



KAJIAN LITERATUR: BAKTERI PENGAKUMULASI LOGAM BERAT TIMBAL (Pb DAN MERKURI (Hg)

Rena Ediana, Rabiatul Jannah*, Zulkarnain

Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman
Jl. Pasir Balengkong, Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75119

*Korespondensi penulis: r.jannah74@gmail.com

ABSTRAK

Pencemaran lingkungan oleh logam berat Pb dan Hg biasanya berasal dari limbah industri, proses penambangan, serta kegiatan pertanian. Salah satu upaya untuk menanggulangi pencemaran lingkungan oleh logam berat adalah dengan bioremediasi melalui penggunaan mikroorganisme. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji jenis bakteri dan mengetahui tingkat efektivitas bakteri yang dapat mengakumulasi logam berat timbal (Pb) dan merkuri (Hg). Penelitian ini menggunakan data sekunder melalui studi pustaka, yaitu mengumpulkan informasi dari sumber-sumber ilmiah seperti jurnal ilmiah, skripsi, publikasi ilmiah, peraturan-peraturan yang berkaitan dengan topik penelitian, pendapat ahli, maupun berbagai studi eksperimental. Hasil yang diperoleh dari kajian ini adalah terdapat 7 (tujuh) jenis bakteri yang dapat mengakumulasi Pb yaitu *Bacillus* sp, *Pseudomonas*, *Klebsiella edwardsii*, *Enterobacter coacae*, *Pediococcus pentosaceus*, *Alcaligeneses paecalis* dan *Staphylococcus aureus* dan terdapat sepuluh jenis bakteri yang terbukti merespon baik Hg dan dapat mengakumulasi penurunan Hg yaitu *Bacillus*, *Burkholderia cenosepacia*, *Brevundimonas* sp., *Klebsiella pneumonia*, *Morganella morganii*, *Fusobactreium aquatile*, *Pseudomonas* sp., *Brevibacterium casei*, *Escherichia coli* dan *Proteus mirabilis*. Tingkat keefektifan bakteri dari 7 genus yang ditemukan terdapat 3 genus yang terbaik dalam mengakumulasi logam Pb yaitu *Bacillus*, *Pseudomonas* dan *Alcaligeneses faecalis*. Hasil kajian literatur ini adalah ditemukannya 3 jenis bakteri yang terbaik dari 3 kategori kadar merkuri yaitu *Bacillus albus*, *Bacillus thuringiensis* dengan persentase akumulasi dan *Morganella morganii*.

Kata Kunci: Logam Berat, Merkuri, Pengakumulasi Logam Berat, Timbal

1. Pendahuluan

Logam timbal (Pb) banyak digunakan sebagai bahan pengemas, saluran air, alat-alat rumah tangga dan hiasan. Dalam bentuk oksida timbal digunakan sebagai pigmen atau zat warna dalam industri kosmetik dan gelas serta industri keramik yang sebagian diantaranya digunakan dalam peralatan rumah tangga, sedangkan bentuk aerosol anorganik dapat masuk ke dalam tubuh melalui udara yang dihirup atau makanan seperti sayuran dan buah-buahan yang tumbuh dari tanah yang tercemar oleh paparan logam Pb. Logam Pb tersebut dalam jangka waktu panjang dapat terakumulasi dalam tubuh karena proses eliminasinya yang lambat dan logam yang mendapat perhatian utama dalam segi kesehatan karena dampaknya pada sejumlah besar orang akibat keracunan makanan atau udara yang memiliki sifat toksik berbahaya [1].

Logam merkuri (Hg) merupakan salah satu jenis polutan yang bersifat toksik [2]. Hal ini sejalan dengan yang diungkapkan oleh Selid dkk. bahwa merkuri adalah unsur yang sangat beracun yang banyak tersebar di atmosfer, litosfer, dan air permukaan. Merkuri menimbulkan masalah serius bagi kesehatan manusia, seperti bioakumulasi merkuri dalam otak dan ginjal pada akhirnya mengarah pada penyakit neurologis [3].

Pencemaran lingkungan oleh logam berat Pb dan Hg biasanya berasal dari limbah industri, proses penambangan, serta kegiatan pertanian. Logam berat banyak terdapat di dalam limbah industri kimia, misalnya pada industri metalurgi, *smelting*, *electroplating* dan lain-lain. Selain limbah industri, proses penambangan yang dilakukan oleh manusia seperti penambangan batu bara dan penambangan emas dapat mencemari tanah. Penambangan batu bara secara terbuka mendorong terjadinya oksidasi mineral sulfida, sehingga tanah akan



menjadi sangat masam dan mengakibatkan tingginya akumulasi logam berat pada tanah. Penambangan emas yang dilakukan juga dapat mencemari tanah hal ini karena dalam proses penambangan emas digunakan proses ekstraksi yang berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungan yaitu menggunakan logam merkuri untuk proses amalgamasi. Penggunaan logam merkuri tersebut akan mengakibatkan tanah tercemar logam berat merkuri. Logam merkuri akan mengendap di dalam tanah yang kemudian akan masuk ke rantai makanan makhluk hidup.

Salah satu upaya untuk menanggulangi pencemaran lingkungan oleh logam berat adalah dengan bioremediasi. Bioremediasi adalah suatu metode dengan menggunakan mikroorganisme dalam menurunkan kadar logam berat di tanah, sehingga kondisi tanah dan lingkungan tidak berbahaya bagi makhluk hidup. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui jenis-jenis bakteri yang dapat mengakumulasi logam Pb dan Hg serta tingkat efektivitas bakteri dalam menurunkan kadar logam Pb dan Hg.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder (pengumpulan data secara tidak langsung) melalui studi pustaka, yaitu mengumpulkan informasi dari sumber-sumber ilmiah seperti jurnal ilmiah, skripsi, publikasi ilmiah, peraturan-peraturan yang berkaitan dengan topik penelitian, pendapat ahli, maupun berbagai studi eksperimental. Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan berbagai data-basis seperti ScienceDirect, Pub-Med, dan Google Scholar.

