

Biosorpsi Kation Tembaga (II) dan Seng (II) oleh Biomassa Alga Hijau *Spirogyra subsalsa*

Biosorption of Copper (II) and Zinc (II) Cations By Green Algae *Spirogyra subsalsa*

Mawardi

Laboratorium Kimia Analitik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Padang, Jln. Hamka Air Tawar Padang 25131
E-mail: mawardianwar@yahoo.com

Abstract

In this study, the biosorption of heavy metal ions, specially Cu^{2+} and Zn^{2+} cations from aqueous solution and wastewater using green algae *Spirogyra subsalsa* biomass was investigated. The results of this biosorption study revealed that the rate and extent of uptake were effected by pH of solution, contact time (rate of sorption), and initial Cu^{2+} and Zn^{2+} concentration. The maximum uptake of metal cations was obtained at pH 4,0. The equilibrium sorption data for cations system were described by the Langmuir isotherms model. The biosorption capacities for Cu^{2+} and Zn^{2+} cations at pH 4.0 were obtained 6,03 and 2,91 mg per gram dry biomass, respectively. The data obtained show a fast uptake of the Cu^{2+} and Zn^{2+} cations by the *S. subsalsa* biomass.

Key words: Biosorption, *S. subsalsa*, isotherm Langmuir, maximum biosorption capacity

Abstrak

Dalam kajian ini, telah diteliti biosorpsi ion logam berat, khususnya kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} dalam larutan berair dan air limbah menggunakan biomassa ganggang hijau *Spirogyra subsalsa*. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa laju biosorpsi dan kemampuan serapan biomassa dipengaruhi oleh pH larutan, waktu kontak (laju serapan), dan konsentrasi awal kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} . Penyerapan maksimum kation logam diperoleh pada pH 4,0. Data kesetimbangan penyerapan sistem kation digambarkan dengan model isotherm Langmuir. Kapasitas biosorpsi untuk masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} pada pH 4,0 diperoleh, berturut-turut 6,03 dan 2,91 mg per gram biomassa. Proses biosorpsi kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} oleh biomassa *S. Subsalsa* berlangsung cepat, 99% dan 97,2% penyerapan total dari masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} berlangsung dalam 5 menit pertama.

Kata kunci: Biosorpsi, *S. subsalsa*, isotherm Langmuir, kapasitas biosorption maksimum

Diterima: 10 Maret 2011, disetujui: 30 Mei 2011

Pendahuluan

Logam-logam berat seperti krom, timbal, kadmium, merkuri, tembaga, dan arsen merupakan salah satu kandungan limbah cair industri yang menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan makhluk hidup (Chergui *et al.*, 2007). Keefektifan pemisahan logam-logam berat dari limbah cair merupakan masalah penting di negara-negara industri. Perlakuan umum yang dilakukan untuk memisahkan logam-logam berat dari limbah cair adalah pengendapan secara kimia, yaitu

dengan menambahkan bahan kimia yang dapat mengendapkan logam berat sebagai hidroksidanya, pertukaran ion, adsorpsi, proses membran, osmosis terbalik, dan ekstraksi pelarut (Park *et al.*, 2005). Metode lain yang banyak dikembangkan adalah memanfaatkan kemampuan beberapa mikroba, seperti alga, ragi, jamur dan bakteri, dalam menyerap logam-logam berat dan radionuklida dari lingkungan eksternalnya secara efisien (Mawardi *et al.*, 1997; Davis *et al.*, 2003).

Alga hijau *Spirogyra subsalsap* merupakan perifiton berfilamen yang hidup

melekat pada berbagai substratum, baik dalam air mengalir maupun dalam air tergenang, dan dapat membentuk hamparan massa alga yang menutupi dasar dan permukaan sungai (Pritchard *et al.*, 1984; Afrizal *et al.*, 1999).

Unsur utama penyusun biomassa alga hijau adalah karbon, nitrogen, oksigen masing-masing sekitar 8,76%; 30,09% dan 55,83%. Disamping itu, terdapat unsur-unsur fosfor, belerang, silikon dan kalium masing-masing 1,21%; 1,26%; 0,73% dan 1,73%. Dengan demikian, biomassa alga hijau diharapkan mengandung gugus-gugus karboksilat, amina, amida, karbonil dan hidroksil, disamping adanya senyawa silikon, belerang dan fosfor (Mawardi *et al.*, 2008).

