

Biosorpsi Perifiton terhadap Ion Pb²⁺ dan Ni²⁺

Evi Susanti¹, Fajar Sumi Lestari², Nofdianto¹

Pusat Penelitian Limnologi – LIPI
Komplek CSC-BG LIPI Jalan Jakarta-Bogor KM. 46

Email: evi@limnologi.lipi.go.id

Abstrak

Biosorpsi merupakan salah satu metode alternatif yang efektif dalam mengatasi pencemaran logam berat di perairan. Penelitian ini memanfaatkan perifiton epilithic sebagai bioakumulator ion Pb²⁺ dan Ni²⁺ dengan mempelajari pengaruh waktu, bobot biosorben, konsentrasi logam berat, kapasitas dan efisiensi biosorpsi Pb²⁺ dan Ni²⁺. Penelitian dilakukan pada skala laboratorium menggunakan sistem kanal berliku dengan panjang 1,20 m dan lebar 1,00 m. Sistem kanal diisi dengan air sebanyak 132 L dengan luas area perifiton sebesar 1,20 m², kedalaman 0,09 – 0,10 m serta kecepatan arus 0,04 – 0,06 m/s. Konsentrasi Pb²⁺ dan Ni²⁺ yang dilarutkan pada media air masing-masing sebesar 1,40 mg/L dan proses bioakumulasi diamati selama 24 jam. Komunitas perifiton didominasi oleh jenis *Spirogyra* sp berdasarkan pengamatan menggunakan mikroskop dan pembacaan gugus fungsi menggunakan spektrum inframerah (FTIR). Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi Pb²⁺ yang tersisa dalam air 0,05 mg/L (menyisihkan 96%) dan Ni²⁺ 0,03 mg/L (menyisihkan 98%). Kapasitas bioakumulasi maksimum perifiton terhadap Pb²⁺ sebesar 1,97 mg/g dan Ni²⁺ sebesar 1,92 mg/g. Kinetika sorpsi Pb²⁺ dan Ni²⁺ mengikuti persamaan orde kedua semu masing-masing dengan nilai $k_2 = 4,5 \times 10^{-3}$ g·mg⁻¹·menit⁻¹ dan $2,26 \times 10^{-2}$ g·mg⁻¹·menit⁻¹ dengan koefisien determinasi (R^2) keduanya sebesar 0,971. Penelitian ini menunjukkan bahwa perifiton memiliki potensi sebagai bioakumulator ion Pb²⁺ dan Ni²⁺ pada suatu perairan lotik.

Kata kunci: bioakumulasi, perifiton, Pb²⁺, Ni²⁺, lotik

Pendahuluan

Keberadaan logam berat di lingkungan perairan semakin meningkat sejalan dengan perkembangan industri. Beberapa logam berat berada pada konsentrasi yang melampaui ambang batas sehingga dapat membahayakan ekosistem perairan dan kesehatan manusia. Kawasan perairan sering kali tercemar logam berat timbal (Pb) dan nikel (Ni) yang berasal dari buangan industri. Beberapa metode fisika-kimia telah diuji untuk mengatasi pencemaran logam berat tersebut, di antaranya presipitasi kimia, osmosis balik, pertukaran ion dan bioreduksi (Cabuk *et al.*, 2005), namun membutuhkan biaya yang relatif mahal, tidak efisien atau kapasitas adsorpsinya rendah. Pengembangan beberapa metode alternatif telah dilakukan dengan menggunakan metode biosorpsi. Biosorpsi dapat didefinisikan sebagai kemampuan makhluk hidup dalam mengikat atau menjerap senyawa logam maupun limbah lainnya pada permukaan dinding selnya (Gadd, 1990; Chojnacka &

Katarzyna, 2009). Biosorpsi terbukti cukup efektif, ekonomis dan ramah lingkungan dalam memindahkan ion logam dari media yang tercemari (Volesky, 1990). Salah satu biomassa yang dapat digunakan sebagai biosorben adalah perifiton yang keberadaannya melimpah di perairan tropis Indonesia. Perifiton telah dimanfaatkan dalam berbagai pengolahan limbah dan bioremediasi.

Perifiton merupakan organisme yang tumbuh atau menempel pada substrat padat di bawah air, tetapi tidak melakukan penetrasi ke dalam substrat tersebut, dan dikendalikan oleh energi cahaya untuk fotosintesis (Susanti & Nofdianto, 2014). Secara alami, perifiton bersifat tetap dan menempel pada substrat cenderung lebih banyak menerima polutan dari area tersebut dibandingkan dengan biota air lainnya. Perifiton dapat menjadi akumulator penting dari logam berat (Newman & McIntosh, 1989). Pemanfaatan perifiton sebagai biosorben logam berat dalam pengelolaan sumber daya air menjadi sangat penting dan strategis.