Tahapan Review Paper

Tahapan yang digunakan pada *review* paper ini antara lain :

1. Pengorganisasian, yakni menemukan literatur-literatur yang relevan dan kemudian mengorganisasi literatur-literatur tersebut dengan maksud untuk mencapai tujuan penelitian. Adapun tahap dalam mengorganisasi literatur adalah mencari ide, tujuan umum, dan simpulan dari literatur dengan membaca abstrak, beberapa paragraf pendahuluan, dan kesimpulannya, serta mengelompokkan literatur berdasarkan kategori-kategori tertentu
2. Identifikasi, yakni meninjau (*mereview*) hasil literatur-literatur tersebut dengan maksud menemukan bagian yang dianggap paling penting dan berguna, kemudian mengkaji lebih lanjut hasil tersebut untuk mencapai tujuan penelitian.
3. Sintesa, yakni menyatukan hasil organisasi dan identifikasi literatur agar menjadi satu kesatuan yang padu, dengan mencari keterkaitan antar literatur, sehingga hal ini menghasilkan suatu interpretasi hasil yang berguna untuk mencapai sasaran akhir tujuan penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Timbal (Pb)

Bakteri merupakan makhluk hidup yang sangat kecil dan hanya bisa dilihat dengan menggunakan mikroskop [4]. Bakteri dapat digunakan sebagai agen bioremediasi lingkungan. Bioremediasi adalah suatu metode dengan menggunakan mikroorganisme dalam menurunkan logam berat di tanah, sehingga kondisi tanah dan lingkungan tidak berbahaya bagi makhluk hidup. Beberapa penelitian yang telah dilakukan membuktikan bahwa bakteri dapat mengakumulasi logam berat di tanah salah satunya adalah logam berat timbal (Pb).

Kajian literatur mengenai bakteri pengakumulasi logam Pb dilakukan dengan mengumpulkan dan mengkaji data yang berasal dari 15 jurnal. Kajian literatur yang telah dilakukan membuktikan 7 jenis bakteri yang dapat mengakumulasi Pb yaitu *Bacillus* sp [5]-[8], *Pseudomonas* [9], *Klebsiella edwardsii* [10], *Enterobacter coacae* [11], *Pediococcus pentosaceus* [12], *Alcaligeneses paecalis* [13] dan *Staphylococcus aureus* [14]. Genus *Bacillus* merupakan genus yang paling banyak ditemukan dalam mengakumulasi Pb, dari kajian yang dilakukan terdapat beberapa penelitian yang mengakumulasi Pb menggunakan genus *Bacillus* sampai pada



tingkat spesies yaitu *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis* dan *Bacillus thuringiensis*. Penelitian [5, 6, 7, 15] melakukan identifikasi dan uji morfologi hanya pada tingkat genus *Bacillus*.

Tabel 1. Hasil Kajian Literatur Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Timbal (Pb)

No	Penulis	Judul	Tahun	Jenis Bakteri	Konsentrasi Awal Pb dalam Media (ppm)	Waktu Inkubasi (jam)	Persentase Akumulasi Penurunan Logam Pb (%)
1	Oziegbe, O. Oluduro, A. O. Oziegbe, E. J. Ahuekwe, E. F. Olorunsola, S. J. [10]	Assessment of Heavy Metal Bioremediation Potential of Bacterial Isolates From Landfill Soils	2021	1. <i>Klebsiella edwardsii</i> 2. <i>Enterobacter cloacae</i> 3. <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	300	192	1. 25,17 2. 17,58 3. 33,67
2	Njoku, K. L. Akinyede, O. R. Obidi, O. F. [16]	Microbial Remediation of Heavy Metals Contaminated Media by <i>Bacillus megaterium</i> and <i>Rhizopus stolonifer</i>	2020	<i>Bacillus megaterium</i>	390,4	96	48,23
3	Jaafar, R. S. [12]	Bioremediation Of Lead and Cadmium and The Strive Role of <i>Pediococcus Pentosaceus</i> Probiotic	2020	<i>Pediococcus Pentosaceus</i>	50	24	68,39
4	Bambang Rahadi, Liliya Dewi Susanawati, Rinda Agustianingrum [5]	Bioremediasi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Bakteri Indigenous Pada Tanah Tercemar Air Lindi (<i>Leachate</i>)	2019	<i>Bacillus</i>	0,204	24	69,1
5	Hasyimuddin, Fatmawati Nur, Indriani [6]	Isolasi Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) pada Saluran Pembuangan Limbah Industri di Kabupaten Gowa	2018	1. <i>Bacillus</i> 2. <i>Pseudomonas</i>	40	24	1. 27,5 2. 17,5
6	Negin Salamat, Razieh Lamoochi, Fatemeh Shahaliyan [17]	Metabolism and removal of anthracene and lead by a <i>B. subtilis</i> -produced biosurfactant	2018	<i>Bacillus subtilis</i>	50	2,5	82
7	Maulin Inggaini [8]	Efektifitas Pengikatan Logam	2017	<i>Bacillus subtilis</i>	0,35	18	17,45



