

Fitoremediasi Logam Berat dengan Menggunakan Mangrove

Faisal Hamzah dan Yuli Pancawati

Balai Penelitian dan Observasi Laut
Badan Penelitian dan Pengembangan Kelautan dan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan
Jl. Baru Perancak, Negara, Jembrana, Bali, Indonesia. 82251
Email: faisalhamzah@kkp.go.id; Telp/Fax: 0365 44266/44278

Abstrak

Mangrove mampu mengakumulasi dan mempunyai toleransi yang tinggi terhadap logam berat sehingga bisa dijadikan tumbuhan untuk tujuan fitoremediasi (fitostabilisasi). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi fitoremediasi berdasarkan akumulasi dan translokasi logam berat pada mangrove di daerah pesisir. Sebanyak 10 pohon mangrove (4 spesies) pada 4 stasiun di Hutan Lindung Angke Kapuk dan Taman Margasatwa Muara Angke diambil untuk dianalisa. Logam berat yang dianalisa dibagi menjadi dua yaitu esensial (Cu dan Zn) dan non esensial (Pb). Hasil analisa fisikokimia perairan dan sedimen menunjukkan bahwa mangrove tumbuh pada kondisi normal untuk daerah estuari (pH 7,10-7,46; suhu 28,5-30 °C; salinitas 2-6 ‰; oksigen terlarut 0,71-1,42 mg.L⁻¹ dan kelembaban sedimen 10-30 %). Konsentrasi Zn pada sedimen lebih tinggi dibandingkan Cu dan Pb, namun pada akar dan daun, konsentrasi Pb lebih tinggi dibandingkan Zn dan Cu. Nilai biological accumulation coefficient (BAC=ratio kandungan logam pada daun dengan sedimen), biological transfer coefficient (BTC=ratio kandungan logam pada daun dengan akar) dan bioconcentration factor (BCF=ratio kandungan logam pada akar dengan sedimen) logam non esensial lebih tinggi dibandingkan logam esensial. BAC, BTC, dan BCF Pb adalah 0,84-1,10, 0,84-1,15 dan 0,91-1,09. Nilai BAC, BTC, dan BCF logam Cu dan Zn berturut adalah 0,02-0,13 & 0,12-0,25, 0,17-0,82 & 0,56-1,11 dan 0,09-0,17 & 0,13-0,25. Untuk tujuan fitoremediasi, mangrove bisa diterapkan di daerah pesisir sebagai fitostabilisasi. Hasil perhitungan FTD menunjukkan spesies *Sonneratia caseolaris* 3 bisa dijadikan sebagai kriteria mangrove untuk fitoremediasi.

Kata kunci: mangrove, fitoremediasi, logam berat, pesisir

Abstract

Phytoremediation of Heavy Metals Using Mangroves

Mangroves are able to accumulate and have a high tolerance to heavy metals so that those trees can be used as phytoremediation purpose (phytostabilization). This study was conducted to determine metal phytoremediation potential of mangroves based on accumulation and translocation of heavy metals in coastal areas. A total of 10 of mangrove trees (4 species) at 4 stations in HLAK and SMMA were taken and analyzed. Heavy metal divided into two such as essential (Cu and Zn) and non essential (Pb). Based on phycochemical analysis both of water and sediment, our result showed that mangroves grow on normal condition for estuarine ecosystem (pH 7.10-7.46; temperature 28.5-30 °C; salinity 2-6‰; dissolved oxygen 0.71-1.42 mg.L⁻¹ dan humidity of sediment 10-30%). Concentration of Zn in sediment was higher than Cu and Pb, but in roots and leaves Pb was higher than Zn and Cu. Biological accumulation coefficient (BAC=ratio of leaf metal to sediment metal concentration), biological transfer coefficient (BTC= ratio of leaf metal to root concentration) and bioconcentration factor (BCF= ratio of root metal to sediment metal concentration) for non essential is higher than essential. BAC, BTC and BCF Pb metal were 0.84-1.10, 0.84-1.15 and 0.91-1.09, respectively. While value of BAC, BTC and BCF for Cu and Zn were 0.02-0.13 & 0.12-0.25, 0.17-0.82 & 0.56-1.11 and 0.09-0.17 & 0.13-0.25, respectively. For phytoremediation purposes, mangroves are perhaps best employed as phytostabilisers. Result of calculation FTD showed that species of *Sonneratia caseolaris* 3 can be used as mangrove criterion for phytoremediation.

Keywords: mangrove, phytoremediation, heavy metals, coastal

Pendahuluan

Pesisir merupakan daerah yang rentan terhadap pencemaran, baik organik maupun

inorganik. Pencemaran inorganik berupa logam berat berasal dari berbagai aktivitas seperti industri, kapal dan pelabuhan, tumpahan minyak, pengolahan limbah maupun kegiatan pertambangan

(Peters *et al.*, 1999). Selain itu, aktivitas pertanian yang menggunakan insektisida dan pupuk secara berlebihan juga akan meningkatkan konsentrasi logam berat yang berhilir di daerah pesisir (Alloway, 1994; Hasim dan Hughes, 2009). Walaupun ada beberapa logam yang bersifat esensial (dibutuhkan oleh makhluk hidup) seperti Zn, Cu, Fe dan Mn, namun jika jumlahnya berlebihan akan mengandung racun. Adapula logam yang walaupun dalam konsentrasi rendah tetap berbahaya dan bersifat toksik seperti Cd, Hg Cr dan Pb (Akin dan Unlu, 2007).

Secara umum, logam berat bersifat non-biodegradasi dan tetap di lingkungan (MacFarlane dan Burchett, 2001). Jika di suatu daerah terakumulasi logam berat, maka sifat logam tersebut akan merusak lingkungan dan meningkatkan daya racun serta persisten (MacFarlane dan Burchett, 2001; Nazli dan Hashim, 2010). Salah satu tumbuhan yang mampu hidup dan berkembang di daerah pesisir adalah mangrove. Melalui modifikasi akar dan daunnya, mangrove mampu hidup pada berbagai macam substrat yang masih mendapat pengaruh pasang surut. Kandungan logam berat pada sedimen mangrove mampu mempengaruhi proses biologi dan ekologi, walaupun mangrove mempunyai imunitas terhadap efek racun dari logam berat (Annie dan Sigua, 2013). Mangrove mampu mengakumulasi logam berat dan mempunyai toleransi yang tinggi terhadap logam berat (Handayani, 2006; Hamzah dan Setiawan, 2010). Mangrove ini memiliki karakteristik yang khas, maka bisa dijadikan tumbuhan untuk tujuan fitoremediasi di daerah pesisir khususnya fitostabilisasi (MacFarlane *et al.*, 2007).

