

**ANALISIS APLIKASI BAKTERI INDIGENOUS SEBAGAI AGEN
BIOREMEDIASI PENCEMARAN LOGAM BERAT DI PERAIRAN**

SKRIPSI

Oleh:

**CITRA ANJANI HARDIYANTI
NIM. 175080100111019**



**PROGRAM STUDI MANAJEMEN SUMBERDAYA PERAIRAN
JURUSAN MANAJEMEN SUMBERDAYA PERAIRAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2021**



**ANALISIS APLIKASI BAKTERI INDIGENOUS SEBAGAI AGEN
BIOREMEDIASI PENCEMARAN LOGAM BERAT DI PERAIRAN**

LAPORAN SKRIPSI

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Meraih Gelar Sarjana Perikanan
di Fakultas Perikanan Dan Ilmu Kelautan
Universitas Brawijaya**

Oleh:

**CITRA ANJANI HARDIYANTI
NIM. 175080100111019**



**PROGRAM STUDI MANAJEMEN SUMBERDAYA PERAIRAN
JURUSAN MANAJEMEN SUMBERDAYA PERAIRAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG**

2021



SKRIPSI

ANALISIS APLIKASI BAKTERI INDIGENOUS SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI PENCEMARAN LOGAM BERAT DI PERAIRAN

Oleh:

CITRA ANJANI HARDIYANTI

NIM. 175080100111019

Telah dipertahankan didepan penguji
pada tanggal 12 Juli 2021
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

**Mengetahui:
Ketua Jurusan MSP**

**Menyetujui,
Dosen Pembimbing**



**Dr. Ir. M. Firdaus
NIP. 19680919 200501 1 001**

Tanggal: 7/21/2021

**Andi Kurniawan, S.Pi, M.Eng., D.Sc
NIP. 19790331 200501 1 003**

Tanggal: 7/21/2021



PERNYATAAN ORISINALITAS

Dengan ini Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Citra Anjani Hardiyanti

NIM : 175080100111019

Judul Skripsi : Analisis Aplikasi Bakteri Indigenus Sebagai Agen Bioremediasi Pencemaran Logam Berat di Perairan

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa penulisan *review* sebagai pengganti skripsi ini berdasarkan hasil kajian, analisa, pemikiran dan pemaparan asli dari saya sendiri yang berasal dari telaah berbagai sumber pustaka. Sedangkan baik untuk naskah, tabel, gambar maupun ilustrasi lainnya yang tercantum sebagai bagian dari skripsi ini yang berasal dari sumber pustaka atau dari karya/ pendapat/ penelitian dari orang lain, maka saya telah mencantumkan sumber yang jelas dalam daftar pustaka.

Demikian pernyataan ini saya buat, apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Brawijaya, Malang. Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa adanya paksaan dari pihak manapun.

Malang, 12 Juli 2021

Citra Anjani Hardiyanti
NIM.175080100111019

IDENTITAS TIM PENGUJI

Judul : Analisis Aplikasi Bakteri Indigenous Sebagai Agen
Bioremediasi Pencemaran Logam Berat di Perairan

Nama Mahasiswa : Citra Anjani Hardiyanti

NIM : 175080100111019

Program Studi : Manajemen Sumberdaya Perairan

PENGUJI PEMBIMBING:

Pembimbing 1 : Andi Kurniawan, S.Pi., M. Eng., D.Sc

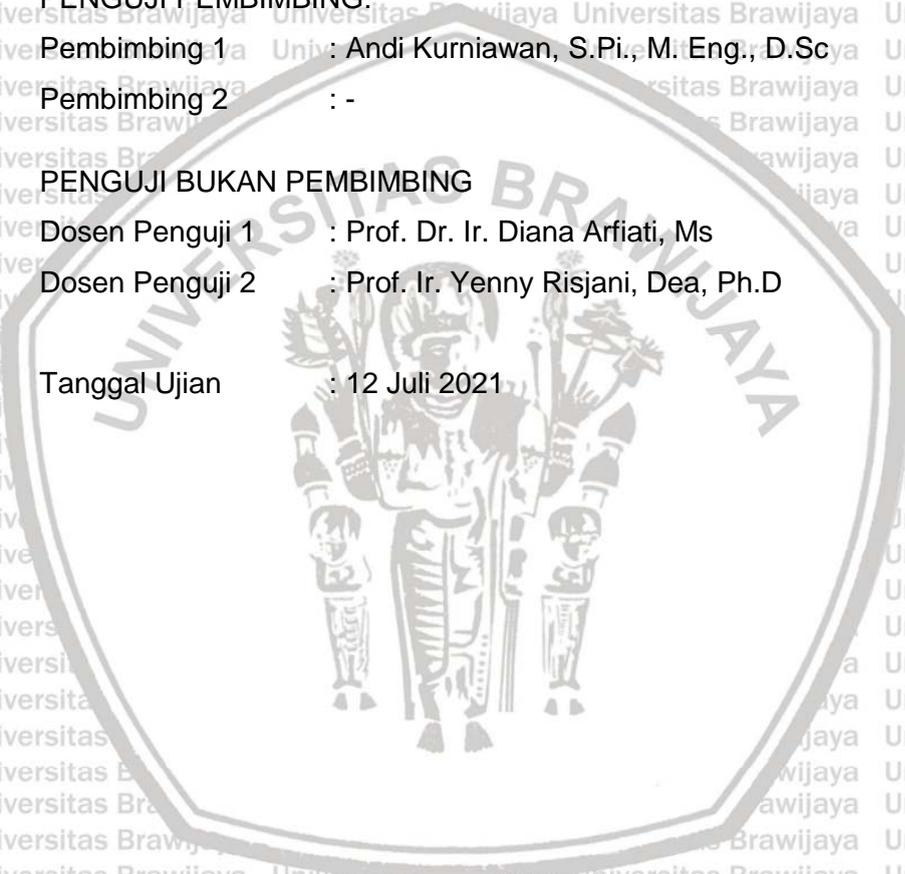
Pembimbing 2 : -

PENGUJI BUKAN PEMBIMBING

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Diana Arfiati, Ms

Dosen Penguji 2 : Prof. Ir. Yenny Risjani, Dea, Ph.D

Tanggal Ujian : 12 Juli 2021



UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada beberapa pihak atas dukungannya mulai dari penyusunan proposal, pelaksanaan skripsi, sampai penulisan laporan akhir. Hal ini sangat membantu penulis dalam melaksanakan Tugas Akhir berupa kajian literatur. Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat serta hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi berupa kajian literatur.
2. Kedua orang tua dan seluruh anggota keluarga yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan selama penyusunan dan pengerjaan laporan skripsi kajian literatur ini
3. Bapak Andi Kurniawan, S.Pi, M.Eng., D.Sc. selaku dosen pembimbing skripsi yang senantiasa membantu dan membimbing kami dalam menyelesaikan penulisan laporan skripsi kajian literatur ini
4. Prof. Dr. Ir. Diana Arfiati, Ms dan Prof. Ir. Yenny Risjani, Dea, Ph.D selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan evaluasi baik berupa masukan dan saran demi kesempurnaan skripsi ini
5. Seluruh tim asisten Bapak Andi Kurniawan yang telah membantu dalam memberikan masukan dan arahan selama proses penyusunan tugas akhir kajian literatur ini
6. Teman-teman bimbingan skripsi alfi, rike, ratna, desi, chika dan novi yang telah memberikan dukungan selama penyusunan laporan skripsi kajian literatur ini
7. Nisa, Rizky, Devi, Rere, Dhafin, Lutfi dan Fira yang telah memberikan dukungan dan semangat dalam menyelesaikan kajian literatur ini
8. Seluruh Tim Asisten Ilmu Tanah dan Asisten Mars yang selalu memberikan dukungan dan motivasi

9. Seluruh teman-teman Eridanus 2017, MSP 2017 atas waktu dan pengalaman yang saya habiskan bersama teman-teman selama 4 tahun ini.

10. Semua pihak yang tidak bias disebutkan satu-persatu yang telah membantu dalam kesuksesan kajian literatur ini



SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Citra Anjani Hardiyanti

NIM : 175080100111019

Program Studi : Manajemen Sumberdaya Perairan

Judul Skripsi : Analisis Aplikasi Bakteri Indigenous Sebagai Agen Bioremediasi Pencemaran Logam Berat di Perairan

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Bersedia kajian literatur ini diterbitkan menjadi buku atau artikel dengan penulisan dibawah koordinasi dan korespondensi dosen pembimbing
2. Tidak akan menerbitkan sebagian atau keseluruhan skripsi ini tanpa seijin dosen pembimbing.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan yang sebenar-benarnya tanpa adanya paksaan dari pihak manapun. Apabila saya melanggar maka saya siap menerima kosekuensi yang berlaku.

Malang, 19 Juli 2021

Hormat saya,



Citra Anjani Hardiyanti
NIM: 175080100111019

RINGKASAN

CITRA ANJANI HARDIYANTI. ANALISIS APLIKASI BAKTERI INDIGENOUS SEBAGAI AGEN BIOREMEDIASI PENCEMARAN LOGAM BERAT DI PERAIRAN (di bawah bimbingan **Andi Kurniawan, S.Pi, M.Eng., D.Sc**)

Pencemaran logam berat di perairan merupakan salah satu permasalahan serius yang tanpa disadari seringkali terjadi akibat adanya aktivitas antropogenik. Maka dari itu, perlu adanya upaya yang diterapkan dalam mengatasi pencemaran logam berat. Bioremediasi menggunakan bakteri indigenous merupakan salah satu pendekatan secara biologi yang dapat menjadi solusi alternatif dalam mengatasi pencemaran logam berat secara berkelanjutan. Kajian literatur dilakukan berdasarkan hasil penelitian yang sudah ada sebelumnya. Namun, mengingat ketersediaan informasi yang ada masih terpecah-pecah, kajian literatur ini ditulis dengan tujuan untuk mendapatkan informasi yang lebih komprehensif guna mendukung kebutuhan dalam mengembangkan penelitian yang lebih baik. Metode yang digunakan pada kajian literatur ini adalah metode *Systematic Literature Review* menggunakan sistem meta-analisis dengan pendekatan meta-agregasi. Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan diketahui bahwa setiap bakteri dapat mengadaptasi mekanisme bioremediasi yang berbeda-beda seperti mekanisme biosorpsi, bioakumulasi dan biotransformasi. Pengaplikasian bakteri indigenous dalam bioremediasi dapat melalui beberapa tahapan seperti melakukan isolasi strain bakteri dari lokasi tercemar logam berat, melakukan identifikasi strain bakteri, melakukan uji resisitensi, hingga dapat dilakukan uji kemampuan untuk bioremediasi. Bakteri indigenous yang terbukti memiliki kemampuan bioremediasi berdasarkan kajian literatur adalah bakteri *Acinetobacter sp.*, *Aeromonas macleodii*, *Bacillus cereus.*, *Bacillus thuringiensis*, *Basil sp.*, *Chromobacterium violaceum*, *Comamonas testosterone*, *Echerichia coli*, *Echerichia vulneris*, *Enterobacter clocae*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pantoea agglomerans*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas Chengduensis*, *Pseudomonas extremorientalis*, *Serratia marcescens*, *Serratia namatodiplia*, *Shigella flexneri*, dan *Staphylococcus sp.* Bakteri yang berhasil diidentifikasi ini dapat digunakan dalam melakukan bioremediasi berbagai jenis logam berat seperti logam berat Cu, Cr, Hg, Pb, As, Cd, Ni, Fe dan Ni bahkan beberapa diantaranya mampu melakukan bioremediasi lebih dari satu jenis logam berat dengan tingkat keberhasilan proses bioremediasi khususnya pada mekanisme hingga $\geq 95\%$. Kemampuan bakteri indigenous inilah yang secara umum memberikan peluang untuk di aplikasikan dalam bidang manajemen sumber daya perairan terutama dalam pengelolaan perairan yang tercemar secara *in-situ*. Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa setiap bakteri memiliki kemampuan yang berbeda-beda dalam melakukan bioremediasi, hal tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis dan konsentrasi logam berat, spesies bakteri, suhu, pH dan salinitas. Namun dalam kajian ini hampir semua literatur memiliki masalah yang sama yakni masih banyak penelitian yang terhenti di tahap penelitian laboratorium, sehingga dapat disarankan untuk dilakukan pengembangan lebih lanjut terkait upaya untuk mengatasi dampak dari proses bioremediasi logam berat oleh bakteri sehingga tidak lagi menimbulkan pencemaran dalam perairan.



KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia serta rahmat-Nya kepada penulis sehingga penulis berhasil menyelesaikan laporan Skripsi yang berjudul “Analisis Aplikasi Bakteri Indigenus Sebagai Agen Bioremediasi Pencemaran Logam Berat di Perairan”. Tujuan dibuatnya Laporan Skripsi ini adalah sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya, Malang.

Laporan skripsi ini menyajikan latar belakang samapai dengan hasil dan pembahasan selama kegiatan penelitian yang diharapkan dapat menjadi pegangan dalam penelitian selanjutnya sekaligus menambah wawasan ataupun gambaran dan informasi yang berguna dan bermanfaat bagi yang membutuhkan. Penulis menyadari bahwa Laporan Skripsi ini memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis berharap kepada berbagai pihak untuk dapat memberikan kritik, saran maupun masukan yang bersifat membangun untuk menjadikan laporan ini lebih baik kedepannya. Semoga laporan skripsi ini dapat diterima dengan baik, khususnya bagi penulis sehingga tujuan yang diharapkan dapat tercapai, Aamiin.

Malang, 12 Juli 2021

Citra Anjani Hardiyanti
NIM. 175080100111019

DAFTAR ISI

Halaman

PERNYATAAN ORISINALITAS..... iii

IDENTITAS TIM PENGUJI.....iv

UCAPAN TERIMA KASIH.....v

RINGKASAN.....viii

KATA PENGANTAR.....ix

DAFTAR ISI.....x

DAFTAR TABEL.....xii

DAFTAR GAMBAR.....xiii

DAFTAR LAMPIRAN.....xiv

1. PENDAHULUAN..... 1

1.1 Latar Belakang..... 1

1.2 Rumusan Masalah..... 5

1.3 Tujuan..... 5

1.4 Manfaat..... 6

2. METODE *REVIEW*..... 7

2.1 Konsep Dasar Kajian Literatur..... 7

2.2 Tahapan Pembuatan Kajian Literatur..... 9

2.2.1. Penentuan Topik Kajian Literatur..... 10

2.2.2. Pencarian Sumber Pustaka..... 11

2.2.3. Pemilihan Sumber Pustaka..... 13

2.2.4. Analisa Sumber Pustaka..... 14

2.2.5. Penyusunan Sumber Pustaka..... 15

3. HASIL *REVIEW*..... 17

3.1. Pencemaran Logam Berat di Perairan..... 17

3.1.1. Pencemaran Perairan..... 17

3.1.2. Logam Berat..... 17

3.1.3. Pencemaran Logam Berat di Perairan..... 20

3.1.4. Dampak Pencemaran logam berat..... 24

3.1.5. Teknologi Mengatasi Pencemaran Logam Berat..... 25

3.2. Bioremediasi Logam Berat oleh Bakteri Indigenous..... 27

3.2.1. Bioremediasi..... 17

3.2.2. Bakteri Indigenous..... 28

3.2.3. Mekanisme Bioremediasi oleh Bakteri Indigenous..... 32

3.3. Aplikasi Bakteri Indigenous Terhadap Pencemaran Logam Berat..... 40

3.3.1. Isolasi bakteri..... 40

3.3.2. Identifikasi Jenis Bakteri Indigenous..... 41





3.3.3. Resistensi Bakteri Indigenous.....	44
3.3.4. Kemampuan Bioremediasi Bakteri Indigenous.....	47
3.4. Potensi Pemanfaatan Bakteri Indigenous dalam Manajemen Sumberdaya Perairan	61
4. KESIMPULAN DAN SARAN	64
4.1. Kesimpulan	64
4.2. Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	66
LAMPIRAN.....	76



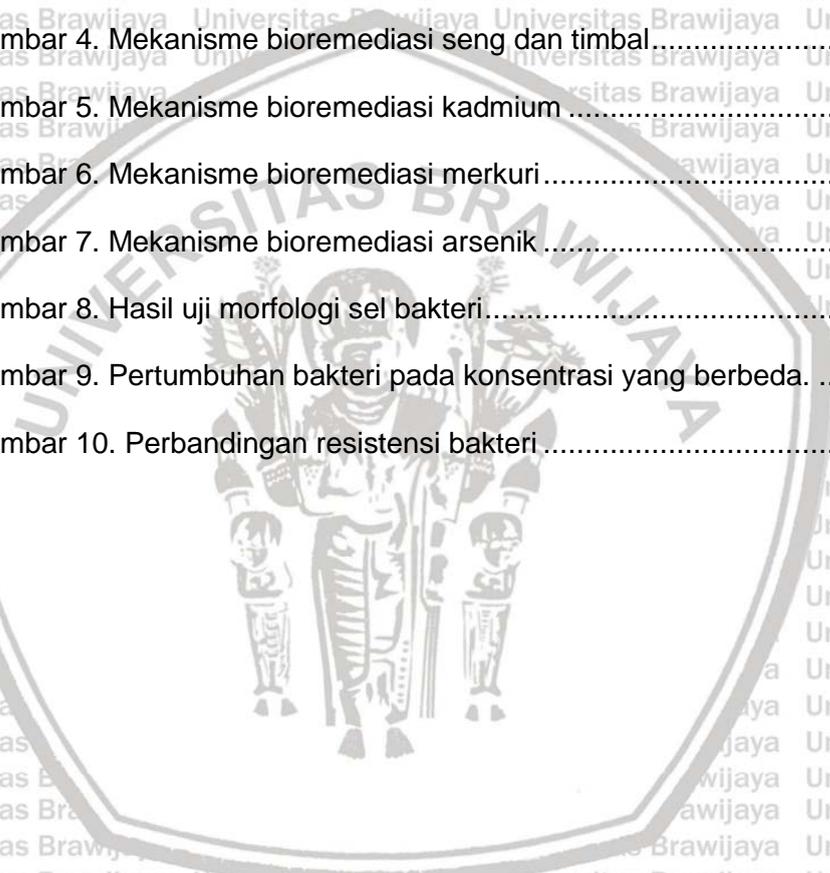
DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. Kata Kunci dan database yang digunakan dalam pencarian pustaka...	12
Tabel 2. Hasil Pencarian Sumber Pustaka.....	13
Tabel 3. Jenis kontaminasi logam berat di perairan	22



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Tahapan Pembuatan Kajian Literatur.....	10
Gambar 2. Kondisi perairan tercemar logam berat akibat aktivitas manusia.....	21
Gambar 3A. Mekanisme utama bioremediasi oleh mikroorganisme.....	33
Gambar 3B. Mekanisme bioremediasi logam berat pada sel bakteri.....	33
Gambar 4. Mekanisme bioremediasi seng dan timbal.....	35
Gambar 5. Mekanisme bioremediasi kadmium.....	37
Gambar 6. Mekanisme bioremediasi merkuri.....	38
Gambar 7. Mekanisme bioremediasi arsenik.....	40
Gambar 8. Hasil uji morfologi sel bakteri.....	42
Gambar 9. Pertumbuhan bakteri pada konsentrasi yang berbeda.....	45
Gambar 10. Perbandingan resistensi bakteri.....	47



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
Lampiran 1. Outlite pada Laporan Kajian Literatur	76
Lampiran 2. Ringkasan Jurnal Utama yang digunakan dalam Kajian Literatur ..	78
Lampiran 3. Profil logam berat di perairan	87
Lampiran 4. Identifikasi bakteri indigenous pada lokasi tercemar logam berat ...	89
Lampiran 5. Kemampuan biosorpsi bakteri indigenous	93
Lampiran 6. Kemampuan bioakumulasi bakteri indigenous	98



1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan aktivitas manusia, kemajuan teknologi dan perkembangan dari sektor industri yang semakin pesat secara tidak langsung membawa dampak yang cukup signifikan terhadap lingkungan (Dixit, *et al.*, 2015; Ojuederie dan Babalola, 2017), dampak yang terjadi seringkali bersifat negatif dan menimbulkan suatu permasalahan (Kristianto, *et al.*, 2017). Meskipun pesatnya pertumbuhan dan perkembangan Industrialisasi yang terjadi dapat meningkatkan perekonomian dan kesejahteraan masyarakat, namun dampak lain yang ditimbulkan seringkali menyebabkan terjadinya penurunan kualitas lingkungan akibat adanya alih fungsi lahan yang tidak sesuai dan peningkatan polutan yang berasal dari berbagai sumber yang dibuang ke dalam lingkungan perairan tanpa adanya pengelolaan (Miran, *et al.*, 2017; Supriyantini dan Endrawati, 2015; Sasongko, *et al.*, 2020). Pembuangan berbagai jenis limbah ke dalam lingkungan perairan dapat menyebabkan beban yang diterima oleh perairan semakin berat sehingga menimbulkan pencemaran dan efek jangka panjang terhadap rusaknya tatanan lingkungan hidup (Budiastuti, *et al.*, 2016).

Pencemaran air dapat mengakibatkan terjadinya perubahan keadaan pada suatu lingkungan perairan yang bersifat tidak menguntungkan atau merusak lingkungan, hal ini dapat terjadi akibat masuknya zat, energi, unsur atau komponen lainnya oleh aktivitas alam maupun aktivitas manusia (Herlina, 2018; Anjelita, *et al.*, 2019). Air memiliki peran yang sangat penting dalam menunjang dan memenuhi kebutuhan berbagai aktivitas manusia diantaranya dimanfaatkan untuk kegiatan mandi, cuci, kakus, irigasi pertanian, sumber air perikanan (Kristianto, *et al.*, 2017; Wijayanti 2017); bahkan seringkali lingkungan perairan dialihfungsikan

sebagai tempat yang mudah dan praktis untuk pembuangan hasil limbah dari berbagai aktivitas industri maupun domestik (Budiasuti, *et al.*, 2016).

Logam berat adalah salah satu polutan yang sering ditemukan di perairan.

Logam berat di perairan dapat berasal dari berbagai sumber baik dari aktivitas alami maupun aktifitas antropogenik (aktivitas manusia). Namun seringkali penyebab terbesar dari pencemaran logam berat di perairan adalah dampak dari adanya aktivitas manusia seperti aktivitas perbaikan dan bongkar muat kapal di pelabuhan penambangan, produksi energi dan hasil buangan limbah industri maupun domestik (Beoang, 2019; Ramlia, *et al.*, 2018).

Keberadaan beberapa logam berat di perairan bersifat esensial, namun dalam kadar yang berlebihan logam berat dapat menyebabkan pencemaran lingkungan perairan yang berbahaya (Putra, *et al.*, 2019). Logam berat dapat dikatakan sebagai salah satu sumber pencemaran yang sulit untuk di degradasi dan bersifat tetap di lingkungan (Ikerismawati, 2019). Logam berat yang terlepas dari proses produksi pada suatu industri tidak bisa dirombak seperti senyawa organik pada umumnya dan dapat terakumulasi pada sedimen maupun badan air dalam jangka waktu yang lama (Ramlia, *et al.*, 2018). Logam berat yang terakumulasi di perairan tidak hanya berpengaruh terhadap kualitas lingkungan perairan namun juga dapat mengakibatkan berbagai dampak buruk jika terakumulasi pada organisme akuatik (Sasongko, *et al.*, 2020). Dampak buruk tersebut karena organisme akuatik merupakan kelompok pertama yang akan terkena dampak secara langsung dari adanya pencemaran logam berat di perairan. Kadar dan lamanya waktu paparan logam berat di lingkungan perairan dapat mengganggu kerja enzim metabolisme tubuh dalam proses fisiologis bagi organisme akuatik, sedangkan bagi manusia akumulasi logam berat yang berasal dari rantai makanan dapat bersifat karsinogenik, mutagenik, dan teratogenik (Ikhsan, *et al.*, 2020; Kristianto, *et al.*, 2017).

Berbagai metode fisika dan kimia telah digunakan dalam menanggulangi dampak dari adanya pencemaran logam berat, seperti pengendapan kimiawi, oksidasi atau reduksi, filtrasi, pertukaran ion, elektrokimia, teknologi membran, penyaringan, penguapan dan *reverse osmosis* (Dixit, *et al.*, 2015; Ikhsan, *et al.*, 2020), namun kebanyakan metode tersebut seringkali tidak efektif atau menimbulkan dampak serta biaya yang lebih besar (Miran, *et al.*, 2017). Oleh karena itu, perlu adanya upaya penggunaan teknologi yang lebih ekonomis, efisien, dan ramah lingkungan dalam mengatasi adanya pencemaran logam berat di lingkungan. Saat ini kemajuan dan perkembangan teknologi dalam bidang biologi, telah menjadi alternatif yang dapat digunakan dalam mengatasi pencemaran logam berat secara berkelanjutan (Nanda, *et al.*, 2019).

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh limbah logam berat dapat diatasi oleh lingkungan perairan secara biologis melalui proses bioremediasi (Wardani, *et al.*, 2015). Dibandingkan dengan metode fisika maupun kimia penggunaan metode ini dianggap sebagai salah satu solusi yang lebih menguntungkan dalam upaya mengatasi adanya pencemaran logam berat, dikarenakan metode bioremediasi dinilai lebih efektif dan ramah lingkungan dalam mereduksi pencemar logam berat secara permanen tanpa meninggalkan residu atau dampak lain terhadap lingkungan perairan (Beoang, 2019; Rahadi, *et al.*, 2020; Kumar dan Gopal, 2015). Bioremediasi merupakan proses yang dapat digunakan dalam menurunkan konsentrasi polutan dan memperbaiki kualitas suatu lingkungan dengan menggunakan agen hayati seperti bakteri (Lutfi, *et al.*, 2018). Penggunaan bakteri dalam bioremediasi memiliki potensi untuk mengembalikan kondisi lingkungan yang tercemar logam berat mendekati rona lingkungan awal (Christita, *et al.*, 2018). Bakteri dapat digunakan pada proses bioremediasi karena bakteri dapat hidup di lingkungan yang tercemar konsentrasi

logam berat yang cukup tinggi dan dapat mereduksi logam berat dalam lingkungan (Lutfi, *et al.*, 2018).

Proses bioremediasi pencemaran logam berat di perairan dapat dilakukan oleh berbagai jenis bakteri seperti bakteri indigen, bakteri eksogen maupun bakteri kultur yang telah dimanipulasi secara genetik (Kumar dan Gopal, 2015). Namun secara umum, efisiensi dalam pengelolaan lingkungan yang tercemar logam berat sangat bergantung pada afinitas antara logam berat dan bakteri yang digunakan, maka dari itu penggunaan bakteri yang tepat pada saat melakukan bioremediasi merupakan hal yang sangat penting untuk di perhatikan, dan tingkat keberhasilan yang lebih tinggi dalam proses bioremediasi dapat dicapai dengan menggunakan bakteri indigenous yang di isolasi langsung dari lokasi yang tercemar (Beoang, 2019; Kumar dan Gopal, 2015).

Beberapa penelitian terdahulu melaporkan bahwa bakteri *Bacillus sp* (Ikerismawati, 2019), *Morganella morgani* (Lutfi *et al.*, 2018), dan *Pseudomonas sp.* (Chatterjee, *et al.*, 2016) merupakan bakteri indigenous yang di isolasi dari beberapa lokasi yang terkontaminasi, menunjukkan ketahanan yang luar biasa terhadap logam berat serta kemampuan yang baik dalam melakukan penyisihan logam berat dari lingkungan tercemar. Bakteri indigenous merupakan jenis bakteri isolasi yang secara alamiah hidup dan berasal dari lingkungan hidupnya dan dikultur secara *in vitro* sebagai starter dalam proses bioremediasi pencemaran suatu lingkungan (Fidiastuti dan Suarsini, 2017). Beberapa negara maju saat ini mulai memanfaatkan teknologi bioremediasi secara *in-situ* dengan menggunakan bakteri indigenous karena memiliki biaya yang lebih rendah (Dixit, *et al.*, 2015).

Selain itu, penggunaan bakteri indigenous dilakukan karena bakteri ini cenderung memiliki tingkat adaptasi dan resistensi yang lebih tinggi pada lingkungan yang tercemar logam berat dibandingkan menggunakan bakteri yang berasal dari luar lingkungan yang tercemar (Lutfi, *et al.*, 2018). Kemampuan yang melekat pada

bakteri indigenous tersebut dinilai lebih sesuai untuk digunakan dalam mengatasi tingginya paparan konsentrasi logam berat pada kondisi lingkungan yang ekstrim secara *in-situ* (Kumar dan Gopal, 2015).

