

BIOREMOVAL KADMIUM PADA BAKTERI FOTOSINTETIK ANOKSIGENIK (BFA): KARAKTERISTIK PENYERAPAN PADA SEL

Nina Hermayani Sadi*, Tri Widiyanto* & Agus Taufik**

ABSTRAK

Bakteri fotosintetik anoksigenik (BFA) telah dimanfaatkan untuk mengatasi pencemaran air akibat limbah organik dan H₂S. BFA juga diketahui mampu menurunkan ion tembaga (Cu²⁺) hingga 36-76%. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik penyerapan ion logam kadmium (Cd²⁺) dalam sel BFA serta daya penyisihan kadmium. Tiga isolat BFA asal perairan tambak dan estuarin dibiakkan dalam medium cair Sea Water Complete (SWC) 50% yang mengandung 1mg/L ion Cd²⁺. Setelah diinkubasi selama fasa pertumbuhannya, kadar logam kadmium dalam sel utuh, bagian dinding sel, dan sitoplasma sel dianalisis dengan atomic absorption spectrophotometer (AAS). Selain itu dilakukan juga analisis kadar logam kadmium pada medium sebelum dan sesudah inkubasi untuk mengetahui penurunan konsentrasi kadmium. Kandungan kadmium tertinggi ditemukan dalam sel Naga 2 (0,057% bk), berturut-turut diikuti oleh Lp Psr (0,051% bk), dan IR3 (0,013% bk). Pada isolat Naga 2 dan Lp Psr kadmium lebih banyak terakumulasi dalam sitoplasma, sedangkan pada isolat IR3 kandungan kadmiumnya didala sitoplasma hanya sedikit lebih tinggi dari dinding sel. Penurunan konsentrasi kadmium terbesar terjadi pada isolat Lp Psr yaitu sebesar 96,79%, diikuti oleh IR3 (58,99%), dan Naga2 (44,99%).

Kata Kunci : bioremoval, kadmium, bakteri fotosintetik anoksigenik, akumulasi, adsorpsi

ABSTRACT

CADMIUM BIOREMOVAL OF ANOXYGENIC PHOTOSYNTHETIC BACTERIA (APB): ABSORPTION CHARACTERISTIC WITHIN CELL.

Anoxygenic photosynthetic bacteria (APB) has been used to eliminate organic pollutants and H₂S from water environment. APB also has been recognized for their ability to remove Cu²⁺ up to about 36-76%. The objectives of this research was to study the characteristic of Cd²⁺-sorption in APB's cell as well as the capacity of the bacterial cells to remove cadmium. Three APB's isolates from shrimp hatchery and estuarine water were incubated in sea water complete medium (SWC) 50% that contains 1mg Cd²⁺/L. After incubation up to its eksponential phase, cadmium content in whole cell, cytoplasm, and cell's wall were analyzed using atomic absorption spectrophotometer (AAS). Concentration of cadmium in the medium was analyzed before and after incubation to calculate the reduction of cadmium concentration. The highest cadmium content was found in Naga2's cell (0.057% dw), followed by Lp Psr (0.051% dw), dan IR3 (0.013% dw) respectively. In Naga2 isolate and Lp Psr isolate, cadmium tended to accumulate in their cytoplasm, but in IR3 isolate cadmium content in its cytoplasm was only a slightly higher than in the cell's wall . The highest reduction of cadmium concentration from medium was in Lp Psr (96.79%), then followed by IR3 (58.99%), and Naga2 (44.99%).

Key words: bioremoval, cadmium, anoxygenic photosynthetic bacteria, accumulation, absorption

* Staf Peneliti Puslit Limnologi-LIPI

** F-MIPA Universitas Pakuan Bogor

PENDAHULUAN

Kadmium (Cd) adalah logam berat yang berbahaya bagi makhluk hidup. Widle & Benemann (1993) dalam Suryahendratna (2001) menyatakan bahwa kadmium bersama-sama timbale (Pb) dan merkuri (Hg) merupakan logam berat yang memiliki tingkat bahaya tinggi terhadap kesehatan manusia. Kadmium memiliki sifat sulfofilik dengan afinitas terhadap gugus sulfohidril yang cukup tinggi, sehingga meningkatkan kelarutannya dalam lemak, akumulasi dalam sel, dan toksis terhadap organisme. Dalam lingkungan perairan, toksisitas kadmium dipengaruhi oleh pH dan kesadahan. Selain itu keberadaan seng (Zn) dan timbal dapat meningkatkan toksisitas kadmium (Effendi, 2003). Konsentrasi logam tersebut yang melebihi batas normal menyebabkan gangguan, bahkan pada tingkat lanjut dapat menimbulkan kematian. Darmono (1995) melaporkan bahwa kadmium dapat menghambat perkembangan ovarium ikan mas (*Cyprinus carpio*).

