

Pemodelan Hidrodinamika pada Musim Barat di Pantai Gosong Kalimantan Barat sebagai Calon Tapak PLTN Pertama di Indonesia pada Tahun 2025

Haidar Thahir Wiyadi*, Muslim, Jarot Marwoto

Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Soedarto, S.H, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, 50275, Indonesia
Email: *haidarthahir03@gmail.com

Abstrak

Indonesia berencana membangun Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) pertama di Pantai Gosong, Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat. Pembangunan rencananya akan dimulai tahun 2025. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa kondisi hidrodinamika di perairan Pantai Gosong pada musim barat. Model hidrodinamika bisa dijadikan acuan untuk memperkirakan sebaran berbagai macam limbah radionuklida yang terlepas ke lautan ketika PLTN mengalami kecelakaan. Metode yang digunakan yaitu metode kuantitatif dengan pemodelan 2D. Model disimulasikan menggunakan Modul Hidrodinamika pada software MIKE 21 dengan skenario selama 15 hari dengan kondisi pasang tertinggi dan surut terendah pada Januari 2025. Berdasarkan hasil yang didapat, perairan Pantai Gosong memiliki tipe pasang surut campuran condong ke harian ganda. Parameter angin berperan lebih besar terhadap hidrodinamika. Hasil model menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi pasang tertinggi dan surut terendah, yang mana kecepatan arus saat surut terendah lebih besar ketimbang kecepatan arus saat pasang tertinggi. Pola pergerakan arus saat kondisi pasang dominan ke arah timur laut dengan kecepatan 0,010 m/s – 0,610 m/s, arah arus berasal dari selatan kemudian berbelok ke arah timur laut. Pola pergerakan arus pada saat kondisi surut dominan ke arah barat laut dengan kecepatan sebesar 0,010 m/s – 1,021 m/s, arah arus berasal dari timur laut kemudian berbelok ke arah barat laut.

Kata kunci: Model Hidrodinamika, Musim Barat, Pantai Gosong

Abstract

Indonesia plans to build the first nuclear power plant (NPP) in Gosong Coast, Bengkayang Regency, West Kalimantan Province. Construction is planned to start in 2025. This study aims to analyze the hydrodynamic conditions in the waters of Gosong Beach in the west monsoon. The hydrodynamic model can be used as a reference for estimating the distribution of various kinds of radionuclide waste that is released into the ocean when a nuclear power plant has an accident. The method used is quantitative method with 2D modeling. This model is simulated using the Hydrodynamics Module on MIKE 21 software with a scenario for 15 days which includes conditions during the highest and lowest tides in January 2025. Based on the results obtained, the waters of Gosong Beach have mixed semidiurnal tidal type. Wind parameters play a greater role in hydrodynamic conditions. The model results show a significant difference between the highest and lowest tide conditions, where the current velocity at the lowest low tide is greater than the current velocity at the highest tide. The pattern of current movement during tidal conditions is dominant to the northeast at a speed of 0.010 m/s – 0.610 m/s, with the current direction coming from the south and then turning to the northeast. The pattern of current movement at low tide is dominant to the northwest with a speed of 0.010 m/s – 1.021 m/s, with the current direction coming from the northeast and then turning to the northwest.

Keywords: Hydrodynamic Model, West Monsoon, Gosong Coast

PENDAHULUAN

Pembangunan PLTN pada area pantai dikhawatirkan dapat melepaskan bahan radioaktif ke perairan laut. Pada kondisi normal, limbah radioaktif disimpan di dalam tangki-tangki bawah tanah dan tidak dilepaskan ke lingkungan luar. Limbah radioaktif bisa dilepaskan ke lautan apabila terjadi kondisi kedaruratan maupun bencana alam. Pelepasan limbah radioaktif ke lautan dapat mempengaruhi organisme yang hidup di dalamnya. Penelitian mengenai limbah radioaktif di perairan pernah dilakukan oleh Muslim *et al.*, (2015), yang

membahas mengenai distribusi radionuklida ^{137}Cs di perairan Gresik akibat dari limbah buangan pabrik. Penelitian lainnya dilakukan oleh Silalahi *et al.*, (2014), yang membahas mengenai aktivitas radionuklida ^{137}Cs di perairan Bangka Selatan sebagai akibat dari kecelakaan dari kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi.

Kondisi hidrodinamika merupakan parameter utama yang mempengaruhi persebaran dari limbah yang dibuang ke lautan, terlepas dari karakteristik setiap unsur radionuklida pada massa air. Simulasi dinamika laut memberikan pola arus laut secara temporal di area yang luas. Selain itu, model hidrodinamika membagi pola pergerakan ke dalam dua konsep dinamis yaitu adveksi dan difusi. Proses adveksi menerangkan perpindahan limbah cair pada satu titik di perairan karena arus air, sedangkan proses difusi menerangkan perambatan konsentrasi limbah di perairan karena pelarutan alaminya.