Mekanisme penyerapan logam berat menggunakan biomassa ini bersifat pasif dengan membentuk ikatan fisiko-kimia antara ion logam berat dan permukaan sorben seperti mineral organik, karbon aktif ataupun biomassa (Susanti & Nofdianto, 2014). Ekspresi deskripsif dan korelasi data kinetika diuji dan dipantau menggunakan model kinetika *pseudo-first order* (orde pertama semu) dan *pseudo-second order* (orde kedua semu) (Ho & McKay, 1999; Ho, 2006). Kegiatan penelitian bertujuan untuk mempelajari potensi dan kapasitas perifiton epilithic sebagai bioakumulator ion Pb^{2+} dan Ni^{2+} pada perairan lotik menggunakan sistem kanal artifisial. Pengamatan meliputi waktu kontak, bobot biosorben dan konsentrasi logam berat terhadap kapasitas dan efisiensi biosorpsi.

Bahan dan Metode

Bahan dan Alat

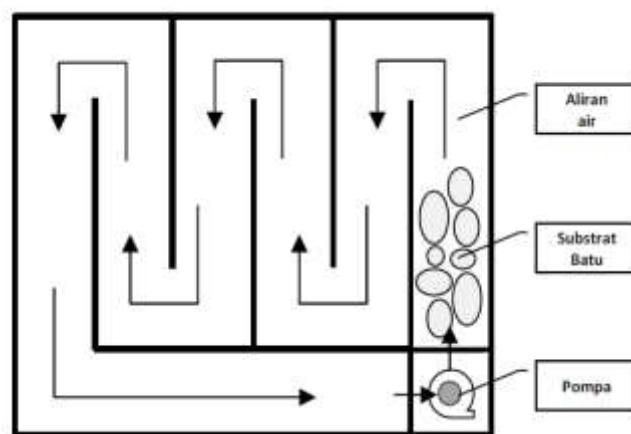
Bahan-bahan yang digunakan adalah perifiton, HNO_3 65%, larutan standar Pb 1000 mg/L, larutan standar Ni 1000 mg/L, larutan NPK 2 mg/L dan air deionisasi. Alat yang digunakan antara lain spektrofotometer serapan atom (*Graphite Furnace – Atomic Absorption Spectrophotometer*, AAS) Hitachi Z2000, Spektrofotometer Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) Shimadzu IRPrestige-21, mikroskop Nikon Diaphot 300, neraca analitik, penyaring vakum, oven, lempeng pemanas dan alat-alat kaca di laboratorium.

Metode Penelitian

Penelitian meliputi beberapa tahapan diantaranya pembuatan sistem kanal, kolonisasi perifiton, pembuatan larutan tunggal ion Pb^{2+} dan Ni^{2+} , bioakumulasi ion logam oleh perifiton, analisis laju kinetika sorpsi dan analisis struktur.

Pembuatan Sistem Kanal

Sistem kanal dirancang menyerupai kondisi perairan lotik (mengalir) pada kondisi stabil dan pada periode waktu yang pendek (Gambar 1). Sistem kanal yang digunakan merupakan kolam berlukis berbahan akrilik dengan dimensi panjang 1,20 m dan lebar 1,00 m. Kolam sistem kanal diisi dengan air sebanyak 132 L dan luas area perifiton 1,20 m^2 . Kedalaman sistem kanal berkisar 0,09 – 0,10 m dengan kecepatan arus 0,04 – 0,06 m/s.



Gambar 1. Model kanal artifisial pengujian dengan biosorben perifiton

Kolonisasi Perifiton

Perifiton ditumbuhkan pada sistem kanal dengan menyebar bibit perifiton dan menambahkan larutan NPK 2 mg/L kemudian dibiarkan tumbuh melekat pada substrat berupa batuan kali berdiameter 5 – 10 cm. Batuan ditempatkan pada sistem kanal dan dibiarkan tumbuh hingga 1 – 2 minggu dengan asumsi bahwa kurun waktu tersebut cukup untuk menentukan homogenitas pertumbuhan perifiton pada lapisan lotik (Susanti & Nofdianto, 2014). Sampel perifiton yang tumbuh diambil dan diamati di bawah mikroskop. Larutan Pb²⁺ dan Ni²⁺ dimasukkan ke dalam sistem kanal untuk selanjutnya diuji bioakumulasinya oleh biomassa perifiton.

Pembuatan Larutan Tunggal Ion Logam

Larutan tunggal Pb²⁺ dan Ni²⁺ dibuat dengan konsentrasi masing-masing 1,4 mg/L dalam pelarut air deionisasi dari larutan standar Pb²⁺ dan Ni²⁺ 1000 mg/L. Konsentrasi 1,4 mg/L merupakan nilai konsentrasi efektif 50% (EC₅₀) dari Pb dan Ni (Yap *et al.*, 2004).

