

Pola distribusi logam berat Pb-Cd di perairan pelabuhan Biringkassi, Pangkep dengan pemodelan sms 10.1

Distribution pattern of pb-cd heavy metal in biringkassi port waters, pangkep with sms modeling 10.1

Arif Fuddin Usman^{1*}, Rusnaedi¹, M Azhar Sauqy¹, Andi Ningrat¹, Muslihati¹

¹Transportasi Laut, Politeknik Maritim AMI Makassar

Jl. Nuri Baru Nomor 1, Kel. Sambung Jawa, Kec. Mamajang, Makassar 90121,

*Correspondence author: arifusman575@gmail.com

ABSTRAK

Pelabuhan Biringkassi yang dioperasikan PT. Semen Tonasa (Persero) secara kontinyu menghasilkan zat pencemar di lingkungan perairan sekitar. Peningkatan bahan pencemar makin meningkat dengan pembangunan Power Plant yang memiliki kapasitas 2X25 MW pada Desember 2007. Bertambah lagi dengan keberadaan dermaga khusus batubara yang dibangun tahun 2015. Jenis bahan pencemar dibuang di sekitar pelabuhan adalah logam berat. Keberadaan limbah logam berat ini berakibat turunnya kualitas air di sekitar Pelabuhan Biringkassi di Kabupaten Pangkep. Penelitian ini bertujuan melihat penyebaran logam berat Pb-Cd di sekitar Pelabuhan Biringkassi. Riset ini menggunakan metode deskripsi dari pemodelan dengan piranti Surface-water Modeling System (SMS) 10.1. Hasil pemodelan dalam kolom air pada simulasi dengan $t=360$ jam atau hari ke-15, terlihat pola penyebaran mirip pada hari ke-5. Distribusi Pb dalam sedimen tampak meluas ke berbagai arah dengan nilai lebih dari 0,0001 ppm. Adapun jarak radius dari 800 m ke arah utara, lalu 900 m menuju selatan, serta 1.100 m ke arah barat. Kesimpulan akhir dari pemodelan dengan waktu $t=360$ jam, logam berat Pb-Cd, dari model SMS 10.1 belum mencapai area tambak.

Kata Kunci: Pelabuhan Biringkassi, logam berat, timbal, cadmium

ABSTRACT

Biringkassi Port operated by PT. Semen Tonasa (Persero) continuously produces environmental pollutants in the surrounding waters. The increase in pollutants is even higher with the construction of a Power Plant with a capacity of 2X25 MW in December 2007. This is further increased by the presence of a special coal jetty which was built in 2015. One of the pollutants produced is heavy metal. The presence of heavy metal waste has resulted in a decrease in water quality around the Biringkassi Special Port, Pangkep Regency. The purpose of this research is to see the water quality and distribution model of Pb-Cd heavy metal content around Biringkassi Port. This research uses the description method of modeling with the Surface-water Modeling System (SMS) 10.1 device. The results of the modeling in the water column in the simulation with $t=360$ hours or the 15th day, it is seen that the distribution pattern is similar on the 5th day. The distribution of Pb in the sediment seemed to extend in various directions with a value of more than 0.0001 ppm. The radius distance is 800 m to the north, then 900 m to the south, and 1,100 m to the west. The final conclusion from modeling with time $t=360$ hours, heavy metal Pb-Cd, from SMS 10.1 model has not yet reached the pond area.

Keywords: Biringkassi Harbor, heavy metal, lead, cadmium

PENDAHULUAN

Logam berat merupakan salah satu zat pencemar yang berbahaya di lingkungan, (Effendi. 2003). Ketika masuk dalam lingkungan, logam berat tidak dapat terdegradasi. Selain itu, jenis pencemar ini memiliki sifat toksik atau racun, terutama dalam konsentrasi tinggi. Ketika masuk dalam tubuh makhluk hidup, termasuk manusia, zat pencemar ini memiliki sifat bioakumulasi. Sedikit demi sedikit bertambah dan tersimpan di dalam tubuh, hingga dalam konsentrasi tertentu akan menjadi racun. Zat pencemar logam berat ini asalnya dari minyak bumi, batubara, cat antikerak, dan lainnya.

Unsur Timbal (Pb) merupakan salah satu jenis logam berat dengan sifat racun paling signifikan, terutama jenis anorganik saat terserap dalam tubuh lewat konsumsi air, makanan, maupun pernapasan (Ferner. 2001). Efek yang cukup serius dan berbahaya dari keracunan Pb adalah efek teratogenik (A Rosihan dkk. 2017). Efek ini adalah kelainan kelainan perkembangan fisiologis dari janin pada manusia. Keracunan Pb dapat menyebabkan keterhambatan penyerapan oksigen dalam hemoglobin, kelainan pada fungsi ginjal, kelainan pada sistem reproduksi, kelainan pada kardiovaskular, dapat merusak saraf pusat, dan dapat merusak saraf tepi (Ogwuegbu etc. 2005).

Keberadaan logam berat Pb yang terlarut dalam air laut, sedimen, hingga kerang sangat berbahaya, sebab berpotensi besar masuk dalam jejaring rantai makanan (Effendi. 2003). Pb dapat berpindah ke manusia lewat perantara ikan konsumsi yang tercemari Pb. Jika telah masuk ke organisme, dapat terakumulasi dan menjadi racun dalam waktu lama (Darmono. 2001). Pada konsentrasi yang melewati ambang batas, mampu mengganggu kinerja enzim di tubuh hingga berpotensi menyebabkan kecacatan (Ogwuegbu etc. 2005).

Logam pencemar lainnya yang berbahaya bagi manusia adalah Cadmium (Cd). Seperti Pb, logam berat Cd ini, merupakan logam pencemar ini berasal buangan limbah cair PLTU dan kegiatan pelabuhan laut (Palar. 1994). Sumber pencemaran Cd lainnya di area pelabuhan berasal dari cat kapal antifouling yang bertujuan untuk menahan laju korosi dan perusakan bodi kapal dari hewan laut sejenis kerang (Hutagalung. 1991).