Beberapa studi tentang potensi fitoremediasi tumbuhan mangrove telah dilakukan. Nazli dan Hashim (2010) meneliti kandungan logam Cd, Cr, Cu, Pb, dan Zn pada *Sonneratia caseolaris* di Semenanjung Malaysia. Hasil penelitian tersebut menunjukkan konsentrasi seluruh logam di sedimen berada dibawah ambang batas. Namun, logam Pb dan Cu pada akar dan daun melebihi kondisi normal. Zeng *et al.* (1997) meneliti berbagai logam berat Cu, Ni, Cr, Zn, Pb, Cd dan Mn pada *Rhizophora stylosa* di Teluk Yingluo, China. Hasil penelitian tersebut menunjukkan konsentrasi logam sangat rendah dikarenakan sumber polutan juga rendah. Hamzah dan Setiawan (2010) meneliti kandungan logam Pb, Cu, dan Zn pada *Avicennia marina*, *Sonneratia caseolaris* dan *Rhizophora mucronata* di Muara Angke, Jakarta Utara dan hasilnya menunjukkan bahwa kandungan logam Zn pada akar lebih tinggi dibandingkan pada daun, sedimen dan air. Heriyanto dan Subiandono (2011) meneliti kandungan logam berat Hg, Pb dan Cu pada *Avicennia marina* (Forsk.), *Rhizophora apiculata* dan

Ceriops tagal C.B. Rob di Blanakan, Subang Jawa Barat, Cilacap, Jawa Tengah dan Taman Nasional Alas Purwo, Jawa Timur. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa Cu terakumulasi di bagian akar dan batang, Pb terakumulasi pada bagian akar dan daun, sedangkan Hg terakumulasi pada batang dan daun.

Upaya mengurangi polutan khususnya logam berat di daerah pesisir melalui mangrove (fitoremediasi) perlu dilakukan. Namun perlu dikaji spesies apa saja yang mungkin bisa diterapkan untuk tujuan tersebut. Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan yang telah dilakukan oleh Hamzah dan Setiawan (2010) di Muara Angke yang dilakukan untuk mengetahui potensi fitoremediasi yang dilihat berdasarkan akumulasi dan translokasi logam berat pada mangrove di daerah pesisir.

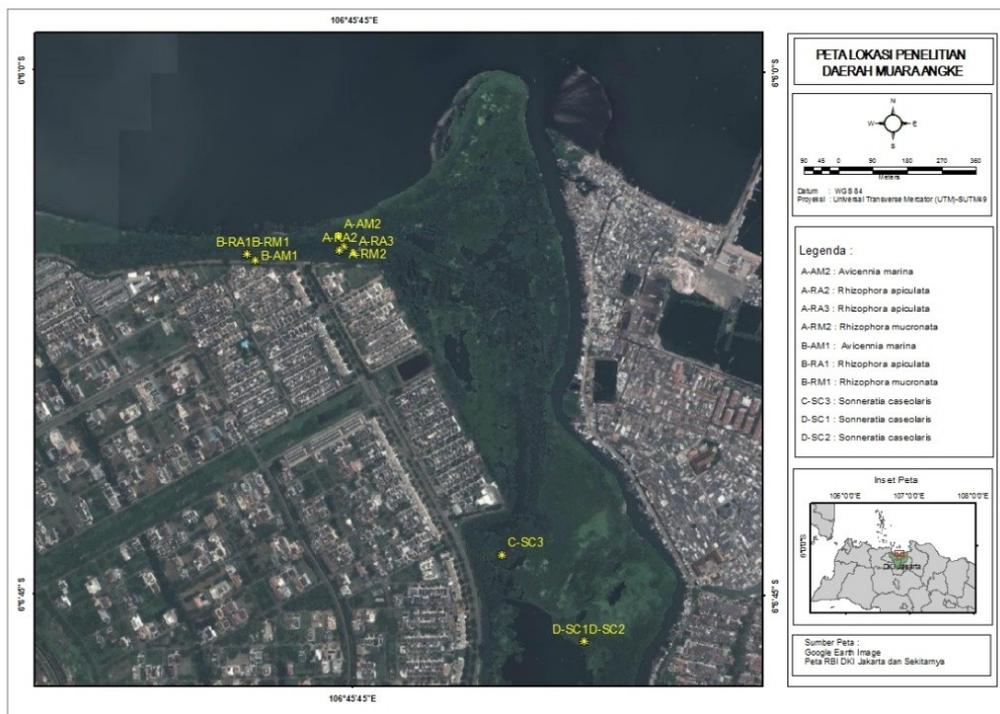
Materi dan Metode

Penelitian dilaksanakan bulan Juni 2011 di Hutan Lindung Angke Kapuk (HLAK) dan Taman Margasatwa Muara Angke (TMMA). Dua lokasi tersebut dibagi menjadi 4 stasiun yaitu 2 stasiun di HLAK (Stasiun A dan B) dan 2 stasiun di TMMA (Stasiun C dan D). HLAK merupakan kawasan konservasi hutan mangrove di utara Jakarta dibawah koordinasi Dinas Kelautan dan Pertanian Provinsi DKI Jakarta (Hamzah dan Setiawan, 2010), sedangkan TMMA dibawah koordinasi BKSDA Provinsi DKI Jakarta. Stasiun A terdiri dari 4 mangrove yaitu *Avicennia marina*-2, *Rhizophora apiculata*-2, *Rhizophora apiculata*-3 dan *Rhizophora mucronata*-2. Untuk Stasiun B, terdiri dari 3 spesies mangrove yaitu *Avicennia marina*-1, *Rhizophora apiculata*-1 dan *Rhizophora mucronata*-1. Stasiun C terdiri dari 1 spesies mangrove yaitu *Sonneratia caseolaris*-3, sedangkan Stasiun D terdiri dari 2 pohon, 1 spesies mangrove yaitu *Sonneratia caseolaris*-1 dan *Sonneratia caseolaris*-2. Lokasi penelitian disajikan pada Gambar 1.

Koleksi dan analisa data

Sampel yang diambil meliputi sampel air, sedimen dan mangrove. Parameter yang dianalisa di air meliputi oksigen terlarut (DO), suhu, salinitas, pH dan logam berat. Pada sedimen, parameter yang dianalisa yaitu salinitas, pH, kelembaban dan logam berat sedangkan pada mangrove hanya logam berat saja. Logam berat yang dianalisa adalah logam esensial (Cu dan Zn) dan non esensial (Pb) bagi tumbuhan. Bagian mangrove yang diambil dalam penelitian ini adalah akar dan daun.

Sampel air diambil dengan menggunakan Van Dorn water sampler. Parameter air seperti suhu,



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel di HLAK dan SMMA, Muara Angke, Jakarta 2011

salinitas, pH dan kandungan oksigen terlarut (DO) di air diukur secara insitu. Untuk analisa logam berat, sebanyak 2 liter air disimpan dalam botol polietilen, yang telah direndam dengan HCl 8N dan dibilas beberapa kali dengan air suling ganda-bebas ion (aqua bides) dan dibungkus dengan kantong plastik. Sampel air kemudian dimasukkan kedalam cool box yang bersuhu 4 °C dan siap dianalisa di laboratorium dengan Atomic Absorption Spechtrphotometer (AAS) sesuai metode Hutagalung et al. (1997).