Bioakumulasi Ion Logam oleh Perifiton

Bioakumulasi ion logam oleh perifiton diamati pada periode waktu pengamatan 0, 15, 30, 60, 120, 240, 480 dan 1.140 menit setelah pemaparan logam untuk menentukan laju sorpsi. Sampel air dan biomassa perifiton diambil secara acak. Sampel air didestruksi dengan HNO₃ 65% sesuai metode standar (APHA 1998). Biomassa perifiton yang melekat pada substrat batu disikat untuk selanjutnya dikeringkan pada suhu 40°C dan ditimbang bobot keringnya, kemudian didestruksi dengan HNO₃ 65% sesuai metode standar (APHA 1998). Larutan diukur menggunakan AAS pada panjang gelombang 261 nm untuk pengukuran Pb²⁺ dan 232 nm untuk Ni²⁺.

Kapasitas biosorpsi dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = \frac{V(C_{\text{awal}} - C_{\text{akhir}})}{m}$$

Efisiensi biosorpsi dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Efisiensi} = \frac{C_{\text{awal}} - C_{\text{akhir}}}{C_{\text{awal}}} \times 100\%$$

Dengan:

Q = kapasitas adsorpsi per bobot biomassa ($\mu\text{g/g}$ biomassa)

V = volume larutan (mL)

C_{awal} = konsentrasi awal larutan (mg/L)

C_{akhir} = konsentrasi akhir larutan (mg/L)

m = massa perifiton (g)

Kinetika Biosorpsi

Kinetika biosorpsi laju orde pertama semu dikemukakan oleh Lagergren (1989) yang diacu dalam Ho *et al.* (2000) melalui persamaan berikut:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_1 - q_t)$$

Untuk mendapatkan tetapan k_1 dan q_1 , persamaan di atas dapat diturunkan menjadi:

$$\log(q_1 - q_t) = \log(q_1) - \frac{k_1}{2,303} t$$

dengan k_1 adalah tetapan laju orde pertama semu (menit^{-1}), q_1 adalah jumlah ion logam yang dijerap pada kesetimbangan, dan q_t adalah jumlah ion logam yang dijerap pada permukaan adsorben pada waktu t (mg/g).

Kinetika laju orde kedua semu dievaluasi dari persamaan Ho *et al.* (2000) yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

dengan k_2 adalah tetapan laju orde kedua semu ($\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{menit})$), q_e adalah jumlah ion logam divalen yang diserap pada saat t (mg/g). Dengan memisahkan peubah pada persamaan, dan mengintegrasikan persamaan pada kondisi batas $t = 0$ sampai t dan $q_t = 0$ sampai t , persamaan dapat disusun kembali menjadi bentuk linear berikut:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} t$$

dengan h (mg/g jam) adalah tetapan $k_2 q_e^2$. Tetapan laju orde kedua (k_2) dapat ditentukan secara eksperimental dengan mengalurkan t/q_t dengan t .

Analisis Struktur

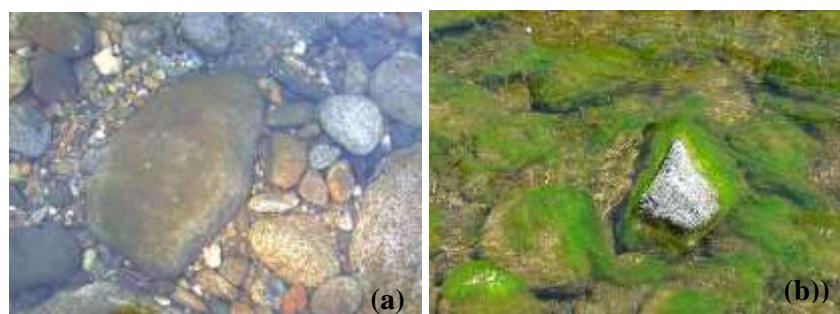
Struktur perifiton dianalisis sebelum dan setelah proses sorpsi. Sampel perifiton dikeringkan terlebih dahulu dan dicampur dengan KBr. Campuran digerus hingga halus lalu ditekan untuk membentuk pelet. Pelet yang diperoleh dimasukkan

ke tempat sampel dan direkam spektrum serapan inframerahnya pada panjang gelombang $400 - 4.000 \text{ cm}^{-1}$.