Pencemaran logam berat Pb-Cd, rentan terjadi di perairan sekitar Pelabuhan Biringkassi. Laporan tahunan PT Semen Tonasa, dalam sehari aktivitas bongkar muat kapal di pelabuhan ini 5-10 kapal setiap hari. Peningkatan konsentrasi Pb-Cd di Pelabuhan Biringkassi semakin tinggi setelah pembangunan Power Plant berkapasitas 2X25 MW dengan bahan baku batubara (Semen Tonasa. 2018).

Data Adendum Amdal dan RKL dan RPL 2016, terdapat 2 unit PLTU di Pelabuhan Biringkassi yang membuang limbah cair sebanyak 27.795 m³ / jam. Data ini berasal dari neraca penggunaan air pada PLTU (Adendum Andal dan RKL-RPL Tonasa. 2016). Catatan BPS, di Kecamatan Bungoro, terdapat 1.286 hektar tambak milik warga dengan sebagian air baku dari perairan Biringkassi (BPS. 2018). Air baku untuk tambak warga berasal dari Sungai Bontorannu yang airnya terhubung dengan perairan Biringkassi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pola penyebaran logam berat Pb-Cd di sekitar perairan Pelabuhan Khusus Biringkassi. Pola distribusi atau sebaran logam berat di kolom air dan sedimentasi dilakukan dengan pemodelan perangkat lunak *Surface-water Modeling System (SMS) 10.1*. (Harmesa dkk. 2020). Data utama penginputan adalah elevasi pasang surut per jam atau arus sesaat interval 1 jam dan nilai konsentrasi logam berat Pb-Cd hasil analisis laboratorium berdasarkan 4 titik pengambilan sampel.

METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi atau tempat penelitian adalah di perairan sekitar Pelabuhan Biringkassi. Pelabuhan khusus ini dioperasikan PT. Tonasa Lines yang merupakan anak perusahaan PT Semen Tonasa (Persero) grup perusahaan PT Semen Indonesia di Desa Bulu Cindea, Kabupaten Pangkep.

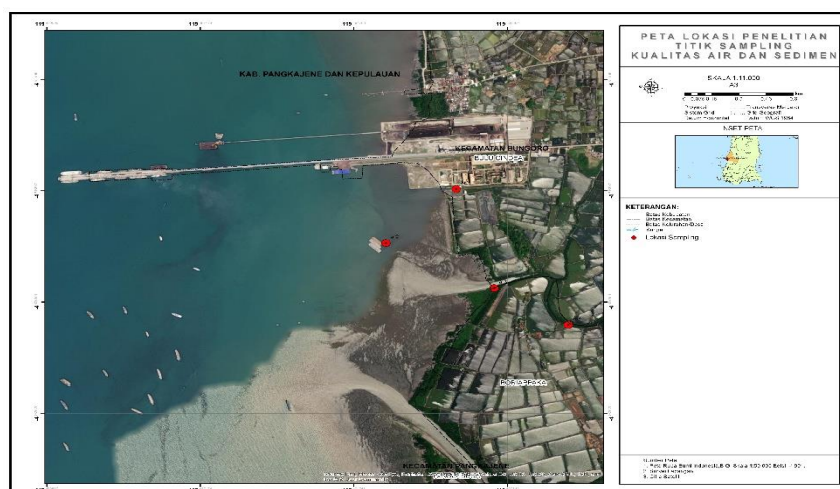
Pengambilan Sampel

Penelitian ini mengambil sampel dari kolom air, sedimen, dan biota yang dilakukan pada September 2020. Penentuan sampel dilakukan pada di titik stasiun yang

ditentukan berdasar pertimbangan letak geografis dan karakteristik wilayah (Hutagulung. 1997). Analisis logam berat Pb-Cd dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Hasanuddin. Penelitian ini juga menggunakan data pasang surut dari Dokumen Adendum Amdal PT Semen Tonasa (Amdal Tonasa. 2014).

Titik pengambilan sampel dibagi 4 titik stasiun. Stasiun 1 lokasinya di outfall atau tempat buangan limbah cair PLTU. Stasiun 2 ditentukan sejauh 250 meter ke arah barat laut dari outfall. Stasiun 3 ditentukan sejauh 400 meter ke selatan dari Stasiun 2. Titik Stasiun 4 berlokasi di tambak warga, dengan jarak 300 m arah timur Stasiun 3. Keempat titik ditentukan lewat *Global Positioning System* (GPS). Tiap titik dilakukan pengukuran arus, kandungan air, dan kandungan Pb-Cd. Setiap titik stasiun tersebut diplot dengan luasan 2 meter persegi untuk batas pengambilan sampel (RA Pratama dkk. 2021).

Lokasi sampling Stasiun I berada di lokasi pembuangan limbah cair atau outfall PLTU dengan titik koordinat LS: 4° 49' 12,06" dan BT 119° 29' 43,28". Lokasi Stasiun II berada di sebelah barat daya outfall dengan jarak 600 meter dengan titik koordinat LS: 4° 49' 30,54" dan BT 119° 30' 15,63". Lokasi Stasiun III berada di selatan outfall pada muara Sungai Bontorannu dengan titik koordinat LS: 4° 50' 20,06" dan BT 119° 30' 51,62". Lokasi sampling Stasiun IV ke arah timur dari muara sungai berada di tambak warga dengan titik koordinat LS: 4° 50' 28,06" dan BT 119° 40' 31,27". Lebih jelasnya titik sampling tampak dalam peta pengambilan sampel sesuai Gambar 1.



Gambar 1. Peta titik pengambilan sampel air dan sedimen.

Analisis

Distribusi atau sebaran logam berat Pb-Cd dalam air laut dan sedimen menggunakan pemodelan menggunakan perangkat lunak *Surface-Water Modeling System* (SMS) versi 10.1 yang kemudian disajikan secara deskriptif. Data yang diinput adalah data elevasi pasang surut per jam serta konsentrasi Pb-Cd dari hasil analisis laboratorium di titik sampling. Hasil pengolahan gambar fotorealistik atau proses rendering dari gambar 2D dilakukan dengan program SMS 10.1 pada sampel air dan sampel sedimentasi. Sehingga dihasilkan gambar 2D model penyebaran logam berat Pb-Cd terhadap fungsi waktu (t). Fungsi waktu (t) yang ditentukan adalah $t = 1$ jam, $t = 24$ jam, $t = 120$ jam, dan $t = 360$ jam, kemudian disajikan data model untuk konsentrasi logam Pb-Cd, baik di air laut dan sedimen.