Salah satu metoda untuk mengatasi pencemaran kadmium di perairan adalah bioremoval. Bioremoval didefinisikan sebagai terakumulasi dan terkonsentrasinya zat polutan dari suatu cairan oleh material biologis seperti bakteri, jamur, dan alga. Material biologis ini, melalui proses *recovery*, dapat dibuang dan bersifat ramah lingkungan (Suryahendratna, 2001). Material biologis yang digunakan pada proses bioremoval dapat berupa organisme alami atau hasil rekayasa (Gadd, 1992). Bioremoval dapat diaplikasikan dalam menyisihkan logam berat dari perairan karena material biologis diketahui dapat menyerap logam berat dalam jumlah besar (Gazsó, 2001). *Citrobacter* sp, *Scenedesmus obliquus*, dan *Saccharomyces cerevisiae* telah diketahui memiliki kemampuan dalam mengatasi pencemaran air oleh kadmium melalui proses bioremoval (Gadd, 1992).

Menurut Gadd (1990) pengambilan logam berat oleh mikroba terjadi dalam dua

fasa. Fasa pertama adalah pengikatan atau adsorpsi pada dinding sel atau permukaan luar lainnya. Fasa ini tidak bergantung pada metabolisme sel (*metabolism-independent binding*). Fasa selanjutnya adalah transport ke dalam sel mikroba yang tergantung pada metabolisme sel (*metabolism-dependent transport*). Dalam beberapa kasus, pengambilan secara intraseluler boleh jadi merupakan hasil dari meningkatnya permeabilitas sel sebagai akibat dari munculnya toksisitas logam. Oleh karena itu seringkali ditemukan pada bakteri yang sensitif-logam tingkat akumulasinya lebih tinggi dari bakteri tahan logam. Rendahnya akumulasi logam pada bakteri tahan logam salah satunya disebabkan oleh kemampuan bakteri tersebut untuk mengekskresikan logam ke luar sel melalui sistem *ion efflux*, sementara bakteri sensitif-logam tidak memiliki sistem itu (Nies, 1995). Walaupun demikian pada bakteri resistan dapat pula terjadi tingkat akumulasi yang tinggi, tetapi hal ini disebabkan oleh mekanisme lain seperti kompartementalisasi dalam organel sel (Gadd, 1990). Penelitian yang dilakukan Sani, *et al.* (2001) terhadap bakteri pereduksi sulfat *Desulfovibrio desulfuricans* G20 mendapatkan bahwa resistensi bakteri ini terhadap ion Zn^{2+} dan Pb^{2+} tidak menurunkan integritas membran sel.

Proses adsorpsi ion logam disebabkan oleh pengikatan secara non spesifik pada protein dan polisakarida yang terdapat di permukaan sel (Gazso, 2001). *Zoogloea* sp, alga, dan fungi memproduksi sejumlah besar polisakarida ekstrasel yang memiliki sifat anionik. Sifat anionik ini merupakan biosorben bagi kation-kation logam (Gaad, 1990). Selain itu lapisan dinding sel bakteri gram positif yang tebal kaya akan atom oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Atom-atom ini berfungsi sebagai atom donor pasangan elektron dalam pembentukan khelat dengan atom logam. Walau demikian, beberapa bakteri gram negatif diketahui memiliki kapasitas penyerapan yang tinggi. Leung, *et al.* (2001)

mendapatkan bahwa bakteri gram negatif *Pseudomonas pseudoalcaligenes* memiliki kapasitas biosorpsi tertinggi diantara 12 isolat bakteri (terdiri dari bakteri gram positif dan gram negatif) yang diisolasi dari lumpur aktif. *P. pseudoalcaligenes* mampu menyerap timbal sebanyak 27,17% dari berat kering sel, sedangkan seng diserap sebanyak 4,68% dari berat kering sel.

