

## BIOREMEDIASI LIMBAH MERKURI DENGAN MENGGUNAKAN MIKROBA PADA LINGKUNGAN YANG TERCEMAR

Yani Suryani

### Abstrak

Merkuri merupakan salah satu jenis polutan yang bersifat toksik. Merkuri menimbulkan masalah serius bagi kesehatan manusia, seperti bioaccumulation merkuri dalam otak dan ginjal pada akhirnya mengarah pada penyakit neurologis. Baik tanaman maupun bakteri merupakan agens biologi penting yang dapat digunakan untuk bioremediasi, maka beberapa tahun terakhir ini bidang mikrobiologi terapan dan biologi molekular menjadi dasar pengembangan teknologi bioremediasi dengan memanfaatkan bakteri yang dapat mereduksi merkuri. Merkuri merupakan unsur yang sangat beracun bagi semua makhluk hidup, baik itu dalam bentuk unsur tunggal (logam) ataupun dalam bentuk persenyawaan. Merkuri umumnya terdiri dari tiga bentuk yaitu elemen merkuri ( $Hg^0$ ), ion merkuri ( $Hg^{2+}$ ), dan merkuri organik kompleks. Bioremediasi adalah penggunaan organisme hidup, terutama mikroorganisme, untuk mendegradasi kontaminan lingkungan ke dalam bentuk yang kurang beracun. Secara umum teknik bioremediasi terbagi dua *in situ* (on-site), dapat dilakukan langsung di lokasi tanah tercemar dan *ex situ* (off-site). Jenis-jenis bioremediasi adalah sebagai berikut biostimulasi, bioaugmentasi dan bioremediasi *intrinsic*. Sejumlah bakteri resisten terhadap merkuri telah diisolasi dari berbagai jenis lingkungan. Umumnya bakteri tersebut termasuk dalam kelompok baik bakteri Gram negatif maupun Gram positif. Beberapa bakteri aerobik dan fakultatif mengkatalisasi proses reduksi  $Hg(II)$  menjadi  $Hg(0)$  seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Corynebacterium*, *Micrococcus* dan *Vibrio*. *Pseudomonas maltophilia* dapat mereduksi  $Cr^{6+}$  yang bersifat mobile dan toksik menjadi bentuk immobile dan nontoksik  $Cr^{3+}$  serta meminimumkan mobilitas ion toksik lainnya di lingkungan seperti  $Hg^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  dan  $Cd^{2+}$ .

*Kata kunci: bioremediasi, mikroba, limbah merkuri, in, ex situ.*

### A. Pendahuluan

Pembangunan kawasan industri di daerah-daerah pertanian dan sekitarnya menyebabkan berkurangnya luas areal pertanian, pencemaran tanah dan badan air yang dapat menurunkan kualitas dan kuantitas hasil/produk pertanian, terganggunya kenyamanan dan kesehatan manusia atau makhluk hidup lain. Kerusakan akibat kegiatan pertambangan adalah berubah atau hilangnya bentuk

permukaan bumi (landscape), terutama pertambangan yang dilakukan secara terbuka (opened mining) meninggalkan lubang-lubang besar di permukaan bumi.

Logam berat merupakan jenis polutan yang terdistribusi secara luas di dalam tanah dan mendapat perhatian secara khusus karena sifatnya yang tidak dapat terdegradasi serta dapat bertahan lama di dalam lingkungan. Limbah padat dan atau cair yang dihasilkan dari

berbagai proses industri dan pertambangan mengandung logam berat toksik (Essa et.al, 2002). Termasuk logam berat yang sering mencemari habitat lingkungan diantaranya yaitu Cr, Cd, As Pb dan Hg (Merkuri). Merkuri ini merupakan salah satu jenis polutan yang bersifat toksik (Santi dan Goenadi, 2009). Hal ini sejalan dengan yang diungkapkan oleh Selid, et.al (2009) bahwa merkuri adalah unsur yang sangat beracun yang banyak tersebar di atmosfer, litosfer, dan air permukaan. Merkuri menimbulkan masalah serius bagi kesehatan manusia, seperti bioaccumulation merkuri dalam otak dan ginjal pada akhirnya mengarah pada penyakit neurologis.

