

Pengaruh Karakteristik Sedimen terhadap Distribusi dan Akumulasi Logam Berat Pb dan Zn di Perairan Sungai, Estuaria, dan Pantai

Najamuddin^{1*}, Irmalita Tahir¹, Rustam E. Paembonan¹ dan Inayah²

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Khairun

²Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Khairun

Jl. Raya Pertamina, Ternate, 97719

Email : najamuddin313@gmail.com

Abstrack

Sediment Characteristics Influence on the Distribution and Accumulation of Heavy Metals Pb and Zn in the River, Estuary, and Coastal Waters

The purpose of the study was to analyze the effect of surface sediment characteristics including texture, organic carbon content, and redox potential of sediments on the distribution and accumulation of heavy metals Pb and Zn in three different water zones of each river, estuary and coast. Sediment texture was determined by pipette method, organic carbon content in sediments using Walkley and Black method, redox potential of sediments measured by Eh Meter, and concentrations of heavy metals Pb and Zn in sediments with Atomic Absorption Spectrophotometer with graphite furnace system. The results showed that the distribution and accumulation pattern of heavy metals Pb was similar to Zn where the highest concentration was in the coastal waters zone and the lowest was in the estuary waters zone. Sediment texture in the three zones of the dominant was sand. The percentage of organic carbon content in sediments ranges from 1.63-3.25% and the sediment redox potential was classified as reduction and transition zones. The parameters of texture, organic carbon content, and sediment redox potential have a significant influence on the distribution and accumulation of heavy metals Pb and Zn in sediments in all three water zones.

Keywords: heavy metal; texture; organic carbon; redox potential

Abstrak

Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh karakteristik sedimen permukaan meliputi tekstur, kandungan karbon organik, dan potensial redoks sedimen terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn di tiga zona perairan berbeda masing-masing sungai, estuaria, dan pantai. Tekstur sedimen ditentukan dengan metode pipet, kandungan karbon organik dalam sedimen dengan metode *Walkley and Black*, potensial redoks sedimen diukur dengan Eh Meter, dan konsentrasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen dengan Spektrofotometer Serapan Atom dengan sistem *graphite furnace*. Hasil penelitian menunjukkan pola distribusi dan akumulasi logam berat Pb serupa dengan Zn dimana konsentrasi tertinggi di zona perairan pantai dan terendah zona perairan estuaria. Tekstur sedimen pada tiga zona perairan dominan berupa fraksi pasir (*sand*). Persentase kandungan karbon organik dalam sedimen berkisar antara 1,63-3,25 % dan nilai potensial redoks sedimen termasuk kategori zona reduksi dan transisi. Parameter tekstur, kandungan karbon organik, dan potensial redoks sedimen memberikan pengaruh nyata terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen pada ketiga zona perairan.

Kata kunci: logam berat; tekstur; karbon organik; potensial redoks

PENDAHULUAN

Logam berat masuk ke dalam perairan mengalami beberapa proses seperti pengendapan, pengenceran, pelarutan, dispersi, dan akumulasi akibat proses fisika, kimia, dan biologi. Salah satu bentuk perilaku logam berat dalam perairan adalah mudah terikat pada bahan organik menyebabkan logam berat berbentuk terlarut berubah menjadi logam berat bentuk partikel kemudian terdeposisi dan terakumulasi di sedimen dasar perairan. Akibatnya sering dijumpai kadar logam berat dalam sedimen lebih tinggi dibanding dalam kolom air bahkan menurut Bryan and Langston, 1992 bahwa konsentrasi logam berat dalam sedimen bisa mencapai 3-5 kali lebih tinggi dari konsentrasi logam berat dalam kolom air di atasnya.

Tingkat konsentrasi logam berat dalam sedimen sangat penting diketahui karena konsentrasi logam berat dalam sedimen menggambarkan tingkat akumulasi logam berat pada suatu periode waktu tertentu. Tingkat akumulasi logam berat dalam sedimen ditentukan oleh faktor fisika kimia sedimen. Perbedaan karakteristik sedimen menyebabkan perbedaan kemampuan sedimen dalam mengakumulasi logam berat sehingga mempengaruhi pola distribusinya. Beberapa karakteristik fisika kimia sedimen yang paling utama menentukan distribusi dan akumulasi logam berat dalam sedimen adalah tekstur atau ukuran partikel sedimen, kandungan karbon organik, dan kondisi oksidasi reduksi dalam sedimen (Rainbow, 2006).

Stecko dan Bendell-Young (2000) mengemukakan bahwa ketersediaan logam berat dalam sedimen berkaitan erat dengan sifat dan ukuran sedimen. Sedimen yang mengandung jumlah mineral lempung (*clay*) dan karbon organik tinggi cenderung mengakumulasi logam berat lebih tinggi, karena senyawa-senyawa tersebut memiliki sifat mengikat logam. Demikian pula komponen oksida besi, mangan dan bahan organik lainnya merupakan komponen geokimia yang paling penting dalam mengontrol pengikatan logam berat dalam sedimen.

Kandungan karbon organik memiliki hubungan yang positif dengan konsentrasi logam berat dalam sedimen. Selain itu, kandungan logam berat dalam sedimen juga bergantung pada komposisi kimia dan mineral sedimen. Konsentrasi logam berat dalam sedimen umumnya lebih tinggi pada sedimen yang bertekstur liat, lumpur, pasir berlumpur, dan campuran ketiganya dibanding sedimen berupa pasir murni. Hal ini disebabkan adanya gaya tarik elektro kimia partikel sedimen yang lebih kuat pada sedimen yang lebih halus (Sanusi, 2006). Fraksi sedimen yang halus memiliki area permukaan yang lebih luas sehingga dapat mengikat zat terlarut lebih banyak. Faktor lain yang juga berperan adalah kandungan bahan organik yang lebih tinggi pada fraksi sedimen yang halus sehingga logam berat membentuk ikatan dengan partikel organik.

Distribusi dan akumulasi logam berat dalam sedimen, selain dipengaruhi oleh tekstur dan kandungan bahan organik, juga ditentukan oleh mekanisme reaksi oksidasi-reduksi dalam sedimen dan ketersediaan oksigen terlarut dalam air jebakan (*interstitial water*) serta pH sedimen (Sanusi, 2006). Aspek lain yang berpengaruh terhadap distribusi dan akumulasi logam berat adalah faktor perbedaan musim (Najamuddin *et al.*, 2016) dan perubahan ekosistem (Najamuddin dan Surahman, 2017).

Karakteristik fisika kimia sedimen pada tiga zona perairan masing-masing sungai, estuaria, dan pantai cenderung selalu berbeda karena perbedaan kondisi pada tiga perairan tersebut. Namun data dan informasi terkait distribusi dan akumulasi logam berat pada tiga zona perairan tersebut dalam satu kajian yang terintegrasi masih kurang sehingga menjadi dasar dilakukannya penelitian ini.

Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh parameter fisika kimia sedimen yang meliputi tekstur, kandungan bahan organik, dan potensial redoks sedimen terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam tiga zona perairan berbeda (sungai, estuaria, dan pantai).

