesudah simulasi model panas dijalankan, dilakukan perhitungan luasan sebaran suhu air limbah menggunakan Teorema Green sebagai berikut

Tabel 1. Pengaturan outlet dan inlet pada model

Titik	Pengaturan		
	Nilai debit (m ³ /s)	Suhu (°C)	Waktu aktif
Inlet	-4,1	30	4 Juni 2017 00.00 – 21 Juni 2017 23.00 (GMT+7)
Outlet	24,6	40	4 Juni 2017 00.00 – 21 Juni 2017 23.00 (GMT+7)

$$\oint P dx + Q dy = \iint \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy \quad (16)$$

Persamaan 16 digunakan untuk menghitung luas sebaran limbah air panas yang diapit oleh dua garis kontur suhu, dengan adalah kontur pertama dan adalah kontur kedua. Penjabaran untuk menghitung area tersebut ditulis dalam Persamaan 17 (Li dkk., 2022).

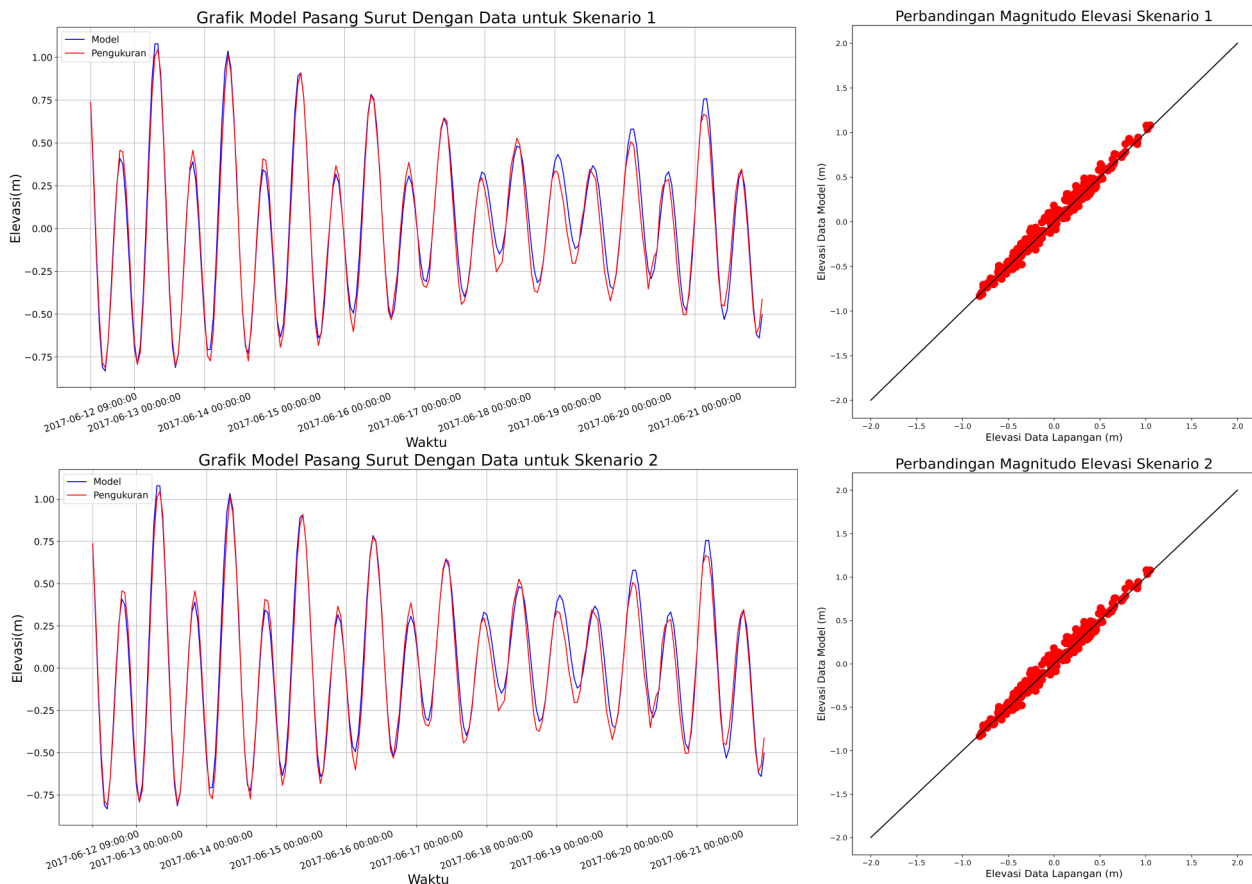
$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} [(x_i)(y_{i+1}) - (x_{i+1})(y_i)] \quad (17)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Verifikasi model

Hasil verifikasi elevasi pasang surut dari Skenario 1 dan Skenario 2 masing-masing dibuat menjadi grafik perbandingan antara elevasi muka air model dengan data pengukuran serta grafik sebaran dengan sumbu horizontal adalah magnitudo elevasi muka air data pengukuran dan sumbu vertikal adalah magnitudo elevasi muka air model. Gambar-gambar verifikasi elevasi pasang surut dimuat dalam **Gambar 2**. Hasil kedua skenario tidak memiliki perbedaan yang signifikan dan kedua skenario memiliki nilai *RMSE* (*Root Mean Square Error*) yang sama yaitu sebesar 0,07 m atau dapat dikatakan bahwa model memiliki kesalahan sebesar 3,5%, terhadap tunggang pasut, dalam menghasilkan elevasi muka air yang sesungguhnya. Dari kedua skenario ini, dapat disimpulkan bahwa adanya interaksi dari SSPAL tidak mengubah pola dan magnitudo pasang surut di Perairan Bontang meskipun jarak antara titik *outlet* dengan lokasi pengukuran pasang surut berjarak 701 m.

Adanya interaksi SSPAL di Perairan Bontang juga tidak mengubah nilai kecepatan arus di Perairan Bontang secara signifikan sehingga pada penelitian ini hanya ditampilkan verifikasi dari Skenario 1 saja. Verifikasi arus model dibuat menjadi grafik batang yang membandingkan magnitudo kecepatan arus model dengan pengukuran dan grafik sebaran dengan sumbu horizontal adalah magnitudo kecepatan data lapangan dan sumbu vertikal adalah magnitudo kecepatan model. Gambar-gambar hasil verifikasi arus ini dimuat dalam **Gambar 3**. Model sudah dapat menghasilkan kecepatan dalam orde yang sama dengan data pengukuran seperti yang terlihat pada verifikasi Stasiun 1. Verifikasi untuk Stasiun 2 masih didominasi oleh data pengukuran, dikarenakan lokasi Stasiun 2 berada di daerah yang sempit. Lokasi yang terisolasi ini membuat arus yang masuk ke titik Stasiun 2 sedikit. Secara kuantifikasi *RMSE* untuk Stasiun 1 dan Stasiun 2 berturut-turut adalah 0,119 m/s dan 0,126 m/s. Dapat dikatakan bahwa model memiliki prosentase galat sebesar 23,84% (Stasiun 1) dan 39,39% (Stasiun 2), apabila dibandingkan terhadap kecepatan arus maksimum. Perbedaan antara kecepatan aliran hasil pemodelan dan pengukuran cukup signifikan, terutama pada Stasiun 1 dan 2. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti ketidakpastian dalam data masukan, keterbatasan model Delft3D, dan