Upaya penanggulangan bahaya pencemaran yang diakibatkan oleh merkuri telah banyak dilakukan. Berdasarkan asumsi bahwa baik tanaman maupun bakteri merupakan agens biologi penting yang dapat digunakan untuk bioremediasi, maka beberapa tahun terakhir ini bidang mikrobiologi terapan dan biologi molekular menjadi dasar pengembangan teknologi bioremediasi dengan memanfaatkan bakteri yang dapat mereduksi merkuri.

## B. Merkuri

Logam merkuri (Hg) adalah salah satu trace element yang mempunyai sifat

cair pada temperatur ruang dengan spesifik gravity dan daya hantar listrik yang tinggi. merkuri di industri ini untuk memudahkan (sebagai katalis) proses pencampuran logam dengan logam lainnya, contohnya dalam proses ekstraksi logam emas dan logam campuran untuk gigi.

- Sifat Fiska-Kimia Merkuri

Secara umum logam merkuri mempunyai sifat-sifat sebagai berikut yaitu berwujud cair pada suhu kamar ( $25^{\circ}$  C) dengan titik beku paling rendah sekitar  $39^{\circ}$  C. Merupakan logam yang paling mudah menguap jika dibandingkan dengan logam yang lain. Tahanan listrik yang dimiliki sangat rendah, sehingga menempatkan merkuri sebagai logam yang sangat baik untuk menghantarkan daya listrik. Dapat melarutkan bermacam-macam logam untuk membentuk alloy yang disebut dengan amalgam. Merupakan unsur yang sangat beracun bagi semua makhluk hidup, baik itu dalam bentuk unsur tunggal (logam) ataupun dalam bentuk persenyawaan (Palar, 1994). Merkuri umumnya terdiri dari tiga bentuk yaitu elemen merkuri ( $Hg^0$ ), ion merkuri ( $Hg^{2+}$ ), dan merkuri organik kompleks (Selid et.al, 2009).

- Siklus Merkuri di Dalam Lingkungan

Siklus merkuri di alam dimediasi oleh proses geologi dan biologi. Bentuk utama merkuri di atmosfer adalah uap merkuri ( $\text{Hg}^0$ ) yang mudah menguap dan dioksidasi menjadi ion merkuri ( $\text{Hg}^{2+}$ ) sebagai hasil dari interaksi terhadap ozon dengan adanya air. Kebanyakan merkuri yang masuk ke lingkungan perarian adalah  $\text{Hg}^{2+}$ .

Organisme predator yang ada di tingkat paling atas dalam rantai makanan umumnya memiliki konsentrasi merkuri lebih tinggi, yang dikenal sebagai bentuk organik metylmerkuri. Umumnya bentuk kimia merkuri yang terpapar pada manusia adalah uap merkuri  $\text{Hg}^0$  dan senyawa metylmerkuri yang merupakan racun yang sangat kuat bagi semua organisme hidup. Adanya kontaminasi limbah logam berat mengakibatkan beberapa bakteri, jamur dan tanaman telah berevolusi sehingga memiliki mekanisme resistensi terhadap beberapa bentuk zat kimia yang berbeda. Bakteri memainkan peran penting dalam siklus global merkuri dalam lingkungan sekitar. Berkenaan dengan bakteri resistensi terhadap merkuri dan peran bakteri tersebut dalam siklus merkuri telah dipelajari secara ekstensif (Osborn et al., 1997 at Nascimento and Edmar, 2003).

### C. Bioremediasi

Bioremediasi merupakan proses penguraian limbah organik atau anorganik polutan secara biologi dalam kondisi terkendali dengan tujuan mengontrol, mereduksi atau bahkan mereduksi bahan pencemar dari lingkungan. Menurut definisi (Vidali, 2001), bioremediasi adalah penggunaan organisme hidup, terutama mikroorganisme, untuk mendegradasi kontaminan lingkungan ke dalam bentuk yang kurang beracun.

Bioremediasi terjadi karena enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme memodifikasi polutan beracun dengan mengubah struktur kimia polutan tersebut, disebut biotransformasi. Pada banyak kasus, biotransformasi berujung pada biodegradasi, dimana polutan beracun terdegradasi, strukturnya menjadi tidak kompleks, dan akhirnya menjadi metabolit yang tidak berbahaya dan tidak beracun. Pendekatan umum untuk meningkatkan kecepatan biotransformasi atau biodegradasi adalah dengan cara seeding dan feeding.

Secara umum teknik bioremediasi terbagi dua in situ (on-site), dapat dilakukan langsung di lokasi tanah tercemar dan ex situ (off-site) yaitu tanah tercemar digali dan dipindahkan ke dalam

penampungan yang lebih terkontrol. Lalu diberi perlakuan khusus dengan memakai mikroba.