MATERI DAN METODE

Pengumpulan data dilakukan pada 17 titik sampling yang dibagi dalam tiga zona perairan yaitu perairan sungai dengan titik sampling 1-3, perairan estuaria dengan titik sampling 4-10, dan perairan pantai dengan titik sampling 11-17. Peta lokasi penelitian dan sebaran titik sampling disajikan pada Gambar 1. Sedimen diambil pada lapisan permukaan kira-kira pada lapisan 0-20 cm dengan *Ekman Grab Sampler* (distribusi titik sampling ditunjukkan pada Gambar 1). Sampel sedimen sebanyak 500 gram dimasukkan ke dalam botol *polyetilen*. Botol *polyetilen* sebelumnya telah direndam dengan HNO_3 6 N dan selanjutnya dibilas dengan air suling. Sampel sedimen selanjutnya disimpan dalam *ice box* pada suhu 4 °C. Setelah di laboratorium sampel sedimen dikeringkan dengan menggunakan alat *freeze dryer* pada suhu -12 °C.

Pengambilan sampel sedimen, dilakukan pengukuran secara langsung parameter potensial redoks sedimen dengan *Eh meter digital*. Tekstur sedimen ditentukan dengan metode pipet. Konsentrasi karbon organik dalam sedimen dengan metode *Walkley and Black* (1934), konsentrasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen ditentukan dengan *Spektrofotometer Serapan Atom* dengan sistem *graphite furnace*.

Proses preparasi sedimen sebelum dianalisis logam beratnya dengan menimbang 5 gram sedimen yang sudah homogen selanjutnya dikeringkan dengan oven pada suhu 60 °C selama 24 jam. Sedimen dihaluskan dan dimasukkan ke dalam tabung reaksi lalu ditambahkan 10 ml HNO_3 (1:1) kemudian dipanaskan pada suhu 95 °C selama 15 menit, selanjutnya didinginkan lalu ditambahkan 5 ml HNO_3 pekat dan dipanaskan selama 30 menit. Setelah itu ditambahkan 5 ml HNO_3 secara berulang-ulang sampai reaksi terjadi secara sempurna. Dilakukan lagi pemanasan hingga volumenya mencapai 5 ml lalu didinginkan kembali. Kemudian ditambahkan lagi 2 ml *aquabidest* dan 3 ml H_2O_2 (30%) kemudian dipanaskan beberapa menit lalu ditambahkan lagi 1 ml H_2O_2 dan pemanasan dilanjutkan sampai volume menjadi 5 ml dan setelah itu didinginkan. Ditambahkan lagi 10

ml HCl pekat lalu dipanaskan pada suhu 95 °C selama 15 menit, selanjutnya disaring dengan kertas saring *whatman* dan siap dianalisis dengan *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) varian *Shimudzu-AA7000*.

Penentuan tekstur sedimen yang terdiri dari *sand*, *silt*, *clay* (pasir, lanau, dan liat) kemudian diproyeksikan dalam segitiga tekstur sedimen dan dihitung persentasenya berdasarkan skala *Wenworth*. Analisis hubungan karakteristik sedimen (tekstur, kandungan karbon organik, dan potensial redoks sedimen) dengan distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dianalisis menggunakan regresi linier.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsentrasi logam berat Pb tertinggi ditemukan pada titik 1 yang berada pada zona perairan sungai sebesar 3,30 mg/kg berat kering. Sumber potensial Pb dalam sungai berasal dari pemukiman, aktivitas pertanian, dan transportasi darat yang masuk ke dalam aliran sungai Jeneberang lalu terakumulasi di dalam perairan sungai. Konsentrasi yang tinggi juga ditemukan pada titik 14 yaitu pada perairan pantai sebelah utara estuaria Jeneberang.

Tingginya konsentrasi Pb dalam sedimen pada titik 14 karena dekat dengan aktivitas pelabuhan dan industri kapal yang berkontribusi menyumbang polutan logam berat Pb ke dalam perairan. Selain itu, sumber lain yang berpotensi menyumbang polutan logam berat Pb adalah keberadaan rumah sakit, hotel, dan mall di pesisir pantai Losari yang dekat dengan titik 14 serta aktivitas transportasi darat yang ikut menyumbang Pb dari buangan asap kendaraan karena TEL (*tetra ethyl lead*) digunakan sebagai peningkat nilai oktan bahan bakar sehingga buangan dari asap kendaraan dapat meningkatkan Pb dalam lingkungan perairan.

Konsentrasi terendah ditemukan pada titik 4 yang berada di zona perairan estuaria yaitu sebesar 0,449 mg/kg berat kering (Gambar 2). Diduga konsentrasi terendah Pb dalam sedimen pada titik 4 karena kuatnya proses pengadukan atau turbulensi massa air sehingga terjadi proses desorpsi logam

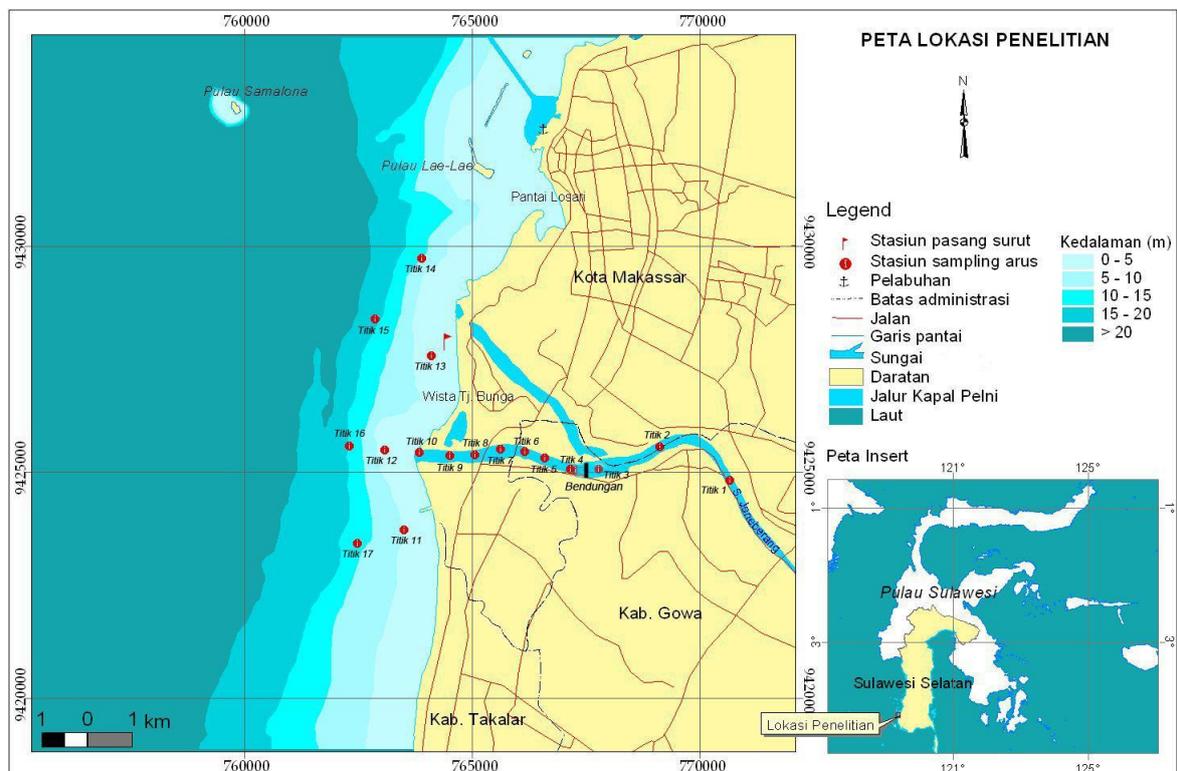
dari sedimen ke dalam kolom air akibat proses resuspensi sedimen. Hal ini dikemukakan oleh Lenzi (2008) bahwa resuspensi sedimen menyebabkan terjadinya desorpsi atau pelepasan logam di dalam kolom air sebagai dampak lanjutan yang muncul adalah perubahan pola interaksi logam berat terlarut dan partikulat dalam kolom air. Mekanisme tersebut menggambarkan kondisi yang selalu terjadi di perairan estuaria sehingga perilaku logam berat di perairan estuaria sangat spesifik dan dinamis.