Sampel sedimen diambil dengan Ekman grab (stainless steel) dan kemudian disimpan dalam cool box yang diberi blue ice (gel pembeku) agar kondisi suhu dari sampel tetap stabil (4 °C). Salinitas sedimen diukur dengan menggunakan SCT meter sedangkan pH sedimen dan humiditas (kelembaban) diukur dengan menggunakan pH/Eh meter. Fraksinasi sedimen dilakukan dengan metode hidrometer. Pengukuran kandungan logam berat (Pb, Cu dan Zn) dalam sedimen dilakukan dengan AAS menggunakan nyala udara asitilen.

Spesies mangrove diamati adalah yang dominan di kedua lokasi (Hamzah dan Setiawan, 2010) yaitu *Avicennia marina*, *Rhizophora mucronata*, dan *Sonneratia caseolaris*. Sampel daun dan akar dikeringkan dengan menggunakan oven pada suhu 105 °C selama 24 jam. Kemudian tambahkan HNO₃ dan HClO₄ (urutan penambahan tidak boleh salah terutama untuk bahan organik) (APHA, 2005). Tujuan pemberian larutan HClO₄ dan HNO₃ adalah untuk melarutkan bagian tulang daun

dan kulit akar, dan jika larutan belum jernih, tambahkan lagi HClO₄ dan HNO₃ sampai sampel larut dengan sempurna, kemudian dipanaskan dan tambahkan HNO₃. Sampel dianalisa dengan AAS menggunakan nyala udara asitilen.

Fitoremidiasi

Fitoremidiasi dihitung dengan tiga pendekatan biologi yaitu *Biological Accumulation Coefficient* (BAC) (Khan et al., 2013). BAC juga sama dengan *Enrichment Coefficient* (EF) dimana didapatkan dengan cara membagi konsentrasi logam berat pada daun dengan konsentrasi logam pada sedimen (Cui et al., 2007).

$$BAC/EF = \frac{[\text{Logam Berat}]_{\text{daun}}}{[\text{Logam Berat}]_{\text{sedimen}}}$$

Biological Transfer Coefficient (BTC) atau *Translocation Factor* (TF) didefinisikan sebagai konsentrasi logam berat pada daun dibagi dengan konsentrasi logam berat pada akar (Zu et al., 2005; Cui et al., 2007; MacFarlane et al., 2007; Khan et al., 2013).

$$BTC/TF = \frac{[\text{Logam Berat}]_{\text{daun}}}{[\text{Logam Berat}]_{\text{akar}}}$$

Bio-Concentration Factor (BCF) adalah rasio antara konsentrasi logam berat pada akar dengan konsentrasi logam berat pada sedimen (Yoon et al., 2006; MacFarlane et al., 2007; Khan et al., 2013).

$$BCF = \frac{[\text{Logam Berat}]_{\text{akar}}}{[\text{Logam Berat}]_{\text{sedimen}}}$$

Hasil dan Pembahasan

Parameter fisikokimia air dan sedimen

Terkait dengan fitoremediasi di pesisir, perlu diketahui karakteristik fisikokimia perairan dan sedimen (Yoon *et al.*, 2006). Kondisi fisikokimia perairan akan berpengaruh terhadap kondisi sedimen dan fisiologi serta pertumbuhan mangrove. Di sedimen, kandungan logam berat yang ada juga sangat dipengaruhi oleh kapasitas pertukaran ion, pH, redoks, spesiasi logam berat, ketersediaan nutrisi dan salinitas sedimen (Greger, 2004). Hasil pengukuran terhadap parameter fisikokimia perairan dan sedimen ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan tabel tersebut didapatkan bahwa pH pada air di keempat stasiun berkisar antara 7,10-7,46. Nilai pH tertinggi terdapat pada stasiun B dan terendah terdapat pada stasiun D. Untuk suhu pada keempat lokasi penelitian tidak menunjukkan perbedaan yang jauh dengan kisaran nilai 28,5-30⁰ C. Jika kedua parameter ini dibandingkan dengan baku mutu KepMen LH No 51 tahun 2004 maka kedua parameter tersebut berada pada kisaran baku mutu yang artinya masih berada pada batas aman dan normal untuk kondisi perairan tropis terutama untuk kehidupan ekosistem mangrove.

Salinitas pada keempat stasiun menunjukkan perbedaan yang jelas dimana stasiun yang berada di TMMA mendapat pasokan air tawar dari Sungai Angke sehingga salinitasnya cenderung rendah yaitu 2‰ (Stasiun C dan D). Stasiun yang berada di HLAK cenderung dekat dengan laut sehingga mendapat pengaruh air laut dan salinitasnya cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan stasiun yang berada di TMMA. Nilai salinitas pada stasiun A dan B masing-masing adalah 6‰ dan 5‰. Nilai Kandungan oksigen terlarut (DO) menunjukkan perbedaan antarlokasi dimana stasiun A dan B berada di HLAK, lebih rendah dibandingkan pada stasiun C dan D berada di TMMA. Nilai DO pada stasiun A dan B adalah 0,71 mg.L⁻¹ dan 1,42 mg.L⁻¹, sedangkan pada stasiun C dan D masing-masing 4,26 dan 4,96 mg.L⁻¹ (Tabel 1).

Nilai salinitas sedimen memperlihatkan perbedaan lokasi penelitian. Sama halnya dengan salinitas yang diukur pada air, nilai salinitas sedimen pada stasiun A (33‰) dan B (34‰) lebih tinggi dibandingkan stasiun C (28‰) dan D (20%). Tingginya nilai salinitas pada sedimen bisa berpengaruh pada proses penyerapan dan translokasi logam berat di mangrove (Khan *et al.*, 2013). Pengukuran nilai pH pada sedimen dengan menggunakan pH meter khusus sedimen tidak menunjukkan perbedaan yang cukup jauh. Nilai pH sedimen pada stasiun yang berada di HLAK cenderung lebih tinggi dibandingkan SMMA. Nilai pH sedimen pada stasiun A dan B masing-masing adalah 6,8 dan 8,9 sedangkan stasiun C dan D yang berada di SMMA yaitu 6,1 dan 6,0. Nilai kelembaban (humiditas) pada sedimen di kedua lokasi memperlihatkan perbedaan jenis sedimen. Stasiun A dan B mempunyai humiditas yang rendah yaitu 10%, sedangkan stasiun C dan D adalah 30%.

Pada umumnya ekosistem mangrove tumbuh pada substrat yang sedikit mengandung oksigen (anaerob) (Hogarth, 1999). Terjadi proses pemanfaatan oksigen untuk respirasi aerobik sehingga kandungan oksigen tersebut berkurang. Kandungan oksigen yang ada juga berpengaruh terhadap pH dan Eh Sedimen. Secara umum nilai pH di Muara Angke (HLAK dan SMMA) berada dalam kondisi asam yaitu pH<7. pH pada sedimen sangat berpengaruh pada proses dinamika dekomposisi di ekosistem mangrove selain suhu, kelembaban, aerasi, populasi mikroba dan fauna sedimen. Perbedaan lokasi dan banyaknya bahan organik yang berasal dari serasah mangrove pada kedua lokasi tersebut sangat mempengaruhi nilai pH dan kelembaban. HLAK lebih dominan sampah dibandingkan dengan SMMA (lebih banyak serasah mangrove). Penurunan pH dan kenaikan suhu juga akan mengurangi adsorpsi senyawa logam berat pada bentuk partikulat. Pada suhu yang lebih dingin akan meningkatkan adsorpsi logam berat ke partikulat untuk mengendap di dasar laut. Sementara saat suhu naik, senyawa logam berat akan melarut karena terjadi penurunan laju adsorpsi ke dalam partikulat (Hogarth, 1999; Greger, 2004).

