

STUDI BIOAKUMULASI LOGAM BERAT (Pb, Cd, DAN As) PADA RUMPUT LAUT (*Caulerpa racemosa*) DARI TAMBAK TRADISIONAL DI BRONDONG, LAMONGAN

Study of Heavy Metals (Pb, Cd, and As) Bioaccumulation on Seaweed (*Caulerpa racemosa*) from Traditional Fish Pond In Brondong, Lamongan

Cindi Koes Farizky¹, Mirna Fitriani², Nuning Vita Hidayati³, Boedi Setya Rahardja¹, Sapto Andriyono^{4*}

1 Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Airlangga, Surabaya, 60155

2 Program Studi Budidaya Perairan, Fakultas Pertanian, Universitas Sriwijaya, Jl. Palembang Prabumulih KM 32 Indralaya, Ogan Ilir Sumatera Selatan 30662

3 Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman, Kampus Karangwangkal, Jl. dr. Suparno, Purwokerto 53123

4 Departemen Kelautan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Airlangga, Surabaya, 60155

*Korespondensi email: sapto.andriyono@fpk.unair.ac.id

(Received 1 November 2022; Accepted 6 Desember 2022)

ABSTRAK

Rumput laut (*Caulerpa racemosa*) merupakan salah satu makroalga yang memiliki kemampuan untuk mengakumulasi logam berat, sehingga dijadikan sebagai bioindikator pencemaran lingkungan. Wilayah pesisir Lamongan, termasuk di Kecamatan Brondong terdapat berbagai kegiatan industri. Buangan limbah kegiatan industri tersebut akan meningkatkan resiko pencemaran logam berat. Metode penelitian yang digunakan adalah observasi dengan analisis Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). Analisis data yang digunakan yaitu kuantitatif dengan perhitungan berdasarkan Geo-Accumulation Index (Igeo), Contamination Factor (CF), dan Bio Concentration Factor (BCF). Hasil penelitian menunjukkan bahwa rumput laut (*C. racemosa*), air, dan sedimen dari tambak tradisional di Brondong, Lamongan mengandung logam berat (Pb, Cd, dan As) dengan konsentrasi yang rendah. Rata-rata konsentrasi Pb, Cd, dan As pada rumput laut (*C. racemosa*) berturut-turut adalah 0,0901 mg/kg, 0,0124 mg/kg, dan 0,2357 mg/kg. Konsentrasi Pb dan Cd pada air tidak terdeteksi, sedangkan rata-rata konsentrasi As pada air adalah 0,0158 mg/l. Konsentrasi Pb, Cd, dan As pada sedimen berturut-turut adalah 12,3 mg/kg, 0,171 mg/kg, dan 3,74 mg/kg. Nilai Igeo dan CF menunjukkan bahwa logam berat (Pb, Cd, dan As) mengindikasikan tingkat pencemaran dan tingkat kontaminasi yang rendah ($0 < I_{geo} < 1$ dan $CF < 1$). Nilai BCF yang rendah juga menunjukkan bahwa tingkat akumulatif rumput laut (*C. racemosa*) dikategorikan rendah ($BCF < 100$). Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat diketahui bahwa tambak tradisional di Brondong, Lamongan tergolong aman untuk dilakukan kegiatan budidaya rumput laut (*C. racemosa*).

Kata Kunci: Arsen, Bioakumulasi, *Caulerpa racemosa*, Kadmium, Logam Berat, Timbal

ABSTRACT

Seaweed (*Caulerpa racemosa*) is a macroalgae that has the ability to accumulate heavy metals, so that it is used as a bioindicator of environmental pollution. The coastal area of Lamongan, including Brondong District has various industrial activities. Disposal of industrial activity waste will increase the risk of heavy metal pollution. The research method used was observation with Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) analysis. The data analysis used is quantitative with calculations based on the Geo-Accumulation Index (Igeo), Contamination Factor (CF), and Bio Concentration Factor (BCF). The results showed that seaweed (*C. racemosa*), water, and sediment from traditional fish pond in Brondong, Lamongan contained low concentrations heavy metals (Pb, Cd, and As). The average concentrations of Pb, Cd, and As in seaweed (*C. racemosa*) were 0,0901 mg/kg, 0,0124 mg/kg, and 0,2357 mg/kg, respectively. Pb and Cd concentrations in water were not detected, while the average concentration of As in water was 0,0158 mg/l. The concentrations of Pb, Cd, and As in sediment were 12,3 mg/kg, 0,171 mg/kg, and 3,74 mg/kg. Igeo and CF values indicate that heavy metals (Pb, Cd, and As) indicate a low level of pollution and contamination ($0 < I_{geo} < 1$ and $CF < 1$). A low BCF value also indicates that the accumulative level of seaweed (*C. racemosa*) is categorized as low ($BCF < 100$). Based on the results of this study, it can be seen that traditional fish pond in Brondong, Lamongan are classified as safe for seaweed (*C. racemosa*) farming activities.

Key words: Arsenic, Bioaccumulation, Cadmium, *Caulerpa racemosa*, Heavy Metals, Lead

PENDAHULUAN

Rumput laut (*C. racemosa*) merupakan salah satu makroalga yang secara alami tumbuh di perairan Indonesia dan termasuk jenis *edible seaweed* yaitu rumput laut yang dapat dimakan (Fithriani, 2009). Rumput laut yang hidup di dasar perairan sangat mudah menyerap logam berat. Kemampuan yang dimiliki rumput laut dalam mengakumulasi logam berat tersebut, sehingga dijadikan sebagai bioindikator pencemaran lingkungan (Ghazali & Nurhayati, 2018). Bioindikator adalah organisme yang dianggap mampu menilai kondisi yang menunjukkan terjadinya perubahan dalam suatu ekosistem (Gerhardt, 2002). Selain Madura sebagai sentra rumput laut di Provinsi Jawa Timur, Kabupaten Lamongan juga memproduksi rumput laut (*C. racemosa*) untuk pasar lokal (Rachmawan et al., 2021).