Program inti dari *Surface-Water Modeling System* (SMS) ini adalah program pemodelan hidrodinamika yang dapat menghitung elevasi muka air dan kecepatan aliran untuk masalah aliran perairan dangkal. Hal ini untuk mendukung pemodelan keadaan langgeng (*steady*) dan tidak langgeng (dinamis-berubah terhadap waktu) (RA Pratama dkk. 2021). Program SMS terdapat 3 modul program penting untuk simulasi hidrodinamika, yaitu GFGEN, RMA-2, RMA-4 yang fungsi masing-masingnya sebagai berikut:

- GFGEN (*Geometri File Generation*) adalah program untuk membuat geometri dan file mesh elemen hingga untuk menjadi data masukan program sistem pemodelan SMS. Program ini melakukan pemeriksaan rutin mesh dan menyusun kembali mesh. Program GFGEN ini hanya membutuhkan file geometri ASCII sebagai input.
- RMA-2 (*Resources Management Associates-2*) adalah program inti dari SMS. RMA-2 adalah program elemen hingga dua dimensi untuk menyelesaikan masalah hidrodinamika. RMA-2 dapat digunakan untuk menghitung elevasi muka air dan kecepatan aliran pada titik node dalam suatu mesh elemen hingga yang mewakili badan air seperti teluk, sungai, estuari, pulau-pulau kecil dan kolam pelabuhan.

- RMA-4 (*Resources Management Associates-4*) adalah sebuah program pengembangan dari SMS. RMA-4 dapat digunakan untuk mengetahui nilai persebaran polutan dalam konteks ini logam berat yang berada dalam elevasi muka air dan kecepatan aliran pada titik node dalam suatu mesh elemen.

Modul GFGEN (Geometri File Generation)

Proses pertama yang dilakukan dalam melakukan simulasi hidrodinamika dengan menggunakan SMS adalah dengan membuat grid pada peta batimetri (data pengukuran lapangan) yang telah dilakukan dengan menggunakan beberapa perangkat lunak seperti ArGIS, MapSource dan software pendukung lainnya. Sebelum grid dibuat, pertama kali yang dilakukan adalah membuat node-node yang nantinya tiap-tiap node akan dihubungkan menjadi grid-grid elemen. (Moustafa etc. 2015).

Mesh merupakan data input yang paling umum untuk simulasi. Mesh adalah grid yang menggambarkan rupa bumi dari lokasi yang akan dimodelkan. Grid tersebut dapat dibentuk menggunakan elemen hingga atau elemen beda hingga sesuai keperluan. Pada umumnya mesh dibuat berdasarkan peta situasi. Mesh dapat berupa gambaran kondisi sekarang maupun kondisi setelah bangunan rencana selesai dibangun.

Langkah pertama yang dilakukan dalam pemodelan hidrodinamika adalah pemodelan sirkulasi arus adalah dengan membuat geometri dan elemen dari lokasi yang akan dimodelkan. GFGEN (*Geometri File Generation*) adalah program dalam SMS untuk membuat program geometri dan file mesh elemen hingga untuk menjadi data masukan program sistem dan pemodelan SMS. Program ini melakukan pemeriksaan rutin mesh dan menyusun kembali mesh. Program GFGEN ini hanya membutuhkan file geometri ASCII sebagai input.

Beberapa kelebihan utama dari modul GFGEN adalah sebagai berikut :

- Membaca data node dan elemen hingga yang berisi informasi mesh dan bentuk geometri dan kemudian merubahnya ke file bentuk binary agar dapat digunakan oleh program lain dalam sistem pemodelan SMS.
- Mengidentifikasi kesalahan dan kemungkinan dapat terjadinya kesalahan dalam mesh yang dibangun.

- Pembentukan sisi elemen kurva lengkung agar dibentuk tepat pada batas model dan bagian dalam elemen dengan efisien dalam pemodelan.
- Mengembangkan urutan solusi elemen yang mengizinkan operasi yang paling efektif menggunakan mesh.

Pemodelan Hidrodinamika dengan Modul RMA-2

Tujuan simulasi hidrodinamika ini adalah untuk mendapatkan besaran kecepatan dan arah arus yang akan berguna dalam penentuan sifat dinamika perairan lokal khususnya lokasi Perairan Pelabuhan Biringkassi, Pangkep. Pemodelan arus yang digunakan adalah dengan model numerik RMA2. RMA2 adalah sebuah modul dari SMS berupa model numerik elemen hingga (*finite element*) yang diintegrasikan dalam arah vertikal (kedalaman perairan dapat dianggap konstan relatif terhadap dimensi horizontalnya), sehingga dapat dianggap sebagai masalah dua dimensi (2-D).

Keutamaan dari modul RMA2 adalah mampu menghitung perubahan elevasi permukaan (fluktuasi pasut) perairan dan komponen kecepatan arus horizontal untuk aliran permukaan bebas sub-kritis dalam medan aliran 2-dimensi. Pada dasarnya RMA2 menyelesaikan masalah aliran turbulen persamaan Reynolds yang diturunkan dari persamaan Navier-Stokes. Pengaruh kekasaran diperhitungkan dengan koefisien Manning atau Chezy, sementara karakteristik turbulensi diperhitungkan dengan memasukkan koefisien kekentalan turbulen (*eddy viscosity*). Baik masalah aliran langgeng (tunak) maupun aliran tak langgeng (tak tunak) dapat diselesaikan dengan baik. Sebagai persamaan pengatur, RMA2 menggunakan persamaan konservasi massa dan momentum yang diintegrasikan terhadap kedalaman.