No	Penulis	Judul	Tahun	Jenis Bakteri	Konsentrasi Awal Pb dalam Media (ppm)	Waktu Inkubasi (jam)	Persentase Akumulasi Penurunan Logam Pb (%)
		Pb oleh Bakteri, <i>Bacillus subtilis</i>					
8	Dewi Sakti Angraeni [9]	Kemampuan Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) Berdasarkan Waktu Paparannya Oleh Bakteri Endapan Sedimen Perairan Sekitar Rumah Susun Kota Makassar	2017	1. <i>Alcaligenes faecalis</i> 2. <i>Bacillus thuringiensis</i> 3. <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	350	12	1. 91,71 2. 92,85 3. 89,14
9	Alfian Maulana, Supartono, dan Sri Mursiti [14]	Bioremediasi Logam Pb pada Limbah Tekstil dengan <i>Staphylococcus aureus</i> dan <i>Bacillus subtilis</i>	2017	1. <i>Staphylococcus aureus</i> 2. <i>Bacillus subtilis</i>	2,5	720	1. 95,85 2. 84,00
10	Achmad Arifiyanto, Fitriya Dwi Apriyanti, Puput Purwaningsih, Septian Hary Kalqutny, Dyah Agustina, Tini Surtiningsih, Maya Shovitri, and Enny Zulaika [7]	Lead (Pb) bioaccumulation; genera <i>Bacillus</i> isolate S1 and SS19 as a case study	2017	<i>Bacillus</i>	75	24	53
11	Mastang [13]	Isolasi Dan Identifikasi Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) Pada Endapan Sedimen Kanal Sekitar Rumah Susun Kota Makasar	2016	1. <i>Pseudomonas aeruginosa</i> 2. <i>Alcaligenes faecalis</i> 3. <i>Bacillus thuringiensis</i>	250	48	1. 96 2. 98,4 3. 99,6
12	Kang, Chang Ho Oh, Soo Ji Shin, Yu Jin Han, Sang Hyun Nam, In Hyun So, Jae Seong [11]	Bioremediation Of Lead By Ureolytic Bacteria Isolated From Soil At Abandoned Metal Mines In South Korea	2015	<i>Enterobacter cloacae</i>	7,2	48	68,1
13	Zaimatul Khoiroh [18]	Bioremediasi Logam Berat Timbal (Pb) dalam	2014	1. <i>Pseudomonas pseudomallei</i>	3,5	960	65



No	Penulis	Judul	Tahun	Jenis Bakteri	Konsentrasi Awal Pb dalam Media (ppm)	Waktu Inkubasi (jam)	Persentase Akumulasi Penurunan Logam Pb (%)
		Lumpur Lapindo Menggunakan Campuran Bakteri (<i>Pseudomonas pseudomallei</i> dan <i>Pseudomonas aeruginosa</i>)		2. <i>Pseudomonas aeruginosa</i>			
14	Harikrishna Yadav. Nanganuru, Satish. Mutyala, Bhanu Prakash. Maradala [19]	Studies on Biological Removal of Plumb (Pb) by <i>Bacillus subtilis</i>	2012	<i>Bacillus subtilis</i>	10	168	90
15	Kim, S. U. Cheong, Y. H. Seo, D. C. Hur, J. S. Heo, J. S. Cho, J. S. [15]	Characterisation Of Heavy Metal Tolerance And Biosorption Capacity Of Bacterium Strain CPB4 (<i>Bacillus</i> spp.)	2007	<i>Bacillus</i> spp	100	40	90

Persentase akumulasi penurunan Pb tertinggi ditemukan pada penelitian Mastang, dengan jenis bakteri yang digunakan yaitu *Bacillus thuringiensis* sebesar 99,6% [13] dan persentase terendah pada penelitian Inggraini, dengan jenis bakteri yang digunakan yaitu *Bacillus subtilis* sebesar 17,45% [8]. Menurut Isa & Yuliana, bakteri *Bacillus* sangat toleran terhadap logam Pb, bakteri tersebut memiliki karakteristik sel berbentuk batang mempunyai ukuran $0,3-22 \mu\text{m} \times 1,22-7,0 \mu\text{m}$, dapat bergerak (motil), membentuk endospora, tidak lebih dari satu dalam satu sel isolatorangium, gram positif, aerobik dan anaerobik fakultatif dan umumnya ditemukan di tanah. Anggota spesies dari genus *Bacillus* menunjukkan kemampuan fisiologis yang luas, sehingga dapat hidup di berbagai lingkungan [20].

Kemampuan *Bacillus subtilis* sangat efisien dalam menyerap Pb, kemampuan *B. subtilis* dalam menghilangkan Pb sangat dipengaruhi oleh nilai pH, value medium, waktu kontak, level biomass dan konsentrasi Pb [19]. Bakteri selain dari genus *Bacillus* juga dalam efisiensi menghilangkan logam dipengaruhi oleh faktor-faktor tersebut.

Menurut Nadyah, pertumbuhan bakteri terdiri atas beberapa fase yang pertama yaitu fase lag (lambat) merupakan fase di mana bakteri beradaptasi dengan lingkungannya dan mulai bertambah sedikit demi sedikit [21]. Kedua fase logaritmik (eksponensial) merupakan fase di mana pembiakan bakteri berlangsung paling cepat dan terjadi pembelahan sel. Menurut Angraeni, pada fase logaritmik, tingkat penurunan logam berat lebih banyak terakumulasi oleh bakteri. Dalam penelitian tersebut fase logaritmik terjadi pada jam ke 12-24 saat inkubasi [9]. Ketiga fase stasioner merupakan fase di mana jumlah bakteri yang berkembangbiak sama dengan jumlah bakteri yang mengalami kematian. Keempat fase autolisis (kematian) merupakan fase di mana jumlah bakteri yang mati semakin banyak, melebihi jumlah bakteri yang berkembang biak. Pada penelitian Angraeni tersebut, fase autolisis terjadi pada jam ke 72 [9].