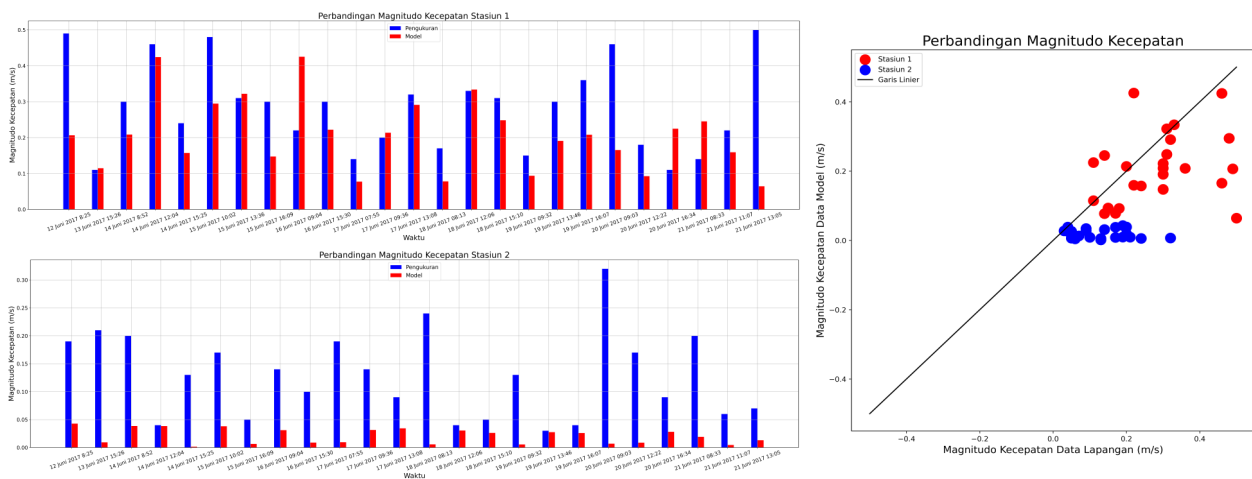


Gambar 2. Verifikasi elevasi pasang surut

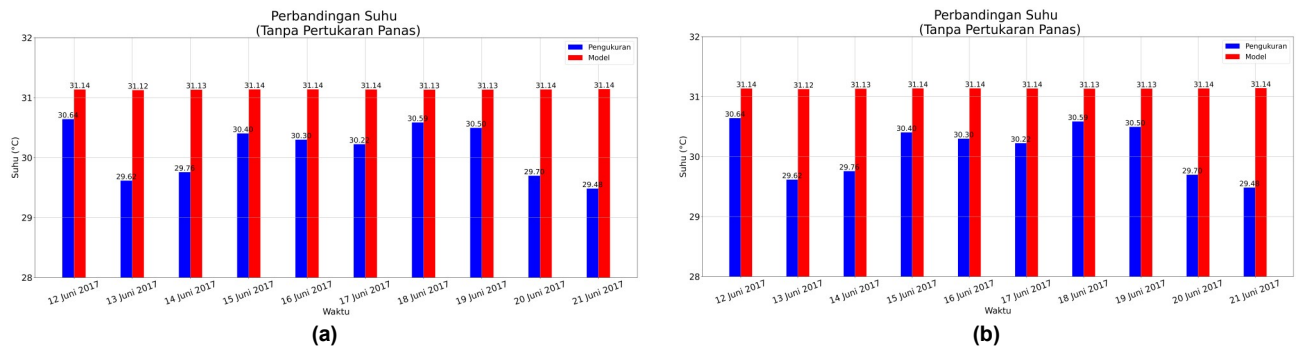
kompleksitas kondisi lapangan. Dengan memperhatikan suku adveksi pada Persamaan (12), ukuran rentang grid sebesar 100 m, dan, langkah waktu iterasi sebesar 12 detik, maka galat kecepatan sebesar 0,126 m/s atau 39,39% dapat menimbulkan galat maksimum estimasi perpindahan panas sebesar 0,6 0 Celcius atau setara prosentase 1,5% untuk suhu air sebesar 40°C.

Verifikasi dari model panas skenario *no flux* dan model panas *excess temperature*, disajikan dalam bentuk diagram batang perbandingan suhu rata-rata tiap hari

dari tanggal 12 Juni 2017 sampai 21 Juni 2017. Tujuan pembuatan suhu rata-rata adalah untuk menghilangkan variasi harian atau variasi siang dan malam. Gambar yang memuat verifikasi suhu tercantum dalam **Gambar 4**. Kedua model panas memiliki suhu rata-rata harian yang lebih tinggi dari pengukuran dengan model panas *no flux* (**Gambar 4a**) lebih tinggi dibandingkan model panas *excess temperature* (**Gambar 4b**). Penyebab perbedaan hasil model panas *no flux* dengan pengukuran yaitu pada model, pembuangan diasumsikan dilakukan secara terus menerus dan tidak ada panas yang keluar dari air.



Gambar 3. Verifikasi kecepatan arus



Gambar 4. Perbandingan suhu rata-rata harian untuk model (a) no flux dan (b) excess temperature