Hasil dan Pembahasan

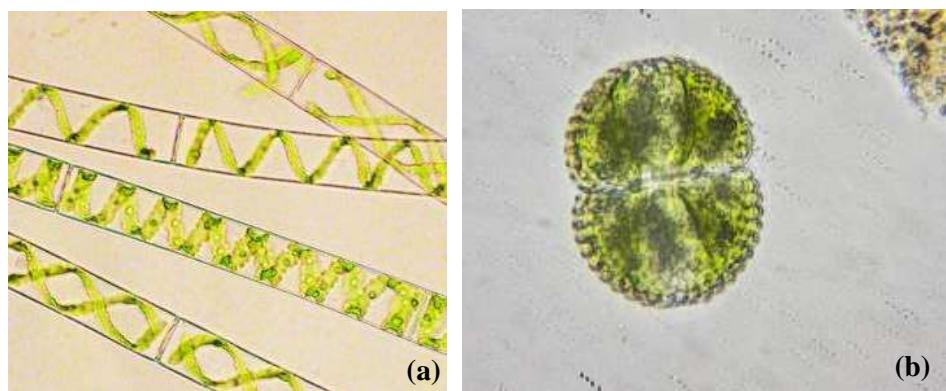
Koloni Perifiton

Perifiton ditumbuhkan pada substrat batuan kali (Gambar 2a) setelah dua minggu membentuk koloni perifiton yang berwarna hijau (Gambar 2b). Perifiton berupa mikroalga filamen tumbuh memanjang menutupi hampir seluruh permukaan batu dan mempunyai biomassa yang cukup padat untuk proses bioakumulasi. Suhu pada perairan sistem kanal berkisar $25 - 35^\circ\text{C}$ dan pH berkisar 7 – 9. Konsentrasi oksigen terlarut yang terukur berkisar $5 - 15 \text{ mg/L}$. Suhu dan pH optimum untuk pertumbuhan perifiton ialah $20 - 36^\circ\text{C}$ dan 7,5 – 8,4 sedangkan suhu optimum fotosintesis $28 - 30^\circ\text{C}$.



Gambar 2. (a) Substrat batuan kali yang digunakan untuk penumbuhan perifiton,
(b) Koloni perifiton yang dihasilkan setelah 2 minggu.

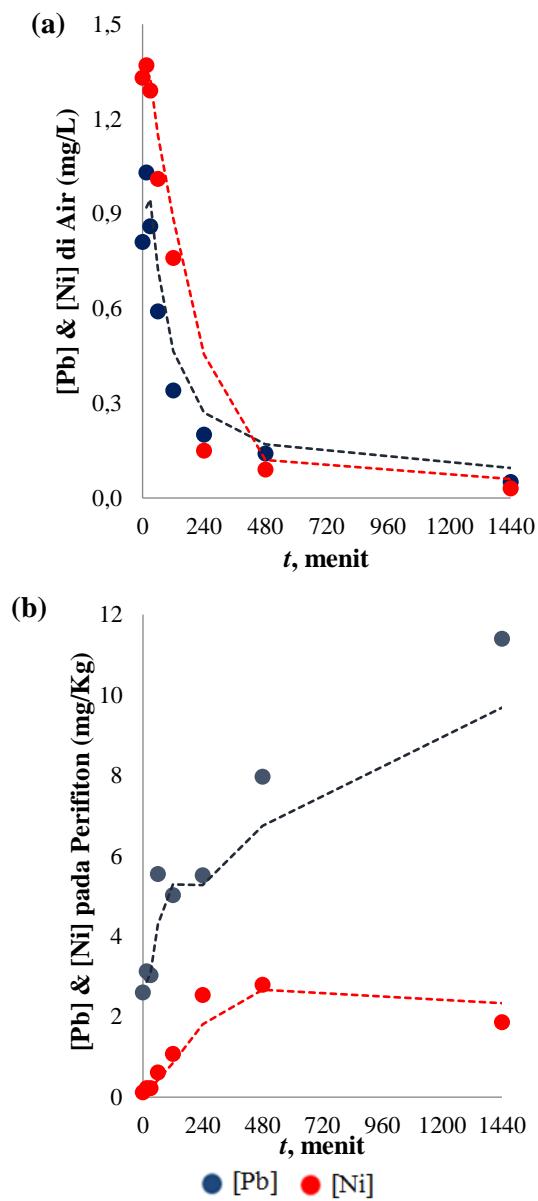
Koloni perifiton didominasi oleh jenis alga filamen *Spirogyra* sp (Gambar 3a) dari kelompok Chlorophyta. Selain itu, ditemukan juga *Cosmarium* sp (Gambar 3b) dan diatom *Navicula* sp. *Spirogyra* merupakan alga hijau air tawar bentik dengan pita kloroplas berbentuk spiral (Lee & Chang, 2011). Dinding sel alga terdiri atas selulosa, asam alginat, dan mengandung polisakarida sulfat yang semuanya memiliki sifat pertukaran ion (Loukido *et al.*, 2004; Turker & Baytak, 2004). Polimer ini memiliki berbagai gugus fungsi yang dapat bertindak sebagai tapak pengikatan ion logam.



