

ABSTRAK

ASRI ISMAYATI SUNARYA. Biosorpsi Logam Berat Pb(II) dan Cd(II) Menggunakan Kulit Jeruk Siam (*Citrus reticulata*). Dibimbing oleh MUCHAMMAD SRI SAENI dan HENNY PURWANINGSIH SUYUTI.

Logam-logam yang beracun sering dihasilkan dari beberapa proses industri dan menimbulkan permasalahan pada lingkungan. Logam berat merupakan pencemar yang banyak terdapat di tanah dan perairan. Salah satu metode yang biasa digunakan untuk mengatasi logam berat adalah fisika-kimia. Akan tetapi, metode fisika-kimia sangat mahal dan tidak efektif. Oleh karena itu, biosorpsi menjadi salah satu alternatif untuk mengatasi pencemaran logam berat. Pada penelitian ini, biosorpsi kadmium dan timbal dipelajari dengan menggunakan kulit jeruk siam (*Citrus reticulata*). Parameter yang dipelajari adalah waktu kontak, konsentrasi larutan logam, suhu, pH larutan, bobot biosorben, dan ukuran biosorben.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu optimum biosorpsi kedua ion logam terjadi pada waktu 120 menit. Proses biosorpsi kadmium dan timbal meningkat seiring dengan meningkatnya pH dan mencapai nilai optimum pada pH 5.5 dan pH 6 masing-masing untuk Pb(II) dan Cd(II). Pengaruh konsentrasi untuk kedua logam menunjukkan bahwa kapasitas biosorpsi dan penjerapan logam berat meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi logam berat. Hasil penelitian menunjukkan, semakin banyak bobot biosorben semakin menurun kapasitas biosorpsinya dan semakin meningkat jumlah logam yang terjerap. Ukuran biosorben yang lebih kecil menghasilkan penjerapan logam berat yang lebih banyak. Pengaruh suhu menunjukkan bahwa penjerapan kadmium berkurang seiring dengan meningkatnya suhu, sedangkan timbal stabil pada semua suhu yang dipelajari.

Kesetimbangan biosorpsi kadmium dan timbal dipelajari dengan menggunakan isoterm Freundlich dan Langmuir pada kondisi yang sama. Linieritas kedua tipe isoterm adsorpsi lebih besar dari 90%. Hal ini menunjukkan bahwa kedua tipe isoterm adsorpsi terjadi pada proses biosorpsi logam berat kadmium dan timbal oleh kulit jeruk siam.

ABSTRACT

ASRI ISMAYATI SUNARYA. Biosorption of Cadmium and Lead by Orange Peel. Under the direction of MUCHAMMAD SRI SAENI and HENNY PURWANINGSIH SUYUTI.

Toxic metals are often discharged from industrial processes and this can lead by environmental problems. Heavy metals are major pollutants that can be found in soil and water resources. One of the conventional methods for removing heavy metals is physico-chemical methods. These methods maybe ineffective or extremely expensive. Biosorption as an alternative for heavy metals removal are being considered. In this study, biosorption of lead and cadmium ions from industrial wastewater has been investigated by using orange peel (*Citrus reticulata*). The biosorption was carried out in a batch system. This research studied about the effect of various contact times, heavy metal concentrations, temperatures, and pH solutions. Various amounts and size of orange peel also been investigated.

Result indicated that optimum biosorption capacity occurred after 120 minutes for both metal ions. Biosorption process and metal uptake increase with increase of pH value. The optimum pH was found to be 5.5 and 6, respectively, for Pb(II) and Cd(II). The effect of initial metal concentration for both metal ions showed increase metal concentration with strongly increase capacity of biosorption and metal uptake. The result showed that the higher the amount of biosorbent the higher the metal uptake and the lower the biosorption capacity. It also found that smaller size of biosorbent, the higher the metal uptake capacity. For cadmium, ions metal uptake was decreasing when the temperature was increasing, but for lead it was stable over the temperature range.

The biosorption equilibrium of cadmium and lead was investigated using Langmuir and Freundlich isotherm under the same condition. The coefficient of determination of both models were mostly greater than 90%, indicating that both models adequately describe the experimental data of the biosorption of these metal ions.

BIOSORPSI Cd(II) DAN Pb(II) MENGGUNAKAN KULIT JERUK SIAM (*Citrus reticulata*)

ASRI ISMAYATI SUNARYA

Skripsi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains pada
Departemen Kimia

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2006**

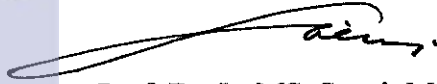
Halaman ini adalah bagian dari dokumen yang dihasilkan oleh sistem manajemen dokumen dan informasi IPB University. Untuk informasi lebih lanjut, silakan kunjungi situs web IPB University di www.ipb.ac.id.
1. Dilindungi sebagai dokumen resmi dan tidak boleh disebarluaskan tanpa izin dari IPB University.
2. Diperoleh menggunakan dan menyalinnya adalah tindakan yang melanggar hukum.
3. IPB University tidak bertanggung jawab atas kerugian yang timbul akibat penggunaan dokumen ini.
4. Penggunaan dokumen ini tidak boleh untuk tujuan komersial.
5. Penggunaan dokumen ini tidak boleh untuk tujuan politik, agama, ras, atau golongan.
6. Penggunaan dokumen ini tidak boleh untuk tujuan yang bertentangan dengan hukum dan peraturan yang berlaku.
7. IPB University tidak bertanggung jawab atas kerugian yang timbul akibat penggunaan dokumen ini.
8. Penggunaan dokumen ini tidak boleh untuk tujuan yang bertentangan dengan hukum dan peraturan yang berlaku.
9. Penggunaan dokumen ini tidak boleh untuk tujuan yang bertentangan dengan hukum dan peraturan yang berlaku.
10. Penggunaan dokumen ini tidak boleh untuk tujuan yang bertentangan dengan hukum dan peraturan yang berlaku.

Judul skripsi : Biosorpsi Pb(II) dan Cd(II) Menggunakan Kulit Jeruk Siam
(*Citrus reticulata*)

Nama : Asri Ismayati Sunarya

NIM : G44201018

Disetujui



Prof. Dr. Ir. MS. Saeni, M.S.

Ketua



Henny Purwaningsih Suyuti, S.Si, M.Si.

Anggota

Diketahui



Tanggal Lulus:

PRAKATA

Dengan menyebut Asma Allah yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang.

Segala puja dan puji hanyalah bagi Allah Rabb semesta alam yang telah melimpahkan nikmat-Nya, rahmat-Nya, dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dengan judul " Biosorpsi Logam Berat Pb(II) dan Cd(II) Menggunakan Kulit Jeruk Siam (*Citrus reticulata*)". Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Agustus 2005 sampai Januari 2006 di Laboratorium Kimia Fisik dan Lingkungan, Departemen Kimia, Institut Pertanian Bogor.

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada Prof. Dr. Ir. MS. Saeni, MS dan Henny Purwaningsih Suyuti S.Si, M.Si selaku pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan kepada penulis. Ucapan terimakasih juga disampaikan seluruh Staf dan Laboran Kimia Fisik dan Lingkungan, rekan-rekan mahasiswa kimia 38, Didi, Ataufaul, Zahra, Azizah, Ikhwah kimia 38, serta rekan-rekan seperjuangan di PAGI ANABA'38, PAKIS BEM FMIPA, Al-Ghifari dan BIRU MUDA. Terakhir penulis menghaturkan ucapan terimakasih kepada Mamah, Apa, Kiki, Iwan, teh Santi, teh Tini, serta keluarga besar Hamidah atas dukungan materi, doa, semangat, dan kasih sayangnya.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat.

Bogor, April 2006

Asri Ismayati Sunarya



RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Tasikmalaya pada tanggal 21 Mei 1982 dari ayah Endang Sunarya dan ibu R.Yoyoh Maesaroh. Penulis merupakan putri terakhir dari tiga bersaudara.

Tahun 2001 penulis lulus dari SMU Negeri I Singaparna dan pada tahun yang sama lulus seleksi masuk IPB melalui jalur Undangan Seleksi masuk IPB pada Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.

Selama mengikuti perkuliahan, penulis menjadi asisten Pendidikan Agama Islam tahun ajaran 2003/2004, 2004/2005, dan 2005/2006 serta menjadi penanggung jawab asisten Pendidikan Agama Islam Fakultas MIPA tahun ajaran 2004/2005. Penulis menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Kimia dan DKM Al-Ghifari.

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	vii
PENDAHULUAN.....	1
TINJAUAN PUSTAKA.....	1
Jeruk Siam.....	1
Pektin.....	2
Bioremoval, Biosorpsi, dan Biosorben.....	2
Isoterm Adsorpsi.....	3
Logam Berat.....	3
BAHAN DAN METODE	
Bahan dan Alat	5
Metode	5
HASIL DAN PEMBAHASAN	
Biosorben	6
Waktu Biosorpsi	6
Pengaruh pH.....	6
Pengaruh Bobot Biosorben.....	7
Pengaruh Suhu.....	8
Pengaruh Ukuran Biosorben.....	8
Pengaruh Konsentrasi Pb(II) dan Cd(II)	9
Isoterm Adsorpsi.....	9
Perbandingan Biosorben dengan Adsorben Komersial.....	11
Biosorpsi Pb(II) dan Cd(II) dari Limbah Pabrik Aki.....	12
SIMPULAN DAN SARAN	
Simpulan	12
Saran	12
DAFTAR PUSTAKA	12
LAMPIRAN	15

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1 Rantai senyawa pektin.....	2
2 Struktur asam D-galakturonat.....	2
3 Waktu biosorpsi optimum Cd(II) dan Pb(II)	6
4 Pengaruh pH terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II) dan Cd(II)	6
5 Pengaruh bobot biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II)	7
6 Pengaruh suhu terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II)	8
7 Pengaruh ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II)	8
8 Pengaruh konsentrasi Pb(II) dan Cd(II) terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan.....	9
9 Biosorpsi logam berat oleh biosorben dengan mekanisme fisisorpsi dan kimisorpsi	10
10 Isoterm Langmuir biosorpsi Cd(II)	10
11 Isoterm Freundlich biosorpsi Cd(II).....	10
12 Isoterm Langmuir biosorpsi Pb(II).....	11
13 Isoterm Freundlich biosorpsi Pb(II).....	11
14 Perbandingan kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II) oleh zeolit dan biosorben.....	11
15 Konsentrasi limbah Pb(II) dari pabrik aki setelah dijerap oleh kulit jeruk siam	12
16 Konsentrasi limbah Cd(II) dari pabrik aki setelah dijerap oleh kulit jeruk siam	12

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
1 Bagan alir penelitian	16
2 Jenis-jenis logam berat dan sumbernya di alam.....	17
3 Kadar air kulit jeruk siam	17
4 Waktu biosorpsi optimum Cd(II)	18
5 Pengaruh pH terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)..	18
6 Pengaruh konsentrasi Cd(II) terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan	18
7 Pengaruh suhu terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)	19

8	Pengaruh bobot biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)	19
9	Pengaruh ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)	19
10	Waktu biosorpsi Pb(II)	20
11	Pengaruh pH terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II) ..	20
12	Pengaruh konsentrasi Pb(II) terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan	20
13	Pengaruh suhu terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II)	21
14	Pengaruh bobot biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II)	21
15	Pengaruh ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II)	21
16	Isoterm Langmuir dan Freundlich untuk biosorpsi Cd(II) menggunakan kulit Jeruk siam	22
17	Isoterm Langmuir dan Freundlich untuk biosorpsi Pb(II) menggunakan kulit jeruk siam	23
18	Perbedaan mekanisme adsorpsi fisisorpsi dan kimisorpsi	24
19	Perbandingan antara biosorben dan adsorben komersil terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)	25
20	Perbandingan antara biosorben dan adsorben komersial terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II)	25
21	Kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II) dan Cd(II) dari limbah limbah pabrik aki	25

PENDAHULUAN

Proses produksi dalam industri yang memerlukan suhu sangat tinggi, seperti pertambangan batu bara, pemurnian minyak, pembangkit tenaga listrik dengan energi minyak, dan pengecoran logam berat banyak mengeluarkan limbah logam berat. Logam berat yang biasanya ditemukan sebagai zat pencemar adalah logam berat-logam berat yang relatif mudah menguap dan larut dalam air, seperti arsen (As), kadmium (Cd), timah hitam (Pb), dan merkuri (Hg) (Darmono 1995). Banyaknya limbah dari industri pengguna logam berat atau bahan yang mengandung logam berat akan meningkatkan pencemaran logam berat pada udara, tanah atau daratan, dan air. Logam berat yang dibuang ke lingkungan cenderung tidak dapat didegradasi secara kimiawi maupun biologi dan tidak dapat dihancurkan. Kadar logam berat yang melebihi ambang batas bersifat karsinogenik dan teratogenik.