Terlepas dari adanya penelitian yang membahas terkait penggunaan bakteri khususnya bakteri indigenous dalam bioremediasi pencemaran logam berat, nyatanya ketersediaan informasi dari berbagai penelitian yang ada masih terpecah-pecah. Sehingga untuk mendapatkan informasi yang lebih komprehensif guna mendukung kebutuhan dalam mengeksplorasi serta mengembangkan penelitian yang lebih baik, maka perlu adanya rujukan atau ringkasan yang dapat menjelaskan terkait poin-poin utama dalam melakukan bioremediasi pencemaran logam berat di perairan. Berdasarkan permasalahan tersebut dilakukan kajian literatur untuk menganalisis dan memberikan informasi terkait potensi pengaplikasian bakteri indigenous dalam bioremediasi pencemaran logam berat di perairan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana mekanisme bioremediasi pencemaran logam berat di perairan?
2. Bagaimana jenis dan kemampuan bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi pencemaran logam berat di perairan
3. Bagaimana potensi pemanfaatan bakteri indigenous dalam manajemen sumberdaya perairan?

1.3 Tujuan

1. Menganalisis mekanisme bioremediasi pencemaran logam berat di perairan.
2. Menganalisis jenis dan kemampuan bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi pencemaran logam berat di perairan.

3. Menganalisis potensi pemanfaatan bakteri indigenous dalam manajemen sumberdaya perairan.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat dari penyusunan kajian literatur ini yaitu sebagai sumber informasi ilmiah yang dapat digunakan dalam pengembangan penelitian yang lebih baik terkait pengaplikasian bakteri indigenous dalam proses bioremediasi. Selain itu, segala informasi yang termuat dalam kajian literatur ini dapat digunakan sebagai dasar dalam pengelolaan lingkungan hidup khususnya lingkungan perairan yang tercemar polutan logam berat dengan menggunakan mikroorganisme seperti bakteri indigenous.



2. METODE REVIEW

2.1 Konsep Dasar Kajian Literatur

Kajian literatur atau *literature review* merupakan kajian teoritis yang dilakukan dengan menggumpulkan, mempelajari, membandingkan dan mengelola data yang diperoleh dari berbagai sumber penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan topik permasalahan tertentu guna memperoleh perspektif baru atau titik tengah antara berbagai sumber pustaka yang digunakan (Mirzaqon dan Purwoko 2017; Prasela, *et al.*, 2020). Kajian literatur juga dapat artikan sebagai suatu metode penulisan dengan menganalisis, menguraikan dan menyimpulkan isi data yang ada pada penelitian sebelumnya guna dijadikan sebagai landasan menyelesaikan berbagai rumusan masalah (Rahardja, *et al.*, 2019; Yusuf dan Khasanah 2018).

Penulisan kajian literatur mengharuskan penulis untuk melakukan serangkaian kegiatan seperti mencari dan mengumpulkan sumber pustaka, membaca maupun mencatat poin-poin penting dari sumber pustaka yang kemudian akan diolah sebagai bahan penulisan untuk menciptakan suatu informasi (Jamil, *et al.*, 2020). Informasi data yang digunakan dalam penulisan kajian literatur dapat berasal dari berbagai sumber terpercaya baik secara online maupun secara offline seperti buku, artikel ilmiah, jurnal, majalah, dan terbitan-terbitan lain (Yusuf dan Khasanah 2018). Penulisan kajian literatur dapat dijadikan sebagai *context review*, karena sangat membantu dalam memberikan informasi suatu konteks secara *eksplisit* dan mempermudah pembaca dalam mengetahui permasalahan yang sedang diteliti ataupun permasalahan yang sedang dibahas (Prasela, *et al.*, 2020).

Metode merupakan prosedur, tahapan atau langkah-langkah yang

tersusun secara sistematis yang dapat digunakan untuk menyistematiskan dan mengorganisasikan suatu gagasan dalam proses penelitian karya ilmiah maupun penulisan (Nugrahani dan Al-Ma'ruf, 2015). Ada 3 jenis metode yang dapat digunakan dalam penulisan kajian literatur antara lain metode *systematic review* (terstruktur), *traditional review* (tidak terstruktur) dan gabungan antara *systematic* dan *traditional*. Namun metode yang digunakan dalam penulisan kajian literatur ini adalah metode *Systematic Literature Review* (SLR). Metode *systematic literature review* merupakan suatu metode yang digunakan untuk merujuk pada suatu riset atau metodologi penelitian tertentu yang dilakukan untuk mengumpulkan, mengevaluasi serta menginterpretasi data penelitian yang terkait pada fokus tertentu (Triadini, *et al.*, 2019). *Systematic literature review* juga dapat dikatakan sebagai bentuk dari *secondary studies*, data yang dimasukkan dalam penulisan merupakan data sekunder yang dikumpulkan dari beberapa studi yang kemudian akan dianalisis, diekstraksi dan dirangkum hasilnya berdasarkan transmisi topik yang digunakan secara sistematis (Yunanto dan Rochimah, 2017; Tian, *et al.*, 2017).

Adanya beberapa keterbatasan dalam suatu penelitian dapat menyebabkan informasi dari berbagai studi yang ada masih terpecah-pecah. Maka dari itu, penggunaan metode *systematic literature review* pada kajian literatur merupakan metodologi yang menjanjikan dibandingkan metode *traditional literature review* karena data yang diperoleh merupakan hasil sintesis dari berbagai sumber penelitian ilmiah, sehingga fakta yang dipaparkan akan lebih komprehensif (Tian, *et al.*, 2017; Willianto dan Kurniawan 2018). Metode ini pada prinsipnya memiliki kecenderungan menjawab tujuan dari rumusan masalah yang dibuat oleh penulis, hasil kesimpulan yang didapatkan dapat menunjukkan pengetahuan tentang suatu topik tertentu dalam penulisan (Kraus, *et al.*, 2020). Metode *systematic literature review* memiliki kelemahan seperti memakan waktu yang

lebih lama dalam penulisan dikarenakan sulitnya mencari literatur ilmiah yang sesuai dan proses penyusunan yang cenderung lebih lama karena pengerjaan hasil kajian literatur mengacu pada struktur yang sistematis sedangkan kelebihan metode ini yakni adanya transparansi dalam pengumpulan dan sintesis data yang menghasilkan tingkat objektivitas yang lebih tinggi (Kraus, *et al.*, 2020).

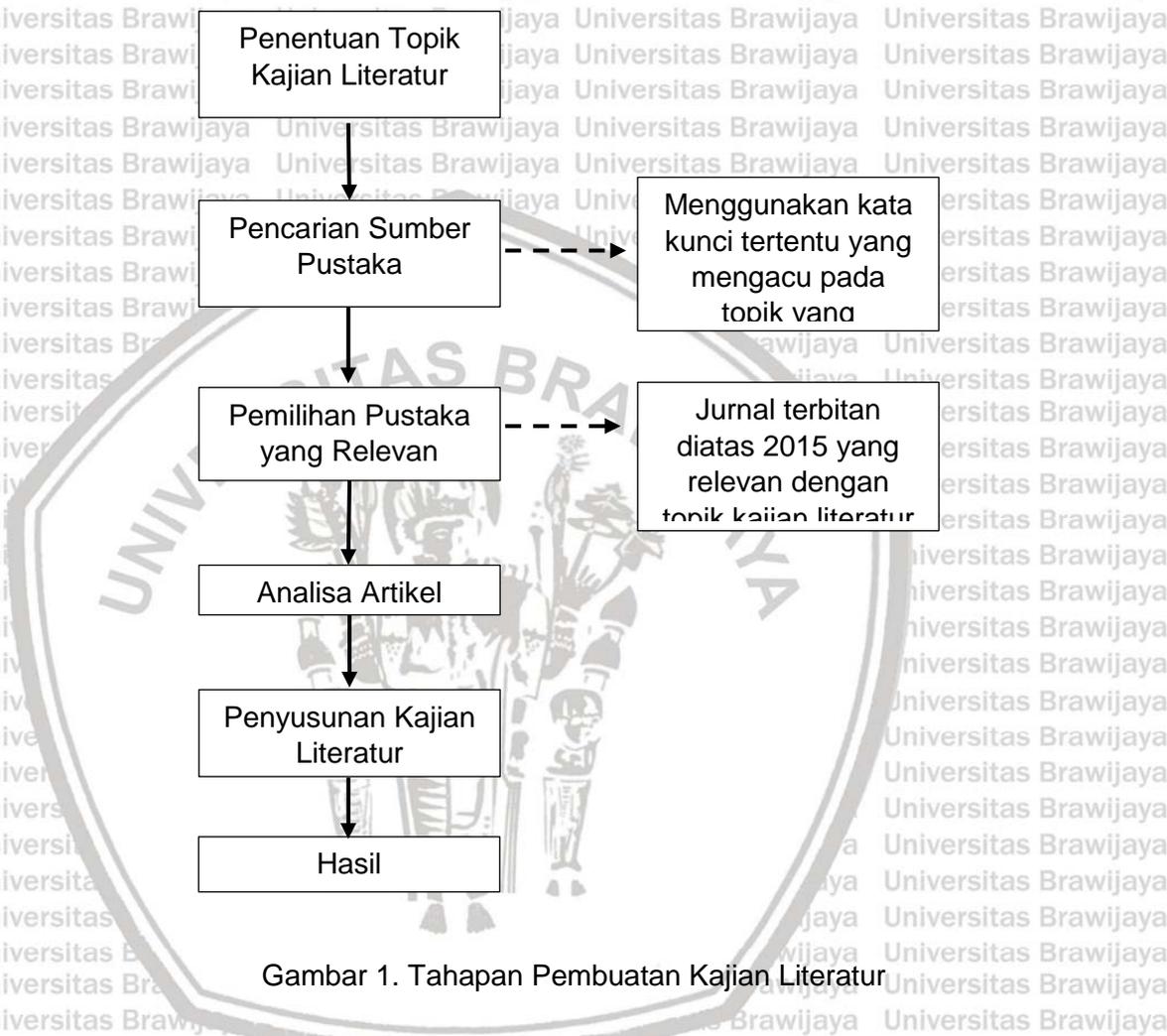
Data yang digunakan dalam proses kajian literatur dapat dianalisis menggunakan metode *systematic literature review* melalui pendekatan secara meta-analisis (teknik kuantitatif/statistik) maupun meta-sintesis (teknik kualitatif/naratif) (Wilianto dan Kurniawan 2018). Namun pada kajian literatur ini proses analisis data dilakukan dengan menggunakan pendekatan meta-sintesis.

Secara umum meta-sintesis dapat dibagi menjadi 2 yakni meta-agregasi dan meta-etnografi. Meta-agregasi bertujuan untuk menganalisis dan merangkum data dari berbagai hasil penelitian dengan menjawab tujuan atau rumusan masalah yang diangkat oleh peneliti atau penulis, sedangkan meta-etnografi bertujuan untuk mengembangkan suatu teori baru guna melengkapi teori yang sudah ada (Rachman dan Napitupulu, 2016).

2.2 Tahapan Pembuatan Kajian Literatur

Penulisan kajian literatur memiliki beberapa tahapan hingga dapat menghasilkan suatu tulisan. Penulisan kajian pustaka secara sistematis dapat dikelompokkan menjadi beberapa tahap seperti melakukan penentuan topik dan pengembangan tujuan, melakukan pencarian dan penyaringan sumber pustaka, mengevaluasi sumber pustaka berdasarkan kriteria tertentu, mengekstrak dan mensintesis data akan digunakan, melakukan penyusunan dengan menjawab tujuan dari topik (Kraus, *et al.*, 2020; Sondakh, 2017). Namun secara umum penulisan kajian literatur dapat dibagi menjadi 5 tahapan seperti pemilihan topik yang akan digunakan, melakukan pencarian sumber pustaka, melakukan

pemilihan sumber pustaka yang relevan, melakukan proses analisis dan sintesis sumber pustaka dan terakhir melakukan penyusunan penulisan (Rahayu, *et al.*, 2019). Tahapan yang dilakukan dalam kegiatan kajian literatur dapat di lihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Pembuatan Kajian Literatur

2.2.1. Penentuan Topik Kajian Literatur

Langkah pertama sebelum melakukan penulisan atau penyusunan kajian literatur adalah menentukan topik yang ingin digunakan. Topik dapat diartikan sebagai pokok kajian yang diambil dari suatu tema tertentu dalam sebuah kepenulisan. Pemilihan topik pada suatu penulisan karya ilmiah perlu pertimbangan beberapa faktor seperti (1) penguasaan materi pada topik yang

dipilih, (2) pemilihan topik yang menarik, (3) melakukan pemusatan atau penyempitan lingkup permasalahan, (4) memiliki ketersediaan data dan fakta objektif yang memadai, (5) memiliki pengetahuan terhadap prinsip-prinsip ilmiah dari topik yang akan dipilih dan (6) memadainya ketersediaan sumber yang digunakan sebagai acuan (Nugrahani dan Al-Ma'ruf, 2015). Setelah penentuan topik selesai dilakukan barulah dapat melakukan penetapan judul yang digunakan dalam kajian literatur.

Topik yang digunakan penulis dalam kajian literatur ini adalah terkait pengelolaan pencemaran lingkungan akibat polutan logam berat, namun karena topik tersebut masih terlalu umum maka dilakukannya pembatasan topik menjadi bioremediasi pencemaran logam berat menggunakan bakteri indigenous. Penulis memiliki latar belakang studi bidang manajemen sumberdaya perairan maka topik yang dipilih akan dipersempit lagi menjadi aplikasi bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi pencemaran logam berat di perairan. Topik tersebut dipilih karena masih terbatasnya penelitian yang membahas terkait penggunaan bakteri indigenous dalam upaya bioremediasi pencemaran logam berat di perairan khususnya yang berada di Indonesia. Maka, atas beberapa pertimbangan penulis memilih topik tersebut sebagai kajian utama dalam kajian literatur ini.

2.2.2. Pencarian Sumber Pustaka

Pencarian sumber pustaka yang dilakukan penulis yaitu mengandalkan pencarian pustaka secara daring dengan menggunakan mesin pencarian google.

Pustaka yang dianalisis berasal dari pencarian menggunakan beberapa mesin pencari dan basis data utama. Basis data tersebut adalah *Google Scholar*, *Research Gate*, *Elsevier Science Direct*, *Springer* dan lain-lain. Adapun sumber pustaka yang dicari berkaitan dengan topik yang telah ditetapkan yakni aplikasi bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi pencemaran logam berat di

perairan. Untuk mempermudah proses pencarian sumber pustaka yang sesuai dengan topik pembahasan perlu adanya pembuatan daftar kata kunci atau *keyword* yang akan digunakan (Cahyono, *et al.*, 2019). Berdasarkan Kamus Besar Bahasa Indonesia kata kunci dapat diartikan sebagai suatu kata yang dapat mewakili suatu gagasan atau konsep yang menandai suatu kelompok. Penggunaan kata kunci dalam pencarian sumber pustaka berfungsi untuk memudahkan pencarian dan pemahaman informasi dengan menghilangkan kata-kata pada kalimat yang bukan menjadi inti dari topik yang akan digunakan (Sanusi, 2019).

Kata kunci yang digunakan pada pencarian sumber pustaka adalah kata kunci berbahasa Indonesia dan berbahasa Inggris, hal ini dikarenakan kriteria sumber pustaka yang digunakan dalam penulisan ini meliputi 60% jurnal internasional dan 40% jurnal nasional. Selain itu, ketentuan penulisan kajian literatur ini menggunakan sumber pustaka dengan tahun terbit antara 2015-2021. Kata kunci yang digunakan pada penulisan kajian literatur ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kata Kunci dan database yang digunakan dalam pencarian pustaka

No	Kata Kunci	Database/ Search Engine
1.	Pencemaran logam berat	Google Scholar dan Research Gate
2.	Pencemaran logam berat di air	
3.	Logam berat	
4.	Bioremediasi logam berat	
5.	Bakteri indigenous	
6.	Bioremediasi logam berat menggunakan bakteri indigenous	Spinger Link, Elsevier Science Direct, Research Gate dan Google Scholar
7.	<i>Heavy metal</i>	
8.	<i>Heavy metal contamination</i>	
9.	<i>Bioremediation of heavy metal</i>	
10.	<i>Heavy metal tolerance</i>	
11.	<i>Biosorpsi of heavy metal</i>	
12.	<i>Bioaccumulation of heavy metal</i>	
13.	<i>Indigenous bacteria</i>	
14.	<i>Bioremediation of heavy metal using indigenous bacteria</i>	

Hasil dari pencarian sumber pustaka yang telah dilakukan berdasarkan kata kunci tersebut, kemudian diseleksi sesuai kriteria untuk dijadikan sebagai sumber data utama atau sebagai sumber jurnal utama. Hal penting yang harus dilakukan saat mencari sumber pustaka adalah melakukan pengecekan apakah sumber referensi yang ditemukan relevan dengan topik yang di inginkan, hal ini disebabkan sumber mesin pencarian seperti *google scholar* memiliki indeks kelompok terbawah yang menyebabkan sering terjadinya pengulangan beberapa judul sumber pustaka yang terkait dengan kata kunci pada mesin pencarian serta tercampurnya antara artikel yang memiliki reputasi dan artikel yang asal jadi (Cahyono, *et al.*, 2019; Nasution, 2017). Selain itu, jenis sumber pustaka yang semestinya dihindari penggunaannya adalah sumber artikel tidak asli seperti surat kepada editor, artikel yang dapat di edit dan artikel yang tidak *fulltext* atau hanya berisi abstrak (Herman dan Kusbaryanto, 2020)

2.2.3. Pemilihan Sumber Pustaka

Hasil pencarian sumber pustaka yang telah dilakukan berdasarkan kata kunci dan kesesuaian judul dengan topik yang digunakan pada kajian literatur dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pencarian Sumber Pustaka

No	Kata Kunci Pencarian	Search Engine	Jumlah Artikel
1.	Pencemaran logam berat	Google Scholar	65
2.	Pencemaran logam berat di air	Google scholar	45
3.	Logam berat	Google scholar	35
4.	Bioremediasi logam berat	Research Gate	39
5.	Bakteri indigenous	Google Scholar	31
6.	Bioremediasi logam berat menggunakan bakteri indigenous	Google Scholar	29
7.	Heavy metal	Google Scholar	26
8.	Heavy metal contamination	Spinger Link	46
9.	Bioremedation of heavy metal	Google Scholar	58
10.	Heavy metal tolerance	Elsevier Science Direct	41
11.	Biosorpsi of heavy metal	Google Scholar	32

Lanjutan tabel 2

No	Kata Kunci Pencarian	Search Engine	Jumlah Artikel
12.	<i>Bioacumulation of heavy metal</i>	Google Scholar	24
13.	<i>Indigenous bacteria</i>	Elsevier Science Direct	26
14.	<i>Bioremediation of heavy metal using indigenous bacteria</i>	Elsevier Science Direct	42

Berdasarkan kata kunci yang digunakan, terdapat banyak artikel relevan yang ditemukan penulis selama pencarian sumber pustaka. Artikel-artikel tersebut selanjutnya diseleksi dan dipilih sebagai sumber pustaka utama. Pemilihan sumber pustaka merupakan tahapan yang penting, karena sumber yang didapatkan dan dimanfaatkan sebagai data utama dalam penyusunan kajian literatur (Cahyono, et al., 2019). Proses pemilihan sumber pustaka dapat dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa kriteria seperti kesesuaian garis besar dari isi jurnal terhadap topik yang di pilih, artikel yang dipilih merupakan artikel jenis penelitian ilmiah (*original empirical research*) dengan tahun terbit antara 2015-2021. Jenis artikel *fulltext* dengan komposisi antara penggunaan jurnal internasional sebanyak 60% dan jurnal nasional sebanyak 40%. Berdasarkan kriteria tersebut dipilih sebanyak 20 jurnal utama dari 539 jurnal yang terdiri dari 5 jurnal nasional dan 15 jurnal internasional. Penggunaan 20 jurnal utama sebagai sumber utama telah memenuhi ketentuan minimum sumber yang digunakan dalam penulisan kajian literatur. Adapun artikel atau jurnal utama yang digunakan sebagai sumber utama dalam kajian literatur dapat dilihat pada Lampiran 2.

2.2.4. Analisa Sumber Pustaka

Data yang telah diperoleh pada tahap pemilihan sumber pustaka kemudian dianalisis dengan menggunakan metode *content analysis* (analisis isi). Metode analisis isi dapat diartikan sebagai metode untuk mengobservasi dan menganalisis isi data secara objektif dari penelitian sebelumnya kemudian data-data tersebut

akan membentuk inferensi secara sistematis sesuai konteks yang digunakan (Ahmad, 2018; Mirzaqon dan Purwoko 2017). Analisis data dalam sumber pustaka dapat dimulai dengan melakukan telaah kritis atau *critical appraisal*, yang bertujuan untuk menilai ketepatan poin-poin isi artikel dengan topik yang sedang dibahas. Hasil dari telaah kritis ini kemudian dilanjutkan dengan pendekatan *simplified approach*, yakni teknik menganalisis data dengan melakukan kompilasi dari setiap sumber pustaka yang telah didapatkan (Rukmana, *et al.*, 2017).

Proses analisis sumber pustaka juga dapat diartikan sebagai proses untuk memilih, membandingkan dan mengevaluasi setiap sumber referensi yang telah didapatkan kemudian di korelasikan dengan tujuan penulisan yang telah disusun sebelumnya agar membentuk suatu kesatuan materi dari kajian literatur. Selain itu, kegiatan ini memiliki tujuan untuk mempermudah proses interpretasi yang dilakukan guna menjaga kesesuaian isi *review* dengan topik yang diangkat dalam kajian literatur (Cahyono, *et al.*, 2019; Mirzaqon dan Purwoko 2017). Untuk mencegah dan mengatasi adanya kesalahan proses pengkajian informasi secara detail atau mendalam maka perlu dilakukan pengecekan antar sumber pustaka dan memperhatikan masukan dari dosen pembimbing.

2.2.5. Penyusunan Sumber Pustaka

Penyusunan sumber pustaka dilakukan setelah selesai mengumpulkan data dari hasil analisis sumber pustaka yang digunakan. Metode yang digunakan dalam penyusunan kajian literatur adalah metode *Systematic Literature Review* dengan pendekatan meta-sintesis jenis meta-agregasi. Pendekatan meta-agregasi dapat diartikan sebagai pendekatan secara kualitatif dengan mengolah berbagai data yang telah didapatkan untuk dirangkum dan disusun secara deskriptif sesuai dengan rumusan masalah yang diangkat (Pertiwi, 2019; Arafah dan Winarso, 2020). Pada pendekatan ini hasil sistesis atau agregat harus relevan

dengan topik yang diangkat maka dari itu perlu dilakukannya pembuatan kerangka penulisan kajian literatur seperti yang ditunjukkan oleh Lampiran 1, sebelum melakukan penyusunan kajian literatur, hal ini bertujuan untuk mempermudah penyusunan pustaka agar menjadi suatu kesatuan yang koheren. Hal terpenting yang harus diperhatikan pada tahap ini adalah proses parafrase pada sumber pustaka yang digunakan dalam penyusunan kajian literatur, kegiatan ini dilakukan untuk meminimalkan resiko terjadinya plagiarisme (Pertiwi, 2019).

Penyusunan kajian literatur meliputi penulisan pendahuluan, pembahasan atau isi kajian literatur dan kesimpulan serta saran. Pendahuluan pada kajian literatur biasanya berisi tujuan yang menajati topik atau fokus tertentu dari penulis. Bagian pembahasan biasanya berisi informasi yang ingin dipaparkan, penyajian informasi ini akan terbagi atas beberapa sub bab dan anak sub bab. Hal penting yang perlu diperhatikan saat penulisan pembahasan anatara lain melakukan ringkasan pada sumber pustaka agar informasi yang dipaparkan tidak bertele-tele, melakukan analisis dan interpretasi yang sesuai dengan kaidah keilmuan dan terakhir melakukan evaluasi hasil penulisan guna menghindari terjadinya penulisan yang melenceng dari topik yang dibahas. Sedangkan bagian kesimpulan dan saran biasanya berisi rangkuman yang menjawab tujuan dari penulisan kajian literature serta saran yang bisa diberikan kepada beberapa pihak terkait (Cahyono, *et al.*, 2019). Penulisan kajian literatur ini mengacu pada format penulisan naskah akademik di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya.

3. HASIL REVIEW

3.1. Pencemaran Logam Berat di Perairan

3.1.1. Pencemaran Perairan

Selama beberapa dekade terakhir pencemaran lingkungan merupakan permasalahan paling serius yang berkembang di seluruh dunia seiring dengan adanya proses pertumbuhan industrialisasi (Danish dan Wang 2019; Antoci, *et al.*, 2016; Bilgili, *et al.*, 2016; Gusman dan Waluyo, 2015). Berkembangnya teknologi dalam industrialisasi, menyebabkan terjadinya peningkatan pemanfaatan sumber daya alam yang diiringi dengan peningkatan buangan limbah pada lingkungan (Bilgili, *et al.*, 2016; Danish dan Wang 2019). Meskipun pencemaran lingkungan dapat disebabkan oleh adanya aktivitas alam, namun penyebab terbesar dari pencemaran lingkungan adalah dampak dari adanya aktivitas manusia guna memenuhi kebutuhan di era revolusi industri saat ini (Yani, *et al.*, 2020; Wahyudin, 2017; Christita, *et al.*, 2018; Naggar, *et al.*, 2018). Secara umum pencemaran lingkungan dapat didefinisikan sebagai masuknya suatu zat asing atau kontaminan yang memiliki dampak berbahaya karena bersifat toksik ke dalam suatu ekosistem lingkungan sehingga dapat menyebabkan terjadinya perubahan fungsi lahan dan penurunan kualitas pada suatu ekosistem lingkungan (Wahyudin, 2017; Gusman dan Waluyo, 2015; Appannagari, 2017).

Pencemaran lingkungan dapat terjadi pada berbagai ekosistem seperti tanah, air maupun udara (Hidayat, 2015; Gusman dan Waluyo, 2015; Baktiar, *et al.*, 2016; Appannagari, 2017). Namun, pencemaran lingkungan yang paling berbahaya merupakan pencemaran perairan, meskipun pada faktanya pencemaran perairan merupakan kejadian yang sudah biasa terjadi (Irawati, 2020; Naggar, *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2015). Pencemaran air memiliki implikasi yang

sangat serius karena air merupakan elemen penting dalam lingkungan yang digunakan sebagai penyangga utama dalam keberlangsungan hidup semua organisme termasuk dalam aktivitas manusia sehari-hari (Rijal, *et al.*, 2015; Halder dan Islam 2015; Naggar, *et al.*, 2018). Bahkan di beberapa negara seperti Zambia-Afrika (Liddle, *et al.*, 2015), Kathmandu-Nepal (Shrestha, *et al.*, 2016), Iran (Neshat, *et al.*, 2015) dan India (Nayak, *et al.*, 2019), air tanah yang diasumsikan sebagai sumber air yang lebih aman dibandingkan air permukaan terbukti telah tercemar oleh berbagai sumber polutan.

Ada banyak sumber polutan yang dapat menyebabkan terjadinya pencemaran perairan, namun saat ini kebanyakan pencemaran perairan berasal dari berbagai macam aktivitas manusia baik secara langsung maupun tidak langsung, dan pada umumnya dapat berpengaruh besar terhadap perubahan dan penurunan kualitas lingkungan perairan baik dari sifat kimia, fisika maupun biologi (Verma, *et al.*, 2017; Halder dan Islam 2015; Baktiar, *et al.*, 2016). Beberapa kegiatan yang dapat menyebabkan terjadinya pencemaran perairan antara lain: penggunaan pestisida dan insektisida pada kegiatan pertanian, kegiatan budidaya perikanan, kegiatan pelayaran (Indirawati, 2017; Yani, *et al.*, 2020), kegiatan pariwisata (Rijal, *et al.*, 2015), serta berbagai buangan limbah kegiatan industri dan limbah sampah rumah tangga (Djoharam, *et al.*, 2018; Halder dan Islam 2015; Verma, *et al.*, 2017).