Penyerapan logam oleh organisme dapat terjadi secara *metabolism-independent*, yang terjadi pada sel hidup dan mati, terutama pada permukaan dinding sel melalui mekanisme kimia dan fisika, seperti pertukaran ion, pembentukan kompleks dan adsorpsi, yang secara keseluruhan disebut *biosorpsi* (Wang Chen, 2006). Proses biosorpsi melibatkan interaksi ionik, polar dan interaksi gabungan antara kation logam dengan biopolimer (makromolekul), sebagai sumber gugus fungsional seperti gugus karboksilat, amina, tiolat, fosfodiester, karbonil, dan gugus fosfat, dapat berkoordinasi dengan atom pusat logam melalui pasangan elektron bebas (Hughes dan Poole, 1990; Hancock, 1996a).

Kapasitas suatu biomassa sebagai adsorben digambarkan dengan kesetimbangan adsorpsi isoterm, yang dicirikan oleh konstanta yang memperlihatkan sifat permukaan dan afinitas adsorben. Isoterm Langmuir merupakan adsorpsi isoterm yang paling luas diterapkan (Deng *et al.*, 2006). Langmuir menggambarkan bahwa permukaan adsorben terdapat sejumlah tertentu pusat aktif (*active site*) yang sebanding dengan luas adsorben. Pada setiap sisi aktif hanya satu molekul atau satu ion yang dapat diserap. Penyerapan secara kimia, terjadi apabila terbentuk ikatan kimia antara zat terserap dengan sisi aktif adsorben, membentuk lapisan tunggal pada permukaan adsorben (*monolayer adsorption*). Persamaan adsorpsi isoterm Langmuir dapat ditentukan konstanta afinitas serapan (k) dan kapasitas serapan maksimum (a_m) dari suatu adsorben.

Metode Penelitian

Persiapan Biomassa

Biomassa alga hijau *S. subsalsa* diperoleh dari perairan sungai Batang Air Dingin, Daerah Lubuk Minturun Padang. Alga dipisahkan dari media tumbuhnya, kemudian dipisahkan untuk diidentifikasi di Laboratorium Taksonomi Jurusan Biologi FMIPA Universitas Andalas. Alga dicuci, dan dibilas dengan akuades bebas ion, setelah bersih dikeringkan di udara terbuka (tanpa kena cahaya matahari langsung). Biomassa yang telah kering direndam dengan larutan asam nitrat 1% v/v selama satu jam, kemudian dicuci dan dibilas dengan akuades sampai air hasil pencucian kembali netral. Setelah itu, biomassa alga kembali dikeringkan dengan cara yang sama sampai diperoleh berat tetap. Partikel biomassa murni yang diperoleh disimpan dalam desikator dan siap digunakan sesuai kebutuhan.

Pembuatan Larutan Kation Cu^{2+} dan Zn^{2+}

Larutan kerja masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} dibuat dengan mengencerkan larutan induk masing-masing kation 1000 mg/L dengan akuabides. Larutan induk dibuat dengan melarutkan 1 gram masing-masing logam dalam volume kecil asam nitrat, HNO_3 , pekat, dipindahkan ke dalam labu takar 1L kemudian dicukup volumenya dengan larutan HNO_3 1% sampai tanda batas. Pengaturan pH larutan dilakukan dengan larutan HNO_3 atau larutan NH_3 dalam jumlah seminimum mungkin sebelum larutan dikontak dengan biomassa.

Perlakuan Penelitian dengan Sistem Batch

Penentuan Kondisi Optimum

Perlakuan penelitian menggunakan larutan simulasi yang disiapkan dari larutan induk. Pada setiap perlakuan, 25 mL masing-masing larutan kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} simulasi, dikontak (sistem *batch*) masing-masing dengan 0,5 gram biomassa alga *S. subsalsa* dengan ukuran partikel dioptimasi (150–425 μm). Campuran digoyang dengan *shaker* pada kecepatan 250 rpm, pada suhu kamar (sekitar 27°C), selama waktu tertentu (5–120 menit). Setelah perlakuan, biomassa dipisahkan dengan metode filtrasi menggunakan kertas saring,

filtrat yang diperoleh ditentukan konsentrasi masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} dengan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) nyala udara-asetilen pada panjang gelombang 324,8 nm untuk kation Cu^{2+} dan 213,9 nm untuk kation Zn^{2+} . Jumlah ion logam yang diserap oleh biomassa diperoleh dari selisih antara konsentrasi logam saat setimbang dengan konsentrasi mula-mula (Hancock, 1996b), yang dinyatakan sebagai berat (mg) logam yang terserap per berat (g) biosorben.

Kondisi optimum yang ditentukan adalah pengaruh pH awal larutan, ukuran partikel biosorben, kecepatan pengadukan, pengaruh pemanasan biosorben, laju penyerapan dan pengaruh konsentrasi awal larutan logam terhadap kapasitas serapan biosorben masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} . Dilakukan uji coba kinerja biosorben terhadap limbah cair laboratorium, yang mengandung kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} , untuk prekonsentrasi masing-masing kation yang terdapat dalam kadar runtu.