Lamongan merupakan kawasan yang padat dengan kegiatan ekonomi (Rachmawan et al., 2021). Wilayah pesisir Lamongan, termasuk di Kecamatan Brondong terdapat berbagai kegiatan industri. Hasil pembuangan limbah dari kegiatan industri tersebut meningkatkan risiko pencemaran (Choirun et al., 2015). Salah satu polutan yang berdampak pada lingkungan perairan yaitu logam berat. Logam berat adalah polutan yang berbahaya bagi makhluk hidup karena tidak dapat dimusnahkan atau dengan kata lain selalu terdapat di alam. Logam berat di badan perairan akan mengendap dan terakumulasi di sedimen, selanjutnya terakumulasi di tubuh biota perairan. Proses ini dikenal sebagai bioakumulasi (Dahuri, 1998). Beberapa logam berat yang sebarannya cukup melimpah di perairan antara lain timbal (Pb), kadmium (Cd), dan arsen (As) (Choirun et al., 2015).

Timbal (Pb) banyak digunakan dalam industri pembuatan baterai Kumar et al (2022), pipa berwarna, pelapis kabel, campuran pada pembuatan pelapis keramik dan bahan bakar (Fardiaz, 2002). Kadmium (Cd) dapat berasal dari limbah industri besi (Wang et al., 2016),

baterai Khan *et al* (2020), Liu *et al* (2014), dan pupuk fosfat Huang *et al* (2022), Luo *et al* (2020). Arsen (As) banyak digunakan dalam industri pertanian seperti bahan pembuatan pestisida, herbisida, insektisida, algisida, rodentisida, dan pupuk serta digunakan sebagai bahan pengawet kayu (Shaban *et al.*, 2016). Pada penelitian ini, kami melakukan pengujian tiga logam berat (Pb, Cd, dan As) pada perairan dan substrat habitat hidup termasuk rumput laut (*C. racemosa*). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang akumulasi logam berat (Pb, Cd, dan As) rumput laut (*C. racemosa*) serta mengetahui aman atau tidaknya kegiatan budidaya rumput laut (*C. racemosa*) di Brondong, Lamongan sehingga dapat dimanfaatkan sebagai acuan untuk peningkatan dan pengembangan kualitas budidaya rumput laut (*C. racemosa*).

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Pengambilan sampel dilakukan pada bulan November 2021 dan analisis data dilakukan hingga bulan Maret 2022. Lokasi pengambilan sampel pada penelitian ini adalah di Tambak Tradisional Dusun Ngesong, Desa Sedayulawas, Kecamatan Brondong, Kabupaten Lamongan (6°52'25.3"S-112°14'27.4"E). Pengujian logam berat pada rumput laut (*C. racemosa*) dan air dilakukan Unit Pelayanan Terpadu Pengujian Mutu dan Pengembangan Produk Kelautan dan Perikanan (UPT PMP2KP) Surabaya. Sedangkan pengujian logam berat pada sedimen dilakukan di PT. Angler BioChemLab Surabaya.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi tiga. Pertama, alat yang digunakan untuk pengambilan sampel dan identifikasi morfologi antara lain yaitu handglove, ekman grab, botol sampel, nampan, baskom, tali rafia, tali karet, *cool box styrofoam*, plastik sampel, timbangan digital, spidol permanen, dan kertas label. Kedua, alat yang digunakan untuk pengukuran kualitas air antara lain yaitu termometer GEA Medical S-006, pH meter MediaTech, refraktometer ATAGO, DO meter YSI 550A, dan secchi disk. Ketiga, alat yang digunakan untuk analisis logam berat yaitu seperangkat alat *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS) dengan spesifikasi IK 2.4.2.6. Bahan yang digunakan antara lain yaitu lima sampel rumput laut (*C. racemosa*), dua sampel air dari tambak budidaya, satu sampel sedimen dari dasar tambak budidaya, es batu, dan aquades.

Pengambilan sampel

Pengambilan sampel rumput laut (*C. racemosa*) menggunakan metode *purposive sampling* yang ditentukan berdasarkan pertimbangan bahwa sampel yang diambil dapat mewakili populasi (Sugiyanto *et al.*, 2016). Rumput laut (*C. racemosa*) disimpan dalam kantong plastik, masing-masing kantong sebanyak 300 g. Sampel air diambil langsung dari tambak budidaya rumput laut (*C. racemosa*) dan dimasukkan ke dalam dua botol steril (volume masing-masing botol sebanyak 600 ml). Sedimen diambil dengan menggunakan *Ekman grab* di dasar tambak budidaya rumput laut (*C. racemosa*) dan disimpan dalam kotak plastik, kemudian dimasukkan ke dalam *cool box styrofoam* untuk dilakukan analisis laboratorium lebih lanjut. Sedimen yang diambil sebanyak 1 liter.

Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil uji laboratorium berupa konsentrasi logam berat (Pb, Cd, dan As) pada rumput laut (*C. racemosa*), air, dan sedimen. Selanjutnya, hasil pengujian dari

laboratorium dilakukan analisis data secara kuantitatif dengan mengolah data menggunakan Excel untuk melakukan perhitungan ke dalam beberapa rumus sebagai berikut:

Geo-Accumulation Index (Igeo)

Geo-Accumulation Index (Igeo) atau indeks geo-akumulasi adalah indeks yang digunakan untuk mengetahui nilai keberadaan dan intensitas pencemaran logam berat antropogenik dalam sedimen (Barbieri, 2016). *Igeo* dapat dihitung dengan menggunakan rumus berdasarkan Muller (1969) sebagai berikut:

$$Igeo = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5 B_n} \right]$$

Keterangan:

Igeo : *Geo-Accumulation Index* (indeks geo-akumulasi)

Log₂ : 0,301

C_n : Konsentrasi logam berat pada sampel sedimen

1.5 : Nilai konstan

B_n : Konsentrasi standar logam berat di alam (Pb=20 mg/kg, Cd=0,3 mg/kg, dan As=13 mg/kg)

Kategori nilai *Igeo* dibagi ke dalam tujuh kelas yaitu tidak tercemar ($Igeo \leq 0$), tidak tercemar hingga tercemar sedang ($0 < Igeo < 1$), tercemar sedang ($1 < Igeo < 2$), tercemar sedang hingga berat ($2 < Igeo < 3$), tercemar berat ($3 < Igeo < 4$), tercemar berat hingga sangat berat ($4 < Igeo < 5$), dan tercemar sangat berat ($Igeo \geq 5$) (Muller, 1969).

Contamination Factor (CF)

Contamination Factor (CF) atau faktor kontaminasi merupakan indeks yang bertujuan untuk mengetahui tingkat kontaminasi yang disebabkan oleh unsur toksik seperti logam (Suyatno et al., 2021). Kategori nilai CF dibagi ke dalam empat kelas yaitu tingkat kontaminasi rendah ($CF < 1$), tingkat kontaminasi sedang ($1 \leq CF < 3$), tingkat kontaminasi cukup ($3 \leq CF < 6$), dan tingkat kontaminasi sangat tinggi ($CF \geq 6$) (Hakanson, 1980). CF dapat dihitung dengan menggunakan rumus berdasarkan Hakanson (1980) sebagai berikut:

$$CF = \frac{C_n}{B_n}$$

Keterangan:

CF : *Contamination Factor* (faktor kontaminasi)

C_n : Konsentrasi logam berat pada sampel sedimen

B_n : Konsentrasi standar logam berat di alam (Pb = 20 mg/kg, Cd = 0,3 mg/kg, dan As = 13 mg/kg)

Bio Concentration Factor (BCF)

Bio Concentration Factor (BCF) atau faktor biokonsentrasi merupakan rasio dari konsentrasi zat dalam jaringan organisme akuatik terhadap konsentrasi dalam air atau sedimen (Widawati et al., 2020). Kategori nilai BCF dibagi menjadi tiga yaitu akumulatif rendah ($BCF < 100$), akumulatif sedang ($100 \leq BCF \leq 1000$), dan akumulatif tinggi ($BCF > 1000$) (Baker, 1981). BCF dihitung dengan menggunakan rumus berdasarkan Baker (1981) sebagai berikut:

$$BCF = \frac{C_{org}}{C}$$

Keterangan:

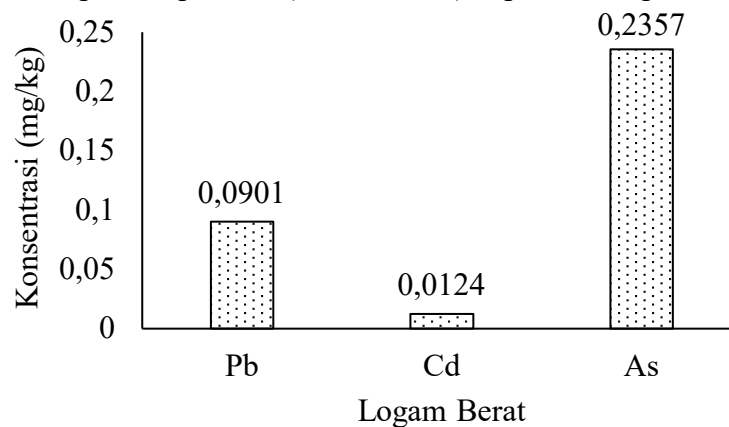
BCF : *Bio Concentration Factor*/faktor biokonsentrasi

C_{org} : Konsentrasi logam berat dalam organisme

C : Konsentrasi logam berat dalam air atau sedimen

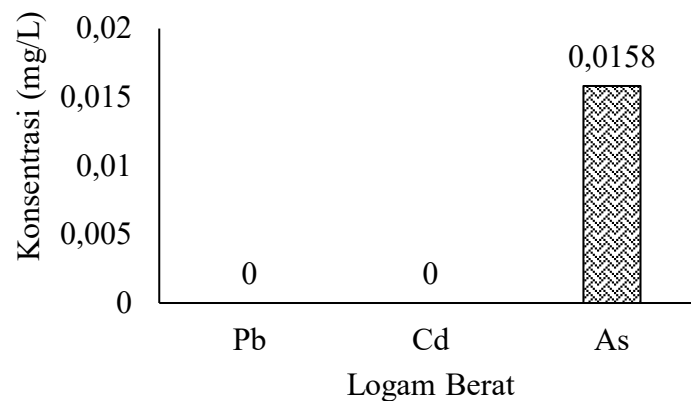
HASIL

Pada penelitian ini, kami berhasil melakukan pengujian konsentrasi logam berat pada rumput laut (*C. racemosa*), air, dan sedimen. Hasil rata-rata logam berat (Pb, Cd, dan As) yang teridentifikasi pada sampel rumput laut (*C. racemosa*) dapat dilihat pada Gambar 1.