Fase pertumbuhan bakteri berkaitan dengan nilai pH. Menurut Stefanescu, hal ini dikarenakan saat bakteri berinteraksi dengan logam berat terjadi penurunan pH akibat produksi asam organik dan anorganik, reaksi oksidasi atau reduksi serta ekskresi agen pengompleks yang terikat dengan bakteri [22]. Penurunan pH disertai dengan peningkatan akumulasi logam. Menurut Njoku dkk., hilangnya kandungan logam berat pada media oleh bakteri menyebabkan penurunan pH di dalam media [16]. Hal yang disampaikan oleh Stefanescu berkaitan



dengan fase kematian yang dialami oleh bakteri. Bakteri dapat hidup pada pH 6,4-7,5, sehingga saat terjadi penurunan pH akibat dari metabolisme bakteri saat proses akumulasi logam akan mengakibatkan terjadinya fase kematian karena bakteri tidak akan bertahan hidup di bawah pH 6,4 [22]. Penelitian-penelitian yang dilakukan dalam kajian ini kondisi nilai pH 6-7 hanya diatur pada awal inkubasi saja sebaiknya nilai pH selama proses bioremediasi harus tetap terjaga di tingkat netral agar fase logaritmik dapat bertahan lama, apabila fase logaritmik ini semakin lama maka akumulasi logam berat juga semakin tinggi.

Persentase akumulasi penurunan logam Pb dipengaruhi juga oleh tingkat konsentrasi awal Pb dalam media dan waktu kontak, pada kajian literatur yang telah dilakukan dari 7 genus yang ditemukan terdapat 3 genus yang terbaik dalam mengakumulasi logam Pb yaitu *Bacillus*, *Pseudomonas* dan *Alcaligenes faecalis*. Kadar konsentrasi logam Pb dan waktu kontak yang optimal pada ketiga genus tersebut dapat toleran logam Pb pada konsentrasi 250 ppm dan waktu kontak 48 jam dengan persentase akumulasi penurunan logam Pb masing-masing sebesar 99,6%, 96 % dan 98,4 %.

Genus *Klebsiella* dan *Enterobacter* yang diteliti oleh Oziegbe dkk., dengan konsentrasi awal logam Pb sebesar 300 ppm dan waktu kontak 192 jam dengan persentase akumulasi penurunan logam Pb masing-masing sebesar 25,17% dan 17,58% [10]. Persentase akumulasi yang rendah dikarenakan kedua genus tersebut tidak toleran pada konsentrasi logam Pb 300 ppm dan semakin lama waktu kontak maka semakin lama fase kematian bakteri terjadi karena dalam proses metabolisme bakteri selama di dalam media inkubasi menyebabkan penurunan pH, sehingga bakteri tidak dapat bertahan hidup. Genus *Enterobacter* yang diteliti oleh Kang dkk., dengan persentase akumulasi sebesar 68,1% dengan konsentrasi logam Pb 7,2 ppm dan waktu kontak 48 jam, hal ini membuktikan bahwa toleransi genus *Enterobacter* sangat rendah terhadap logam Pb [11].

Penelitian Jaafar yang melaporkan genus *Pediococcus* dapat mengakumulasi logam Pb dengan persentase 68,39% di konsentrasi logam Pb 50 ppm dan waktu kontak 24 jam [12], persentase dapat meningkat apabila waktu kontak ditambah hal ini karena menurut Angraeni, fase kematian bakteri terjadi pada waktu kontak 72 jam [9]. Genus lain yang dapat mengakumulasi logam Pb yaitu *Staphylococcus* terbukti dapat mengakumulasi logam Pb sebesar 95,85% pada konsentrasi awal logam Pb 2,5 ppm dan waktu kontak 720 jam [14]. Persentase akumulasi yang tinggi pada penelitian Maulana & Mursiti dikarenakan konsentrasi awal logam Pb yang rendah, sehingga bakteri *Staphylococcus* toleran terhadap kadar logam tersebut meskipun waktu kontak yang sangat lama [14].

Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Merkuri (Hg)

Bakteri yang resisten terhadap logam merkuri yang tinggi mengandung mer operon yang mengkode flavoenzim dan merkuri reduktase yang dapat mereduksi ion Hg^{2+} menjadi Hg^0 yang kurang toksik [23]. Terdapat 3 mekanisme bakteri dalam merespon logam merkuri. Pertama ialah dengan cara menghambat metabolisme sel, sehingga pertumbuhan sel lambat atau sel mati. Kedua yaitu menginduksi sistem operon resisten merkuri untuk bekerja, sehingga sel tetap hidup walau dalam kondisi stress. Ketiga adanya plasmid yang mengandung gen resisten merkuri yang masuk ke dalam sel.

Terdapat 10 jenis bakteri yang terbukti merespon baik logam merkuri dan dapat mengakumulasi penurunan logam merkuri dalam kajian literatur yang telah dilakukan yaitu *Bacillus*, *Burkholderia cenocepacia* [24], *Brevundimonas* sp. [25], *Klebsiella pneumonia* [26], *Morganella morganii* [27], *Fusobacterium aquatile* [28], *Pseudomonas* sp. [29], *Brevibacterium casei* [30], *Escherichia coli* [31] dan *Proteus mirabilis* [32]. Genus *Bacillus* ditemukan paling banyak dalam beberapa penelitian yaitu *Bacillus subtilis*, *B. megaterium*, *B. cereus*, *B. thuringiensis*, *B. albus*.