Penentuan Kapasitas Serapan

Jumlah serapan maksimum biomassa ditentukan dengan persamaan Adsorpsi Isoterm Langmuir, yang dapat ditulis dalam bentuk persamaan linier (Ramelow *et al.*, 1996; Ocsik, 1982), yaitu :

$$\frac{c}{a} = \frac{1}{a_m k} + \frac{1}{a_m} c.$$

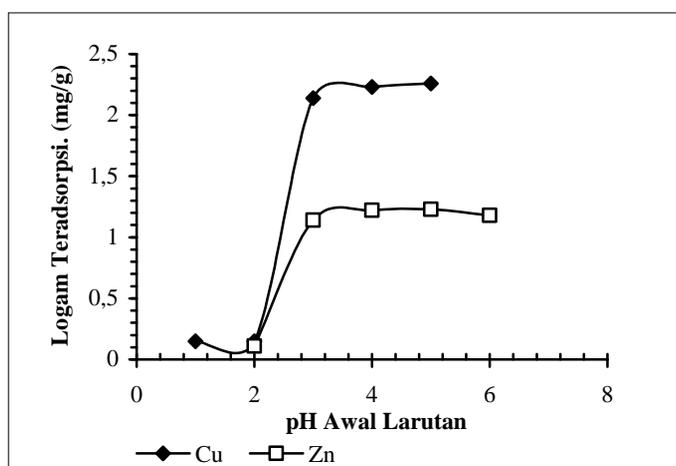
Keterangan:

- a = miligram logam yang terserap per gram biomaterial kering
- k = konstanta keseimbangan (konstanta afinitas serapan)
- c = konsentrasi ion bebas saat seimbang (mg/L)
- a_m = miligram logam terserap pada keadaan jenuh (kapasitas serapan maksimum), biasa juga ditulis dengan notasi b . Apabila plot c/a versus c menghasilkan garis lurus, maka konstanta afinitas serapan (k) dan kapasitas serapan maksimum (a_m) dapat ditentukan dari *slope* dan *intercept*. Mempelajari aplikasi metode pada sampel riil, dalam skala laboratorium, untuk mempelajari perolehan kembali metode pada sampel riil yang mengandung logam yang diteliti.

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh pH Larutan terhadap Serapan Biomassa

Penyerapan biomassa alga *S. subsalsa* sp. terhadap masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} , dipengaruhi pH awal larutan analit seperti terlihat pada Gambar 1. Efisiensi biosorpsi kation logam meningkat tajam pada kisaran pH antara 2,0 dan 3,0 kemudian optimum pada pH 4,0 untuk kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} .



Gambar 1. Pengaruh pH awal larutan logam terhadap serapan biomassa (0,5 g biomassa/25 mL larutan, waktu kontak 60 menit).

Proses biosorpsi melibatkan interaksi ionik, polar dan interaksi gabungan antara kation logam dan biopolimer (makromolekul), sebagai sumber gugus fungsional seperti gugus karboksilat, amina, tiolat, fosfodiester, karbonil, dan gugus fosfat, yang dapat membentuk ikatan kovalen koordinasi dengan atom pusat logam melalui pasangan elektron bebas. Biosorpsi logam, diantaranya, tergantung pada protonasi atau deprotonasi gugus fungsional pada dinding sel biosorben. Pada pH rendah gugus fungsional sebagai ligan terprotonasi oleh ion hidronium, H^+ , sehingga menghalangi terikatnya kation akibat gaya tolak muatan sejenis (Pino *et al.*, 2006; Pravasant *et al.*, 2006). Pada pH tinggi, konsentrasi ion H^+ rendah tidak terjadi protonasi, sehingga gugus fungsi bersifat basa Lewis berfungsi sebagai ligan yang membentuk kovalen koordinasi dengan kation logam. Pada pH tinggi, ionisasi gugus fungsi yang bersifat sebagai asam lemak akan meningkat, sesuai titik isoelektriknya, menyebabkan jumlah muatan negatif pada pusat aktif biomassa bertambah, sehingga interaksi ionik biomassa dengan kation logam semakin besar.