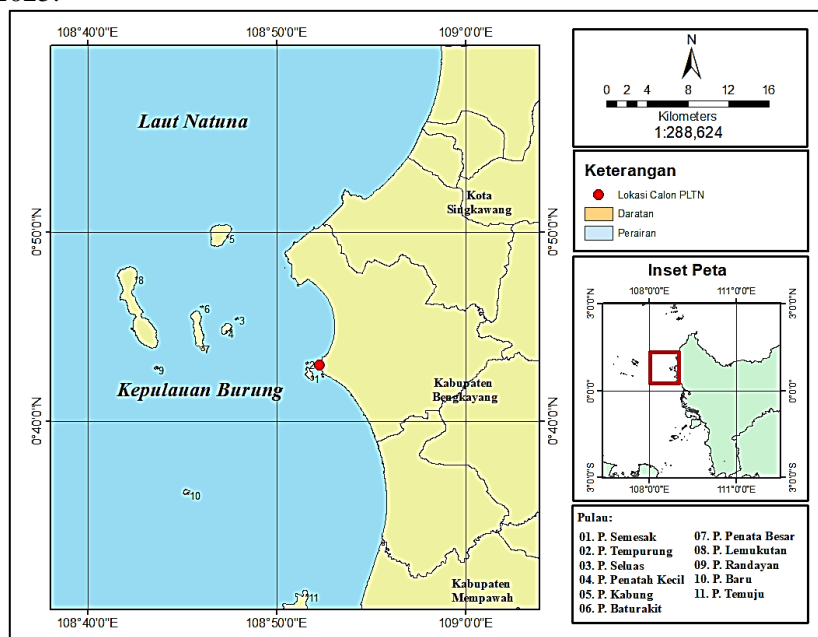
Setiap jenis limbah cair memiliki karakteristik difusi yang berbeda di laut yang mana ditunjukkan dalam bentuk bilangan koefisien. Memahami karakteristik kimia radionuklida di perairan sangat penting ketika memperkirakan sebaran limbah radionuklida di area perairan, seperti konservatif dan non-konservatif. Radionuklida konservatif merupakan radionuklida yang mudah larut dalam massa air yang keberadaannya terdapat pada kolom perairan, sehingga persebarannya sangat dipengaruhi oleh dinamika massa air seperti arus laut. Sedangkan radionuklida non-konservatif merupakan radionuklida yang reaktif dengan gaya gabung yang kuat terhadap partikel tersuspensi, selain itu radionuklida ini juga akan secara mudah tenggelam dan berakumulasi dengan sedimen dasar (Silalahi *et al.*, 2014).

Penelitian ini merupakan studi lanjutan dari penelitian sebelumnya oleh Prasetyo *et al.*, (2021), yang mana telah dilakukan pemodelan di lokasi yang sama yaitu calon tapak PLTN Kalmantan Barat pada musim timur. Area perairan Pantai Gosong, yang terletak pada garis pantai Kalimantan Barat, diasumsikan memiliki pengaruh besar dari angin muson yang mana dapat merubah secara signifikan pola arus lautan di sekitarnya. Asumsi tersebut yang menjadi alasan untuk penelitian ini yang bertujuan untuk mengilustrasikan kondisi hidrodinamika Pantai Gosong pada musim barat tahun 2025. Selanjutnya, hasil yang didapatkan bisa menjadi dasar untuk memperkirakan pola sebaran limbah radionuklida di perairan tersebut.

MATERI DAN METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Simulasi pemodelan dilakukan pada bulan Januari (musim barat) tahun 2025. Penelitian dilakukan di daerah perairan Pantai Gosong, Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat (berbatasan dengan Malaysia) (Gambar 1). Durasi simulasi model hidrodinamika dilakukan selama 15 hari mulai dari tanggal 1 Januari 2025 hingga 15 Januari 2025.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Materi Penelitian

Materi yang digunakan pada penelitian ini berupa data primer dan data pendukung. Data primer meliputi data arah dan kecepatan angin yang diperoleh dari <https://resources.marine.copernicus.eu/products> yang diakses pada tanggal 20/08/2021, data batimetri dari <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/batnas> yang diakses pada tanggal 18/09/2021, dan data prediksi pasang surut dari *software* MIKE 21. Data pendukung meliputi data lapangan pasang surut dari Badan Informasi Geospasial (BIG) <http://ina-sealevelmonitoring.big.go.id/ipasut/> yang diakses pada tanggal 15/02/2022 dan data Peta SHP Indonesia skala 1:800.000 dari <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/download/perwilayah> yang diakses pada tanggal 20/08/2021.

Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif yang merupakan suatu cara untuk memperoleh data berupa angka-angka serta analisis statistik dengan tujuan tertentu secara ilmiah (Silalahi *et al.*, 2014). Hasil dari metode kuantitatif berupa tabel, grafik, gambar, maupun tampilan lain yang sifatnya sistematis dari data yang telah dikumpulkan, diolah, diproses, dan dianalisis berdasarkan permasalahan dan tujuan penelitian. Metode ini digunakan untuk mengetahui hubungan antar variabel yang satu dengan lainnya lalu menarik kesimpulan dari objek yang diteliti (Sugiyono, 2009).

Metode Pengolahan Data

- Data Pasang Surut

Data pasang surut yang digunakan sebagai inputan model sebaran pada pemodelan adalah data prediksi yang didapatkan dari *tide prediction of height 0,25°* pada *software* MIKE 21 di bulan Januari 2025 untuk area penelitian disesuaikan dengan rentang waktu dan interval yang digunakan. Data pasang surut untuk simulasi menggunakan data pasang surut dari *software* MIKE 21 bulan Januari 2022 yang diverifikasi dengan data pasang surut lapangan di bulan Januari 2022 dari stasiun pasut BIG di Pemangkat, Kabupaten Sambas, Kalimantan Barat, <http://ina-sealevelmonitoring.big.go.id/ipasut/> yang diakses pada tanggal 15/02/2022. Data pasang surut diverifikasi menggunakan metode RMSE, yang mana hasilnya akan menunjukkan nilai *error* dari data model tersebut. Nilai *error* yang kecil menunjukkan bahwa data prediksi oleh MIKE 21 dapat dianggap merepresentasikan data pasang surut yang ada di lapangan.