Tabel 1. Parameter fisika kimia air dan sedimen di lokasi penelitian

No	Parameter	Satuan	Stasiun			
			A	B	C	D
Air						
1	pH (in-situ)	-	7,35	7,20	7,46	7,10
2	Suhu (in-situ)	°C	30	28,5	29,5	28,5
3	Salinitas (in-situ)	‰	6	5	2	2
4	Oksigen Terlarut	mg/L	0,71	1,42	4,26	4,96
Sedimen						
5	Salinitas	‰	33	34	28	20
6	pH		6,8	6,9	6,1	6,0
7	Humiditas	%	10	10	30	30

Pengukuran fraksi sedimen dilakukan untuk mengetahui tipe substrat yang berada di lokasi penelitian. Hal tersebut sangat berpengaruh pada pertumbuhan mangrove, dimana masing-masing mangrove akan tumbuh dengan subur pada substrat yang sesuai dengan tipe akar. Hasil analisa menunjukkan bahwa stasiun C dan D didominasi oleh substrat liat, kemudian debu dan pasir dengan prosentase masing-masing adalah 68,8-71,1%, 28,4-31,1% dan 0,1-0,5%. Stasiun B didominasi oleh substrat debu (76,5%), sedangkan stasiun A lebih didominasi oleh dua substrat yaitu debu (43,6%) dan liat (51,4%) (Gambar 2). Jika dilihat pada jenis mangrove yang tumbuh di masing-masing stasiun, maka stasiun C dan D merupakan tempat cocok untuk spesies *Sonneratia* spp. Spesies tersebut condong tumbuh pada substrat liat berpasir. Selain berpengaruh pada media tanam, kondisi substrat juga akan berpengaruh pada konsentrasi logam khususnya lumpur (Hogarth, 1999; Greger, 2004; Yoon et al., 2006).

Kandungan logam berat pada sedimen, akar dan daun

Sebelum ditranslokasikan ke jaringan tanaman, logam berat yang berasal dari air akan terdeposisi menuju sedimen dan terakumulasi. Proses ini akan berlangsung secara kontinu. Hasil pengukuran kandungan logam berat pada sedimen menunjukkan bahwa logam Zn merupakan logam yang memiliki konsentrasi paling tinggi dibandingkan dengan Cu dan Pb ($Zn > Cu > Pb$) (Tabel 2). Konsentrasi logam Zn berkisar antara 210,21-274,37 mg.kg⁻¹, dimana konsentrasi tertinggi terdapat pada stasiun A dan terendah terdapat pada stasiun C. Untuk logam Cu sebesar 52,19-59,66 mg.kg⁻¹, sedangkan Pb berkisar antara 43,73-54,85 mg.kg⁻¹. Logam Cu dan Pb keduanya tertinggi terdapat pada stasiun A dan terendah terdapat pada stasiun C. Berdasarkan lokasi pengamatan, maka stasiun-stasiun yang berada di HLAK lebih tinggi dibandingkan dengan stasiun yang berada di SMMA. Jika dibandingkan dengan pola kandungan logam berat hasil penelitian Hamzah dan Setiawan (2010) di bagian barat HLAK, maka kandungan logam di bagian timur HLAK dan SMMA mempunyai pola yang sama yaitu logam Zn lebih tinggi dibandingkan dengan Cu dan Pb. Kandungan logam Zn, Cu dan Pb di bagian barat HLAK adalah 56,58-69,3 ppm, 28,41- 51,36 ppm dan 18,64-29,57 ppm. Pola yang sama juga diperlihatkan Arifin dan Fadhlina (2009) di Teluk Jakarta, dimana nilai Zn (795,24-1200,62 mg.kg⁻¹) lebih tinggi dibandingkan Cu (13,29-38,77 mg.kg⁻¹) dan Pb (7,74-14,09 mg.kg⁻¹). Rochyatun dan Rozak (2007) juga mengamati kandungan logam berat pada sedimen di bagian barat, tengah dan timur Teluk Jakarta dan hasilnya adalah logam Zn lebih tinggi dibandingkan Pb dan Cu.

Kandungan logam berat pada akar memperlihatkan Pb merupakan logam yang paling tinggi dengan konsentrasi antara 50,16-55,62 ppm. Kandungan logam Pb pada akar tertinggi terdapat pada stasiun A spesies *Rhizophora apiculata* 3 dan terendah terdapat pada stasiun C spesies *Sonneratia caseolaris* 1. Kandungan logam Zn berkisar 39,27-68,35 ppm, dimana tertinggi terdapat pada stasiun A spesies *Rhizophora mucronata* 2 dan terendah terdapat pada stasiun spesies A spesies *Rhizophora apiculata* 3. Untuk logam Cu, konsentrasi logam ini berkisar antara 7,6-11,95 ppm. Nilai Cu pada akar tertinggi terdapat pada stasiun B spesies *Avicennia marina* 1 dan terendah terdapat pada stasiun A spesies *Rhizophora mucronata* 2 (Tabel 3). Hasil analisa logam Cu dan Zn yang dilakukan oleh Hamzah dan Setiawan (2010) di HLAK sebelah barat, menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan di timur HLAK dan SMMA yaitu 21,17-37,68 ppm dan 55,38-99,88 ppm. Namun untuk logam Pb, lebih rendah dengan konsentrasi 20,98-68,78 ppm. Untuk spesies *Avicennia marina*, hasil penelitian rata-rata kandungan logam berat Cu dan Pb pada akar di HLAK dan SMMA menunjukkan konsentrasi lebih rendah dibandingkan dengan akar *Avicennia marina* di Blanakan, Subang, Jawa Barat (Cu=15,28 ppm; Pb=105,60 ppm) dan di Cilacap, Jateng (Cu=28,83 ppm; Pb=64,44 ppm). Namun pada spesies yang sama, nilai logam berat Cu dan Pb pada akar di HLAK dan SMMA lebih tinggi dibandingkan di TN Alas Purwo, Jatim (Cu=5,89 ppm; Pb= <0,006 ppm) (Heriyanto dan Subiandono, 2011).