Laju Biosorpsi

Proses biosorpsi kation logam Cu^{2+} dan Zn^{2+} oleh biomassa alga *S. subsalsa sp.*, berlangsung relatif cepat. Data yang diperoleh memperlihatkan bahwa, masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} , sekitar 99% dan 97,2% dari jumlah total serapan terjadi dalam selang waktu relatif pendek, yaitu sekitar 5 menit (Gambar 2). Laju serapan masing-masing kation relatif konstan setelah 30 menit waktu kontak dengan biosorben, kecenderungan ini menunjukkan bahwa pada waktu tersebut sistem telah mencapai kesetimbangan. Pravasant *et al.*, (2006) melaporkan bahwa laju biosorpsi kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} oleh biomassa makroalga *Caulerpa lentillifera* mencapai kesetimbangan setelah 20 menit waktu kontak, sedangkan Babarinde *et al.*, (2008) melaporkan bahwa biosorpsi kation Zn^{2+} oleh *Calymperes erosum* mencapai kesetimbangan setelah 60 menit.

Pengaruh Ukuran Partikel Biosorben

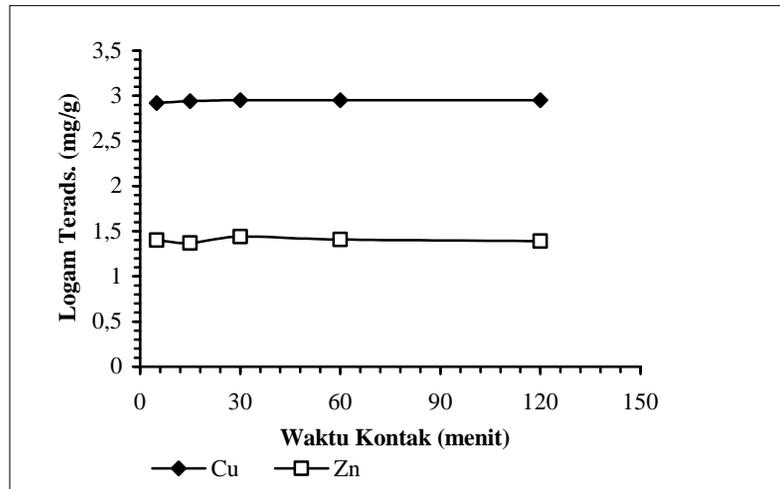
Secara teoritis, kapasitas serapan biomassa bergantung pada jumlah pusat aktif

yang terdapat pada dinding sel, semakin kecil ukuran partikel biosorben semakin luas permukaan, sehingga pusat aktif yang dapat berinteraksi dengan kation logam akan lebih banyak. Dengan demikian, diharapkan semakin kecil ukuran partikel biosorben daya serap biosorben akan bertambah. Data penelitian memperlihatkan bahwa perbedaan ukuran partikel biosorben relatif tidak mempengaruhi kapasitas serapan biosorben (Gambar 3).

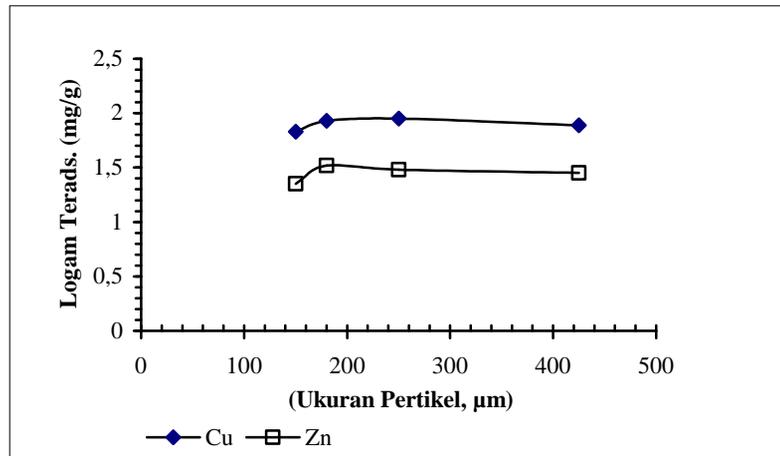
Perbedaan biosorpsi antara partikel terkecil (150 μm) dengan partikel terbesar (425 μm) untuk masing-masing logam kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} berkisar antara 3–5%. Hal ini, karena pada sistem kontak yang digunakan (sistem *batch*), biosorben dengan ukuran partikel yang lebih kecil sebagian terapung dalam larutan, sehingga penyebaran suspensi dalam larutan tidak merata, mengakibatkan tidak maksimalnya kontak biosorben dengan kation logam. Berdasarkan data yang diperoleh ukuran partikel optimum ditetapkan sekitar 250 μm . Pravasant *et al.*, (2006) juga melaporkan bahwa kapasitas serapan makroalga *C. lentillifera* terhadap kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} secara signifikan tidak dipengaruhi oleh ukuran partikel biomassa.