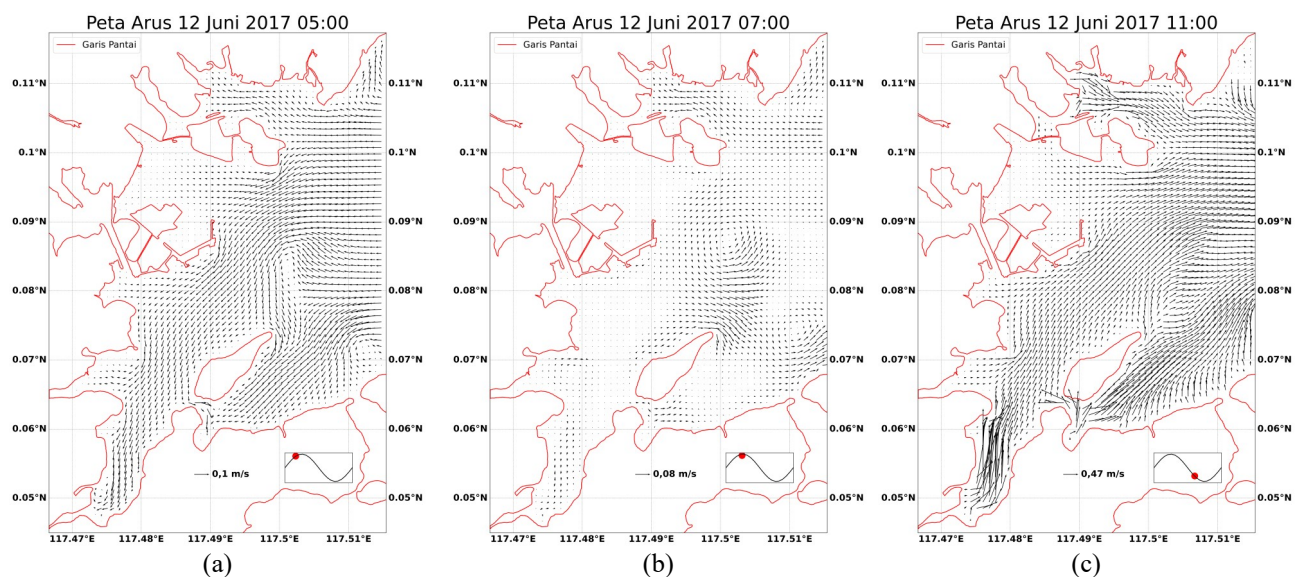
Sementara hasil model panas *excess temperature* masih memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pengukuran. Hal ini dikarenakan model *excess temperature* menggunakan asumsi bahwa penyerapan panas oleh air laut dari udara pada siang hari dan pelepasannya pada malam hari dalam kondisi setimbang dan dilibatkan di dalam perhitungan sebagai suhu latar belakang. Pemilihan suhu latar belakang didalam kajian ini didasarkan pada nilai tengah data pengukuran suhu air selama 15 hari, sementara kondisi ideal untuk simulasi mengharuskan data suhu latar belakang sebaiknya didasarkan data suhu klimatologis (selama minimal 30 tahun) dan belum terpengaruh limbah air panas. Sementara itu model panas *no flux* memiliki *RMSE* 1,09°C atau dikatakan memiliki galat sebesar 3,57% terhadap suhu tertinggi dari pengukuran sementara model panas *excess temperature* memiliki *RMSE* 0,83°C atau memiliki galat sebesar 2,72% terhadap suhu tertinggi pada pengukuran.

3.2. Hidrodinamika di perairan Bontang

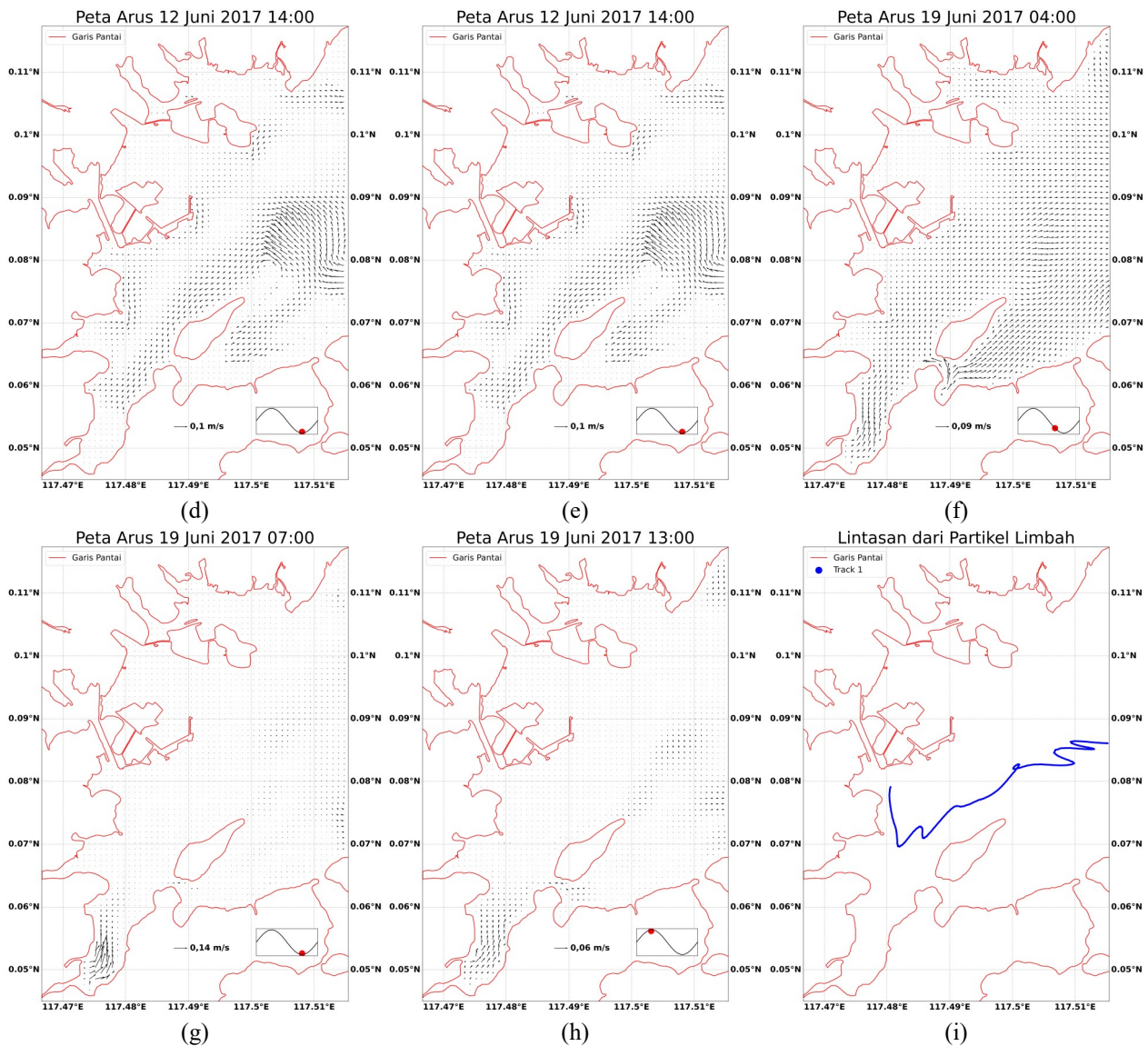
Pola arus yang diambil saat fase purnama dan perbani, dengan masing-masing fase diambil waktu menuju pasang, menuju surut, saat pasang tertinggi dan saat surut terendah untuk Skenario 1 ditunjukkan pada Gambar 5.