- Data Angin

Data angin diperoleh dari *website* Copernicus, <https://resources.marine.copernicus.eu/products> yang diakses pada tanggal 20/08/2021. Data yang digunakan merupakan data angin selama 1 bulan mulai tahun 2017-2019 dengan interval pengukuran setiap 6 jam. Data yang diunduh berupa data berformat file *NetCDF*. Data tersebut lalu diubah ke dalam format file *txt* menggunakan *software* Ocean Data View (ODV). Data berformat file *txt* kemudian diolah menggunakan *software* Ms. Excel untuk mendapatkan data arah dan kecepatan angin. Data arah dan kecepatan angin dari 2017-2019 kemudian dirata-rata. Hasil rerata ini dianggap mewakili dan merepresentasikan arah dan kecepatan angin di bulan Januari 2025. Data arah dan kecepatan rata-rata ini kemudian dimodelkan menggunakan modul hidrodinamika pada *software* MIKE 21 sehingga didapatkan model arah dan kecepatan arus permukaan di perairan Bengkayang.

- Data Batimetri

Data batimetri yang digunakan diperoleh dari *website* Batimetri Nasional (BATNAS), dari <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/batnas> yang diakses pada tanggal 18/09/2021. Data yang diunduh berupa data berformat file *tif*. Data tersebut lalu diinput dan diolah menggunakan *software* ArcMap 10.3 untuk mendapatkan garis kontur dan *boundary* atau batasan sesuai dengan lokasi penelitian yang telah ditentukan. Hasil olahan kemudian disimpan ke dalam format file *dbf*. Data berformat file *dbf* kemudian disortir menggunakan *software* Ms. Excel dan disimpan dengan format file *txt*. Data *txt* lalu dibuka menggunakan *software* Notepad dan disimpan dengan format file *xyz*. Data *xyz* ini kemudian dijadikan sebagai data input kedalaman pada *software* MIKE 21. Data batimetri dari BATNAS memiliki resolusi spasial sebesar 6 *arc-second* (180km) dengan datum Mean Sea Level (MSL).

Metode Pemodelan

- Pemodelan Hidrodinamika 2 Dimensi

Data masukan untuk pemodelan hidrodinamika yaitu data pasang surut, garis pantai dari digitasi Peta SHP Indonesia, dan data batimetri sebagai batas. Hasil yang didapatkan berupa pemodelan pola arus dan elevasi muka air atau pasang surut yang akan divalidasi dengan data pasang surut lapangan dari BIG. Solusi numerik dengan menggunakan *software* MIKE 21 yang bisa menyelesaikan persamaan diferensial hidrodinamika dengan metode elemen berhingga (*finite element methods*). Untuk aplikasi lokal, tipe ukuran domain model adalah 1-100 km dan tipe ukuran grid 0.1-5 km. Rentang waktu yang digunakan akan lebih kecil dari periode pasang surut (Periáñez, 2005).

Modul hidrodinamika merupakan komponen perhitungan dasar seluruh program sistem model dari MIKE 21 *Flow Model FM* yang menyajikan dasar hidrodinamika untuk modul-modul lain. Modul hidrodinamika juga menyediakan dasar perhitungan untuk digunakan sendiri. Modul ini mensimulasikan perbedaan ketinggian muka air dan aliran air sebagai respon dari perbedaan gaya yang bekerja pada perairan seperti danau, estuari, dan pantai. Modul ini juga mensimulasikan aliran tidak stabil seperti perbedaan densitas, batimetri, dan gaya eksternal. Pemilihan antara model 2D dan 3D tergantung dari beberapa faktor (DHI, 2007).

Persamaan yang dibangun dalam pemodelan hidrodinamika meninjau gaya pembangkit arus yang disebabkan oleh angin (*wind driven current*). Di perairan terbuka, selain oleh angin, arus dapat pula dibangkitkan oleh adanya perbedaan muka air (gaya gradien tekanan). juga dibangkitkan oleh adanya perbedaan muka air (gaya gradien tekanan), dan diperhitungkan pula gaya gesekan dasar. Dalam tinjauan 2 dimensi dengan menerapkan asumsi-asumsi tersebut, maka persamaan gerak fluida dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial U}{\partial t} - fV = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{rU}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} + \rho_a \lambda w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad \dots(1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} - fU = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{rU}{H^2} \sqrt{U^2 + V^2} + \rho_a \lambda w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad \dots(2)$$

Untuk persamaan kontinuitasnya dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad \dots(3)$$

Dimana U,V adalah tranpor arus dalam arah x dan y. f adalah parameter Coriolis, ζ adalah elevasi muka air (m), H adalah kedalaman total ($H+\zeta$), g merupakan percepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$), r merupakan gesekan dasar, ρ_a adalah masa jenis udara, λ adalah koefisien gesek permukaan, dan w adalah kecepatan angin permukaan (Kushadiwijayanto *et al.*, 2017).