Persamaan massa :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

Persamaan momentum :

Dalam arah x;

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{p} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gun^2}{(1.486h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2h\omega v \sin \phi = 0$$

Dalam arah y;

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{p} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial \alpha}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gun^2}{(1.486h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \psi - 2h\omega v \sin \phi = 0$$

dengan :

h = kedalaman perairan

t = waktu

u, v = komponen kecepatan dalam arah x dan y

p = kerapatan fluida

g = percepatan gravitasi

E = koefisien kekentalan turbulen,

xx , dalam arah normal terhadap bidang x

yy , dalam arah normal terhadap bidang y

xy dan yx , masing-masing berimpit dengan bidang x dan y

a = elevasi dasar perairan

n = koefisien kekasaran Manning

ζ = koefisien tegangan geser angin empiris

V_a = kecepatan angin

ψ = arah angin

ω = kecepatan rotasi bumi

ϕ = posisi lintang geografis

Persamaan konservasi massa dan momentum tersebut di atas diselesaikan dengan metode elemen hingga dengan menggunakan Metode sisa berbobot (*weighted residuals*) Galerkin.

Pemodelan Sebaran Polutan dengan Modul RMA-4

Pemodelan dengan RMA4 dapat digunakan untuk investigasi proses fisika dari migrasi dan pencampuran substansi konservatif pada *reservoir*, sungai, estuari, dan zona perairan pantai. Tujuan umum dari RMA4 adalah untuk investigasi proses fisika yang memodelkan distribusi polutan dari suatu lingkungan. Formulasi yang digunakan dalam modul RMA4 ini adalah formulasi transport pada kedalaman rata-rata sebagai berikut (King, 2009).

Pengembangan model matematika untuk gerak air (kecepatan u dan v , serta kedalaman h), untuk menentukan dispersi polutan digunakan RMA4. Model matematika RMA4 adalah model numerik elemen hingga untuk transport kualitas air, dimana distribusi konsentrasi terhadap kedalaman diasumsikan seragam (King, 2009). RMA4 menyelesaikan persamaan adveksi-difusi sebagai berikut;

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} - \sigma + kc + \frac{R(c)}{h} \right) = 0$$

dengan

h = kedalaman perairan

t = waktu

u, v = komponen kecepatan dalam koordinat Cartesien x dan y

c = konsentrasi polutan

g = percepatan gravitasi

D_x, D_y = koefisien difusi dan arah x dan y

k = koefisien atenuasi

σ = sumber lokasi

$R(c)$ = presipitasi atau penguapan

Persamaan ini diselesaikan dengan metode elemen hingga menggunakan metode residu berpemberat Galerkin

Kondisi Batas Permodelan

Kondisi batas yang dapat diaplikasikan pada modul RMA2 ini yaitu perubahan elevasi muka air sebagai input pasang surut (*head*). Pada umumnya, elevasi digunakan pada batas dimana elevasi muka air mengalir masuk ke model. Kondisi batas dapat diberi pada node batas masing-masing atau dapat diberi pada deretan node batas. Pada studi ini modul RMA-2 digunakan untuk menghitung kasus aliran tak langgeng (dinamis). Aliran tidak langgeng adalah suatu aliran yang berubah dalam waktu, misalnya aliran akibat pasang surut, banjir dan sebagainya. Pada kasus ini digunakan kondisi batas (perubahan elevasi muka air) berubah terhadap waktu sesuai dengan kondisi yang terjadi di lapangan. Pemilihan kondisi batas tersebut biasanya tergantung dari ketersediaan data, kebutuhan dan besarnya pengaruh terhadap model yang disimulasikan.

Perubahan elevasi muka air yang dibangkitkan oleh pasang surut yang bolak-balik di perairan Pelabuhan Biringkassi didefinisikan sebagai tinggi muka air pada saat tertentu di perairan lepas. Untuk simulasi kondisi dinamis dimana elevasi muka air berubah terhadap waktu, head didefinisikan sebagai data pasang surut pada waktu tertentu. *Output pertama* dari hasil simulasi adalah berupa tinggi muka air dari MSL berupa grafik data pasut, yang nantinya dikalibrasi terhadap data lapangan yang diperoleh dari survei lapangan. *Output kedua* adalah arah dan besar arus yang membentuk pola pergerakan arus di lokasi yang dimodelkan selanjutnya juga dilakukan verifikasi arus dari hasil pengukuran lapangan.

Validasi Data dan Permodelan

Pada pengukuran dengan model, diperlukan validasi nilai angka sampel, baik dari hasil pengukuran laboratorium di titik stasiun yang telah ditentukan maupun nilai dari hasil pemodelan yang dihasilkan dari piranti lunak *Surface-Water Modeling System* (SMS). Untuk validasi tersebut dilakukan perhitungan sesuai dengan gambar rumus

Root Mean Square Error (RMSE). Hal serupa dapat dilakukan dengan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Baik RMSE atau MAPE adalah alat statistik yang digunakan untuk mengukur keakuratan suatu model statistik dalam melakukan prediksi atau peramalan.

Jika nilai RMSE rendah menunjukkan bahwa variasi nilai yang dihasilkan oleh suatu model prakiraan mendekati variasi observasinya. RMSE menghitung seberapa berbedanya seperangkat nilai. Semakin kecil nilai RMSE, semakin dekat nilai yang diprediksi dan diamati. Secara matematis, rumusnya ditulis sebagai berikut.

$$\text{RMSE} = \left(\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right)^{1/2}$$

Keterangan:

RMSE = nilai *root mean square error*

y = nilai hasil observasi

\hat{y} = nilai hasil prediksi

i = urutan data pada database

n = jumlah data

Sedangkan MAPE merupakan alat ukur ketepatan model peramalan yang paling sering digunakan dibandingkan RMSE, MAD, MAE atau lainnya. Hal ini karena nilai MAPE lebih mudah diinterpretasikan dibandingkan alat ukur yang lain tersebut. Nilai MAPE sebesar 10% dapat diartikan bahwa selisih rata-rata nilai peramalan dengan nilai sebenarnya adalah 10%. Secara matematis, rumusnya ditulis sebagai berikut:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right| \times 100\%$$

dimana:

n = ukuran sampel

A_i = nilai data aktual

F_i = nilai data peramalan

Semakin kecil MAPE maka semakin akurat sebuah model dalam melakukan peramalan. Hal ini berarti sebuah model yang memiliki nilai MAPE sebesar 5% merupakan model yang lebih baik dalam melakukan peramalan dibandingkan model lain yang memiliki MAPE sebesar 10%. Interpretasi nilai MAPE dapat dilihat dari interval nilainya sebagai berikut:

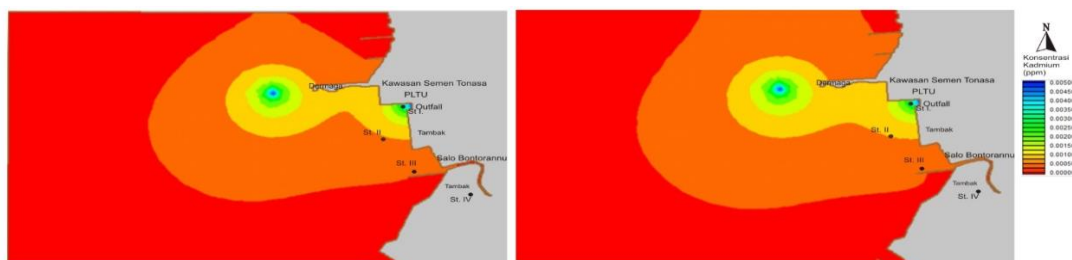
Tabel 1. Interpretasi nilai MAPE

Nilai MAPE	Interpretasi
≤ 10	Hasil peramalan sangat akurat
10 - 20	Hasil peramalan baik
20 - 50	Hasil peramalan layak (cukup baik)
> 50	Hasil peramalan tidak akurat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Sebaran Pb-Cd dengan t= 1 Jam

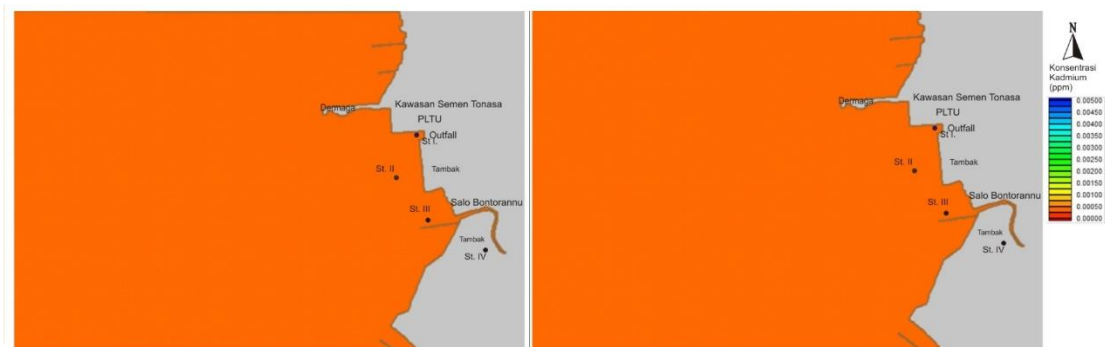
Hasil pengolahan gambar fotorealistik atau proses render dari model 2D (dua dimensi) pada program SMS 10.1 terhadap air laut dengan t= 1 jam, terlihat pola penyebaran Pb-Cd masih di sekitar sumber. Pada **Gambar 2** tampak masih terpusat di area dermaga bongkar muat dan titik pembuangan limbah cair.



Gambar 2. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di air pada t= 1 jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilai 0,0005–0,005 ppm.

Adapun nilai konsentrasi Pb-Cd untuk $t= 1$ jam antara 0,003–0,005 ppm dengan indikasi distribusi ke berbagai arah. Pada titik buang limbah cair melebar ke timur dan selatan pada jarak 40 meter dengan konsentrasi 0,003 ppm. Sedangkan di dermaga bongkar muat distribusi melebar ke segala arah dengan konsentrasi 0,003 ppm.

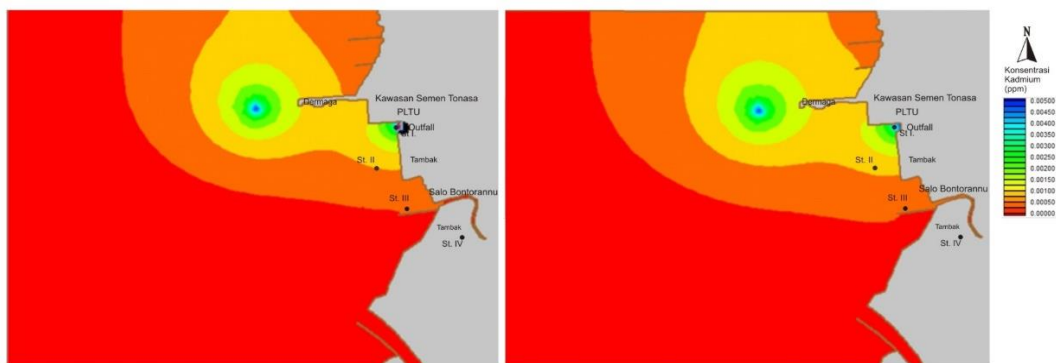
Sementara untuk sedimen, pola sebaran atau distribusi logam berat Pb-Cd belum memperlihatkan tanda-tanda yang signifikan dari visual warna di **Gambar 2**. Nilai umum konsentrasi masih di bawah 0,0001 ppm.



Gambar 3. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di sedimen pada $t= 1$ jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilainya 0,0000 – 0,0009 ppm.

Model Sebaran Pb-Cd dengan $t= 24$ Jam

Pola sebaran Pb-Cd di air laut untuk nilai $t= 24$ jam atau $t= 1$ hari, terlihat signifikan ke utara dari titik sumber pencemar dermaga bongkar muat. Sebaran Cd lebih luas dibanding Pb. Nilai konsentrasi di kisaran 0,001 ppm dengan jarak sampai 800 meter. Sementara ke arah timur dan selatan tidak berbeda saat $t= 1$ jam. Distribusi masih berkisar 400 meter. Adapun di titik buang limbah cair PLTU, simak **Gambar 4** tidak berbeda dengan $t= 1$ jam.