Lebih lanjut Lenzi (2008) menyatakan bahwa efek resuspensi bergantung pada musim dan kondisi dasar perairan. Misalnya efek resuspensi berupa peningkatan nitrogen yang terjadi secara tiba-tiba akibat pencampuran antara air jebakan dalam sedimen (*interstitial water*) dengan kolom air, namun jumlah yang dilepaskan dipengaruhi oleh gradien difusinya dalam periode waktu yang lama. Resuspensi sedimen dengan karakter permukaan yang halus meningkatkan oksidasi dalam sedimen sehingga terjadi peningkatan nilai Eh,

penurunan bahan organik namun tidak menunjukkan peningkatan nutrisi dan konsumsi oksigen secara signifikan dalam kolom air.

Pola distribusi dan akumulasi logam berat Pb menunjukkan penurunan konsentrasi dalam perairan estuaria, hal mengindikasikan bahwa sumber logam berat Pb dalam estuaria berasal dari perairan pantai dan sungai. Variasi distribusi dan akumulasi logam berat Pb di perairan estuari ditentukan oleh input material dari daratan melalui aliran sungai dan dari laut melalui siklus pasang surut dan proses fisika-kimia-biologi yang berlangsung di dalam estuaria.

Rata-rata total konsentrasi Pb dalam sedimen di lokasi penelitian sebesar 1,987 mg/kg berat kering. Penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Werorilangi *et al.*, 2013 yang menyatakan bahwa distribusi logam Pb di sekitar perairan pantai Kota Makassar termasuk pantai Losari cukup tinggi. Perbandingan hasil penelitian ini dengan beberapa penelitian lain disajikan pada Tabel 2.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian dan sebaran titik sampling di tiga zona perairan (Sumber peta; diolah dari data Citra Landsat 7 ETM+)

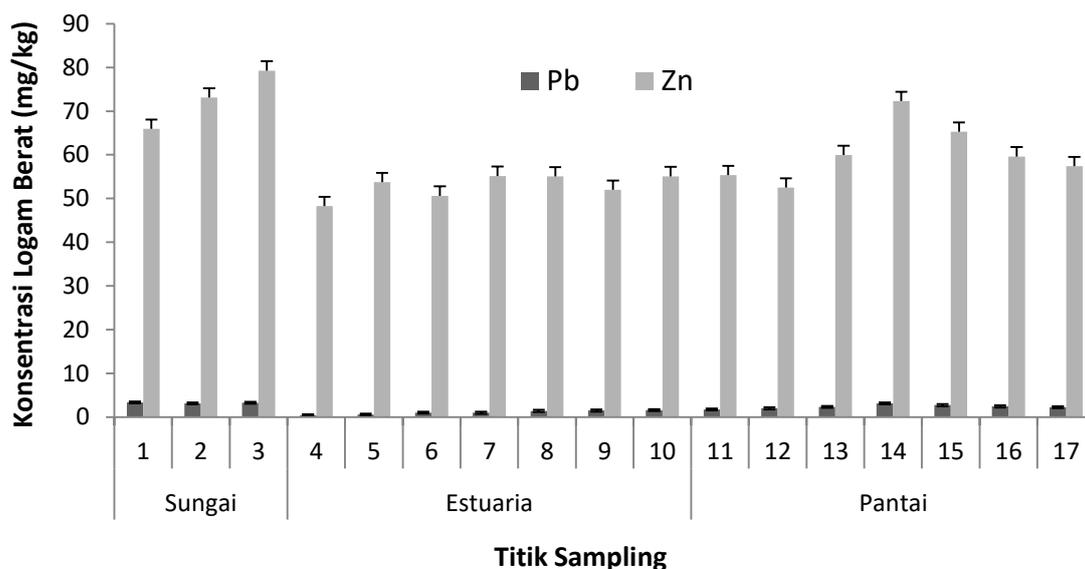
Konsentrasi logam berat Pb dalam sedimen pada semua titik sampling masih di bawah kadar Pb alami dalam kerak bumi, sebagaimana Mohiuddin *et al.*, 2010 menyatakan bahwa konsentrasi alami Pb dalam kerak bumi adalah 12,5 mg/kg atau menurut Louma dan Rainbow, 2008 sebesar 14 mg/kg dan menurut Effendi, 2003 sebesar 15 mg.kg⁻¹. *Canadian Council of Ministers for the Environment (CCME, 2002)* menyatakan bahwa nilai ambang batas logam Pb dalam sedimen untuk perlindungan biota adalah sebesar 35 mg/kg berat kering dengan demikian perairan di sekitar lokasi penelitian masih aman bagi kelangsungan hidup biota. Baku mutu menurut US NOAA bahwa konsentrasi logam berat Pb dalam sedimen yang aman bagi biota (ERL; *Effect Range Low*) atau konsentrasi logam berat Pb dalam sedimen yang tidak memberikan efek negatif bagi biota sebesar 46,7 mg/kg dan konsentrasi yang sudah bisa memberikan efek negatif bagi biota (ERM; *Effect Range Medium*) sebesar 218 mg/kg (Turki, 2007), maka berdasarkan hal tersebut konsentrasi Pb di lokasi penelitian masih aman bagi kelangsungan hidup biota.

Konsentrasi logam berat Zn dalam sedimen tertinggi diperoleh di titik 3 pada zona perairan sungai yaitu sebesar 79,275 mg/kg berat kering. Besarnya konsentrasi Zn di titik ini diduga karena keberadaan

bendungan menyebabkan pola aliran air dari sungai tertahan sehingga terjadi deposisi partikel sehingga logam terakumulasi cukup tinggi dalam sedimen. Adapun konsentrasi Zn terendah berada pada titik 4 yaitu sebesar 48,284 mg/kg berat kering yang merupakan zona perairan estuaria (Gambar 2).

Tingginya konsentrasi logam berat Zn dalam sedimen diduga terutama berasal dari hasil pelapukan dan pengikisan batuan di lahan atas yang kemudian terbawa oleh aliran air sungai baik sebagai logam berat terlarut maupun berbentuk partikulat. Adapun input lain yang ikut menyumbang logam berat Zn adalah dari aktivitas pemukiman dan pertanian.

Distribusi dan akumulasi logam berat Zn dalam sedimen menunjukkan pola yang cenderung sama dengan logam berat Pb dimana konsentrasi terendah diperoleh pada zona perairan estuaria dan konsentrasi tinggi ditemukan pada zona perairan sungai. Kondisi ini menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi logam Zn dalam estuaria disebabkan karena mekanisme filter (penyaringan) yang terjadi secara alami di titik batas atas bendungan. Mekanisme filter ini terutama diperankan oleh keberadaan partikel tersuspensi yang mengadsorpsi logam terlarut dalam kolom



Gambar 2. Konsentrasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen di tiga zona perairan.

air yang kemudian terdeposisi ke dasar perairan sungai sehingga logam berat yang terdistribusi masuk ke estuaria menurun drastis.