Hasil simulasi menunjukkan, pola arus saat pasang dominan bergerak ke arah barat daya. Saat pasang air bergerak masuk ke dalam perairan yang ditunjukkan dengan adanya arus datang dari sisi timur model, dan kemudian saat bergerak ke barat, arus terbagi menjadi dua arah yaitu ke arah barat laut, mengarah ke Pantai Berbas dan ke arah barat daya, menuju Teluk Kadere dan Pantai Sekangat, dikarenakan adanya Pulau Marina PT. Badak NGL. Arus bergerak lebih banyak ke arah barat daya dikarenakan di saat arus yang terpecah ke arah barat daya akibat Pulau Marina turut serta mengarahkan arus lainnya ke arah barat daya, sehingga membentuk arus yang dominan. Sementara saat surut, arus bergerak keluar dari perairan, yang mana arus dominan bergerak ke arah timur laut yang kemudian berbelok ke arah timur sehingga keluar dari perairan. Pola arus di fase purnama dan perbani mempunyai pola gerak yang sama yaitu, saat pasang arus dominan bergerak ke arah barat daya dan saat surut arus dominan bergerak ke arah timur laut.

Kecepatan arus saat fase purnama (Gambar 5a-d) lebih besar ketimbang saat fase perbani (Gambar 5e-h), dengan kondisi saat surut lebih besar dibandingkan saat pasang. Dari hasil simulasi, pada fase purnama kecepatan maksimum saat surut mencapai 0,47 m/s dan



Gambar 5. Pola arus saat (a) menuju pasang, (b) puncak pasang, (c) menuju surut, dan (d) puncak surut kondisi purnama untuk skenario 1. Pola arus saat (e) menuju pasang, (f) puncak pasang, (g) menuju surut, dan (h) puncak surut kondisi perbani untuk skenario 1. (i) Hasil simulasi particle tracking dari limbah air panas.



Gambar 5. Pola arus saat (a) menuju pasang, (b) puncak pasang, (c) menuju surut, dan (d) puncak surut kondisi purnama untuk skenario 1. Pola arus saat (e) menuju pasang, (f) puncak pasang, (g) menuju surut, dan (h) puncak surut kondisi perbani untuk skenario 1. (i) Hasil simulasi particle tracking dari limbah air panas. (lanjutan)

saat pasang 0,1 m/s untuk Skenario 1, sedangkan Skenario 2 (gambar tidak ditampilkan) di fase purnama kecepatan maksimum saat surut bernilai 0,26 m/s dan saat pasang mencapai 0,11 m/s. Di fase perbani, Skenario 1 menghasilkan kecepatan arus maksimum saat surut sebesar 0,09 m/s sedangkan saat pasang sebesar 0,05 m/s sementara Skenario 2 menghasilkan kecepatan arus maksimum saat surut sebesar 0,07 m/s sedangkan saat pasang sebesar 0,05 m/s. Adapun kecepatan terbesar terletak di bagian barat daya dari daerah kajian. Sementara kecepatan rata-rata untuk seluruh perairan, Skenario 1 menghasilkan 0,06 m/s saat surut dan 0,04 m/s saat pasang dalam kondisi purnama sedangkan Skenario 2 menghasilkan 0,05 m/s saat surut dan 0,04 m/s saat pasang dengan kondisi purnama. Saat perbani, Skenario 1 memiliki kecepatan arus rata-rata sebesar 0,02 m/s saat surut dan 0,017 m/s saat pasang sedangkan Skenario 2 memiliki kecepatan rata-rata sebesar 0,02 m/s saat surut dan 0,016 m/s saat pasang. Kecepatan saat pasang tertinggi dan surut

terendah, besar kecepatan maksimumnya dapat dikatakan lebih kecil dari saat menuju pasang atau saat menuju surut. Hal ini dikarenakan kondisi elevasi muka air ada pada kondisi diam, yang mana sedang berada di waktu elevasi tertinggi atau elevasi terendah, sehingga perbedaan muka air yang terbentuk antar lokasinya bernilai kecil. Oleh karena itu, besar kecepatan yang terbentuk juga ikut bernilai kecil.

Dari kedua skenario model, dapat dikatakan bahwa SSPAL yang beroperasi dapat mempengaruhi besar kecepatan maksimum dari suatu perairan. Terlihat bahwa hasil dari Skenario 2 memberikan kecepatan maksimum yang lebih kecil dibandingkan Skenario 1. Penyebabnya adalah aliran dari SSPAL memberikan arus yang berlawanan arah dari arah arus dominan sehingga kecepatan maksimum mengalami pengurangan. Tetapi dari besar kecepatan arus rata-rata, SSPAL tidak memberikan pengaruh yang

signifikan yang dilihat dari kecilnya perbedaan kecepatan arus rata-rata antara kedua skenario.

Kecepatan arus yang terbentuk memberikan dampak terhadap gerak parsel limbah atau kemampuan berpindahnya suatu benda dari suatu tempat ke tempat lainnya. Berdasarkan pembahasan sebelumnya, Perairan Bontang memiliki kondisi arus saat surut yang lebih besar dibandingkan saat pasang dengan perbandingan nilainya yaitu 0,26 m/s dengan 0,11 m/s saat purnama dan 0,07 m/s dengan 0,05 m/s saat perbani. Artinya jika terdapat zat pencemar yang hadir di perairan ini, maka seharusnya zat pencemar tersebut dapat keluar dari perairan ini. Dari hasil simulasi model *particle tracking* yang ditunjukkan oleh **Gambar 5i**, didapat bahwa partikel limbah air panas yang dibuang dapat keluar dari perairan dengan waktu yang dibutuhkan oleh partikel untuk keluar dari perairan dari awal pembuangan limbah adalah 3 hari 12 jam 12 menit. Maka dari hasil ini dapat dikatakan bahwa Perairan Bontang dapat mengeluarkan zat pencemar yang ada perairannya. Kemudian untuk melihat kaitan kondisi hidrodinamika dengan limbah air panas dari SSPAL akan dibahas di bagian berikutnya.