Tabel 2. Hasil Kajian Literatur Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Merkuri (Hg)

No	Penulis	Judul	Tahun	Jenis Bakteri	Konsentrasi Awal Hg dalam Media (ppm)	Waktu Inkubasi (jam)	Persentase Akumulasi Penurunan Logam Hg (%)
1	Wiwik Ekyastuti dan Tri Rima Setyawati [24]	Identification and in vitro effectiveness test of four isolates of mercury-resistant bacteria as bioaccumulation agents of mercury	2015	1. <i>Bacillus subtilis</i> 2. <i>Burkholderia cenosepacia</i>	10	72	1. 58,9 2. 66,2
2	Wahyu Irawati, Patricia, Yenny Soraya, Abyatar Hugo Baskoro [25]	A Study on Mercury-Resistant Bacteria Isolated from a Gold Mine in Pongkor Village, Bogor, Indonesia	2012	<i>Brevundimonas</i> sp.	100	3	57,10
3	Fatimawali, Fatmawaty Badaruddin, Irawan Yusuf. [26]	Isolasi Dan Identifikasi Bakteri Resisten Merkuri Dari Muara Sungai Sario Yang Dapat Digunakan Untuk Detoksifikasi Limbah Merkuri	2011	<i>Klebsiella pneumonia</i>	2	24	99,4
4	Saundra Rosallina Lutfi, Wignyanto, Evi Kurniati [27]	Bioremediasi Merkuri Menggunakan Bakteri Indigenous Dari Limbah Penambangan Emas Di Tumpang Pitu, Banyuwangi	2018	<i>Morganella morganii</i>	130	48	92,4
5	Siska Nurfitriani, Umi Chasanah, Yulia Nuraini, Amrullah Fiqri, Eko Handayanto [28]	Kemampuan Akumulasi Merkuri oleh Bakteri yang Diisolasi dari Tailing Tambang Emas Skala Kecil	2018	1. <i>Brevundimonas vesicularis</i> 2. <i>Fusobactreium aquatile</i>	30	24	1. 7,23 2. 3,38
6	Wirnangsi D Uno, Sri Rahayu Thalib [33]	Penyerapan Logam Berat Merkuri (Hg) Oleh Bakteri <i>Bacillus subtilis</i> Pada Sedimen Danau Limboto	2020	<i>Bacillus subtilis</i>	0.053	72	73,58



No	Penulis	Judul	Tahun	Jenis Bakteri	Konsentrasi Awal Hg dalam Media (ppm)	Waktu Inkubasi (jam)	Persentase Akumulasi Penurunan Logam Hg (%)
7	Sri Ambardini, Nur Arfa Yanti, Kasmawati Dehe dan La Ode Abdul Fajar Hasidu [29]	Lab-scale experimental investigation concerning ex-situ bioremediation of mercury (Hg) contaminated soil by local bacterial isolated from Bombana mining area	2021	1. <i>Bacillus</i> sp. 2. <i>Pseudomonas</i> sp.	1. 1,428 2. 1,781	1.344	1. 99,98 2. 99,99
8	Hafidh Zarkasyi [34]	Biosorpsi Logam Merkuri (Hg) Oleh <i>Bacillus megaterium</i> Asal Hilir Sungai Cisadane	2008	<i>Bacillus megaterium</i>	20	12	99,58
9	Umi Sholikhah dan Nengah Dwianita Kuswytasari [35]	Uji Potensi Genera <i>Bacillus</i> Sebagai Bioakumulator Merkuri	2013	<i>Bacillus cereus</i>	3,202	24	89
10	Abdul Rehman, Ashfaq Ali, Bushra Muneer dan Abdul Rauf Shakoori [30]	Resistance and Biosorption of Mercury by Bacteria Isolated from Industrial Effluents	2007	1. <i>Brevibacterium casei</i> 2. <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	50	24	1. 70 2. 80
11	X.W. Zhao, M.H. Zhou, Q.B. Li, Y.H. Lu, N. He, D.H. Sun, X. Deng, [31]	Simultaneous mercury bioaccumulation and cell propagation by genetically engineered <i>Escherichia coli</i>	2005	<i>Escherichia coli</i>	7,40	42	97,6
12	Bhupendra Pushkar, Pooja Sevak and Suvarna Sounderajan [36]	Assessment of the bioremediation efficacy of the mercury resistant bacterium isolated from the Mithi River	2019	<i>Bacillus thuringiensis</i>	50	48	90,10
13	Soraya Fitria Nasir, Ani M. Hasan, Aryati Abdul, Yuliana Retnowati [37]	Molecular Identification of Hg-Resistant Bacteria and Their Potential in Reducing Mercury Contamination	2021	<i>Bacillus albus</i>	10	24	99,59



No	Penulis	Judul	Tahun	Jenis Bakteri	Konsentrasi Awal Hg dalam Media (ppm)	Waktu Inkubasi (jam)	Persentase Akumulasi Penurunan Logam Hg (%)
14	Wanti Tandi Payung, Fatimawali, Novel S. Kojong [32]	Identifikasi Secara Biomolekuler Dan Uji Daya Reduksi Bakteri Resisten Merkuri Yang Diisolasi Dari Air Di Wilayah Bekas Tambang Emas Rakyat Desa Tanoyan Utara	2018	<i>Proteus mirabilis</i>	40	24	52,2
15	Titik Fadilah Amelia, Ace Bachaki, Herpandi [38]	Aktivitas Reduksi Merkuri pada Bakteri yang Diisolasi dari Air dan Sedimen di Sungai Musi	2016	<i>Bacillus subtilis</i>	0,2	24	65,93

Suatu bakteri digolongkan sebagai bakteri resisten merkuri apabila bakteri tersebut dapat bertahan pada konsentrasi merkuri 10 ppm atau lebih [039] dan bakteri yang dapat hidup atau bertahan pada kadar merkuri lebih dari 20 ppm digolongkan sebagai bakteri resisten merkuri tinggi [30], sehingga penelitian-penelitian yang menggunakan kadar merkuri di bawah 10 ppm tidak dapat direkomendasikan sebagai bakteri resisten merkuri seperti penelitian yang dilakukan oleh Ambardini dkk. [29]. Uno & Thalib [33], Sholikah & Kuswytasari [35], serta Amelia dkk. [38] yang menggunakan genus *Bacillus*, penelitian Fatimawali dkk. menggunakan bakteri *Klebsiella pneumonia* [26], penelitian Ambardini dkk. menggunakan bakteri *Pseudomonas* sp. [29], dan penelitian Zhao dkk. menggunakan bakteri *Escherichia coli* [31].