Berbagai usaha dilakukan untuk mengatasi pencemaran logam berat ini, di antaranya dengan metode fisika-kimia seperti presipitasi kimia, osmosis balik, pertukaran ion, dan bioreduksi (Cabuk *et al.* 2005). Akan tetapi, metode tersebut mahal dan tidak efektif terutama pada konsentrasi larutan ion logam berat 1-100 ppm (Hussein *et al.* 2004). Oleh karena itu, metode bioteknologi seperti biosorpsi atau bioakumulasi menjadi metode alternatif untuk mengatasi pencemaran logam berat. Metode ini diketahui lebih murah dan lebih efektif dibandingkan metode lain (Kapoor and Viraraghavan 1995).

Aplikasi pertukaran ion di industri merupakan proses yang sangat mirip dengan biosorpsi. Pertukaran ion menggunakan resin polimer turunan hidrokarbon sebagai adsorben yang spesifik untuk adsorbat tertentu. Harganya jauh lebih mahal jika dibandingkan dengan biosorben. Di Amerika, harga resin tersebut mencapai US \$2 milyar/tahun, sementara harga biosorben hanya US \$30 juta/tahun (Volesky dan Naja 2004). Dari segi ekonomi dan bisnis, keuntungan ini menjadikan teknologi biosorpsi banyak dipilih oleh industri-industri besar untuk mengatasi limbah logam berat.

Pada tahun 1990-an, pertama kali dilaporkan bahwa bahan-bahan biologi dapat digunakan untuk memindahkan logam berat dari limbah industri dengan harga relatif murah, mudah, dan ekonomis. Bahan biologi ini dikenal dengan istilah biomassa (Viera dan Volesky 2000). Kulit buah jeruk siam (*Citrus*

reticulata) diduga dapat digunakan sebagai biosorben yang potensial dalam menyerap logam berat.

Produksi jeruk di Indonesia pada tahun 2000-2003, menurut Ditjen Bina Produksi Hortikultura dan Biro Pusat Statistik (BPS) berturut-turut adalah 644.052 ton, 691.433 ton, 986.132 ton, dan 1.121.000 ton. Hal ini menunjukkan terjadinya peningkatan produksi jeruk setiap tahunnya. Menurut Sihombing (2003), konsumsi jeruk ideal yang mengandung banyak vitamin C dalam satu tahun adalah 5 kg/orang, dengan konsumsi ideal ini maka diperlukan 1.2 juta ton/tahun. Seiring dengan keperluan konsumsi tersebut, maka limbah kulit buah jeruk akan terus meningkat. Pemanfaatan limbah kulit jeruk siam sebagai biosorben logam berat kadmium dan timbal diharapkan dapat meningkatkan nilai tambahnya.

Penelitian ini bertujuan memanfaatkan limbah kulit buah jeruk siam sebagai biosorben Pb(II) dan Cd(II) serta mempelajari pengaruh waktu, pH, bobot biosorben, konsentrasi logam berat, suhu, dan ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan logam berat Pb(II) dan Cd(II).

TINJAUAN PUSTAKA

Jeruk Siam

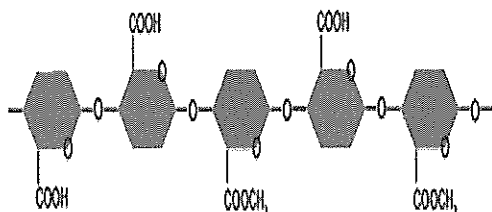
Tanaman jeruk adalah tanaman buah tahunan yang berasal dari Asia. Jeruk yang dibudidayakan di Indonesia adalah jeruk siam, jeruk manis (*C. auranticum* L. dan *C. sinensis* L.), jeruk lemon atau sitrun (*C. medica*), dan jeruk besar (*C. maxima* Herr). Klasifikasi botani tanaman jeruk siam adalah sebagai berikut:

- divisi : Spermatophyta
- subdivisi : Angiospermae
- kelas : Dicotyledonae
- ordo : Rutales
- keluarga : Rutaceae
- genus : *Citrus*
- spesies : *Citrus reticulata*

Secara umum, dalam setiap 100 g buah jeruk yang dapat dimakan mengandung 90 g air, 0.6 g protein, 0.4 g lemak, 8.6 g karbohidrat, 0.5 g serat, vitamin A1062 SI, dan 42 mg vitamin C. Kulit buah jeruk mengandung 20-40% pektin. Pektin diduga berfungsi sebagai tapak aktif dari biosorben logam berat.

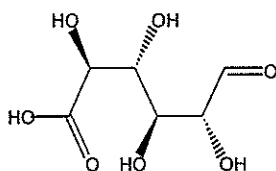
Pektin

Pektin merupakan senyawa polisakarida kompleks yang komposisinya tergantung pada sumbernya. Pektin terdiri atas asam-asam poligalakturonat yang dapat diesterifikasi oleh gugus metanol dan dapat dinetralkan oleh basa. Struktur umum pektin dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Rantai senyawa pektin

Pektin merupakan suatu polisakarida alami. Komponen utama dari pektin adalah asam D-galakturonat. Struktur kimia asam D-galakturonat dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Struktur asam D-galakturonat.

Berdasarkan kadar metoksilnya, pektin dibedakan atas dua macam, yaitu pektin bermetoksil tinggi yang mengandung 7-12 metil ester dan pektin bermetoksil rendah dengan kandungan 3-7 metil ester. Pektin yang mempunyai kadar metoksil tinggi larut dalam air, sedangkan pektin berkadar metoksil rendah larut dalam alkali dan asam oksalat. Pektin tidak larut dalam pelarut organik non polar, tetapi larut dalam air dan pelarut organik polar seperti formamida dan dimetil sulfoksida. Kelarutan pektin dipengaruhi oleh kandungan metil ester, bobot molekul, pH, konsentrasi garam, dan kandungan gula (Fitriani 2003).

Bioremoval, Biosorpsi, dan Biosorben

Bioremoval didefinisikan sebagai bahan biologis yang digunakan dalam proses penyerapan pencemar dari suatu cairan. Selanjutnya melalui proses desorpsi bahan pencemar ini dapat dibuang dan bersifat

ramah lingkungan (Suhendrayatna 2001). Secara alami, pada saat kondisi tak terkendali, proses bioremoval ion logam berat umumnya terdiri dari dua mekanisme yang melibatkan proses pengambilan aktif dan pengambilan pasif.

Pengambilan aktif dapat terjadi pada berbagai sel hidup. Mekanisme ini secara simultan terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam berat untuk pertumbuhan mikroorganisme atau akumulasi intraseluler ion logam berat tersebut. Logam berat diendapkan pada proses metabolisme dan ekskresi pada tingkat kedua. Proses ini tergantung dari energi yang terkandung dan sensitivitasnya terhadap pH, suhu, kekuatan ikatan ionik, dan cahaya. Proses ini dapat dihambat oleh suhu yang rendah, tidak tersedianya sumber energi atau nutrisi.

Proses pengambilan pasif terjadi ketika ion logam berat mengikat dinding sel dengan dua cara yang berbeda. Pertama, pertukaran ion monovalen dan divalen seperti Na^+ , Mg^{2+} , dan Ca^{2+} pada dinding sel digantikan oleh ion-ion logam berat. Kedua, pembentukan kompleks antara ion-ion logam berat dengan gugus-gugus fungsi seperti karbonil, amino, tiol, hidroksi, fosfat, dan hidroksi karbonil yang terdapat pada dinding sel. Proses ini dikenal dengan istilah biosorpsi.

Biosorpsi adalah pemindahan ion logam berat dari suatu larutan menggunakan biosorben prokariotik atau eukariotik (Volesky 2004). Menurut Cossich *et al.* (2003), biosorpsi didefinisikan sebagai proses penggunaan bahan alami untuk mengikat logam berat. Biosorpsi memiliki beberapa mekanisme, yaitu pertukaran ion, pengkelatan, dan difusi yang melewati dinding sel dan membran. Mekanisme biosorpsi yang terjadi tergantung dari biosorben yang digunakan.

Bahan alami yang telah digunakan sebagai biosorben di antaranya adalah ganggang laut, bakteri, jamur, dan kulit kepiting (Volesky 2004). Sementara itu menurut Mashall *et al.* (1996), beberapa produk samping pertanian berpotensi sebagai biosorben, yaitu tongkol jagung, gabah padi, ampas kedelai, biji kapas, jerami, ampas tebu, dan kulit kacang tanah.

Biosorpsi lebih efektif dengan adanya keasaman dan kehadiran ion-ion lainnya di dalam media tempat logam berat dapat terendapkan sebagai garam yang tidak larut (Gadd 1998). Pada saat ion logam berat tersebar pada permukaan sel, ion akan mengikat pada bagian permukaan sel berdasarkan kemampuan daya afinitas kimianya.

Biosorben mengandung tapak aktif seperti karboksil, imidazol, tiol, amino, fosfat, sulfat tioeter, fenol, karbonil, dan amida (Volesky 2004). Biosorben yang baik memiliki kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan yang tinggi.

Kapasitas biosorpsi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Q = \left(\frac{C_1 - C_2}{m} \right) x V \dots\dots\dots(1)$$

Persentase penjerapan logam berat dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\% \text{Penjerapan} = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1} \right) x 100\% \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

- Q = kapasitas biosorpsi per bobot molekul (mg logam /g biosorben)
 V = volume larutan (ml)
 C₁ = konsentrasi awal larutan (mg/l)
 C₂ = konsentrasi akhir larutan (mg/l)
 m = bobot biosorben (g)

Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi merupakan fungsi konsentrasi zat terlarut yang terjerap pada padatan terhadap konsentrasi larutan. Persamaan yang dapat digunakan untuk menjelaskan data percobaan isoterm dikaji oleh Freundlich, Langmuir, serta Brunauer, Emmet, dan Teller (BET).