Pengaruh Kecepatan Pengadukan

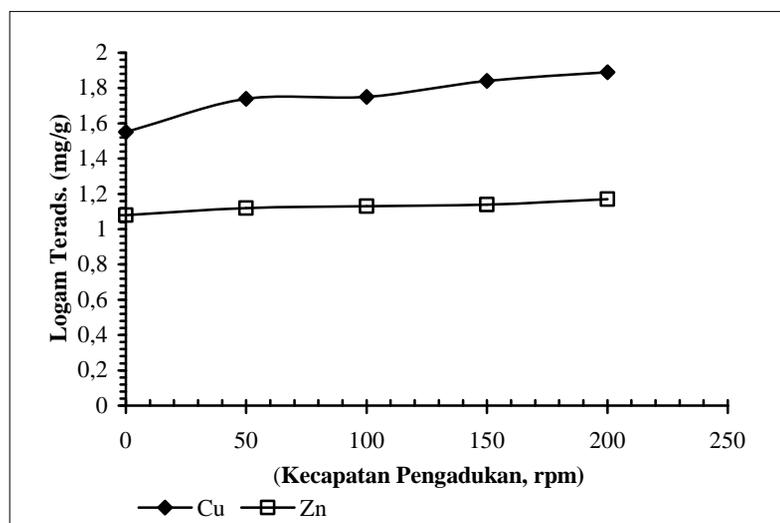
Perbedaan kecepatan pengadukan larutan relatif kurang mempengaruhi kapasitas serapan biosorben (Gambar 4). Perbedaan biosorpsi antara kecepatan pengadukan terlambat (50 rpm) dengan tercepat (200 rpm) untuk masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} antara 3–10%. Keadaan ini karena reaksi atau kontak terjadi dalam larutan yang volumenya besar dibanding jumlah biosorben, sehingga penetrasi larutan terhadap padatan biosorben relatif baik dan tidak membutuhkan gaya mekanik yang besar. Menurut Chergui *et al.*, (2007) kapasitas adsorpsi optimal kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} dalam larutan oleh biomassa *Streptomyces rimosus* diperoleh pada laju pengadukan 250 rpm. Nilai ini gambaran dari kompromi antara kecepatan lebih rendah, ketidakmerataan sebaran suspensi biomassa dalam medium cair dan daya tahan terhadap pemindahan massa yang meningkat.



Gambar 2. Laju biosorpsi logam oleh biomassa alga *S. subsalsa* (0,5 g biomassa/25 mL larutan, waktu kontak 60 menit).



Gambar 3. Pengaruh ukuran partikel biosorben terhadap biosorpsi logam (0,5 g biomassa/25 mL larutan, waktu kontak 60 menit).



Gambar 4. Pengaruh kecepatan pengadukan terhadap biosorpsi logam (0,5 g biomassa/25 mL larutan logam, waktu kontak 60 menit).

Pengaruh Pemanasan Biosorben

Secara umum pemanasan biosorben akan meningkatkan daya serap biomassa untuk masing-masing kation logam Cu^{2+} dan Zn^{2+} tetapi peningkatan daya serap tersebut relatif kecil, yaitu antara 3–10% (Gambar 5). Hasil ini mendukung bahwa proses biosorpsi logam oleh biomassa alga *S. subsalsa* sp. dominan melalui proses biosorpsi secara kimia dibanding biosorpsi secara fisika, sehingga pemanasan biosorben mempengaruhi ukuran pori-pori biosorben, relatif tidak mempengaruhi daya serap biosorben.

Munaf (1997a,b) melaporkan bahwa pemanasan biosorben dedak padi sampai suhu 80°C meningkat biosorpsi ion logam kromium, seng, tembaga dan kadmium, tetapi pemanasan biosorben tersebut tidak berpengaruh pada biosorpsi fenol.

Pengaruh Konsentrasi Awal Larutan

Jumlah masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} terserap meningkat tajam dengan bertambahnya konsentrasi awal larutan yang dikontakkan dengan biomassa alga *S. Subsalsa* (Gambar 6). Serapan optimum kation Cu^{2+} terjadi pada konsentrasi 200 mg/L, dengan kapasitas serapan 5,34 mg/g biosorben, sedangkan kation Zn^{2+} terjadi pada konsentrasi 100 mg/L dengan serapan optimum 2,13 mg/g biosorben.