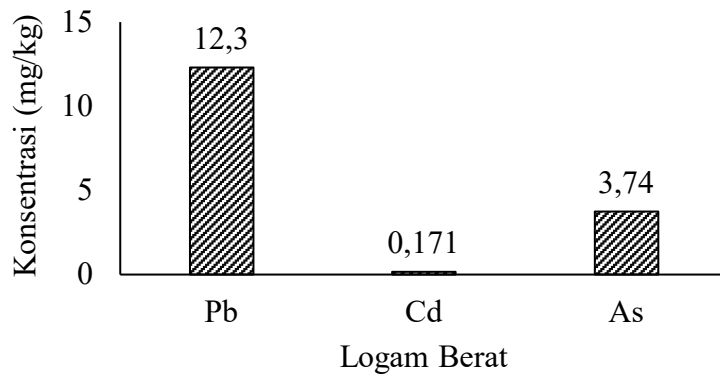
Gambar 1. Grafik Hasil Rata-Rata Pengujian Sampel Rumput Laut (*C. racemosa*)

Hasil rata-rata pengujian logam berat (Pb, Cd, dan As) pada sampel air dapat dilihat pada Gambar 2.



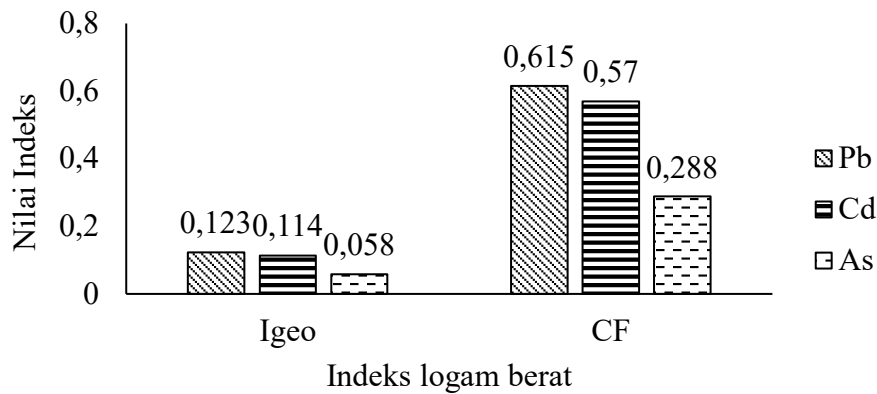
Gambar 2. Grafik Hasil Rata-Rata Pengujian Sampel Air

Hasil pengujian logam berat (Pb, Cd, dan As) pada sampel sedimen dapat dilihat pada Gambar 3.



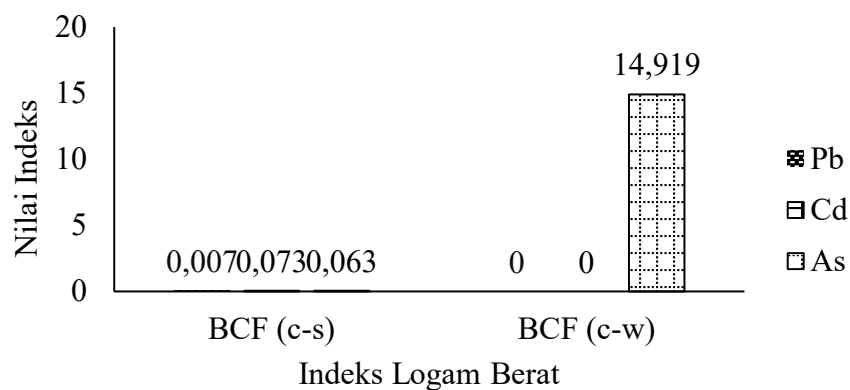
Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Sampel Sedimen

Hasil analisis data *Geo-Accumulation Index* (Igeo) dan *Contamination Factor* (CF) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Hasil Analisis Data Igeo dan CF

Hasil analisis data *Bio Concentration Factor* (BCF) dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Hasil Analisis Data BCF

Keterangan:

BCF (c-s) : Faktor biokonsentrasi rumput laut terhadap sedimen

BCF (c-w) : Faktor biokonsentrasi rumput laut terhadap air

Hasil pengukuran kualitas air tambak budidaya rumput laut (*C. racemosa*) di Brondong disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kualitas Air Tambak Budidaya Rumput Laut (*C. racemosa*)

Parameter	Hasil Pengukuran	Pertumbuhan Optimal <i>C. racemosa</i>
Suhu (°C)	31,9	20-32°C (Supriadi et al., 2014)
pH	6,86	6-8 (Kusmawati et al., 2018)
Salinitas (ppt)	30,0	28-32 ppt (Kusmawati et al., 2018)
Oksigen Terlarut (mg/L)	6,78	4-8 mg/L (Wantasen & Tamrin, 2012)
Kecerahan (cm)	49,0	>45 cm (Supriadi et al., 2016)

PEMBAHASAN

Berdasarkan Gambar 1 dapat diketahui bahwa rata-rata konsentrasi logam berat Pb, Cd, dan As pada sampel rumput laut (*C. racemosa*) berturut-turut adalah 0,0901 mg/kg, 0,0124 mg/kg, dan 0,2357 mg/kg. Rata-rata konsentrasi ketiga logam berat tersebut masih dibawah baku mutu batas maksimum berdasarkan Badan Standarisasi Nasional, No. 7387 (2009) Tentang Batas Maksimum Cemar Logam Berat dalam Pangan yang menetapkan batas maksimum logam berat Pb, Cd, dan As berturut-turut adalah 0,5 mg/kg, 0,2 mg/kg, dan 1 mg/kg. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rumput laut (*C. racemosa*) di Brondong masih tergolong aman untuk dibudidayakan dan dikonsumsi. Konsentrasi logam berat tertinggi yaitu pada As. Hal tersebut dikarenakan tanaman lebih mudah menyerap As, sehingga memungkinkan As berada dalam pangan pada konsentrasi tinggi dalam bentuk organik dan anorganik. Arsen anorganik sering ditemukan dalam rumput laut dan pangan lainnya yang berasal dari laut (SNI 7387:2009).