Gambar 4. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di air pada $t = 24$ jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilainya 0,0005 – 0,005 ppm.

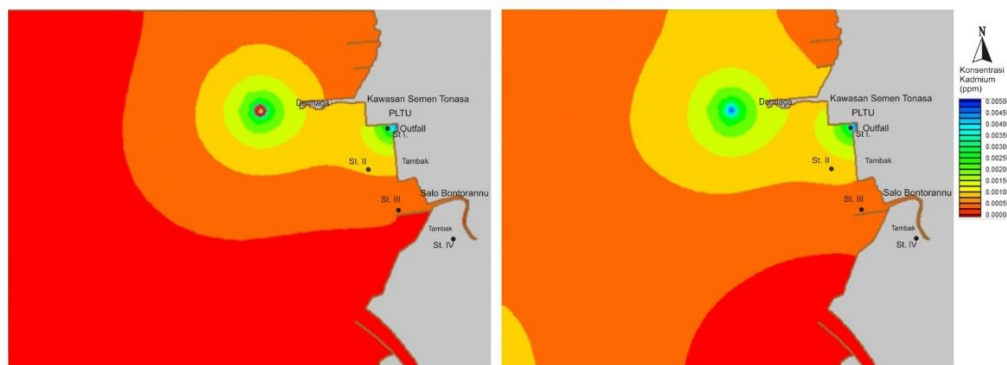
Pola sebaran Pb-Cd di sedimen untuk nilai $t = 24$ jam atau $t = 1$ hari, terlihat pada **Gambar 5** belum menampakkan signifikansi perubahan warna. Hal ini menandakan nilai konsentrasi di bawah 0,0001 ppm.



Gambar 5. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di sedimen pada $t = 24$ jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilainya 0,0000 – 0,0009 ppm.

Model Sebaran Pb-Cd dengan $t = 120$ Jam

Pola sebaran Pb-Cd di air untuk nilai $t = 120$ jam atau $t = 5$ hari, terlihat berbeda lagi untuk titik dermaga dan outfall. Sebaran Cd semakin meluas ke utara dibanding Pb. Nilai konsentrasi di kisaran 0,001 ppm dengan jarak sampai 800 meter. Sebaran Pb masih mirip saat $t = 24$ jam dalam radius 500 meter. Adapun sebaran di titik buang limbah cair PLTU, tampak di **Gambar 6** masih sama dengan $t = 24$ jam.



Gambar 6. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di air pada $t= 120$ jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilainya 0,0005 – 0,005 ppm.

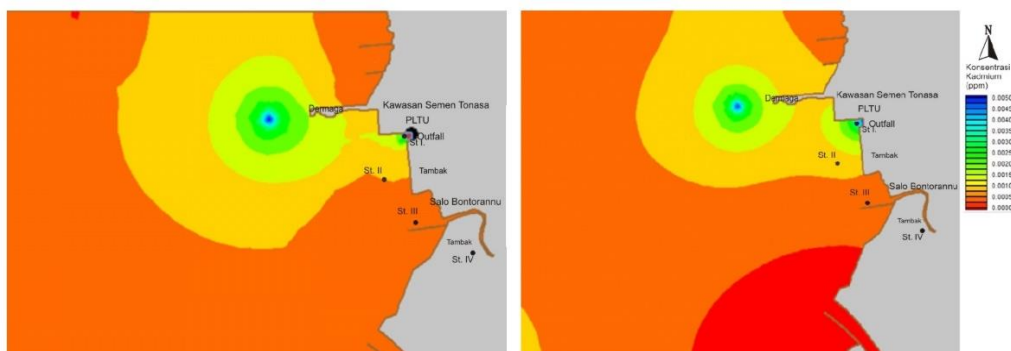
Sedangkan pola distribusi atau sebaran Pb-Cd dalam sedimen tampak meningkat konsentrasinya secara signifikan antara 0,0001–0,0004 ppm di dua titik sumber terlihat di **Gambar 7** di bawah ini. Sebaran Pb di titik buang limbah cair masih dalam radius rendah berkisar 100 meter, tapi untuk Cd tampak mengarah ke barat dengan jarak 400 meter. Sebaran di titik dermaga bongkar muat, tampak dari warna Pb yang berbentuk lingkaran dengan radius sekira 200 meter. Sedangkan sebaran Cd tampak lebih signifikan pada radius 600–800 meter.



Gambar 7. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di sedimen pada $t= 120$ jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilainya 0,0000 – 0,0009 ppm.

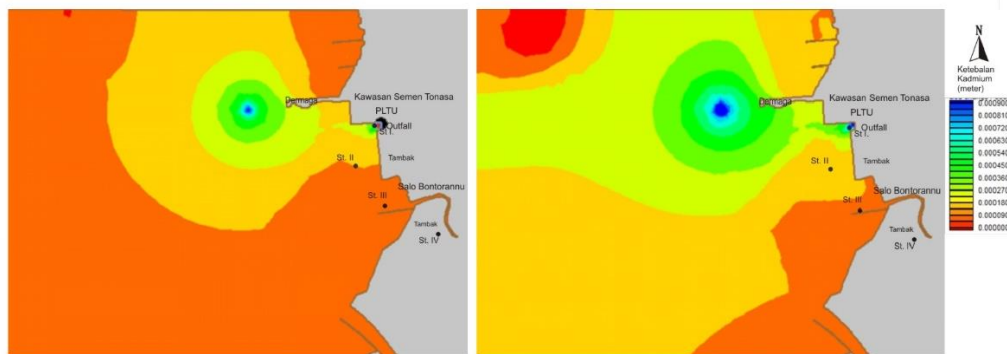
Model Sebaran Pb-Cd dengan $t = 360$ Jam

Pola sebaran Pb-Cd di air untuk nilai $t = 360$ jam atau $t = 15$ hari, tampak di **Gambar 8** semakin tinggi gradasi warna baik di titik dermaga bongkar muat dan outfall PLTU. Tampak berkebalikan dengan $t = 120$ jam. Sebaran Pb semakin meluas ke utara dibanding Cd. Nilai konsentrasi di kisaran 0,001 ppm dengan jarak sampai 2000 meter. Sebaran Cd dalam radius 1000 meter. Adapun pola distribusi Pb di titik buang limbah cair PLTU tampak menyatu dengan distribusi dari titik sumber bongkar muat. Diketahui panjang dari dermaga Pelabuhan Khusus Biringkassi yang menjorok ke laut adalah 2000 meter.