- Desain Model

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui model hidrodinamika di lokasi sekitar calon tapak PLTN Kalimantan Barat pada tahun 2025 dengan beberapa skenario. Tahap awal yaitu dengan membuat *mesh* menggunakan opsi *Mesh Generator* pada *software* MIKE 21 dengan data input yaitu data batimetri dan *boundary* berformat *xyz*. *Mesh* di sini berguna sebagai domain model. Tahap kedua yaitu menginput data angin menggunakan opsi *Time Series* pada *software* MIKE 21 dengan data input yaitu data arah dan kecepatan angin yang telah diolah. Domain model simulasi ini memiliki syarat batas yang terdiri dari syarat batas terbuka dan syarat batas tertutup. Selanjutnya, model hidrodinamika 2 dimensi dilakukan dengan opsi *Flow Model FM* pada *software* MIKE 21 dan mengisi data input ke dalam modul hidrodinamika di antaranya domain model, data angin, dan data pasang surut. Simulasi yang dilakukan memiliki tujuan agar pola arus yang terjadi karena pengaruh angin dan pasang surut diketahui sehingga pola arus tersebut dapat digunakan untuk memodelkan sebaran radionuklida. Hasil akhir yang didapat berupa model elevasi muka air laut atau pasang surut, serta pola arus berdasarkan arah dan kecepatan.

- Skenario Model

Simulasi model yang dilakukan selama 15 hari dimulai dari tanggal 1 hingga 15 Januari 2025 (musim barat). Model diskenariokan dengan lepasnya partikel ¹³⁷Cs ke perairan pada tanggal 1 Januari 2025 pukul 00.00 dari sumber lepasan secara kontinu dan berakhir pada tanggal 15 Januari 2025 pukul 18.00.

Tabel 1. Skenario model hidrodinamika

No.	Parameter	Keterangan
1.	Lama Simulasi	15 hari
2.	Periode Simulasi	1 - 15 Januari 2025
3.	Luas Domain	109 km x 113 km
4.	Time Step	21600 s

Verifikasi Data Pasang Surut

Setelah dilakukan pemodelan hidrodinamika yang mana salah satu hasilnya adalah data elevasi muka air laut atau pasang surut, langkah selanjutnya yaitu dengan memverifikasi data tersebut dengan data lapangan agar diketahui besar ketepatan nilai model dengan keadaan sesungguhnya di lapangan. Cara untuk melakukannya dengan menghitung nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) atau akar rerata kesalahan kuadrat.

Menurut Astari *et al.* (2018), nilai RMSE adalah rerata dari jumlah kuadrat kesalahan hasil analisis. Kelebihan dari metode RMSE adalah mempunyai tingkat sensitifitas yang cukup tinggi. Perhitungan nilai RMSE dituliskan dengan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n}}$$

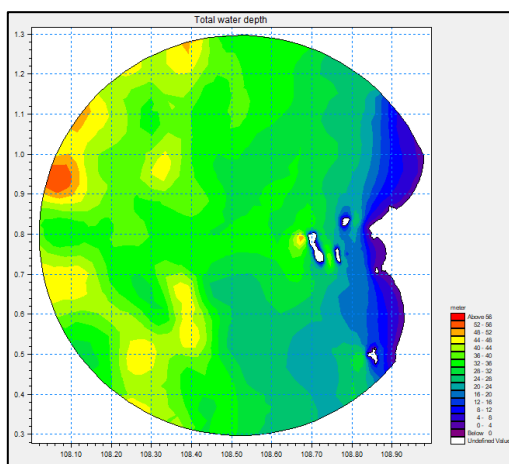
dengan n, y_i , \bar{y}_i secara berturut-turut adalah jumlah data, data lapangan, dan data hasil pemodelan. Tingkat kesesuaian dan kualitas hasil model berdasarkan nilai RMSE dapat dilihat pada **Tabel 2.**

Tabel 2. Interpretasi RMSE

RMSE	Tingkat Kesalahan
0,00 – 0,299 (0% - 29,9%)	Kecil
0,30 – 0,599 (30% - 59,9%)	Sedang
0,60 – 0,899 (60% - 89,9%)	Besar
>0,9 (>90%)	Sangat Besar

(Sumber: Astari *et al.*, 2018)

**HASIL DAN PEMBAHASAN
Batimetri Perairan Bengkayang**

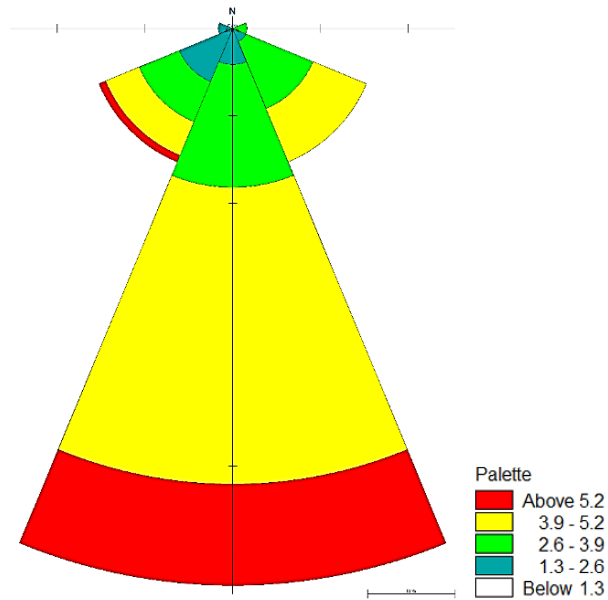


Gambar 2. Batimetri Perairan Bengkayang

Hasil dari proses interpolasi batimetri menunjukkan nilai batimetri perairan Bengkayang memiliki kedalaman yang relatif sama dan sejajar garis pantai dengan penambahan kedalaman ke arah laut hingga kedalaman 30 meter. Kedalaman maksimal sebesar 60 meter yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kondisi batimetri di sekitar lokasi calon tapak PLTN berkisar antara 0 - 5 meter.