Jika suatu perairan terkontaminasi oleh logam berat, maka akan larut dan diserap organisme akuatik yang berada di dasar perairan. Rumput laut merupakan biota yang mempunyai kemampuan untuk menyerap senyawa logam berat yang terdapat pada dasar perairan (Rahmaningsih, 2012). Logam berat masuk dan terakumulasi dalam talus rumput laut melalui proses adsorpsi pada permukaan talusnya berupa kation, anion atau senyawa organik. Proses selanjutnya yaitu absorpsi pada dinding sel yang dapat melalui tiga mekanisme yaitu transpor pasif dengan cara difusi, difusi terfasilitasi, dan transpor aktif. Ion pada dinding sel digantikan oleh ion logam berat, kemudian disalurkan ke bagian korteks dan masuk ke bagian medula dengan cara metabolisme agar lebih polar sehingga lebih mudah untuk diakumulasi (Nasuha et al., 2014).

Berdasarkan Gambar 2 dapat diketahui bahwa konsentrasi logam berat pada kedua sampel air tidak terdeteksi adanya logam berat Pb dan Cd dikarenakan masih di bawah batas deteksi alat yakni nilai batas Pb adalah 0,0002 mg/L dan nilai batas Cd adalah 0,0001 mg/L. Logam berat As masih terdeteksi dari kedua sampel air dengan konsentrasi rata-rata yaitu 0,0158 mg/L. Konsentrasi logam berat As tersebut masih dibawah baku mutu batas maksimum berdasarkan Keputusan Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 51 (2004) Tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut yang menetapkan batas maksimum logam berat Pb, Cd, dan As berturut-turut adalah 0,08 mg/L, 0,001 mg/L, dan 0,025 mg/L. Hasil pengujian menunjukkan bahwa air tambak di Brondong masih tergolong aman sebagai media untuk budidaya rumput laut (*C. racemosa*). Kelarutan Pb dalam air cukup rendah sehingga kadarnya relatif sedikit. Cd di perairan mudah terikat dengan bahan organik, kemudian mengendap dan menyatu dengan sedimen di dasar perairan (Darmono, 1995). Hal ini menyebabkan konsentrasi logam berat Pb dan Cd pada air sangat rendah bahkan tidak terdeteksi.

Konsentrasi logam berat yang rendah juga dapat dipengaruhi oleh iklim seperti curah hujan. Pengambilan sampel pada bulan November merupakan curah hujan yang cukup tinggi. Curah hujan yang tinggi menyebabkan terjadinya peningkatan volume air dan penurunan kelarutan konsentrasi logam berat. Pada musim hujan konsentrasi logam berat menjadi lebih rendah karena proses pelarutan, sebaliknya pada musim kemarau konsentrasi logam menjadi lebih tinggi karena logam menjadi pekat (Darmono, 1995). Air tambak budidaya di Brondong berasal dari perairan setempat. Oleh karena itu, rendahnya konsentrasi logam berat juga disebabkan adanya pergerakan air yang dinamis pada perairan setempat yang dipengaruhi oleh beberapa faktor fisika seperti angin dan arus sehingga terjadi pengenceran secara terus menerus yang mengakibatkan konsentrasi logam berat menjadi rendah (Akbar et al., 2014).

Berdasarkan Gambar 3 dapat diketahui bahwa konsentrasi logam berat Pb, Cd, dan As pada sedimen berturut-turut yaitu 12,3 mg/kg, 0,171 mg/kg, dan 3,74 mg/kg. Konsentrasi ketiga logam berat tersebut masih dibawah baku mutu batas maksimum berdasarkan Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, (2000) yang menetapkan batas maksimum logam berat Pb, Cd, dan As berturut-turut adalah 50 mg/kg, 1,5 mg/kg, dan 20 mg/kg. Hal ini menunjukkan bahwa sedimen dasar tambak di Brondong masih tergolong aman sebagai media untuk budidaya rumput laut (*C. racemosa*). Konsentrasi logam berat tertinggi yaitu Pb. Hal ini disebabkan karena Pb merupakan jenis logam yang cepat menghilang dari perairan karena memiliki residence time yang singkat yaitu 14 hari di perairan. Selain itu, berat atom Pb yaitu 207,20 g/mol sehingga memungkinkan lebih cepat mengendap ke sedimen (Anggraeny, 2010). Sedimen dasar tambak budidaya di Brondong berupa lumpur berwarna hitam. Umumnya sedimen yang memiliki tekstur berupa lumpur berwarna hitam memiliki pori-pori yang cukup kecil dan memiliki daya adsorpsi yang cukup tinggi (Supriyantini & Endrawati, 2015). Oleh karena itu, konsentrasi logam berat yang diserap oleh tekstur lumpur tersebut cukup tinggi.

Sumber logam berat Pb di Brondong diduga berasal dari industri pembuatan pipa, peleburan baterai, dan bahan bakar kapal nelayan. Timbal banyak digunakan dalam industri, seperti pembuatan baterai, pipa berwarna, amunisi, pelapis kabel, campuran dalam pembuatan pelapis keramik dan bahan bakar (Kumar et al., 2022). Logam berat Cd di Brondong diduga berasal dari pembuangan limbah industri plastik, besi, cat, dan tumpahan solar di laut. Secara alamiah, Cd masuk melalui aktivitas geologis seperti letusan gunung berapi di lautan. Secara non-alamiah, Cd masuk ke perairan karena adanya limbah industri besi, industri baterai atau aki, dan pupuk fosfat (Syaifullah et al., 2018). Sumber logam berat As di Brondong diduga berasal dari industri di bidang pertanian. As banyak digunakan sebagai bahan pengawet kayu, bahan pembuatan di bidang pertanian seperti pestisida, insektisida, herbisida, algisida, rodentisida, dan pupuk (Mohammed et al., 2011).