Gambar 3. Koloni perifiton jenis: (a) *Spirogyra* sp dan (b) *Cosmarium* sp

Bioakumulasi Ion Logam oleh Perifiton

Hubungan konsentrasi ion Pb^{2+} dan Ni^{2+} terlarut di perairan terhadap waktu kontak dapat dilihat pada Gambar 4a. Mekanisme sorpsi ion logam pada alga mengikuti 2 fase; fase pertama metabolisme cepat dengan adsorpsi pada dinding sel dan permukaan luar, dan fase kedua berupa metabolisme yang berlangsung lambat bpengangkutan melintasi membran sel (Bere & Tundisi, 2012). Pada perifiton yang didominasi *Spirogyra* ini, sorpsi cepat ion Pb^{2+} terjadi pada 60 menit pertama dan Ni^{2+} terjadi pada 120 menit pertama. Adsorpsi pada menit ke 60 dan 120 menit tersebut, konsentrasi Pb dan Ni yang tersisa dalam air sebesar 0,59 mg/L dan 0,76 mg/L. Nilai ini mengindikasikan bahwa Pb dan Ni telah terjerap lebih dari 50% dalam 60 dan 120 menit. Pada adsorpsi cepat terjadi pertukaran ion (adsorpsi fisis) pada permukaan dinding sel perifiton.



Gambar 4. Penurunan konsentrasi Pb dan Ni di air (a) dan konsentrasi Pb dan Ni yang terjerap biomassa perifiton (b)

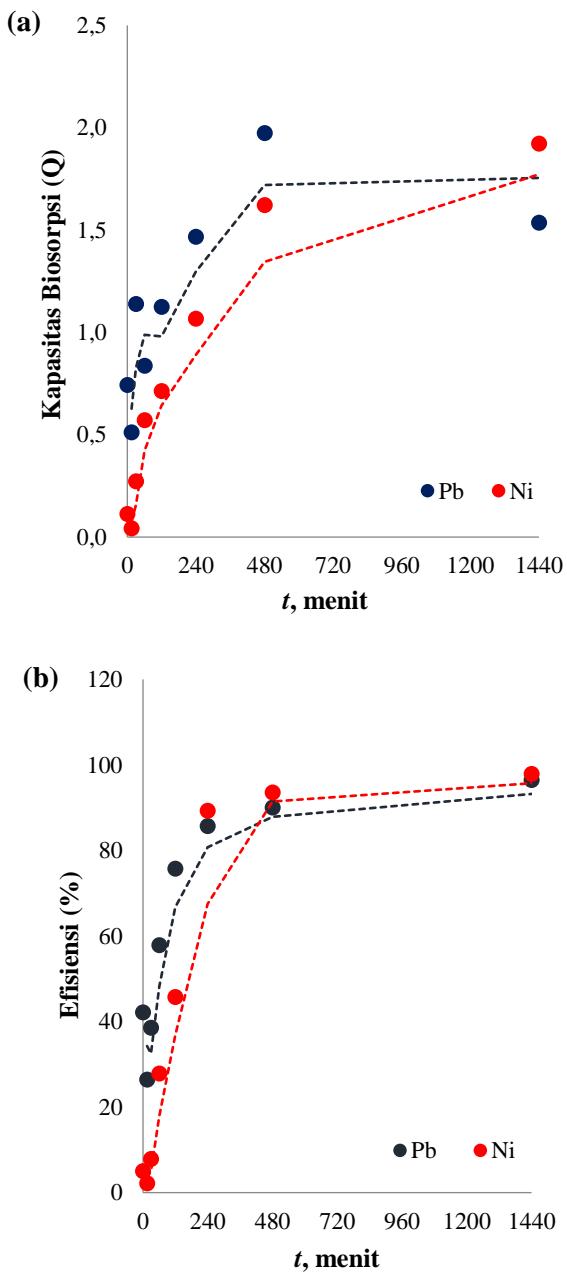
Laju adsorpsi kedua terjadi hingga waktu kontak mencapai 4 jam, Pb dan Ni terjerap hingga 85% dari adsorpsi keseluruhan, konsentrasi Pb dan Ni yang tersisa dalam air berturut-turut 0,20 dan 0,15 mg/L. Selanjutnya laju adsorpsi mulai konstan menuju keadaan setimbang. Jari-jari Pb (0,175 nm) yang lebih besar daripada Ni (0,072 nm) menyebabkan pada awal adsorpsi Pb lebih cepat terjerap sehingga tapak aktif di permukaan adsorben lebih cepat jenuh. Pada fase selanjutnya terjadi adsorpsi lambat yang melibatkan mekanisme lainnya, seperti

kejemuhan pada tapak aktif, kompleksasi atau mikro-presipitasi (Lee & Chang, 2011; Onyancha *et al.*, 2008). Setelah 24 jam proses adsorpsi, konsentrasi Pb²⁺ dalam air 0,05 mg/L dan Ni²⁺ 0,03 mg/L. Konsentrasi Pb tersebut belum memenuhi baku mutu kelas air golongan C sesuai Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 115 Tahun 2003, yaitu 0,03 mg/L sedangkan untuk Ni belum ada standar nilai baku mutu.