Konsentrasi logam berat Zn dalam sedimen pada zona perairan sungai (titik 2 dan 3) dan pantai (14) lebih besar dibanding kadar alami logam berat dalam sedimen berdasarkan Mohiuddin *et al.*, 2010 dan Effendi, 2003 yang menyatakan bahwa konsentrasi alami Zn dalam kerak bumi adalah 70 mg/kg. Adapun konsentrasi logam berat Zn di zona perairan estuaria masih lebih kecil dibanding kadar alaminya. Bila menggunakan acuan Louma dan Rainbow, 2008 bahwa kadar alami logam berat Zn dalam kerak bumi sebesar 75 mg/kg maka hanya titik 3 yang melampaui kadar alami.

Canadian Council of Ministers for the Environment (CCME, 2002) menyatakan bahwa nilai ambang batas logam Zn dalam sedimen untuk perlindungan biota adalah sebesar 123 mg/kg berat kering, maka lokasi penelitian masih aman bagi kelangsungan hidup biota. Sedang baku mutu menurut US NOAA bahwa konsentrasi logam berat Zn dalam sedimen yang aman bagi biota (ERL; *Effect Range Low*) atau konsentrasi logam berat Zn dalam sedimen yang tidak memberikan efek negatif bagi biota sebesar 150 mg/kg dan konsentrasi ERM yaitu konsentrasi yang sudah bisa memberikan efek negatif bagi biota (ERM; *Effect Range Medium*) sebesar 410 mg/kg (Turki, 2007), maka lokasi penelitian menunjukkan bahwa kisaran konsentrasi Zn dalam sedimen belum memberikan efek negatif bagi biota.

Kisaran konsentrasi logam berat Pb dan Zn di lokasi penelitian lebih rendah jika dibanding dengan penelitian Rastina, 2012 di sungai Tallo tetapi sedikit lebih tinggi dibanding hasil penelitian Werorilangi *et al.*, 2013. Sementara jika dibanding dengan hasil penelitian di beberapa lokasi di perairan lainnya di Indonesia maka kisaran konsentrasi Pb di lokasi penelitian cukup rendah sedang kisaran konsentrasi logam Zn termasuk tinggi kecuali hasil penelitian Lestari dan Budiyanto, 2013 di Perairan Gresik yang lebih tinggi (Tabel 2).

Karakteristik Fisika Kimia Sedimen

Tekstur sedimen di lokasi penelitian secara umum didominasi oleh fraksi pasir dengan kisaran antara 3-88 % dengan rata-rata persentase 57,324 %. Komponen fraksi sangat halus yang terdiri dari fraksi lempung (*clay*) dan lanau (*silt*) dengan kisaran dan rata-rata adalah 6-77 % (27,882) dan 2-68 % (14,794) seperti disajikan pada Gambar 3. Komposisi tekstur pasir (*sand*) dominan di lokasi penelitian mengindikasikan bahwa pergerakan massa air di lokasi penelitian cukup kuat sehingga yang mengalami deposisi ke dasar perairan adalah tekstur yang lebih besar berupa pasir. Pernyataan ini diperkuat oleh Perillo (1995) bahwa perairan dengan pergerakan massa air yang kuat mempunyai tekstur yang lebih besar berupa pasir.

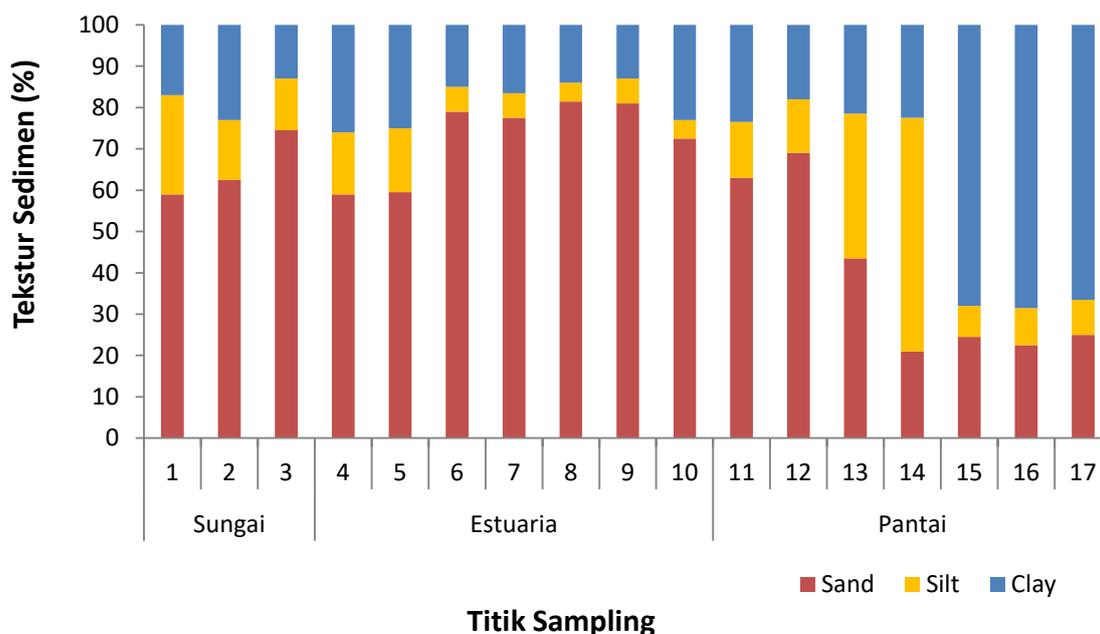
Pola sebaran fraksi pasir (*sand*) menunjukkan persentase terendah diperoleh pada zona perairan pantai dan persentase tertinggi terdapat pada zona perairan estuaria. Adapun pola sebaran fraksi halus (*clay* dan *silt*) menunjukkan persentase tekstur halus (*clay*) yang terendah didapatkan pada zona perairan sungai dan *silt* terendah pada zona perairan estuaria, sedang persentase tertinggi fraksi *clay* dan *silt* ditemukan di perairan pantai.

Secara umum pada zona perairan dengan pergerakan arus yang lemah, maka partikel halus akan terdeposisi ke dasar perairan sehingga fraksi halus akan lebih dominan ditemukan. Kondisi ini banyak ditemukan pada perairan laut dengan pola aliran cenderung laminar sehingga mempengaruhi angkutan partikel kasar dari sungai serta pengaruh dinamika pantai sudah sangat kecil. Sebaliknya, fraksi sedimen berupa pasir (*sand*) dominan dijumpai pada zona estuaria karena zona perairan ini pergerakan massa air yang cukup kuat terutama pengadukan massa air (*turbulensi*) sehingga partikel berukuran halus tidak dapat terdeposisi dan yang mengendap hanya partikel berukuran besar.

Karakter perairan yang didominasi tekstur sedimen yang halus memiliki kecenderungan mengikat logam berat lebih

tinggi dibanding tekstur sedimen yang kasar, begitupun dengan kandungan organik karbon yang lebih tinggi akan mengikat lebih banyak logam berat. Demikian pula halnya dengan peranan nilai potensial redoks yang menentukan mekanisme reaksi oksidasi reduksi dalam pengikatan dan pelepasan logam berat.

Stecko dan Bendell-Young (2000) bahwa ketersediaan logam berat dalam sedimen sangat berkaitan erat dengan sifat-sifat dan ukuran sedimen. Sedimen yang mengandung jumlah mineral lempung (*clay*) dan bahan organik akan cenderung mengakumulasi logam lebih tinggi, karena senyawa-senyawa tersebut memiliki sifat



Gambar 3. Komposisi tekstur sedimen (%) di tiga zona perairan berbeda

Tabel 2. Perbandingan hasil penelitian konsentrasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen (mg/kg berat kering) di beberapa lokasi perairan di dunia.