Ada 4 teknik dasar yang biasa digunakan dalam bioremediasi:

- Stimulasi aktivitas mikroorganisme asli (di lokasi tercemar) dengan penambahan nutrien, pengaturan kondisi redoks, optimasi pH.
- Inokulasi (penanaman) mikroorganisme di lokasi tercemar, yaitu mikroorganisme yang memiliki kemampuan biotransformasi khusus.
- Penerapan immobilized enzymes.
- Penggunaan tanaman (phytoremediation) untuk menghilangkan atau mengubah pencemar.

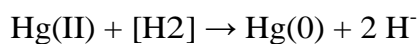
Jenis-jenis bioremediasi adalah sebagai berikut biostimulasi, bioaugmentasi dan bioremediasi intrinsic. Faktor yang mempengaruhi optimalisasi proses bioremediasi meliputi adanya populasi mikroba yang mampu menurunkan polutan, keberadaan kontaminan terhadap populasi mikroba, faktor-faktor lingkungan (jenis tanah, suhu, pH, adanya oksigen atau akseptor elektron lainnya, dan nutrisi ) (Vidali, 2001).

#### D. Bioremediasi Merkuri

Upaya penanggulangan bahaya pencemaran yang diakibatkan oleh merkuri telah banyak dilakukan. Berdasarkan asumsi bahwa baik tanaman maupun bakteri merupakan agens biologi penting yang dapat digunakan untuk bioremediasi, maka beberapa tahun terakhir ini bidang mikrobiologi terapan dan biologi molekular menjadi dasar pengembangan teknologi bioremediasi dengan memanfaatkan bakteri yang dapat mereduksi merkuri. Hasil penelitian Benyehuda *et al.* (2003) menunjukkan respons penghambatan pertumbuhan yang sangat bervariasi dari bakteri aerobik kemoheterotrop yang diisolasi dari dasar permukaan sedimen di dalam medium pepton – tripton – yeast - glukosa (PTYG) dengan kertas cakram yang mengandung 2  $\mu\text{mol}$  Cr(VI), 50 nmol Hg(II), dan 500 nmol Pb(II). Hal ini diduga karena bakteri Gram positif dan Gram negatif secara prinsip memiliki perbedaan satu dengan lainnya dalam hal interaksi dengan logam (Giller *et al.*, 1998). Bakteri Gram negatif menunjukkan toleransi terhadap logam yang lebih besar daripada Gram positif karena memiliki struktur dinding sel yang lebih kompleks yang mampu mengikat dan

mengimobilisasi ion logam termasuk  $\text{Hg}^{2+}$ .

Ahmad *et al.* (2005) mengemukakan bahwa kemampuan bakteri menghasilkan polisakarida ekstraselular dapat melindungi sel dari pengaruh toksik logam berat. Hasil penelitiannya memberikan indikasi bahwa bakteri heterotrof yang ditumbuhkan di dalam medium yang mengandung merkuri dengan konsentrasi 150-200  $\mu\text{g/g}$  akan mengalami penurunan viabilitas setelah 21 hari inkubasi. Kontaminasi yang diakibatkan oleh logam berat di alam tidak bersifat *bio degradable*. Namun demikian, sejumlah logam berat dan metaloid pengkontaminan penting bersifat kurang larut dan lebih volatil dalam bentuk tereduksi apabila dibandingkan dalam bentuk teroksidasi. Reaksi reduksi merkuri merupakan salah satu contoh reaksi reduksi logam larut menjadi bentuk volatil dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



Merkuri yang terdapat dalam limbah atau *waste* di perairan umum diubah oleh aktifitas mikroorganisme menjadi komponen methyl merkuri ( $\text{CH}_3\text{-Hg}$ ) yang memiliki sifat racun dan daya ikat yang kuat disamping kelarutannya yang tinggi terutama dalam tubuh hewan air.

Hal tersebut mengakibatkan merkuri terakumulasi melalui proses *bioakumulasi* dan *biomagnifikasi* dalam jaringan tubuh hewan-hewan air, sehingga kadar merkuri dapat mencapai level yang berbahaya baik bagi kehidupan hewan air maupun kesehatan manusia, yang makan hasil tangkap hewan-hewan air tersebut. Sanusi (1980) mengemukakan bahwa terjadinya proses akumulasi merkuri di dalam tubuh hewan air, karena kecepatan pengambilan merkuri (*up take rate*) oleh organisme air lebih cepat dibandingkan dengan proses ekskresi.