Konsentrasi Pb dan Ni yang terjerap biomassa perifiton mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya waktu (Gambar 4b). Komposisi jenis perifiton sangat mempengaruhi kemampuan pengikatan logam di perairan yang disebabkan oleh perbedaan sifat permukaan selnya, khususnya dinding sel. Permukaan sel merupakan tempat utama pengikatan ion logam pada alga, dan logam yang terikat di permukaan seringkali jauh melebihi logam yang terakumulasi dalam kompartemen intraselular (Andrade *et al.*, 2005; Mehta & Gaur, 2005). Permukaan sel memiliki gugus fungsi yang berbeda seperti hidroksil, fosfat, amino, aldehyda, sulfidril, dan karboksil, dengan afinitas yang beragam dalam mengikat logam (Pavasant *et al.*, 2006).

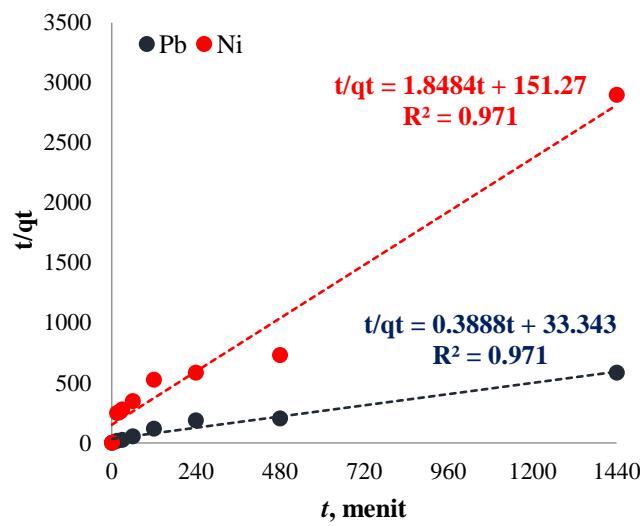
Kinetika Biosorpsi

Hasil pengujian menggunakan model kinetika orde satu dan dua semu terhadap biosorpsi ion Pb²⁺ dan Ni²⁺ dalam perifiton menunjukkan hasil yang mengikuti persamaan orde kedua semu, ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi sebesar 0,971 (Gambar 6). Alur linear proses sorpsi ini dapat digambarkan sebagai kemisorpsi (Ho *et. al.*, 2000). Nilai tetapan laju adsorpsi orde kedua semu (k_2) untuk Pb²⁺ dan Ni²⁺ berturut-turut sebesar $4,516 \times 10^{-3}$ dan $2,259 \times 10^{-2}$ g.mg⁻¹.menit⁻¹, yang menunjukkan kemampuan interaksi Ni dengan perifiton lebih cepat dibandingkan dengan Pb (Gupta & Bhattacharyya, 2008).



Gambar 5. Kapasitas biosorpsi (a) dan efisiensi biosorpsi ion Pb^{2+} dan Ni^{2+} (b)

Nilai kapasitas biosorpsi berbanding lurus dengan konsentrasi logam pada biomassa. Biosorpsi dilakukan pada pH media sekitar 7 – 8 yang merupakan pH optimum proses biosorpsi (Sing & Yu, 1998). Kapasitas biosorpsi maksimum (Q_{maks}) Pb ialah 1,97 mg/g dan Ni 1,92 mg/g, sedangkan nilai efisiensi biosorpsi Pb 96,43% dan Ni 97,86% (Gambar 5).