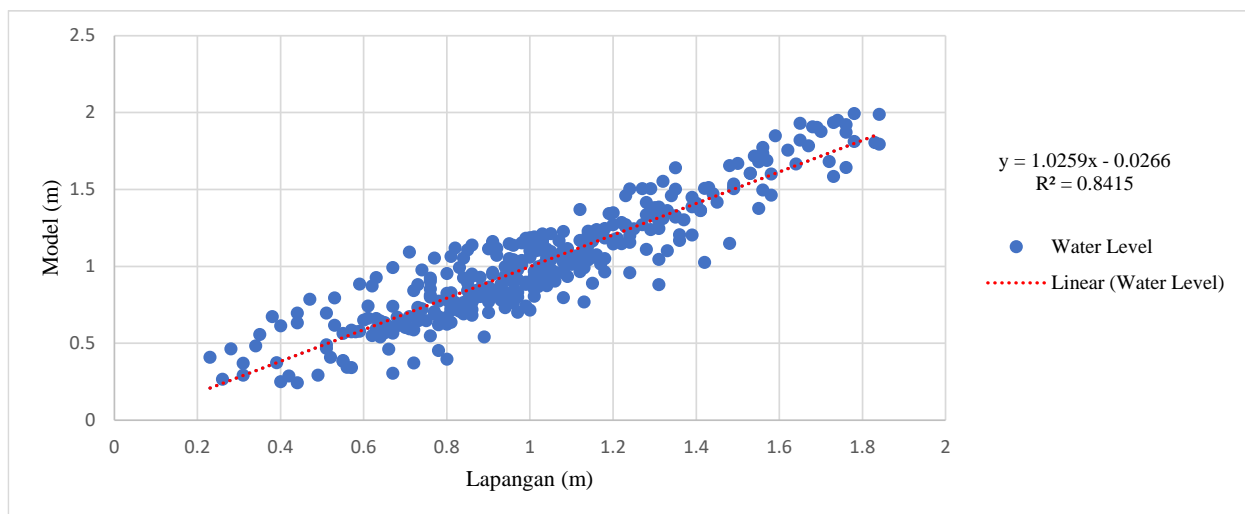
Windrose Rerata 3 Tahun (2017-2019)

Windrose atau mawar angin menunjukkan visualisasi arah pergerakan angin dominan di perairan Bengkayang, Kalimantan Barat. Arah angin paling dominan bergerak dari arah selatan ke utara dengan kecepatan 1,3 – 5,2 m/s yang ditunjukkan pada Gambar 3.

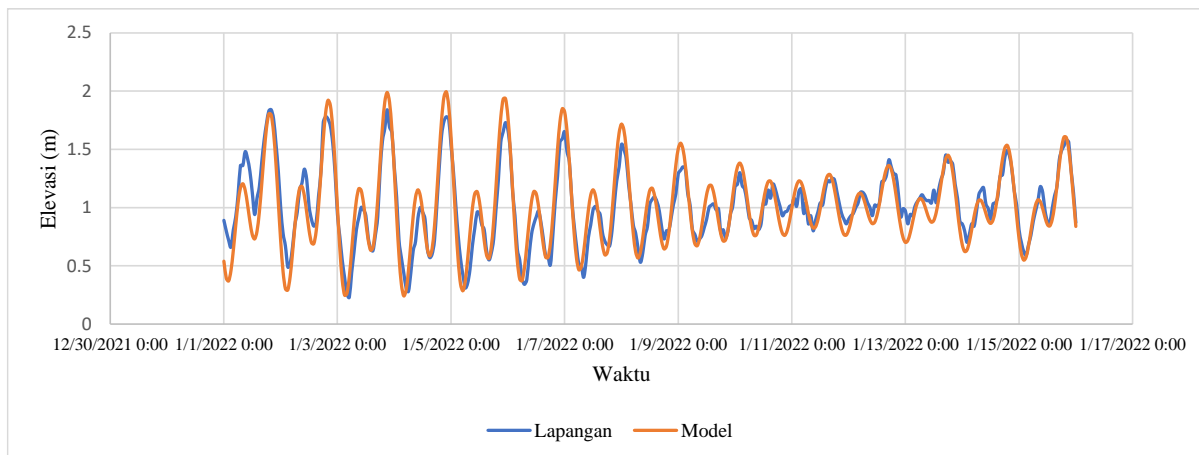


Gambar 3. Windrose (Mawar Angin) Rerata 3 Tahun (2017-2019)