Sejumlah senyawa organik hasil metabolisme sel memegang peran penting dalam penyisihan ion logam karena dapat berperan sebagai pengkelat ion logam. Asam sitrat yang dihasilkan *Citrobacter* sp. dan asam oksalat yang dihasilkan oleh beberapa jenis fungi (Gadd, 1990) merupakan pengkelat logam yang efisien. Asam sitrat dan asam oksalat selanjutnya akan mengendapkan logam di sekitar dinding sel dan medium eksternal.

Bioakumulasi logam dalam sel dapat terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan mikroorganisme. Beberapa logam berat diketahui masuk ke dalam intrasel dengan menggunakan jalur transport untuk logam lain yang bersifat esensial (Nies & Silver, 1995; Gadd, 1990). Kadmium ditransport melalui sistem pengambilan magnesium pada bakteri gram-negatif *Alcaligenes eutrophus*, tetapi pada bakteri gram positif *Staphylococcus aureus* kadmium masuk melalui sistem pengambilan logam mangan (Nies & Silver, 1995).

Bakteri diketahui memiliki tiga sistem yang berbeda untuk pengambilan Mg^{2+} yaitu MgtAB, Cor A, dan MgtE. Jenis MgtAB paling sedikit ditemukan dan keberadaannya sebagian besar ditemukan pada enterobakter dan beberapa bakteri gram negatif. Sebaliknya sistem CorA dan MgtE merupakan sistem pengambilan magnesium yang tersebar luas pada berbagai jenis bakteri (Papp & Maguire, 2004). Studi yang dilakukan Silver (1969) menunjukkan pengambilan magnesium pada *E. coli* merupakan suatu transpor aktif yang dipengaruhi oleh suhu. Hasil studi kinetika

yang dilakukan oleh Nies & Silver (1989) menunjukkan bahwa 1 mM Mg^{2+} mampu menghambat pengambilan Cd^{2+} (konsentrasi dalam medium 1 uM Cd^{2+}) pada *Alcaligenes eutrophus*. Bila konsentrasi Mg^{2+} diturunkan menjadi 100 uM, kadmium yang diserap naik tujuh kali lipat, sedangkan penurunan Mg^{2+} pada konsentrasi 10 uM menaikkan penyerapan kadmium hingga 20 kali lipat. Nies & Silver (1989) menyimpulkan Mg^{2+} merupakan inhibitor kompetitif bagi Cd^{2+} dengan rata-rata konstanta inhibisi (K_i) sebesar 13 ± 9 uM Mg^{2+} . Hal ini mengindikasikan kadmium masuk ke dalam sel *A. eutrophus* dengan menggunakan sistem pengambilan yang sama dengan sistem pengambilan Mg^{2+} .

Sejumlah besar spesies bakteri dilaporkan memiliki dua tipe sistem pengambilan mangan dengan afinitas yang tinggi, yaitu Sit dan MntH (Runyen-Janecky, *et al.*, 2006). Tipe pertama, yaitu MntH, adalah suatu protein pembawa kation divalent yang bersifat *proton-dependent*. MntH terdapat pada membran sitoplasma (Kehres, *et al.* & Makui, *et al.* dalam Runyen-Janecky, *et al.*, 2006). Protein MntH bakteri homolog dengan keluarga protein NRAMP (*natural-resistance-associated macrophage protein*) yang membawa Mn^{2+} dan Fe^{2+} pada organisme eukariotik (Cellier, *et al.* dalam Runyen-Janecky, *et al.*, 2006). Tipe kedua sistem pembawa mangan adalah protein Sit, yaitu suatu protein jenis *ATP-binding cassette* (ABC). Sistem Sit terdiri atas protein periplasma pengikat ligan (di bakteri gram negatif) atau lipoprotein (di bakteri gram positif), dua membran-permease sitoplasma, dan dua subunit protein membran sitoplasma peripheral dengan *ATP binding motifs* (Clavery, *et al.*, 2001). Studi vesikel membran *S. aureus* yang dilakukan Perry & Silver (1982) menunjukkan bahwa pengambilan Cd^{2+} terjadi melalui sistem transpor mangan yang digerakan oleh potensial listrik membran. Mn^{2+} dan Cd^{2+} saling menghambat transportnya ke dalam

sel secara kompetitif dengan nilai K_m masing-masing sebesar $0.95 \mu\text{M Mn}^{2+}$ and $0.2 \mu\text{M Cd}^{2+}$ (Perry & Silver, 1982).