Nilai *Igeo* pada logam berat Pb, Cd, dan As berturut-turut adalah 0,123, 0,114, dan 0,058 (Gambar 4). Berdasarkan status indeks geo-akumulasi yang dikategorikan oleh Muller (1969), dari hasil yang diperoleh dapat diketahui bahwa indeks geo-akumulasi logam berat Pb, Cd, dan As pada sedimen dasar tambak budidaya rumput laut (*C. racemosa*) di Brondong berada pada status tidak tercemar hingga tercemar sedang karena berada pada kategori $0 < I_{geo} < 1$. Nilai CF pada logam berat Cd, Pb, dan As berturut-turut adalah 0,615, 0,57, dan 0,288 (Gambar 4). Berdasarkan status faktor kontaminasi yang dikategorikan oleh Hakanson (1980), hasil yang diperoleh dapat diketahui bahwa faktor kontaminasi logam berat Pb, Cd, dan As pada sedimen dasar tambak budidaya rumput laut (*C. racemosa*) di Brondong menunjukkan tingkat kontaminasi rendah karena berada pada kategori $CF < 1$. Nilai *Igeo* dan CF yang rendah disebabkan karena rendahnya konsentrasi logam berat Pb, Cd, dan As pada sedimen dasar tambak budidaya rumput laut (*C. racemosa*) di Brondong.

Nilai BCF rumput laut terhadap sedimen pada logam berat Pb, Cd, dan As berturut-turut adalah 0,007, 0,073, dan 0,063 (Gambar 5). Nilai BCF rumput laut terhadap air pada logam berat Pb dan Cd tidak terdefinisi karena tidak terdeteksi adanya logam berat Pb dan Cd pada sampel air, sedangkan pada logam berat As adalah 14,919 (Gambar 5). Berdasarkan nilai faktor biokonsentrasi yang dikategorikan oleh Baker (1981), dari hasil yang diperoleh dapat diketahui bahwa kedua nilai faktor biokonsentrasi tersebut berada pada kategori $BCF < 100$ yang menunjukkan bahwa tingkat akumulatif rumput laut (*C. racemosa*) yang dibudidayakan di Brondong tergolong rendah. Tingkat akumulasi bahan toksik dipengaruhi oleh keberhasilan tubuh biota dalam proses detoksifikasi dan ekskresi sehingga pengaruh toksik logam berat masih dapat ditoleransi oleh tubuh biota (Yulaipi & Aunurohim, 2013). Pada umumnya kemampuan penyerapan logam berat oleh tanaman air yaitu dengan menyimpan pada bagian tanaman tersebut. Dinding sel merupakan pertahanan utama untuk mencegah masuknya ion logam yang bersifat toksik (Purnamawati et al., 2015).

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa hasil pengukuran suhu, pH, salinitas, oksigen terlarut, dan kecerahan air menunjukkan bahwa kualitas air tambak budidaya di Brondong masih dalam kisaran optimal untuk pertumbuhan rumput laut (*C. racemosa*). Dampak yang terjadi apabila rumput laut (*C. racemosa*) di perairan telah tercemar, maka akan mengakibatkan terganggunya rumput laut (*C. racemosa*) baik secara morfologi maupun fisiologi yang dapat menyebabkan kematian sebagian atau seluruh bagian. Selain itu, dampak besar yang akan terjadi dapat merusak ekosistem rumput laut sehingga dapat menyebabkan menurunnya ekologi maupun ekonomi rumput laut (Palar, 1994). Logam berat di perairan dapat menyebabkan kerusakan pada biota laut. Apabila rumput laut secara terus menerus mengakumulasi logam berat hingga melewati batas, maka pertumbuhan rumput laut menjadi terhambat dan kemudian akan rusak (Yusuf et al., 2016).