Gambar 8. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di air pada $t = 360$ jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilainya 0,0005 – 0,005 ppm.

Sedangkan pola distribusi atau sebaran Pb-Cd dalam sedimen dengan $t = 360$ jam, tampak dari **Gambar 9** meningkat konsentrasinya ke segala arah secara dalam radius ke utara sejauh 800 meter, ke selatan sejauh 900 meter, ke barat sejauh 1.100 meter dan ke timur tampak menyatu dari dua titik sumber. Nilai konsentrasi di atas 0,0001 ppm. Sebaran Pb di titik buang limbah cair meningkat dengan radius 800 meter ke barat. Pola distribusi Cd di titik dermaga bongkar muat, tampak dari warnanya yang berbentuk lingkaran makin membesar dengan radius sekira 800-1200 meter.



Gambar 9. Pola distribusi Pb (kiri) dan Cd (kanan) di sedimen pada $t = 360$ jam. Konsentrasi Pb-Cd ditunjukkan dengan gradasi warna, nilainya 0,0000 – 0,0009 ppm.
Validasi Pemodelan

Faktor koreksi atau sebagai validasi dilakukan pada nilai dari pemodelan dengan metode MAPE dan RMSE pada masing-masing fungsi waktu dengan empat stasiun yang telah ditentukan. Berikut hasil validasinya;

Tabel 2. Validasi nilai model pada air laut dengan $t = 1$ jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0006	0.0009	0,001	0,002	0,00000016	0,00000004	0,00000121	3,025E-07	40	55
2	0.0001	0.0002	0,001	0,002	0,00000001	2,5E-09	0,00000324	0,00000081	90	90
3	0.0001	0.0001	0,001	0,002	0	0	0,00000361	9,025E-07	90	95
4	0.0000	0.0000	0,001	0,002	0	0	0,000004	0,000001	100	100
						4,25E-08		0,000003015	320	340
					RMSE	0,00021		0,002	80	85

Tabel 3. Validasi nilai model pada sedimentasi dengan $t = 1$ jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0012	0.0014	0.220	0.172	0,04787344	0,01196836	0,02910436	0,00727609	99,45454545	99,18604651
2	0.0005	0.0009	0.151	0.118	0,02265025	0,005662563	0,01371241	0,003428103	99,66887417	99,23728814
3	0.0001	0.0003	0,001	0.058	0,00000081	2,025E-07	0,00332929	0,000832323	90	99,48275862
4	0.0000	0.0000	0,001	0.009	0,000001	0,00000025	0,000081	0,00002025	100	100

	0,017631375	0,011556765	389,1234196	397,90609 33
RMSE	0,13278	0,108	97,28085491	99,476523 32

Tabel 4. Validasi nilai model pada air laut dengan t= 24 jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0006	0.0008	0,001	0,002	0,00000016	0,00000004	0,00000144	0,00000036	40	60
2	0.0001	0.0001	0,001	0,002	0,00000081	2,025E-07	0,00000361	9,025E-07	90	95
3	0.0000	0.0001	0,001	0,002	0,00000001	0,00000025	0,00000361	9,025E-07	100	95
4	0.0000	0.0000	0,001	0,002	0,00000001	0,00000025	0,00000004	0,00000001	100	100
						7,425E-07		0,000003165	330	350
					RMSE	0,00086		0,0018	82,5	87,5

Tabel 5. Validasi nilai model pada sedimentasi dengan t= 24 jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0011	0.0014	0.220	0.172	0,04791721	0,011979303	0,02910436	0,00727609	99,5	99,18604651
2	0.0005	0.0008	0.151	0.118	0,02265025	0,005662563	0,01373584	0,00343396	99,66887417	99,3220339
3	0.0001	0.0003	0,001	0.058	0,00000081	2,025E-07	0,00332929	0,000832323	90	99,48275862
4	0.0000	0.0000	0,001	0.009	0,00000001	0,00000025	0,0000081	0,00002025	100	100
						0,017642318		0,011562623	389,1688742	397,990839
					RMSE	0,13282		0,108	97,29221854	99,49770976

Tabel 6. Validasi nilai model pada air laut dengan t= 120 jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0008	0.0009	0,001	0,002	0,00000004	0,00000001	0,00000121	3,025E-07	20	55
2	0.0002	0.0003	0,001	0,002	0,00000064	0,00000016	0,00000289	7,225E-07	80	85
3	0.0001	0.0001	0,001	0,002	0,00000081	2,025E-07	0,00000361	9,025E-07	90	95

4	0.0000	0.0000	0,001	0,002	0,000001	0,00000025	0,000004	0,000001	100	100
						6,225E-07		2,9275E-06	290	335
					RMSE	0,00079		0,0017	72,5	83,75

Tabel 7. Validasi nilai model pada sedimentasi dengan t= 120 jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0013	0.0014	0.220	0.172	0,04782969	0,011957423	0,02910436	0,00727609	99,40909091	99,18604651
2	0.0006	0.0008	0.151	0.118	0,02262016	0,00565504	0,01373584	0,00343396	99,60264901	99,3220339
3	0.0001	0.0002	0,001	0.058	0,00000081	2,025E-07	0,00334084	0,00083521	90	99,65517241
4	0.0000	0.0000	0,001	0.009	0,000001	0,00000025	0,000081	0,00002025	100	100
						0,017612915		0,01156551	389,0117399	398,1632528
					RMSE	0,13271		0,108	97,25293498	99,54081321