Saat ini bakteri fotosintetik anoksigenik (BFA) telah banyak digunakan sebagai agen biokondisioner di perairan budidaya seperti pada tambak udang windu, khususnya untuk mengatasi H_2S , karena bakteri ini memanfaatkan H_2S sebagai sumber elektron pada proses metabolisme foto-autotrofnya. Oleh karena itu aktifitas fotosintesis BFA tidak menghasilkan oksigen pada akhir proses. Dalam kaitannya dengan bioremoval, berdasarkan hasil penelitian Widiyanto, *et al.* (1998) beberapa isolat bakteri fotosintetik anoksigenik (BFA) dapat hidup pada medium yang mengandung Cu^{2+} sebesar $1,5 \text{ mg/L}$ dan mampu menurunkan konsentrasi ion Cu^{2+} sekitar 36-76%. Daya tahan terhadap Cu^{2+} ini lebih besar dari ikan trout dan siput *Hydrobia* sp. (Widiyanto, *et al.*, 1998). Kemampuan isolat BFA menyisihkan logam Cu^{2+} memungkinkan isolat tersebut dimanfaatkan untuk menyisihkan logam berat berbahaya seperti kadmium dari perairan budidaya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis distribusi kadmium pada sel BFA serta mengetahui kemampuan isolat BFA dalam menyisihkan ion Cd^{2+} .

BAHAN DAN METODE

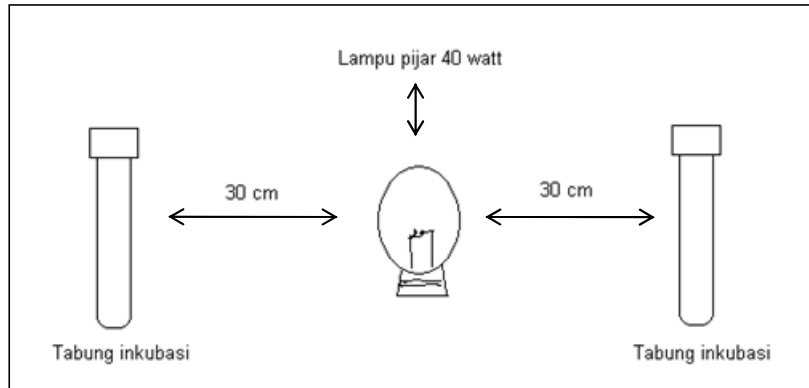
Penelitian ini menggunakan tiga isolat BFA dengan kode Naga 2, Lp Psr, dan IR3 yang diisolasi dari perairan pesisir. Ketiga isolat tersebut yang berumur empat hari dengan nilai *optical density* (OD) satu, dibiakkan dalam medium cair SWC 50% yang mengandung $1 \text{ mg Cd}^{2+}/\text{L}$ (perbandingan volume medium dan isolat = 50:1) dengan tiga ulangan. Kondisi inkubasi dapat dilihat pada Gambar 1. Setiap isolat diinkubasikan hingga fasa pertumbuhan optimumnya tercapai. Fasa pertumbuhan

optimum ditentukan dari kurva pertumbuhan masing-masing bakteri, dimana fasa pertumbuhan optimum adalah saat OD tiap kultur bakteri mencapai setengah dari OD tertinggi (Gambar 2). Selanjutnya dilakukan analisis kandungan kadmium total dalam sel, kandungan pada dinding sel dan sitoplasma, dan jumlah kadmium yang disisihkan dari medium.

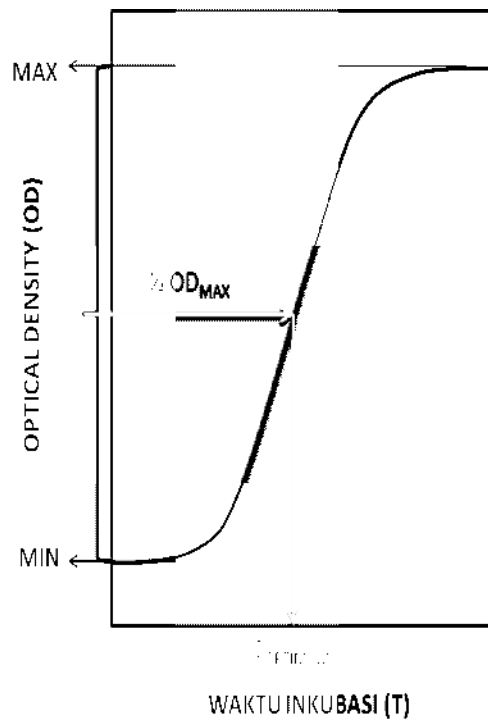
Analisis kandungan kadmium total dalam sel dilakukan dengan mendestruksi sel kering bakteri (oven, 60°C) dalam larutan HNO_3 13% (gr/mL) dalam autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit. Sel bakteri didapatkan dengan penyaringan dalam membran filter selulosa-nitrat ukuran pori $0,45 \mu$. Merk Whatmann kadar logam hasil destruksi dianalisis dengan AAS (*Atomie Absorption Spectrophotometer*) merk Hitachi model Z-6100 dengan kondisi analitik seperti yang tertera pada Tabel 1.