Verifikasi Pasang Surut



Gambar 4. Grafik Regresi Pasang Surut Tahun 2022

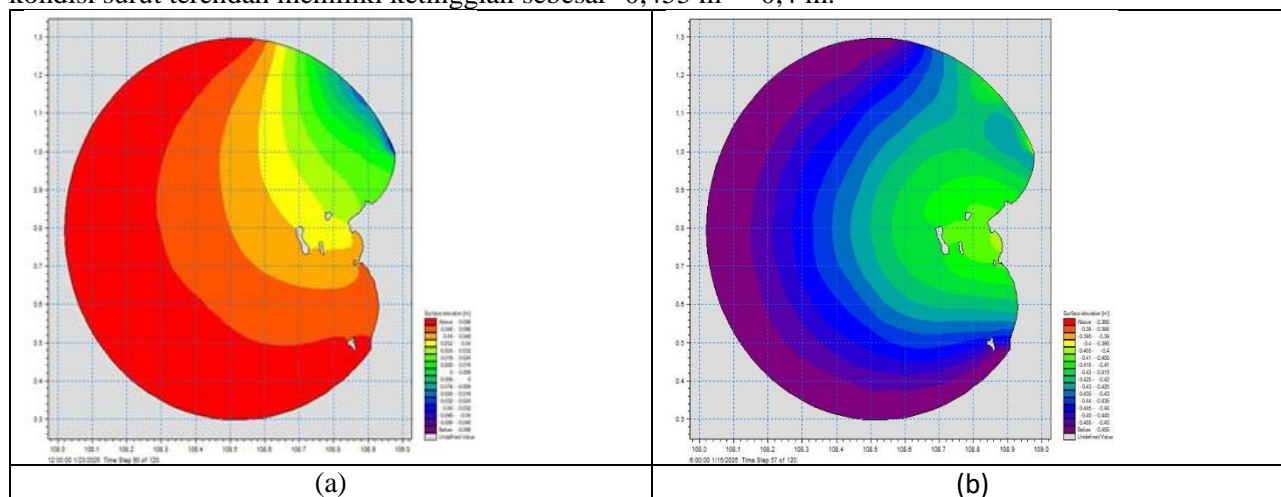


Gambar 5. Grafik Pasang Surut 2022

Verifikasi pasang surut dilakukan dengan membandingkan data lapangan yang diperoleh dari BIG dan data prediksi simulasi pasang surut yang diperoleh dari *software* MIKE 21 selama 15 hari di bulan Januari 2022. Verifikasi dilakukan dengan menggunakan metode RMSE dan dengan membuat grafik korelasi nilai *R-squared*-nya. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa data pasang surut dari kedua sumber memiliki kemiripan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 4 ditunjukkan bahwa nilai dari *R-squared* yang didapatkan yaitu sebesar 0,8415, yang berarti bahwa data simulasi pasang surut MIKE 21 memiliki korelasi yang baik dengan data lapangan pasang surut BIG. Hal ini sesuai dengan pernyataan dari Hidayat *et al.* (2019), bahwa besar magnitude dan fase pasang surut sebuah model dianggap merepresentasikan dengan pembandingnya saat nilai *R-squared*-nya mendekati 1. Berdasarkan hasil grafik pasang surut dan nilai *Formzhal* pada perairan Bengkayang di mana $F = 1,058$ yang artinya tipe pasang surut di Perairan Bengkayang adalah tipe campuran condong ke harian ganda ($0,26 < F \leq 1,50$), di mana dalam sehari terdapat dua kali pasang dan dua kali surut dengan ketinggian dan periode yang berbeda. Hal ini sesuai dengan pernyataan Simanjuntak *et al.* (2013), bahwa tipe pasang surut di perairan Bengkayang adalah pasang surut campuran condong harian ganda. Setelah dilakukan uji metode RMSE, data prediksi pasang surut dari *software* MIKE 21 memiliki nilai *error* sebesar 0.144497577618734 atau 14,49 %. Nilai tersebut dapat dikategorikan kecil karena masih berada di interval 0,00 – 0,299 (0% - 29,9%) yang tergolong memiliki nilai kesalahan yang kecil.

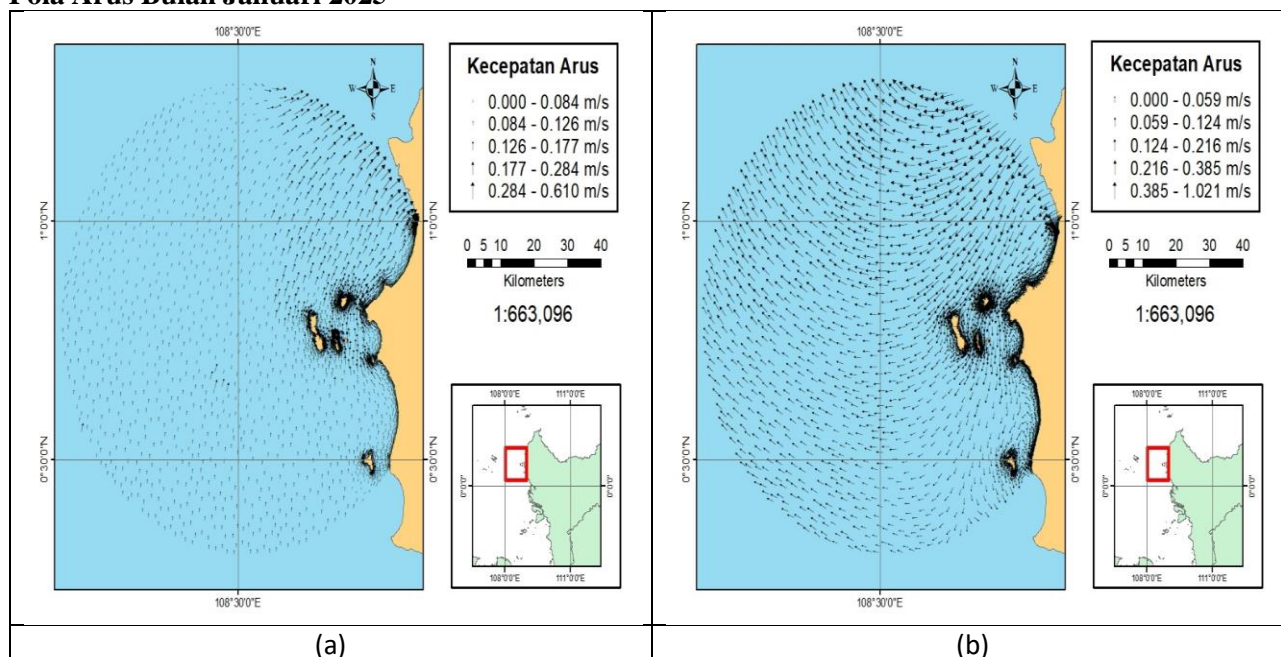
Elevasi Muka Air Bulan Januari 2025

Elevasi muka air pada bulan Januari 2025 ditunjukkan oleh Gambar 6a dan Gambar 6b. Elevasi muka air saat kondisi pasang tertinggi memiliki ketinggian sebesar -0,024 m – 0,056 m. Elevasi muka air pada saat kondisi surut terendah memiliki ketinggian sebesar -0,455 m – -0,4 m.