3.1.2. Logam Berat

Logam berat merupakan istilah umum yang sering digunakan dalam menjelaskan suatu kelompok logam ataupun semi logam yang memiliki berat jenis lebih besar dari 5 gr/cm^3 (Mutiat, *et al.*, 2018; Sepahy, *et al.*, 2015; Ali dan Khan, 2017). Logam berat secara alamiah sudah ada di lingkungan baik di air, tanah maupun sedimen akibat dari adanya aktivitas alam seperti pelapukan batuan

mineral, letusan gunung berapi dan partikel logam di udara (Jebelli, *et al.*, 2017; Syaifullah, *et al.*, 2018; Ikhsan, *et al.*, 2020).

Di alam terdapat sebanyak lima puluh tiga unsur logam berat (Mutiat, *et al.*, 2018), secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yakni logam berat *esensial* dan logam berat *nonesensial* (Saha, *et al.*, 2016; Irhamni, *et al.*, 2017).

Logam berat *esensial* merupakan logam berat yang dibutuhkan oleh suatu organisme dalam jumlah tertentu, namun pada kondisi dan konsentrasi tertentu logam berat dapat berubah menjadi toksis yang berbahaya. Beberapa jenis logam berat esensial antara lain: Zn, Cu, Fe, Mn, Ni, Na, Mg, Co dan lain-lain (Saha, *et al.*, 2016; Handa dan Jadhav, 2017; Irhamni, *et al.*, 2017; Verma, *et al.*, 2017).

Sedangkan, logam berat non-esensial dapat dikatakan sebagai logam berat yang belum diketahui manfaatnya bahkan dapat bersifat toksik dan dapat menyebabkan kematian jika di konsumsi oleh makhluk hidup. Beberapa jenis logam berat non-esensial antara lain: Pb, Hg, Cd, Cr, Ag, Al dan lain-lain (Saha, *et al.*, 2016; Fahrudin, *et al.*, 2020; Irhamni, *et al.*, 2017; Syaifullah, *et al.*, 2018).

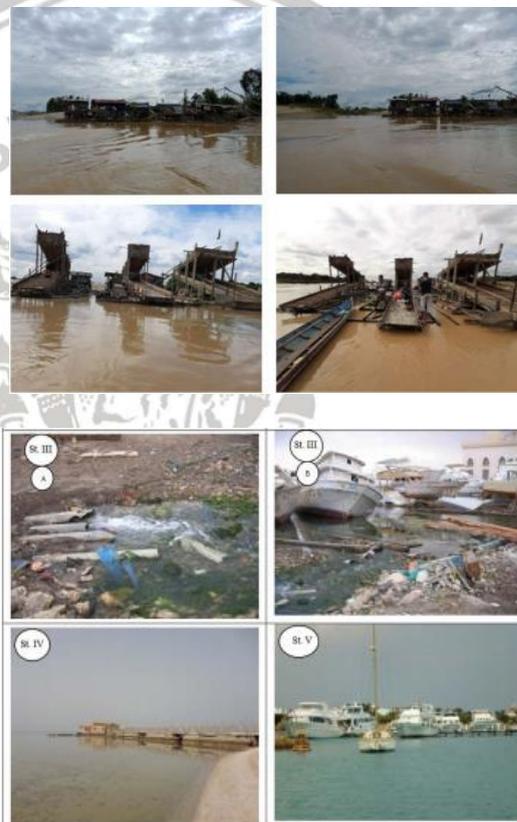
Pada prinsipnya tidak semua logam berat di lingkungan bersifat berbahaya untuk lingkungan. Beberapa jenis logam berat dibutuhkan oleh lingkungan khususnya oleh organisme akuatik sebagai mikronutrien dalam membantu mekanisme homeostasis serta pengikatan konstituen sel dan digunakan dalam membantu sistem metabolisme dalam organisme. Namun, yang menjadi penyebab toksisitas pada logam berat adalah struktur kimia yang membentuk logam berat, selain itu adanya akumulasi yang berlebihan akibat paparan logam berat yang berpotensi dalam meningkatkan kadar toksisitas pada suatu logam berat (Irawati, *et al.*, 2019; Templeton, 2015; Abdi dan Kazemi, 2015; Kurniawan dan Mustikasari, 2019).

3.1.3. Pencemaran Logam Berat di Perairan

Salah satu kontaminan yang sering ditemukan di badan air maupun sedimen baik di sungai, danau maupun laut adalah logam berat (Verma, *et al.*, 2017; Jebelli, *et al.*, 2017; Ali, *et al.*, 2016). Pencemaran logam berat di perairan merupakan salah satu permasalahan yang banyak menarik perhatian global dibanding pencemaran lainnya (Irawati, *et al.*, 2019; Benhalima, *et al.*, 2020). Hal ini disebabkan karena logam berat merupakan salah satu polutan anorganik yang cukup unik. Logam berat di perairan mengalami reaksi kimia yang paling berbahaya dan dapat berpotensi dalam menghambat terjadinya proses biodegradasi secara alami karena sifatnya yang tidak mudah terurai secara hayati. Logam berat merupakan polutan yang dapat terakumulasi secara biologis di jaringan, dapat mengalami biomagnifikasi bersama dengan tingkat trofik serta dapat mengendap pada dasar maupun badan perairan dalam jangka waktu yang lama (Christita, *et al.*, 2018; Handa dan Jadhav, Irawati, *et al.*, 2017; Jebelli, *et al.*, 2017; Verma, *et al.*, 2017; Zhang, *et al.*, 2018; Ikhsan, *et al.*, 2020; Banerjee, *et al.*, 2015; Ali, *et al.*, 2016).

Pencemaran logam berat di perairan dapat berasal dari berbagai sumber. Meskipun logam berat dapat bersumber dari alam, namun saat ini masuknya logam berat ke perairan tidak terlepas dari dampak yang ditimbulkan oleh adanya kegiatan antropogenik, seperti penggunaan pupuk fosfat dan pestisida pertanian yang mengandung logam, proses dari kegiatan penambangan dan peleburan logam berat, aktivitas bongkar muat kapal dan pelabuhan, kegiatan urbanisasi, serta pembuangan limbah dari berbagai aktivitas baik limbah industri maupun limbah domestik (Dey, *et al.*, 2016; Zhang, *et al.*, 2018; Ikhsan, *et al.*, 2020; Prabhakaran, *et al.*, 2018; Handa dan Jadhav, 2017; Fahrudin, *et al.*, 2020; Benhalima, *et al.*, 2020). Kondisi lingkungan yang tercemar polutan logam berat

akibat dampak dari aktivitas manusia dapat terlihat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2, yakni pencemaran pada sungai di Kalimantan akibat dari proses penambangan emas ilegal dan pencemaran di Laut Merah akibat dampak aktivitas pelabuhan. Logam berat di perairan terdistribusi dalam berbagai bentuk seperti bentuk terlarut, koloid, suspensi dan terikat pada sedimen (Harmesa, 2020), sedangkan masuknya logam berat ke dalam lingkungan dapat melalui beberapa mekanisme baik secara fisika, kimia maupun biologi seperti melalui proses akumulasi, dispersi, pengendapan maupun pelarutan (Fahrudin, *et al.*, 2020).



Sumber: Neneng, *et al.* (2020) dan Shaaban, *et al.* (2015)

Gambar 2. Kondisi perairan tercemar logam berat akibat aktivitas manusia

Beberapa jenis logam yang sering ditemukan di perairan antara lain logam berat mangan (Mn), kadmium (Cd), timbal (Pb), seng (Zn), merkuri (Hg), tembaga (Cu), kromium (Cr), dan lain sebagainya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3. Jenis kontaminasi logam berat di perairan

No	Lokasi	Sumber	Jenis Logam Berat									Referensi		
			As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb		Zn	
1.	Sungai Mithi, Mumbai	Aktivitas antropogenik industri							√					Pushkar, <i>et al.</i> , 2018
2.	Sungai Gangga, Bihar, India	Aktivitas alamiah yang berasal dari sedimen holosen yang mengandung tanah liat dan lanau	√											Satyapal, <i>et al.</i> , 2018
3.	Sungai Mithi, Mumbai	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah perkotaan dan industri				√								Handa dan Jadhav, 2017
4.	Danau Tempe, Sulawesi Selatan, Indonesia	Aktivitas antropogenik berupa limbah sanitasi serta limbah rumah tangga dan perkotaan		√		√						√		Yani, <i>et al.</i> , 2020
5.	Sungai Cisadane, Kabupaten Tangerang	Aktivitas antropogenik berupa buangan buangan limbah industri				√								Irawati dan Tahya, 2020
6.	Pantai Timur Surabaya	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah pabrik				√								Irawati, 2020
7.	Sungai Kemisan, Tangerang, Banten, Indonesia	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah industri				√					√	√		Irawati, <i>et al.</i> , 2017
8.	Badan Air Udairpur, India	Aktivitas antropogenik berupa pembuangan limbah industri										√		Verma, <i>et al.</i> , 2017
9.	Sungai Cikapundung, Jawa Barat, Indonesia	Aktivitas antropogenik berupa pembuangan limbah industri				√								Irawati, <i>et al.</i> , 2019
10.	Lembah Sukinda, Odisha, India	Aktivitas antropogenik berupa penambangan biji kromit				√								Prabhakaran, <i>et al.</i> , 2018
11.	Mata Air Babagorgor, Iran	Aktivitas alamiah berupa pelapukan batuan mineral	√											Jebelli, <i>et al.</i> , 2017

Lanjutan tabel 3

No	Lokasi	Sumber	Jenis Logam Berat										Referensi
			As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	
12.	Kolam air bekas galian tambang, Halmahera Timur, Maluku Utara	Aktivitas antropogenik berupa kegiatan penambangan								√			Christita, <i>et al.</i> , 2018
13.	Sungai Ciujung, Serang Banten	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah industri									√		Ikhsan, <i>et al.</i> , 2020
14.	Sungai Banger, Pekalongan, Indonesia	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah industri tekstil										√	Sasi, <i>et al.</i> , 2018
15.	Pantai Timur, Surabaya	Aktivitas antropogenik berupa limbah rumah tangga dan industri			√	√				√		√	Irawati, 2019
16.	Sungai Soltan Abad, Shiraz-Iran	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah rumah tangga dan industri serta menggunakan pupuk pada pertanian			√								Kafilzadeh dan Saberifad, 2016
17.	Sungai Seybouse, Algeria	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah industri tomat kalengan dan marmar serta aktivitas pertanian		√		√							Benhalima, <i>et al.</i> , 2020
18.	Laut Merah, Mesir	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah industri		√		√	√		√	√	√	√	Shaaban, <i>et al.</i> , 2015
19.	Sungai Sukolilo, Indonesia	Aktivitas antropogenik berupa buangan limbah industri				√							Irawati dan Tahya, 2021
20.	Air tanah, Burdwan Benggala Barat, India	Aktivitas alamiah kerak bumi dan dampak aktivitas antropogenik	√										Dey, <i>et al.</i> , 2016
Keterangan: Standar maksimum logam berat di lingkungan perairan menurut World Health Organization (2017), dalam satuan mg/L= As: 0.01, Cr: 0.05, Cd: 0.03, Cu: 2, Ni: 0.2, Pb: 0.01, Zn: 1.5, Hg: 0.002, Fe: 0.3 Mn: 0.4.													

3.1.4. Dampak Pencemaran logam berat

Pencemaran logam berat di lingkungan perairan dapat berdampak pada kritisnya keberadaan sumber daya air yang layak guna, terjadinya pendangkalan perairan serta terjadi perubahan tatanan lingkungan (Halder dan Islam 2015; Yani, *et al.*, 2020). Keberadaan logam berat di perairan tidak hanya berpengaruh terhadap kualitas perairan tetapi juga pada organisme (Christita, *et al.*, 2018). Hal ini dikarenakan masuknya logam berat ke dalam lingkungan perairan akan cenderung langsung menyebar ke dalam jaringan makhluk hidup dan menyebabkan berbagai dampak yang tidak diinginkan (Alencar, *et al.*, 2017).

Beberapa penelitian melaporkan jika akumulasi paparan logam berat di perairan dapat meningkatkan tingkat toksisitas dari suatu logam berat dan sangat berbahaya jika terkonsumsi seperti yang ditunjukkan pada Lampiran 3. Tingginya konsentrasi paparan logam berat dapat menyebabkan terganggunya berbagai aktivitas antara komponen abiotik dan biotik baik secara fisika, kimiawi maupun biologi (Irawati, 2020; Handa dan Jadhav, 2017). Konsentrasi paparan logam berat yang semakin tinggi dapat menyebabkan terganggunya mineral nutrisi penting pada sistem kehidupan, hal ini terbukti dengan terganggunya fungsi organ vital pada organisme (Benhalima, *et al.*, 2020).

Paparan logam berat juga dapat mempengaruhi proses fisiologi biokimia, histologi atau morfologi, perilaku dan reproduksi pada organisme perairan bahkan jika konsentrasi logam berat telah melewati ambang batas dapat menyebabkan kematian pada organisme sehingga berdampak pada penurunan biodiversitas (Aminah dan Nur, 2018; Halder dan Islam 2015). Bagi manusia logam berat di perairan yang masuk ke dalam rantai makanan akan sangat berbahaya bagi kesehatan karena dapat menyebabkan berbagai dampak berbahaya seperti karsinogenik, mutagenik, dan teratogenik (Ikhsan, *et al.*, 2020).

3.1.5. Teknologi Mengatasi Pencemaran Logam Berat

Pencemaran logam berat sudah jelas berpotensi bahaya bagi lingkungan dan organisme. Dampak negatif yang ditimbulkan oleh pencemaran logam berat saat ini juga telah memunculkan banyak kekhawatiran bagi masyarakat global. Meskipun secara umum alam memiliki kemampuan yang tinggi dalam memperbaiki kualitas perairan akibat pencemaran, namun untuk mengoptimalkan pemulihan lingkungan akibat pencemaran yang melewati ambang batas perlu dilakukannya penanganan secara lebih lanjut menggunakan pengembangan metode remediasi baik secara konvensional melalui metode fisika dan kimia maupun secara non-konvensional melalui metode biologi (Christita, *et al.*, 2018; Irawati, 2020; Handa dan Jadhav, 2017).

a. Fisika

Pendekatan fisika merupakan tahap awal yang dapat dilakukan dalam mengatasi adanya pencemaran logam berat di perairan. Beberapa metode atau pendekatan secara fisika yang dapat digunakan dalam mengatasi pencemaran logam berat di lingkungan adalah metode penyaringan, pengendapan, teknologi membran, *evaporation recovery*, *reverse osmosis* dan *ion exchange* (Ikhsan, *et al.*, 2020; Chatterjee, *et al.*, 2016). Meskipun metode fisika dapat menciptakan tingkat pembersihan logam berat dalam volume yang relatif besar namun pada realitanya kebanyakan metode fisika memiliki keterbatasan. Penerapan metode *ion exchange* sering kali tidak efektif untuk diterapkan karena metodenya tidak spesifik, sensitif terhadap perubahan pH serta memerlukan biaya yang lebih besar, terutama jika digunakan secara komersial dalam mengatasi paparan logam berat dengan konsentrasi yang tinggi (Irawati, *et al.*, 2017; Yani, *et al.*, 2020). Selain itu, metode teknologi membran atau *reverse osmosis* juga dinilai tidak efisien untuk diterapkan dalam lingkungan karena memerlukan energi serta biaya yang cukup

mahal dalam prosesnya. Metode *reverse osmosis* memiliki keterbatasan masa guna membran karena sifat membran yang cepat kotor dan mudah tersumbat oleh bahan organik dan padatan lainnya, dan juga metode ini menghasilkan residu berupa lumpur yang terkontaminasi sehingga perlu hati-hati dalam proses pembuangannya (Shaaban, *et al.*, 2015; Jebelli, *et al.*, 2017).

b. Kimia

Selain menggunakan metode fisika ada beberapa metode kimia yang dapat digunakan dalam mengatasi adanya pencemaran logam berat seperti pengendapan kimia, penguapan/presipitasi kimia, pelapisan listrik, oksidasi/reduksi kimia, perawatan elektrokimia dan lain-lain (Verma, *et al.*, 2017; Jebelli, *et al.*, 2017; Ikhsan, *et al.*, 2020; Prabhakaran, *et al.*, 2018). Meskipun metode kimia memiliki tingkat efisien yang cukup baik untuk pengelolaan perairan yang terkontaminasi logam berat, namun metode-metode kimia yang digunakan memiliki banyak kerugian. Kerugian yang sering ditimbulkan antara lain tidak menarik secara komersial karena kebutuhan energi dan penggunaan reagen yang tinggi sehingga biaya yang dikeluarkan cukup mahal, penghilangan logam yang tidak dapat diprediksi serta terbentuknya pencemaran sekunder atau residu berupa endapan lumpur sehingga metode ini dinilai kurang efektif untuk digunakan (Verma, *et al.*, 2017; Kafizadeh dan Saberifard, 2016; Jebelli, *et al.*, 2017; Shaaban, *et al.*, 2015).

c. Biologi

Beberapa metode konvensional telah digunakan untuk memulihkan situs yang terkontaminasi logam berat tetapi tidak dapat menghilangkan logam berat secara permanen (Handa dan Jadhav, 2017). Sehingga untuk saat ini metode non-konvensional seperti menggunakan agen biologi merupakan solusi alternatif yang dinilai sangat membantu dalam mengurangi toksisitas pencemaran logam berat di lingkungan (Handa dan Jadhav, 2017; Verma, *et al.*, 2017). Penggunaan agen

biologi dalam mengatasi pencemaran logam berat di lingkungan merupakan sasaran utama bagi kebanyakan penelitian karena pendekatan ini memiliki banyak sekali kelebihan seperti pengaplikasian yang ramah lingkungan karena tidak memerlukan penambahan zat kimia, biaya yang digunakan cukup rendah, memiliki efisiensi yang tinggi untuk digunakan dalam skala volume yang besar, menarik secara komersial karena dapat menyerap logam berat berkali-kali dalam satu waktu, dan mudah untuk digunakan (Ikhsan, *et al.*, 2020; Irawati dan Tahya, 2020).

Pada pendekatan biologi ada beberapa mekanisme umum yang dapat diaplikasikan seperti fitoremediasi, bioremediasi, bioaugmentasi, biosorpsi, bioakumulasi, biopresipitasi, bioleaching, dan lain sebagainya dalam mereduksi logam berat di lingkungan. Mekanisme-mekanisme tersebut dapat dilakukan oleh berbagai macam organisme seperti jamur, tanaman, khamir, bakteri, algae maupun plankton (Kafilzadeh dan Saberifard, 2016; Irawati, *et al.*, 2017; Prabhakara, *et al.*, 2018; Harmesa, 2020).

3.2. Bioremediasi Logam Berat oleh Bakteri Indigenus

Pencemaran logam berat di lingkungan perairan meningkatkan peluang kerusakan pada ekosistem perairan bahkan akan berpengaruh buruk terhadap keberlangsungan makhluk hidup jika memasuki rantai makanan dan terakumulasi terhadap organisme hidup. Maka dari itu berbagai metode bioremediasi baik secara *in-situ* maupun *ex-situ* telah diselidiki dan direkomendasikan sesuai dengan kondisi lingkungan yang berbeda. Untuk mendapatkan hasil yang efektif perlu adanya pemilihan agen biologi yang sesuai dengan kebutuhan. Salah satu, agen biologi yang dapat diterapkan dalam proses bioremediasi khususnya secara *in-situ* adalah dengan menggunakan bakteri indigenus. Penggunaan bakteri ini dikarenakan potensinya yang dapat diaplikasikan diberbagai jenis kontaminan logam berat dan berbagai keadaan lingkungan (Azubuike, *et al.*, 2016).

3.2.1. Bioremediasi

Pengendalian pencemaran merupakan upaya yang dapat dilakukan dalam memaksimalkan dampak positif dan meminimumkan dampak negatif. Untuk mencapai hal ini, teknologi bioremediasi diperlukan guna meminimalisir kontaminan dan memperbaiki kondisi lingkungan yang tercemar (Osman, *et al.*, 2015; Christita, *et al.*, 2018; Irawati, *et al.*, 2019). Bioremediasi merupakan salah satu pendekatan dalam bidang biologi yang dapat digunakan untuk mendetoksifikasi (menurunkan, mengubah, menghilangkan) kontaminasi polutan pada lingkungan dengan memanfaatkan mikroorganisme (Handa dan Jadhav, 2017; Christita, *et al.*, 2018; Kafilzadeh dan Saberifard, 2016) seperti jamur, khamir, mikroalga maupun bakteri sebagai agen bioremediator (Kafilzadeh dan Saberifard, 2016; Verma, *et al.*, 2017). Penggunaan metode bioremediasi dalam mengatasi pencemaran di lingkungan merupakan alternatif solusi untuk digunakan karena dirasa lebih efektif, ekonomis karena biaya yang dikeluarkan lebih murah, serta aman dan ramah lingkungan karena tidak menimbulkan adanya pencemaran sekunder (Osman, *et al.*, 2015; Handa dan Jadhav, 2017; Prabhakaran, *et al.*, 2018; Kafilzadeh dan Saberifard, 2016).

Secara umum pengaplikasian bioremediasi dapat terbagi menjadi 2 teknik yakni secara *in-situ* maupun secara *ex-situ*. Bioremediasi secara *in-situ* merupakan penerapan metode bioremediasi yang dilakukan secara langsung pada lokasi tanpa adanya pemindahan media dan biasanya cenderung menggunakan mikroorganisme asli dari lingkungan tanpa adanya proses rekayasa pada bioremediator. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menerepakan bioremediasi secara *in-situ* agar meningkatkan keberhasilan proses bioremediasi yakni ketersediaan unsur hara pada lokasi sebagai sumber nutrisi bagi mikroorganisme, status akseptor elektron serta kondisi lingkungan perairan.

Beberapa jenis bioremediasi in-situ yang sering di gunakan dalam penelitian adalah bioventing, bioaugmentasi, biostimulan, bioattenuation dan biosparging (Azubuike, *et al.*, 2016; Kapahi dan Sachdeva, 2019).

Teknik *ex-situ* merupakan penerapan metode bioremediasi secara tidak langsung pada lokasi atau dalam hal ini melibatkan adanya pemindahan dari lokasi asli yang tercemar untuk dilakukan proses lebih lanjut. Penggunaan teknik *ex-situ* dalam bioremediasi cenderung terjadi proses rekayasa pada mikroorganisme yang digunakan, selain itu ada beberapa hal yang harus diperhatikan dalam penerapan teknik antara lain terkait jenis organisme yang di aplikasikan, jenis dan tingkat pencemaran logam berat serta biaya yang harus dikeluarkan. Beberapa contoh teknik bioremediation secara *ex-situ* yang sering digunakan adalah bioreactor, biopile, windrow, dan land farming (Azubuike, *et al.*, 2016).

3.2.2. Bakteri Indigenous

a. Bakteri

Mikroba merupakan salah satu mikroorganisme berukuran mikro yang memiliki banyak sekali manfaat (Ikhsan, *et al.*, 2020). Bakteri merupakan salah satu mikroorganisme bersel tunggal yang diketahui memiliki kemampuan untuk bertahan hidup di berbagai jenis lingkungan, seperti di tanah, air, mata air panas, dasar laut bahkan di dalam kerak bumi. Berdasarkan bentuk morfologinya mikroorganisme bakteri dapat dibedakan menjadi beberapa jenis antara lain bakteri dengan bentuk batang (*basil*), coccus (*staptococcus*) dan spiral (*spirillum*) yang biasanya memiliki diameter ukuran sebesar 0,2 mikrometer (μm) dengan panjang antara 2-8 mikrometer (μm) (Osman, *et al.*, 2015).

Berdasarkan sifat kimia dan fisik dinding sel bakteri dapat di bedakan menjadi bakteri gram positif dan bakteri gram negatif. Bakteri gram positif memiliki ciri khas berupa dinding sel yang lebih tebal dan sederhana dengan jumlah

peptidoglikan yang relatif lebih banyak dibandingkan bakteri gram negatif (Christita, *et al.*, 2018; Irawati, 2020), sementara dari segi struktural bakteri gram negatif cenderung lebih kompleks dibandingkan bakteri gram positif (Fahrudin, *et al.*, 2020). Bakteri gram positif memiliki kadar peptidoglikan yang cukup tinggi, pada setiap peptidoglikan terdapat asam teikoat yang mengandung fosfodiester. Asam teikoat memiliki fungsi sebagai penyedia muatan negatif yang membantu bakteri dalam pertukaran ion sebagai bentuk pertahanan diri terhadap paparan logam berat. Bakteri gram negatif tidak memiliki asam teikoat melainkan lipopolisakarida yang sangat anionik terhadap membran luar dan dapat menyebabkan terjadinya peningkatan regulasi antioksidan endogen, hal inilah yang menyebabkan bakteri gram negatif memiliki kemampuan dalam mengikat logam berat (Christita, *et al.*, 2018; Irawati, 2020; Sasi, *et al.*, 2018).

Bakteri di lingkungan secara alami memiliki peranan yang berbeda-beda. Belakangan ini penggunaan bakteri sebagai remediator dalam bioremediasi banyak dilakukan oleh beberapa peneliti dalam menghilangkan, mendegradasi serta menonaktifkan berbagai kontaminan seperti limbah radioaktif, produk hidrokarbon, mikroplastik, metaloid maupun logam berat di lingkungan (Guzman, *et al.*, 2016; Dixit, *et al.*, 2015). Beberapa bakteri merupakan organisme penting dalam rantai makanan yang memiliki kemampuan sebagai pengurai dalam merubah seyawa yang semula tidak dapat larut menjadi bentuk yang dapat di evaluasi oleh organisme lain di lingkungan perairan. Namun pada kondisi lingkungan tertentu khususnya pada kondisi lingkungan perairan yang buruk bakteri dapat mempengaruhi ekosistem serta kesehatan manusia karena dianggap sebagai mikroorganisme pantogen yang berbahaya bagi lingkungan dan makhluk hidup lainnya (Osman, *et al.*, 2015).

b. Bakteri Indigenous

Bakteri indigenous dapat dikatakan sebagai bakteri pribumi atau bakteri lokal yang berasal dari lokasi bakteri tersebut ditemukan. Dalam arti lainnya bakteri indigenous merupakan bakteri pengurai yang secara alami hidup bebas pada berbagai ekosistem lingkungan. Untuk memperoleh bakteri indigenous proses yang harus dilakukan adalah dengan melakukan isolasi bakteri pada suatu lingkungan (Kamsina, *et al.*, 2017; Anggriany, *et al.*, 2018).

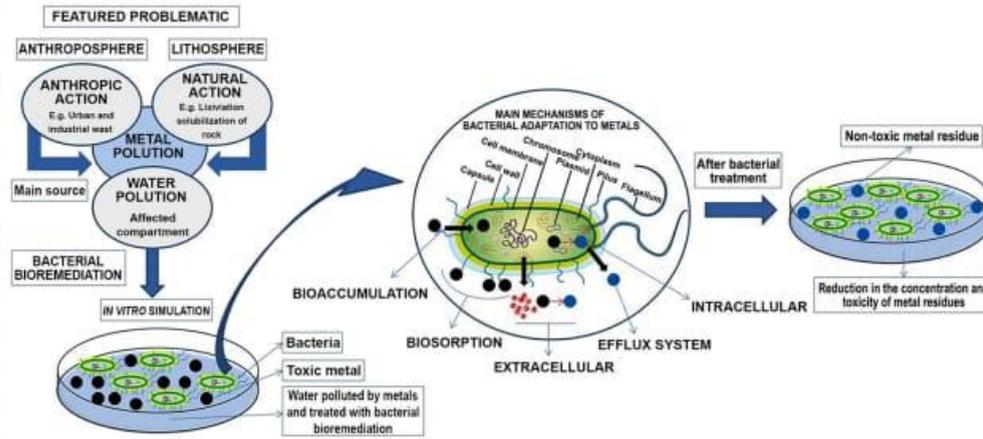
Belakangan ini banyak penelitian yang menggunakan bakteri indigenous dalam pengelolaan lingkungan berbasis bioteknologi. Hasil dari beberapa penelitian tersebut menunjukkan jika bakteri indigenous dapat memberikan informasi baru terkait keanekaragaman bakteri yang tinggi sehingga peluang yang dihasilkan dalam mengatasi situs yang terkontaminasi cenderung lebih tinggi. Penggunaan bakteri indigenous memungkinkan akan ditemukannya spesies baru yang lebih resisten. Selain itu, bakteri indigenous dapat mentolerir kontaminan dengan cara yang berbeda yang memungkinkan dalam memainkan peran yang penting dalam mengatasi lingkungan yang terkontaminasi (Irawati, *et al.*, 2017; Irawati dan Tahya, 2020).