Persentase akumulasi penurunan logam merkuri yang tertinggi dengan menggunakan kadar merkuri 10-20 ppm yaitu pada penelitian Nasir dkk. dengan jenis bakteri yang digunakan *Bacillus albus* sebesar 99,59% [37] dan persentase terendah pada penelitian Ekyastuti & Setyawati dengan jenis bakteri yang digunakan yaitu *Bacillus subtilis* sebesar 58,9% [24]. Persentase akumulasi penurunan logam merkuri yang tertinggi dengan menggunakan kadar merkuri 30-50 ppm yaitu pada penelitian Pushkar dkk. dengan jenis bakteri yang digunakan *Bacillus thuringiensis* sebesar 90,1% [36] dan persentase terendah pada penelitian Nurfitriani dkk. dengan jenis bakteri yang digunakan yaitu *Fusobactreium aquatile* sebesar 3,38% [28]. Persentase akumulasi penurunan logam merkuri yang tertinggi dengan menggunakan kadar merkuri 100-130 ppm yaitu pada penelitian Lutfi dkk. dengan jenis bakteri yang digunakan *Morganella morgani* sebesar 92,4% [27] dan persentase terendah pada penelitian Zarkasyi dengan jenis bakteri yang digunakan yaitu *Brevundimonas* sp sebesar 57,21% [34].

Ditemukan 3 jenis bakteri yang terbaik dari 3 kategori kadar merkuri yaitu *Bacillus albus*, *Bacillus thuringiensis* dan *Morganella morgani*. Bakteri jenis *Morganella morgani* pada kajian ini merupakan bakteri yang tingkat toleransinya paling tinggi terhadap kadar merkuri sebesar 130 ppm. Bakteri dapat hidup pada media dengan kadar merkuri yang tinggi dikarenakan adanya mekanisme bakteri dalam merespon logam merkuri yaitu bakteri dapat menginduksi sistem operon resisten merkuri untuk bekerja sehingga sel tetap hidup walau dalam kondisi stres dan adanya plasmid yang mengandung gen resisten merkuri yang masuk ke dalam sel. *Morganella morgani* merupakan bakteri berbentuk batang dan termasuk dalam gram negatif, bakteri ini diklasifikasikan sebagai *Proteus morganii* dan merupakan genus *Morganella*. Bakteri ini biasanya banyak



ditemukan tersebar di lingkungan dan berada di dalam tubuh manusia maupun hewan khususnya di usus, bakteri jenis ini termasuk dalam family *Enterobacteriaceae* dan dapat menyebabkan infeksi bagi manusia [27], sehingga hal ini menjadi dampak negatif dari penggunaan *Morganella morgani* sebagai agen bioremediasi.

Tingginya persentase akumulasi penurunan logam merkuri dipengaruhi oleh waktu inkubasi bakteri dan kadar merkuri di dalam media. Bakteri mempunyai fase-fase di dalam masa pertumbuhan selama proses bioremediasi sehingga waktu inkubasi yang dilakukan di dalam penelitian harus melihat waktu optimum bakteri pada setiap fase. Semakin tinggi kadar merkuri yang diberikan maka semakin lama bakteri membutuhkan waktu adaptasi (fase lag) dan fase lainnya yang dibuktikan pada beberapa penelitian dengan kadar merkuri yang berbeda. Penelitian Sholikah & Kuswytasari yang menggunakan *Bacillus cereus* dalam kadar merkuri 3,202 ppm, melaporkan bahwa fase lag terjadi pada 2 jam pertama dan pada jam ke-3 sampai jam ke-18 merupakan fase logaritmik. Pada penelitian ini, tidak terlihat fase stasioner karena pertumbuhan bakteri mulai menurun pada jam ke-20 [35]. Penelitian Zarkasyi yang menggunakan *Bacillus megaterium* terhadap merkuri sebesar 20 ppm, ditemukan terjadinya fase lag pada 0-8 jam dan fase logaritmik 8-12 jam, di mana pada penelitian ini, fase stasioner pertumbuhan bakteri tidak teramati karena setelah 12 jam inkubasi pertumbuhan sel bakteri sudah menurun tajam [34]. Penelitian Rehman dkk. melakukan pengujian dengan kadar merkuri 50 ppm menggunakan *Brevibacterium casei* dan *Pseudomonas aeruginosa*, di mana terindikasi berlangsungnya fase lag *Brevibacterium casei* selama 4-12 jam dan *Pseudomonas aeruginosa* selama 4-12 jam [30].

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa terdapat 7 (tujuh) bakteri yang dapat mengakumulasi Pb yaitu *Bacillus sp.*, *Pseudomonas*, *Klasiella edwardsii*, *Enterobacter coacae*, *Pediococcus pentosaceus*, *Alcaligeneses paecalis* dan *Staphylococcus aureus* dan terdapat 10 (sepuluh) jenis bakteri yang terbukti merespon baik Hg dan dapat mengakumulasi Hg yaitu *Bacillus*, *Burkholderia cenosepacia*, *Brevundimonas sp.*, *Klasielle pneumonia*, *Morganella morganii*, *Fusobacterium aquatile*, *Pseudomonas sp.*, *Brevibacteriumcasei*, *Escherichia coli* dan *Proteus mirabilis*. Untuk tingkat efektivitas bakteri dari 7 genus yang ditemukan, terdapat 3 genus terbaik dalam mengakumulasi logam Pb yaitu *Bacillus*, *Pseudomonas* dan *Alcaligeneses paecalis*. Kadar konsentrasi logam Pb dan waktu kontak optimal pada ketiga genus tersebut dapat toleran logam Pb pada konsentrasi 250 ppm dan waktu kontak 48 jam dengan persentase akumulasi penurun Pb masing-masing sebesar 99,6%, 96,5 dan 98,4%. Ditemukan 3 jenis bakteri yang terbaik dari 3 kategori akumulasi kadar merkuri yaitu: a) pada kadar Hg 10 ppm dan waktu kontak 24 jam, terdapat *Bacillus albus* dengan persentase akumulasi penurunan Hg, 99,59 %, b) pada kadar Hg 50 ppm dan waktu kontak 48 jam, terdapat *Bacillus thuringiensis* dengan persentase akumulasi penurunan Hg 90,1%; dan c) pada kadar Hg 130 ppm dan waktu kontak 48 jam, terdapat *Morganella morgani* dengan persentase akumulasi penurunan Hg 92,4%.