Gambar 6. Elevasi Muka Air (a) saat Kondisi Pasang, (b) saat Kondisi Surut

Pola Arus Bulan Januari 2025



Gambar 7. Pola Pergerakan Arus (a) saat Kondisi Pasang, (b) saat Kondisi Surut

Pergerakan pola arus bulan Januari 2025 ditunjukkan oleh Gambar 7a dan Gambar 7b. Pola pergerakan arus saat kondisi pasang dominan ke arah timur laut dengan kecepatan sebesar 0,010 m/s – 0,610 m/s, dengan arah arus yang berasal dari selatan kemudian berbelok ke arah timur laut. Pola pergerakan arus pada saat kondisi surut dominan ke arah barat laut dengan kecepatan sebesar 0,010 m/s – 1,021 m/s, dengan arah arus yang berasal dari timur laut kemudian berbelok ke arah barat laut.

Dinamika aliran air pada saat pasang tertinggi dan surut terendah ditunjukkan pada Gambar 7a dan 7b. Secara umum, kisaran pasang surut di laut ini mencapai sekitar 1 m pada saat musim barat, kecuali di wilayah pesisir Kabupaten Sambas Gambar 6a dan 6b. Pada saat kondisi pasang tertinggi, elevasi muka air laut di perairan Kabupaten Sambas mencapai -0,024 – -0,016 m. Sedangkan pada saat kondisi surut terendah, elevasi muka air laut di perairan Kabupaten Sambas mencapai -0,435 – -0,43 m. Kemiringan batimetri yang rendah di sekitar pesisir Kabupaten Sambas diduga sebagai pengaruh dari fluktuasi elevasi muka air (Yogaswara *et al.*, 2016). Pola arus pada saat kondisi pasang tertinggi dan surut terendah berbeda signifikan. Arus air relatif bergerak sejajar dengan garis pantai baik pada saat pasang maupun surut. Pola arus ini biasanya terjadi di laut lepas. Di sisi lain, dinamika air bergerak menjauh dari garis pantai pada saat surut dan mendekati garis pantai pada saat air pasang di laut tertutup, seperti teluk atau muara. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Simanjuntak *et al.*, (2013), pola arus di Wilayah Pesisir Kalimantan Barat sangat dipengaruhi oleh parameter angin permukaan. Ada beberapa hasil yang berbeda antara musim barat dan timur pada dinamika air seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Prasetyo *et al.*, (2021) pada musim timur. Selain itu, penelitian sebelumnya di tempat serupa menyimpulkan bahwa pengaruh angin muson berpengaruh cukup signifikan terhadap perubahan hidrodinamika di Kalimantan Barat. Lautan yang terletak di dekat ekuator ini menunjukkan bahwa pengaruh Coriolis jarang melibatkan pembelokan aliran oleh gaya angin (Azis, 2006). Oleh karena itu, pola arus relatif mengalir mengikuti arah gerak angin permukaan. Namun, perambatan pasut dan batimetri tetap menjadi parameter yang lebih mempengaruhi pola arus di perairan pantai.

Pergerakan arus laut menyebabkan limbah radioaktif tersebar hingga ke perairan wilayah lain dari lokasi calon tapak PLTN di Pantai Gosong. Hal ini dapat terlihat dari vektor arus yang ditunjukkan pada Gambar 7a dan 7b. Saat kondisi pasang tertinggi, awalnya lepasan limbah radioaktif dari Pantai Gosong diperkirakan akan menyebar ke wilayah pantai Kota Singkawang. Sebaran kemudian diperkirakan terus menyebar hingga ke perairan wilayah perairan Kabupaten Sambas. Saat kondisi surut terendah, lepasan limbah radioaktif diperkirakan akan bergerak dan menyebar ke lautan lepas melalui Kepulauan Burung, Wilayah perairan Kota Singkawang, Kabupaten Sambas, dan Kepulauan Burung, diperkirakan akan terkena dampak limbah radioaktif

jika PLTN dibangun di Pantai Gosong mengalami kecelakaan. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa terdapat banyak ekosistem penting yang tumbuh dan hidup pada area-area tersebut seperti mangrove, lamun, dan terumbu karang.

Limbah radioaktif dari PLTN harus diolah sebelum disimpan pada fasilitas pembuangan seperti pemrosesan ulang, dekontaminasi, dan penonaktifan. Perlakuan ini membagi limbah radioaktif menjadi beberapa tingkatan yaitu *high-level waste* (HIW), *low-intermediate level waste* (LILW), dan *very low-level waste* (VLLW). Limbah-limbah radioaktif ini disimpan di tangki-tangki bawah tanah dengan kedalaman berdasarkan tingkatan untuk beberapa dekade (IAEA, 2009). Limbah radioaktif pada kondisi operasi normal PLTN tidak mencemari lingkungan laut. Penelitian ini memperingatkan jika suatu kecelakaan terjadi pada pengaplikasian energi nuklir. Limbah radioaktif tanpa penanganan akan terlepas ke lautan dan atmosfer yang dapat mencemari lingkungan laut.