Referensi	Lokasi Penelitian	Pb	Zn
Penelitian ini	Perairan Jeneberang	0,449-3,330	48,284-79,275
Werorilangi <i>et al.</i> 2013	Perairan Pantai Kota Mks	0,38-2,58	0-107,49
Ahmad, 2013	Pulau Bangka	5,794	16,706
Lestari dan Budiyanto, 2013	Perairan Gresik	1,74-12,70	77,3-405,0
Armid <i>et al.</i> (2014)	Teluk Kendari	0,84-17,02	-
Tornero <i>et al.</i> (2014)	Estuaria Guadalquivir	30-54	69-190
Bastami <i>et al.</i> (2015)	Laut Caspia, Iran	7,13-13,00	26,95-28,00
Hu <i>et al.</i> (2015)	Sungai Changjiang	13,5-35,5	47,2-124
Jiang <i>et al.</i> (2015)	Laut Kuning (Yellow Sea)	4,31-21,9	18,8-96,2
Parra <i>et al.</i> (2015)	Teluk Quintero, Chile	17-36	65-167
Al-Rashdi <i>et al.</i> (2015)	Perairan Pantai Abu Dhabi	1,9	8,2
Liu <i>et al.</i> (2015)	Estuaria Yangtze	28	70
Xu <i>et al.</i> (2015)	Perairan Pantai Shandong Utara, Peninsula	11,0-26,3	40,5-89,8
Wu <i>et al.</i> (2016)	Teluk Bohai	16- 49	75- 288
Komalasari <i>et al.</i> (2019)	Teluk Klabat	7,15-7,73	-
Suryono <i>et al.</i> (2019)	Muara Sungai Kota Semarang	5-18	-

mengikat logam. Komponen hasil oksida besi, mangan dan bahan organik merupakan komponen geokimia yang paling penting dalam mengontrol pengikatan logam-logam berat dalam sedimen estuaria.

Fraksi sangat halus (*clay* dan *silt*) lebih memiliki kemampuan berikatan dengan logam berat karena semakin halus tekstur maka luas permukaannya semakin besar sehingga kapasitas untuk berikatan dengan logam juga makin besar. Selain itu, fraksi sangat halus juga memiliki kemampuan berikatan dengan bahan organik sehingga logam dengan bahan organik akan membentuk ikatan kompleks dalam sedimen. Sebagaimana Sanusi, (2006) menyatakan bahwa konsentrasi logam berat dalam sedimen umumnya lebih tinggi pada sedimen berupa liat, lumpur, pasir berlumpur, dan campuran ketiganya dibanding sedimen berupa pasir murni. Hal ini disebabkan oleh adanya gaya tarik elektro kimia partikel sedimen yang lebih kuat pada sedimen yang lebih halus.

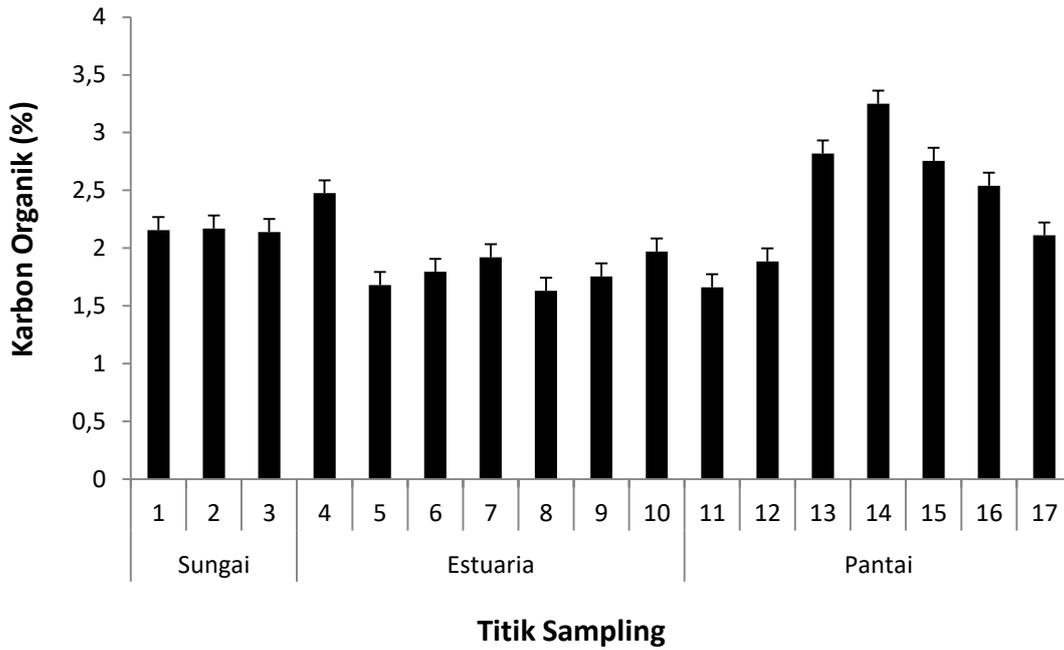
Oleh karena itu, berdasarkan data dan analisis yang dikemukakan di atas maka diketahui bahwa wilayah perairan yang mengalami deposisi paling besar terjadi di perairan dengan pola aliran laminar (stabil) yaitu di perairan pantai. Dengan demikian, potensi akumulasi logam berat paling besar terdapat pada wilayah perairan yang memiliki karakter tekstur yang lebih halus berupa *clay* dan *silt* yaitu dimulai dari mulut estuaria ke perairan pantai.

Kandungan karbon organik berkisar antara 1,63-3,25 % dengan rata-rata sebesar 2,159 % seperti disajikan pada Gambar 4. Sumber karbon organik dalam sedimen dalam perairan berasal dari aliran sungai baik dalam bentuk terlarut maupun berasosiasi dengan partikel tersuspensi dan sebagian dari laut. Namun sumber utamanya berasal dari partikel yang mengikat karbon organik. Hal ini sesuai dengan yang dikemukakan oleh Kemp (1989) bahwa kebanyakan bahan organik berbentuk partikulat yang kemudian mengendap di permukaan sedimen sehingga dapat meningkatkan konsentrasi bahan organik dalam sedimen.