Tabel 8. Validasi nilai model pada air laut dengan t= 360 jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0012	0.0011	0,001	0,002	4E-08	1E-08	0,00000081	2,025E-07	20	45
2	0.0004	0.0004	0,001	0,002	0,00000036	0,00000009	0,00000256	0,00000064	60	80
3	0.0001	0.0001	0,001	0,002	0,00000081	2,025E-07	0,00000361	9,025E-07	90	95
4	0.0000	0.0000	0,001	0,002	0,000001	0,00000025	0,000004	0,000001	100	100
						5,525E-07		0,000002745	270	320
					RMSE	0,000743303		0,001656804	67,5	80

Tabel 9. Validasi nilai model pada sedimentasi dengan t= 360 jam

Stasiun	Pb	Cd	Pb insitu	Cd insitu	Pb (mg/kg)		Cd (mg/kg)		MAPE	
	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	Selisih	Selisih ² /n	Selisih	Selisih ² /n	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)
1	0.0015	0.0015	0.220	0.172	0,04774225	0,011935563	0,02907025	0,007267563	99,31818182	99,12790698
2	0.0007	0.0008	0.151	0.118	0,02259009	0,005647523	0,01373584	0,00343396	99,53642384	99,3220339

3	0.0001	0.0001	0,001	0.058	0,00000081	2,025E-07	0,00335241	0,000838103	90	99,82758621
4	0.0000	0.0000	0,001	0.009	0,000001	0,00000025	0,000081	0,00002025	100	100
						0,017583538		0,011559875	388,8546057	398,2775271
RMSE						0,13260		0,108	97,21365141	99,56938177

Data validasi hasil pengukuran model di semua stasiun, ditung nilai RMSE antara angka 0,00086 hingga 0,13282 yang menunjukkan angka sangat kecil. Hal ini semakin dekat nilai yang diprediksi dan diamati. Tapi berbeda dengan nilai MAPE yang berada di rentang angka 72,5-99. Nilai MAPE ini > 50 yang menandakan hasil peramalan tidak akurat.

SIMPULAN

Pola distribusi atau sebaran logam berat Pb-Cd di perairan Pelabuhan Biringkassi dengan perangkat lunak pemodelan SMS 10.1, menunjukkan pola berbeda dari simulasi pada $t = 1$ jam, $t = 24$ jam, $t = 120$ jam, dan $t = 360$ jam. Distribusi pada air dan sedimen, memperlihatkan nilai semakin meluas ke segala arah dengan sebaran Pb lebih meluas dibanding Cd pada $t = 360$ jam. Nilai konsentrasi di kisaran 0,001 ppm dengan jarak sampai 1000 meter. Sebaran Cd masih mirip saat $t = 120$ jam dalam radius 800 meter. Adapun pola distribusi Pb di titik buang limbah cair PLTU telah menyatu dengan distribusi dari titik sumber bongkar muat. Kesimpulan dari pola distribusi atau sebaran logam berat Pb-Cd pada fungsi waktu $t = 360$ jam belum mencapai tambak yang dalam penelitian berada di titik stasiun 4.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima sebesar-besarnya kepada jajaran petinggi di kampus Politeknik Maritim AMI Makassar (Polimarim) yang telah mendanai kegiatan penelitian dan terbitnya artikel ini. Ucapan terima kasih, juga peneliti haturkan untuk dua dosen Universitas Hasanuddin (Unhas), Prof. Dr. Budimawan, DEA dan Prof. Dr. Ir. Prastawa Budi, M.Sc sebagai pembimbing pada penelitian pendahuluan saat studi magister Program Pascasarjana Unhas. Tak lupa ucapan terima kasih untuk rekan-rekan pengajar pada program studi D4 Transportasi Laut dan semua pihak yang mendukung penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- A, Rosihan, Husaini. (2017). *Logam Berat Sekitar Manusia*, Lambung Mangkurat University Press, Banjarmasin.
- BPS, Propinsi Sulawesi Selatan. (2018). *Sulawesi Selatan dalam angka tahun 2017*. Pemerintah Propinsi Sulawesi Selatan, Makassar.
- Darmono. (1995). *Logam Dalam Sistem Biologi Mahluk Hidup*. Penerbit Universitas Indonesia, Jakarta.
- Effendi. (2003). *Telaah Kualitas Air, Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*, Penerbit Kanisius. Yogyakarta.
- Ferner. (2001). Toxicity, Heavy Metals. *Journal eMed.*, 2(5): 1
- Harmesa, Lestari¹, B. Fitri. (2020). Distribusi Logam Berat Dalam Air Laut Dan Sedimen Di Perairan Cimanuk, Jawa Barat. Pusat Penelitian Oseanografi LIPI. *Jurnal Oseanologi dan Limnologi di Indonesia 2020.*, 5(1): 19-32
- Hutagalung. (1991). *Pencemaran Laut Oleh Logam Berat*. Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press). Jakarta.
- Hutagalung. (1997). *Metode Penelitian Air Laut dan Sedimen*. LIPI. Jakarta.
- Ogwuegbu. MOC., Muhanga, W., (2005). Investigation of Lead Concentration in the Blood of People in the Copperbelt Province of Zambia, *Journal Environment*. Edition (1): 66-75.
- Palar. (1994). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Penerbit Rinika Cipta, Jakarta.
- Semen Tonasa., PT. (2018). *Annual Report*. PT Semen Indonesia, Jakarta.
- Semen Tonasa., PT. (2016). *Dokumen Adendum Andal dan RKL-RPL*. PT Semen Indonesia, Jakarta.
- Pratama, R.A., Maslukah, L., Atmodjo, W. (2021). Pola Sebaran Horizontal Logam Berat Timbal (Pb) dan Zeng (Zn) pada Sedimen di Perairan Muara Sungai Kaligung Tegal, Universitas Trunojoyo, *Jurnal Kelautan Volume 14, No. 1*, <http://journal.trunojoyo.ac.id/jurnalkelautan>
- Supriharyono. (2007). *Konservasi Ekosistem Sumber Daya Hayati di Wilayah. Pesisir dan Laut Tropis*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Moustafa, S., EL-Sammany., Ashraf, M., El-Moustafa. (2015). *Adaptation of Surface Water Modeling System for Sediment Transport Investigations in Lake Nasser*. Nile Research Institute, National Water Research Center, Egypt.