KESIMPULAN

Perairan Pantai Gosong, Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat, terletak pada wilayah tropis yang sangat dipengaruhi oleh angin muson. Perairan Pantai Gosong memiliki tipe pasang surut campuran condong ke harian ganda. Parameter angin berperan lebih besar pada kondisi hidrodinamika. Hasil model menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi pasang tertinggi dan surut terendah, yang mana kecepatan arus pada saat surut terendah lebih besar ketimbang kecepatan arus pada saat pasang tertinggi. Pola pergerakan arus saat kondisi pasang dominan ke arah timur laut dengan kecepatan 0,010 m/s – 0,610 m/s, dengan arah arus yang berasal dari selatan kemudian berbelok ke arah timur laut. Pola pergerakan arus pada saat kondisi surut dominan ke arah barat laut dengan kecepatan sebesar 0,010 m/s – 1,021 m/s, dengan arah arus yang berasal dari timur laut kemudian berbelok ke arah barat laut. Arus laut pada saat pasang tertinggi diperkirakan akan menyebarkan limbah radioaktif dari Pantai Gosong sampai ke wilayah perairan Kota Singkawang dan Kabupaten Sambas. Sedangkan arus laut pada saat kondisi surut terendah akan menyebarkan limbah radioaktif dari Pantai Gosong ke perairan Kepulauan Burung.

DAFTAR PUSTAKA

- Astari, K. F., A. Hendri, dan M. Fauzi. 2018. Analisis Pasang Surut Perairan Dumai Menggunakan Metode Admiralty. *Jom FTEKNIK*, 5(2): 1-7.
- Azis, M. F. 2006. Gerak Air di Laut. *Oseana*, 31(4): 9–21.
- Hidayat, T., W. Atmodjo, Hariyadi, H. Setyono, A. Ismanto, dan A. A. D. Suryoputro. 2019. Kajian Tipe dan Komponen Pasang Surut di Pantai Sigandu Kabupaten Batang. *Indonesian Journal of Oceanography*., 1(1): 1-5.
- IAEA. 2009. Policies and Strategies for Radioactive Waste Management. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1. IAEA, Vienna, 69 p.
- Muslim. 2007. Marine Radionuclide. Universitas Diponegoro, Semarang, 101 hlm.
- Muslim., H. Suseno, and F. Rafsani. 2015. Distribution of ¹³⁷Cs Radionuclide in Industrial Wastes Effluents of Gresik, East Java, Indonesia. *Atom Indonesia*., 41(1): 47-50.
- Muslim, H. Suseno, and S. Saodah. 2016. Condition of ¹³⁷Cs Activity in Karimunjawa Waters and its Distribution When an NPP Jepara is Operated. *Ilmu Kelautan*, 21(3): 143-150.
- Octavia, Y. P., M. I. Jumarang, dan Apriansyah. 2018. Estimasi Arus Laut Permukaan yang Dibangkitkan oleh Angin di Perairan Indonesia. *Prisma Fisika*, 6(1): 1–8.
- Periáñez, R. 2005. Modelling The Dispersion Of Radionuclides In The Marine Environment. Springer-Verlag, Heidelberg, Netherlands.
- Periáñez, R., R. Bezhenar., I. Brovchenko., K. T. Jung., Y. Kamidara., K. O. Kim., T. Kobayashi., L. Liptak., V. Maderich., B.I. Min, and K. S. Suh. 2019. Fukushima ¹³⁷Cs Releases Dispersion Modelling Over the Pacific Ocean. Comparisons of Models with Water, Sediment and Biota Data. *Journal of Environmental Radioactivity*, 198: 50-63.
- Prasetyo, A. T., Muslim, and H. Suseno. 2021. Hydrodynamical Model During East Season at Gosong Coastal West Borneo as Candidate Location of Nuclear Power Plant in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 890 012002: 1-10.

- Prasetyo, A. T., Muslim, and H. Suseno. 2021. Modeling on ^{137}Cs Radioactive Dispersion in Gosong Coast as the Candidate Location for Nuclear Power Plant. *Jurnal Kelautan Tropis*, 24(3): 291-301.
- Setiawan, B. dan D. Suganda. 2016. Pengaruh Koefisien Distribusi ^{137}Cs Pada Keselamatan Calon Tapak Fasilitas Disposasi Limbah Radioaktif. *Dalam: Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah*, 14, pp. 93-104.
- Silalahi, C., Muslim, dan H. Suseno. 2014. Aktivitas Cesium-137 (^{137}Cs) Di Perairan Bangka Selatan Sebagai Base Line Data Radionuklida Di Perairan Indonesia. *Journal of Oceanography*, 3(1): 36-42.
- Simanjuntak, B. L., G. Handoyo, dan D. Nugroho S. 2013. Analisis Bathimetri dan Komponen Pasang Surut untuk Penentuan Kedalaman Tambahan Kolam Dermaga di Perairan Tanjung Gundul Bengkayang-Kalimantan Barat. *Journal of Oceanography*, 2(1): 1-7.
- Sugiyono. 2009. Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D. CV. Alfabeta, Bandung, 464 hlm.
- Yogaswara, G. M., E. Indrayanti, dan H. Setiyono. 2016. Pola Arus Permukaan di Perairan Pulau Tidung, Kepulauan Seribu, Provinsi DKI Jakarta pada Musim Peralihan (Maret-Mei). *Jurnal Oseanografi*, 5(2): 227-233.