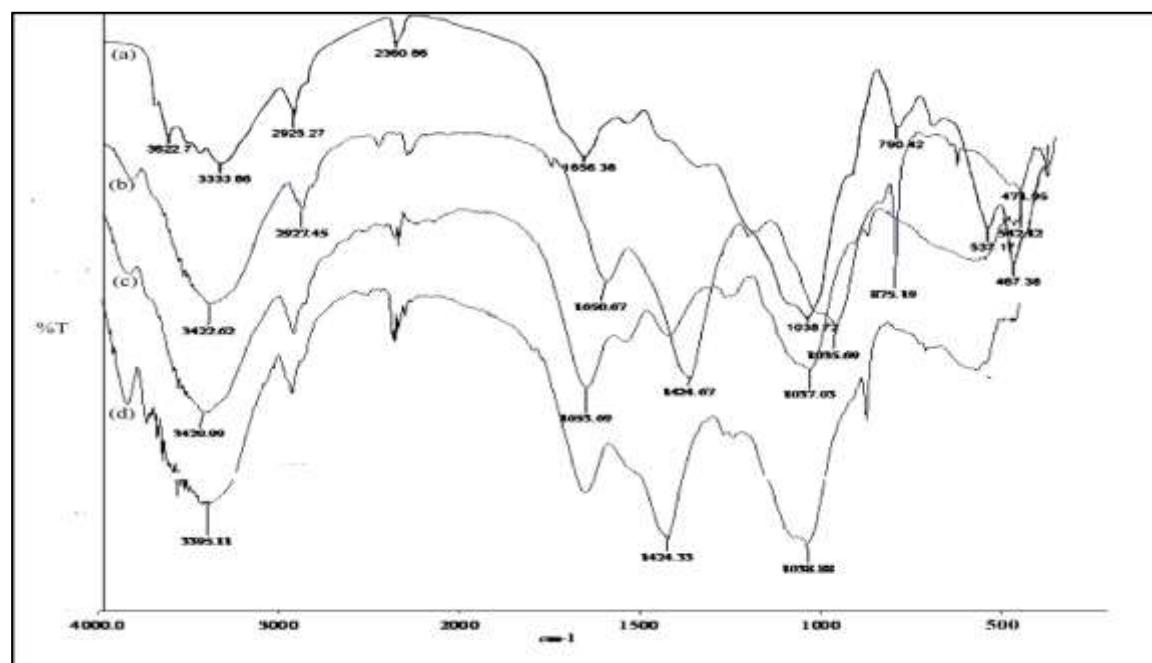
Gambar 6. Model kinetika orde kedua semu adsorpsi ion Pb^{2+} dan Ni^{2+} pada perifiton

Tabel 1. Kinetika reaksi pada adsorpsi Pb dan Ni oleh perifiton

Logam	Kinetika model orde pertama semu			Kinetika model orde kedua semu		
	k_1 (menit ⁻¹)	q_e (mg/g)	R^2	k_2 ($\times 10^{-3}$ g/mg·menit)	q_e (g/mg)	R^2
Pb	-0,052	1,454	0,701	4,516	2,577	0,971
Ni	-0,085	3,796	0,330	22,589	0,541	0,971

Spektrum FTIR

Spektrum FTIR sebelum proses adsorpsi (Gambar 7b) menunjukkan kemiripan dengan spektrum FTIR *Spirogyra* (Gambar 7a). Spektrum FTIR *Spirogyra* menunjukkan gugus fungsi O – H dan N – H pada bilangan gelombang 3622 cm^{-1} dan 3333 cm^{-1} , C – H pada 2925 cm^{-1} , C – C pada 2360 cm^{-1} , C = O pada 1656 cm^{-1} , dan C – O pada 1038 cm^{-1} (Onyancha *et al.*, 2008). Spektrum FTIR perifiton sesudah adsorpsi Pb (Gambar 7c), dan sesudah adsorpsi Ni (Gambar 7d)



menunjukkan gugus fungsi yang merespon dibandingkan sebelum proses adsorpsi (Gambar 7b).

Gambar 7. Spektrum FTIR *Spirogyra* (Onyancha *et al.* 2008) (a); perifiton sebelum adsorpsi logam (b); perifiton sesudah adsorpsi Pb^{2+} (c); perifiton sesudah adsorpsi logam Ni^{2+} (d)

Tabel 2. Perbandingan spektrum IR perifiton sebelum dan sesudah adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+}

Bilangan gelombang serapan (cm^{-1})			
Perifiton sebelum adsorpsi	Perifiton sesudah adsorpsi	<i>Spirogyra</i> (Onyancha <i>et al.</i> 2008)	Ikatan kimia
—	—	3622	O–H bebas
3339	3420	3341	ulur O–H

2926	—	2925	ulur C—H
—	—	2360	—CC— rangkap 3
1654	1653	1656	ulur C=O
1424	1424	—	tekuk C—H
1036	1037	1038	ulur C—O
875	—	—	scissoring C—N—S

Perbandingan spektrum IR perifiton sebelum dan sesudah adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} oleh perifiton *Spirogyra* selengkapnya diberikan di Tabel 2. Berdasarkan data pada tabel tersebut hidroksil (O—H) merupakan gugus fungsional yang paling menunjukkan interaksi terhadap adsorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} oleh perifiton *Spirogyra*.

Perubahan komposisi dan kelimpahan spesies perifiton akan mengalami perubahan pada saat terjadinya peningkatan konsentrasi Pb^{2+} dan Ni^{2+} yang terlarut di suatu perairan. Hal ini menunjukkan kegunaan komunitas perifiton dalam mengidentifikasi tinggi atau rendahnya konsentrasi logam di perairan tersebut. Perifiton dapat menjadi bioindikator potensial untuk pencemaran logam di perairan yang sama baiknya dengan pengukuran logam dalam sedimen dan padatan tersuspensi (Fuchs *et al.*, 1996).