Sama halnya dengan akar, konsentrasi logam Pb pada daun merupakan konsentrasi paling tinggi dibandingkan dengan Cu dan Zn (Tabel 3). Logam Pb pada daun berkisar 46,57-58,57 ppm dengan spesies *Avicennia marina* 1 pada Stasiun B merupakan spesies yang memiliki konsentrasi Pb tertinggi, sedangkan *Rhizophora mucronata* 2 Stasiun A terendah. Untuk logam Zn dan Cu masing-masing berkisar antara 35,65-55,5 ppm dan 1,16-7,34 ppm. Konsentrasi Zn akar tertinggi terdapat pada stasiun D spesies *Sonneratia caseolaris* dan terendah terdapat pada Stasiun A spesies *Rhizophora mucronata* 1. Sedangkan untuk logam Cu, konsentrasi tertinggi terdapat pada stasiun D spesies *Sonneratia caseolaris* 3 dan terendah terdapat pada Stasiun A spesies *Rhizophora apiculata* 1. Hasil analisa logam Cu dan Pb yang dilakukan oleh Hamzah dan Setiawan (2010) di HLAK sebelah barat, menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan di timur HLAK dan SMMA yaitu 2,07-10,07 ppm dan 54,31-85,48 ppm. Namun untuk logam Zn, lebih tinggi dengan konsentrasi 47,86-67,45 ppm. Jika dibandingkan dengan penelitian lain terutama spesies *Avicennia marina*

Tabel 2. Kandungan logam Cu, Zn, dan Pb pada Sedimen

No.	Parameter	Satuan	Stasiun			
			A	B	C	D
1	Cu	mg/kg	59,66	57,15	52,19	54,32
2	Zn	mg/kg	274,37	259,73	210,21	214,42
3	Pb	mg/kg	54,85	50,5	43,73	47,02

hasil penelitian kandungan logam berat rata-rata Cu dan Pb pada daun di HLAK dan SMMA menunjukkan konsentrasi lebih rendah dibandingkan dengan akar *Avicennia marina* di Blanakan, Subang, Jawa Barat (Cu= 8,03 ppm; Pb 110,81 ppm) dan di Cilacap, Jawa Tengah (Cu=9,48 ppm; Pb=91,96 ppm). Namun pada spesies yang sama, nilai Cu dan Pb pada daun di HLAK dan SMMA lebih tinggi dibandingkan di TN Alas Purwo, Jawa Timur (Cu=9,93 ppm; Pb= 8,58 ppm) (Heriyanto dan Subiandono, 2011).

Jika dilihat konsentrasi ketiga logam yang ada di sedimen, akar maupun daun, terdapat dua kecenderungan logam yang berasal dari sedimen ke bagian organ mangrove. Kecenderungan yang pertama yaitu logam esensial (Zn dan Cu) cenderung tinggi di sedimen kemudian berkurang konsentrasinya di akar dan semakin berkurang di daun. Hal ini lebih ditekankan pada fungsi dan kegunaan kedua logam tersebut. Cu dan Zn sangat dibutuhkan oleh tumbuhan untuk pertumbuhan dan perkembangan, Cu sangat berguna untuk pertumbuhan jaringan di daun dimana pada jaringan ini terdapat proses fotosintesis (Kamaruzzaman et al., 2009). Selain itu, Cu berguna sebagai mikronutrien yang diperlukan mitokondria dan khloroplas, sedangkan Zn berguna dalam sistem enzim (MacFarlane dan Burchett, 2003). Kecenderungan yang kedua yaitu logam non esensial (Pb) relatif sama konsentrasinya baik di sedimen, akar dan daun. Hal ini diduga lebih disebabkan oleh karena adanya kapasitas atau kemampuan mangrove yang tinggi dalam menyerap logam Pb yang ada di sedimen oleh akar, kemudian ditranslokasikan ke daun. Selain diakumulasikan melalui akar, mekanisme lain mangrove dan tumbuhan lainnya mendapatkan logam melalui daun khususnya di daerah polusi. Pada daun, logam Pb bisa mendapat asupan yang berasal dari transpor atmosfer, sehingga Pb pada daun mempunyai konsentrasi yang tinggi (Libes, 1992). Selain itu, tingginya logam Pb pada daun bisa terjadi melalui penempelan partikel Pb pada daun dan masuk ke dalam jaringan melalui stomata. Lokasi penelitian ini (Muara Angke) dekat dengan daerah industri, pelabuhan, dan muara dari beberapa sungai, sehingga tingginya logam Pb pada sedimen, akar dan daun mangrove juga diduga berasal dari aktivitas diatas.

Akumulasi, translokasi dan fitoremediasi

Akumulasi dan translokasi logam Pb, Cu dan Zn bisa dilihat dengan membandingkan konsentrasi pada jaringan tumbuhan (akar, daun maupun batang). Pada dasarnya, tumbuhan mangrove mampu beradaptasi dan mempunyai daya toleransi terhadap logam berat, bahkan mampu mengakumulasi logam berat hingga 1000 mg.kg⁻¹ (Baker dan Brooks, 1989). Kim et al. (2003); Zu et al. (2005); Cui et al. (2007); MacFarlane et al. (2007); dan Khan et al. (2013) menyatakan bahwa untuk mengetahui seberapa besar perpindahan logam dari satu jaringan ke jaringan yang lain, bisa diketahui dari faktor bioakumulasi/*enrichment* (BAC/EC), biokonsentrasi (*bioconcentration factor*/BCF) dan biotranslokasi (BTC/TF). Dalam hal ini, BAC/EC merupakan rasio kandungan logam berat dalam daun dengan kandungan logam berat pada sedimen, BCF merupakan rasio kandungan logam berat dalam akar dengan kandungan logam berat di sedimen, sedangkan BTC/TF merupakan rasio konsentrasi logam berat dalam daun dan akar. BAC, BCF dan BTC bisa mengetahui seberapa besar konsentrasi kandungan logam berat dari lingkungan yang diserap oleh jaringan akar, kemudian disebar dan diakumulasikan ke jaringan lainnya (daun dan kulit batang). Selain itu, BCF dan BTC bisa digunakan untuk mengetahui potensi tumbuhan untuk tujuan fitoremediasi (Yoon et al., 2006).

Nilai BAC untuk logam Cu berkisar antara 0,02-0,13, sedangkan BAC daun untuk logam Zn dan Pb berturut-turut adalah 0,12-0,25 dan 0,84-1,10. Nilai BAC untuk logam Cu, Zn dan Pb tertinggi terdapat pada Stasiun D spesies *Sonneratia caseolaris* 3, sedangkan terendah terdapat pada spesies *Rhizophora mucronata* 1 Stasiun B & *Rhizophora apiculata* 3 stasiun A (Cu), *Rhizophora apiculata* 3 Stasiun A (Zn), dan *Rhizophora mucronata* 2 Stasiun A (Pb) (Tabel 4). Jika dilihat akumulasi logam berdasarkan nilai BAC, maka dapat dilihat bahwa tinggi rendahnya nilai rasio sangat ditentukan oleh konsentrasi logam baik di daun maupun di sedimen. Kandungan logam Pb cenderung memiliki konsentrasi yang sama antara sedimen dan daun, sehingga rasionya cenderung mendekati 1. Sedangkan logam Zn pada daun mempunyai konsentrasi 4-5 kali lipat dari sedimen sehingga nilai rasio cenderung kecil (<1). Hal yang