Isoterm Freundlich

Isoterm yang paling umum digunakan adalah isoterm Freundlich yang lebih baik dalam mencirikan kebanyakan proses adsorpsi (Jason 2004). Pada isoterm Freundlich proses biosorpsi terjadi secara fisorpsi banyak lapisan (Anggaraningrum 1996).

Menurut Atkins (1999), pada proses adsorpsi zat terlarut oleh permukaan padatan diterapkan isoterm Freundlich yang diturunkan secara empiris dengan bentuk persamaan:

$$\frac{x}{m} = kc^{1/n} \dots\dots\dots(3)$$

apabila dilogartimakan, persamaan akan menjadi:

$$\text{Log} \frac{x}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log c \dots\dots\dots(4)$$

keterangan:

- x/m = jumlah adsorbat teradsorpsi perunit bobot adsorben (mg logam/g biosorben).
 c = konsentrasi keseimbangan adsorbat dalam larutan setelah adsorpsi (ppm)
 k,n = konstanta empiris

Isoterm Langmuir

Isoterm Langmuir diturunkan berdasarkan teori dengan persamaan:

$$\frac{x}{m} = \frac{\alpha\beta c}{1 + \beta c} \dots\dots\dots(5)$$

Isoterm Langmuir dipelajari untuk menggambarkan pembatasan sisi adsorpsi dengan asumsi bahwa sejumlah tertentu sisi sentuh adsorben ada pada permukaannya dan semuanya memiliki energi yang sama, serta adsorpsi bersifat balik (Atkins 1999). Menurut Anggaraningrum (1996), isoterm Langmuir terjadi secara kimisorpsi satu lapisan. Konstanta α , β dapat ditentukan dari kurva hubungan $\frac{c}{x/m}$ terhadap c dengan persamaan:

$$\frac{c}{x/m} = \frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\alpha} c \dots\dots\dots(6)$$

Isoterm Brunauer, Emmet, Teller (BET).

Isoterm BET merupakan metode umum untuk menentukan luas permukaan adsorben dari data adsorpsi, dengan persamaan:

$$\frac{x}{n(1-x)} = \frac{1}{cn} + \frac{(c-1)x}{cn} \dots\dots\dots(7)$$

konstanta n dan c dapat diperoleh dari kemiringan garis perpotongan kurva hubungan $\frac{x}{n(1-x)}$ terhadap x.

Logam Berat

Logam berat didefinisikan sebagai suatu jenis logam berat yang mempunyai bobot atom lebih besar dari bobot atom kalsium dan densitasnya lebih besar dari 5 g/cm³. Logam berat memiliki nomor atom 22-92 dan terdapat pada periode IVA dan VIIA (Lampiran 2). Logam berat dalam tubuh manusia jumlahnya sangat sedikit dan bersifat esensial karena digunakan untuk aktivitas kerja enzim

misalnya zink (Zn), tembaga (Cu), besi (Fe), dan beberapa unsur lainnya seperti kobalt (Co), mangan (Mn), dan lainnya. Beberapa logam berat bersifat non-esensial dan bersifat toksik terhadap makhluk hidup seperti kadmium dan timbal.

Timbal atau timah hitam (Pb)

Timbal adalah logam berat yang lunak dan berwarna cokelat kehitaman, serta mudah dimurnikan dari pertambangan. Timbal merupakan logam berat yang sangat beracun, dapat dideteksi secara praktis pada seluruh benda mati di lingkungan dan seluruh sistem biologis.

Sumber utama timbal berasal dari komponen gugus alkil timbal yang digunakan sebagai bahan aditif bensin. Pada pertambangan, timbal ditemukan sebagai sulfida logam berat (PbS) yang sering disebut galena. Timbal yang masuk ke perairan alami berada dalam bentuk Pb^{2+} (Saeni 1989).

Plumbism atau keracunan timbal pada manusia telah diketahui sejak lama. Timbal bersifat toksik jika dikonsumsi sekitar 0.2-2.0 mg/hari. Pemasukan 2.5 mg Pb/hari akan memerlukan waktu hampir 4 tahun untuk menjadi toksik, sedangkan pemasukan 3.5 mg Pb/hari akan bersifat toksik dalam beberapa bulan saja (Darmono 1995). Menurut WHO toleransinya bagi orang dewasa adalah 50 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bobot badan dan untuk bayi atau anak-anak 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ bobot badan.

Timbal dapat menyebabkan kerusakan pada beberapa sistem organ di antaranya adalah sistem hemopoietik, hemotologik, hemetotoksik, sistem saraf pusat dan tepi, ginjal, sistem kardiovaskuler, sistem gastrointestinal, sistem reproduksi, dan sistem endokrin (Darmono 1995).

Timbal dalam tubuh berikatan dengan gugus -SH dalam molekul protein yang menyebabkan hambatan pada aktivitas kerja sistem enzim. Timbal mengganggu sistem sintesis Hb dengan jalan menghambat konversi delta asam aminolevulinat (delta-ALA) menjadi fosfobilinogen dan juga menghambat korporasi dari Fe ke dalam protoforfin IX untuk membentuk Hb dengan jalan menghambat enzim delta asam aminolevulinat dehidratase (delta-ALAD) dan ferokelatase. Hal ini meningkatkan ekskresi koproporfin dalam urin dan delta-ALA serta menghambat sintesis Hb.

Kadmium (Cd)

Kadmium merupakan salah satu logam berat yang berbahaya karena beresiko tinggi terhadap pembuluh darah. Kadmium berpengaruh pada manusia dalam jangka waktu panjang dan dapat terakumulasi pada tubuh khususnya hati dan ginjal. Secara prinsip pada konsentrasi rendah berpengaruh terhadap gangguan paru-paru, emfisema, dan renal turbural yang kronis. Logam berat ini bersama merkuri dan timbal termasuk dalam tiga besar logam berat yang memiliki tingkat bahaya tertinggi terhadap kesehatan manusia (Widle dan Benemann 1993).

Kadmium lebih mudah diakumulasi oleh tanah dibanding dengan ion logam berat lainnya seperti timbal. Sumber utama pencemaran kadmium adalah tambang seng, tembaga, dan tambang logam berat lainnya, pabrik minyak, pabrik semen, penyepuhan, dan pusat pembakaran sampah.

Keseimbangan antara fase padat dan cair kadmium dalam berbagai komponen dipengaruhi oleh pH tanah, suhu, kapasitas biosorpsi bahan organik, potensial reduksi oksidasi, komposisi mineral, dan jenis serta konsentrasi bahan-bahan terlarut lainnya. Sifat fisik dari logam berat kadmium adalah berwarna putih keperakan, tahan panas, sangat bagus untuk campuran bahan keramik dan plastik. Selain itu, kadmium sangat tahan terhadap korosi, sehingga baik untuk melapisi besi dan baja (Darmono 1995).

Proses pemurnian dalam industri pertambangan logam berat timbal dan seng menghasilkan produk samping berupa kadmium yang terbuang ke dalam lingkungan. Kadmium masuk ke dalam tubuh manusia melalui makanan dan minuman yang terkontaminasi. Kadmium dalam tubuh terakumulasi dalam ginjal dan hati terutama terikat sebagai metalotionin. Metalotionin mengandung asam amino sistein, dan kadmium terikat dengan gugus tiol (-SH) dalam enzim karboksil sisteinil, histidil, hidroksil dan fosfatil dari protein dan purin.

Kemungkinan besar pengaruh toksisitas kadmium disebabkan oleh interaksi antara kadmium dan protein tersebut, sehingga menimbulkan hambatan terhadap aktivitas kerja enzim. Kadmium lebih beracun bila terhisap melalui saluran pernafasan daripada saluran pencernaan. Kasus keracunan akut kadmium pada umumnya disebabkan debu dan asap kadmium, terutama kadmium oksida (CdO). Menurut WHO dan FAO (1998),

konsumsi per minggu yang ditoleransikan bagi manusia adalah 7 µg/kg bobot badan.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan adalah kulit buah jeruk siam, kristal Pb(NO₃)₂, kristal CdCl₂, NaOH 25%, HNO₃ 0.1N dan NaOH 0.1N. Alat-alat yang digunakan adalah spektroskopi serapan atom (SSA), neraca analitik, eksikator, oven, cawan porselen, cawan petri, *shaker*, *blender*, pH meter, sentrifusa, corong buchner, dan alat-alat kaca yang biasa terdapat di laboratorium.

METODE

Biosorben

Biosorben yang digunakan adalah kulit buah jeruk siam. Jeruk diperoleh dari perkebunan jeruk siam di Bojongsari-Garut. Buah jeruk yang dipilih adalah buah jeruk yang berumur muda dan masih segar.

Biosorben dibuat menjadi dua ukuran, yaitu 60 mesh dan 100 mesh. Biosorben alami kemudian dibandingkan dengan adsorben komersial, yaitu zeolit.

Preparasi sampel

Kulit jeruk siam dicuci dengan air keran yang mengalir dan dibiarkan selama 2 jam. Setelah itu, dicuci dengan air deionisasi. Kulit jeruk siam diambil sebagian kecil untuk ditentukan kadar airnya. Selebihnya kulit jeruk tersebut dipotong kecil-kecil, dikeringkan di bawah sinar matahari, dan dihaluskan menggunakan *blender* untuk menghasilkan ukuran yang seragam, yaitu 60 mesh dan 100 mesh.

Analisis Kadar Air Kulit Jeruk

Sebanyak 1 g serbuk kulit jeruk siam hasil pencucian ditempatkan dalam cawan porselin yang telah dikeringkan dalam oven dan telah diketahui bobot kosongnya. Cawan porselen yang berisi sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 3 jam dan didinginkan. Setelah dingin kulit jeruk disimpan dalam eksikator lalu ditimbang. Pengeringan dilakukan beberapa kali sampai diperoleh bobot yang tetap. Penentuan

dilakukan tiga kali ulangan. Perhitungan kadar air ialah sebagai berikut:

$$\text{Kadar air} = \frac{a-b}{c} \times 100\%$$

keterangan:

- a : bobot sampel dan bobot cawan porselen sebelum dikeringkan (g)
- b : bobot sampel dan bobot cawan porselen sesudah dikeringkan (g)
- c : bobot sampel (g)

Pembuatan Larutan Tunggal Pb(II) dan Cd(II)

Larutan tunggal Pb(II) dan Cd(II) stok dibuat dalam konsentrasi 100 ppm dengan menggunakan air deionisasi sebagai pelarut.

Biosorpsi Pb(II) dan Cd(II) oleh Biosorben

Metode biosorpsi Pb(II) dan Cd (II) menggunakan metode yang dimodifikasi dari Ceribasi dan Yetis (2001). Sebanyak 1 g biosorben dimasukkan dalam 50 ml larutan tunggal Pb(II) dan Cd(II). Campuran dikocok dengan *shaker* berkecepatan 500 rpm selama selang waktu tertentu, kemudian ditambahkan 5-10 tetes NaOH 25%, disaring dengan corong buhner atau disentrifusa, lalu diambil supernatannya. Larutan siap dianalisis dengan AAS pada panjang gelombang 261 untuk Pb(II) dan 226 nm Cd(II).