Upaya pengendalian untuk mengurangi bahan pencemar ke dalam lingkungan perairan yaitu dengan melakukan penyuluhan kepada masyarakat untuk tidak sembarangan dalam membuang limbah terutama limbah industri ke dalam perairan (Shavira, 2017). Selain itu, untuk meminimalkan pencemaran logam berat yaitu dengan membangun Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di kawasan industri. Tujuan dari pengolahan air limbah adalah untuk menghilangkan parameter pencemar yang terdapat di air limbah hingga batas yang telah ditetapkan. Logam berat di perairan dapat diminimalisir dengan cara remediasi menggunakan biofilter seperti kerang hijau (*Perna viridis*) (Azlee et al., 2014). Biofilter adalah sistem filtrasi menggunakan organisme hidup untuk mengurangi pencemaran di lingkungan perairan (Nasuha et al., 2014). Kerang hijau (*P. viridis*) merupakan indikator biologis yang sangat baik dalam mengakumulasi polutan karena sifatnya yang menetap (Vasanthi et al., 2012). Beberapa pendekatan teknologi, salah satunya yaitu rekayasa genetika dapat memperbaiki gen dan meningkatkan ketahanan rumput laut (Vairappan, 2006). Selain itu, dengan pengembangan teknologi kultur jaringan juga dapat mendukung rekayasa genetik pada tanaman (Suryati & Mulyaningrum, 2009).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa tambak tradisional di Brondong, Lamongan tergolong aman untuk dilakukan kegiatan budidaya rumput laut (*C. racemosa*) dikarenakan rendahnya konsentrasi logam berat Pb, Cd, dan As pada rumput laut (*C. racemosa*), air, dan sedimen serta rendahnya tingkat pencemaran, tingkat kontaminasi, dan tingkat akumulatif rumput laut (*C. racemosa*).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Hibah Penelitian Prioritas Riset Nasional Perguruan Tinggi Tahun Anggaran 2021 No. 1365/UN3.15/PT/2021 yang mendukung terselenggaranya penelitian keamanan pangan produk perikanan dalam mendukung pencegahan masalah kurang gizi kronis (*stunting*) di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A. W., Daud, A., & Mallongi, A. (2014). *Analisis Risiko Lingkungan Logam Berat Cadmium (Cd) pada Sedimen Air Laut di Wilayah Pesisir Kota Makassar*. Fakultas Kesehatan Masyarakat. Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Anggraeny, Y. A. (2010). *Analisis Kandungan Logam Berat Pb, Cd, dan Hg pada Kerang Darah (Anadara granosa) di Perairan Bojonegoro, Kecamatan Bojonegoro, Kabupaten Serang*. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Australian and New Zealand Environment and Conservation Council. (2000). *ANZECC Interim Sediment Quality Guidelines Report for the Environmental Research Institute of the Supervising Scientist Sydney, Australia*. ANZECC ISQG-Low.
- Azlee, I. W., Ismail, R., Ali, R., & Abu, B. (2014). Chelation Technique for the Removal of Heavy Metals (As, Pb, Cd and Ni) from *Green Mussel, Perna viridis*. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 43(3), 372–376.
- Badan Standarisasi Nasional. (2009). *Batas Maksimum Cemaran Logam Berat dalam Pangan*. SNI 7387:2009.
- Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and Excluders-Strategies in the Response of Plants to Heavy Metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3, 643–654.
- Barbieri, M. (2016). The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *Journal Geology and Geophysics*, 5(1), 1–3.
- Choirun, A., Sari, S. H. J., & Iranawati, F. (2015). Identifikasi Fitoplankton Spesies *Harmfull Algae Bloom* (HAB) Saat Kondisi Pasang di Perairan Pesisir Brondong, Lamongan, Jawa Timur. *Jurnal Ilmu Kelautan Dan Perikanan*, 25(2), 58–66.
- Dahuri, R. (1998). *Pengaruh Pencemaran Limbah Industri terhadap Potensi Sumber Daya Laut*. Makalah pada Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah Industri dan Pencemaran Laut. SPPT. Jakarta.
- Darmono. (1995). *Logam Berat dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*. UI Press. Jakarta.
- Fardiaz, S. (2002). *Polusi Air dan Udara*. Kanisius. Yogyakarta.
- Fithriani, D. (2009). *Potensi Antioksidan Caulerpa racemosa di Perairan Teluk Hurun Lampung*. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Gerhardt, A. (2002). Bioindicator Species and Their Use in Biomonitoring. *Environmental Monitoring*, 1, 77–123.
- Ghazali, M., & Nurhayati. (2018). Peluang dan Tantangan Pengembangan Makroalga Non Budidaya sebagai Bahan Pangan di Pulau Lombok. *Jurnal Agrotek*, 5(2), 135–140.
- Hakanson, L. (1980). Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach. *Water Research*, 14(5), 975–1001.
- Huang, R., Li, Y., Li, F., Yin, X., Li, R., Wu, Z., Liang, X., & Li, Z. (2022). Phosphate Fertilizers Facilitated The Cd Contaminated Soil Remediation by Sepiolite: Cd Mobilization, Plant Toxicity, and Soil Microbial Community. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234, 1–10.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2004). *Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 Tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut*.

Jakarta.

- Khan, M., Javed, M., Rehman, M., Urooj, M., & Ahmad, M. (2020). Heavy Metal Pollution and Risk Assessment by The Battery of Toxicity Tests. *Scientific Report*, 10, 1–10.
- Kumar, S., Rahman, M. A., Islam, M. R., Hashem, M. A., & Rahman, M. M. (2022). Lead and Other Elements-Based Pollution in Soil, Crops and Water Near A Lead-Acid Battery Recycling Factory in Bangladesh. *Chemosphere*, 290, 133288.
- Kusmawati, I., Diana, F., & Humaira, I. (2018). Studi Kualitas Air Budidaya Latoh (*Caulerpa racemosa*) di Perairan Lhok Bubon Kecamatan Aceh Barat. *Jurnal Akuakultura*, 2(1), 33–43.
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2004). Surat Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 Tentang Baku Mutu Air Laut untuk Biota Laut. Jakarta.
- Liu, G., Yu, Y., Hou, J., Xue, W., Liu, X., Liu, Y., Wang, W., Alsaedi, A., Hayat, T., & Liu, Z. (2014). An Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution of The Agricultural Ecosystem Near A Lead-Acid Battery Factory. *Ecological Indicators*, 47, 210–218.
- Luo, W., Yang, S., Khan, M. A., Ma, J., Xu, W., Li, Y., Xiang, Z., Jin, G., Jia, J., & Zhong, B. (2020). Mitigation of Cd Accumulation in Rice with Water Management and Calcium-Magnesium Phosphate Fertilizer in Field Environment. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 3877–3886.
- Mohammed, A. S., Kapri, A., & Goel, R. (2011). Heavy Metal Pollution: Source, Impact, and Remedies. *Biomanagement of Metal-Contaminated Soils*, 1–28.
- Muller, G. (1969). Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118.
- Nasuha, T., Yuliani, & Indah, N. K. (2014). Efektivitas *Gracilaria gigas* sebagai Biofilter Logam Berat Timbal (Pb) pada Media Tanam. *Jurnal LenteraBio*, 3(1), 91–96.
- Palar, H. (1994). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Rineka Cipta. Jakarta.
- Purnamawati, F. S., Soeprbowati, T. R., & Izzati, M. (2015). Potensi *Chlorella vulgaris* Beijerinck dalam Remediasi Logam Berat Cd dan Pb Skala Laboratorium. *Jurnal Bioma*, 16(2), 102–113.
- Rachmawan, E. W., Suryono, C. A., & Riniatsih, I. (2021). Perbandingan Tutupan Antar Lamun, Makroalga dan Epifit di Perairan Paciran Lamongan. *Journal of Marine Research*, 10(4), 509–514.
- Rahmaningsih, S. (2012). Penerapan Teknologi Penggunaan Rumput Laut sebagai Biofilter Alami Air Tambak untuk Mengurangi Tingkat Serangan Penyakit Udang Vannamei (*Litopenaeus vannamei*). *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*, 3(1), 11–16.
- Shaban, N. S., Abdou, K. A., & Hassan, N. E. Y. (2016). Impact of Toxic Heavy Metals and Pesticide Residues in Herbal Products. *Beni-Suef University Journal Of Basic And Applied Sciences*, 5, 102–106.
- Shavira, E. (2017). *Akumulasi Logam Berat Timbal (Pb) pada Akar, Kulit Batang, dan Daun Avicenna marina di Kawasan Percut Sei Tuan Provinsi Sumatera Utara*. Skripsi. Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Sugiyanto, R. A. N., Yona, D., & Kasitowati, R. D. (2016). *Analisis Akumulasi Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada Lamun (Enhalus acoroides) sebagai Agen Fitoremediasi di Pantai Paciran, Lamongan*. Seminar Nasional Perikanan dan Kelautan VI, Fakultas Perikanan Dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya. Malang.
- Supriadi, S., Kaswadji, R. F., Bengen, D. G., & Hutomo, M. (2014). Carbon Stock of Seagrass Community in Barranglompo Island, Makassar (Stok Karbon pada Komunitas Lamun di Pulau Barranglompo, Makassar). *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*,