Kadar merkuri di dalam tanah sangat bervariasi dan tergantung tingkat kedalaman khususnya pada tanah-tanah alami. Hal ini berarti bahwa kedalaman pengambilan contoh tanah merupakan suatu pedoman yang penting untuk memperoleh akurasi data. Pada tanah yang diolah, kadar merkuri dalam lapisan olah dengan kedalaman 0 - 20 cm cukup homogen karena adanya pengelolaan tanah (Alloway, 1995).

Berdasarkan Essa *et al.* (2002), ada 3 mekanisme bioremediasi terhadap merkuri yaitu metilasi, reduksi secara enzimatik, pengendapan dari ion  $\text{Hg}^{2+}$  sebagai  $\text{HgS}$  yang tidak larut sebagai hasil dari pembentukan gas  $\text{H}_2\text{S}$ , atau biomineralisasi dari ion  $\text{Hg}^{2+}$  sebagai

komplek merkuri-fosfat yang tidak larut selain HgS. Menurut Nazaret et al. (1994) dalam Kiefer (2000), *Enterobacter aerogenes* melakukan bioremediasi dengan melakukan uptake reduksi terhadap ion Hg. Resistensi bakteri tersebut berdasarkan potensial redoks dimana sel mampu mereduksi ion Hg<sup>2+</sup> menjadi Hg<sup>0</sup> yang lebih tidak toksik bagi sel bakteri dengan bantuan enzim reduktase, sehingga Hg<sup>0</sup> dapat meninggalkan sel melalui mekanisme difusi pasif maupun volatilisasi. Pada penelitian ini diduga *Enterobacter aerogenes* lebih banyak melakukan bioremediasi terhadap logam Hg secara reduksi enzimatik, karena tidak terjadi mekanisme efflux hingga jam ke-30. *Enterobacter aerogenes* tidak dapat melakukan bioremediasi logam Hg dengan cara pembentukan HgS, karena bakteri tersebut tidak dapat menghasilkan gas H<sub>2</sub>S ketika dilakukan uji biokimia. Sedangkan mekanisme bioremediasi secara metilasi biasanya terjadi pada bakteri anaerob, dan belum pernah dilaporkan terjadi pada *Enterobacter aerogenes*. Bioremediasi logam Hg baik dengan variasi pH maupun suhu inkubasi, tidak tampak terjadinya mekanisme efflux. Hal ini diduga karena Hg<sup>0</sup> yang

terbentuk selama proses remediasi keluar dari sel bakteri melalui proses volatilisasi.

Pendapat sejalan juga mengungkapkan bahwa detoksifikasi merkuri dapat dilakukan menggunakan mikroorganisme resisten merkuri, misalnya bakteri resisten merkuri. Berbagai mekanisme detoksifikasi merkuri telah dilaporkan, seperti berkurangnya penyerapan ion merkuri karena pengurangan permeabilitas selular untuk ion Hg<sup>2+</sup> (Pan-Hou et al., 1981 dalam Nascimento and Edmar, 2003), demethylation dari methylmercury oleh *Clostridium cochlearium* T - 2P, yang melibatkan dekomposisi dan inaktivasi dari merkuri anorganik dengan hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S) (Pan-Hou dan Imura, 1981 dalam Nascimento and Edmar, 2003), metilasi merkuri oleh bakteri tertentu yang menggunakan metilasi sebagai resistensi atau detoksifikasi mekanisme (Trevor, 1986 dalam Nascimento and Edmar, 2003) dan penyitaan dari methylmercury (Silver dan Misra, 1984 dalam Nascimento and Edmar, 2003).