Penentuan Waktu Optimum

Biosorben sebanyak 1 g dimasukkan dalam 50 ml larutan tunggal ion logam berat. Adsorpsi dilakukan sesuai prosedur biosorpsi ion Pb(II) dan Cd(II) dengan variasi waktu adsorpsi 60, 80, 120, 180, dan 210 menit. Waktu optimum ditentukan oleh kapasitas biosorpsi optimum tiap biosorbennya.

Biosorpsi Cd(II) dan Pb(II)

Parameter-parameter yang dipelajari dalam biosorpsi ini adalah pH, bobot biosorben, konsentrasi Cd(II) dan Pb(II), suhu, dan ukuran biosorben.

Pengaruh pH terhadap adsorpsi Cd(II) dan Pb(II) diukur dengan menggunakan pH yang beragam dari 5-6.5 (Krishnan dan Anirudhan 2003). Penentuan suhu optimum dilakukan dengan ragam suhu 15°C, 27°C, 40°C dan 60°C (Gaikwad 2004). Bobot biosorben yang digunakan adalah 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 dan 2 g (Barros 2003). Konsentarsi larutan Cd(II) 5, 15 dan 30 mg/l (Barros 2003) dan konsentarsi

larutan Pb(II) 15, 20, 50 mg/l. Ukuran biosorben divariasikan menjadi 100 mesh dan 60 mesh.

Analisis Isoterm Adsorpsi Freundlich dan Langmuir

Sebanyak 1 g biosorben dimasukkan dalam 50 ml larutan ion tunggal Pb(II) dan Cd(II) pada beberapa konsentrasi, yaitu 1, 5, 10, 25, 50, dan 100 mg/l selama 2 jam pada suhu kamar. Kemudian disaring dan diukur kadar nya dengan AAS. Kapasitas biosorpsi (Q) dihitung dengan model isoterm Freundlich dan Langmuir (Lampiran 1).

HASIL DAN PEMBAHASAN

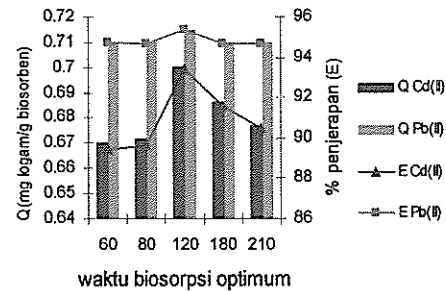
Biosorben

Kulit jeruk siam yang tidak dimanfaatkan dibuat sebagai biosorben Pb(II) dan Cd(II). Limbah kulit jeruk siam dicuci dengan air yang mengalir, kemudian dibersihkan dengan air deionisasi untuk menghilangkan ion lain yang kemungkinan terdapat pada kulit jeruk.

Kulit jeruk siam dengan kadar air 68.45% (Lampiran 3) dikeringudarkan, kemudian dihaluskan sampai berukuran 60 mesh dan 100 mesh. Salah satu kelemahan dari biosorben adalah cepat jenuh dibandingkan dengan adsorben komersial (Suhendrayatna 2001). Oleh karena itu, untuk mengatasinya biosorben dipanaskan dalam oven pada suhu 45°C lalu disimpan pada eksikator untuk menjaga kestabilan. Penentuan kadar air biosorben penting dilakukan karena akan berpengaruh pada proses penyimpanan biosorben.

Waktu Biosorpsi

Biosorben dari kulit jeruk siam digunakan pada proses biosorpsi Pb(II) dan Cd(II) dari larutan tunggal. Konsentrasi larutan tunggal Pb(II) dan Cd(II) untuk menentukan waktu optimum adalah 15 ppm. Lamanya proses biosorpsi ditentukan berdasarkan kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapannya selama rentang waktu tertentu. Pada saat kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan kedua logam mencapai nilai optimum, maka lama proses biosorpsi tersebut diambil sebagai waktu optimum biosorpsi.

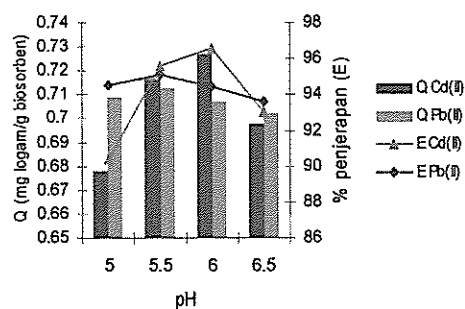


Gambar 3 Waktu biosorpsi optimum Cd(II) dan Pb(II).

Berdasarkan Gambar 3, proses biosorpsi menggunakan biosorben berukuran 60 mesh, terlihat meningkat pada selang waktu 60-120 menit. Selanjutnya proses biosorpsi cenderung menurun untuk kedua logam. Waktu biosorpsi optimum untuk Pb(II) dan Cd(II) diperoleh pada waktu kontak 120 menit. Hal ini menunjukkan bahwa waktu yang diperlukan untuk mencapai kapasitas biosorpsi optimum untuk kedua logam sama. Akan tetapi, persentase penjerapan Pb(II) lebih besar dibandingkan Cd(II), yaitu 95.40%, sedangkan Cd(II) 93.40%. Kapasitas biosorpsi Pb(II) > Cd(II), yaitu 0.7151 (mg /g biosorben) dan 0.7002 (mg /g biosorben) (Lampiran 4 dan 10).

Pengaruh pH

Kapasitas biosorpsi kulit jeruk siam sangat tergantung pada pH larutan, sehingga penentuan pengaruh pH larutan pada biosorpsi diperlukan untuk keakuratan parameter biosorpsi. Pengaruh pH terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II) dan Cd(II) menggunakan kulit jeruk siam dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Pengaruh pH terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II) dan Cd(II).

Gambar 4 menunjukkan bahwa kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II) relatif meningkat mulai dari pH 5 sampai dengan pH 6.0 dan pH 5.5. Akan tetapi, setelah melewati titik optimum, kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan kedua logam cenderung kembali turun.

Proses biosorpsi mengalami peningkatan, seiring dengan meningkatnya pH, tetapi mengalami penurunan setelah melewati titik optimum, yaitu pada saat pH $\geq 5.5-6$. Hal ini dapat dijelaskan dengan memperhitungkan adanya kelompok karboksilat dan komposisi yang berbeda dari kesetimbangan *counter ion* pada kulit jeruk.

Pada pH netral *counter ion* utama pada kulit jeruk siam adalah Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} . Pada saat pH menurun, maka ion-ion proton menggantikan ion-ion ini. Hal ini menyebabkan terjadinya gaya tolak elektrostatis antara ion-ion dengan proton. Ketika pH meningkat, ion-ion tersebut terendapkan dan ion-ion menggantikan posisi dari *counter ion* tersebut (Cordero *et al.* 2004).

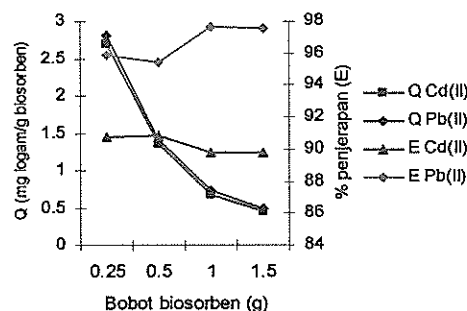
Ketergantungan pH pada biosorpsi Cd(II) dan Pb(II) sangat erat hubungannya dengan keadaan ionik kelompok gugus fungsi yang terkandung dalam dinding sel kulit jeruk siam, terutama gugus karboksilat dari pektin. Dapat diasumsikan bahwa kadmium dan timbal berada dalam bentuk ion bebas Cd^{2+} dan Pb^{2+} pada $\text{pH} < 8$ dan keadaan ionik kelompok fungsional karboksilat memiliki pKa sekitar 3.5. Hal ini sangat menentukan biosorpsi kadmium dan timbal dalam variasi pH yang dipelajari (Cordero *et al.* 2004). Pada saat nilai pH lebih rendah dari pKa, kelompok karboksilat membatasi terikatnya Cd(II) dan Pb(II) pada dinding sel, karena gugus fungsi karboksilat berada dalam bentuk gugus COOH, sehingga penjerapan Cd(II) dan Pb(II) menjadi rendah, sebagai hasil dari gaya tolak elektrostatis antara gugus karboksilat dan ion-ion logam berat. Pengaruh ini lebih kuat pada pH yang lebih rendah lagi. Tetapi, pada saat pH lebih tinggi dari nilai pKa, kelompok karboksilat berada dalam bentuk gugus COO^- yang membawa muatan negatif, sehingga terjadi gaya tarik elektrostatis antara gugus fungsi karboksilat dengan ion-ion logam berat, menyebabkan kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II) mengalami peningkatan (Cordero *et al.* 2004). Pada penelitian ini, terjadi penurunan kapasitas biosorpsi setelah titik optimum, karena pada $\text{pH} > 5.5$ dan $\text{pH} > 6$ ion-ion Pb(II) dan Cd(II) yang terlarut mengendap menjadi $\text{X}(\text{OH})_2$ dan tidak ikut terjerap, sehingga

kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan kedua ion logam berat mengalami penurunan.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, (Lampiran 5 dan 11), kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan optimum untuk Pb(II) terjadi pada pH 5.5, yaitu 0.7127 (mg /g biosorben) dan 95.13% (mg /g biosorben). Kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan optimum Cd(II), terjadi pada pH 6, yaitu 0.7239 (mg /g biosorben) dan 96.60%. pH 6 dan pH 5.5. pH tersebut dipilih untuk menentukan pengaruh parameter lain pada biosorpsi Cd(II) dan Pb(II).

Pengaruh Bobot Biosorben

Pengaruh bobot biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II) menggunakan kulit jeruk siam dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan kapasitas biosorpsi seiring dengan berkurangnya bobot biosorben, dan terjadi peningkatan persentase penjerapan Pb(II) dan Cd(II) seiring dengan bertambahnya bobot biosorben. Hal ini dikuatkan oleh Barros (2003) yang menyatakan bahwa pada saat ada sebuah peningkatan bobot biosorben, maka ada peningkatan persentase penjerapan dan penurunan kapasitas biosorpsi.



Gambar 5 Pengaruh bobot biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd (II) dan Pb(II).

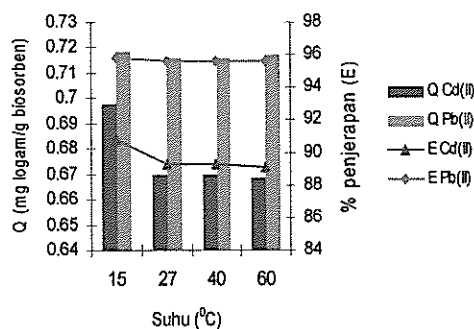
Berdasarkan data yang diperoleh (Lampiran 8 dan 14), dapat dilihat bahwa peningkatan bobot biosorben memberikan pengaruh pada persentase penjerapan Cd(II) dan Pb(II). Persentase penjerapan optimum untuk Cd(II) diperoleh pada bobot biosorben 0.25-0.5 g, yaitu sebesar 90.86%, sedangkan untuk Pb(II) persentase penjerapan optimum terjadi pada bobot biosorben 1.0 g, yaitu sebesar 97.66%. Untuk bobot yang sama, yaitu pada 0.25 g dapat dibandingkan

persentase penjerapan untuk kedua logam berat menunjukkan bahwa persentase penjerapan $Pb(II) > Cd(II)$ dengan nilai 95.86% dan 91.93%. Kapasitas biosorpsi menunjukkan hasil yang berlawanan, yaitu $Pb(II) < Cd(II)$ dengan nilai masing-masing 2.8129 (mg /g biosorben) dan 2.7056 (mg /g biosorben).