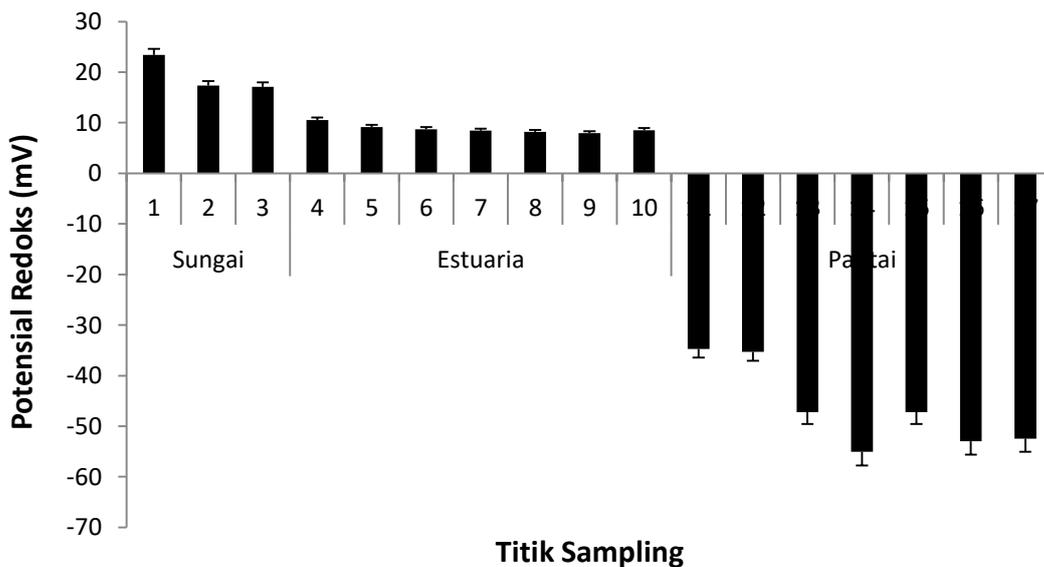
Distribusi kandungan bahan organik cenderung stabil di ketiga zona perairan sungai, estuaria, dan pantai meski terlihat terdapat kecenderungan lebih rendah di estuaria. Distribusi yang karbon organik yang merata terjadi karena sumber utama karbon organik di dalam perairan berasal dari karbon organik bentuk partikulat yang berasal dari daratan hasil erosi lahan atas terbawa oleh sungai. Adapun kecenderungan rendah di estuaria karena sumber karbon organik bentuk partikulat mengalami deposisi di atas bendungan yang merupakan batas wilayah perairan sungai. Kandungan maksimum ditemukan pada titik 14 yang merupakan wilayah perairan pantai. Tingginya kandungan karbon organik pada titik 14 diduga karena wilayah perairan pantai di bagian utara Jeneberang terdapat sejumlah aktivitas yang dapat menyumbang buangan bahan organik seperti restoran, rumah makan, hotel, rumah sakit dan aktivitas pelabuhan. Sumber karbon organik dalam perairan juga berasal dari aliran sungai baik dalam bentuk terlarut maupun berasosiasi dengan partikel tersuspensi dan dari hasil dekomposisi dan eksresi organisme laut.

Kondisi perairan di sekitar Jeneberang hanya berupa hamparan pasir tanpa keberadaan mangrove menyebabkan suplai bahan organik yang berasal dari jatuhnya serasah pohon mangrove berupa daun, ranting, cabang, dan buah tidak ada sehingga input bahan organik ke dalam perairan estuaria sangat kecil. Karbon organik dalam sedimen memiliki kemampuan untuk berikatan dengan logam berat. Karbon dalam sedimen membentuk ikatan kompleks (*complexation*) dengan logam berat, sehingga semakin tinggi konsentrasi karbon organik dalam sedimen, maka semakin tinggi konsentrasi polutan logam berat dalam sedimen, seperti yang diungkapkan oleh Sanusi, 2006 bahwa kandungan bahan organik memiliki hubungan yang positif dengan konsentrasi logam berat dalam sedimen.

Potensial redoks (Eh) merupakan sifat elektrokimia yang dapat dipakai sebagai indikasi dalam mengukur derajat an-aerobik tanah dan tingkat transformasi biogeokimia yang terjadi. Nilai potensial redoks sedimen di



Gambar 4. Kandungan karbon organik (%) dalam sedimen di tiga zona perairan berbeda



Gambar 5. Nilai potensial redoks sedimen (mV) di tiga zona perairan berbeda

lokasi penelitian berkisar antara -52,43 sampai 23,43 mV, termasuk kategori zona reduksi dan transisi atau berada pada kondisi anaerob dan aerob, seperti disajikan pada Gambar 5. Odum (1998) mengelompokkan sedimen dasar suatu perairan menjadi 3 zona yang didasarkan pada nilai potensial redoks. Ketiga zona tersebut adalah zona oksidasi

dengan nilai $E_h > 200$ mV, zona transisi dengan nilai E_h antara 0-200 mV dan zona reduksi dengan nilai $E_h < 0$.

Perubahan suasana oksidatif ke reduktif mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk besi, dari feri tereduksi menjadi fero dan masuk ke dalam sedimen. Pada kondisi

anaerob, mikroorganisme fakultatif dan obligatif akan menggunakan oksidan anorganik selain oksigen sebagai akseptor elektron, seperti NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , CO_2 , N_2 dan H^+ , yang kemudian akan direduksi berturut-turut menjadi N_2 , Mn^{2+} , Fe^{2+} , H_2S , CH_4 , NH_4^+ , dan NH_2 .

Mangan oksida dan besi oksida dalam sedimen mempengaruhi kandungan dan asosiasi logam berat dalam sedimen. Fe-oksida dan Mn-oksida dalam keadaan oksidasi dapat menyerap kation dan anion dari larutan serta logam dalam air terutama logam runtuhan. Dalam keadaan reduksi logam yang terserap dapat diremobilisasi kembali ke larutan dan bertindak sebagai sumber logam dalam perairan, namun logam yang terikat oleh fraksi sedimen akan mengalami diagenesis yang menyebabkan peningkatan bobot molekul dan hilangnya gugus fungsi (Connel dan Miller, 1995).

Zona reduksi yang terdapat pada perairan pantai terutama titik yang jauh dari garis pantai disebabkan karena kurangnya sirkulasi massa air (alirannya lambat dan polanya laminar) sehingga terjadi deplesi oksigen (kadar oksigen menurun). Pada perairan estuaria dibanding sungai dan pantai, potensial redoks lebih tinggi karena di perairan estuaria terjadi pengadukan massa air (pola aliran turbulen) akibat pertemuan massa air laut dan sungai yang berbeda densitasnya. Zona reduksi juga bisa terjadi akibat adanya aktivitas bakteri yang membutuhkan oksigen dalam mendegradasi bahan organik.

Penurunan nilai potensial redoks sedimen ke arah laut disebabkan oleh peningkatan pH ke arah laut dan penurunan itu semakin tajam ketika kandungan bahan organik tinggi dalam sedimen dan siklus pergerakan massa air kecil serta penambahan kedalaman. Kondisi itu terlihat pada titik 14-17 yang berada pada perairan laut dengan titik sampling paling luar. Penurunan nilai potensial redoks disebabkan adanya kontribusi bahan organik ke dalam sedimen, baik gugus hidroksil maupun senyawa karbosil lainnya yang dapat memberi keseimbangan terhadap aktivitas ion H^+ sehingga menyebabkan menurunnya konsentrasi ion H^+ .

Penurunan nilai potensial redoks juga mendorong berkurangnya jumlah elektron dalam sedimen. Jumlah elektron berbanding lurus dengan potensial redoks sehingga penurunan jumlah elektron secara otomatis menurunkan pula nilai Eh. Perairan dalam juga dicirikan dengan kondisi deplesi O_2 sehingga diikuti oleh penurunan nilai potensial redoks sebagaimana Rhoads (1974), bahwa konsentrasi oksigen dalam sedimen berhubungan erat dengan nilai potensial redoks (Eh) sedimen. Nilai Eh +400 mV, konsentrasinya antara 4-10 mg/l. Sedangkan pada nilai Eh +300 mV, konsentrasi oksigen sekitar 0.3 mg/l dan pada +200 mV, oksigennya sekitar 0.1 mg/l, konsentrasi oksigen menjadi tidak terukur jika nilai Eh di bawah 0 mV.