19(1), 1–10.

- Supriadi, S., Syamsuddin, R., Abustang, A., & Yasir, I. (2016). Pertumbuhan dan Kandungan Karotenoid Lawi-Lawi *Caulerpa racemosa* yang Ditumbuhkan pada Tipe Substrat Berbeda. *Jurnal Rumput Laut Indonesia*, 1(2), 117–122.
- Supriyantini, E., & Endrawati, H. (2015). Kandungan Logam Berat Besi (Fe) pada Air, Sedimen, dan Kerang Hijau (*Perna viridis*) di Perairan Tanjung Emas Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 18(1), 38–45.
- Suryati, E., & Mulyaningrum, S. R. H. (2009). Regenerasi Rumput Laut *Kappaphycus alvarezii* (Doty) melalui Induksi Kalus dan Embrio dengan Penambahan Hormon Perangsang Tumbuh Secara In Vitro. *Jurnal Riset Akuakultur*, 4(1), 39–45.
- Suyatno, A. P., Afianti, N., & Muskananfolo, M. R. (2021). Analisis Faktor Pengayaan dan Faktor Kontaminasi Logam Berat Cr, Cd dan Cu di Sungai Banjir Kanal Barat Kota Semarang, Propinsi Jawa Tengah. *Jurnal Berkala Perikanan Terubuk*, 49(2), 1042–1052.
- Syaifullah, M., Candra, Y. A., Soegianto, A., & Irawan, B. (2018). Kandungan Logam Non Esensial (Pb, Cd dan Hg) dan Logam Esensial (Cu, Cr dan Zn) pada Sedimen di Perairan Tuban Gresik dan Sampang Jawa Timur. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11, 69–74.
- Vairappan, C. S. (2006). Seasonal Occurrences of Epiphytic Algae on the Commercially Cultivated Red Alga *Kappaphycus alvarezii* (Solieriaceae, Gigartinales, Rhodophyta). *Journal of Applied Phycology*, 18, 611–617.
- Vasanthi, L. P., Revanthi, C., Arulvasu, N., & Munuswamy. (2012). Biomarkers of Metal Toxicity and Histology of *Perna viridis* from Ennore Estuary, Chennai, Shout East Coast of India. *Ecotoxicology and Enviromental*, 84, 92–98.
- Wang, K., Tian, H., Hua, S., Zhu, C., Gao, J., Xue, Y., Hao, J., Wang, Y., & Zhou, J. (2016). A Comprehensive Emission Inventory of Multiple Air Pollutants from Iron and Steel Industry in China: Temporal Trends and Spatial Variation Characteristics. *Science of the Total Environment*, 559, 7–14.
- Wantasen, A. S., & Tamrin. (2012). Analisis Kelayakan Lokasi Budidaya Rumput Laut di Perairan Teluk Dodinga Kabupaten Halmahera Barat. *Jurnal Perikanan Dan Kelautan Tropis*, 8(1), 23–27.
- Widawati, D., Rudiyanti, S., & Taufani, W. T. (2020). Biokonsentrasi Logam Berat Besi (Fe) pada Kerang Hijau di pantai Morosari, Demak. *Jurnal Pena Akuatika*, 19(1), 26–33.
- Yulaipi, S., & Aunurohim. (2013). Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) dan Hubungannya dengan Laju Pertumbuhan Ikan Mujair (*Oreochromis mossambicus*). *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 2(2), 2337–3520.
- Yusuf, Y. E., Nafie, Y. L., & Dali, S. (2016). Analisis Senyawa Piren pada Alga Laut *Euchema cottoni* di Perairan Kabupaten Bantaeng. *Indonesian Journal of Chemical Research*, 4(1), 352–355.