Pengaruh Suhu

Pengaruh suhu terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan $Cd(II)$ dan $Pb(II)$ menggunakan kulit jeruk siam dapat dilihat pada Gambar 6. Studi literatur menunjukkan bahwa untuk yang sama, yaitu $Pb(II)$ dan $Cd(II)$ tidak ada pengaruh suhu yang jelas terhadap proses biosorpsi. Martin *et al.*, Aksu dan Kutsal (1991), serta Ajmal *et al.* (2003), melaporkan peningkatan kapasitas biosorpsi seiring dengan meningkatnya suhu, sedangkan Cruz *et al.* (2004) dan Aksu (2004) menemukan penurunan kapasitas biosorpsi seiring dengan meningkatnya suhu. Hal ini dapat dijelaskan bahwa untuk sistem logam berat-biomaterial yang berbeda ditemukan perilaku yang berbeda dan bahkan berlawanan.

Walaupun pengaruh suhu ini tidak begitu jelas, tetapi parameter ini tetap harus diperhitungkan karena kenyataannya, kulit jeruk siam yang digunakan sebagai biosorben hanya efektif menjerap kedua pada suhu 15°C, dan pada aplikasinya harus dikondisikan dengan suhu limbah yang dihasilkan oleh industri.



Gambar 6 Pengaruh suhu terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan $Pb(II)$ dan $Cd(II)$

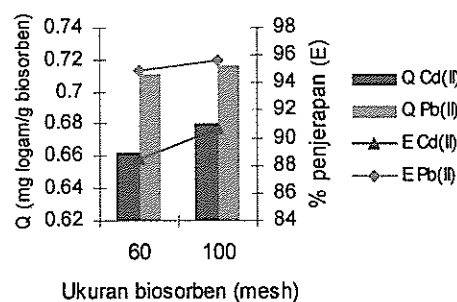
Berdasarkan hasil percobaan (Lampiran 7 dan 13), menunjukkan bahwa kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan timbal menggunakan kulit jeruk siam cenderung stabil seiring dengan meningkatnya suhu.

Kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan $Cd(II)$ cenderung menurun seiring dengan meningkatnya suhu. Pada suhu 15°C diperoleh bahwa persentase penjerapan $Pb(II) > Cd(II)$, yaitu 95.80% dan 90.80%. Kapasitas biosorpsi $Pb(II) > Cd(II)$ dengan nilai 0.7183 (mg /g biosorben) dan 0.3809 (mg /g biosorben).

Pengaruh Ukuran Biosorben

Pengaruh ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan $Cd(II)$ dan $Pb(II)$ menggunakan kulit jeruk siam dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan data yang diperoleh (Lampiran 9 dan 15), menunjukkan bahwa ukuran biosorben memberikan pengaruh pada proses biosorpsi $Cd(II)$ dan $Pb(II)$. Proses biosorpsi kedua menggunakan dua ukuran, yaitu 60 dan 100 mesh. Ukuran tersebut memiliki ketebalan yang sama disebabkan oleh standar penyaringan yang hanya menghasilkan ukuran panjang dan lebar saja (ukuran yang menentukan jauhnya difusi) (Cossich *et al.* 1998).

Berdasarkan Gambar 7, ukuran biosorben 100 mesh lebih efisien menjerap kedua dibandingkan dengan ukuran 60 mesh karena semakin kecil ukuran partikel per satuan volume biosorben, maka semakin luas permukaannya, sehingga ion-ion akan lebih banyak terjerap pada permukaan biosorben tersebut. Volesky dan Kuyucak (1988) serta Yang dan Volesky (1998) melaporkan bahwa ukuran biosorben yang lebih kecil dapat menjerap lebih banyak seperti pada penjerapan kadmium, nikel, timbal, dan zink.



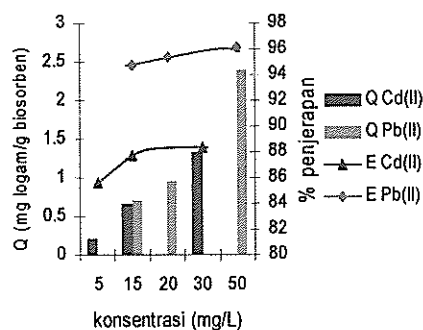
Gambar 7 Pengaruh ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan $Cd(II)$ dan $Pb(II)$.

Perbandingan persentase penjerapan $Pb(II)$ dan $Cd(II)$ menggunakan ukuran 100 mesh menunjukkan bahwa persentase penjerapan $Pb(II) > Cd(II)$, yaitu 95.60% dan 90.66%.

Kapasitas biosorpsi Pb(II)>Cd(II) dengan nilai masing-masing 0.7170 (mg /g biosorben) dan 0.6800 (mg /g biosorben).

Pengaruh Konsentrasi Pb(II) dan Cd(II)

Pengaruh konsentrasi Cd(II) dan Pb(II) sintetik pada proses biosorpsi menggunakan kulit jeruk siam dapat dilihat pada Gambar 8. Berdasarkan Gambar 8, peningkatan konsentrasi logam berat menyebabkan terjadinya peningkatan kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan logam berat. Hasil yang sama dilaporkan oleh Al-Garni (2005), Cordero *et al.* (2004), serta Horsfall dan Spiff (2005). Terjadinya peningkatan persentase penyerapan logam berat dan kapasitas biosorpsi seiring dengan meningkatnya konsentrasi larutan logam berat disebabkan oleh meningkatnya interaksi elektrostatis dengan melibatkan salah satu bagian dari ion-ion logam berat (Al-Asheh dan Duvnjak 1995; Puranik dan Pakniker 1999).



Gambar 8 Pengaruh konsentrasi Pb(II) dan Cd(II) terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan.

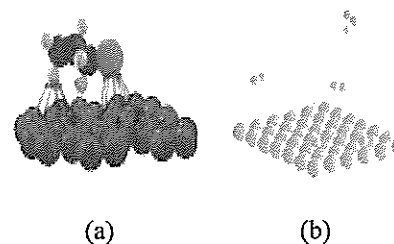
Pencirian biosorpsi ion-ion logam berat menunjukkan bahwa kejenuhan permukaan biosorben tergantung pada konsentrasi ion-ion logam berat tersebut. Pada konsentrasi yang rendah biosorben menyerap lebih banyak ion logam berat yang tersedia dengan cepat. Sementara, pada konsentrasi yang tinggi ion-ion logam berat tersebar pada seluruh permukaan biosorben melalui difusi intrapartikel dan hidrolisis ion secara besar-besaran dengan kecepatan yang lebih rendah. Pada penelitian ini, semua konsentrasi yang dipelajari belum menyebabkan permukaan biosorben jenuh.

Kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan kedua dapat dibandingkan pada konsentrasi 15 ppm. Kapasitas biosorpsi dan

persentase penyerapan Pb(II)>Cd(II). Besarnya kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan Pb(II) adalah 0.7109 dan 94.80% (mg /g biosorben) (Lampiran 6 dan 12), sedangkan kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan Cd(II) adalah 0.6579 (mg/g biosorben) dan 87.73%.

Isoterm Adsorpsi

Tipe isoterm adsorpsi dapat digunakan untuk mempelajari mekanisme biosorpsi kedua logam berat. Adsorpsi fase padat-cair pada umumnya menganut tipe isoterm Freundlich dan Langmuir (Atkins 1999). Ikatan yang terjadi antara molekul adsorbat dengan permukaan biosorben dapat terjadi secara fisisorpsi dan kimisorpsi. Fisisorpsi adalah adsorpsi yang hanya melibatkan gaya intermolekul (ikatan van der Waals) dan tidak dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan orbital elektronik, sementara kimisorpsi adalah adsorpsi yang terjadi melalui ikatan kimia yang sangat kuat antara sisi aktif permukaan dengan molekul adsorbat dan dipengaruhi oleh densitas elektron (IUPAC 1997). Perbandingan antara kimisorpsi dan fisisorpsi dapat dilihat pada Lampiran 18.

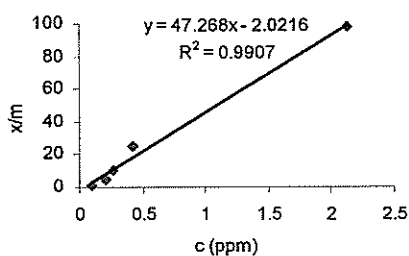


Gambar 9 Biosorpsi oleh biosorben dengan mekanisme fisisorpsi (a) dan mekanisme kimisorpsi (b) (Willis 2006).

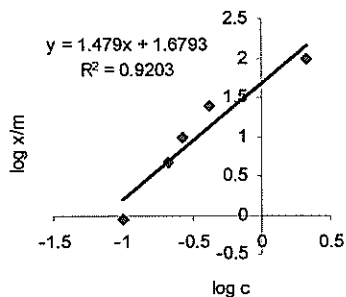
Biosorpsi berlangsung secara kimisorpsi satu lapisan jika tipe isoterm yang dianut adalah isoterm Langmuir. Jika isoterm yang dianut adalah isoterm Freundlich maka biosorpsi terjadi secara fisisorpsi banyak lapisan (Fourest dan Volesky 1996). Adsorpsi satu lapisan terjadi karena ikatan kimia biasanya bersifat spesifik, sehingga permukaan biosorben mampu mengikat ion dengan ikatan kimia. Pada mekanisme fisisorpsi, selain terjadi ikatan antara ion logam berat dengan biosorben, juga memungkinkan terjadinya ikatan antar ion logam berat yang terdapat dalam larutan

ataupun limbah. Ikatan yang terjadi hanyalah ikatan van der Waals, sehingga ikatannya lemah.

Kurva regresi linier untuk tipe isoterm Freundlich dan Langmuir menggunakan data konsentrasi awal logam berat, konsentrasi terjerap, dan bobot biosorben (Lampiran 16 dan 17). Isoterm adsorpsi Cd(II) tipe Langmuir dan Freundlich diperlihatkan pada Gambar 16–17. Isoterm adsorpsi Pb(II) tipe Langmuir dan Freundlich diperlihatkan pada Gambar 18-19. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua kurva adalah linier. Hal ini disebabkan oleh terdapatnya banyak gugus kimia yang reaktif pada permukaan biosorben (kulit jeruk siam) dan dapat mendukung terjadinya proses biosorpsi.



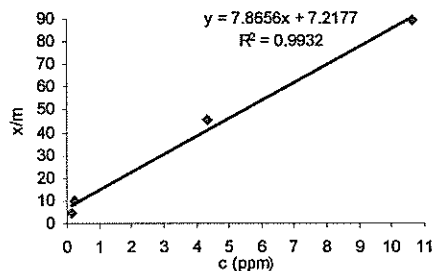
Gambar 10 Isoterm Langmuir biosorpsi Cd(II).



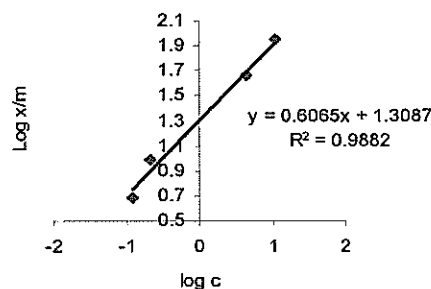
Gambar 11 Isoterm Freundlich biosorpsi Cd(II).