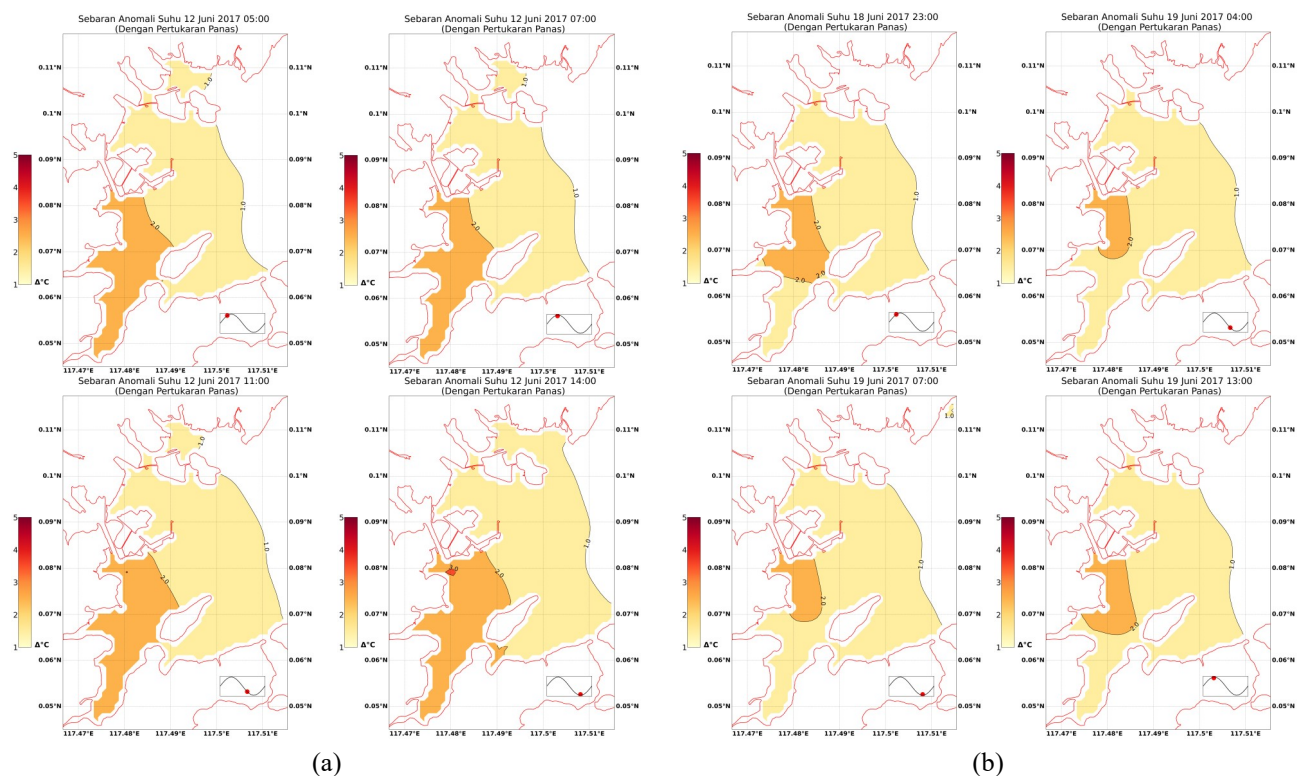
3.3. Sebaran limbah air panas

Suhu buangan yang dikeluarkan sebesar 40°C yang dimulai dari tanggal 4 Juni 2017 waktu 00.00, dari total simulasi 2 Juni 2017 waktu 00.00 sampai 21 Juni 2017 waktu 23.00. Setelah simulasi selesai dijalankan, diambil gambar sebaran limbah air panas berdasarkan kondisi purnama dan perbani dengan pengambilan waktunya sama seperti pengambilan waktu untuk penggambaran

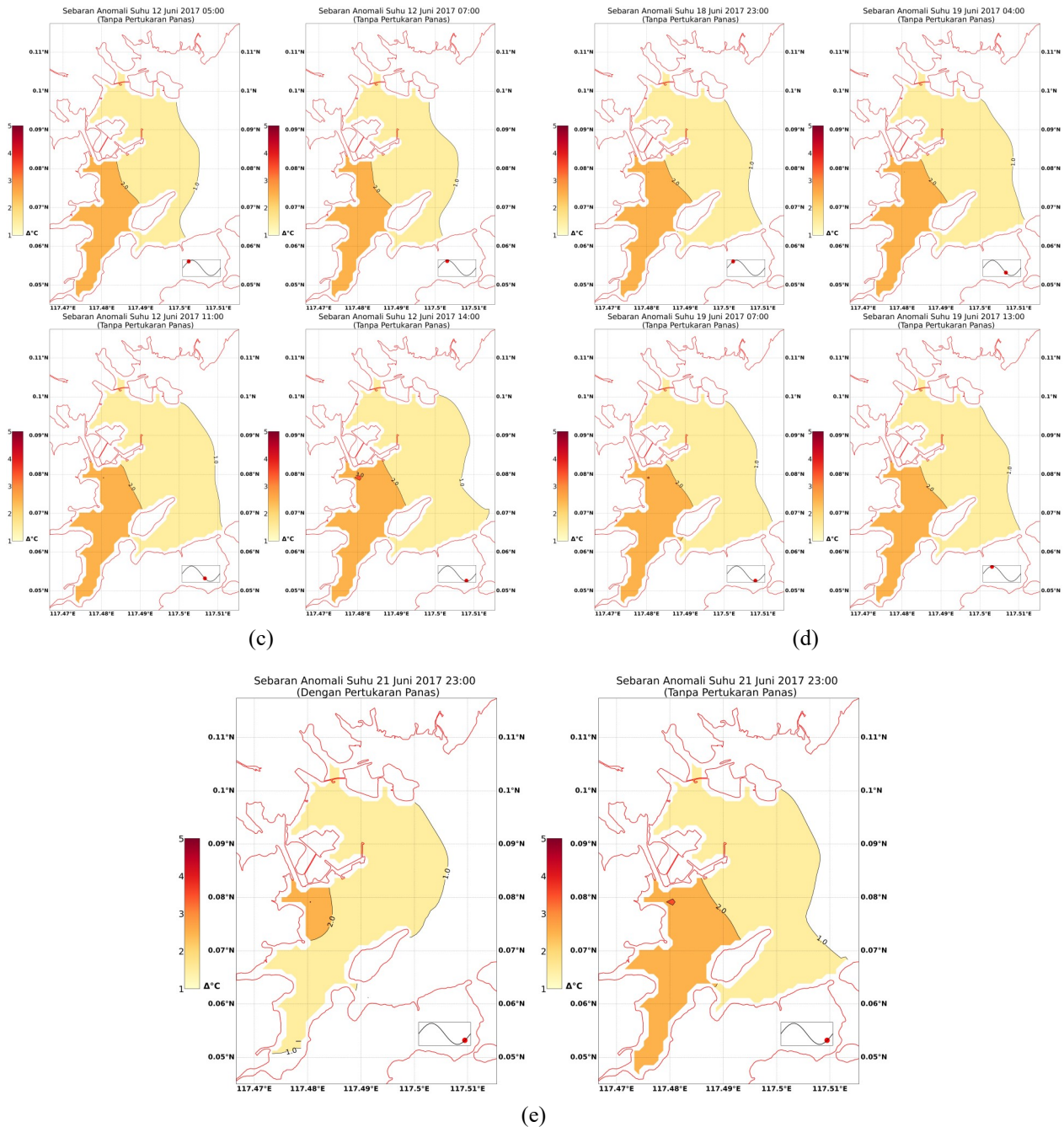
pola arus horizontal. Kemudian nilai dari hasil simulasi dikurangi dengan suhu awal yang diatur pada model yaitu sebesar 29,23°C, sehingga hasil yang ditunjukkan merupakan anomali suhu atau nilai yang di atas dari suhu awal. Kemudian pembuatan kontur anomali suhu didasarkan pada hasil studi literatur mengenai dampak perubahan suhu terhadap biota laut (Hutagalung, 1988; Lutuconsina, 2010; Yao and Somero, 2014), sehingga anomali suhu yang tergambar hanya untuk kontur anomali dengan selisih 1, 2, 3, 4, dan 5°C lebih tinggi dari suhu awal perairan.