Kandungan kadmium dalam dinding sel bakteri dianalisis dengan mengekstrak pelet bakteri dari 10 mL kultur ke dalam 12 mL EDTA 5 mM (pH 8,0). Tabung berisi pelet ditutup dan direndam dalam wadah yang berisi es batu selama 15 menit. Kemudian disentrifus pada kecepatan 5000 rpm selama 10 menit dan supernatan dipisahkan dari pelet bakteri. Kandungan logam dalam supernatan langsung dianalisis dengan AAS merk Hitachi model Z6100 pada kondisi analitik seperti tertera dalam Tabel 1.

Di samping itu juga dilakukan penetapan kadar berat kering sel bakteri dalam suspensi. Kadar berat kering sel bakteri dianalisis dengan menyaring kultur bakteri pada membran filter selulosa nitrat yang telah diketahui bobotnya. Sel bakteri yang tertahan di membran selanjutnya dicuci dengan akuades dan dikeringkan pada suhu 70°C selama 24 jam. Membran yang telah kering ditimbang dan bobot kering bakteri dalam kultur dihitung.



Gambar 1. Posisi Tabung Inkubasi Terhadap Lampu Pijar



Gambar 2. Penentuan Fasa Optimum Pertumbuhan dari Kurva Pertumbuhan

Tabel 1. Kondisi Analisis Logam Kadmium pada *Atomic Absorption Spectrofotometer* Model Polarized Zeeman Z-6100

Lamp current	7,5 mA
Wavelength	228,8 nm
Width of slith	1,3 nm
Burner head	Standard type
Burner height	50 mm
Flame	Air-C ₂ H ₂
Oxidant gas pressure (flow rate)	160 kPa (15,0 l/min)
Fuel gas pressure (flow rate)	6 kPa (2,0 l/min)

Kandungan logam pada sitoplasma bakteri dianalisis melalui perhitungan yaitu kadar kadmium dalam sel total dikurangi kadar kadmium di permukaan sel.

Kemampuan penyisihan kadmium diketahui dengan menganalisis kadar kadmium dalam medium sebelum dan setelah inkubasi. Medium disaring dengan filter jenis selulosa-nitrat berukuran pori 0,45 μm lalu didestruksi dengan HNO_3 pekat. Hasil destruksi diencerkan dengan air bebas mineral dan dianalisis dengan AAS. Analisis kandungan logam dalam medium tanpa bakteri (blanko) juga dilakukan dengan metoda yang sama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari ketiga isolat uji diketahui bahwa kandungan Cd pada sitoplasma isolat Naga2 dan Lp Psr lebih tinggi dari kandungan Cd di dinding selnya, sedangkan kandungan Cd pada sitoplasma IR3 hanya sedikit lebih tinggi dibandingkan kandungan Cd pada dinding selnya (Gambar 3). Perbedaan pola penyerapan ion logam pada ketiga isolat BFA ini diduga dipengaruhi oleh perbedaan komposisi dinding sel BFA, walaupun ketiga isolat ini merupakan bakteri gram negatif. Isolat BFA yang digunakan pada penelitian ini diduga berasal dari jenis bakteri yang berbeda bila dilihat dari bentuk dan warna koloninya, sehingga akan terdapat perbedaan komposisi dinding sel. Menurut Gupta, *et al.* (2000), perbedaan komposisi dinding sel antar-kelompok maupun intra-kelompok mikroorganisme akan menghasilkan perbedaan yang nyata dalam jenis ikatan dan jumlah logam yang diikatnya.