Penggunaan bakteri indigenous dalam proses bioremediasi banyak dilakukan karena ukuran bakteri yang kecil namun kapabilitas responsif yang dimiliki dalam mengatasi pencemaran lingkungan sangat baik. Sumber nutrisi yang dibutuhkan oleh bakteri ini tidak mahal dan sudah tersedia di alam. Selain itu, bakteri indigenous memungkinkan untuk dapat ditemukan di berbagai jenis biosfer, hal ini yang menyebabkan bakteri memiliki kemampuan yang sangat baik dalam beradaptasi pada berbagai kondisi lingkungan yang tercemar logam berat. Bakteri cenderung dapat digunakan sebagai salah satu bioremediator dalam mengurangi polutan logam berat yang ada pada sedimen maupun badan air (Christita, *et al.*, 2018; Irawati dan Tahya, 2020; Dash dan Das, 2015).

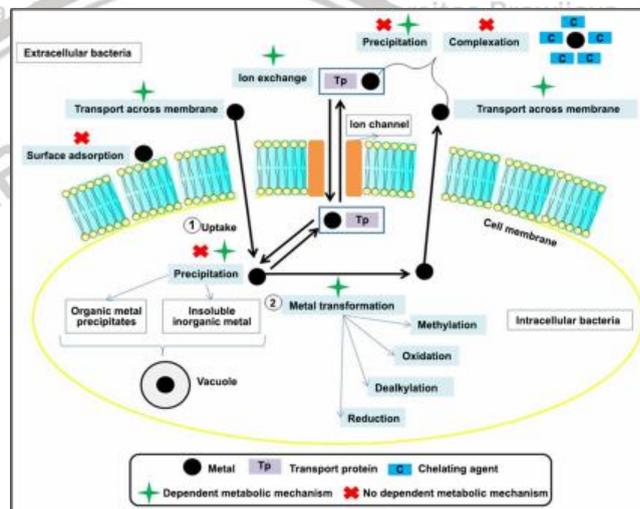
3.2.3. Mekanisme Bioremediasi oleh Bakteri Indigenous

Sebagian besar bakteri mengembangkan berbagai mekanisme baik secara langsung maupun tidak langsung sebagai bentuk pertahanan diri dalam menghadapi stres pada lingkungan akibat toksisitas dari paparan logam berat (Irawati, *et al.*, 2019; Irawati, *et al.*, 2017). Mekanisme yang diadopsi oleh setiap bakteri akan berbeda-beda, tergantung dari sifat dan jenis logam berat serta spesies bakteri yang tersedia pada lingkungan. Seperti yang terlihat pada Gambar 3A, mekanisme bioremediasi oleh bakteri secara umum dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis yakni secara ekstraseluler dan secara intraseluler (Lubis, *et al.*, 2019).

Secara ekstraseluler mekanisme yang dapat terjadi adalah mekanisme biosorpsi dan aktivitas enzim ekstraseluler, sedangkan secara intraseluler mekanisme yang dapat terjadi adalah mekanisme bioakumulasi, biotransformasi (oksidasi, reduksi, metilasi), biomineralisasi, sistem efflux yang dibantu oleh ATP, dan proses aktivitas enzimatik intraseluler (Lotlikar, 2019; Christita, *et al.*, 2018; Sasi, *et al.*, 2018; Irawati, *et al.*, 2019; Benhalima, *et al.*, 2020; Irawati dan Tahya, 2020). Berdasarkan beberapa mekanisme yang ada, mekanisme unggulan yang sering terjadi secara intrinsik dan sering dimanfaatkan dalam proses bioremediasi logam berat adalah mekanisme biosorpsi, bioakumulasi dan biotransformasi (Irawati, *et al.*, 2019; Igiri, *et al.*, 2018). Mekanisme bioremediasi logam berat didalam sel bakteri dapat dilihat pada Gambar 3B.



Sumber: Alencar, et al. (2017)



Sumber: Alencar, et al. (2017)

Gambar 3A. Mekanisme utama bioremediasi oleh mikroorganisme

3B. Mekanisme bioremediasi logam berat pada sel bakteri

a. Biosorpsi

Biosorpsi merupakan sebagai salah satu mekanisme potensial yang dapat digunakan untuk menghilangkan atau mengurangi kontaminan logam berat hingga mencapai batas minimum konsentrasi yang diterima oleh lingkungan (Irawati, et al., 2019). Hal ini dikarenakan biosorpsi memiliki beberapa keunggulan seperti pemanfaatannya yang ramah lingkungan, biaya yang digunakan relatif lebih terjangkau, dapat meminimalkan penggunaan reagen kimia, tidak sulit untuk menemukan nutrisi bagi bakteri, cukup efektif dan efisien dalam perlakuan

konsentrasi yang rendah dan tidak menimbulkan resiko keracunan maupun produk sampingan yang berpotensi sebagai pencemaran baru (Irawati, 2020).

Secara umum mekanisme biosorpsi sering kali disebut dengan mekanisme secara pasif atau adsorpsi, yaitu pengikatan logam berat secara ekstraseluler pada permukaan dinding sel yang terlepas dari proses metabolisme. Sedangkan mekanisme secara aktif akan melibatkan metabolisme dari biomassa hidup.

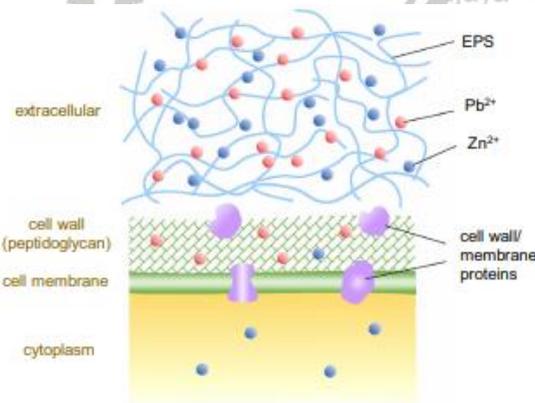
Proses biosorpsi terjadi secara perlahan akibat masuknya ion logam berat ke dalam metabolisme sel, atau pengikatan intraseluler. Biosorpsi lebih dikenal dengan istilah absorpsi intraseluler atau bioakumulasi (Irawati, *et al.*, 2020; Mosa, *et al.*, 2016).

Mekanisme biosorpsi merupakan mekanisme dengan sistem ekstraseluler yang terjadi di permukaan sel pada bakteri, sehingga permukaan sel memiliki peran yang sangat penting pada mekanisme biosorpsi logam berat. Permukaan sel bakteri merupakan media yang bersentuhan langsung dengan ion logam berat yang berada pada perairan dan sekaligus bertanggung jawab atas penyerapan polutan logam berat dan hasilnya akan berbeda bergantung pada jenis biomasanya (Irawati, *et al.*, 2015; Abdi dan Kazemi, 2015). Pada bakteri permukaan sel memiliki ion yang bermuatan negatif atau yang disebut dengan anion, sedangkan pada logam berat memiliki ion yang bermuatan positif, hal inilah yang menyebabkan terbentuknya sebuah interaksi antara permukaan sel pada bakteri dan logam berat yang menjadi langkah awal dalam pengikatan logam berat oleh bakteri (Fahrudin, *et al.*, 2020; Irawati, *et al.*, 2015).

Di bawah kondisi yang keras dengan adanya logam berat beracun dan antibiotik, bakteri biasanya menghasilkan zat polimer ekstraseluler (EPS) sebagai respon protektif. EPS bakteri adalah polimer alami dengan berat molekul tinggi yang disekresikan oleh mikroorganisme ke lingkungan. Secara umum EPS mengandung polisakarida dengan gugus fungsi yang dapat terionisasi seperti

hidroksil, karboksil, sulfat, dan fosfat. Gugus fungsi ini dapat dideprotonasi menjadi spesies anionik, yang berinteraksi dengan ion logam kationik melalui interaksi elektrostatik, yang mengakibatkan imobilisasi logam berat dalam EPS (Irawati, *et al.*, 2017).

Seperti halnya proses biosorpsi yang terjadi pada logam berat tembaga (Cu). Pada mekanisme biosorpsi logam berat Cu (II) fungsi gugus pada EPS berperan dalam menghasilkan muatan negatif dan kemungkinan daya tarik elektrostatik yang diduga sebagai mekanisme utama dalam proses biosorpsi (Mwadira, *et al.*, 2020; Irawati, *et al.*, 2017). Pada mekanisme biosorpsi logam berat seng dan timbal sebagian besar EPS ditemukan di supernatan setelah sentrifugasi, beberapa EPS akan tinggal di sekitar sel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, pada gambar tersebut korelasi dan visualisasi masing-masing komponen (sel bakteri, EPS, dan logam berat Pb (II)) menegaskan adsorpsi ion timbal ke dalam sel dan sekitarnya. Sel dikelilingi oleh sisa EPS, yang disekresikan oleh sel, protein dan karbohidrat dalam EPS akan bertanggung jawab untuk detoksifikasi logam berat melalui kompleksasi dengan ion logam. Akibatnya, EPS memiliki peran penting dalam adsorpsi berbagai logam berat beracun (Mwadira, *et al.*, 2020)



Sumber: Mwadira, *et al.* (2020).

Gambar 4. Mekanisme bioremediasi seng dan timbal

b. Bioakumulasi

Untuk melindungi diri dari toksisitas akibat paparan logam berat, bakteri mangadaptasi mekanise dengan menyerap logam berat ke dalam sel pada konsentrasi yang sesuai sebagai mikronutrien proses ini sering disebut dengan bioakumulasi intraseluler (Irawati, *et al.*, 2019). Bioakumulasi merupakan mekanisme penghapusan logam berat yang bergantung pada metabolisme organisme (Igiri, *et al.*, 2018; Mosa, *et al.*, 2016). Mekanisme bioakumulasi logam berat oleh bakteri merupakan salah satu cara bakteri dalam menanggapi toksisitas pada logam berat. Mekanisme dilakukan dengan mengangkut dan mengikat ion logam berat ke dalam sitoplasma menggunakan protein yang dimiliki oleh bakteri, protein ini sering dikenal dengan sebutan *metallothionein* (MT).

Sifat setoksifikasi yang dimiliki logam berat, maka protein *metallothionein* memiliki peran penting dalam proses imobilisasi logam berat di dalam sel bakteri, untuk melindungi terjadinya proses metabolisme kalatis enzim pada sel bakteri, sehingga bakteri mampu beradaptasi dengan memunculkan kemampuan resistensi dan remediasi terhadap logam berat (Benhalima, *et al.*, 2020; Fahrudin, *et al.*, 2020). Mekanisme bioakumulasi memungkinkan terbentuknya spesies logam yang kemudian hasil detoksifikasi logam berat akan di pompa keluar dari dalam sel melalui sitematikan efflux sistem, sehingga terjadilah penurunan logam berat (Lubis, 2019).

Protein *metallothionein* yang ada pada sel bakteri berbeda-beda dalam hal ini meliputi struktur primer, jumlah serta jenis logam berat yang dapat di ikat, ekspresi *metallothionein* diatur oleh logam berat melalui *metalosensors*. Sehingga menyebabkan tingkat akumulasi logam berat dari setiap bakteri juga berbeda-beda (Benhalima, *et al.*, 2020). Proses akumulasi logam berat terjadi hingga bakteri mencapai batas tidak dapat mentolerir paparan logam berat pada sel tubuhnya (Fahrudin, *et al.*, 2020).

Seperti halnya mekanisme bioakumulasi logam berat cadmium. Pada Gambar 5 bakteri berinteraksi dengan paparan logam berat di perairan melalui pengikatan kadmium pada permukaan sel bakteri, kemudian terjadi pengangkutan ion logam berat cadmium oleh MIT. Di dalam sel bakteri kemudian terjadi proses sekuestrasi intraseluler oleh bakteri metallothionein (MT) dan protein smtA. Pada bioakumulasi saat sel sudah terlalu jenuh untuk menaham logam berat maka hal selanjutnya yang terjadi adalah proses efflux sistem oleh transporte cadA (Nanda, *et al.*, 2019)



Sumber: Nanda, *et al.* (2019).

Gambar 5. Mekanisme bioremediasi kadmium

c. Biotransformasi

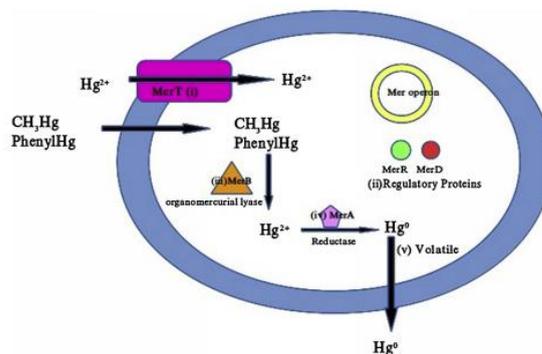
Biotransformasi merupakan mekanisme lainnya yang dapat digunakan untuk mengatasi paparan logam berat, mekanisme ini dapat merubah bentuk senyawa kimia dari logam berat (toksisitas, mobilitas, dan bioavailabilitasnya).

Senyawa logam berat yang semula toksik dan berbahaya menjadi bentuk yang relatif tidak berbahaya pada lingkungan (Kafilzadeh dan Saberifard, 2016). Pada proses biotransformasi, mekanisme dilakukan secara intraseluler di dalam sel bakteri (Neneng, *et al.*, 2020). Salah satu proses biotransformasi dapat terjadi pada logam berat merkuri (Hg) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6. Pada mekanisme ini logam berat Hg²⁺ direduksi menjadi logam berat yang volatile Hg⁰ oleh sekelompok enzim merkuri reduktase atau yang sering disebut sebagai

operon mer. Saat logam berat merkuri masuk ke dalam sel protein akan dikodekan oleh gen struktural MerT yang berfungsi untuk memindahkan ion merkuri.

Selanjutnya saat didalam sel bakteri protein MerR akan mengontrol regulasi positif dan negatif dari gen lain serta mengontrol ekspresi diri. Setelah itu operon gen merB (*encoding organomercurial lyase*) akan membentuk toleransi terhadap berbagai jenis merkuri baik *organomercurials*, *methylmercury* maupun *phenylmercury*.

Hal selanjutnya yang terjadi yakni enzim merkuri reduktase yang dikode oleh gen merA mengubah Hg^{2+} menjadi merkuri volatil (Hg^0) yang mudah menguap dan sedikit reaktif, yang kemudian hasil tersebut akan terdifusi keluar dari dalam sel bakteri. Operon mer terdiri atas beberapa gen yang dapat berinteraksi dengan berbagai protein fungsional, seperti operon MerR dan MerD merupakan protein yang berfungsi untuk regulasi atau pengaturan, operon MerT dan MerP merupakan protein yang berfungsi untuk transportasi dan opron MerA merupakan protein yang berfungsi untuk mengkatalisis/mereduksi merkuri. Beberapa gen tambahan seperti MerC, MerF dan MerB. MerB merupakan salah satu gen yang berperan dalam proses reduksi logam berat merkuri organik (Neneng, *et al.*, 2020; Nanda, *et al.*, 2020).

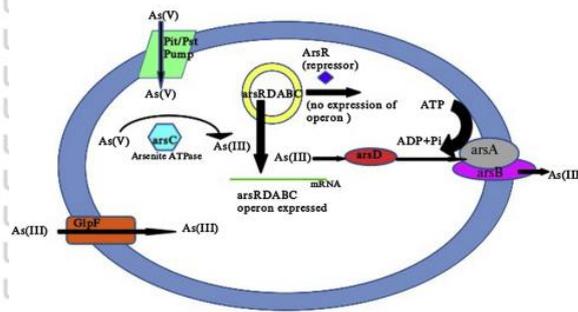


Sumber: Nanda, *et al.* (2019).

Gambar 6. Mekanisme bioremediasi merkuri

Sedangkan biotransformasi logam berat seperti arsenik dapat dilakukan oleh bakteri dengan mengembangkan sejumlah mekanisme detoksifikasi termasuk reduksi logam, penghabisan logam, pengikatan membran sel bakteri, metilasi, adsorpsi berat logam ke permukaan sel dan kompleksasi logam dengan eksopolisakarida (Dey, *et al.*, 2016; Jebelli, *et al.*, 2017). Di perairan perubahan redoks antara bilangan oksidasi As (III) dan As (V) terjadi akibat adanya reaksi metilasi yang menghasilkan oksanion termetilasi dari As (III) dan As (V) yang dilakukan oleh aox operon. Mikroorganisme memanfaatkan oksanion arsenik sebagai akseptor elektron terminal untuk respirasi aerob atau arsenik trivalent sebagai donor elektron untuk mendukung fiksasi kemoautotrofik karbondioksida (CO₂) menjadi karbon sel dan memainkan peran penting dalam proses penghilangan As dari lingkungan. Hasil akhir dari mekanisme ini adalah bentuk senyawa arsenik yang paling tereduksi secara kimiawi (Jebelli, *et al.*, 2017; Satyapal, *et al.*, 2017).

Mekanisme yang ditunjukkan oleh Gambar 7, ketika As (III) tidak ada, protein represor (ArsR) menempati operator dan membatasi ekspresinya sendiri serta gen lain dari operon ars. Kemudian masuknya As (V) ke dalam sel bakteri dimediasi oleh transporter fosfat (Pompa Pit dan Pst) sedangkan As (III) masuk melalui GlpF. Reduksi As(v) menjadi As (III) dikatalisis oleh ArsC (arsenat reduktase). Saat As (III) dikeluarkan dari sel melalui sistem penghabisan logam, arsenit ATPase terbentuk dari protein ArsA (subunit katalitik) dan ArsB (subunit membran). ArsD mentransfer As (III) ke ArsA ATPase. Ketika As (III) tidak ada, kemudian protein penekan (ArsR) menempati operator dan membatasi ekspresinya sendiri serta gen lain dari ars operon (Nanda, *et al.*, 2019).



Sumber: Nanda, *et al.*, (2019).

Gambar 7. Mekanisme bioremediasi arsenik

3.3. Aplikasi Bakteri Indigenus Terhadap Pencemaran Logam Berat

Penggunaan bakteri indigenus atau bakteri lokal yang di isolasi dari alam belakangan ini menjadi pilihan utama yang digunakan dalam proses bioremediasi (Irawati, 2020). Mekanisme penggunaan bakteri indigenus sebagai bioremediator pencemaran logam berat harus melalui beberapa proses tahapan antara lain isolasi strain bakteri dari lokasi yang tercemar logam berat, identifikasi jenis strain bakteri yang telah di isolasi, uji resistensi isolat bakteri dan uji kemampuan bakteri indigenus terhadap paparan logam berat (Christita, *et al.*, 2018; Fahrudin, *et al.*, 2020; Irawati, *et al.*, 2017).

3.3.1. Isolasi bakteri

Hal pertama yang harus diperhatikan dalam aplikasi bakteri indigenus adalah proses isolasi strain bakteri asli dari lokasi, proses ini dilakukan pertama kali untuk mempermudah mendapatkan kandidat strain bakteri yang memiliki tingkat resistensi yang baik terhadap paparan logam berat, sehingga potensi keberhasilan proses bioremediasi juga akan cenderung lebih tinggi (Irawati, *et al.*, 2017). Isolasi bakteri indigenus dilakukan pada beberapa lokasi yang diduga terpapar pencemaran logam berat baik. Sampel untuk proses isolasi bakteri dapat diambil dari sedimen perairan maupun dari badan perairan (Christita, *et al.*, 2018). Proses

isolasi bakteri dapat diawali dengan pembuatan media agar yang berfungsi sebagai media inokulasi dan pertumbuhan bakteri. Sampel bakteri yang telah diambil dari lokasi kemudian di inokulasi dan isolasi pada media yang telah disiapkan, media yang di inokulasi oleh bakteri juga telah diberikan sampel logam berat dengan konsentrasi tertentu (Christita, *et al.*, 2018; Verma, *et al.*, 2017).

Proses isolasi bakteri dapat dilakukan dengan rentang waktu antara 24 hingga 72 jam dengan kondisi suhu sebesar 37°C (Irawati, 2019; Irawati, 2020; Fahrudin, *et al.*, 2020).

3.3.2. Identifikasi Jenis Bakteri Indigenous

Identifikasi bakteri merupakan penelitian pendahuluan yang sangat penting untuk dilakukan sebelum melakukan kegiatan bioremediasi lingkungan yang tercemar logam berat, hal ini dikarenakan adanya keragaman bakteri yang hidup pada suatu lingkungan. Maka dari itu identifikasi bakteri dapat berpengaruh dalam penentuan bakteri isolat yang berpotensi untuk digunakan sebagai agen bioremediasi logam berat (Christita, *et al.*, 2018). Proses identifikasi bakteri dapat dilakukan dengan berbagai metode baik secara molekuler seperti amplifikasi 16S rDNA menggunakan teknik PCR (Verma, *et al.*, 2017; Sasi, *et al.*, 2018) maupun secara konvensional dengan menggunakan serangkaian proses seperti uji morfologi, uji fisiologi dan uji biokimia (Christita, *et al.*, 2018; Shaaban, *et al.*, 2015).

a. Uji Morfologi

Proses uji morfologi isolat bakteri dilakukan dengan menggunakan perlakuan pewarnaan gram. Proses pewarnaan gram bertujuan untuk menentukan karakteristik dari bakteri yang ditemukan berdasarkan bentuk dan ukuran selnya.

Proses pewarnaan gram ini dilakukan dengan penambahan zat pewarna berupa kristal violet, lugol dan larutan safranin. Hasil uji morfologi ini kemudian diamati dengan menggunakan bantuan mikroskop (Christita, *et al.*, 2018; Verma, *et al.*,

2017). Berdasarkan hasil uji morfologi bakteri dapat dibedakan berdasarkan bentuknya menjadi bakteri berbentuk basil, kokus dan spiral, sedangkan berdasarkan pewarnaan gram bakteri dapat diketahui dan dibagi menjadi bakteri gram negatif dan bakteri gram positif (Christita, *et al.*, 2018). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, pemberian pewarnaan gram pada bakteri dapat menunjukkan perubahan warna seperti merah pada bakteri gram negatif dan warna violet pada bakteri gram positif (Irawati, 2020)



(a) Bakteri gram negatif

(b) Bakteri gram positif

Sumber: Irawati, (2020)

Gambar 8. Hasil uji morfologi sel bakteri

b. Uji fisiologis

Proses pada uji fisiologi dilakukan pada sampel isolat bakteri. Hal ini bertujuan untuk mengetahui motilitas atau untuk mengetahui ada atau tidaknya pergerakan pada bakteri yang telah di isolasi (Christita, *et al.*, 2018; Verma, *et al.*, 2017). Hasil dari uji fisiologi dapat diketahui dengan memperhatikan pergerakan dari bakteri seperti ada atau tidaknya penyebaran bakteri yang berwarna putih berbentuk seperti akar di sekitar daerah yang di isolasi (Christita, *et al.*, 2018).

c. Uji Biokimia

Uji biokimia merupakan proses terakhir yang dilakukan dalam mengidentifikasi bakteri, pada proses uji biokimia terjadi beberapa proses pengujian meliputi pengujian indol, H₂S, fermentasi karbohidrat, katalase, sitrat, dan lisin dekarboksilase (Christita, *et al.*, 2018; Verma, *et al.*, 2017). Uji indol pada pengujian biokimia bertujuan untuk mengetahui kemampuan isolate bakteri dalam

mendegradasi triptofan. Uji H₂S pada pengujian biokimia bertujuan untuk mengetahui kemampuan isolat bakteri dalam menghasilkan H₂S melalui reduksi thiodulfat. Uji fermentasi karbohidrat pada pengujian biokimia bertujuan untuk mengetahui kemampuan isolat bakteri dalam memfermentasikan dan mendegradasi karbohidrat tertentu melalui produksi asam dan gas. Uji katalase pada pengujian biokimia bertujuan untuk mengetahui kemampuan isolat bakteri dalam mendegradasi hidrogen peroksida melalui proses reduksi enzim katalase. Uji sitrat dalam pengujian biokimia bertujuan untuk mengetahui kemampuan isolat bakteri dalam memanfaatkan sitrat sebagai sumber energi dan karbon. Uji lisis dekarboksilase dalam pengujian biokimia bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri dalam menetralkan suatu lingkungan yang semula asam menjadi basa (Christita, *et al.*, 2018).

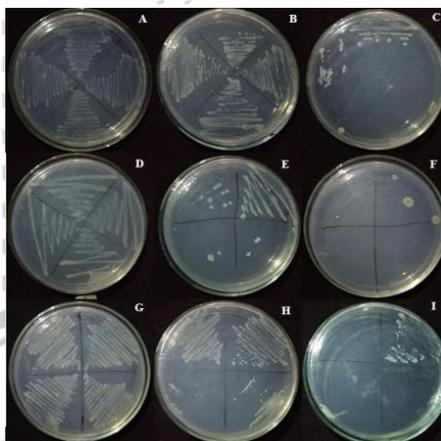
Studi telah mendokumentasikan dengan baik terkait bakteri yang diidentifikasi pada setiap lingkungan memiliki perbedaan jenis spesies bakteri dan jumlah populasi bakteri. Perbedaan tersebut dapat dikaitkan dengan perbedaan komposisi unsur hara pada lingkungan, latar belakang genetik dan kondisi pertumbuhan (Irawati, *et al.*, 2019; Bhagat, *et al.*, 2016). Berdasarkan beberapa penelitian yang pernah dilakukan, jenis isolat bakteri indigenous yang dapat ditemukan dan diidentifikasi dalam lokasi perairan yang terpapar logam berat dapat dilihat pada Lampiran 4. Hasil tersebut menunjukkan bahwa setiap perairan menunjukkan hasil keanekaragaman bakteri yang berbeda-beda. Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa sebagian besar jenis bakteri yang memiliki kemampuan dalam bertahan hidup pada kondisi lingkungan perairan yang tercemar logam berat adalah jenis bakteri gram negatif (Irawati, *et al.*, 2019).

3.3.3. Resistensi Bakteri Indigenus

Konsentrasi, jenis dan ketersediaan logam berat di perairan sangat mempengaruhi setiap aspek pada bakteri seperti terganggunya sistem metabolisme bakteri, perubahan struktural membran sitoplasma, penurunan dan perlambatan aktivitas pertumbuhan sel hingga kematian sel bakteri (Benhalima, *et al.*, 2020; Handa dan Jadhav, 2017; Yani, *et al.*, 2020). Untuk mengatasi keadaan tersebut populasi bakteri akan mengembangkan kemampuan adaptasi menjadi sistem resistensi yang kemudian akan menurunkan paparan logam berat di lingkungan (Irawati dan Tahya, 2021). Resistensi bakteri terhadap logam berat sangat berhubungan dengan resistensi antibiotik (Shaaban, *et al.*, 2015; Kumar, *et al.*, 2019). Paparan logam berat pada lingkungan menyebabkan terjadinya seleksi alam terhadap bakteri yang hidup pada lingkungan tersebut. Strain bakteri yang bertahan merupakan bakteri yang mampu melawan antibiotik. Hal ini terjadi akibat gen yang menyandi logam berat terletak bersamaan dengan gen resisten antibiotik. Dalam kondisi tertekan oleh senyawa logam berat, resistensi antibiotik pada organisme membantu dalam mempercepat proses adaptasi dengan penyebaran faktor resistensi dibandingkan dengan melakukan mutasi dan seleksi alam (Mutiat, *et al.*, 2018).

Sistem resistensi pada bakteri terjadi akibat adanya tekanan selektif dari lingkungan yang terpapar logam berat (Yani, *et al.*, 2020). Salah satu bentuk adaptasi bakteri pada lingkungan dapat dilihat dari proses pertumbuhan, karena paparan logam berat pada lingkungan cenderung menyebabkan terhambatnya proses pertumbuhan bakteri. Penurunan pertumbuhan bakteri pada lingkungan yang terpapar oleh logam berat diakibatkan oleh adanya interaksi antara ion logam berat dengan gugus negatif yang terdapat pada permukaan sel bakteri sehingga kemungkinan besar bakteri menyimpan energi yang seharusnya

digunakan dalam pertumbuhan diaktifkan untuk mempertahankan fungsi selulernya guna menahan adanya paparan toksisitas logam berat (Irawati dan Tahya, 2020; Guzman, *et al.*, 2016).