Gambar 6a merupakan kondisi sebaran saat fase purnama untuk model yang tidak terdapat pertukaran panas sedangkan **Gambar 6b** menggambarkan kondisi sebaran saat fase perbani dari model yang sama. Lalu **Gambar 6c** dan **Gambar 6d** merupakan kondisi saat purnama dan perbani untuk model *excess temperature*. **Gambar 6e** adalah perbandingan gambar sebaran limbah air panas di akhir waktu simulasi antara model *excess temperature* dengan model yang tidak terdapat pertukaran panas.

Pola sebaran limbah air panas dipengaruhi oleh besar dan arah dari kecepatan arus yang hadir di perairan tersebut. Saat kondisi pasang fase purnama, kontur suhu yang terbentuk terlihat terdorong ke arah barat daya, atau dapat dikatakan terdorong masuk ke dalam perairan, sedangkan saat surut fase purnama, kontur suhu yang terbentuk terlihat semakin meluas atau bergerak ke sisi timur laut. Baik hasil model *excess temperature* maupun model panas yang tidak terdapat pertukaran panas, memiliki pola yang sama. Hal ini



Gambar 6. Sebaran limbah air panas pada kondisi (a) purnama dan (b) perbani untuk kondisi tidak terdapat pertukaran panas. Sebaran limbah air panas pada kondisi (c) purnama dan (d) perbani untuk kondisi terdapat pertukaran panas. Perbandingan sebaran limbah air panas di akhir waktu simulasi untuk kondisi terdapat dan tidak terdapat pertukaran panas.



Gambar 6. Sebaran limbah air panas pada kondisi (a) purnama dan (b) perbani untuk kondisi tidak terdapat pertukaran panas. Sebaran limbah air panas pada kondisi (c) purnama dan (d) perbani untuk kondisi terdapat pertukaran panas. Perbandingan sebaran limbah air panas di akhir waktu simulasi untuk kondisi terdapat dan tidak terdapat pertukaran panas. (lanjutan)

dikarenakan kecepatan arus saat purnama yang besar sehingga proses adveksi terjadi lebih kuat dan menyebabkan proses pertukaran panas dengan udara dari model *excess temperature* kurang terlihat. Jika dibandingkan dengan kondisi perbani, terdapat perbedaan antara hasil model *excess temperature* dengan model yang tidak terdapat pertukaran panas. Model yang tidak terdapat pertukaran panas, memiliki pola sebaran yang terbentuk cenderung tetap untuk semua kontur anomali. Hal ini terlihat dari **Gambar 6a** dengan kondisi model panas tidak terdapat pertukaran dengan udara. Sedangkan pola sebaran limbah dari model *excess temperature*, yaitu **Gambar 6d**, kontur

anomali 1°C terlihat tidak berbeda sedangkan kontur anomali 2°C terlihat masih mengikuti pengaruh pasang dan surut. Kontur anomali 2°C terlihat terdorong ke barat daya di saat pasang dan di saat surut terlihat lebih mengecil. Penyebab kontur anomali tidak berubah di kondisi perbani ini dikarenakan kondisi kecepatan arus yang lemah sehingga proses adveksi berjalan lebih lemah dibandingkan saat purnama, hal ini ditunjukkan pada kondisi model panas yang tidak terdapat pertukaran panas dengan udara. Sedangkan untuk model *excess temperature*, kondisi perbani juga memberikan pengaruh yang sama yaitu lemahnya proses adveksi tetapi dikarenakan terdapat pertukaran

Tabel 2. Perhitungan luas untuk model panas tanpa dan dengan pertukaran panas

Kontur anomali suhu	Luas sebaran limbah air panas tanpa pertukaran panas dengan udara (km ²)							
	Fase purnama				Fase perbani			
	Menuju pasang	Puncak pasang	Menuju surut	Puncak surut	Menuju pasang	Menuju surut	Puncak surut	Puncak pasang
5°C	-	-	-	-	-	-	-	-
4°C	-	-	-	-	-	-	-	-
3°C	-	-	-	0,02	-	-	-	-
2°C	6,49	6,23	6,74	7,26	6,95	6,96	7,20	6,87
1°C	16,54	16,89	19,61	19,32	18,34	19,06	19,25	18,59
Kontur anomali suhu	Luas sebaran limbah air panas dengan pertukaran panas dengan udara (km ²)							
	Fase purnama				Fase perbani			
	Menuju pasang	Puncak pasang	Menuju surut	Puncak surut	Menuju pasang	Menuju surut	Puncak surut	Puncak pasang
5°C	-	-	-	-	-	-	-	-
4°C	-	-	-	-	-	-	-	-
3°C	-	-	-	0,03	-	-	-	-
2°C	6,95	6,69	7,73	9,56	3,59	2,62	2,75	3,12
1°C	20,01	19,94	21,40	20,88	21,43	23,11	23,59	21,98

panas dengan udara maka hal ini yang membuat kontur anomali suhu 2°C berubah tergantung kondisi pasang surutnya serta secara visual memiliki luasan yang lebih kecil dibandingkan kontur anomali 2°C di model panas yang tidak terdapat pertukaran panas dengan udara. Pertukaran panas dengan udara dipengaruhi oleh besarnya kecepatan angin serta besar selisih antara suhu di permukaan air dengan suhu di udara atau dalam hal ini adalah suhu latar belakang. Pada kondisi perbani ini, anomali suhu 2°C memiliki nilai selisih suhu yang lebih besar dibandingkan anomali 1°C sehingga panas lebih banyak dilepas ke udara di daerah kontur anomali 2°C dibandingkan di area anomali 1°C. Dan diperkuat oleh kecepatan angin maka suhu yang dilepas akan lebih banyak, sehingga secara visual kontur anomali 2°C lebih kecil dibandingkan anomali 1°C. Hal ini yang menyebabkan kontur anomali 1°C secara visual terlihat tetap luas dari model *excess temperature*.