Jenis bakteri yang resisten terhadap logam berat mungkin berada di dalam tanah dan di lokasi tambang. Apabila bakteri tersebut dapat beradaptasi pada lingkungan dengan tingkat kontaminasi logam berat yang tinggi, maka

diasumsikan bahwa penggunaan bakteri tersebut sangat efektif dalam meningkatkan reduksi logam berat. Sejumlah bakteri resisten terhadap merkuri telah diisolasi dari berbagai jenis lingkungan. Umumnya bakteri tersebut termasuk dalam kelompok baik bakteri Gram negatif maupun Gram positif (Nascimento & Chartone-Souza, 2003 dalam Santi dan Goenadi, 2009). Beberapa bakteri aerobik dan fakultatif mengkatalisis proses reduksi Hg(II) menjadi Hg(0) seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Corynebacterium*, *Micrococcus* dan *Vibrio*. *Pseudomonas maltophilia* dapat mereduksi Cr<sup>6+</sup> yang bersifat mobile dan toksik menjadi bentuk immobile dan nontoksik Cr<sup>3+</sup> serta meminimumkan mobilitas ion toksik lainnya di lingkungan seperti Hg<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> dan Cd<sup>2+</sup>.

Detoksifikasi merkuri oleh bakteri resisten merkuri terjadi karena bakteri resisten merkuri memiliki gen resisten merkuri, mer operon. Struktur mer operon berbeda untuk tiap jenis bakteri (Mann, 2009), yang mengubah Hg(II) menjadi Hg(0). Umumnya struktur mer operon terdiri dari gen metaloregulator (merR), gen transpor merkuri (merT, merP, merC), gen merkuri reduktase (merA) dan organomercuri liase (merB). Model

mekanisme resisten merkuri bakteri gram negatif adalah sebagai berikut Hg(II) yang masuk periplasma terikat ke pasangan residu sistein MerP. Selanjutnya MerP mentransfer Hg(II) ke residu sistein MerT atau MerC. Akhirnya ion Hg menyeberang membran sitoplasma melalui proses reaksi pertukaran ligan menuju sisi aktif flavin disulfide oksidoreduktase, merkuri reduktase (MerA). Merkuri reduktase (MerA) mengkatalisis reduksi Hg (II) menjadi Hg (0) volatil dan sedikit reaktif (Rasmussen et.al, 2008). Akhirnya Hg(0) berdifusi di lingkungan sel untuk selanjutnya dikeluarkan dari sel. Bakteri yang hanya memiliki protein merkuri reduktase (MerA) disebut dengan bakteri resisten merkuri spektrum sempit. Beberapa bakteri selain memiliki protein merkuri reduktase (MerA) juga memiliki protein organomercuri liase (MerB). MerB berfungsi dalam mengkatalisis pemutusan ikatan merkuri-karbon sehingga dihasilkan senyawa organik dan ion Hg yang berupa garam tiol. Bakteri yang memiliki kedua protein merkuri reduktase (MerA) dan organomercuri liase (MerB) disebut dengan bakteri resisten merkuri spektrum luas.

Bentuk merkuri yang utama di dalam atmosfer adalah unsur merkuri

dalam bentuk ( $\text{Hg}^0$ ), yang mana mudah menguap dan dioksidasi menjadi ion merkuri ( $\text{Hg}^{2+}$ ) secara fotokimia kebanyakan dari merkuri yang memasuki lingkungan akuatik dalam bentuk  $\text{Hg}^{2+}$  (Gambar 1). Resistensi merkuri telah dipelajari secara intensif pada bakteri Gram negatif *Pseudomonas aeruginosa*, dimana gen untuk resistensi merkuri berada pada suatu plasmid. Gen ini disebut gen mer yang diatur di dalam suatu operon dan dibawah kontrol dari protein regulator MerR (produk dari merR) (Gambar 2). MerR berfungsi seperti repressor dan suatu aktivator. Pada keadaan tidak adanya  $\text{Hg}^{2+}$ , MerR mengikat kepada bagian operator dan adanya transkripsi dari mer TPCAD. Bagaimanapun, jika ada  $\text{Hg}^{2+}$ , membentuk suatu kompleks dengan MerR, yang kemudian berfungsi sebagai suatu activator dari transkripsi dari operon mer. Merkuri reduktase, menjadi produk dari gen merA. MerD, produk dari merD, juga memainkan suatu peran sebagai regulator, sedangkan mer menyandi suatu protein pengikat  $\text{Hg}^{2+}$  periplasmik. Protein ini, MerP mengikat  $\text{Hg}^{2+}$  dan memindahkannya kepada suatu membran protein MerT (produk merT), yang mengangkut  $\text{Hg}^{2+}$  ke dalam sel untuk direduksi merkuri reduktase. Hasil akhir

adalah reduksi  $\text{Hg}^{2+}$  menjadi  $\text{Hg}^0$ , yang mudah menguap dan bebas dari sel.