Tabel 3. Kandungan logam Cu, Zn, dan Pb pada Akar dan Daun

No	Parameter	Satuan	Lokasi dan Spesies mangrove									
			B-RA 1	A-RA 2	A-RA 3	B-RM 1	A-RM 2	B-AM 1	A-AM 2	C-SC 1	C-SC 2	D-SC 3
Akar												
1	Cu	ppm	6,12	11,49	9,69	10,38	7,6	11,95	10,39	7,32	9,95	8,92
2	Zn	ppm	40,42	50,54	39,27	40,08	68,35	45,01	43,96	49,57	53,22	55,93
3	Pb	ppm	51,32	54,92	55,62	53,28	55,27	50,89	50,71	50,16	52,22	54,72
Daun												
1	Cu	ppm	3,83	5,67	1,16	1,73	2,43	4,68	6,93	2,14	3,18	7,34
2	Zn	ppm	38,94	39,88	35,65	35,73	38,24	48,98	48,86	47,16	46,59	55,5
3	Pb	ppm	49,41	51,89	58,45	49,23	46,57	58,57	53,42	48,75	48,09	50,38

Keterangan: kode spesies mangrove disingkat dengan B-RA1 dst. Sebagai contoh B-RA1=*Rhizophora apiculata*-1 St. B dan B-RM1=*Rhizophora mucronata*-1St. B

Tabel 4. Nilai BCF daun, BCF Akar dan TF mangrove di HLAQ dan SMMA

Spesies	Stasiun	BAC daun			BCF akar			BTC		
		Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb
<i>Rhizophora mucronata</i> 1	B	0,02	0,13	0,90	0,15	0,15	0,97	0,17	0,89	0,92
<i>Rhizophora mucronata</i> 2	A	0,03	0,13	0,84	0,11	0,22	0,99	0,32	0,56	0,84
<i>Rhizophora apiculata</i> 1	B	0,06	0,14	0,90	0,09	0,14	0,93	0,63	0,96	0,96
<i>Rhizophora apiculata</i> 2	A	0,08	0,13	0,93	0,16	0,17	0,99	0,49	0,79	0,94
<i>Rhizophora apiculata</i> 3	A	0,02	0,12	1,05	0,13	0,13	1,00	0,12	0,91	1,05
<i>Sonneratia caseolaris</i> 1	C	0,04	0,21	1,06	0,17	0,16	0,93	0,29	0,95	0,97
<i>Sonneratia caseolaris</i> 2	C	0,05	0,21	1,05	0,14	0,14	0,91	0,32	0,88	0,92
<i>Sonneratia caseolaris</i> 3	D	0,13	0,25	1,10	0,13	0,25	1,09	0,82	0,99	0,92
<i>Avicennia marina</i> 1	B	0,07	0,17	1,07	0,15	0,14	0,97	0,39	1,09	1,15
<i>Avicennia marina</i> 2	A	0,10	0,16	0,96	0,11	0,22	0,99	0,67	1,11	1,05

sama juga dengan logam Cu, dimana nilai rasio cenderung kurang dari 1. MacFarlane et al. (2007) menganalogikan nilai BAC sama dengan leaf bioconcentration factor (BCF daun). Hasil BAC di HLAQ dan TMMA Jika dibandingkan dengan hasil penelitian MacFarlane et al. (2007) skala laboratorium lebih kecil yaitu dengan nilai BAC Cu=0,47 dan Zn=0,51, namun BAC Pb lebih tinggi yaitu 0,11.

Nilai BCF untuk logam Cu umumnya cenderung sama dengan BAC yaitu berkisar antara 0,09-0,17. BCF logam Cu tertinggi terdapat pada stasiun C spesies *Sonneratia caseolaris* 1 dan terendah terdapat pada stasiun B spesies *Rhizophora apiculata* 1. Nilai BCF untuk logam Zn dan Pb masing-masing adalah 0,13-0,25 dan 0,91-1,09. BCF Zn dan Pb tertinggi terdapat pada stasiun D spesies *Sonneratia caseolaris* 3. BCF Zn terendah terdapat pada stasiun A spesies *Rhizophora apiculata* 3, sedangkan BCF Pb terendah terdapat pada stasiun C spesies *Sonneratia caseolaris* 2. Nilai BCF di HLAQ dan TMMA lebih kecil dibandingkan oleh penelitian lainya dengan nilai lebih dari 1 yaitu nilai BCF 1,5-2,4 pada spesies *A. marina* (Sadiq dan Zaidi, 1994), 1,7 spesies

Aegicerac corniculatum dan 1,2 spesies *Kandelia candel* (Chen et al., 2003). Hasil penelitian menunjukan bahwa kandungan logam Pb lebih mudah ditranslokasikan dari sedimen menuju akar maupun daun dibandingkan logam Cu dan Zn (BAC/BCF_{Pb}>BAC/BCF_{Zn}>BAC/BCF_{Cu}). BAC khusus untuk logam esensial semakin berkurang/mengecil dibandingkan dengan logam non esensial walaupun konsentrasi di lingkungan (air dan sedimen) meningkat. Hal tersebut diduga karena rendahnya konsentrasi logam esensial pada daun/akar yang ditranslokasikan dari akar menuju daun dan dimanfaatkan untuk proses metabolisme, walaupun logam yang mempunyai konsentrasi tinggi pada jaringan tumbuhan cenderung terbatas untuk ditranslokasikan ke jaringan lainnya dikarenakan sifat toksiknya (MacFarlane dan Burchett, 2002). Berdasarkan pada nilai BCF dan BAC yang besarnya lebih dari 1 mengindikasikan terjadinya proses akumulasi dan translokasi (MacFarlane et al., 2007).

Translokasi (BTC) logam berat dari akar ke daun menunjukan proses perpindahan dan distribusi logam ke jaringan tumbuhan lainnya. Berdasarkan nilai BTC pada Tabel 4, dapat dilihat

Tabel 5. Nilai FTD daun dan Akar mangrove di HLAK dan TMMA

Spesies	Stasiun	FTD Daun			FTD Akar		
		Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb
<i>Rhizophoramucronata 1</i>	B	-0,14	-0,77	-0,03	-0,02	-0,74	-0,77
<i>Rhizophoramucronata 2</i>	A	-0,29	-0,43	-0,01	-0,21	-0,33	0,15
<i>Rhizophoraapiculata 1</i>	B	-0,57	-0,83	-0,06	-0,54	-0,82	-0,03
<i>Rhizophoraapiculata 2</i>	A	-0,42	-0,66	-0,01	-0,33	-0,62	0,04
<i>Rhizophoraapiculata 3</i>	A	-0,10	-0,79	0,00	0,01	-0,78	-0,05
<i>Sonneratiacaseolaris 1</i>	C	-0,26	-0,74	0,09	-0,12	-0,79	-0,05
<i>Sonneratiacaseolaris 2</i>	C	-0,27	-0,67	0,13	-0,18	-0,73	-0,01
<i>Sonneratiacaseolaris 3</i>	D	-0,70	-0,75	0,18	-0,70	-0,77	0,17
<i>Avicennia marina 1</i>	B	-0,32	-0,92	-0,08	-0,24	-0,95	-0,18
<i>Avicennia marina 2</i>	A	-0,57	-0,95	-0,09	-0,56	-0,89	-0,06

bahwa BTC logam Cu bervariasi pada beberapa spesies mangrove di HLAK dan TMMA dengan kisaran BTC adalah 0,17-0,82. Nilai BTC logam Cu tertinggi terdapat pada Stasiun D spesies *Sonneratia caseolaris 3* dan terendah terdapat pada stasiun B spesies *Rhizophora mucronata 1*. Untuk logam Zn, BTC berkisar antara 0,56-1,11, dimana spesies *Avicennia marina 2* pada Stasiun A merupakan stasiun yang memiliki nilai BTC tertinggi dan *Rhizophora mucronata 2* stasiun A merupakan spesies yang memiliki BTC terendah. BTC logam Pb cenderung memiliki perbedaan yang tidak jauh antarspesies, dimana spesies *Avicennia marina 1* pada Stasiun B merupakan stasiun yang memiliki BTC tertinggi (1,15), sedangkan *Rhizophora mucronata 2* Stasiun A merupakan stasiun yang memiliki BTC terendah (0,84).