Linieritas kedua tipe isoterm pada biosorpsi Cd(II) menunjukkan linieritas yang tinggi, yaitu 99.07% untuk isoterm Langmuir dan 92.03% untuk isoterm Freundlich. Fakta ini menunjukkan bahwa kedua tipe isoterm terjadi pada proses biosorpsi untuk Cd(II). Jika dibandingkan linieritas kedua tipe isoterm adsorpsi tersebut, dapat dilihat ternyata linieritas isoterm adsorpsi tipe Langmuir lebih tinggi dibandingkan dengan isoterm Freundlich. Mekanisme biosorpsi Cd(II) dapat dinyatakan lebih dominan terjadi secara kimisorpsi dibandingkan dengan

fisisorpsi. Oleh karena itu, isoterm adsorpsi Cd(II) tipe Langmuir lebih baik digunakan untuk mencirikan mekanisme biosorpsi larutan Cd(II) (Lampiran 16).



Gambar 12 Isoterm Langmuir biosorpsi Pb(II).



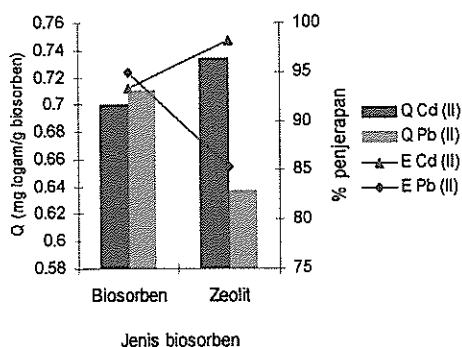
Gambar 13 Isoterm Freundlich biosorpsi Pb(II).

Hasil yang sama diperoleh pada isoterm adsorpsi Pb(II), kedua tipe isoterm menunjukkan linieritas yang tinggi, yaitu 99.32% untuk isoterm Langmuir dan 98.82% untuk isoterm Freundlich. Dengan melihat linieritas kedua tipe isoterm adsorpsi tersebut, ternyata linieritas isoterm Langmuir lebih tinggi dibandingkan dengan isoterm Freundlich, sehingga mekanisme kimisorpsi lebih dominan dibandingkan dengan mekanisme fisisorpsi untuk proses biosorpsi larutan Pb(II) (Lampiran 17). Hasil penelitian ini dikuatkan oleh Hussein *et al.* (2004) yang menyatakan bahwa dengan nilai linieritas 90%, dapat dinyatakan bahwa kedua tipe isoterm adsorpsi terjadi pada proses biosorpsi kedua logam berat.

Perbandingan Biosorben dengan Adsorben Komersial

Kulit jeruk siam sebagai adsorben yang potensial perlu diuji kemampuannya dalam menyerap Pb(II) dan Cd(II) dengan cara membandingkannya dengan adsorben komersil (dalam penelitian ini digunakan zeolit). Zeolit yang digunakan adalah zeolit alam yang berasal dari Cikotok-Bandung. Kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan digunakan sebagai faktor pembanding. Perbandingan antara biosorben dan adsorben komersil terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan kadmium dan timbal menggunakan kulit jeruk siam dapat dilihat pada Gambar 14.

Semua parameter biosorpsi untuk kedua jenis adsorben diperlakukan sama, yaitu konsentrasi awal larutan Pb(II) dan Cd(II) adalah 15 ppm, pH larutan Pb(II) dan Cd(II) adalah 5.05 dan 5.85, menggunakan suhu ruangan (30°C), bobot adsorben 1 g, dan ukuran adsorben 60 mesh. Waktu kontak yang digunakan untuk kedua jenis adsorben adalah 120 menit. Kapasitas biosorpsi Pb(II) dengan menggunakan biosorben lebih tinggi hasilnya, yaitu 0.7100 (mg /g biosorben) dibandingkan dengan zeolit dengan nilai 0.6373 (mg /g biosorben). Begitu juga dengan persentase penyerapannya, biosorben lebih mampu menyerap Pb(II) sampai 94.80%, sedangkan zeolit hanya 85.40% (Lampiran 20). Hasil ini disebabkan oleh adanya mekanisme adsorpsi yang melibatkan pertukaran ion dan pembentukan kompleks. Hasil yang sama dilaporkan oleh Krishnan dan Annirudhan (2003).

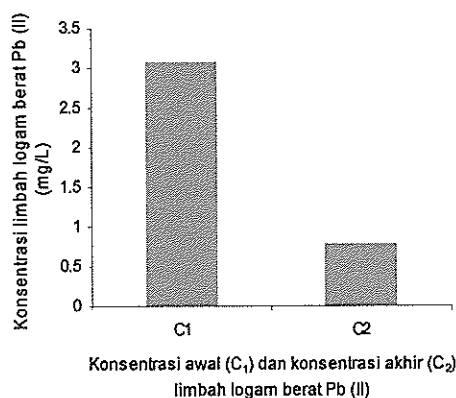


Gambar 14 Perbandingan kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan logam berat Cd(II) dan Pb(II) oleh zeolit dan biosorben.

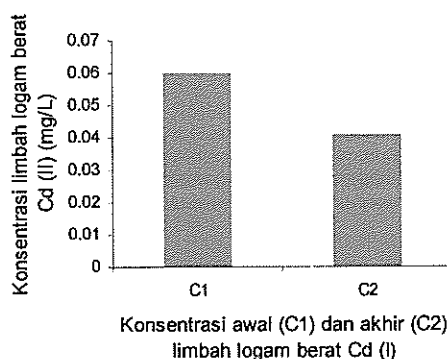
Untuk Cd(II), persentase penyerapan zeolit sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan biosorben, yaitu 98.20%, sedangkan biosorben 93.40%. Kemampuan zeolit dalam menyerap Cd(II) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan biosorben. Kapasitas biosorpsi untuk zeolit dan biosorben adalah 0.7345 (mg /g biosorben) dan 0.7002 (mg /g biosorben) (Lampiran 19). Walaupun demikian, nilai persentase penyerapan Cd(II) yang mencapai 93.40% tersebut cukup untuk membuktikan bahwa kulit jeruk siam memiliki potensi untuk dijadikan sebagai penyerap logam berat.

Biosorpsi Pb(II) dan Cd(II) dari Limbah Pabrik Aki

Proses biosorpsi telah diujikan pada limbah aki (Lampiran 21). Konsentrasi awal untuk Cd(II) dan Pb(II) adalah 0.06 mg/l dan 3.086 mg/l. Setelah dijerap dengan kulit jeruk, konsentrasi Pb(II) dan Cd(II) berkurang menjadi 0.796 dan 0.041 ppm.



Gambar 15 Konsentrasi limbah Pb(II) dari pabrik aki setelah dijerap oleh kulit jeruk siam.



Gambar 16 Konsentrasi limbah Cd(II) dari pabrik aki setelah dijerap oleh kulit jeruk siam.

Gambar 15 dan 16 menunjukkan bahwa kulit jeruk siam dapat menyerap Pb(II) dengan baik. Persentase penyerapan dan kapasitas biosorpsi limbah Pb(II) berturut-turut adalah 74.21% dan 0.1144 (mg /g biosorben). Hal ini menunjukkan bahwa kulit jeruk siam tidak hanya baik untuk menyerap larutan Pb(II) tunggal, tetapi baik juga pada campuran logam berat. Pb(II) mampu berkompetisi dengan logam berat yang lain untuk berikatan dengan molekul-molekul yang terkandung dalam kulit jeruk. Sebaliknya, kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan limbah Cd(II) sangat kecil yaitu 0.0009 (mg /g biosorben) dan 31.66%. Kulit jeruk siam tidak terlalu baik dalam menyerap Cd(II) pada konsentrasi kurang dari 1 ppm. Aplikasi ini menunjukkan bahwa kulit jeruk siam merupakan biosorben yang potensial untuk menurunkan konsentrasi limbah pada skala industri, terutama untuk limbah Pb(II).

Secara umum, dari keseluruhan parameter yang diujikan, ternyata kulit jeruk siam memiliki kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan yang lebih tinggi terhadap Pb(II) daripada Cd(II). Ada beberapa hal yang mempengaruhi kondisi ini, di antaranya adalah jari-jari ion atau ukuran ion, serta afinitas elektron. Jika dibandingkan, Pb(II) memiliki ukuran ion yang lebih besar daripada Cd(II), polaritasnya lebih besar, sehingga lebih mudah untuk membentuk ikatan dengan molekul biosorben. Begitupula dengan kemampuan Pb(II) untuk menarik elektron dari molekul biosorben lebih besar daripada Cd(II).

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kulit jeruk siam merupakan biosorben yang potensial untuk mengatasi pencemaran Pb(II) dan Cd(II). Kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan kedua meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi larutan logam berat, ukuran biosorben dan pH. Biosorpsi Pb(II) stabil pada semua suhu yang dipelajari, sedangkan biosorpsi Cd(II) tidak stabil. Kapasitas biosorpsi meningkat seiring dengan berkurangnya bobot biosorben, dan persentase penyerapannya meningkat seiring dengan meningkatnya bobot biosorben.

Waktu kontak optimum untuk kedua terjadi pada waktu 120 menit. Ukuran biosorben 100 mesh merupakan ukuran

terbaik untuk kedua logam berat. Kondisi optimum untuk Pb(II) diperoleh dengan nilai pH 5.5, bobot biosorben optimum 0.5 g. Kondisi optimum untuk Cd(II) diperoleh pada pH 6, bobot biosorben 0.25 g. Biosorpsi Cd(II) dipengaruhi oleh suhu, sedangkan biosorpsi Pb(II) relatif stabil pada semua suhu yang dipelajari.

Kedua tipe isoterm adsorpsi, yaitu Freundlich dan Langmuir terjadi pada proses biosorpsi Pb(II) dan Cd(II) menggunakan kulit jeruk siam. Linieritas isoterm adsorpsi Langmuir lebih besar dibandingkan dengan isoterm Freundlich untuk kedua logam berat, sehingga mekanisme isoterm adsorpsi lebih dominan terjadi secara kimisorpsi. Nilai linieritas isoterm Langmuir untuk Cd(II) dan Pb(II) masing-masing adalah 99.07% dan 99.32%. Isoterm adsorpsi Freundlich untuk Cd(II) dan Pb(II) adalah 92.03% dan 98.82%.

Proses biosorpsi Pb(II) dengan menggunakan biosorben lebih efektif dibandingkan dengan zeolit, sedangkan proses biosorpsi Cd(II) lebih efektif menggunakan zeolit. Proses biosorpsi menggunakan kulit jeruk siam lebih efektif menyerap Pb(II) dibandingkan dengan Cd(II). Kulit jeruk siam dapat menyerap Pb(II) dan Cd(II) dari limbah pabrik aki dengan nilai persentase penyerapan 74.21% dan 31.66%.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, maka tahapan selanjutnya yang perlu dilakukan adalah mempelajari pengaruh termodinamika terhadap proses biosorpsi Pb(II) dan Cd(II), seperti energi aktivasi, entalpi, entropi, dan energi bebas Gibbs. Kulit jeruk siam yang digunakan masih bersifat alami, oleh karena itu perlu memodifikasinya secara fisika atau kimia, sehingga kapasitas biosorpsi dan persentase penyerapan kedua logam berat dapat ditingkatkan. Cd(II) dan Pb(II) yang telah terjerap oleh biosorben dilanjutkan dengan proses desorpsi sehingga dapat dimanfaatkan kembali.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajmal M, Rao RAK, Anwar S, Ahmad J, Ahmad R. 2003. *Bioresour Technol* 86: 147.
- Aksu Z, Kutsal T. 2004. Biosorption of cadmium. *J Chem Tech Biotechnol* 52: 109.