Referensi

- [1] H. Hardiani, T. Kardiansyah, S. Sugesty, "Bioremediasi logam timbal (pb) dalam tanah terkontaminasi limbah sludge industri kertas proses deinking," *Jurnal Selulosa*, vol. 1, no. 1, pp. 31–41, 2011
- [2] L. P. Santi dan D.H. Goenadi, "Pupuk organo-kimia untuk pemupukan bibit kelapa sawit," *Menara Perkebunan*, vol. 76(1), pp. 36-46, 2008
- [3] P. D. Selid, H. Xu, E. M. Collins, M. S. Face-Collins, dan J. X. Zhao, "Sensing Mercury for Biomedical and Environmental Monitoring," *Sensor*, vol. 9, pp. 5446- 5459, 2009.
- [4] K. Irianto, *Mikrobiologi; Menguak Dunia Mikroorganisme* Jilid II, Bandung: CV. Yrama Widya, 2006
- [5] B. Rahadi, L. D. Susanawati, dan R. Agustianingrum, "Bioremediasi Logam Timbal (Pb) Menggunakan Bakteri Indigenus Pada Tanah Tercemar Air Lindi (Leachate)," *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, vol. 6, no. 3, pp. 11–18, 2019.
- [6] Hasyimuddin, F. Nur, dan Indriani, "Isolasi Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) Pada



- Saluran Pembuangan Limbah Industri Kabupaten Gowa,” *Biotropic : The Journal of Tropical Biology*, vol. 2, no. 2, pp. 126–132, 2018.
- [7] A. Arifiyanto, F. D. Apriyanti, P. Purwaningsih, S.H. Kalqutny, D. Agustina, T. Surtiningsih, M. Shovitri, dan E. Zulaika, “Lead (Pb) bioaccumulation; Genera *Bacillus* isolate S1 and SS19 as a case study”, *AIP Conference Proceedings*, Jun. 2017, pp. 1854. <https://doi.org/10.1063/1.4985394>
- [8] M. Inggaini, “Efektifitas Pengikatan Logam Pb Oleh Bakteri, *Bacillus subtilis*,” *Jurnal Sains Natural*, vol. 4, no. 2, pp. 152, 2017.
- [9] D. S. Angraeni, “Kemampuan Bioakumulasi Logam Berat Timbal (Pb) Berdasarkan Waktu Paparannya Oleh Bakteri Endapan Sedimen Perairan Sekitar Rumah Susun Kota Makassar,” Skripsi, Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alaudin, Makassar, 2017
- [10] O. Oziegbe, A. O. Oluduro, E. J. Oziegbe, E. F. Ahuekwe, dan S. J. Olorunsola, “Assessment of heavy metal bioremediation potential of bacterial isolates from landfill soils,” *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 28, no. 7, pp. 3948–3956, 2021.
- [11] C. H. Kang, S. J. Oh, Y. J. Shin, S.H. Han, I. H. Nam, dan J. S. So, “Bioremediation of lead by ureolytic bacteria isolated from soil at abandoned metal mines in South Korea,” *Ecological Engineering*, vol 74, pp. 402–407, 2015.
- [12] R. S. Jaafar, “Bioremediation of lead and cadmium and the strive role of pediococcus pentosaceus probiotic,” *Iraqi Journal of Veterinary Sciences*, vol. 34, no. 1, pp. 51–57, 2020.
- [13] Mastang, “Isolasi dan Identifikasi Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Timbal (P) Pada Endapan Sedimen Kanal Sekitar Rumah Susun Kota Makassar,” Skripsi, UIN Alauddin, Makassar, 2016.
- [14] A. Maulana dan S. Mursiti, S. “Bioremediasi Logam Pb pada Limbah Tekstil dengan *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis*,” *Indonesian Journal of Chemical Science*, vol. 6, no. 3, pp. 256–261, 2017.
- [15] S. U. Kim, Y. H. Cheong, D. C. Seo, J. S. Hur, J. S. Heo, dan J. S. Cho, “Characterisation of Heavy Metal Tolerance and Biosorption Capacity of Bacterium Strain CPB4 (*Bacillus* spp.),” *Water and Science Technology*, vol. 55, pp. 105-111, 2007.
- [16] K. L. Njoku, O. R. Akinyede, dan O. F. Obidi, “Microbial Remediation of Heavy Metals Contaminated Media by *Bacillus megaterium* and *Rhizopus stolonifer*,” *Scientific African*, vol. 10, pp. 545, 2020.
- [17] N. Salam, R. Lamoochi, dan F. Shahaliyan, “Metabolism and removal of anthracene and lead by a *B. subtilis*-produced biosurfactant,” *Toxicology Reports*, vol. 5, pp. 1120-23, 2018. Tersedia: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30510904/>
- [18] Z. Khoiroh, “Bioremediasi Logam Berat Timbal (Pb) dalam Lumpur Lapindo Menggunakan Campuran Bakteri (*Pseudomonas pseudomallei* dan *Pseudomonas aeruginosa*),” Skripsi, UIN Maulana Malik Ibrahim, Malang, 2014.
- [19] H. Y. Nanganuru, S. Mutyala, dan B.P. Maradala, “Studies on Biological Removal of Plumb (Pb) by *Bacillus subtilis*,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 3, no. 7, pp. 17–20, 2012.
- [20] I. Isa dan R. Yuliana, “Pemanfaatan berbagai jenis bakteri dalam proses bioleaching limbah logam berat,” Laporan tahunan Penelitian Fundamental. Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, 2013.
- [21] Nadyah, *Dasar-Dasar Mikrobiologi Untuk Mahasiswa Ilmu Kesehatan*. Makassar: Alauddin University Press, 2011.
- [22] I. A. Stefanescu, “Bioaccumulation of heavy metals by *Bacillus megaterium* from phosphogypsum waste,” *Chemistry and Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, vol. 16, no. 1, pp. 93 - 97, 2015
- [23] C. Vetriani, Y. S. Chew, S. M. Miller, J. Yagi, J. Coombs, R. A. Lutz, dan T. Barkay. “Mercury Adaptation among Bacteria from a Deep-sea Hydrothermal Vent,” *Appl. Environ. Microbiol.* vol. 71, no. 1, pp. 220-226, 2005.
- [24] W. Ekyastuti dan T. R. Setyawati, “Identification and in Vitro Effectiveness test of Four Isolates of Mercury-resistant Bacteria as Bioaccumulation Agents of Mercury,” dalam *Procedia Environmental*