Estimasi luas permukaan kontur dihitung untuk kondisi model tanpa dan dengan pertukaran udara (Tabel 2). Kontur anomali suhu senilai 1°C memiliki daerah yang paling luas, diikuti dengan luas kontur anomali suhu 2°C, sementara anomali suhu 3°C hanya terbentuk di beberapa waktu saja dan anomali suhu 4°C dan 5°C tidak terbentuk sama sekali. Luasan anomali baik untuk suhu 1°C maupun 2°C dikatakan bertambah luas di saat surut dan berkurang di saat pasang kecuali untuk kontur anomali 2°C kondisi perbani dari hasil model panas *excess temperature*. Hal ini sesuai dengan gambaran visual dari Gambar 6c & 6d serta pembahasan sebelumnya. Di saat pasang kontur anomali 2°C bergerak ke barat daya dan terlihat lebih besar dibandingkan di saat surut yang bergerak ke timur laut sehingga terlihat lebih kecil. Secara umum, penyebab luasan lebih luas saat surut dan lebih kecil saat pasang adalah karena saat surut kecepatan arus maksimal mencapai 0,26 m/s dengan rata-rata 0,056 m/s sedangkan saat pasang mencapai 0,11 m/s dengan rata-rata 0,04 m/s untuk kondisi purnama. Sedangkan untuk kondisi perbani, kecepatan arus yang terbentuk lebih lemah dengan kecepatan maksimum mencapai 0,07 m/s dan rata-rata 0,02 m/s saat surut dan saat pasang kecepatan maksimum mencapai 0,05 m/s dan rata-rata 0,016 m/s. Besarnya

kecepatan saat surut bertanggung jawab dalam membuat luasan anomali suhu lebih besar dibandingkan saat purnama. Tetapi berbeda untuk kondisi perbani di hasil model panas *excess temperature*, dikarenakan kecepatan arus yang lebih lemah, membuat faktor pertukaran panas dengan udara menjadi lebih dominan. Hal ini menjelaskan di kondisi perbani yang luasan kontur anomali suhu 2°C lebih kecil dibandingkan kondisi perbani. Pada hasil untuk kondisi purnama untuk model panas *excess temperature*, pengaruh pengurangan suhu akibat pertukaran panas dengan udara kurang terlihat dikarenakan kuatnya proses adveksi akibat kecepatan arus sehingga luasan yang terbentuk memiliki nilai yang luas seperti hasil pada model panas yang tidak terdapat pertukaran panas dengan udara. Meskipun kondisi perbani dari model *excess temperature* berbeda, karena faktor yang telah disebutkan sebelumnya, secara umum hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Kasman, dkk. (2010) yaitu terjadinya peluasan limbah air panas di saat surut.

Dari model panas yang sudah dilakukan, dikaitkan dengan kemampuan Perairan Bontang dalam menyirkulasikan zat pencemar, Perairan Bontang memiliki kemampuan yang kurang baik jika model panas yang dipakai adalah model panas yang tidak terdapat pertukaran udara. Hal ini dikarenakan panas yang ada di dalam air terjebak. Kemudian limbah air panas juga terlihat tertumpuk di daerah barat daya dari daerah kajian yang disebabkan akibat gerak arus pasang

Tabel 3. Perbandingan hasil perhitungan kedua model panas di waktu akhir simulasi

Kontur anomali suhu	Luas sebaran limbah air panas (km ²)	
	Tanpa pertukaran panas	Dengan pertukaran panas
5°C	-	-
4°C	-	-
3°C	0,01	-
2°C	7,50	2,11
1°C	18,81	14,29

surut yang mana arus saat pasang memiliki gerak ke arah barat daya. Tetapi jika dilihat dari model panas *excess temperature*, Perairan Bontang dikatakan memiliki sirkulasi yang lebih baik dibandingkan model tanpa pertukaran panas karena luasan limbah yang lebih kecil serta berdasarkan visualisasinya, kontur anomali suhu 2°C terlihat cenderung tertahan di daerah tempat outlet berada. Dapat dikatakan bahwa Perairan Bontang dapat menahan sebaran panas yang lebih tinggi tetap di sekitar sumber dan dapat mendistribusikan panasnya ke perairan sekitar dengan cepat. Jadi, model panas yang tidak terdapat pertukaran panas, atau yang disebut sebagai model no flux, adalah gambaran kondisi terburuk untuk suatu perairan dengan dampak buruk bagi lingkungan yang besar juga sementara model *excess temperature* adalah gambaran kondisi yang lebih mendekati kondisi nyatanya dengan interaksi udara-air yang dapat mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan.

4. Kesimpulan

Kajian dispersi limbah panas (bahang) di perairan Teluk Bontang telah dilaksanakan dengan menggunakan model hidrodinamika dan model transpor panas dalam dua dimensi. Berdasarkan hasil kajian dapat dijabarkan empat kesimpulan utama, yang meliputi:

1. Verifikasi hasil model numerik dengan data observasi mengindikasikan bahwa model dapat menyimulasikan kondisi hidrodinamika di perairan Teluk Bontang dengan nilai akar galat rata-rata (*root mean square error / RMSE*) hasil simulasi elevasi muka air terhadap data pengukuran sebesar 0,07 m atau 7 cm pada kondisi pasang surut perbani dengan tunggang pasang surut (*tidal range*) berkisar 1,25 m sampai dengan 2,5 m, sedangkan simulasi arus menghasilkan galat yang bernilai 0,119 m/s dan 0,126 m/s pada stasiun pengukuran-1 dan 2 secara berturut-turut. Galat pemodelan hidrodinamika ini diperkirakan mempengaruhi perhitungan dispersi panas pada kisaran 1- 3%.
2. Hasil simulasi hidrodinamika juga menunjukkan bahwa kecepatan arus di daerah kajian dapat mencapai 0,26 m/s pada kondisi purnama dan melemah hingga 0,07 m/s pada kondisi perbani. Kecepatan arus pada saat surut lebih besar jika dibandingkan dengan kecepatan arus saat pasang, sehingga hal ini mengindikasikan adanya kemampuan membilas atau mengeluarkan limbah panas keluar dari perairan teluk yang dikaji.
3. Uji kemampuan bilas yang dilaksanakan dengan menjalankan (*running*) model trayektori (*particle tracking*) pada perairan yang dikaji telah menghasilkan pemahaman bahwa pola sirkulasi di Perairan Teluk Bontang dapat mengeluarkan parsel limbah air panas dari perairan kajian dalam rentang waktu 3 hari 12 jam dan 12 menit. Nilai ini juga menggambarkan waktu tinggal (*residence time*) dari parsel limbah panas di perairan Teluk Bontang yang dikaji.
4. Hasil pemodelan transport panas menunjukkan bahwa area sebaran limbah panas lebih luas pada saat surut dibandingkan pada saat pasang. Adanya SSPAL di perairan Teluk Bontang telah meningkatkan suhu perairan sebesar 1°C dengan cakupan area perairan sebesar 14,29 km², sedangkan proses pelepasan panas ke udara dapat mempersempit area perairan dengan peningkatan suhu 1°C menjadi 18,81 km².