Kesimpulan

Perifiton berpotensi sebagai biosorben Pb dan Ni. Kapasitas biosorpsi maksimum untuk Pb sebesar 1,97 mg/g dan logam Ni 1,92 mg/g. Kinetika biosorpsi Pb^{2+} dan Ni^{2+} mengikuti persamaan reaksi orde kedua semu dengan nilai $k_2 = 4,516 \times 10^{-3} \text{ g.mg}^{-1}.\text{menit}^{-1}$ untuk Pb dan nilai $k_2 = 2,259 \times 10^{-2} \text{ g.mg}^{-1}.\text{menit}^{-1}$ untuk logam Ni. Nilai koefisien determinasi (R^2) masing-masing 0,971.

Referensi

- American Public Health Association. 1998. Standard Method for The Examination of Water and Wastewater. Ed ke-20. Washington: America Water Works Association and Water Polution Control Federation.
- Andrade AD, Rollemburg MCE, Nobrega JA. 2005. Proton and metal binding capacity of the green freshwater alga *Chaetophora elegans*. *Process Biochem* 40:1931-1936.
- Bere T, Tundisi JG. 2012. Effects of cadmium stress and sorption kinetics on tropical freshwater periphytic communities in indoor mesocosm experiments. *Sci Environ* 432:103-112.

- Bere T, Chia MA, Tundisi JG. 2012. Effects of Cr III and Pb on the bioaccumulation and toxicity of Cd in tropical periphyton communities: implications of pulsed metal exposures. *Environ Poll.* 163:184-191.
- Cabuk A, Ilhan S, Fluk C, Caliskan F. 2005. Pb²⁺ biosorption by pretreated fungal biomass. *Turk J Biol* 29:23-28.
- Chojnacka, K. 2009. Biosorption and bioaccumulation in practice. New York. Nova Science Publisher, Inc.
- Fuchs S, Haritopoulou T, Wilhelmi M. 1996. Biofilms in freshwater ecosystems and their use as a pollutant monitor. *Water Sci Technol* 34:137-140.
- Gadd, G.M. 1990. Biosorption, Chemistry, and Industry Society. Journal of Chemical Industry A13, 421-426.
- Gupta SS, Bhattacharayya GK. 2008. Immobilization of Pb(II), Cd(II), Ni(II) ions on kaolinite and montmorillonite surfaces from aqueous medium. *J Environ Manag* 87:46-58.
- Ho YS, Mc Kay G, Wase DAJ, Forster CF. 2000. Study of sorption of divalent metal ions onto peat. *Adsorp Sci Technol* 18:639-650.
- Lee YC, Chang SP. 2011. The biosorption of heavy metals from aqueous solution by *Spirogyra* and *Cladophora* filamentous macroalgae. *Biores Technol* 102:5297-5304.
- Loukidou MX, Zouboulis AI, Karapantsios TD, Matis KA. 2004. Equilibrium and kinetic modeling of chromium(VI) biosorption by *Aeromonas caviae*. *Coll Surf* 242:93-104.
- Mehta SK, Gaur JP. 2005. Use of algae for removing heavy metals ions from wastewater: progress and prospect. *Crit Rev Biotechnol* 25:113-152.
- Susanti E. & Nofdianto. 2014. Model kinetika “pseudo-second order” untuk penyerapan Ion Cr⁶⁺ dari media air ke biomassa perifiton. *Limnotek* Vol 21(1): 95-102.
- Onyancha D *et al.* 2008. Studies of chromium removal from tannery wastewaters by green algae biosorbent, *Spirogyra condensata* and *Rhizoclonium hieroglyphicum*. *J Hazard Mat* 158:605-614.
- Pavasant P *et al.* 2006. Biosorption of Cu²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺, and Zn²⁺ using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera*. *Biores Technol* 97:2321-2329.
- Sing C, Yu J. 1998. Copper adsorption and removal from water by living mycelium of white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*. *Water Res* 32:2746-2752.
- Turker A, Baytak S. 2004. Use of *Escherichia coli* immobilized on amberlite XAD-4 as a solid-phase extractor for metal preconcentration and determination by atomic absorption spectroscopy. *Anal Sci* 20:329-334.
- Volesky B. 1990. *Biosorption and biosorbents*. Di dalam: *Biosorption of Heavy Metals*, editor. Florida: CRC Pr.
- Yap CK, Ismail A, Omar H, Tan SG. 2004. Toxicities and tolerances of Cd, Cu, Pb, and Zn in a primary producer (*Isochrysis galbana*) and in a primary consumer (*Perna viridis*). *Environ Int* 9:1097-1104.