- Al-Asheh S, Duvnjak Z. 1995. Adsorption of copper and chromium by *Aspergillus carbonarius*. *Biotechnol Prog* 11:638-642.
- Al-Garni SM. 2005. Biosorption of lead by Gram capsulated and non-capsulated bacteria. Saudi Arabia: Biological Science Department, King Abdulaziz University.
- Anggaraningrum IT. 1996. Model adsorpsi ion kompleks koordinasi nikel (II) pada permukaan alumina [tesis]. Jakarta: Magister Sains Ilmu Kimia, Universitas Indonesia.
- Atkin PW. 1999. *Kimia Fisika* Jilid 2. Ed ke-4. Jakarta: Erlangga.
- Barkhordar B, Ghiaseddin. 2004. Comparison of Langmuir and Freundlich Equilibrium in Cr, Cu, and Ni adsorption by *Sargassum*. *Iran J Environ Health Sci Eng* 2: 277-282.
- Barros LM. 2003. Biosorption of cadmium using the fungus *aspergillus niger*. *Braz J Chem Eng* 20:3.
- Cabuk A, Ilhan S, Filik C, Caliscan F. 2005. Pb^{2+} biosorption by pretreated fungal biomass. *Turk J Biol* 29: 23-28.
- Ceribasi IH, Yetis U. 2001. Biosorption of Ni(II) and Pb(II) by *Phanerochaete chrysosporium* from binary metal system kinetics. Turkey: Environmental Engineering Department, Middle East Technical University.
- Cordero B, Lodeiro P, Herrero R, Vicente MES. 2004. Biosorption of cadmium by *Fucus spiralis*. *Environ Chem* 1: 180-187.
- Cossich ES, Tevares CRG, Ravagnani TMK. 2003. Colombo: Departamento de Engenharia Quimica.
- Cruz CCV, Costa ACA, Henrique CA, Luna AS. 2004. Biosorption of cadmium. *Bioresour Technol* 91: 249.
- Darmono. 1995. *Dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*. Jakarta: UI-Press.
- Dirjen Bina Produksi Hortikultura. 2005. Kajian umum tentang pertanaman jeruk. <http://www.lppbuah.asp.htm>. [14 Juni 2005].
- Fitriani V. 2003. Ekstraksi dan karakterisasi pektin dari kulit jeruk siam lemon (*Citrus medica* var Lemon) [skripsi]. Bogor: Fakultas Teknologi Pertanian, IPB.
- Fourest E, Volesky B. 1996. Contribution of sulfonate groups and alginate to science and technology. Canada: McGill University 30: 277-282.
- Gadd GM. 1998. *Biotechnology* vol 6. pp: 401-433.
- Gaikwad RW. 2004. Removal of Cd(II) from aqueous solution by activated charcoal derived from coconut shell. India: Department of Chemical Engineering, Pravara Rural Engineering College.
- Hadi B, Margaritis A, Berruti F, Bergougnou M. 2003. Kinetics and equilibrium of cadmium biosorption by yeast cells *S. cerevisiae* and *K. fragilis*. *Int J Chem Reac Eng* 1: A47
- Horsfall M, Spiff AI. 2005. Effect of metal ion concentration on the biosorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} by *Caladium bicolor* (wild cocoyam). *Afr J Biotechnol* 4: 191-196.
- Hussein H, Ibrahim SF, Kandeel K, Moawad H. 2004. Biosorption of heavy metal from waste water using *Pseudomonas sp.* *Elec J Biotechnol* 7:1
- IUPAC. 1997. Chemisorption. http://www.iupac.org/reports/2001/colloid_2001/manual_of_s_and_t/node_10.html [18 Jan 2006].
- Jason PP. 2004. Activated carbon and some application for the remediation of soil and groundwater pollution. http://www.cee.vt.edu/program_areas. [8 Jun 2004].
- Kapoor A, Viraraghavan T. 1995. Fungal biosorption-an alternative treatment option for heavy metal bearing waste water: a review. *Bioresour Technol* 53:3.
- Krishnan, Anirudhan TS. 2003. Removal of cadmium (Cd) from aqueous solution by steam activated sulphurised carbon prepared from sugar-cane bagasse pith: Kinetics and equilibrium studies. India: Department of Chemistry, University of Kerala.
- Marshall WE, Mitchell MJ. 1996. Agriculture by-product as metal adsorbent: Sorption properties and resistance to mechanical abrasion. *J Chem Technol Biotechnol* 66:192-198.
- Martins RJE, Pardo R, Boaventura. 2004. Biosorption of cadmium. *Water Res* 38: 693.
- Puranik PR, Pakniker KM. 1999. Biosorption of lead and zinc from solution using *Streptovorticillium cinnamoneum* waste biomass. *J Biotechnol* 55:113-124.
- Saeni MS. 1989. *Kimia Lingkungan*. Bogor: Pusat studi Ilmu Hayat, IPB.
- Scheckel KG, Sparks DL. 2001. Temperature effect on nickel sorption kinetics at the mineral-water interface. *Soil Sci Soc Am J* 65: 719-782.
- Sihombing M. 2003. Jeruk bermutu makin diminati. <http://www.SitusHijau.co.id>. [14 Jun 2005].

- Suhendrayatna. 2001. Heavy Metal Bioremoval by Microorganism: A Literature Study. Japan: Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Kagoshima University.
- Viera RHSF, Volesky B. 2000. Biosorption a solution to pollution. *Int Microbiol* 3: 17-24.
- Volesky B, Kuyucak N. 1988. Biosorbent for gold. US Patent No. 4,769,2333.
- Volesky B, Holan ZR. 1995. Biosorption of heavy metal. *Biotechnol Prog* 11: 235-50.
- Volesky B. 2004. Biosorption of Heavy metal. <http://lifebiosorption.co.uk>. [14 Jun 2005].
- Volesky B, Naja G. 2004. Biosorption: Application Strategies. Canada: Department of Chemical Engineering, McGill University.
- Widle, Beneman. 1993. Binding of heavy metal ions by chemically modified biomass. *Biotech Adv* 11:781-812
- Yan G, Viraraghavan T. 2000. Effect of pretreatment on bioadsorption of heavy metals on *Mocur rouxii*. Canada: Faculty of Engineering, University of Regina.
- Yang J and Volesky B. 1998. Cadmium biosorption rate in protonate *Sargassum* biomass. Canada: Department of Chemical Engineering, McGill University.

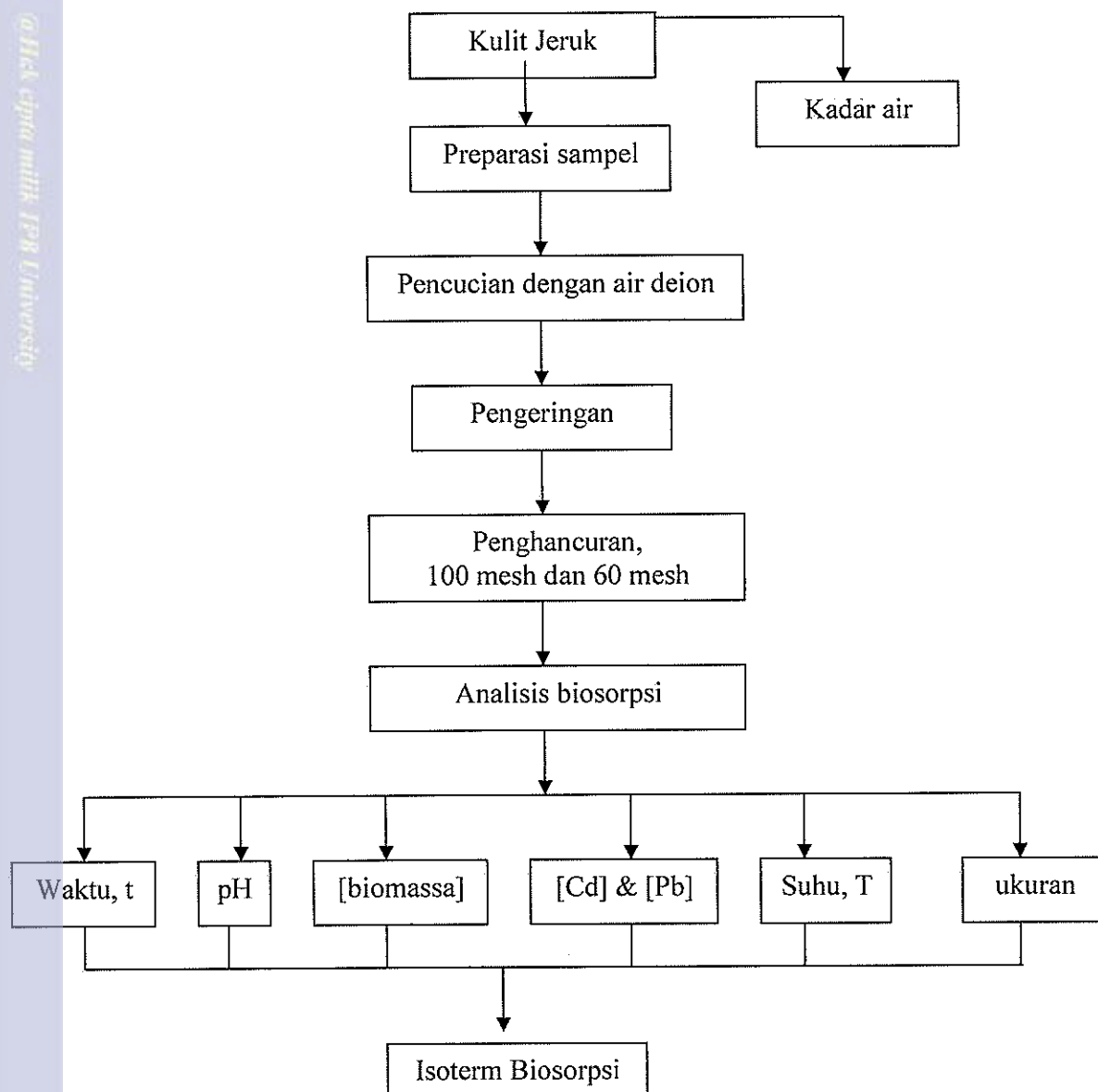


Hal Cipta (Hak Cipta) Unsur-unsur:

1. Diambil sebagai subjek atau objek karya yang merupakan unsur dan merupakan sumber ;
- a. Kegiatan berupa karya intelektual, seni, sastra, musik, pertunjukan karya ilmiah, penemuan, laporan, penemuan karya atau tulisan yang terdapat ;
- b. Kegiatan tidak termasuk ke dalam karya yang terdapat IPB University ;
2. Dianggap menggunakan dan memperbanyak sebagai atau sebagai karya tulis yang dalam bentuk apapun terdapat oleh IPB University ;