Sciences, 2014, pp. 258–264.

- [25] W. Irawati, Patricia, Y. Soraya, dan A. H. Baskoro, “A Study on Mercury-Resistant Bacteria Isolated from a Gold Mine in Pongkor Village, Bogor, Indonesia,” *HAYATI Journal of Biosciences*, vol. 19, no. 4, pp. 197–200, 2012.
- [26] Fatimawali, F. Badaruddin, dan I. Yusuf, “Isolation and Identification of Mercury-Resistant Bacterium From Sario River Estuary That Can Be Used To Detoxify Inorganic Mercury Wastes,” *Jurnal Ilmiah Sains*, vol. 11, no. 2, pp. 282–288, 2011.
- [27] S. R. Lutfi, W. Wignyanto, dan E. Kurniati, “Bioremediasi Merkuri Menggunakan Bakteri Indigenus Dari Limbah Penambangan Emas Di Tumpang Pitu, Banyuwangi,” *Jurnal Teknologi Pertanian*, vol. 19, no. 1, pp. 15–24, 2018.
- [28] Nurfitriani, U. Chasanah, Y. Nuraini, A. Fiqri, dan E. Handayanto, “Kemampuan Akumulasi Merkuri oleh Bakteri yang Diisolasi dari Tailing Tambang Emas Skala Kecil,” dalam *Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal* Oktober 2018, pp. 366–375.,
- [29] S. Ambardini, N. A. Yanti, K. Dehe, dan L. O. A. Fajar Hasidu, “Lab-scale experimental investigation concerning ex-situ bioremediation of mercury (Hg) contaminated soil by local bacterial isolated from Bombana mining are,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1899, no. 1, 2021.
- [30] A. Rehman, A. Ali, B. Muneer, dan A. R. Shakoori, “Resistance and biosorption of mercury by bacteria isolated from industrial effluents,” *Pakistan Journal of Zoology*, vol. 39, no. 3, pp. 137–146, 2007.
- [31] X. W. Zhao, M. H. Zhou, Q. B., Li, Y. H. Lu, N. He, D. H. Sun, dan X. X. Deng, “Simultaneous mercury bioaccumulation and cell propagation by genetically engineered *Escherichia coli*,” *Process Biochemistry*, vol. 40, no. 5, pp. 1611–1616, 2005.
- [32] W. T. Payung dan N. S. Kojong, “Identifikasi Secara Biomolekuler Dan Uji Daya Reduksi Bakteri Resisten Merkuri Yang Diisolasi Dari Air di Wilayah Bekas Tambang Emas Rakyat Desa Tanoyan Utara,” *Pharmacon*, vol. 7, no. 2, pp. 28–40, 2018.
- [33] W. D. Uno dan S. R. Thalib, “Penyerapan Logam Berat Merkuri (Hg) Oleh Bakteri *Bacillus Subtillis* Pada Sedimen Danau Limboto,” *Jambura Edu Biosfer Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 8–12, 2020.
- [34] H. Zarkasyi, “Biosorpsi Logam Merkuri (Hg) Oleh *Bacillus megaterium* Asal Hilir Sungai Cisadane,” Skripsi. Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Syarif Hidayatullah, Jakarta, 2008.
- [35] U. Sholikhah dan N. D. Kuswytasari, “Uji Potensi Genera *Bacillus* Sebagai Bioakumulator Merkuri,” *Jurnal ITS Surabaya*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2013.
- [36] B. Pushkar, P. Sevak, dan S. Sounderajan, S. “Assessment of the bioremediation efficacy of the mercury resistant bacterium isolated from the Mithi River,” *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 19, no. 1, pp. 191–199, 2019.
- [37] S. F. Nasir, A. M. Hasan, A. Abdul, dan Y. Retnowati, “Molecular Identification of Hg-Resistant Bacteria and Their Potential in Reducing Mercury Contamination,” *Microbiology Indonesia*, vol. 15, no. 2, 2021
- [38] T. Amelia, A. Baehaki, dan H. Herpandi, “Aktivitas Reduksi Merkuri Pada Bakteri Yang Diisolasi Dari Air Dan Sedimen di Sungai Musi,” *Jurnal Teknologi Hasil Perikanan*, vol. 5, no. 1, pp. 94–106, 2016.
- [39] O. Anne, *Interaction of Human Commensal Bacteria with Amalgam-Derived Mercury: The Science and Its Implications for Infectious Disease and Neurotoxicology*. Georgia University, Athens (GA), USA, 2006.