Sumber: Irawati dan Tahya, 2021

Gambar 9. Pertumbuhan bakteri pada konsentrasi yang berbeda.

Pada gambar tersebut dapat diketahui jika paparan logam berat tembaga dapat mempengaruhi pertumbuhan bakteri. Setiap spesies bakteri akan memberikan respon pertumbuhan yang berbeda pada setiap konsentrasi logam berat. Seperti halnya, pada gambar A, B, dan C yang merupakan hasil resistensi bakteri *Enterobacter cloacae* yang memiliki konsentrasi tembaga sebesar 5 mM, sedangkan pada gambar D, E, dan F merupakan hasil resistensi bakteri *Enterobacter cloacae subsp.* yang memiliki konsentrasi tembaga sebesar 6 mM dan pada gambar G, H, dan I merupakan hasil resistensi bakteri *Serratia nematodiphila* yang memiliki konsentrasi sebesar 7 mM (Irawati dan Tahya, 2021).

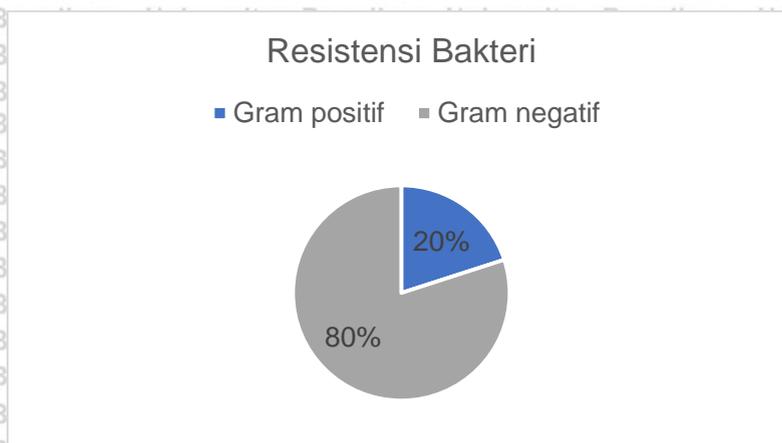
Dari hasil tersebut juga dapat menunjukkan jika paparan logam berat dapat menjadi toksik dan menghambat pertumbuhan serta aktivitas biokimia dari bakteri, hal tersebut sangat terlihat jelas pada biomassa bakteri (Irawati dan Tahya, 2021). Kemampuan bakteri dalam mencapai fase log dalam pertumbuhan merupakan salah satu hal yang menandakan bahwa bakteri tersebut memiliki resistensi terhadap bakteri (Irawati, *et al.*, 2019).

Setiap jenis isolat bakteri memiliki kemampuan resistensi yang berbeda-beda. Untuk mengetahui tingkat resistensi suatu isolat bakteri terhadap paparan logam berat dapat menggunakan uji MIC atau *minimum inhibitory concentration* (Kafilzadeh dan Saberifard, 2016; Irawati, *et al.*, 2017; Irawati, 2019; Irawati, *et al.*, 2019). Nilai MIC dapat digunakan sebagai indikator toleransi bakteri terhadap konsentrasi logam berat. Uji ini dapat menentukan konsentrasi minimum dari paparan logam berat yang dapat menghambat pertumbuhan isolat bakteri.

(Kafilzadeh dan Saberifard, 2016; Verma, *et al.*, 2017; Fahrudin, *et al.*, 2020; Irawati, 2019). Bakteri mulai mengalami penghambatan pertumbuhan jika nilai MIC sebesar 4 mM, namun bakteri juga dapat memiliki tingkat resistensi yang baik jika memiliki nilai MIC diatas 4.7 mM (Irawati dan Tahya, 2020; Irawati, *et al.*, 2020).

Pada proses bioremediasi, variasi nilai MIC pada setiap bakteri berbeda-beda karena perbedaan efek dan toksisitas pada masing-masing logam berat terhadap sel bakteri (Shaaban, *et al.*, 2015).

Secara umum, lingkungan yang terkontaminasi logam berat merupakan sumber adanya bakteri yang toleran terhadap logam berat. Beberapa penelitian membuktikan jika keberadaan bakteri indigenous pada lingkungan yang tercemar logam berat diduga memiliki kemampuan yang lebih baik dan lebih efektif dalam mereduksi adanya pencemaran logam berat, karena bakteri yang di isolasi langsung dari lokasi asal mampu mengembangkan kemampuan dalam mentoleransi paparan logam berat dengan mekanisme sekresi eksopolimer untuk bertahan hidup serta untuk mengikat logam berat dan menjadikannya sebagai sumber nutrisi dalam kelangsungan hidup mikroorganisme tersebut (Irawati, *et al.*, 2017; Yani, *et al.*, 2020; Dey, *et al.*, 2016; Christita, *et al.*, 2018; Irawati, 2020; Irawati, *et al.*, 2019; Irawati, *et al.*, 2020).



Gambar 10. Perbandingan resistensi bakteri

Kemampuan resistensi bakteri indigenous di lingkungan terjadi karena bakteri melakukan detoksifikasi terhadap pengaruh logam berat dengan adanya protein atau materil granula seperti polifosfat yang berfungsi untuk mengikat logam berat di dalam sel. Selain itu, tingkat resistensi bakteri terhadap logam berat juga berkaitan dengan ketersediaan gen resisten yang berada di dalam kromosom, plasmid dan transposon, gen resistan ini akan mengontrol mekanisme dari resisten bakteri (Fahrudin, *et al.*, 2020).

Berdasarkan hasil uji identifikasi yang ditunjukkan pada Lampiran 5 dan 6 dapat diketahui jika pada lokasi yang terpapar logam berat cenderung lebih banyak ditemukan bakteri jenis gram negatif. Hal ini juga terlihat pada Gambar 10, pada gambar tersebut bakteri yang dapat bertahan hidup dan memiliki resistensi yang tinggi merupakan bakteri jenis gram negatif dengan presentase sebesar 80%. Bakteri indigenous jenis gram negatif cenderung memiliki tingkat resistensi yang lebih tinggi dibanding gram positif dalam mengikat logam berat, hal ini dikarenakan pada gram negatif terdapat gugus karboksil pada membran yang berfungsi dalam penyisihan logam berat pada lingkungan (Irawati, 2019).

3.3.4. Kemampuan Bioremediasi Bakteri Indigenous

Kemampuan resistensi bakteri yang tinggi disertai dengan kemampuan

pertumbuhan bakteri pada fase log mengindikasikan terjadinya proses metabolisme yang aktif. Penurunan pertumbuhan bakteri dan kemampuan dalam melakukan bioremediasi logam berat disebabkan oleh terjadinya interaksi antara ion logam berat dengan gugus negatif yang berada di permukaan sel. Penurunan pertumbuhan ini secara tidak langsung menyebabkan terhambatnya metabolisme sel, karena logam berat mengikat dan memodifikasi enzim yang dibutuhkan oleh sel bakteri dalam melakukan metabolisme, mekanisme kompleks dalam metabolisme inilah yang bertugas dalam menetralkan toksisitas logam berat (Irawati dan Tahya, 2020).

Secara mekanisme dapat dijelaskan jika paparan logam berat dapat memicu terjadinya berbagai stress fisiologis pada bakteri. Pada kondisi fisiologis normal, kadar ROS cenderung akan tetap rendah akibat adanya aktivitas pada metabolisme pelindung tertentu seperti katalase, superoksida dismutase dan *glutathione reductase*. Namun sebaliknya kadar ROS pada bakteri akan meningkat apabila pada pertumbuhan bakteri terjadi paparan logam berat, maka dari itu untuk mengatasi keadaan stress tersebut bakteri memproduksi peroksida lipid atau yang biasa disebut dengan *malondialdehid* (MDA). Selain itu, dari berbagai jenis enzim antioksidan, katalase (CAT) dan superoksida dismutase (SOD) dapat merubah ROS menjadi oksigen dan air untuk menjaga integritas sel. Maka dari itu untuk mengoptimalkan proses bioremediasi perlu adanya penggunaan strain bakteri yang cocok untuk diterapkan dalam proses bioremediasi. Salah satu jenis bakteri yang cocok untuk diterapkan adalah bakteri jenis indigenous hal ini dikarenakan bakteri ini memiliki kemampuan beradaptasi terhadap tekanan fisiologis yang merupakan respon yang dihasilkan terhadap logam berat (Banerjee, *et al.*, 2015).

Kemampuan bakteri dalam bioremediasi dikarenakan terjadinya kemisorpsi aktif yang potensial pada dinding sel. Oleh karena itu dalam proses bioremediasi

bakteri indigenous lebih unggul secara resistensi karena sifatnya yang adaptif (Igiri, *et al.*, 2018; Banerjee, *et al.*, 2015). Beberapa hasil penelitian menunjukkan jika bakteri indigenous yang di isolasi dari lingkungan yang terkontaminasi logam berat menunjukkan ketahanan dan kemampuan yang luar biasa dan efisien dalam melakukan proses mekanisme bioremediasi sehingga terjadi penurunan dan penyisihan logam berat pada lingkungan yang tercemar (Irawati, 2020). Bahkan bakteri yang di isolasi langsung dari lokasi yang tercemar mampu menunjukkan kemampuannya dalam mentoleransi serta mereduksi lebih dari satu ion logam berat di lingkungan (Bhagat, *et al.*, 2016).

Hasil dari pengaplikasian bakteri indigenous dalam bioremediasi logam berat dapat dilihat pada Lampiran 5 dan 6. Berdasarkan hasil pada kajian literatur tersebut dapat diketahui beberapa jenis bakteri indigenous yang mampu melakukan bioremediasi. Berikut merupakan bakteri indigenous yang memiliki kemampuan dalam bioremediasi:

a. *Acinobacter sp.*

Acinobacter sp. merupakan bakteri jenis gram negative yang dapat digunakan dalam proses bioremediasi polutan di perairan. Seperti bakteri *Acinobacter sp.* yang ditemukan di Cikapundung yang menunjukkan kemampuannya dalam melakukan biosorpsi logam berat tembaga sebesar 19,16% dan mampu mengakumulasi tembaga sebesar 1,03 mg/g berat kering sel. Sedangkan jenis *Acinobacter calcoaceticus* mampu melakukan biosorpsi logam berat tembaga sebesar 18,01% dan mampu melakukan akumulasi logam berat tembaga sebesar 2,38 mg/g berat kering sel (Irawati, *et al.*, 2019)

b. *Alteromonas sp.*

Alteromonas sp. merupakan bakteri jenis gram negatif yang memiliki ciri-ciri berbentuk batang dengan ukuran sekitar 1 x 2 μm . Salah satu spesies *Alteromonas* yang berhasil di isolasi dari Laut merah yaitu spesies jenis

Alteromonas macleodii. Bakteri indigenous yang berhasil di isolasi ini menunjukkan kemampuannya dalam menysisihkan logam berat yang berbeda dalam sistem larutan logam tunggal maupun multi logam. Hasil dari penelitian menunjukkan jika pada kondisi lingkungan terpapar berbagai jenis logam berat, bakteri *Alteromonas macleodii* memiliki kemampuan dalam penyerapan logam berat jenis Pb yakni sebesar 14.8 mg/g berat kering yang kemudian di ikuti dengan logam berat Mn, Fe, Cu, Zn, Ni dan Cd dengan keberhasilan masing-masing sebesar 14.8, 13.2, 13, 12.8, 12.4, 10.8, dan 10.6 mg/g berat kering pada konsentrasi awal sebesar 200 ppm. Selain itu, bakteri ini juga memiliki kemampuan dalam melakukan biosorpsi pada sistem multi-logam dengan efisiensi hingga 93%, 40%, 55%, 55%, 55%, 36%, dan 50 % pada masing-masing logam berat Pb, Mn, Fe, Cu, Zn, Ni dan Cd dengan konsentrasi awal sebesar 30 ppm. Sedangkan pada sistem logam tunggal kemampuan bakteri ini dalam melakukan biosorpsi pada memiliki efisiensi hingga 92%, 93,4%, 86%, 44,5%, 91%, 85%, dan 83% pada masing-masing logam berat Pb, Mn, Fe, Cu, Zn, Ni dan Cd, tingkat efisiensi tersebut dilakukan pada konsentrasi logam berat sebesar 50 ppm (Shaaban, *et al.*, 2015).

Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui jika bakteri ini secara efektif bermanfaat dalam proses bioremediasi berbagai logam berat di perairan laut. Kehadiran multi-logam pada air dapat mempengaruhi kemampuan bakteri dalam penghilangan logam berat tertentu, hal ini dikarenakan adanya interaksi yang kompetitif antara berbagai macam logam berat dengan spesies bakteri yang ada. Selain itu perbedaan dalam pemindahan atau penyerapan logam berat antara mekanisme multi logam dan logam tunggal disebabkan adanya persaingan yang lebih tinggi antara logam yang bermuatan sama dengan situs pengikat biomassa (Shaaban, *et al.*, 2015).

c. *Bacillus sp.*

Bacillus sp. merupakan bakteri gram positif yang sering ditemukan bahkan sering menjadi dominan pada lingkungan yang tercemar dengan kondisi yang cukup ekstrim. Secara umum bakteri ini memiliki ciri-ciri berbentuk batang dengan koloni yang memanjang dan berukuran sekitar 0,6-2,7 x 1,0-1,2 μm . Beberapa penelitian melaporkan jika bakteri *Bacillus sp.* merupakan salah satu bakteri gram positif yang terbukti mampu beradaptasi dan mereduksi polutan logam berat pada suatu lingkungan (Christita, *et al.*, 2018). Hal ini dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Sasi, *et al.* (2018), pada penelitian ini salah satu bakteri yang berhasil di isolasi dan diidentifikasi dari Sungai Banger merupakan bakteri jenis *Bacillus cereus*. Berdasarkan penelitian tersebut bakteri *Bacillus cereus* mampu mengasorpsi paparan logam berat Zn hingga 95,57%. Pada bakteri ini yang berperan dalam pengikatan logam berat adalah gugus karboksil dalam peptidoglikan (Sasi, *et al.*, 2018). Sedangkan bakteri jenis *Bacillus thuringiensis* yang di isolasi dari Sungai Mithi Mumbai, mampu melakukan penghilangan logam berat merkuri hingga 94,87% dalam waktu 6 jam dan 96,72% dalam waktu 48 jam, proses penghilangan tersebut terjadi pada konsentrasi merkuri sebanyak 10 ppm (Purshkar, *et al.*, 2018)

d. *Chromobacterium sp.*

Chromobacterium sp. merupakan bakteri jenis gram negatif yang secara umum berbentuk seperti batang. Salah satu bakteri *Chromobacterium sp.* yang berhasil di isolasi dan diidentifikasi dari Lembah Sukinda menunjukkan resistensinya terhadap logam berat dan berpotensi untuk digunakan sebagai bioremediator logam berat. Hasil penelitian tersebut menunjukkan kemampuan bakteri *Chromobacterium violaceum* dalam melakukan biosorpsi dan bioreduksi logam berat kromium hingga 50% dalam kondisi metabolisme independen. Hasil tersebut menunjukkan bahwa isolat bakteri asli yang di isolasi dari Lembah Sukinda

dapat menjadi kandidat yang menjanjikan untuk di aplikasikan dalam bioremediasi Cr (VI) (Prabhakaran, *et al.*, 2018).

e. *Comamonas sp.*

Comamonas sp. merupakan bakteri jenis gram negatif yang bersifat aerobik. Secara umum bakteri ini memiliki bentuk basil dan sering di temukan diberbagai habitat seperti di danau, laut, rawa maupun lumpur aktif. Salah satu bakteri *Comamonas sp.* yang berhasil di isolasi dari Danau Tempe memiliki kemiripan sebesar 99,90% dengan spesies *Comamonas testosteroni* strain S-2

yang dikonstruksi menggunakan analisis filogenetik Neighbor-join. Bakteri *Comamonas testosterone* pada penelitian menunjukkan kemampuannya dalam mereduksi logam berat jenis timbal dari 7,45 menjadi 3,48 ppm atau setara dengan 53,35% selama tujuh hari masa perlakuan (Yani, *et al.*, 2020),

f. *Enterobacter sp.*

Enterobacter sp. merupakan bakteri jenis gram negatif yang sering ditemukan pada lingkungan yang tercemar. Bakteri *Enterobacter sp.* yang berhasil di isolasi dari sungai Sukolillo memiliki kesamaan dengan spesies *Enterobacter cloacae* hingga 96.68% berdasarkan analisis gen 16s rDNA. Bakteri *Enterobacter cloacae* yang berhasil di isolasi ini dilaporkan memiliki kemampuan resistensi terhadap logam berat tembaga dengan melakukan akumulasi logam berat sebesar 0,96 mg/g dan 0,45 mg/g berat kering sel serta mampu menghilangkan logam berat tembaga melalui proses biosorpsi hingga 68,78% dan 60,31 pada konsnetrasi awal masing-masing sebesar 2 dan 4 ppm (Irawati dan Tahya, 2021).

g. *Esherichia sp.*

Esherichia sp. merupakan bakteri jenis gram negatif yang identik dengan lokasi tercemar sehingga banyak dikatakan sebagai bakteri pantogen berbahaya bagi kesehatan manusia karena persebarannya yang mudah melalui media zat cair. Bakteri ini secara umum memiliki bentuk batang dengan ukuran 1,2-1,3 x 2,3-

5,7 μm dan sering ditemukan pada lingkungan yang memiliki kondisi suhu yang ekstrim (Christita, *et al.*, 2018; Sasi, *et al.*, 2018). Meskipun memiliki sisi yang negatif, pada beberapa penelitian bakteri ini terbukti dapat dimanfaatkan dalam kegiatan bioremediasi pada lokasi yang tercemar logam berat. Hal ini ditunjukkan oleh penelitian yang dilakukan Irawati, *et al.* (2019), bakteri *Echerichia coli* yang ditemukan pada Sungai Cikapundung, mampu mengakumulasi logam berat tembaga sebesar 2,28 mg/g dan melakukan biosorpsi sebesar 48,15%.

Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Sasi, *et al.* (2018), menunjukkan jika bakteri jenis *Escherichia vulneris* yang di isolasi dari Sungai Banger mampu melakukan reduksi paparan logam berat seng hingga 95,27%.

h. *Klebsiella sp.*

Klebsiella sp. merupakan jenis bakteri gram negatif yang dapat ditemukan diberbagai ruang lingkup seperti di tanah, air, tumbuhan, serangga, hewan dan manusia. Secara umum, bakteri ini memiliki bentuk batang pendek dengan ukuran sebesar 0,7 x 1,25 μm . Beberapa penelitian menyebutkan jika bakteri ini dapat digunakan dalam melakukan bioremediasi pada paparan logam berat (Christita, *et al.*, 2018; Mutiat, *et al.*, 2018). Salah satu bakteri *Klebsiella sp.* jenis *Klebsiella pneumonia* yang di isolasi dari Sungai Cikapundung mampu melakukan akumulasi logam berat tembaga hingga 3,12 mg/g dan melakukan biosorpsi sebesar 36,78% (Irawati, *et al.*, 2019), sedangkan yang di isolasi dari Sungai Cisadane mampu mengakumulasi tembaga hingga 1,55 mg/g (Irawati dan Tahya, 2020). Selain logam berat tembaga berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sasi, *et al.*, (2018), bakteri *Klebsiella pneumoniae* yang di isolasi dari sungai Banger juga mampu mereduksi paparan logam berat seng hingga 95,49%.

i. *Pantoea sp.*

Pantoea sp. merupakan bakteri yang dapat ditemukan di berbagai lingkungan seperti air dan tanah yang tercemar bahkan dapat juga ditemukan pada

tubuh organisme seperti hewan, tumbuhan hingga manusia. Salah satu isolat bakteri yang berhasil di isolasi dari Sungai Cisadane menunjukkan kemiripannya sebesar 97.75 % dengan *Pantoea agglomerans* berdasarkan analisis gen 16 rDNA. Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan kemampuan resistensi *Pantoea agglomerans* terhadap logam berat tembaga dan bahkan mampu mengakumulasi logam berat tembaga hingga 1,42 mg/g (Irawati dan Tahya, 2020).

j. *Pseudomonas sp.*

Pseudomonas sp. merupakan jenis bakteri gram negatif yang memiliki kemampuan dalam beradaptasi pada lingkungan yang tercemar sebagai polutan. Secara umum bakteri ini berbentuk batang, motil dan non-spora dengan ukuran sebesar 0,7 x 2,2 μm (Christita, *et al.*, 2018; Jebelli, *et al.*, 2017). Beberapa penelitian menyebutkan jika bakteri ini merupakan salah satu jenis bakteri yang memiliki kemampuan yang baik dalam mereduksi logam berat pada suatu lingkungan (Christita, *et al.*, 2018).

Seperti halnya bakteri *Pseudomonas chengduensis* yang di isolasi dari mata air Babagorgor mampu melakukan oksidasi logam berat As (III) sebesar 48% dari 312 mg/L dan logam berat As (V) sebesar 78% dari 130 mg/L dalam kondisi heterotrofik sedangkan dalam kondisi kemolitotrofik mampu mengoksidasi logam berat As (III) sebesar 41% dari 130 mg/L (Jebelli, *et al.*, 2017). Sedangkan bakteri *Pseudomonas extremorientalis* yang di isolasi dari Sungai Gangga mampu mereduksi dan mengoksidasi logam berat As (V) menjadi As (III) hingga 25% pada konsentrasi 1,33 mM (Satyapal, *et al.*, 2018). Selain logam berat arsenik bakteri *Pseudomonas sp.* juga dapat digunakan dalam mengatasi pencemaran kromium.

Seperti yang ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Kafilzadeh dan Saberifard, (2016), *Pseudomonas aeruginosa* yang di isolasi Sungai Soltan-Abad mampu mereduksi logam berat kromium hingga 66% dari 150 mg/L kromium.

k. *Serratia spp.*

Serratia spp. merupakan bakteri gram negative yang sering ditemukan di berbagai lingkungan yang tercemar (Irawati dan Tahya, 2021). Berdasarkan beberapa penelitian bakteri jenis *Serratia spp.* terbukti dapat dimanfaatkan dalam proses bioremediasi lingkungan yang tercemar logam berat. Hal ini dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan oleh Kafilzadeh dan Saberifard (2016), bakteri *Serratia marcescens* yang di isolasi dari Sungai Soltan Abad, Shiraz-Iran mampu mereduksi logam berat kromium hingga 50%. Sedangkan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Irawati dan Tahya (2021), bakteri *Serratia namatidiphila* yang diisolasi dari Sungai Sukolilo mampu mengakumulasi logam berat tembaga sebesar 1,87 mg/l dan melakukan biosorpsi hingga 68,47%. Kemampuan bakteri ini dalam mengikat logam berat dikarenakan kemampuannya dalam memproduksi protein intraseluler (Irawati dan Tahya, 2021).

l. *Shigella sp.*

Shigella sp. merupakan salah satu jenis bakteri yang sering disebutkan sebagai salah satu penyebab penyakit disentri pada manusia. Meskipun sering disebut sebagai bakteri pantogen, bakteri *Shigella sp.* memiliki manfaat untuk digunakan dalam bidang bioteknologi. Hal ini dibuktikan oleh penelitian yang dilakukan di Sungai Cisadane. Hasil isolate bakteri yang ditemukan berhasil diidentifikasi dan cenderung memiliki kemiripan dengan spesies *Shigella flexneri*. Pada penelitian ini bakteri *Shigella flexneri* yang di isolasi dari Sungai Cisadane memiliki kemampuan dalam mengakumulasi logam berat tembaga hingga 0,92 mg/g (Irawati dan Tahya, 2020).

m. *Staphylococcus sp.*

Staphylococcus sp. merupakan jenis bakteri gram positif yang sering dihubungkan dengan penyakit pada hewan dan sering ditemukan di perairan yang terhubung dengan saluran pembuangan limbah. Secara umum bakteri ini memiliki

bentuk yang bulat menyerupai bentuk anggur dengan ukuran diameter sebesar 0,6 µm (Handa dan Jadhav, 2017; Christita, *et al.*, 2018). Bakteri *Staphylococcus sp.* yang diisolasi Sungai Mithi memiliki kemampuan resistensi dan berpotensi dalam menghilangkan logam berat tembaga hingga 84% selama 120 jam (Handa dan Jadhav, 2017).

Berdasarkan beberapa hasil kajian literatur tersebut dapat diketahui jika proses bioremediasi menunjukkan hasil yang berbeda-beda, hal ini dapat diakibatkan oleh adanya perbedaan sistem metabolisme yang diadaptasi oleh setiap isolat serta adanya perbedaan jenis dan kelarutan senyawa logam yang ada pada suatu media (Ikerismawati, 2019; Shaaban, *et al.*, 2015). Bakteri indigenous memiliki kemampuan dalam melakukan bioremediasi lebih dari satu jenis logam berat. Bahkan beberapa bakteri indigenous yang pernah ditemukan memiliki kemampuan dalam melakukan bioremediasi hingga $\geq 95\%$.

Hal menarik yang dapat diperoleh dari beberapa penelitian tersebut adalah bakteri yang memiliki resistensi sangat baik terhadap logam berat dan berpotensi besar sebagai agen bioremediator dalam proses bioremediasi logam berat kebanyakan merupakan bakteri jenis gram negatif, hal ini dikarenakan dinding pada sel bakteri gram negatif yang cenderung kompleks sehingga dapat dijadikan sebagai penghalang, selain itu membran luar pada bakteri gram negatif mengandung komponen gugus karboksil, amina, hidroksil, fosfat dan sulfhidril bermuatan negatif kuat yang berperan dalam melakukan interaksi dengan mengikat dan mendetoksifikasi logam berat bermuatan positif (Irawati, *et al.*, 2019; Yani, *et al.*, 2020; Irawati, *et al.*, 2020).

Selama proses bioremediasi komunitas bakteri indigenous memiliki kemampuan yang berbeda-beda dalam mentolerir polutan logam berat, hal ini disebabkan oleh adanya beberapa faktor seperti perbedaan ketersediaan unsur

hara (makro dan mikro) dalam perairan sebagai penunjang pertumbuhan bakteri, adanya perbedaan variabel penyusun genetik strain bakteri, konsentrasi dan jenis logam berat, waktu kontak, dan kondisi variabel lingkungan itu sendiri (Benhalima, *et al.*, 2020; Abdi dan Kazemi, 2015). Selain itu, kondisi lingkungan merupakan faktor penting lainnya yang menunjang keberhasilan bakteri indigenous dalam proses bioremediasi. Faktor lingkungan yang berpengaruh pada proses bioremediasi adalah suhu, pH dan salinitas (Shaaban, *et al.*, 2015; Igri, *et al.*, 2018).

a. Nutrisi

Ketersediaan sumber energi seperti makanan dan nutrisi merupakan faktor penting yang menentukan keberhasilan dari proses bioremediasi. Bakteri selain dapat menemukan sumber makanan maupun nutrisi secara alami pada lingkungan juga dapat memanfaatkan kontaminan/senyawa toksik sebagai sumber nutrisi dan energi bagi mencukupi kebutuhan untuk pertumbuhannya. Bakteri memanfaatkan kontaminan sebagai sumber energi dan makanan dengan cara mengambil unsur karbon pada kontaminan, selain itu juga dengan memutus ikatan kimia dan memindahkan elektron dari kontaminan (Ayangbenro dan Babalola, 2017).

b. Spesies bakteri

Setiap spesies bakteri memiliki afinitas yang berbeda dalam melakukan proses bioremediasi. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh adanya perbedaan struktur dan komponen dinding sel yang berbeda-beda. Perbedaan inilah yang menyebabkan beberapa spesies bakteri memperlihatkan hasil bioremediasi yang cukup besar sedangkan beberapa lainnya tidak (Irawati, 2020).

c. Konsentrasi logam berat

Konsentrasi logam berat yang rendah pada perairan dapat meningkatkan pertumbuhan dari mikroorganisme bakteri sedangkan pada konsentrasi yang tinggi paparan logam berat dapat menghambat pertumbuhan bakteri (Irawati, 2019).

Meskipun logam berat tembaga merupakan logam berat esensial, namun pada konsentrasi yang tinggi tembaga akan mulai bersifat toksik hal ini dapat menyebabkan melambatnya pertumbuhan bakteri karena logam berat tembaga akan berperan sebagai *stressor* (Irawati, 2020). Selain itu tinggi peningkatan konsentrasi paparan logam berat juga menyebabkan pengurangan biomassa dan denaturasi enzim yang berperan dalam pengikatan ion logam berat dengan sel bakteri, sehingga efisiensi bioremediasi akan menurun (Irawati dan Tahya, 2021).