Peningkatan nilai pH dapat terjadi karena adanya kontribusi bahan organik yang melepaskan ion OH^- karena terjadi proses reduksi. Demikian pula keberadaan ion Fe^{+3} dalam sedimen tereduksi berubah menjadi Fe^{+2} sehingga berpeluang melepaskan OH^- dan meningkatkan pH sedimen atau menurunkan Eh. Mekanisme reaksi oksidasi-reduksi dalam sedimen ditentukan oleh ketersediaan oksigen terlarut dalam air jebakan (*interstitial water*) dan pH sedimen. Pada kondisi oksigen rendah akan terjadi reaksi reduksi sehingga senyawa kimia yang terbentuk adalah H_2S , CH_4 , NH_3 , N_2 , Fe^{2+} , dan Mn^{2+} yang bereaksi membentuk endapan kompleks. Pada kondisi oksigen cukup tersedia akan terjadi reaksi oksidasi dimana senyawa kimia yang terbentuk adalah SO_4^{2-} , CO_2 , CO_3^{2-} , NO_3^- , Fe^{3+} dan Mn^{4+} yang bereaksi membentuk endapan kompleks (Parsons dan Takahashi, 1977 dalam Sanusi, 2006).

Pengaruh Karakteristik Fisika Kimia Sedimen terhadap Distribusi dan Akumulasi Logam Berat Pb dan Zn

Hasil analisis regresi dan korelasi terhadap beberapa parameter yang mempengaruhi distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen menunjukkan hubungan yang linier atau berbanding lurus antara tekstur sedimen halus dan kandungan organik karbon dengan konsentrasi logam berat dalam sedimen, tetapi korelasi nilai potensial redoks

dan tekstur kasar terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen berbanding terbalik. Artinya, semakin besar persentase tekstur sedimen yang berukuran halus dan tingginya kandungan karbon organik dalam sedimen maka semakin besar pula konsentrasi dan akumulasi logam berat yang terikat dalam sedimen, namun semakin kecil nilai potensial redoks dan tekstur kasar maka konsentrasi logam berat dalam sedimen semakin besar. Sanusi (2006) menyatakan bahwa kandungan bahan organik memiliki hubungan yang positif dengan konsentrasi logam berat dalam sedimen.

Persamaan regresi yang diperoleh menunjukkan bahwa karakteristik fisika kimia sedimen yang paling berpengaruh terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen di lokasi penelitian adalah kandungan karbon organik. Peranan karbon organik dalam mengikat logam berat terjadi melalui pembentukan ikatan kompleks antara logam berat dan karbon organik terutama dalam hal ini yang paling berperan adalah asam humus (*humic acid*). Chester (1990) menyatakan bahwa reaktivitas biogeokimia dalam perairan alami diatur oleh sejumlah parameter fisika-kimia seperti: pH, redoks potensial, salinitas, konsentrasi *complexing ligand*, berbagai jenis nutrien, komponen organik dan bahan-bahan partikulat. Demikian pula Togwell (1979), bahwa konsentrasi logam berat pada sedimen, tidak saja ditentukan oleh proses pelapukan batuan, tetapi juga dipengaruhi oleh komposisi mineral dan ukuran (partikel) endapan sedimen. Faktor berpengaruh berikutnya berturut-turut adalah tekstur sedimen dan potensial redoks.

Nilai keeratan hubungan antara distribusi dan akumulasi logam berat Pb dalam sedimen dengan parameter tekstur, kandungan karbon organik, dan potensial redoks ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 0,765 hal ini menunjukkan bahwa keeratan hubungannya cukup tinggi, sedang untuk logam Zn diperoleh nilai R^2 sebesar 0,586 juga menunjukkan adanya keeratan hubungan. Distribusi dan akumulasi logam berat dalam sedimen di suatu wilayah perairan ditentukan oleh beberapa faktor seperti proses pelapukan batuan, endapan

partikel sedimen, status redoks, konsentrasi karbon organik, berbagai jenis nutrien, tekstur sedimen, dan bioturbasi (Chester, 1990; Togwell, 1979; Meador *et al.* 1998; Stecko dan Bendell-Young, 2000). Demikian pula, perubahan kondisi lingkungan seperti pH, suhu, dan potensial redoks dapat menyebabkan lepasnya ikatan logam berat dari permukaan partikel dan menjadi logam terlarut sehingga mengubah peran sedimen yang semula menjadi *sink* (penyerap) logam berat menjadi *source* (sumber) logam berat di dalam perairan (Wang *et al.* 2015).

KESIMPULAN

Distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn menunjukkan pola yang serupa dimana diperoleh konsentrasi paling rendah di perairan estuaria dan konsentrasi tinggi pada perairan pantai dan sungai. Parameter tekstur, kandungan organik karbon dalam sedimen, dan potensial redoks sedimen memberikan pengaruh terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen. Distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen menunjukkan hubungan yang linier atau berbanding lurus antara tekstur sedimen halus dan kandungan karbon organik, namun korelasi nilai potensial redoks sedimen dan tekstur sedimen kasar terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen berbanding terbalik. Parameter yang paling berpengaruh terhadap distribusi dan akumulasi logam berat Pb dan Zn dalam sedimen adalah kandungan karbon organik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, F. 2013. Distribusi dan Prediksi Tingkat Pencemaran Logam Berat (Pb, Cd, Cu, Zn, dan Ni) dalam Sedimen di Perairan Pulau Bangka Menggunakan Indeks Beban Pencemaran dan Indeks Geoakumulasi. *Jurnal Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis* Vol. 5, No. 1, Juni 2013:170. doi : 10.29244/jitkt.v5i1
- Al-Rashdi, S., Arabi, A.A., Howari, F.M., & Siad, A. 2015. Distribution of heavy metals in the coastal area of Abu Dhabi in the United Arab Emirates. *Mar Pollut Bull* 97, 494–498. doi : 10.1016/j.marpolbul.2015.05.052