Daftar Pustaka

- Audzijonyte, A., Richards, S.A., Stuart-Smith, R.D., Pecl, G., Edgar, G.J., Barrett, N.S., Payne, N., Blanchard, J.L., 2020, *Fish body sizes change with temperature but not all species shrink with warming*, Nature Ecology & Evolution, Vol. 4, No. 6, 809–814. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1171-0>
- Brough, D., Jouhara, H., 2020, *The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery*, International Journal of Thermofluids 1–2, 100007. <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2019.100007>
- Cardenas, S., Márquez, A., Guevara, E., 2023, *Diffusion–advection process modeling of organochlorine pesticides in rivers*, Journal of Applied Water Engineering and Research, Vol. 11, 1–22. <https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1982029>
- Chandra, Y.P., Matuska, T., 2019, *Stratification analysis of domestic hot water storage tanks: A comprehensive review*, Energy Build, Vol. 187, 110–131. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.01.052>
- Deltares, 2024, *3D/2D Modelling suite for integral water solutions User Manual*, The Netherlands.
- Fordyce, A.J., Camp, E.F., Ainsworth, T.D., 2017, *Polyp bailout in Pocillopora damicornis following thermal stress*, F1000Res 6. <https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.11522.2>
- Han, T., Qi, Z., Shi, R., Liu, Q., Dai, M., Huang, H., 2022, *Effects of Seawater Temperature and Salinity on Physiological Performances of Swimming Shelled Pteropod Creseis acicula During a Bloom Period*, Front Mar Sci 9, 806848. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2022.06848/BIBTEX>
- Hughes, D.J., Alderdice, R., Cooney, C., Köhl, M., Pernice, M., Voolstra, C.R., Suggett, D.J., 2020, *Coral reef survival under accelerating ocean deoxygenation*, Nature Climate Change, Vol. 10, No. 4, 296–307. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0737-9>
- Hutagalung, H.P., 1988, *Pengaruh suhu air terhadap kehidupan organisme laut*, Jurnal Oseana, Vol. 13, 153–164.

- Jay, O., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., de Dear, R., Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R.S., Ma, W., Malik, A., Morris, N.B., Nybo, L., Seneviratne, S.I., Vanos, J., Ebi, K.L., 2021, *Reducing the health effects of hot weather and heat extremes: from personal cooling strategies to green cities*, The Lancet, Vol. 398, 709–724. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01209-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01209-5)
- Kasman Kasman, I Wayan Nurjaya, Ario Damar, Ismudi Muchsin, Zaenal Arifin, 2012, *Prediksi Sebaran Suhu dari Air Buangan Sistem Air Pendingin PT. Badak NGL di Perairan Bontang Menggunakan Model Numerik*, Ilmu Kelautan, Vol. 15, 194–201. <https://doi.org/10.14710/IK.IJMS.15.4.194-201>
- Latuconsina, H., 2010, Dampak pemanasan global terhadap ekosistem pesisir dan lautan, Agrikan: Jurnal Agribisnis Perikanan, Vol. 3, 30–37. <https://doi.org/10.29239/J.AGRIKAN.3.1.30-37>
- Le Mehaute, B., 1976, *Similitude in coastal engineering*, ASCE J Waterw Harbors Coastal Eng Div, Vol. 102, 317–335. <https://doi.org/10.1061/AWHCAR.0000332>
- Li, S., Zheng, J., Gao, L., Zhao, Z., 2022, *Application of deghosting method based on Green's theorem in reservoir description of Bohai Bay*, SEG Technical Program, 2932–2936. <https://doi.org/10.1190/IMAGE2022-3751647.1>
- Liu, W., Hou, Q., Lian, J., Zhang, A., Dang, J., 2020, *Coastal pollutant transport modeling using smoothed particle hydrodynamics with diffusive flux*, Adv Water Resour, Vol. 146, 103764. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2020.103764>
- Lyu, H., Zhu, J., 2018, *Impact of the bottom drag coefficient on saltwater intrusion in the extremely shallow estuary*, Journal of Hydrology, Vol. 557, 838–850.
- Manasrah, A.M., Aldomi, A., Gupta, B.B., 2019, *An optimized service broker routing policy based on differential evolution algorithm in fog/cloud environment*, Cluster Comput, Vol. 22, 1639–1653. <https://doi.org/10.1007/S10586-017-1559-Z/TABLES/21>
- Manning, J. R., 1959, *Correlation effects in impurity diffusion*, Physical Review, Vol. 116 No.4, 819.
- Martin, J.L., McCutcheon, S.C., Schottman, R.W., 2018, *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling. <https://doi.org/10.1201/9780203751510>
- Mazyan, W., Ahmadi, A., Ahmed, H., Hoorfar, M., 2016, *Market and technology assessment of natural gas processing: A review*, J Nat Gas Sci Eng, Vol. 30, 487–514. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2016.02.010>
- Miller, K.A., Thompson, K.F., Johnston, P., Santillo, D., 2018, *An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps*, Front Mar Sci, Vol. 4, 312755. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2017.00418/BIBTEX>
- Nagpal, H., Spriet, J., Murali, M.K., McNabola, A., 2021, *Heat Recovery from Wastewater—A Review of Available Resource*, Water, Vol. 13, 1274. <https://doi.org/10.3390/W13091274>
- Nur, A.A., Suprijo, T., Mandang, I., Radjawane, I.M., Park, H., Khadami, F., 2021, *Ocean Modeling in the Makassar Strait and Balikpapan Bay Using Online Nesting Method*, J Coast Res, Vol. 114, 206–210. <https://doi.org/10.2112/JCR-SI114-042.1>
- Plawsky, J.L., 2020, *Transport phenomena fundamentals*, CRC press.
- Ramachandran, R.P., Akbarzadeh, M., Paliwal, J., Cenkowski, S., 2017, *Computational Fluid Dynamics in Drying Process Modelling—a Technical Review*, Food and Bioprocess Technology, Vol. 11, No. 2, 271–292. <https://doi.org/10.1007/S11947-017-2040-Y>
- Van Rijn, J., 2013, *Waste treatment in recirculating aquaculture systems*, Aquac Eng, Vol. 53, 49–56. <https://doi.org/10.1016/J.AQUAENG.2012.11.010>
- Wang, D., Jiang, J., Wei, Z., Cheng, J., Zhang, J., 2023, *Estimation of the Manning's n coefficient in multi-constituent tidal models by assimilating satellite observations with the adjoint data assimilation*, Frontiers in Marine Science, Vol. 10, 1151951.
- Weinnig, A.M., Gómez, C.E., Hallaj, A., Cordes, E.E., 2020, *Cold-water coral (Lophelia pertusa) response to multiple stressors: High temperature affects recovery from short-term pollution exposure*, Scientific Reports, Vol. 10, No.1, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58556-9>
- Yao, C.L., Somero, G.N., 2014, *The impact of ocean warming on marine organisms*, Chinese Science Bulletin, Vol. 59, 468–479. <https://doi.org/10.1007/S11434-014-0113-0/METRICS>
- Zhou, J., Bao, W., Tick, G.R., Moftakhari, H., Li, Y., Cheng, L., 2021, *A modified chezy formula for one-dimensional unsteady frictional resistance in open channel flow*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 143, No. 5, 051303.