Berdasarkan hasil kajian literatur dapat diketahui jika setiap penelitian menggunakan konsentrasi yang berbeda-beda, hal tersebut telah disesuaikan oleh peneliti dengan tingkat MIC pada setiap bakteri. Selain itu, perbedaan dalam penetapan konsentrasi logam berat dalam proses bioremediasi bertujuan untuk mengetahui perbedaan yang signifikan terhadap kemampuan bakteri dalam melakukan pengikatan maupun penyerapan logam (Benhalima, *et al.*, 2020).

d. Keberadaan jenis logam berat

Di perairan secara umum akan cenderung tercampur berbagai jenis logam berat yang berbeda. Keberadaan berbagai jenis logam pada suatu lingkungan dapat mempengaruhi afinitas bakteri dalam penghilangan logam berat di perairan. Hal ini dikarenakan pada lingkungan dengan kondisi terpapar berbagai jenis logam berat terjadi interaksi yang kompetitif antara berbagai jenis logam berat dan spesies bakteri. Presentasi keberhasilan bioremediasi pada lingkungan dengan sistem multi logam akan cenderung lebih kecil dibandingkan dengan bioremediasi pada lingkungan dengan sistem multi logam, karena semakin banyak jenis logam berat yang ditemukan maka akan semakin tinggi persaingan yang terjadi antara logam berat yang bermuatan sama dengan biomassa bakteri (Shaaban, *et al.*, 2015).

e. Waktu Kontak

Waktu kontak secara tidak langsung dapat mempengaruhi hasil akhir dari proses bioremediasi, hal ini dikarenakan waktu kontak yang lama memungkinkan semakin banyak terbentuk ikatan antara sel bakteri dengan logam berat sehingga akan semakin banyak logam berat yang akan diserap. Lamanya waktu kontak pada proses bioremediasi dapat bergantung pada konsentrasi logam berat yang diberikan pada bakteri yang digunakan. Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan lamanya waktu kontak pada proses bioremediasi berbeda-beda, perbedaan tersebut telah ditentukan oleh setiap peneliti dengan mempertimbangkan dan melihat dari ketahanan maksimum isolat yang terpilih terhadap peningkatan konsentrasi melalui pengecekan secara berkala pada pertumbuhan biomassa bakteri dalam mencapai fase eksponensial. Seperti penelitian yang dilakukan Shaaban, *et al.* (2015), bahwa waktu kontak pada percobaan bioremediasi sangat terlibat dalam proses transfer logam ke dalam situs pengikatan sel bakteri. Dalam studi tersebut, kondisi eksperimen memungkinkan terjadinya pencampuran logam dengan biomassa yang sebagian besar dapat menekan beberapa faktor kinetik yang memimpin kesetimbangan sehingga cenderung membutuhkan waktu yang singkat dalam proses pengikatan logam berat.

f. Suhu

Suhu secara umum dapat mempengaruhi stabilitas kontaminan logam berat dan metabolisme pada organisme bakteri. Kenaikan suhu dapat menyebabkan terjadinya peningkatan laju difusi adsorbat serta ketersediaan hayati pada logam berat. Sedangkan bagi bakteri perubahan suhu dapat mempengaruhi optimalisasi pertumbuhan pada bakteri. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh suhu yang berbeda terhadap hasil bioremediasi logam berat. Dilaporkan jika pada beberapa penelitian seperti ditunjukkan pada Lampiran 5 dan

6 bahwa kisaran suhu yang sering digunakan dalam proses bioremediasi yakni kisaran suhu sebesar 25, 30 dan 37°C. Sedangkan untuk suhu optimum yang dibutuhkan bakteri dalam proses bioremediasi adalah berkisar antara 25-45°C (Shaaban, *et al.*, 2015; Ayangbenro dan Bablola, 2017; Jebelli, *et al.*, 2017).

g. pH
pH pada suatu perairan khususnya perairan tawar sangat bergantung pada kandungan mineral dan batuan sekitar pada lokasi, selain itu juga dipengaruhi oleh kontaminasi buangan limbah pertanian dan perkotaan (Benhalima, *et al.*, 2020).

Secara fisiologis, dinding sel bakteri memiliki kecenderungan bermuatan negatif, sedangkan pada logam berat bermuatan positif. Hal ini yang menyebabkan anion yang berada pada logam berat dapat terikat pada permukaan sel bakteri (Sasi, *et al.*, 2018). Namun, pada perairan yang memiliki nilai pH rendah dapat menyebabkan berkurangnya daya tarik menarik antara sel bakteri dengan logam berat, karena permukaan sel bakteri akan memiliki kecenderungan untuk lebih bermuatan positif, sehingga proses bioremediasi akan berjalan tidak maksimal (Anggriany, *et al.*, 2018).

Di perairan pH merupakan faktor yang sangat mempengaruhi kimia larutan seperti ion logam. Nilai pH di perairan cenderung bervariasi, namun pada perairan yang memiliki pH asam, logam berat yang ada cenderung membentuk ionik bebas dengan lebih banyak proton yang tersedia yang akan menyebabkan penjeputan pada pengikatan logam. Oleh karena itu logam berat biasanya akan lebih tersedia secara hayati, sehingga dampak toksisitas yang ditimbulkan juga akan cenderung lebih tinggi. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh suhu yang berbeda terhadap hasil bioremediasi logam berat (Benhalima, *et al.*, 2020; Shaaban, *et al.*, 2015; Ayangbenro dan Bablola, 2017). Dilaporkan pada beberapa penelitian seperti ditunjukkan pada Lampiran 5 dan 6 bahwa kisaran pH yang sering

digunakan dalam proses bioremediasi yakni kisaran pH sebesar 7 hingga 7,8.

Secara umum pH optimum yang dibutuhkan dalam pertumbuhan bakteri untuk proses bioremediasi adalah berkisar antara 6 – 8 (Anggriany, *et al.*, 2018).

h. Salinitas

Salinitas merupakan faktor lainnya yang mempengaruhi keberlangsungan proses bioremediasi di perairan laut (Shaaban, *et al.*, 2015; Igri, *et al.*, 2018).

Salinitas merupakan faktor yang secara signifikan dapat menurunkan tingkat bioremediasi, hal ini dikarenakan adanya campuran kation berupa natrium dan kalsium pada air laut yang mengganggu proses pengikatan logam berat (Shaaban, *et al.*, 2015). Selain itu, salinitas juga memainkan peran penting dalam kelangsungan hidup dan metabolisme bakteri. Hal ini dikarenakan perbedaan konsentrasi garam lingkungan sekitar dan sitoplasma bakteri memberikan tekanan osmotik pada dinding sel bakteri. Membran sel bakteri terganggu ketika tekanan osmotik ini tinggi. Perubahan salinitas juga mempengaruhi fungsi berbagai enzim yang ada pada bakteri (Pushkar, *et al.*, 2018). Kadar toleransi bakteri terhadap salinitas adalah 5-35 ppt (Pushkar, *et al.*, 2018), sedangkan bakteri akan mulai menunjukkan perilaku abnormal pada proses biosorpsi jika salinitas berada pada kisaran 30-40 ppt (Shaaban, *et al.*, 2015).

3.4. Potensi Pemanfaatan Bakteri Indigenous dalam Manajemen

Sumberdaya Perairan

Kasus pencemaran pada lingkungan perairan akibat logam berat semakin tahun mengalami peningkatan, hal ini secara tidak langsung sangat mempengaruhi lingkungan dan kehidupan makhluk hidup. Berbagai upaya telah dilakukan dalam mengatasi hal tersebut, dari berbagai upaya uji coba ditemukannya salah satu metode pendekatan yang dirasa memiliki potensi yang cukup baik dalam pengelolaan lingkungan yang tercemar, pendekatan tersebut

adalah pengelolaan lingkungan berbasis bakteri. Biodiversitas mikroba perairan memiliki karakteristik dan potensi yang berbeda-beda, hal ini dapat mendukung kesejahteraan lingkungan dan manusia. Bakteri indigenous merupakan salah satu mikroorganisme yang sangat berpotensi dalam manajemen sumber daya perairan terutama dalam bidang bioremediasi lingkungan yang terkontaminasi secara *in-situ* (Irawati, 2020). Hal ini dikarenakan bakteri indigenous pada suatu lokasi tidak hanya terdiri dari satu jenis bakteri melainkan berbagai jenis bakteri, maka bakteri indigenous dinilai sebagai bakteri yang sangat efisien untuk diterapkan dalam pengelolaan lingkungan karena pada kenyataannya pada lingkungan biasanya terkontaminasi oleh lebih dari satu jenis polutan (Irawati, *et al.*, 2017).

Belakangan ini pengelolaan lingkungan banyak menggunakan bakteri indigenous, karena kemampuan adaptasi yang lebih tinggi dibandingkan strain bakteri yang berasal dari luar lokasi yang sama sehingga penggunaan bakteri indigenous diharapkan lebih mudah beradaptasi dalam menjalankan perannya (Irawati dan Tahya, 2021; Neneng, *et al.*, 2020). Selain itu, bakteri indigenous telah menunjukkan kompatibilitasnya saat di uji sebagai remediator dalam proses bioremediasi di perairan umum, hasil penelitian menunjukkan jika bakteri ini melakukan tugasnya dalam penghilangan maupun pengurangan logam berat secara efektif pada berbagai kondisi lingkungan (Igiri, *et al.*, 2018). Sehingga dapat dikatakan jika keberadaan bakteri indigenous telah terbukti sangat berpotensi dan efektif untuk digunakan sebagai agen bioremediasi pada lingkungan yang tercemar logam berat (Christita, *et al.*, 2018; Ikhsan, *et al.*, 2020), hal tersebut diperkuat lagi dengan penelitian yang dilakukan oleh Osman, *et al.* (2015), yang menyatakan jika di Sungai Galing terjadi aktivitas bioremediasi oleh bakteri indigenous, yang menyebabkan tingkat kontaminasi logam berat pada sampel air yang diambil dari sungai Galing memiliki nilai yang cukup rendah. Kemampuan

Isolat bakteri indigenous dalam mentoleransi logam berat pada perairan secara preventif mampu memberikan peluang untuk dimanfaatkan dalam bidang manajemen sumber daya perairan terutama dalam bidang bioteknologi dan pengelolaan pada instalasi air limbah (IPAL) yang akan di buang ke dalam perairan umum (Satyapal, *et al.*, 2018; Irawati dan Tahya, 2021). Logam berat dapat dikatakan sebagai salah satu polutan anorganik yang sulit didegradasikan.

Berdasarkan kajian literatur ini dapat dikatakan juga bahwa secara tidak langsung bakteri jenis indigenous juga memiliki potensi yang sangat baik untuk di aplikasikan pada lingkungan yang tercemar polutan jenis lainnya (Guzman, *et al.*, 2016).



4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

- Bakteri indigenous telah terbukti menggunakan kemampuan bawaannya untuk meminimalisir konsentrasi berbagai jenis polutan logam berat di perairan. Setiap bakteri indigenous mengadaptasi dan mengembangkan berbagai mekanisme yang berbeda dalam mentoleransi paparan logam berat di perairan, baik secara ekstraseluler melalui mekanisme biosorpsi dan aktivitas enzim ekstraseluler maupun secara intraseluler menggunakan bioakumulasi, biotransformasi (oksidasi, reduksi, metilasi), biomineralisasi, sistem efflux yang dibantu oleh ATP, dan proses aktivitas enzimatik intraseluler. Beberapa mekanisme yang ada, mekanisme unggulan yang paling sering diadaptasi oleh bakteri indigenous adalah mekanisme biosorpsi, bioakumulasi dan biotransformasi.
- Bakteri indigenous yang di isolasi dan diidentifikasi pada lingkungan yang tercemar logam berat mayoritas sangat berpotensi besar sebagai agen bioremediasi logam berat di perairan. Beberapa jenis bakteri indigenous yang berhasil diidentifikasi dan terbukti dapat mendetoksifikasi pencemaran logam berat antara lain bakteri *Acinetobacter sp.*, *Aeromonas macleodii*, *Bacillus cereus*, *Bacillus thuringiensis*, *Basil sp.*, *Chromobacterium violaceum*, *Comamonas testosteroni*, *Echerichia coli*, *Echerichia vulneris*, *enterobacter cloacae*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pantoea agglomerans*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas Chengduensis*, *Pseudomonas extremorientalis*, *Serratia marcescens*, *Serratia namatodiplia*, *Shigella flexneri*, dan *Staphylococcus sp.* Berdasarkan kajian tersebut ditemukan bakteri yang memiliki kemampuan dalam melakukan

lebih dari satu jenis logam berat. Bahkan beberapa dari bakteri indigenous tersebut mampu melakukan bioremediasi polutan logam berat diperairan dengan tingkat keberhasilan hingga $\geq 95\%$ pada permukaan sel dan mampu melakukan penjerapan hingga 14,8 mg/gram berat kering sel.

- Bakteri dapat hidup dan beradaptasi pada berbagai keadaan lingkungan bahkan pada lingkungan perairan yang terpapar polutan seperti logam berat. Selain itu ekosistem lingkungan perairan tempat spesies bakteri tertentu di isolasi dapat membantu dalam memprediksi perilaku bakteri tersebut. Dengan demikian bakteri lokal atau indigenous yang di isolasi dari lingkungan yang terkontaminasi polutan cenderung lebih dapat diterima oleh lingkungan dan merupakan kandidat yang paling sesuai untuk pengelolaan lingkungan yang tercemar secara *in-situ*. Sehingga bakteri ini sangat sangat relevan untuk digunakan dalam pengelolaan lingkungan jika dilihat dari perspektif pengaplikasian ilmu dalam manajemen sumber daya perairan.

4.2 Saran

Sebagian besar penelitian tentang bakteri indigenous masih berhenti di tahap penelitian laboratorium, sehingga dapat disarankan untuk dilakukan pengembangan lebih lanjut terkait upaya untuk mengatasi munculnya dampak dari proses bioremediasi logam berat oleh bakteri sehingga tidak menimbulkan pencemaran baru di dalam perairan. Selain itu, dapat dilakukannya penelitian lebih lanjut guna pengoptimalan penggunaan bakteri indigenous agar dapat di terapkan pada perairan umum secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, O., & Kazemi, M. (2015). A review study of biosorption of heavy metals and comparison between different biosorbents. *J Mater Environ Sci*, 6(5), 1386-1399.
- Ahmad, J. (2018). Desain penelitian analisis isi (Content analysis). *Research Gate*, 5(9).
- Alencar, F. L. S., Navoni, J. A., & do Amaral, V. S. (2017). The use of bacterial bioremediation of metals in aquatic environments in the twenty-first century: a systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(20), 16545-16559. DOI 10.1007/s11356-017-9129-8.
- Ali, H., & Khan, E. (2017). What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 100(1), 6-19.
- Ali, M. M., Ali, M. L., Islam, M. S., & Rahman, M. Z. (2016). Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 5, 27-35.
- Aminah, U., & Nur, F. (2018). Biosorpsi Logam Berat Timbal (Pb) oleh Bakteri. *Teknosains: Media Informasi Sains Dan Teknologi*, 12(1), 50-70.
- Anggriany, P.A., Jati, A. W. N., & Muwarni, L. I. (2018). Pemanfaatan bakteri indigenus dalam reduksi logam berat Cu pada limbah cair proses Etching Printed Circuit Board (PCB). *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 3(2), 87-95.
- Anjelita, M., Windarto, A. P., & Hartama, D. (2019). Pemanfaatan datamining pada pengelompokan provinsi terhadap pencemaran lingkungan hidup. *KOMIK (Konferensi Nasional Teknologi Informasi dan Komputer)*, 3(1). DOI: 10.30865/komik.v3i1.1675
- Antoci, A., Galeotti, M., & Sordi, S. (2018). Environmental pollution as engine of industrialization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 58, 262-273.
- Appannagari, R. R. (2017). Environmental pollution causes and consequences: a study. *North Asian International Research Journal of Social Science & Humanities*, 3(8), 151-161.
- Arafah, Y., & Winarso, H. (2020). Peningkatan dan Penguatan Partisipasi Masyarakat dalam Konteks Smart City. *Tata Loka*, 22(1), 27-40.
- Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017). A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents. *International*





- journal of environmental research and public health*, 14(1), 94.
Doi:10.3390/ijerph14010094
- Azubuiké, C. C., Chikere, C. B., & Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(11), 1-18.
- Baktiar, A. H., Wijaya, A. P., & Sukmono, A. (2016). Analisis Kesuburan dan Pencemaran Air Berdasarkan Kandungan Klorofil-A dan Konsentrasi Total Suspended Solid Secara Multitemporal di Muara Banjir Kanal Timur. *Jurnal Geodesi Undip*, 5(4), 263-276.
- Banerjee, G., Pandey, S., Ray, A. K., & Kumar, R. (2015). Bioremediation of heavy metals by a novel bacterial strain *Enterobacter cloacae* and its antioxidant enzyme activity, flocculant production, and protein expression in presence of lead, cadmium, and nickel. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226(4), 1-9.
- Bhagat, N., Vermani, M., & Bajwa, H. S. (2016). Characterization of heavy metal (cadmium and nickel) tolerant Gram negative enteric bacteria from polluted Yamuna River, Delhi. *African Journal of Microbiology Research*, 10(5), 127-137.
- Benhalima, L., Amri, S., Bensouilah, M., & Ouzrout, R. (2020). Heavy metal resistance and metallothionein induction in bacteria isolated from Seybouse River, Algeria. *Appl Ecol Environ Res*, 18(1), 1721-1737.
- Beoang, A. K. R. V. (2019). Penyisihan Logam Berat Tembaga (Cu²⁺) Oleh Bakteri Indigenus. <https://doi.org/10.31227/osf.io/ed3gj>
- Bilgili, F., Koçak, E., & Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: a revisited Environmental Kuznets Curve approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 838-845. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.080>.
- Budiastuti, P., Rahadjo, M., & Dewanti, N. A. Y. (2016). Analisis pencemaran logam berat timbal di badan Sungai Babon Kecamatan Genuk Semarang. *Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-Journal)*, 4(5), 119-118.
- Cahyono, E. A., Sutomo, N., & Hartono, A. (2019). Literatur review; panduan penulisan dan penyusunan. *Jurnal Keperawatan*, 12(2), 12-12.
- Chatterjee, S., Patel, Y. B., Rajpoot, S., Rani, S., & Mondal, N. K. Isolation and Characterization of Arsenite Tolerant Bacterial Strains from Contaminated Water of West Bengal, India. *International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences*, 4(1), 1-11. [Ttp://dx.doi.org/10.12983/ijres-2016-p0001-0011](http://dx.doi.org/10.12983/ijres-2016-p0001-0011)
- Christita, M., Iwanuddin, Yermias, K., Supratman, T., & Hendra, S. M. (2018). Identifikasi bakteri pada air dari lahan bekas tambang nikel di Halmahera Timur. *Jurnal WASIAN*, 5 (1), 35-42.

Danish & Z. Wang. (2019). Does biomass energy consumption help to control environmental pollution? Evidence from BRICS countries. *Science of the total environment*, 670, 1075-1083.

Dash, H. R., & Das, S. (2015). Bioremediation of inorganic mercury through volatilization and biosorption by transgenic *Bacillus cereus* BW-03 (pPW-B05). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 179-185.

Dey, U., Chatterjee, S., & Mondal, N. K. (2016). Isolation and characterization of arsenic-resistant bacteria and possible application in bioremediation. *Biotechnology reports*, 10, 1-7.

Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U. B., Sahu, A., Shukla, R., & Paul, D. (2015). Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes. *Sustainability*, 7(2), 2189-2212. Doi:10.3390/su702218.

Djoharam, V., Riani, E., & Yani, M. (2018). Analisis kualitas air dan daya tampung beban pencemaran sungai pesanggrahan di wilayah provinsi DKI Jakarta. *Journal of Natural Resources and Environmental Management*, 8(1), 127-133.

Fahrudin, F., & Santosa, S. (2020). Toleransi logam berat timbal (Pb) pada bakteri indigenous dari air laut Pelabuhan Paotere, Makassar (Heavy metal lead [Pb] tolerance of indigenous bacteria from Seawater in Paotere Port, Makassar). *Aquatic Science & Management*, 8(1), 8-14.

Fidiastuti, H. R., & Suarsini, E. (2017). Potensi bakteri indigen dalam mendegradasi limbah cair pabrik kulit secara in vitro. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*, 3(1), 1-10.

Gusman, D., & Waluyo, T. J. (2015). Peran Greenpeace dalam Penanganan Kerusakan Lingkungan (Polusi Udara dan Air) di China. *Transnasional*, 6(2), 1662-1674.

Guzman, M. L., Arcega, K. S. G., Cabigao, J. M. N. R., & Su, G. L. S. (2016). Isolation and identification of heavy metal-tolerant bacteria from an industrial site as a possible source for bioremediation of cadmium, lead, and nickel. *Advances in Environmental Biology*, 10(1), 10-16.

Halder, J. N., & Islam, M. N. (2015). Water pollution and its impact on the human health. *Journal of environment and human*, 2(1), 36-46.

Handa, S., & Jadhav, R. (2017). Bioremediation of heavy metal (copper) using indigenous bacteria (*Staphylococcus* spp.) isolated from Mithi River. *Elixir Appl. Zool*, 104, 45903-45905.

Harmesa, H. (2020). Teknik-teknik remediasi sedimen terkontaminasi logam berat. *OSEANA*, 45(1), 1-16.

Herlina, N. (2018). Antisipasi Bank Untuk Menghindari Kredit Macet Yang Ditimbulkan Oleh Kerugian Debitur Akibat Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Ilmiah Galuh Justisi*, 6(2), 210-226.

Herman, H., & Kusbaryantlo, K. (2020). Pengaruh Edukasi Family Therapy Pada Keluarga Terhadap Pencegahan Perilaku Kekerasan Bullying pada Anak: Literature Review. *Citra Delima: Jurnal Ilmiah STIKES Citra Delima Bangka Belitung*, 4(1), 41-51.

Hidayat, B. (2015). Remediasi tanah tercemar logam berat dengan menggunakan Biochar. *Jurnal Pertanian Tropik*, 2(1), 51-61.

Igiri, B. E., Okoduwa, S. I., Idoko, G. O., Akabuogu, E. P., Adeyi, A. O., & Ejiogu, I. K. (2018). Toxicity and bioremediation of heavy metals contaminated ecosystem from tannery wastewater: a review. *Journal of toxicology*, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2018/2568038>

Ikerismawati, S. (2019). Bioremediasi Pb oleh bakteri indigen limbah cair agar. *Jurnal Biosilampari: Jurnal Biologi*, 1(2), 51-58. DOI: 10.31540/biosilampari.v1i2.288

Ikhsan, F., Herayati, H., Abdullah, S., & Rukmayadi, Y. (2020). Eksplorasi bakteri penyerap logam Pb dari air Sungai Ciujung. *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, 16(2), 261-266.

Indirawati, S. M. (2017). Pencemaran logam berat Pb dan Cd dan keluhan kesehatan pada masyarakat di Kawasan Pesisir Belawan. *JUMANTIK (Jurnal Ilmiah Penelitian Kesehatan)*, 2(2), 54-60.

Irawati, W. (2019). Potensi Mikroorganisme resisten dari Pantai Timur Surabaya sebagai biosorben seng. *Jurnal Biologi Papua*, 11(2), 80-86.

Irawati, W. (2020). Isolasi dan karakterisasi bakteri resisten tembaga dari Pantai Timur Surabaya. *BIOLINK (Jurnal Biologi Lingkungan Industri Kesehatan)*, 6(2), 95-105. DOI:10.14203/beritabiologi.v19i3B.3937

Irawati, W., & Tahya, C. Y. (2021). Copper removal by *Enterobacter cloacae* strain IrSuk1, *Enterobacter cloacae* strain IrSuk4a, and *Serratia nematodiphila* strain IrSuk13 Isolated from Sukolilo River-Indonesia. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1053(1), 1-9. Doi:10.1088/1757-899X/1053/1/012038.

Irawati, W., Ompusunggu, N. P., Susilowati, D. N., & Yuwono, T. (2019). Molecular and physiological characterization of indigenous copper-resistant bacteria from Cikapundung River, West Java, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(2), 344-349.

Irawati, W., Parhusip, A. J., & Sopiah, N. (2015). Heavy metals biosorption by copper resistant bacteria of *Acinetobacter* Sp. IrC2. *Microbiology Indonesia*, 9(4), 163-170. DOI: 10.5454/mi.9.4.4

Irawati, W., Pinontoan, R., & Yuwono, T. (2020). Indigenous copper resistant bacteria isolated from activated sludge of water treatment plant in Surabaya, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(11), 5077-5084. DOI: 10.13057/biodiv/d211112

Irawati, W., Riak, S., Sopiah, N., & Sulistia, S. (2017). Heavy metal tolerance in indigenous bacteria isolated from the industrial sewage in Kemisan River, Tangerang, Banten, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18(4), 1481-1486. DOI: 10.13057/biodiv/d180426.

Irhamni, Setiaty, P., Edison, P & Wirsal, H. (2017). Serapan logam berat esensial dan non esensial pada air lindi TPA Kota Banda Aceh dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan. *Jurnal Serambi Engineering*, 2(1), 134-10.

Jamil, F., Mukhaiyar, R., & Husnaini, I. (2020). Kajian Literatur Rekonstruksi Mata Kuliah (Studi Kasus Mata Kuliah Pengolahan Sinyal Teknik Elektro UNP). *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, 6(2), 198-203.

Jebelli, M. A., Maleki, A., Amoozegar, M. A., Kalantar, E., Shahmoradi, B., & Gharibi, F. (2017). Isolation and identification of indigenous prokaryotic bacteria from arsenic-contaminated water resources and their impact on arsenic transformation. *Ecotoxicology and environmental safety*, 140, 170-176.

Kafilzadeh, F., & Saberifard, S. (2016). Isolation and identification of chromium (VI)-resistant bacteria from Soltan Abad river sediments (Shiraz-Iran). *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 8(1). Doi:10.17795/jjhs-33576.

Kamsina, K., Nurmiati, N., & Periadnadi, P. (2017). Aplikasi Isolat Bakteri Indigenous Ubi Kayu Karet (*Manihot glaziovii*) pada Fermentasi Pembuatan Mocaf. *Jurnal Litbang Industri*, 7(2), 111-121.

Kapahi, M., & Sachdeva, S. (2019). Bioremediation options for heavy metal pollution. *Journal of Health and Pollution*, 9(24), 1-20.

Kraus, S., Breier, M., & Dasi-Rodríguez, S. (2020). The art of crafting a systematic literature review in entrepreneurship research. *International Entrepreneurship and Management Journal*, 16(3), 1023-1042. <https://doi.org/10.1007/s11365-020-00635-4>.

Kristianto, S., Wilujeng, S., & Wahyudiarto, D. (2017). Analisis logam berat kromium (Cr) pada Kali Pelayaran sebagai bentuk upaya pe-nanggulang pencemaran lingkungan di wilayah Sidoarjo. *Jurnal Biota*, 3(2), 66-70.

Kumar, B. L., & Gopal, D. S. (2015). Effective role of indigenous microorganisms for sustainable environment. *3 Biotech*, 5(6), 867-876.

Kumar, P., Gupta, S. B., & Soni, R. (2019). Bioremediation of cadmium by mixed indigenous isolates *Serratia liquefaciens* BSWC3 and *Klebsiella pneumoniae* RpSWC3 isolated from industrial and mining affected water samples. *Pollution*, 5(2), 351-360. DOI: 10.22059/poll.2018.268603.533

Kurniawan, A., & Mustikasari, D. (2019). Review: Mekanisme akumulasi logam berat di ekosistem pascatambang timah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3), 408-415.

Liddle, E. S., Mager, S. M., & Nel, E. L. (2015). The suitability of shallow hand dug wells for safe water provision in sub-Saharan Africa: Lessons from Ndola, Zambia. *Applied Geography*, 57, 80-90.

Lotlikar, N. P. (2019). Physiological response of fungi from marine habitats to heavy metals. *Doctoral dissertation, Goa University*

Lubis, S. S. (2019). Bioremediasi logam berat oleh fungi laut. *AMINA*, 1(2), 91-102.