LAMPIRAN

Lampiran 1 Bagan alir penelitian



Lampiran 2 Jenis-jenis logam berat dan sumbernya di alam

Unsur	Lambang	Sumber
Antimon	Sb	Stibrit (Sb_2S_3), Sumber panas bumi, drainase tambang
Arsenik	As	Logam beratarsenida dan arsenat, arsenoprit, arsenit
Berilium	Be	($HasO_2$)
Kadmium	Cd	Beril ($Be_3Al_2SiO_6$), fenasit (Be_2SiO_4)
Kromium	Cr	Zink karbonat, tembaga karbonat, dan bijih besi
Merkuri	Hg	Kromit (Fe_2Cr_2O), krom Oksida (Cr_2O_3)
Nikel	Ni	Merkuri bebas (Hg), sinabar (HgS)
Perak	Ag	Mineral besi magnesia, besi sulfida, nikel oksida, pentladid, ($[Fe_2Ni]_9S_8$), nikel hidroksida ($Ni(OH)_3$)
Selena	Se	Perak bebas (Ag), perak klorida, argentida (Ag_2S), tembaga, timbal, bijih seng
Tembaga	Cu	Selenium bebas (Se), feroselit ($FeSe_2$), deposit uranium, deposit kalkoprit-pentladid-pirotit
Talium	Tl	Tembaga bebas (Cu), tembaga sulfida, kalkoprit ($CuFeS_2$)
Timbal	Pb	Residu tembaga, timbal dan perak
Seng	Zn	Galena (PbS)
		Seng sulfida, willemit ($ZnSiO_4$), kalamit ($ZnCO_3$), drainase tambang

Lampiran 3 Kadar air kulit jeruk siam

Ulangan	Bobot sampel (gram)			Kadar air (%)
	Bobot basah	Bobot kering 1	Bobot kering 2	
1	1.0568	0.3379	0.3324	68.54%
2	1.0604	0.3356	0.3283	68.98%
3	1.0276	0.3051	0.3029	64.97%

Lampiran 4 Waktu biosorpsi optimum Cd(II)

t (menit)	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
60	1.0005	15	1.58	0.6703	89.44
80	1.0000	15	1.55	0.6718	89.66
120	1.0005	15	0.99	0.7002	93.40
180	1.0005	15	1.26	0.6865	91.60
210	1.0007	15	1.43	0.6772	90.46

Lampiran 5 Pengaruh pH terhadap kapasitas dan persentase penjerapan Cd(II)

pH	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g n)	Penjerapan logam berat(%)
5.0	1.0004	15	1.44	0.6777	90.40
5.5	1.0011	15	0.66	0.7164	95.60
6.0	1.0017	15	0.51	0.7239	96.60
6.5	1.0000	15	1.04	0.6980	93.06

Lampiran 6 Pengaruh konsentrasi Cd(II) terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan

C ₁ (ppm)	m (gram)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
5	1.0001	0.73	0.2137	85.60
15	1.0001	1.84	0.6579	87.73
30	1.0001	3.49	1.3239	88.36

Lampiran 7 Pengaruh suhu terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)

T (°C)	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
15	1.0003	15	1.38	0.6980	90.80
27	1.0020	15	1.60	0.6697	89.33
40	1.0016	15	1.60	0.6695	89.33
60	1.0006	15	1.63	0.6685	89.13

Lampiran 8 Pengaruh bobot biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)

m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
0.25	15	1.38	2.7056	90.80
0.50	15	1.37	1.3630	90.86
1.00	15	1.53	0.6732	89.80
1.50	15	1.53	0.4482	89.80

Lampiran 9 Pengaruh ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Cd(II)

Ukuran (mesh)	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
60	1.0000	15	1.74	0.6630	88.40
100	1.0000	15	1.40	0.6800	90.66

Lampiran 10 Waktu biosorpsi Pb(II)

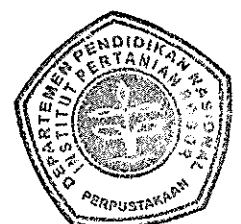
t (menit)	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
60	1.0005	15	0.79	0.7101	94.73
80	1.0000	15	0.80	0.7100	94.66
120	1.0005	15	0.69	0.7151	95.40
180	1.0005	15	0.80	0.7100	94.66
210	1.0007	15	0.80	0.7100	94.66

Lampiran 11 Pengaruh pH terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II)

pH	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Pebjerapan logam (%)
5.0	1.0004	15	0.82	0.7087	94.53
5.5	1.0011	15	0.73	0.7127	95.13
6.0	1.0017	15	0.84	0.7068	94.40
6.5	1.0000	15	0.96	0.7020	93.60

Lampiran 12 Pengaruh konsentrasi Pb(II) terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan

C ₁ (ppm)	m (gram)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
15	1.0001	0.78	0.7109	94.80
20	1.0001	0.92	0.9539	95.40
50	1.0001	1.94	2.4020	96.12



Lampiran 13 Pengaruh suhu terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II)

T (°C)	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
15	1.0003	15	0.63	0.7183	95.80
27	1.0020	15	0.65	0.7161	95.66
40	1.0016	15	0.66	0.7159	95.60
60	1.0006	15	0.65	0.7171	95.66

Lampiran 14 Pengaruh bobot biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II)

m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
0.25	15	0.62	2.8129	95.86
0.50	15	0.68	1.4133	95.46
1.00	15	0.35	0.7324	97.66
1.50	15	0.36	0.4850	97.60

Lampiran 15 Pengaruh ukuran biosorben terhadap kapasitas biosorpsi dan persentase Penjerapan Pb(II)

Ukuran (mesh)	m (gram)	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
60	1.0000	15	0.77	0.7115	94.86
100	1.0000	15	0.66	0.7170	95.60

Lampiran 16 Isoterm Langmuir dan Freundlich untuk biosorpsi Cd(II) menggunakan kulit jeruk siam

No	C ₁ (ppm)	C ₂ * (ppm)	bobot Biosorben* (g)	Isoterm Langmuir			Isoterm Freunlich	
				c	x*	x/m	log c	logx/m
1	0							
2	1	0.10	1.0002	0.10	0.9000	0.8998	-1.0000	-0.0458
3	5	0.21	1.0003	0.21	4.7900	4.7885	-0.6777	0.6802
4	10	0.27	1.0002	0.27	9.7300	9.7280	-0.5686	0.9880
5	25	0.42	1.0002	0.42	24.5800	24.5750	-0.3767	1.3905
6	50	0.58	1.0003	0.58	49.4200	49.4051	-0.2365	1.6937
7	100	2.13	1.0002	2.13	97.8700	97.8504	0.3289	1.9905

* C₂ digunakan sebagai variabel c pada rumus Isoterm Langmuir dan Freundlich

Bobot biosorben digunakan sebagai variabel m pada rumus Isoterm Langmuir dan Freundlich

$$\text{Nilai } x = C_1 - C_2$$

Persamaan garis Isoterm Langmuir yang diperoleh $y = 47.268x - 2.0216 +$ dengan $r^2 = 99.07\%$, maka dari persamaan $c/(x/m) = 1/(\alpha.\beta) + (1/\alpha)c$ diperoleh nilai $\alpha = 0.0211$ dan $\beta = 23.4435$

Persamaan garis Isoterm Freundlich yang diperoleh $y = 1.479x + 1.6793$ dengan $r^2 = 92.03\%$, maka dari persamaan $\log x/m = \text{Log } k + 1/n \log c$ diperoleh nilai $k = 47.78$ dan $n = 0.6761$

Lampiran 17 Isoterm Langmuir dan Freundlich untuk biosorpsi Pb(II) menggunakan kulit jeruk siam

No	C ₁ (ppm)	C ₂ * (ppm)	bobot Biosorben* (g)	Isoterm Langmuir			Isoterm Freundlich	
				c	x*	x/m	log c	logx/m
1	0							-
2	1	0.05	1.0000	0.05	0.9500	0.9500	-1.3010	0.0222
3	5	0.12	1.0005	0.12	4.8800	4.8775	-0.9208	0.6882
4	10	0.22	1.0000	0.22	9.7800	9.7800	-0.6575	0.9903
5	25	0.47	1.0004	0.47	24.5300	24.5200	-0.3279	1.3893
6	50	4.36	1.0002	4.36	45.6400	45.63	0.6395	1.6592
7	100	10.65	1.0003	10.65	89.35	89.32	1.0273	1.9509

* C₂ digunakan sebagai variabel c pada rumus Isoterm Langmuir dan Freundlich

Bobot biosorben digunakan sebagai variabel m pada rumus Isoterm Langmuir dan Freundlich

$$\text{Nilai } x = C_1 - C_2$$

Persamaan garis Isoterm Langmuir yang diperoleh $y = 7.8656x + 7.2177$ dengan $r^2 = 99.32\%$, maka dari persamaan $c/(x/m) = 1/(\alpha\beta) + (1/\alpha)c$ diperoleh nilai $\alpha = 0.1271$ dan $\beta = 1.0900$

Persamaan garis Isoterm Freundlich yang diperoleh $y = 1.3087 + 0.6065x$ dengan $r^2 = 98.82\%$, maka dari persamaan $\log x/m = \text{Log } k + 1/n \log c$ diperoleh nilai $k = 20.35$ dan $n = 1.6488$

Lampiran 18 Perbedaan mekanisme adsorpsi fisisorpsi dan kimisorpsi

	Kimisorpsi	Fisorpsi
Jarak suhu	Tidak terbatas (tetapi untuk molekul tertentu adsorpsinya lebih efektif pada jarak suhu yang kecil)	Dibawah atau mendekati titik kondensasi gas (seperti Xe < 100 K, CO ₂ < 200 K)
Entalpi adsorpsi	Berhubungan dengan kekuatan ikatan kimia Biasanya 40-800 KJmol ⁻¹	Berhubungan dengan beberapa faktor seperti bobot molekul dan polaritas, biasanya 5-40 KJmol ⁻¹
Spesifisitas Kristalografi (Variasi antara permukaan yang berbeda dari kristal yang sama)	Bervariasi	Khusus untuk permukaan geometri atom
Adsorpsi alami	Seringnya disosiatif dan biasanya irreversibel	Non-disosiatif dan reversibel
Pengambilan sampai tingkat jenuh	Terbatas pada monolayer	Multilayer
Kinetika Adsorpsi	Sangat berubah-berubah, lebih sering berupa proses teraktivasi	Cepat, berupa proses non-aktivasi

Lampiran 19 Perbandingan antara biosorben dengan adsorben komersial terhadap persentase penjerapan dan kapasitas biosorpsi Cd(II)

Jenis adsorben	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
Biosrben	15	0.99	0.7002	93.40
Zeolit	15	0.27	0.7345	98.20

Lampiran 20 Perbandingan antara biosorben dengan adsorben komersial terhadap persentase penjerapan logam berat dan kapasitas biosorpsi Pb(II)

Jenis adsorben	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
Biosrben	15	0.78	0.7109	95
Zeolit	15	2.19	0.6373	85.40

Lampiran 21 Kapasitas biosorpsi dan persentase penjerapan Pb(II) dan Cd(II) dari limbah pabrik aki

Limbah logam berat	C ₁ (ppm)	C ₂ (ppm)	Q (mg/g)	Penjerapan logam (%)
Cd(II)	0.060	0.041	0.0009	31.66
Pb(II)	3.086	0.796	0.1144	74.21