Jenis-jenis mikroorganisme yang bersifat resisten terhadap merkuri *Sulfolobus solfataricus*, *Pseudomonas putida* Spi3, *Pseudomonas stutzeri* I b03, *Pseudomonas fulva* Spil 1

### E. Kesimpulan

Pencemaran lingkungan merupakan keadaan di mana bahan kimia buatan manusia masuk dan merubah lingkungan alami. Pencemaran ini biasanya terjadi karena oleh kebocoran limbah cair atau bahan kimia industri atau fasilitas komersial, penggunaan pestisida, masuknya air permukaan tanah tercemar ke dalam lapisan sub-permukaan, kecelakaan kendaraan pengangkut minyak, zat kimia, atau limbah, air limbah dari tempat penimbunan sampah serta limbah industri yang langsung dibuang ke tanah secara tidak memenuhi syarat (illegal dumping). Salah satu limbah zat kimia yaitu limbah logam berat. Merkuri merupakan salah satu logam berat yang sangat toksik.

Ada beberapa cara untuk mengurangi dampak dari pencemaran lingkungan limbah merkuri, diantaranya dengan bioremediasi. Bioremediasi merupakan proses pembersihan



pencemaran lingkungan dengan menggunakan mikroorganisme (jamur, bakteri).

Sejumlah bakteri resisten terhadap merkuri telah diisolasi dari berbagai jenis lingkungan. Umumnya bakteri tersebut termasuk dalam kelompok baik bakteri Gram negatif maupun Gram positif. Beberapa bakteri aerobik dan fakultatif mengkatalisasi proses reduksi Hg(II) menjadi Hg(0) seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Corynebacterium*, *Micrococcus* dan *Vibrio*. *Pseudomonas maltophilia* dapat mereduksi Cr<sup>6+</sup> yang bersifat mobile dan toksik menjadi bentuk immobile dan nontoksik Cr<sup>3+</sup> serta meminimumkan mobilitas ion toksik lainnya di lingkungan seperti Hg<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> dan Cd<sup>2+</sup>.

#### F. Daftar Pustaka

- Essa, A.M.M., L. E. Macaskie and N. L. Brown. Mechanisms of mercury bioremediation. *Biochemical Society Transactions* (2002) Volume 30, part 4
- Ghosh, Amitava, Piyali C, Partha R, Somnath B, Tanushree N and Simli S. Bioremediation of Heavy Metals from Neem (*Azadirachta Indica*) Leaf Extract by Chelation with Dithizone. (A Protective and Effective Method for Pharmaceutical Industry). *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*. Volume 2, issue 1, Jan-March 2009.
- Kiefer, N.2000. Mechanisms of Microbial Metal Resistance, B.Sc. Final Project, Dublin City University. <http://www.infrance.com/kiefer/litsurvey.htm>
- Laksmi Prima SANTI & Didiek Hadjar GOENADI. Potensi *Pseudomonas fluorescens* strain KTSS untuk bioremediasi merkuri di dalam tanah. *Menara Perkebunan*, 2009, 77(2), 110-124.
- Liu, Jian-xiao, Xiu Xiang-min, Tang Lin and Zeng Guang-ming. Determination of trace mercury in compost extract by inhibition based glucose oxidase biosensor. *Trans. Nonferrous. Met.Soc. China* 19 (2009) 235-240.
- Mann, Jeffrey E. Recent advance in the development of *Deinococcus* spp. For use in bioremediation of mixed radioactive waste. *Basic Biotechnology* (2009) 5 :60-65
- Nascimento, Andrea M.A and Edmar Chartone-Souza. Operon mer: Bacterial resistance to mercury and potential for bioremediation of contaminated environments. *Genet. Mol. Res.* 2 (1): 92-101 (2003)
- Palar, H. 1994. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Ramussen, L.D., C. Zawadsky, S.J Binnerup, G. Oregaard, S.J Soresnsen and N. Kroer. Cultivation of Hard-To-Culture Subsurface Mercury-Resistant Bacteria and Discovery of New merA Gene Sequence. *Applied and Environmental Microbiology*, June 2008. p. 3795-3803
- Selid, Paul D., Hanying Xu, E. Michael Collins, Marla Striped FC and Julia X Z. Sensing Mercury for Biomedical and Environmental Monitoring. *Sensor*.2009.9.5446-5459

Vidali, M. Bioremediation. An overview.  
Pure Appl. Chem., Vol. 73, No. 7,

pp. 1163–1172, 2001