Setelah masing-masing kation logam yang terserap mencapai optimum, maka peningkatan konsentrasi kation dalam larutan berikutnya tidak menaikkan nilai serapan biomassa, karena telah tercapai kesetimbangan dalam larutan. Dari data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa biosorpsi masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} memenuhi persamaan adsorpsi isotherm Langmuir, dan reaksi antara masing-masing kation dengan biomassa alga hijau *S. Subsalsa* berorde satu, sehingga konstanta afinitas serapan (k) dan kapasitas serapan maksimum (a_m) dapat ditentukan

dengan nilai seperti terangkum dalam Tabel 1 dan Kurva Linieritas Langmuir biosorpsi untuk masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} seperti pada Gambar 7 a dan b.

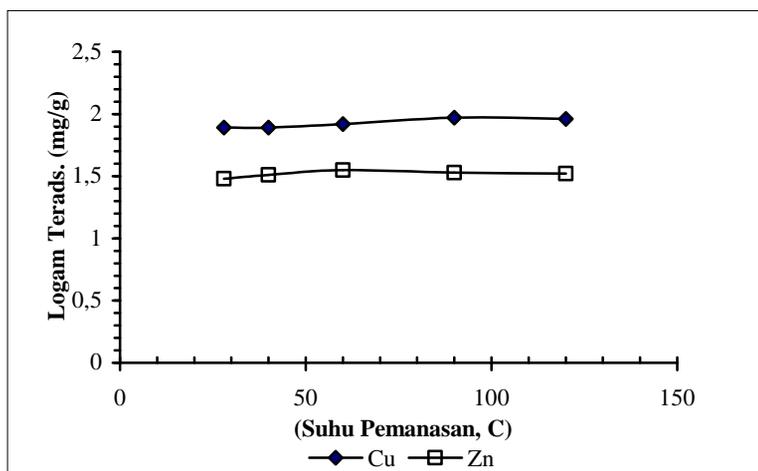
Hasil yang diperoleh memperlihatkan kapasitas serapan maksimum biomassa alga *S. subsalsa* terhadap kation Cu^{2+} (6,02591 mg/g) lebih tinggi daripada kation Zn^{2+} (2,90588 mg/g). Data ini sesuai dengan nilai konstanta afinitas serapan (k), konstanta afinitas serapan Cu^{2+} (0,06823) lebih besar dibanding konstanta afinitas serapan Zn^{2+} (0,02067). Terikatnya ion logam pada gugus fungsional makromolekul penyusun dinding sel biomassa juga dipengaruhi oleh sifat dari kation logam tersebut, seperti jari-jari ion dan sifat asam Lewisnya.

Menurut Melcacova dan Ruzovic (2010), keuntungan utama model isotherm Langmuir adalah kemungkinan mengevaluasi a_m , jumlah maksimum ion logam yang terserap per gram adsorben dan k yang merupakan parameter yang berhubungan dengan afinitas pusat aktif untuk suatu ion logam.

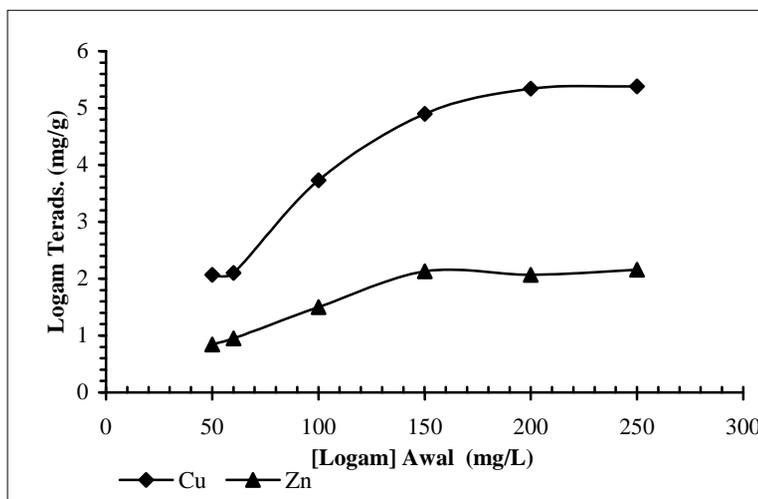
Aplikasi Kondisi Optimum Pada Sampel Limbah

Perlakuan kondisi optimum terhadap sampel riil berupa limbah cair yang dipastikan mengandung masing-masing kation diperoleh data seperti tercantum dalam Tabel 2. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa efisiensi biosorpsi oleh biomassa alga *S. subsalsa* sp untuk masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} berturut-turut sekitar 73,44% dan 36,65%.