Lutfi, S. R., Wignyanto, W., & Kurniati, E. (2018). Bioremediasi merkuri menggunakan bakteri indigenous dari limbah penambangan emas di Tumpang Pitu, Banyuwangi. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 19(1), 15-24.

Miran, W., Jang, J., Nawaz, M., Shahzad, A., Jeong, S. E., Jeon, C. O., & Lee, D. S. (2017). Mixed sulfate-reducing bacteria-enriched microbial fuel cells for the treatment of wastewater containing copper. *Chemosphere*, 189, 134-142.

Mirzaqon, A. T. & Budi, P. 2017. Studi kepustakaan mengenai landasan teori dan praktik konseling *expressive writing*. *Jurnal BK Unesa*, 8(1),1-8

Mosa, K. A., Saadoun, I., Kumar, K., Helmy, M., & Dhankher, O. P. (2016). Potential biotechnological strategies for the cleanup of heavy metals and metalloids. *Frontiers in plant science*, 7(303), 1-14

Mutiati, F. B., Gbolahan, B., & Olu, O. (2018). A comparative study of the wild and mutated heavy metal resistant *Klebsiella variicola* generated for cadmium bioremediation. *Bioremediation Journal*, 22(1-2), 28-42.

Mwandira, W., Nakashima, K., Kawasaki, S., Arabelo, A., Banda, K., Nyambe, I. & Ishizuka, M. (2020). Biosorption of Pb (II) and Zn (II) from aqueous solution by *Oceanobacillus profundus* isolated from an abandoned mine. *Scientific reports*, 10(1), 1-9.

Naggar, Y., Khalil, M. S., & Ghorab, M. A. (2018). Environmental pollution by heavy metals in the aquatic ecosystems of Egypt. *Open Acc. J. Toxicol*, 3(1), 1-10.

Nanda, M., Kumar, V., & Sharma, D. K. (2019). Multimetal tolerance mechanisms in bacteria: The resistance strategies acquired by bacteria that can be exploited to 'clean-up' heavy metal contaminants from water. *Aquatic toxicology*, 212, 1-10.

Nasution, M. K. (2017). Penelaahan 71etabolism. *Teknik Penulisan Karya Ilmiah*, 3.

Nayak, T., De, D., Barman, C., Karmakar, P., Deb, A., & Dhal, P. K. (2020). Characterization of indigenous bacteria from radon-rich groundwater and their tolerance to physicochemical stress. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(3), 1627-1636. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02445-w>.

Neneng, L., Ardianoor, A., Usup, H. L. D., Adam, C., Zakaria, Z., Ghazella, A., & Alvianita, V. Potensi *Chlorella* sp. dan *Pseudomonas* sp. dari Areal Tambang



- Emas sebagai Mikroorganisme Potensial Pereduksi Merkuri. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 617-625.
- Neshat, A., Pradhan, B., & Javadi, S. (2015). Risk assessment of groundwater pollution using Monte Carlo approach in an agricultural region: an example from Kerman Plain, Iran. *Computers, Environment and Urban Systems*, 50, 66-73.
- Nugrahani, F., & Al-Ma'ruf, A. I. (2015). Metode Penulisan Karya Ilmiah. *Yogyakarta: Nuansa Aksara*.
- Ojuederie, O. B., & Babalola, O. O. (2017). Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review. *International journal of environmental research and public health*, 14(12), 1504. Doi:10.3390/ijerph14121504.
- Osman, M. R., Azid, A., Yunus, K., Mustafa, A. D., Amran, M. A., Azaman, F. & Zainuddin, S. F. M. (2015). Assessment on bacteria in the heavy metal bioremediation. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 19(6), 1405-1414.
- Pertiwi, J. (2019). Systematic review: 72etabo yang mempengaruhi akurasi koding diagnosis di rumah sakit. *SMIKNAS*, 41-50.
- Prabhakaran, D. C., Krishnan, S., Ramamurthy, P. C., Sivry, Y., Quantin, C., & Subramanian, S. (2018). Utility of *Chromobacterium violaceum* SUK1a, an indigenous bacterial isolate for the bioremediation of Cr (VI). *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54 (4), 1266-1281.
- Prasela, N., Witarsa, R., & Ahmadi, D. (2020). Kajian 72etabolism tentang hasil belajar kognitif menggunakan model pembelajaran langsung siswa sekolah dasar. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran*, 3(2), 209-216.
- Pushkar, B., Sevak, P., & Sounderajan, S. (2018). Assessment of the bioremediation efficacy of the mercury resistant bacterium isolated from the Mithi River. *Water Supply*, 19(1), 191-199.
- Putra, B. A., Santoso, A., & Riniatsih, I. (2019). Kandungan Logam Berat Seng pada Enhalus acoroides di Perairan Jepara. *Buletin Oseanografi Marina*, 8(1), 9-16.
- Rachman, T., & Napitupulu, D. (2017). Model Kualitas e-Service dengan Pendekatan Meta-Etnografi. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Komunikasi*, 18(2), 81-97.
- Rahardi, B., Susanawati, L. D., & Agustianingrum, R. (2020). Bioremediasi logam timbal (Pb) menggunakan bakteri indigenous pada tanah tercemar air lindi (Leachate). *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 6(3), 11-18.
- Raharja, U., Lutfiani, N., Handayani, I., & Suryaman, F. M. (2019). Motivasi belajar mahasiswa terhadap metode pembelajaran online ilearning+ pada perguruan tinggi. *Sisfotenika*, 9(2), 192-202.

Rahayu, T., Syafril, S., Wekke, I. S., & Erlinda, R. (2019). Teknik Menulis Review Literatur Dalam Sebuah Artikel Ilmiah. doi.org/10.31227/osf.io/z6m2y.

Ramli, R., & Djalla, A. (2018). Uji kandungan logam berat timbal (Pb) di perairan wilayah pesisir Parepare. *Jurnal Ilmiah Manusia Dan Kesehatan*, 1(3), 255-264.

Rijal, M., Amin, M., Rochman, F., Suarsini, E., & Alim, N. N. (2015). The quality of physical and chemical the waters of the areas Ambon. *Intl J Multidisciplinary Res Dev*, 2(4), 87-92.

Rukmana, J. G., Komalasari, R., & Hasibuan, S. Y. (2018). Kajian 73etabolism: penggunaan virgin coconut oil dalam pencegahan luka 73etabolis pada pasien imobilitas (73etabolism review: the utilization of virgin coconut oil in pressure ulcer prevention on immobilization patients). *Nursing Current Jurnal Keperawatan*, 5(1), 62-73.

Saha, N., Mollah, M. Z. I., Alam, M. F., & Rahman, M. S. (2016). Seasonal investigation of heavy metals in marine fishes captured from the Bay of Bengal and the implications for human health risk assessment. *Food Control*, 70, 110-118.

Sanusi, A. (2019). Peningkatan hasil pembelajaran menyimak dengan teknik identifikasi kata kunci. *Jurnal Membaca Bahasa dan Sastra Indonesia*, 4(1), 1-8.

Sasi, F. A., Kusumaningrum, H. P., & Budiharjo, A. (2018). Molecular Characterization of Zinc (Zn) Resistant Bacteria in Banger River, Pekalongan, Indonesia. *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, 10(3), 622-628. DOI: http://dx.doi.org/10.15294/biosaintifika.v10i3.15835

Sasongko, A. S., Cahyadi, F. D., Yonanto, L., Islam, R. S., & Destiyanti, N. F. (2020). Kandungan logam berat di perairan Pulau Tunda Kabupaten Serang Banten. *MANFISH JOURNAL*, 1(02), 90-95.

Satyapal, G. K., Mishra, S. K., Srivastava, A., Ranjan, R. K., Prakash, K., Haque, R., & Kumar, N. (2018). Possible bioremediation of arsenic toxicity by isolating indigenous bacteria from the middle Gangetic plain of Bihar, India. *Biotechnology reports*, 17, 117-125.

Sepahy, A., Sharifian, S., Zolfaghari, M. R., Khalily Dermany, M., & Rashedi, H. (2015). Study on heavy metal resistant fecal coliforms isolated from industrial, urban wastewater in Arak, Iran. *International Journal of Environmental Research*, 9(4), 1217-1224.

Shaaban, M. T., Ibrahim, H. A., Abouhend, A. S., & El-Moselhy, K. M. (2015). Removal of heavy metals from aqueous solutions using multi-metals and antibiotics resistant bacterium isolated from the Red Sea, Egypt. *American Journal of Microbiological Research*, 3(3), 93-106.

Shrestha, S., Semkuyu, D. J., & Pandey, V. P. (2016). Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal. *Science of the Total Environment*, 556, 23-35.

Sondakh, A. F. (2017). Metode penilaian walkability permukiman di perkotaan: sebuah kajian 74etabolism sistematis. *RUAS (Review of Urbanism and Architectural Studies)*, 15(1), 1-12.

Supriyantini, E., & Endrawati, H. (2015). Kandungan logam berat besi (Fe) pada air, sedimen, dan kerang hijau (*Perna Viridis*) di perairan Tanjung Emas Semarang. *Jurnal Kelautan Tropis*, 18(1), 38–45.

Syaifullah, M., Candra, Y. A., Soegianto, A., & Irawan, B. (2018). Kandungan logam non esensial (Pb, Cd dan Hg) dan logam esensial (Cu, Cr dan Zn) pada sedimen di Perairan Tuban Gresik dan Sampang Jawa Timur. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(1):69-74.

Templeton, D. M. (2015). Speciation in metal toxicity and metal-based therapeutics. *Toxics*, 3(2), 170-186.

Tian, M., Deng, P., Zhang, Y., & Salmador, M. P. (2018). How does culture influence innovation? A systematic literature review. *Management Decision*, 56 (5), 1088-1107. Doi: 10.1108/MD-05-2017-0462.

Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Putra, G. W., & Iswara, B. (2019). Metode Systematic Literature Review untuk Identifikasi Platform dan Metode Pengembangan Sistem Informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*, 1(2), 63-77.

Verma, G., Chishty, N., & Veer, C. (2017). Isolation and characterization of *Pseudomonas stutzeri* as lead tolerant bacteria from water bodies of Udaipur, India using 16S rDNA sequencing technique. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 11(2), 975-980.

Wahyudin, U. (2017). Strategi Komunikasi Lingkungan Dalam Membangun Kepedulian Masyarakat Terhadap Lingkungan. *Jurnal Common*, 1(2).

Wardani, A., & Santoso, H. (2015). Keragaman koloni bakteri indigenous pengolahan limbah cair 74etaboli penyamakan kulit. *Biosaintropis*, 1 (1), 19-25.

World Health Organization. (2017). Guidelines For Drinking-water Quality, Fourth Edition Incorporating The First Addendum. Ganeva. Pp 1–631

Wijayanti, T. (2017). Profil pencemaran logam berat pada perairan daerah aliran sungai (DAS) Grindulu Pacitan. *Jurnal Ilmiah Sains*, 17(1), 19-25.

Wilianto, W., & Kurniawan, A. (2018). Sejarah, cara kerja dan manfaat internet of things. *Matrix: Jurnal Manajemen Teknologi dan Informatika*, 8(2), 36-41.

Yani, A., Amin, M., Rohman, F., Suarsini, E., & Putra, W. E. (2020). Profiling indigenous lead-reducing bacteria from Tempe Lake, South Sulawesi,

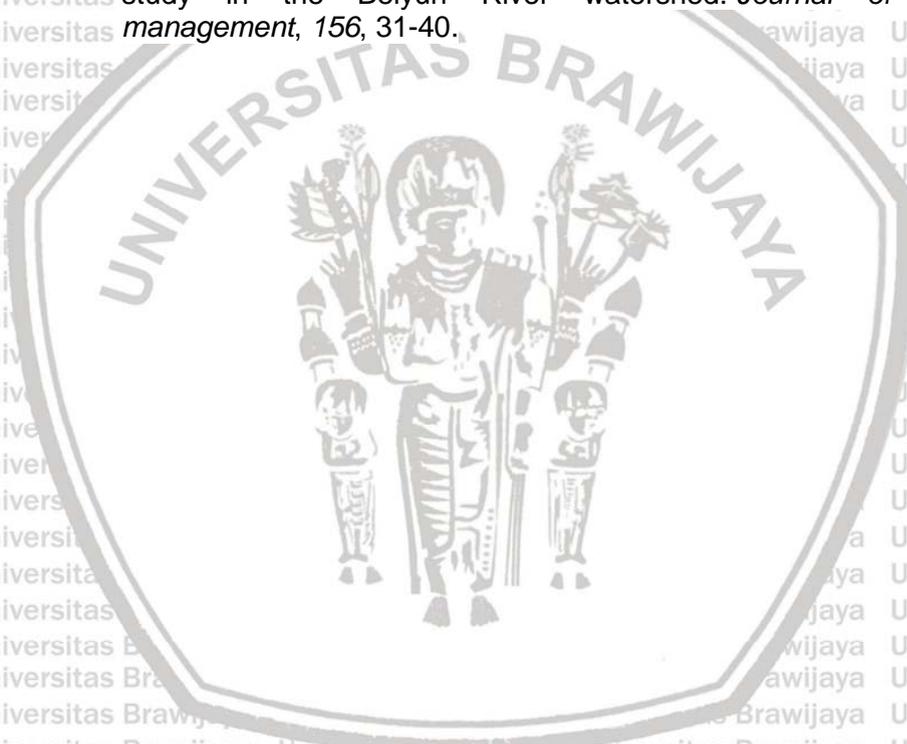
Indonesia as bioremediation agents. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(10), 4778-4786.

Yunanto, A. A., & Rochimah, S. (2017). Systematic Literature Review Terhadap Evaluasi Perangkat Lunak Tentang Serious Game. *Jurnal Informatika*, 4(1), 54-65.

Yusuf, S. A., & Khasanah, U. (2018). Kajian Literatur dan Teori Sosial dalam Penelitian. CV. Adi Karya Mandiri. Yogyakarta.

Zhang, H., Wan, Z., Ding, M., Wang, P., Xu, X., & Jiang, Y. (2018). Inherent bacterial community response to multiple heavy metals in sediment from river-lake systems in the Poyang Lake, China. *Ecotoxicology and environmental safety*, 165, 314-324.

Zhang, S., Li, Y., Zhang, T., & Peng, Y. (2015). An integrated environmental decision support system for water pollution control based on TMDL—A case study in the Beiyun River watershed. *Journal of environmental management*, 156, 31-40.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Outlite pada Laporan Kajian Literatur

Judul: Kajian Literatur Aplikasi Bakteri Indigenus Sebagai Agen Bioremediasi Pencemaran Logam Berat di Perairan

1. Latar Belakang

- Pencemaran lingkungan dan penyebabnya
- Pencemaran logam berat diperairan
- Dampak yang mengharuskan ada pengelolaan
- Pengelolaan pencemaran logam berat di perairan, fisika-kimia-biologi
- Fokus ke pengolahan secara biologi/bioremediasi
- Penggunaan bakteri indigeneous

2. Tujuan Kajian Literatur

- Menganalisis mekanisme bioremediasi logam berat di perairan
- Menganalisis jenis dan kemampuan bakteri indigenus sebagai agen bioremediasi pencemaran logam berat di perairan
- Menganalisis pemanfaatan bioremediasi logam berat dengan bakteri indigenus dalam manajemen sumberdaya perairan

3. Metode Kajian Literatur

- Metode yang digunakan dalam penulisan kajian literature adalah metode *systematic literature review*
- Kajian literature dilakukan dengan pengumpulan data sekunder dari hasil penelitian terdahulu sebanyak 20 jurnal ilmiah utama baik jurnal nasional maupun jurnal internasional
- Penulisan dapat dipermudah dengan membuat kerangka penulisan dan mencatat poin-poin penting dari setiap sumber pustaka

yang digunakan

4. Hasil Kajian Literatur

Bahasan yang akan di paparkan pada bab ini adalah sebagai berikut:

- Penjelasan terkait pencemaran, meliputi definisi dan sumber secara umum, penjelasan terkait pencemaran logam berat meliputi definisi, sumber dan jenis logam berat secara umum di lingkungan dan penjelasan terkait pencemaran logam berat di perairan meliputi definisi, sumber, dampak yang dapat ditimbulkan.
- Penjelasan terkait teknologi yang dapat digunakan dalam mengatasi adanya pencemaran logam berat secara umum di lingkungan baik secara fisika, kimia dan biologi
- Penjelasan terkait bioremediasi secara umum, bakteri secara umum pada lingkungan, bakteri indigenous secara umum, dan mekanisme penggunaan bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi logam berat
- Penjelasan terkait pengaplikasi bakteri indigenous terhadap pencemaran logam berat meliputi kemampuan resistensi bakteri, Identifikasi jenis dan kemampuan bakteri indigenous dalam bioremediasi logam berat
- Penjelasan terkait potensi pemanfaatan bakteri indigenous untuk bioremediasi logam berat dalam manajemen sumberdaya perairan

Lampiran 2. Ringkasan Jurnal Utama yang digunakan dalam Kajian Literatur

No	Judul	Penulis	Hasil Rangkuman
1.	Identifikasi bakteri pada air dari lahan bekas tambang nikel di Halmahera Timur	Christita, <i>et al.</i> 2018	<ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran logam berat nikel pada tanah dan badan air kolam bekas galian di lahan pasca kegiatan pertambangan nikel PT. Antam, Tanjung Buli, Halmahera Timur, Maluku Utara • Berdasarkan hasil penelitian di indentifikasi sebanyak 6 genus bakteri antara lain <i>Bacillus sp.</i>, <i>Esherichia</i>, <i>Enterococcus</i>, <i>Pseudomona</i>,s <i>Staphylococcus</i>, dan <i>Klebsiella</i> dengan bakteri yang mendominasi adalah genus bakteri Bacillus sebesar 50% • Hasil identifikasi bakteri ini membuktikan adanya bakteri indigenous yang resisten terhadap cekaman logam berat
2.	Potensi mikroorganisme resisten seng dari Pantai Timur Surabaya sebagai biosorben	Irawati, 2019	<ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran logam berat seng di Pantai Timur Surabaya • Dari penelitian ini telah diisolasi enam bakteri dan tiga khamir dari pantai timur Surabaya yaitu PmbZn1, PmbZn2, PmbZn3, PmbZn4, PmbZn5, PmbZn6, PmbZn7, PmbZn8, dan PmbZn9. • Bakteri yang paling resisten adalah 78etabol PmbZn5 dengan MIC 9 mM ZnSO4. Potensi 78etabol terhadap biosorb seng adalah 94,79 dan 93,57% pada medium yang mengandung ZnSO4 4 mM dan 7 mM.
3.	Isolasi dan Karakterisasi isolate bakteri resisten	Irawati dan Tahya, 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran logam berat tembaga pada Sungai Cisadane yang terletak pada kawasan industri.



tembaga dari Sungai
Cisadane

- Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan bakteri lokal dalam melakukan mengakumulasi logam berat tembaga.
- Enam bakteri yang berhasil di isolasi dari lokasi dan diidentifikasi berdasarkan analisis gen 16 rDNA menunjukkan jika strain IrCis1, IrCis3, IrCis4, IrCis5, IrCis6 dan IrCis9 berturut-turut adalah *Pantoea agglomerans*, *Klebsiella grimontii*, *Klebsiella pneumoniae*, *Shigella flexneri*, *Enterobacter cloacae*, dan *Enterobacter cloacae*.
- Dari keenam jenis bakteri tersebut tiga bakteri yang paling resisten terhadap tembaga seperti *Klebsiella pneumoniae*, *Pantoea agglomerans* dan *Klebsiella grimontii* mampu mengakumulasi logam berat tembaga masing-masing sebesar 0.92 mg, 1.19 mg, dan 1.39 mg per gram berat kering sel.

4. Isolasi dan karakterisasi Irawati, 2020
bakteri resisten tembaga
dari Pantai Timur
Surabaya

- Pencemaran logam berat tembaga di Pantai Timur Surabaya. Solusi yang dapat ditawarkan adalah dengan melakukan boremediasi menggunakan bakteri indigen yang diisolasi dari lingkungan tercemar.
- Berdasarkan hasil penelitian diperoleh enam 79etabol bakteri resisten tembaga, yaitu PmbC1, PmbC2, PmbC3, PmbC4, PmbC5, dan PmbC6.
- Diantara bakteri-bakteri tersebut 79etabol PmbC4 merupakan bakteri yang paling resisten terhadap logam berat tembaga. Bakteri ini mampu mengakumulasi logam berat tembaga sebesar 6.25 mg per gram berat kering sel serta melakukan biosorpsi hingga 92.17%

5. Eksplorasi penyerap logam Pb dari air Sungai Ciujung	Ikhsan, <i>et al.</i> 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran logam berat timbal pada aliran Sungai Ciujung, Serang, Banten yang berdekatan dengan beberapa industri • Dari proses isolasi bakteri ditemukan sebanyak 7 isolat bakteri lokal yang diketahui mempunyai kemampuan resistensi dan berpotensi sebagai agen bioremediasi terhadap logam berat timbal, ketujuh bakteri tersebut diberi nama IA2, IA3, IA4, IA21, IA22, IA23, dan IA24.
6. Isolation and characterization of arsenic-resistant bacteria and possible application in bioremediation	Dey, <i>et al.</i> 2020	<ul style="list-style-type: none"> • Kontaminasi air tanah oleh logam berat arsenic yang terjadi di Burdwan Benggala Barat, India. • Berdasarkan hasil penelitian ditemukan dua isolate bakteri jenis gram positif yang diduga sebagai bakteri <i>Aneurinibacillus aneurinilyticus</i> dan <i>Basil sp.</i> kedua bakteri tersebut mampu menghilangkan arsenit masing-masing sebesar 51,45% dan 51,99% serta arsenat masing-masing 53,29% dan 50,37%.
7. Assessment of the bioremediation efficacy of the mercury resistant bacteria isolated from Mithi River	Pushkar, <i>et al.</i> 2018	<ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran Sungai Mithi, Mumbai oleh logam berat merkuri • Upaya penanganan melalui bioremediasi menggunakan bakteri • Berdasarkan hasil penelitian ini bakteri resisten merkuri diisolasi dari sampel air Sungai Mithi ditemukan bakteri <i>Bacillus thuringiensis</i> strain RGN1.2 dengan aksesori NCBI no. dari KX832953.1. Itu bisa menghilangkan 96,72%, 90,67% dan 90,10% merkuri dalam 48 jam pada 10, 25 dan 50 ppm merkuri. • MIC dari bakteri yang diisolasi juga ditentukan ditemukan sekitar 500 ppm merkuri yang dipilih untuk analisis lebih lanjut.

- | | | |
|--|---------------------------------|--|
| 8. Molecular characterization of Zinc (Zn) resistant bacteria in Banger River, Pekalongan, Indonesia | Sasi, <i>et al.</i> 2015 | <ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran Logam berat Seng di Sungai Banger Kota Pekalongan • Ditemukan 7 isolat bakteri resisten seng yang inokulasi dari tiga bagian berbeda di Sungai Banger. Ketujuh spesies bakteri tersebut dikelompokkan menjadi 81etaboli genera yaitu <i>Klebsiela</i>, <i>Xenorhabdus</i>, <i>Cronobacter</i>, <i>Enterobacter</i>, <i>Escherichia</i>, <i>Shigella</i> dan <i>Sporomusa</i> yang dikenal sebagai bakteri gram 81etaboli dan <i>Clostridium</i> dan <i>Bacillus</i> sebagai bakteri gram positif • Semua bakteri mampu mereduksi Zn lebih dari 95% dari media |
| 9. Isolation and identification of chromium (VI)-resistant bacteria from Soltan Abad River sediments (Shiraz-Iran) | Kafilzadeh and Saberifard, 2016 | <ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran logam berat kromium pada Sungai Soltan-Abad di selatan Shiraz akibat pencemaran industri dan rumah tangga serta kegiatan pertanian • Hasil penelitian menunjukkan bahwa bakteri yang di isolasi dan di identifikasi dari Sungai Soltan Abad (Shiraz-Iran) menunjukkan <i>Pseudomonas aeruginosa</i> dan <i>Serratia marcescens</i> merupakan bakteri yang paling resisten terhadap logam berat kromium dengan MIC masing-masing 200 dan 150 mg/ L. Kedua bakteri tersebut benar-benar dapat mengurangi 25 dan 50 mg/L Cr (VI) masing-masing dalam 36 jam dan 48 jam. |
| 10. Bioremediation of heavy metal (copper) using indigenous bacteria (<i>Staphylococcus</i> sp.) isolated from Mithi River. | Handa dan Jadhav, 2017 | <ul style="list-style-type: none"> • Pencemaran logam berat tembaga di Sungai Mithi, Mumbai akibat limbah industri • Isolasi bakteri resisten tembaga dilakukan dari sampel yang dikumpulkan dari beberapa titik lokasi berbeda di sungai, hasil bakteri yang ditemukan merupakan bakteri genus <i>Staphylococcus</i> sp. yang mampu melakukan bioremediasi hingga 84%. |

-
11. Heavy metal tolerance in indigenous bacteria isolated from the industrial sewage in Kemisan River, Tangerang, Banten, Indonesia Irawati, *et al.* 2017
- Penceraan logam berat timbal seng dan tembaga yang berasal dari limbah industri di Sungai Kemisan di Tangerang, Banten, Indonesia.
 - Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat delapan bakteri tahan logam berat yang diisolasi dari Sungai Kemisan dengan konsentrasi hambat minimum berkisar antara 7 mM sampai dengan 11 mM.
 - Isolat tersebut mampu menghilangkan timbal sebesar 91,25%, seng sebesar 73,38%, dan tembaga sebesar 98,57%
 - Isolat PbSI1 merupakan bakteri yang menjanjikan, yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk penghilangan logam berat.
-
12. Isolation and identification of indigenous prokaryotic bacteria from arsenic contaminated water resources and their impact on arsenic transformation Jebelli, *et al.* 2017
- Penceraan logam berat 82etabol pada mata Air Babagorgor, yang terletak di sebelah barat Iran, dengan tingkat 82etabol awal adalah 614 µg/l
 - Empat belas bakteri asli yang toleran terhadap 82etabol diisolasi dari air yang terkontaminasi arsenic. Di antara 82etabol, strain As-11 (*Pseudomonas*) menunjukkan kemampuan transformasi 82etabol yang tinggi.
 - Bakteri *Pseudomonas* As-11 memiliki kemampuan tinggi untuk menghilangkan As dari air pada kondisi heterotrofik sebesar 48% As (III) dan 78% As (V) sedangkan dalam kondisi kemolitrofik sebesar 41% As (III).
-
13. Isolation and characterization of *Pseudomonas stutzeri* Verma, *et al.* 2017
- Isolasi dan karakterisasi bakteri resisten timbal dari dua badan air danau Udaisagar dan kolam Gadwa di sistem sungai Berach, Udaipur, Rajasthan, India.
-

asLead tolerant bacteria from water bodies of Udaipur, India using 16S rDNA sequencing technique

- Dari 13 dari total 83etabol yang disaring dari sampel air, dipilih 2 isolat untuk dipelajari berdasarkan ketahanan logam berat yang tinggi. Berdasarkan karakterisasi morfologi, biokimia dan molekuler menggunakan sekuensing 16S rDNA, 83etabol-isolat tersebut diidentifikasi sebagai *Pseudomonas stutzeri* (KX692284) dan *Pseudomonas stutzeri* (KX692285).

14. Possible bioremediation of arsenic toxicity by isolating indigenous bacteria from the middle Gangetic plain of Bihar, India Satyapal, *et al.* 2018

- Penceran logam berat 83etabol di Sungai Gangga, dataran Gangga Bihar akibar sumber alami.
- Dari 48 bakteri indigenous yang berhasil di isolasi, berdasarkan tingkat resisten terbaik dipilih dua 83etabol, AK1 (KY569423) dan AK9 (KY569424), yang berdasarkan analisis sekuens gen 16S rRNA dari 83etabol terpilih mengungkapkan bahwa 83etabol tersebut termasuk dalam genus *Pseudomonas extremorientalis*.
- Hasil uji bakteri *Pseudomonas extremorientalis* menunjukkan kemampuannya dalam melakukan transformasi senyawa 83etabol dari As (III) menjadi As (V)
- Selain logam berat As strain terisolasi juga menunjukkan ketahanan terhadap logam berat Cr (IV), Ni (II), Co (II), Pb (II), Cu (II), Hg (II), Ag (I) dan Cd (II).