Perbedaan tingkat adsorpsi ion logam bahkan dapat terjadi pada bakteri sejenis dengan strain yang berbeda seperti yang dilaporkan oleh Kaewchai & Prasertsan (2002). Mereka melaporkan bahwa pada pH 7 sel kering *Bacillus subtilis* WD 90 dapat mengadsorpsi kadmium lebih besar (1,40%) dari *Bacillus subtilis* SM 29

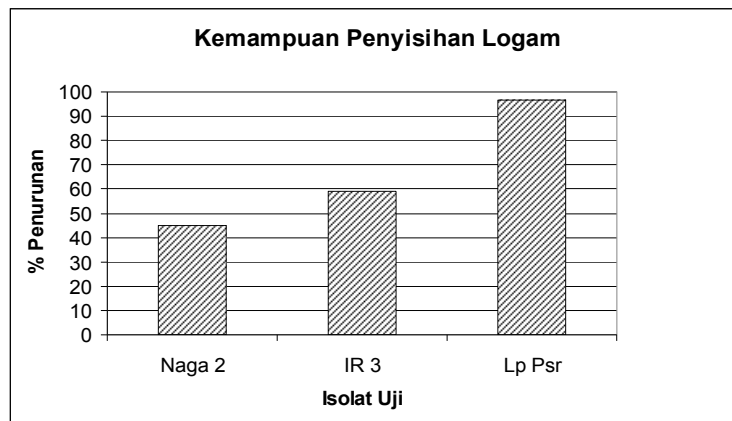
(1,33%). Menurut Gazso (2001) proses adsorpsi ion logam salah satunya disebabkan oleh pengikatan ion logam secara non spesifik pada protein dan polisakarida yang terdapat di permukaan sel. Penelitian pendahuluan mereka menunjukkan bahwa kedua bakteri merupakan bakteri gram positif dan penghasil polimer asam poliglutamat. Rendahnya tingkat adsorpsi kadmium pada *B. subtilis* SM 29 diduga berkaitan dengan rendahnya jumlah asam poliglutamat yang mampu dihasilkan strain ini. *B. subtilis* SM 29 menghasilkan polimer asam poliglutamat sebesar 54,45 g/L sedangkan strain *B. subtilis* WD 90 menghasilkan polimer 55,27 g/L.

Tingkat penyisihan ion Cd^{2+} dari medium pada ketiga isolat BFA (Gambar 4) bila dibandingkan dengan beberapa mikroorganisme yang lazim digunakan pada proses *bioremoval* kadmium ternyata jauh lebih rendah. Bakteri *Citrobacter* sp. dapat menyerap kadmium hingga 13,5% dari berat kering (% bk) sel, bahkan *Zooglea* sp. dapat menyerap hingga 40% bk (Gadd, 1992). Rendahnya penyerapan ion Cd^{2+} diduga berkaitan dengan struktur dinding sel isolat BFA terpilih dan komposisi medium; yaitu: I) BFA termasuk ke dalam kelompok bakteri gram negatif. Bakteri gram negatif memiliki dinding sel yang relatif lebih tipis dan dihalangi oleh membran luar bakteri. Akibatnya kapasitas pengikatan logam pada permukaan bakteri gram negatif tidak sebesar bakteri gram positif; II) Medium yang digunakan pada penelitian ini adalah medium cair Sea Water Complete 50% dengan kadar air laut sebanyak 75% agar dicapai salinitas yang diinginkan (15 – 20 permil). Kandungan ion Mg^{2+} dan Ca^{2+} yang tinggi dalam air laut diduga berperan dalam menahan laju masuknya ion Cd^{2+} ke dalam sel. Hasil studi kinetika yang dilakukan oleh Nies & Silver (1989) menunjukkan bahwa 1 mM Mg^{2+} mampu menghambat pengambilan Cd^{2+} (konsentrasi dalam medium 1 μM Cd^{2+}) pada *Alcaligenes eutrophus*. Sementara Gadd (1990)