Adanya nilai translokasi yang melebihi dari 1 (*Rhizophora apiculata* (St. A); *Avicennia marina 1* (St. B); *Avicennia marina 2* (St. A) menunjukkan tingkat mobilitas logam tinggi. Mobilitas logam tersebut tidak terjadi pada mangrove yang mempunyai akar nafas (Lotfinasabasi dan Gunale, 2012). Hasil analisa BTC ketiga logam di HLAK dan SMMA mengikuti pola $BTC_{Pb} > BTC_{Zn} > BTC_{Cu}$ dan ini mengindikasikan bahwa translokasi Pb dari akar menuju daun lebih tinggi dibandingkan dengan Zn dan Cu. Heriyanto dan Subiandono (2011) juga menemukan pola yang sama dimana logam Pb lebih terakumulasi pada jaringan akar dan daun dibandingkan jaringan lainnya (kulit batang). Untuk tumbuhan yang bisa dikatakan hiperakumulator jika memenuhi syarat nilai BAC dan BTC lebih dari 1 (Ma et al., 2001b; Baker dan Whiting, 2002). Ketika membandingkan nilai BAC pada penelitian ini dengan tumbuhan hiperakumulator seperti *Pteris vittata* (Ma et al., 2001a), dimana nilai BCF As (arsen) lebih besar dari 100, maka nilai BAC pada mangrove yang diamati sangat rendah. Selain itu, jika dibandingkan dengan BCF untuk logam Zn pada tanaman hiperakumulator seperti *Thlaspi*

caerulescens (Zhao et al., 2003), nilai BCF logam tersebut masih dibawah BCF As yaitu sekitar 40. Brooks (1981) dalam MacFarlane et al. (2007) mengungkapkan bahwa, tanaman bisa dikatakan hiperakumulator jika kandungan logam berat dari jaringan tumbuhan tersebut adalah $> 500 \mu\text{g.g}^{-1}$ Cu dan $10.000 \mu\text{g.g}^{-1}$ Zn.

Untuk tujuan fitoremediasi, bisa digunakan pendekatan BAC, BCF dan BTC dengan kriteria spesies tumbuhan yang memiliki nilai BAC dan BCF tinggi, namun nilai BTC-nya rendah (Yoon et al., 2006). Untuk mempermudah perhitungan fitoremediasi dilakukan pengurangan antara nilai BAC/BCF dengan BTC dan hasilnya adalah FTD daun dan akar. Berdasarkan Tabel 5, didapatkan bahwa FTD daun paling tinggi terdapat pada spesies *Sonneratia caseolaris 3* Stasiun D (0,18) dan *Sonneratia caseolaris 2* Stasiun C (0,13), sedangkan FTD akar tertinggi terdapat pada spesies *Sonneratia caseolaris 3* Stasiun D (0,17). Nilai FTD tersebut, lebih kecil dibandingkan dengan nilai FTD pada spesies *Avicennia marina* (FTD daun=2,36 dan akar=2,09) dan *Sonneratia caseolaris* (FTD daun=1,93 dan akar=1,98) di HLAK bagian barat (Hamzah dan Setiawan, 2010).

Berdasarkan hasil perhitungan FTD akar dan daun dapat disimpulkan bahwa *Sonneratia caseolaris 3* diduga dapat digunakan untuk tujuan fitoremediasi khususnya fitostabilisasi. Proses akumulasi dan mobilisasi logam dengan menggunakan jaringan akar dikenal dengan istilah fitostabilisasi. Fitostabilisasi mampu meminimalisir pergerakan polutan (logam berat) dalam sedimen (Susarla et al., 2002). Cara kerja fitostabilisasi adalah menggunakan kemampuan akar mengubah kondisi lingkungan. Tumbuhan akan menghentikan pergerakan logam yang diserap dan diakumulasi oleh akar, kemudian diserap dan diendapkan dalam rizosfer. Proses tersebut juga nantinya akan mengurangi logam berat dalam rantai makanan.

Kesimpulan

Kondisi lingkungan (air dan sedimen) di HLAK dan TMMA berada dalam batas aman untuk pertumbuhan mangrove. Perhitungan BAC dan BCF menunjukkan bahwa logam Pb lebih mudah ditranslokasikan dari sedimen menuju daun dan akar dibandingkan Cu dan Zn ($BAC/BCF_{Pb} > BAC/BCF_{Zn} > BAC/BCF_{Cu}$). Hal yang sama juga dapat dilihat pada BTC, dimana Pb lebih mudah di translokasikan dari akar menuju daun dibanding Zn dan Cu ($BTC_{Pb} > BTC_{Zn} > BTC_{Cu}$). Disimpulkan bahwa untuk tujuan fitoremediasi khususnya fitostabilisasi, spesies *Sonneratia caseolaris* 3 pada stasiun D diduga dapat digunakan di daerah Muara Angke.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala, tim peneliti perubahan iklim dan teknisi Balai Penelitian dan Observasi Laut sehingga kegiatan penelitian ini bisa terlaksana. Ucapan terima kasih juga diucapkan kepada BKSDA dan Dinas Kelautan dan Pertanian Provinsi DKI Jakarta yang telah mengizinkan penulis melakukan penelitian di kedua lokasi. Terimakasih juga disampaikan kepada dua anonymous reviewer.