15. Utility of chromobacterium violaceum SUK1a, an indigenous bacterial isolate Prabhakaran, *et al.* 2018

- Potensi strain bakteri asli resisten kromium diisolasi dari sampel air permukaan yang dikumpulkan dari Lembah Sukinda di Odisha, India.
- Berdasarkan hasil penelitian bakteri yang berhasil diidentifikasi merupakan bakteri isolasi *Chromobacterium violaceum* SUK1a,

for the bioremediation of Cr(VI)

- Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa 84etabol tersebut dapat menjadi kandidat yang menjanjikan untuk aplikasi bioremediasi Cr (VI). Biosorpsi Cr (VI) maksimum yang berhasil dilakukan sekitar 50% diperoleh, dan sisa kromium dalam bentuk Cr (III) yang kurang beracun.
- Mekanisme bioremediasi Cr (VI) oleh 84etabol bakteri dijelaskan untuk diatur oleh proses biosorpsi dan bioeduksi dalam kondisi 84etabolism independen.

16. Copper Removal by Irawati dan Tahya, 2021
Enterobacter cloacae strain IrSuk1, *Enterobacter cloacae* strain IrSuk4a, and *Serratia nematodiphila* strain IrSuk13 Isolated from Sukolilo River-Indonesia. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering m*

- Pencemaran logam berat tembaga di sungai Sukolilo akibat adanya kegiatan industri di sekitar sungai
- Hasil isolasi dan identifikasi bakteri pada sungai menunjukkan adanya 3 jenis bakteri yang memiliki resistensi yang tinggi terhadap logam berat tembaga yakni strain IrSuk1, IrSuk4a, dan IrSuk13 yang memiliki kesamaan dengan bakteri *Enterobacter cloacae*, *Enterobacter cloacae* dan *Serratia nematodiphila*.
- Ketiga jenis bakteri IrSuk1, IrSuk4a, dan IrSuk13 mampu melakukan akumulasi sebesar 0.96 mg, 0.85 mg, 1.89 mg per gram berat kering sel, serta dapat melakukan biosorpsi masing-masing sebesar 68.78%, 68.34%, dan 68.47%.

17. Molecular and physiological characterization of Irawati, et al. 2019

- Pencernan logam berat tembaga pada Sungai Cikapundung sebagai bagian dari Sungai Citarum, Jawa Barat, Indonesia akibat buangan limbah IPAL industri

indigenous copperresistant bacteria from Cikapundung River, West Java, Indonesia

- Lima bakteri resisten tembaga yang disebut strain CN1, CN2, CN5, CN6, dan CN8 telah diisolasi dari sungai Cikapundung dengan strain CN1 dan CN6 tergolong *Klebsiella pneumoniae* dengan kemiripan 99%. Sedangkan strain CN2, CN5, dan CN8 termasuk dalam kelompok *Acinetobacter calcoaceticus*, *Acinetobacter sp.* dan *Escherichia coli* dengan kemiripan masing-masing 99%, 96%, dan 95%.
- Kemampuan akumulasi tertinggi ditemukan pada bakteri *Klebsiella pneumoniae* dengan total 4,62 mg/g berat kering sel. Sedangkan *Escherichia coli* menunjukkan penyisihan tembaga tertinggi dengan nilai 48,15%.

18. Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions Using Multi-Metals and Antibiotics Resistant Bacterium Isolated from the Red Sea, Egypt Shaaban, et al. 2015

- Pencemaran berbagai logam berat di Laut Merah, Mesir
- Berdasarkan hasil identifikasi 85etabol yang diambil di lokasi tersebut ditemukan strain bakteri *Alteromonas macleodii* dan *Nitratireductor basaltis* yang menunjukkan efisiensi tinggi dakam menghilangkan logam berat
- Hasil uji bakteri menunjukkan jika bakteri *A. macleodii* dapat melakukan biosorpsi logam tunggal sebagai berikut :Pb, 73,8%; Mn, 66%; Fe, 65%; Cu, 64%; Zn, 62%; Ni, 54%; dan Cd, 53%. Sedangkan dalam perairan yang memiliki berbagai jenis logam bakteri ini mampu melakukan biosorpsi sebagai berikut Pb, 93%; Fe, 89%; Zn, 55%; Cd, 50%; Cu, 44,5%; Mn, 40% dan Ni, 36%.

19. Profiling indigenous lead-reducing bacteria from Yani, et al. 2020

- Pencemaran logam berat timbal di Danau Tempe yang terletak di Sulawesi Selatan, Indonesia akibat aktivitas antropogenik

Tempe Lake, South
Sulawesi, Indonesia as
bioremediation agents

- Berdasarkan hasil isolasi ditemukan 4 bakteri jenis gram negatif dengan bentuk basil pada dua spesies bakteri yang berbeda (86etabol A dan D), sedangkan bentuk kokus ditemukan pada dua spesies lainnya (86etabol B dan C)

- Bakteri indigenous isolat D memiliki kemiripan 99,90% dengan bakteri *Comamonas 86etabolism86e* strain S-2, bakteri ini mampu menurunkan konsentrasi Pb dari 7,45 menjadi 3,48 ppm selama tujuh hari.

20. Heavy metal resistance Benhalima, *et al.*
and metallothionein 2020
induction in bacteria
isolated from Seybouse
River, Algeria

- Penceraan logam berat 86etabol dan tembaga di Sungai Seybouse di Aljazair.
- Sebanyak 12 bakteri tahan tembaga dan 86etabol (KZ1-KZ12) berhasil diisolasi dari air permukaan di Sungai Seybouse. Lima spesies KZ2, KZ5, KZ8, KZ10 dan KZ11 merupakan bakteri *Citrobacter freundii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella oxytoca*, *Proteus vulgaris* dan *Salmonella Typhimurium*. Bakteri-bakteri tersebut menunjukkan nilai MIC yang tinggi terhadap Cd dan Cu.

Lampiran 3. Profil logam berat di perairan

Logam Berat	Sumber	Akumulasi	Rute Paparan	Dampak	Referensi
Arsenik (As)	Aktivitas alam (sedimen holosen), pestisida, herbisida, pengawet kayu, produk obat-obatan	Paru-paru, kandung kemih, kulit, ginjal, hati	Pencernaan (konsumsi air minum dan makanan) dan – pernafasan (udara)	Karsinogenik, stress oksidatif, kerusakan mitokondria, proliferasi sel, perubahan metilasi DNA, gangguan pencernaan dan pernafasan, anemia	Satyapal, <i>et al.</i> , 2018; Dey, <i>et al.</i> , 2016; Chatterjee, <i>et al.</i> , 2016
Kromium (Cr)	Industri penyamakan kulit, pembuatan baja, penyulingan minyak, pemrosesan pulp, manufaktur tekstil, pembuatan cat dan pengawetan kayu	Ginjal, hati, paru-paru	Pencernaan (konsumsi air minum dan makanan) dan – pernafasan (udara)	Iritasi pada hidung, kanker paru-paru, gagal ginjal, kerusakan hati, gangguan pencernaan dan kematian	Kafilzadeh dan Saberifard, 2016; Prabhakaran, <i>et al.</i> , 2018
Kadmium (Cd)	Kegiatan industri mobil, limbah elektronik dan kelautan, pupuk dan pestisida pertanian	Ginjal, paru-paru,	Pencernaan (konsumsi air minum dan makanan) dan – pernafasan (udara)	Timbulnya disfungsi tubulus ginjal, dimineralisasi tulang, karsinogenik kerusakan ginjal, kanker, endema paru, penyakit kardiovaskular dan pada organisme dapat menyebabkan perubahan DNA inti.	Mutiati, <i>et al.</i> , 2018; Benerjee, <i>et al.</i> , 2015; Benhalima, <i>et al.</i> , 2020; Kumar, <i>et al.</i> , 2019
Timbal (Pb)	Aktivitas alam (proses geokimia), kandungan TEL pada bahan bakar kapal, cat pada perkapalan, aktifitas penambangan, proses manufaktur (pembuatan keramik, baterai, pestisida dan lain-lain)	Ginjal, hati, jantung, otak	Pernafasan (partikel debu dan aerosol) dan pencernaan (makanan dan air)	Mortalitas bagi organisme akuatik, bagi manusia menyebabkan anemia berat, kerusakan saraf, gangguan fungsi imun, kerusakan ginjal, keterbelakangan mental pada anak-anak dan lain-lain	Ikhsan, <i>et al.</i> , 2020; Fahrudin, <i>et al.</i> , 2020; Verma, <i>et al.</i> , 2017

Seng (Zn)	Pestisida dari aktivitas pertanian, limbah industri (pembuatan baterai dan elektronik)	Paru-paru, hati	Konsumsi air dan minuman pangan	Arterosklerosis akibat rusaknya organ metabolisme sehingga metabolisme protein terganggu, penyebab asma,	Sasi, <i>et al.</i> , 2018; Irawati, 2019
Tembaga (Cu)	Aktivitas Alam (geologi tanah), limbah industri dan rumah tangga, produksi barang elektronik dan produksi kuningan.	Hati, ginjal, jantung, otak	Konsumsi air dan minuman pangan	Merusak mekanisme osmoregulasi pada hewan air tawar, kematian ikan, memicu pembentukan tumor dan kanker, merusak otak dan sistem syaraf	Handa dan Jadhav, 2018; Irawati dan Tahya, 2021, Irawati, 2020
Merkuri (Hg)	Aktivitas penambangan, peralatan listrik, limbah logam	Paru-paru, ginjal, kulit	Pencernaan (konsumsi air dan minuman pangan) dan Pernafasan (udara)	Keracunan sisten syaraf, gangguan fungsi pernafasan, kerusakan otak dan reaksi alergi pada kulit	Lutfi, <i>et al.</i> , 2018, Neneng, <i>et al.</i> , 2020
Nikel (Ni)	Industri pelapisan listrik, pembuatan baterai, penambangan, dan galvanis.	Paru-paru, kulit	Konsumsi air dan minuman pangan	Karsinogenik, hematosik, hepatotoksik, nefrotoksik, kanker paru-paru dan rongga hidung, penyakit kulit	Bhagat, <i>et al.</i> , 2016, Banerjee, <i>et al.</i> , 2015

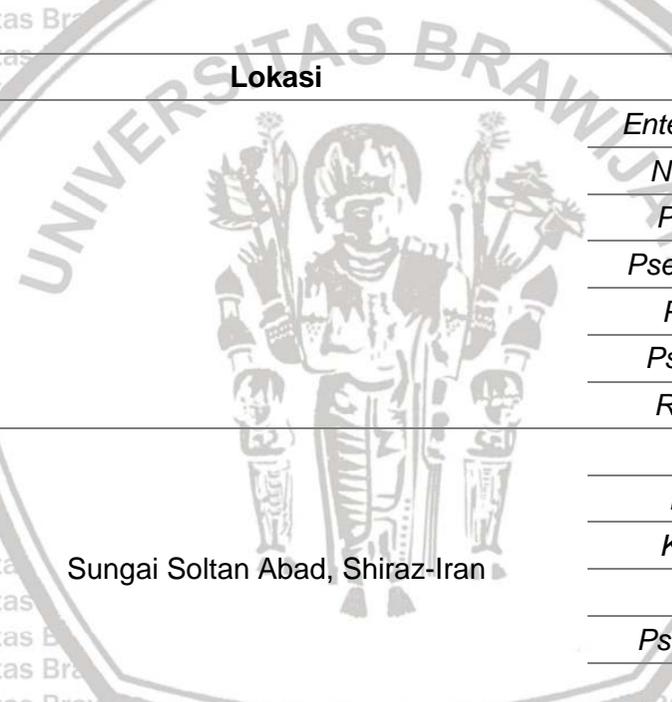
Lampiran 4. Identifikasi bakteri indigenous pada lokasi tercemar logam berat

No	Lokasi	Bakteri	Jenis	Referensi
1.	Sungai Seybouse, Algeria	<i>Acinobacter baumannii</i>	gram negatif	Benhalima, <i>et al.</i> , 2020
		<i>Aeromonas hydrophila</i>	gram negatif	
		<i>Chryseobacterium indologenes</i>	gram negatif	
		<i>Citobacter freundii</i>	gram negatif	
		<i>Echerichia coli</i>	gram negatif	
		<i>Klebsiella oxytoca</i>	gram negatif	
		<i>Pasteurella trehalosi</i>	gram negatif	
		<i>Proteus vulgaris</i>	gram negatif	
		<i>Raoutella ornithinolytica</i>	gram negatif	
		<i>Salmonella typhimurium</i>	gram negatif	
2.	Kolam air bekas galian tambang, Halmahera Timur, Maluku Utara	<i>Shigella spp</i>	gram negatif	Christita, <i>et al.</i> , 2018
		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	gram negatif	
		<i>Bacillus sp.</i>	gram positif	
		<i>Enterococcus sp.</i>	gram positif	
		<i>Escherichia sp.</i>	gram negatif	
		<i>Klebsiella sp.</i>	gram negatif	
3.	Air tanah, Burdwan Benggala Barat, India	<i>Pseudomonas sp.</i>	gram negatif	Dey, <i>et al.</i> , 2016
		<i>Staphylococcus sp.</i>	gram positif	
		<i>Aneurinibacillus aneurinilyticus</i>	gram positif	
		<i>Basil sp.</i>	gram positif	



No	Lokasi	Bakteri	Jenis	Referensi
4.	Sungai Mithi, Mumbai	<i>Staphylococcus sp.</i>	gram positif	Handa dan Jadhav, 2017
5.	Sungai Cisadane, Kabupaten Tangerang	<i>Enterobacter cloacae</i>	gram negatif	Irawati dan Tahya, 2020
		<i>Klebsiella grimontii</i>	gram negatif	
		<i>Klebsiella pneumoniae</i>	gram negatif	
		<i>Enterobacteri cloacae</i>	gram negatif	
		<i>Pantoea agglomerans</i>	gram negatif	
		<i>Shigella flexneri</i>	gram negatif	
6.	Sungai Sukolilo, Indonesia	<i>Enterobacter cloacae</i>	gram negatif	Irawati dan Tahya, 2021
		<i>Enterobacteri cloacae subsp.</i>	gram negatif	
		<i>Serratia nematodiphila.</i>	gram negatif	
7.	Sungai Cikapundung, Jawa Barat, Indonesia	<i>Acinetobacter calcoacetitus</i>	gram negatif	Irawati, <i>et al.</i> , 2019
		<i>Acinobacter sp.</i>	gram negatif	
		<i>Escherichia coli</i>	gram negatif	
		<i>Klebsiella pneumoniae</i>	gram negatif	
		<i>Acinetobacter calcoacetitus</i>	gram negatif	
8.	Mata Air Babagorgor, Iran	<i>Acinetobacter junii</i>	gram negatif	Jebelli, <i>et al.</i> , 2017
		<i>Aeromonas salmonicida</i>	gram negatif	
		<i>Bacillus licheniformis</i>	gram positif	
		<i>Bacilus oceanisedimis</i>	gram positif	
		<i>Basil fi exus</i>	gram positif	
		<i>Brevundimonas diminuta</i>	gram negatif	

No	Lokasi	Bakteri	Jenis	Referensi
		<i>Enterobacter xiangfangensis</i>	gram negatif	
		<i>Nocardiopsi dassonvillei</i>	gram positif	
		<i>Prolinoborus fasciculus</i>	gram negatif	
		<i>Pseudomonas chengduensis</i>	gram negatif	
		<i>Pseudomonas stutzeri</i>	gram negatif	
		<i>Pseudomonas xanthomo</i>	gram negatif	
		<i>Rizhobium halotolerans</i>	gram negatif	
		<i>Bacillus cereus</i>	gram positif	
		<i>Enterobacter cloacae</i>	gram negatif	
9.	Sungai Soltan Abad, Shiraz-Iran	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	gram negatif	Kafilzadeh dan Saberifard, 2016
		<i>Micrococcus luteu</i>	gram positif	
		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	gram negatif	
10.	Sungai Mithi, Mumbai	<i>Serratia marcescens</i>	gram negatif	
		<i>Bacillus thuringiensis</i>	gram positif	Pushkar, et al., 2018
11.	Lembah Sukinda, Odisha, India	<i>Chromobacterium violaceum</i>	gram negatif	Prabhakaran, et al., 2018
		<i>Bacillus cereus</i>	gram positif	
		<i>Escherichia vulneris</i>	gram negatif	
12.	Sungai Banger, Pekalongan, Indonesia	<i>Xenorhabdus</i>	gram negatif	Sasi, et al., 2018
		<i>Shigella</i>	gram negatif	
		<i>Clostridium</i>	gram positif	





No	Lokasi	Bakteri	Jenis	Referensi
		<i>Sporomusa</i>	gram negatif	
		<i>Enterobacter</i>	gram negatif	
		<i>Klebsiella pneumoniae</i>	gram negatif	
13.	Sungai Gangga, Bihar, India	<i>Pseudomonas extremorientalis</i>	gram negatif	Satyapal, <i>et al.</i> , 2018
14.	Laut Merah, Mesir	<i>Alteromonas macleodii</i>	gram negatif	Shaaban, <i>et al.</i> , 2015
15.	Badan Air Udaipur, India	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	gram negatif	Verma, <i>et al.</i> , 2017
16.	Danau Tempe, Sulawesi Selatan, Indonesia	<i>Comamonas testosteroni</i>	gram negatif	Yani, <i>et al.</i> , 2020

Lampiran 5. Kemampuan biosorpsi bakteri indigenous

No	Jenis Bakteri		Jenis Logam Berat	Mekanisme Bioremediasi	MIC (mM)	Konsentrasi Teruji		Penghapusan (%)	Parameter lain			Referensi
	Spesies	Jenis Bakteri				Awal	Akhir		Suhu (°C)	pH	Waktu (h)	
1.	<i>Acinetobacter calcoacetitus</i>	Gram negatif	Cu	Biosorpsi	6	3 mM	-	18,01	37	-	48	Irawati, et al., 2019
2.	<i>Acinobacter sp.</i>	Gram negatif	Cu	Biosorpsi	7	3 mM	-	19,16	37	-	48	
3.	<i>Alteromonas macleodii</i>	Gram negatif	Pb	Biosorpsi	350 ppm	15 ppm	-	98	30	7	5	Shaaban, et al., 2015
			Pb	Biosorpsi	350	30	-	93	30	7	5	
			Pb	Biosorpsi	350	50	4,0	92	30	7	5	
			Pb	Biosorpsi	350	100	13	87	30	7	5	
			Pb	Biosorpsi	350	150	27	82	30	7	5	
			Pb	Biosorpsi	350	200	52,4	73,8	30	7	5	
			Mn	Biosorpsi	300	15	-	53	30	7	5	
			Mn	Biosorpsi	300	30	-	40	30	7	5	
			Mn	Biosorpsi	300	50	3,3	93,4	30	7	5	
			Mn	Biosorpsi	300	100	15,2	84,8	30	7	5	
			Mn	Biosorpsi	300	150	33,9	77,4	30	7	5	
			Mn	Biosorpsi	300	200	68	66	30	7	5	
			Fe	Biosorpsi	250	15	-	87	30	7	5	
Fe	Biosorpsi	250	30	-	55	30	7	5				
Fe	Biosorpsi	250	50	7	86	30	7	5				
Fe	Biosorpsi	250	100	21	79	30	7	5				



No	Jenis Bakteri		Mekanisme Bioremediasi	MIC (mM)	Konsentrasi Teruji		Penghapusan (%)	Parameter lain			Referensi
	Spesies	Jenis Bakteri			Jenis Logam Berat	Awal		Akhir	Suhu (°C)	pH	
		Fe	Biosorpsi	250	150	42	72	30	7	5	
		Fe	Biosorpsi	250	200	70	65	30	7	5	
		Cu	Biosorpsi	275	15	-	91	30	7	5	
		Cu	Biosorpsi	275	30	-	55	30	7	5	
		Cu	Biosorpsi	275	50	4,5	44,5	30	7	5	
		Cu	Biosorpsi	275	100	23	77	30	7	5	
		Cu	Biosorpsi	275	150	44,3	70,5	30	7	5	
		Cu	Biosorpsi	275	200	72	64	30	7	5	
		Zn	Biosorpsi	250	15	-	87	30	7	5	
		Zn	Biosorpsi	250	30	-	55	30	7	5	
		Zn	Biosorpsi	250	50	4,5	91	30	7	5	
		Zn	Biosorpsi	250	100	20	80	30	7	5	
		Zn	Biosorpsi	250	150	44,5	70,3	30	7	5	
		Zn	Biosorpsi	250	200	76	62	30	7	5	
		Ni	Biosorpsi	250	15	-	58	30	7	5	
		Ni	Biosorpsi	250	30	-	36	30	7	5	
		Ni	Biosorpsi	250	50	7,5	85	30	7	5	
		Ni	Biosorpsi	250	100	28	72	30	7	5	
		Ni	Biosorpsi	250	150	58,5	61	30	7	5	
		Ni	Biosorpsi	250	200	92	54	30	7	5	
		Cd	Biosorpsi	175	15	-	80	30	7	5	
		Cd	Biosorpsi	175	30	-	50	30	7	5	

No	Jenis Bakteri		Jenis Logam Berat	Mekanisme Bioremediasi	MIC (mM)	Konsentrasi Teruji		Penghapusan (%)	Parameter lain			Referensi
	Spesies	Jenis Bakteri				Awal	Akhir		Suhu (°C)	pH	Waktu (h)	
			Cd	Biosorpsi	175	50	8,5	83	30	7	5	
			Cd	Biosorpsi	175	100	24	76	30	7	5	
			Cd	Biosorpsi	175	150	48	68	30	7	5	
			Cd	Biosorpsi	175	200	52,4	53	30	7	5	
4.	<i>Bacillus cereus</i>	Gram positif	Zn	Biosorpsi	-	2000 ppm	86,98 ppm	95,65	37	7	24	Sasi, et al., 2018
5.	<i>Bacillus thuringiensis</i>	Gram positif	Hg	Biosorpsi	500 ppm	10 ppm	-	94,87	37	7,4	6	Pushkar, et al., 2018
			Hg	Biosorpsi	500 ppm	10 ppm	-	96,72	37	7,4	48	
			Hg	Biosorpsi	500 ppm	25 ppm	-	90,67	37	7,4	48	
			Hg	Biosorpsi	500 ppm	50 ppm	-	90,10	37	7,4	48	
6.	<i>Chromobacterium violaceum</i>	Gram negatif	Cr	Biosorpsi	-	4 mM	-	50	30	7,3	2,5	Prabhakaran, et al., 2018
7.	<i>Comamonas testosteroni</i>	Gram negatif	Pb	Biosorpsi	-	7,46 ppm	3,48 ppm	53,35	37	-	168	Yani, et al., 2020
8.	<i>Echerichia coli</i>	Gram negatif	Cu	Biosorpsi	8	3 mM	-	48,15	37	-	48	Irawati, et al., 2019
9.	<i>Escherichia vulneris</i>	Gram negatif	Zn	Biosorpsi	-	2000 ppm	94,56 ppm	95,27	37	7	24	Sasi, et al., 2018
10.	<i>Enterobacter cloacae</i>	Gram negatif	Cu	Biosorpsi	9	2 mM	-	68,78	37	-	8	Irawati dan Tahya, 2021
			Cu	Biosorpsi	9	4 mM	-	60,31	37	-	8	
11.			Cu	Biosorpsi	7	3 mM	-	14,99	37	-	48	



No	Jenis Bakteri		Jenis Logam Berat	Mekanisme Bioremediasi	MIC (mM)	Konsentrasi Teruji		Penghapusan (%)	Parameter lain			Referensi
	Spesies	Jenis Bakteri				Awal	Akhir		Suhu (°C)	pH	Waktu (h)	
12.	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Gram negatif	Cu	Biosorpsi	8	3 mM	-	36,78	37	-	48	Irawati, et al., 2019
	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Gram negatif	Zn	Biosorpsi	-	2000 ppm	90,13 ppm	95,49	37	7	24	Sasi, et al., 2018
13.	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Gram negatif	Cr	Biosorpsi	200 ppm	150 ppm	-	66	30	7	36	Kafilzadeh dan Saberifard, 2016
14.	<i>Serratia marcescens</i>	Gram negatif	Cr	Biosoprsi	150 ppm	150 ppm	-	50	30	7	48	Kafilzadeh dan Saberifard, 2016
15.	<i>Serratia namatodiphila</i>	Gram negatif	Cu	Biosorpsi	9	2 mM	-	68,47	37	-	8	Irawati dan Tahya, 2021
			Cu	Biosorpsi	9	4 mM	-	63,36	37	-	8	
16.	<i>Staphylococcus sp.</i>	Gram positif	Cu	Biosorpsi	12	10 mM	1,6 mM	84	34	7	120	Handa dan Jadhav, 2017
17.	<i>Basil sp</i>	Gram positif	As (III)	Oksidasi	4500 ppm	100 ppm	-	51,45	30	7	72	Dey, et al., 2016
			As (V)	Reduksi	4500 ppm	100 ppm	-	53,29	30	7	72	
18.	<i>Pseudomonas chengduensis</i>	Gram negatif	As (III)	Oksidasi (Heterotrofik)	-	130 ppm	-	48	25	7,5	24	Jebelli, et al., 2017
			As (V)	Oksidasi (Heterotrofik)	-	312 ppm	-	78	25	7,7	24	

No	Jenis Bakteri		Jenis Logam Berat	Mekanisme Bioremediasi	MIC (mM)	Konsentrasi Teruji		Penghapusan (%)	Parameter lain			Referensi
	Spesies	Jenis Bakteri				Awal	Akhir		Suhu (°C)	pH	Waktu (h)	
19.	<i>Pseudomonas extremorientalis</i>	Gram negatif	As (III)	Oksidasi (Kemolitotrofik)	-	130 ppm	-	41	25	7,8	144	Satyapal, <i>et al.</i> , 2018
			As (V)	Reduksi	15	1,33 mM	-	25	30	7	72	
			As (III)	Oksidasi	15	1,33 mM	-	25	30	7	72	



Lampiran 6. Kemampuan bioakumulasi bakteri indigenus

No	Jenis Bakteri		Jenis Logam Berat	Mekanisme Bioremediasi	MIC (mM)	Konsentrasi Teruji		Penghapusan (mg/g-1)	Parameter lain			Referensi
	Spesies	Jenis Bakteri				Awal	Akhir		Suhu (°C)	pH	Waktu (h)	
1.	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	6	3 mM	-	2,38	37	-	48	Irawati, <i>et al.</i> , 2019
2.	<i>Acinobacter sp.</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	7	3 mM	-	1,03	37	-	48	
3.	<i>Alteromonas macleodii</i>	Gram negatif	Pb	Bioakumulasi	350	200	-	14,8	30	7	5	Shaaban, <i>et al.</i> , 2015
			Mn	Bioakumulasi	300	200	-	13,2	30	7	5	
			Fe	Bioakumulasi	250	200	-	13	30	7	5	
			Cu	Bioakumulasi	275	200	-	12,8	30	7	5	
			Zn	Bioakumulasi	250	200	-	12,4	30	7	5	
			Ni	Bioakumulasi	250	200	-	10,8	30	7	5	
			Cd	Bioakumulasi	175	200	-	10,6	30	7	5	
4.	<i>Echerichia coli</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	8	3 mM	-	2,28	37	-	48	Irawati, <i>et al.</i> , 2019
5.	<i>Enterobacter cloacae</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	9	2 mM	-	0,96	37	-	8	Irawati dan Tahya, 2021
			Cu	Bioakumulasi	9	4 mM	-	0,45	37	-	8	
6.	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	7	3 mM	-	4,62	37	-	48	Irawati, <i>et al.</i> , 2019
			Cu	Bioakumulasi	8	3 mM	-	3,12	37	-	48	
7.	<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	9	4 mM	-	1,34	37	-	8	Irawati dan Tahya, 2020



8.	<i>Pantoea agglomerans</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	9	4 mM	-	1,19	37	-	8	
			Cu	Bioakumulasi	9	5 mM	-	1,42	37	-	8	
9.	<i>Serratia namatodiphila</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	9	2 mM	-	1,87	37	-	8	Irawati dan Tahya, 2021
			Cu	Bioakumulasi	9	4 mM	-	1,86	37	-	8	
10.	<i>Shigella flexneri</i>	Gram negatif	Cu	Bioakumulasi	9	4 mM	-	0,92	37	-	8	Irawati dan Tahya, 2020
			Cu	Bioakumulasi	9	5 mM	-	0,22	37	-	8	