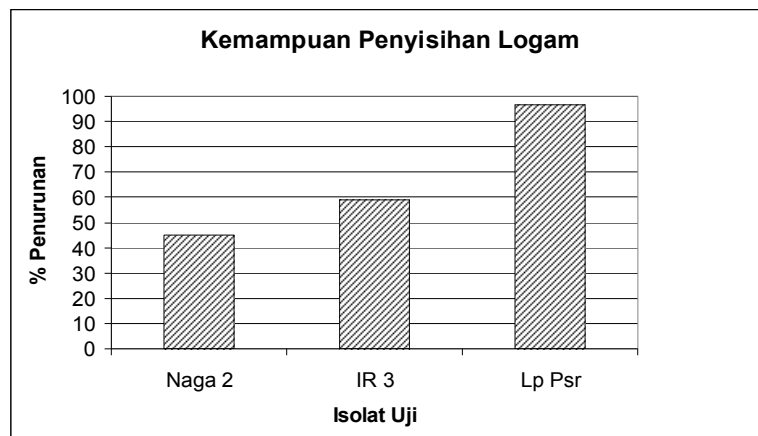
melaporkan bahwa kalsium dapat menurunkan laju masuknya ion Cd^{2+} pada kamir. Menurut Gadd (1990) dan Lau & Waihung (2003), kehadiran logam saingan dalam medium mempengaruhi kapasitas penyerapan logam pada sel. Lau & Waihung (2003) melaporkan bahwa penyerapan logam pada bakteri gram negatif akan turun bila konsentrasi logam saingan meningkat.

Daya penyisihan kadmium dari medium pada ketiga isolat bervariasi. Penyisihan tertinggi terjadi pada isolat Lp Psr, diikuti berturut-turut oleh IR3, dan Naga2 (Gambar 4). Hal ini bertolak belakang dengan jumlah kadmium yang diakumulasi oleh tiap isolat dimana isolat

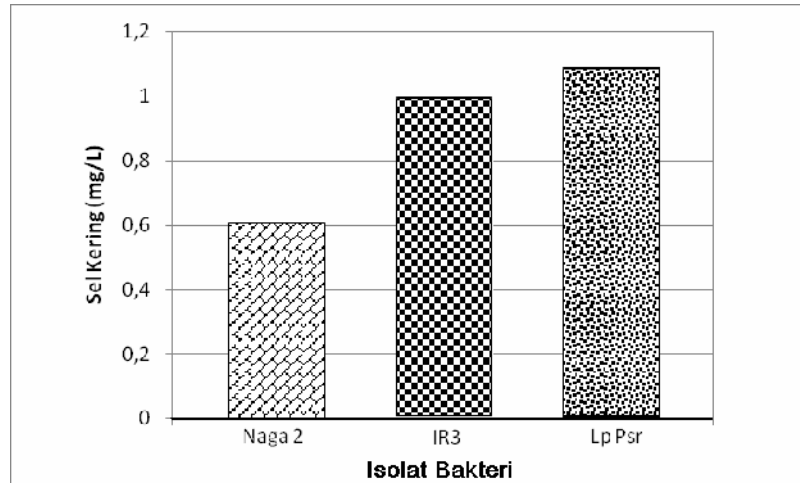
Naga2 mengandung kadmium total lebih besar (Gambar 3). Diduga hal ini berkaitan dengan jumlah biomassa yang diproduksi (Gambar 5). Isolat Lp Psr dan IR3 memproduksi biomassa lebih banyak dari isolat Naga2. Oleh karena itu jumlah total kadmium yang disisihkan dari medium menjadi lebih banyak walaupun tiap sel hanya mampu menyerap kadmium dalam jumlah kecil. Lau & Waihung (2003) dan Suryahendratna (2001) mengemukakan bahwa konsentrasi biomassa mempengaruhi proses penyisihan ion logam. Jumlah logam yang diserap akan lebih besar bila konsentrasi biomassa lebih tinggi (Lau & Waihung, 2003).



Gambar 3. Grafik Kemampuan Penyisihan Cd^{2+} dari Medium



Gambar 4. Grafik Kemampuan Penyisihan Cd^{2+} dari Medium



Gambar 5. Produksi Biomassa Sel Kering BFA

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian mengenai karakteristik penyerapan ion Cd^{2+} pada bakteri fotosintetik anoksigenik (BFA) terpilih adalah sebagai berikut:

1. Isolat Lp Psr memiliki kemampuan penyisihan ion Cd^{2+} paling tinggi dari tiga isolat yang diuji karena isolat ini mampu memproduksi biomassa lebih banyak.
2. Kadar kadmium total pada sel bakteri tertinggi terdapat dalam isolat Naga2 yaitu sebesar 0,057% dari berat kering sel (%bk), diikuti Lp Psr (0,051% bk) dan IR3 (0,013% bk).
3. Kadmium yang terakumulasi dalam sitoplasma isolat Naga2 (0,32% bk) lebih besar dari yang teradsorpsi pada dinding sel (0,025% b.k). Kadmium yang terakumulasi dalam Lp Psr (0,041% bk) juga lebih besar dari yang teradsorpsi (0,010% bk). Sedangkan pada isolat IR3 kadmium yang terakumulasi dalam sitoplasma (0,007% bk) hampir setara dengan kadmium yang teradsorpsi pada dinding sel (0,006% bk).