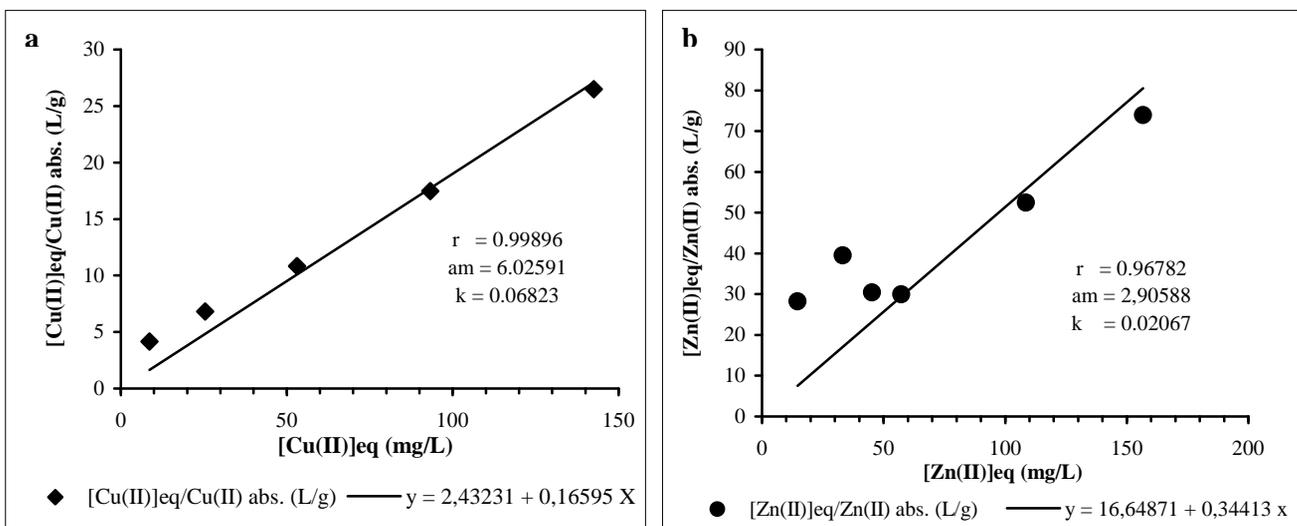
Dari data yang diperoleh terlihat bahwa, secara umum, efisiensi penyerapan masing-masing kation oleh biomassa alga *S. subsalsa* sp lebih rendah daripada larutan simulasi. Hal ini karena dalam limbah terdapat sejumlah komponen lain (matriks) yang jauh lebih kompleks dari larutan simulasi, sehingga interferensi yang timbul pada proses biosorpsi juga lebih kompleks.



Gambar 5. Pengaruh pemanasan biosorben terhadap biosorpsi logam (0,5 g biomassa / 25 mL larutan, waktu kontak 60 menit).



Gambar 6. Pengaruh konsentrasi awal larutan logam terhadap daya serap alga *S. subsalsa* sp (untuk 0,5 g biomassa/25 mL larutan).



Gambar 7. a–b. Linieritas Langmuir biosorpsi masing-masing kation Cu^{2+} dan Zn^{2+} .

Tabel 1. Nilai koefisien regresi (r), konstanta afinitas serapan (k), dan kapasitas serapan maksimum (a_m).

	r	k	a_m (mg/g)
Cu ²⁺	0,99896	0,06823	6,02591
Zn ²⁺	0,96782	0,02067	2,90588

Tabel 2. Data biosorpsi kation logam dari sampel limbah cair oleh biomassa alga *S. subsalsa* sp.

	Kation Logam	
	Cu ²⁺	Zn ²⁺
[L ^{x+}] _{awal} (mg/L)	5,61	115,97
[L ^{x+}] _{eq} (mg/L)	1,49	73,47
L ^{x+} _{abs} (mg/g)	0,21	2,13
Efisiensi Penyerapan (%)	73,44	36,65

Simpulan dan Saran

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa proses biosorpsi masing-masing kation Cu²⁺ dan Zn²⁺ sangat dipengaruhi oleh pH awal larutan, waktu kontak dan konsentrasi awal larutan. Efisiensi biosorpsi logam optimum pada pH 4,0. Biosorpsi logam meningkat secara linier sebagai fungsi dari konsentrasi awal logam sampai konsentrasi sekitar 150 mg/L untuk Cu²⁺ dan 100 mg/L untuk Zn²⁺. Kapasitas serapan maksimum biomassa alga *S. subsalsa* untuk kation Cu²⁺ dan Zn²⁺ adalah 6,03 mg dan 2,91 mg per gram biomassa kering. Proses biosorpsi berlangsung relatif cepat dan terserap hamper 100% dalam waktu 5 menit. Secara umum faktor ukuran partikel, kecepatan pengadukan dan pemanasan biosorben berpengaruh relatif kecil terhadap daya serap biomassa (berkisar antara 3–10 %).