- Arifin, Z. 2008. Nasib kontaminan logam dan implikasinya pada komunitas bentik di Delta Berau, Kalimantan Timur. Laporan akhir kumulatif Riset Kompetitif Tahun 2006-2008. Puslit Oseanografi-LIPI. Jakarta.
- Arifin, Z. 2011. Konsentrasi Logam Berat di Air, Sedimen, dan Biota di Teluk Kelabat, Pulau Bangka. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 3(1):104. doi : 10.29244/jitkt.v3i1
- Armid, A, Shinjo, R, Zaeni, A, Sani, A., & Ruslan, R. 2014. The distribution of heavy metals including Pb, Cd and Cr in Kendari Bay surficial sediments. *Mar Pollut Bull* 84, 373–378. doi : 10.1016/j.marpolbul.2014.05.021
- Bastami, K.D, Bagheri, H, Kheirabadi, V, Zaferani, G.G, Teymori, M.B, Hamzehpoor, A, Soltani F, Haghparast, S, Harami, S.R.M, Ghorghani, N.F., & Ganji, S. 2015. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 81: 262–267. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.01.029
- Bryan, G.W. & Langston, W.J. 1992. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environ. Pollut.* (76): 89-131. doi : 10.1016/0269-7491(92)90099-V
- Canadian Council of Ministers for the Environment (CCME). 2002. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life Summary Table.CCME. Winnipeg, MB. 7p.
- Chester, R. 1990. *Marine Geochemistry*. Unwin Hyman, London, England.
- Connel, D.W & Miller, J.G. 1995. *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*. Diterjemahkan oleh Yanti Koestoer. Penerbit UI Press Press. Jakarta.
- Effendi, H. 2003. *Telaah Kualitas Air. Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*. Penerbit Kanisius, Yogyakarta.
- Hamzah, F. & Setiawan, A. 2010. Akumulasi Logam Berat Pb, Cu, dan Zn di Hutan Mangrove Muara Angke, Jakarta Utara. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 2(2):41-52. doi : doi.org/10.29244/jitkt.v2i2
- Hu, B.Q., Cui, R.Y., Li, J., Wei, H.L., Zhao, J.T., Bai, F.L., Song, W.Y. & Ding, X. 2015. Occurrence and distribution of heavy metals in surface sediments of the Changhua River Estuary and adjacent shelf (Hainan Island). *Marine Pollution Bulletin*, 76, 400–405. doi : 10.1016/j.marpolbul.2013.08.020
- Jiang, X., Teng, A., Xu, W. & Liu, X. 2015. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 83: 366–375. doi : 10.1016/j.marpolbul.2014.03.020
- Kemp, W.M. 1989. *Estuarine Chemistry*. In Day, J.W., C.A.S. Hall, W.M. Kemp, and A. Yanez-Arancibia (eds): estuarine ecology, section II: physycal considerations. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Komalasari, A., Afriyansyah, B., Ihsan, M., & Nugaraha, M.A. 2019. Bioakumulasi Logam Berat Pb dan Cu terhadap *Penaeus merguensis* di Perairan Teluk Kelabat Bagian Dalam. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(1):1–8. doi : 10.14710/jkt.v0i0.3727
- Lenzi, M. 2008. Resuspension of Sediment as a Method for Managing Eutrophic Lagoons. *Marine Pollution: New Research*, Nova Science Publishers, Inc. New York,pp. 15-21.
- Lestari & Budiyanto, F. 2013. Konsentrasi Hg, Cd, Cu, Pb, dan Zn dalam sedimen di Perairan Gresik. *Jurnal Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis* 5(1):182. doi : https://doi.org/10.29244/jitkt.v5i1
- Lestari. 2011. Distribusi dan geokimia logam berat dalam sedimen di Perairan Semarang, Jawa Tengah. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Nasional Tahunan VIII ISOI 2011. Ikatan Sarjana Oseanologi Indonesia*, 25-27 September 2011. Makassar. p204-217
- Liu, Z., Pan, S. Sun Z., Ma, R., Chen, L., Wang, Y. & Wang, S. 2015. Heavy metal spatial variability and historical changes in the Yangtze River estuary and North Jiangsu tidal flat. *Marine Pollution Bulletin*, 98:115–129. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.07.006
- Luoma, S.N. & P.S. Rainbow. 2008. *Metal Contamination in Aquatic Environments* :

- Science and Lateral Management. Cambridge University Press. New York. USA.
- Meador, J.P., Robisch, P.A., Clark, R.C. & Ernest, D.W. 1998. Element in fish and sediment from the Pacific Coast of the United States: result from the national benthic surveillance project. *Marine Pollution Bulletin*, 37(1-2): 56-66. doi : 10.1016/S0025-326X(98)89001-2
- Mohiuddin, M.K., Zakir H.M., Otomo, K., Sharmin, S. & Shikazono, N. 2010. Geochemical distribution of trace metal pollutants in water and sediments of downstream of an urban river. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 7(1):17-28. doi : 10.1007/BF03326113
- Najamuddin, Prartono, T., Sanusi, H.S. & Nurjaya, I.W. 2016. Seasonal distribution and geochemical fractionation of heavy metals from surface sediment in a tropical estuary of Jeneberang River, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 111: 456-462. doi : 10.1016/j.marpolbul.2016.06.106
- Najamuddin & Surahman. 2017. Dispersion, speciation, and pollution assessment of heavy metals Pb and Zn in surface sediment from disturbed ecosystem of Jeneberang Waters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 89. doi : 10.1088/1755-1315/89/1/012030
- Odum, E.P. 1993. Dasar-Dasar Ekologi. Gadjah Mada University Press. Yogyakarta.
- Parra, S., Bravo, M.A., Quiroz, W., Querol, X., & Paipa, C. 2015. Distribution and pollution assessment of trace elements in marine sediments in the Quintero Bay (Chile). *Marine Pollution Bulletin*, 99:256-263. doi : 10.1016/j.marpolbul.2015.07.066
- Rabee, M.A., Al-Fatlawy, Y.F., Own, A.A.H.N.A. & Nameer, M. 2011. Using Pollution Load Index (PLI) and Geoaccumulation Index (I-Geo) for the Assessment of Heavy Metals in Tigris River Sediment in Bagdad Region. *J. of Al- Nahrain University*, 14(4):108-114. doi : 10.22401/JNUS.14.4.14
- Rhoads, D.C. 1974. Organism-Sediment Relations. In *Oceanography and Marine Biology*. Barnes, H. (ed). George Allen and Unwin Ltd, London.
- Samawi, M.F. 2007. Desain Sistem Pengendalian Pencemaran Perairan Pantai Kota. Studi Kasus Perairan Pantai Kota Makassar. Disertasi Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Sanusi, H.S. 2006. Kimia Laut. Proses Fisik Kimia dan Interaksinya dengan Lingkungan. Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan. IPB, Bogor.
- Stecko, J.R.P. & Bendell-Young, L.I. 2000. Contrasting the geochemistry of suspended particulate matter and deposited sediments within an estuary. *Applied Geochemistry*, 15: 753-775. doi : 10.1016/S0883-2927(99)00090-6
- Suryono, C.A., Pratikto, I. & Rusmaharani, A. 2019. Logam Berat Anthropogenik Pb dan Cu pada Lapisan Sedimen Permukaan dan Dasar Muara Sungai di Kota Semarang, Jawa Tengah Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 22(1):87-92. doi : 10.14710/jkt.v22i1.3223
- Togwell, A.J. 1979. Source of heavy metals contamination in a river-lake system. *Environmental Pollution*, (18):131-138. doi : 10.1016/0013-9327(79)90088-0
- Tornero, V., Arias, A.M. & Blasco, J. 2014. Trace element contamination in the Guadalquivir River Estuary ten years after the Aznalcóllar mine spill. *Marine Pollution Bulletin*, 86:349-360. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.06.044
- Turki, A.J. 2007. Metal Speciation (Cd, Cu, Pb and Zn) in Sediments from Al Shabab Lagoon, Jeddah, Saudi Arabia. *Marine Science*, 18 : 191-210. doi : 10.4197/mar.18-1.11
- Walkley A, & Black, L.A. 1934. An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37(1):29-38. doi : 10.1097/00010694-193401000-00003.
- Werorilangi, S., Tahir, A., Noor, A. & Samawi, M.F. 2013. Status Pencemaran dan Potensi Bioavailabilitas Logam di Sedimen Perairan Pantai Kota Makassar. Makalah Seminar Nasional Perikanan, Universitas Hasanuddin, Makassar.
- Wu, Q., Zhou, H., Tam, N.Y.F., Tian, Y., Tan, Y., Zhou, S., Li, Q., Chen, Y., Leung, J.Y.S. 2016. Contamination, toxicity and

speciation of heavy metals in an industrialized urban river: Implications for the dispersal of heavy metals. *Marine Pollution Bulletin*, 104:153–161. doi : 10.1016/j.marpolbul.2016.01.043

Xu, G., Pei, S., Liu, J., Gao, M., Hu, G., Kong X. 2015. Surface sediment properties and

heavy metal pollution assessment in the near-shore area, north Shandong Peninsula. *Marine Pollution Bulletin*, 95: 395–401. doi: 10.1016/j.marpolbul.2015.03.040.