PUSTAKA

- Anton, A., C. Große, J. Reißmann, T. Pribyl, & D.H. Nies. 1999. CzcD is a heavy metal ion transporter involved in regulation of heavy metal resistance in *Ralstonia* sp. strain CH34. *J. Bact.* 181 (22): 6876- 6881.
- Darmono, 1995, *Logam Dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*, Penerbit Universitas Indonesia (UI-Press), Jakarta, Indonesia.
- Effendi, H., 2003, *Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan*, Penerbit Kanisius, Yogyakarta, Indonesia.
- Gadd, G.M., 1990, Metal tolerance, *Microbiology of Extreme Environment* (Editor: C. Edwards), 179 – 207.
- Gazsó, L. G., 2001, The key microbial process in the removal of toxic metals and radionuclides from the environment, *CEJOEM*, Vol 7. Nos. 3-4: 178 – 185.
- Gupta, R., P. Ahuja, S. Khan, R. K. Saxena, & H. Mohapatra, 2000, Microbial biosorbents: meeting challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions, *Current Science*, 78 (8): 967 – 973.

- Kaewchai, S. & P. Prasertsan, 2002, Biosorption of heavy metal by thermotolerant polymer-producing bacterial cells and the bioflocculant, *Songklanakarinn J. Sci. Technol*, 24 (3): 421 – 430.
- Lau, M. N. & L. Waihung, 2003, A Surface Complexation Models for Competitive Biosorption of Metal Cation Onto a Gram Negative Bacterium, *Abstract in The 10th Symposium on Chemistry Postgraduate Research in Hong Kong*, 22nd March 2003, Hong Kong Baptist University, Hong Kong.
- Leung, C.W., H. Chua, & W. Lo, 2001, Biosorption of heavy metals by bacteria isolated from activated sludge, *Appl. Biochem Biotechnol*, 171-84: 91 – 93 .
- Nies, D. H. 1995. The Cobalt, Zinc, and Cadmium Efflux System CzcABC from *Alcaligenes eutrophus* Functions as a Cation-Proton Antiporter in *Escherichia coli*. *J. Bact.* Vol. 177 (10): 2707 – 2712.
- Nies, D. H. & S. Silver. 1989. Metal ion uptake by a plasmid-free metal sensitive *Alcaligenes eutrophus* strain. *J. Bact.* Vol. 171 (7); 4073 – 4075.
- Nies, D.H. & S. Silver, 1995, Ion efflux systems involved in bacterial metal resistances, *Journal of Industrial Microbiology*, Vol. 14: 186 – 199.
- Papp, K. M. & M.E. Maguire. 2004. The CorA Mg²⁺ transporter does not transport Fe²⁺. *J. Bact.* Vol. 186 (22): 7653 – 7658.
- Perry, R. & S. Silver. 1982. Cadmium and manganese transport in *Staphylococcus aureus* membrane vesicles. *J. Bact.* Vol. 150 (2): 973-976.
- Runyen-Janecky, L., E. Dzenski, S. Hawkins, & L. Warner. 2006. Role and regulation of the Shigella flexneri Sit and MntH systems. *Infection And Immunity*. Vol. 74 (8): 4666–4672
- Silver, S. 1969. Active transport of magnesium in *Escherichia coli*. *Microb.* Vol. 62: 764-771.
- Suryahendratna, 2001, *Bioremoval logam berat dengan menggunakan mikroorganisme*, *Makalah Seminar on-Air Bioteknologi untuk Indonesia Abad 21*, 1 – 14 Februari 2001, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Jepang.
- Widiyanto, T., J. Sudarso, & M. Badjoeri, 1998, Ujicoba pendahuluan kemampuan bakteri fotosintetik anoksigenik dalam menyisihkan logam berat tembaga, *Hasil-Hasil Penelitian Puslitbang Limnologi Tahun 1997/1998*, Puslitbang Limnologi LIPI, Bogor, 441 – 445.