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat dikemukakan saran antara lain perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengidentifikasi perubahan struktur makromolekul pada biomassa setelah digunakan dan perlu dipelajari peranan masing-masing gugus fungsi dalam proses biosorpsi logam tertentu.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada DP2M, Dirjen Dikti Kemendiknas yang telah membiayai penelitian ini melalui skim Hibah Bersaing.

Daftar Pustaka

- Afrizal, S., Chairul dan Suwirmen. 1999. *Alga Mat dan Beberapa Aspek Ekologinya pada Beberapa Sungai dalam Kodya Padang*. Laporan Penelitian, FPMIPA UNAND, Padang.
- Babarinde, N.A.A., Oyesiku, O.O., Babalola, J.O. dan Olatunji, J.O. 2008. Isotherm dan Thermodynamic Studies of the Biosorption of Zinc (II) ions by *Calymperes erosum*. *J. of Appl. Sciences Research*, 4 (6): 716–721.
- Chergui, A., Bakhti M.Z., Chahboub, A., Haddoum, S., Selatnia, A. dan Junter, G.A. 2007. Simultaneous biosorption of Cu²⁺, Zn²⁺ and Cr⁶⁺ from aqueous solution by *Streptomyces rimosus*. *Desalination*, 206: 179–184.
- Davis, T.A., Volesky, B. dan Mucci, A. 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research*, 37: 4311–4330.
- Deng, L., Su, Y., Su, H., Wang, X. dan Zhu, X. 2007. Sorption and desorption of lead(II) from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*. *J. Hazard. Mater.*, 143: 220–225.
- Gadd, G.M. dan White, C. 1993. Microbial Treatment of Metal Pollution a Working Biotechnology?, *Tibtech*, 11: 353–359.
- Hancock, J.C. 1996. Mechanisms of Passive Sorption of Heavy Metal by Biomassa and Biological Products, in *Symposium and Workshop on Heavy Metal Bioaccumulation*, IUC Biotechnology Gadjah Mada University.

- Hughes, M.N. dan Poole, R.K. 1990. *Metals and Microorganism*, Chapman and Hill, London.
- Mawardi, Sugiharto, E., Mudjiran, Prijambada dan Irfan, D. 1997. Biosorpsi Timbal (II) Oleh Biomassa *Saccharomyces cerevisiae*, *BPPS-UGM*, 10 (2C), 203–213.
- Mawardi, E., Munaf, S., Kosela, W. dan Wibowo. 2008. Kajian Biosorpsi Kation Timbal (II) Oleh Biomassa Alga Hijau *Spirogyra subsalsa*. *Saintek*, X (2): 163–168.
- Melcakova, I. dan Ruzovic, T. 2010. Biosorption of Zinc from Aqueous Solution Using Algae and Plant Biomass. *Nova Biotechnol.*, 10 (1): 33–43.
- Munaf, E., Zein, R. dan Kurniadi, I. 1997a. The use of rice husk for removal of phenol from waste water as studied using 4-aminoantipyrine spectrophotometric method. *Environ. Technol.*, 18: 355–358.
- Munaf, E. dan Zein, R. 1997b. The use of rice husk for removal of toxic metals from waste water, *Environ. Techno.*, 18: 355–358.
- Ocsick, J. 1982. *Adsorption*. John Willey & Son, New York.
- Park, D., Yun, Y.S., Jo, J.H. dan Park, J.M. 2005. Mecanism of Hexavalent Chromium Removal Dead Fungal Biomass of *Aspergillus niger*. *Water Research*, 39: 533–540.
- Pavasant, P., Apiraticu, R., Sungkhum, V., Suthiparinyanot, P., Wattanachira, S. dan Marhaba, T.F. 2006. Biosorption of Cu²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺ and Zn²⁺ using dried marine green macroalga *Caulerpa lentillifera*. *Bioresource Technol.*, 97: 2321–2329.
- Pino, G.H., Souza de Mesquita, L.M., Torem, M.L. dan Pinto, G.A.S. 2006. Biosorption of Cadmium by green coconut shell powder, *Minerals Engineering*, 19: 380–387.
- Pritchard, H.N. dan Bradt, P.T. 1984. *Nonvascular Plants*, Times Mirror Mosby College Publishing, Toronto.
- Ramelow, U.J., Neil Guidry, C. dan Fisk, S.D. 1996. A Kinetics Study of Metal Ion Binding by Biomass Immobilized in Polymers. *J. of Hazardous Materials*, 46: 37–55.
- Wang, J. dan Chen, C. 2006. Biosorption of Heavy Metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review. *Biotechnology Advances*, 24: 427–451.