Daftar Pustaka

- Akin, H.K. & E. Ünlü. 2007. Heavy Metal Concentration in Water, Sediment, Fish and Some Benthic Organisms from Tigris River, Turkey. *Environ. Monit. Assess.* 131:323-337.
- Alloway, B.J. 1994. Toxic Metals in Soil-Plant Systems, Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- Annie, M.P.A. & G.C. Sigua. 2013. Phytoremediation: A Green Technology to Remove Environmental Pollutants. *American J. Climate Change.* 2(1): 71-86.
- APHA (American Public Health Association). 2005. American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, AWWA, WPCF. 21st Eds. Hal 3-10
- Arifin, Z. & D. Fadhlina. 2009. Fraksinasi Logam Berat Pb, Cd, Cu dan Zn dalam Sedimen dan Bioavailibilitasnya Bagi Biota di Perairan Teluk Jakarta. *Ilmu Kelautan.* 14(1):27-32.
- Baker, A.J.M. & R.R. Brooks. 1989. Terrestrial Higher Plants Which Hyperaccumulate Metallic Elements-A Review of Their Distribution, Ecology and Phytochemistry. *Biorecovery.* 1:81-126.
- Baker, A.J.M. & S.N. Whiting. 2002. In Search of Holy grail- a Further Step in Understanding Metal Hyperaccumulation?. *New Phytol.* 155:1-4.
- Chen, X.Y., E.P.K. Tsang & A.L.W. Chan. 2003. Heavy Metal Content in Sediments Mangrove and Bivalves from Tiongkok, Hongkong. *China Environ. Sci.* 23:480-484.
- Cui, S., Q. Zhou & L. Chao. 2007. Potential Hyperaccumulator of Pb, Zn, Cu and Cd in Endurant Plants Distributed in an Old Smeltery, Northeast China. *Environ. Geol.* 51:1043-1048.
- Greger, M. 2004. Metal Availability, Uptake, Transport and Accumulation in Plants. In Prasad, M. N. V. (Ed). Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems. Springer. Berlin. p.1-27.
- Hamzah, F. & A. Setiawan. 2010. Akumulasi Logam Berat Pb, Cu, dan Zn di Hutan Mangrove Muara Angke, Jakarta Utara. *J. Ilmu Teknol. Kel. Trop.* 2(2):41-52.
- Handayani, T. 2006. Bioakumulasi Logam Berat dalam Mangrove *Rhizophora mucronata* Dan *Avicennia marina* di Muara Angke Jakarta. *J. Tek. Ling.* 7(3):266-270.
- Hashim, N.R. & F. Hughes. 2009. The Responses of Secondary Forest tree Seedlings to Soil enrichment in Peninsular Malaysia: An Experimental Approach. *Trop. Ecol.* 3(1):50-55.
- Heriyanto, N.M. & E. Subiandono. 2011. Penyerapan Polutan Logam Berat (Hg, Pb dan Cu) oleh Jenis-Jenis Mangrove. *J. Penel. Hutan Konserv. Alam.* 8(2):177-188.
- Hogarth, P.J. 1999. The Biology of Mangroves. Oxford University Press. 228 p.
- Hutagalung, H.P., Setiapermana, D. & S.H. Riyono. 1997. Metode Analisis Air Laut, Sedimen dan Biota. Buku kedua. Jakarta: P30-LIPI. 182 pp
- Kamaruzzaman, B.Y., M.C. Ong, K.C.A. Jalal, S. Shahbudin & O.M. Nor. 2009. Accumulation of Lead and Copper in *Rhizophora apiculata* from Setiu Mangrove Forest, Terengganu, Malaysia. *J. Environ. Biol.* 30(5):821-824.
- Khan, M.U., M. Ahmed, S.S. Shaukat, K. Nazim & Q.M. Ali. 2013. Effect of Industrial Waste on Early Growth and Phytoremediation Potential of

- Avicennia Marina* (Forsk.) Vierh. *Pak. J. Bot.* 45(1):17-27.
- Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004. Baku mutu Air Laut
- Kim, L.S., K.H. Kang, P.J. Green & E.J. Lee. 2003. Investigation of Metal Accumulation in *Polygonum thunbergii* for Phytoextraction. *Environ. Poll.* 126(2):235-243.
- Libes, S.M. 1992. An Introduction to Marine Biogeochemistry. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Lotfinasabasl, S. & V.R. Gunale. 2012. Studies on Heavy Metals Bioaccumulations Potential of Mangrove Species *Avicennia marina*. *Int. J. Engineering Sci. Technol.* (4)10: 4411-4421.
- Ma, L.Q., T.U. Komar, C. Tu & W.A. Zhang. 2001a. A Fern That Hyperaccumulates Arsenic. *Nature.* 409:579.
- Ma, L.Q., K.M. Komar, C. Tu, W. Zhang, Y. Cai & E.D. Kenneley. 2001b. Addendum: a Fern That Hyperaccumulates Arsenic. *Nature.* 411:438.
- MacFarlane, G.R. & M.D. Burchett. 2001. Photosynthetic Pigments and Peroxides Activity as Indicators of Heavy Metal Stress in the Grey Mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Mar. Poll. Bull.* 42: 233-240.
- MacFarlane, G.R. & M.D. Burchett. 2002. Toxicity, Growth and Accumulation Relationships of Copper, Lead and Zinc in the Grey Mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. *Mar. Environ. Res.* 54:65-84.
- MacFarlane, G. R., A. Pulkownik & M.D. Burchett. 2003. Accumulation and Distribution of Heavy Metals in grey Mangrove, *Avicennia marina* (Forsk) Vierh: Biological indication potential. *Environ. Poll.* 123:139-151.
- MacFarlane, G.R., C.E. Koller & S.P. Blomberg. 2007. Accumulation and Partitioning of Heavy Metals in Mangroves: A Synthesis of Field Based Studies. *Chemosphere.* 69:1454-1464.
- Nazli, M.F. & N.R. Hasim. 2010. Heavy Metal Concentration in an Important Mangrove Species *Sonneratia caseolaris* in Peninsular Malaysia. *Environment Asia.* 3:50-55.
- Peters, E.C., N.J. Gassman, J.C. Firman, R.H. Richmond & E.A. Power. 1997. Ecotoxicology of Tropical Marine Ecosystems. *Environ. Toxicol. Chem.* 16:12-40.
- Rochayatun, E. & A. Rozak. 2007. Pemantauan Kadar Logam Berat dalam Sedimen di Perairan Teluk Jakarta. *Makara Sains.* 11(1): 28-36.
- Sadiq, M. & T.H. Zaidi. 1994. Sediment Composition and Metal Concentration in Mangrove Leaves from the Saudi Coast of Arabian Gulf. *Sci. Total Environ.* 155:1-8.
- Susarla, S., V.F. Medina & S.C. McCutcheon. 2002. Phytoremediation, an Ecological Solution to Organic Contamination. *Ecol. Eng.* 18:647-658.
- Thomas, C. & O.J. Eong. 1984. Effects of the Heavy Metals Zn and Pb on *R. mucronata* and *A. alba* seedlings. In: Proceedings of the Asian symposium on mangroves and Environment Research and Management (Eds.: E. Soepadmo, A.M. Rao and M.D. MacIntosh). University of Malaysia, ISME. pp.568-574
- Yoon, J., C. Xinde, Z. Qixing & L.Q. Ma. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in Native Plants Growing on a Contaminated Florida Site. *Sci. Total Environ.* 368(2-3):456-464.
- Zao, F.J., E. Lombi & S.P. McGrath. 2003. Assessing the Potential for Zinc and Cadmium Phytoremediation with the Hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Soil.* 249:37-43.
- Zeng, W.J., X.Y. Chen & P. Lin. 1997. Accumulation and Biological Cycling of Heavy Metal Elements in *Rhizophora stylosa* mangroves in Yingluo Bay, China. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 159: 293-301.
- Zu, Y.Q., Y. Li, J.J. Chen, H.Y. Chen, L. Qin & C. Schwartz. 2005. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China. *Environ. Internat.* 31:755-762.