

LOGAM BERAT, PENYEBAB DAN PENANGGULANGANNYA

Prof. Dr. Ir. Rusnam, MS

Dr. Ir. Efrizal, MS

Uwais Inspirasi Indonesia

LOGAM BERAT, PENYEBAB DAN PENANGGULANGANNYA

ISBN: 978-623-227-432-7

Penulis: Prof. Dr. Ir. Rusnam, MS
Dr. Ir. Efrizal, MS

Tata Letak: Yogi

Design Cover: Haqi

14,5 cm x 20 cm

xv + 281 halaman

Cetakan Pertama, November 2020

Diterbitkan Oleh:

Uwais Inspirasi Indonesia

Anggota IKAPI Jawa Timur Nomor: 217/JTI/2019 tanggal 1 Maret 2019

Redaksi:

Ds. Sidoarjo, Kec. Pulung, Kab. Ponorogo

Email: Penerbituwais@gmail.com

Website: www.penerbituwais.com

Telp: 0352-571 892

WA: 0812-3004-1340/0823-3033-5859

Sanksi Pelanggaran Pasal 113 Undang-Undang Nomor 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta, sebagaimana yang telah diatur dan diubah dari Undang-Undang nomor 19 Tahun 2002, bahwa:

Kutipan Pasal 113

- (1) Setiap orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam pasal 9 ayat (1) huruf i untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000,00 (seratus juta rupiah).
- (2) Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin pencipta atau pemegang hak cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi pencipta sebagaimana dimaksud dalam pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h, untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (3) Setiap orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin pencipta atau pemegang hak melakukan pelanggaran hak ekonomi pencipta sebagaimana dimaksud dalam pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g, untuk penggunaan secara komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (4) Setiap orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Penulis mengucapkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan sebuah buku yang berjudul **”Logam Berat, Penyebab dan Penanggulangannya”**.

Pada buku ini dipaparkan definisi logam berat, pembagian, penyebab terjadinya, akibat yang ditimbulkan serta beberapa cara yang dapat digunakan untuk menanggulangi pencemaran logam berat tersebut. Bahan yang digunakan dalam penulisan buku ini berasal dari berbagai sumber baik berbentuk buku, jurnal, serta hasil penelitian yang penulis lakukan beberapa tahun terakhir.

Pada bagian yang merupakan hasil penelitian penulis, dikemukakan secara detail berbagai metode yang digunakan untuk menanggulangi logam berat. Logam berat yang diperlakukan untuk ditanggulangi antara lain: merkuri (Hg), Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr). Teknik yang dapat dilakukan untuk upaya pemulihan (remediasi) lahan tercemar logam berat tersebut salah satunya adalah *Fitoteknologi* yang memanfaatkan tumbuhan air sebagai agensia pembersih.

Beberapa jenis tanaman mampu bekerja sebagai agen *Fitoteknologi*, seperti kiambang (*Salvinia molesta*), enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan kayu apu (*Pistia stratiotes*). Jenis-jenis ini merupakan tanaman air yang banyak dijumpai di sungai, pantai, rawa atau danau. Tumbuhan-tumbuhan ini memiliki kemampuan yang disebut dengan hiperakumulator, yaitu relatif tahan terhadap berbagai macam bahan pencemar dan mampu mengakumulasi dalam jaringan dengan jumlah yang cukup besar.

Disamping menggunakan tanaman air sebagai agen pembersih, penulis juga memanfaatkan bongkahan bekas bongkaran bangunan sebagai media untuk penyerapan logam berat tersebut di atas. Bongkahan bekas bangunan selama ini tidak pernah dimanfaatkan, kecuali hanya untuk penimbunan.

Dengan telah selesainya penulisan buku ini, maka pada kesempatan ini ucapan terima kasih kami sampaikan kepada berbagai pihak yang telah berpartisipasi baik moril maupun material, sehingga buku ini bisa diterbitkan. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dari buku ini baik dari segi isi maupun cara penyajiannya. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengharapkan kritikan dari pembaca semuanya, sehingga

diharapkan akan menambah kesempurnaan isi buku ini untuk masa yang akan datang.

Padang, Oktober 2020

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
BAB 1 DEFINISI LOGAM.....	1
BAB 2 DAMPAK LOGAM BERAT TERHADAP KEHIDUPAN MANUSIA	5
2.1 Kondisi Logam Berat di Lingkungan	5
2.2 Kondisi Logam Berat di Perairan	7
2.3 Kondisi Logam Berat pada Pertanian	14
2.4 Kondisi Logam Berat pada Makanan	19
2.5 Kondisi Logam Berat pada Kosmetik.....	34
2.5.1 Logam Berat pada Lipstik	37
2.5.2 Logam Berat pada Krim Pemutih Kulit.....	40
2.5.3 Logam Berat pada Bedak.....	42
2.5.4 Logam Berat pada Maskara dan <i>Eye Shadow</i>	45
2.5.6 Logam Berat pada Pewarna Rambut	47

2.5.7 Logam Berat pada Tabir Surya (<i>Sunblock/Sunscreen</i>).....	49
--------------------------------------------------------------------------	----

BAB 3 TOKSISITAS LOGAM BERAT 51

3.1 Sifat Toksisitas Logam Berat	51
3.2.1 Pada Enzim	57
3.2.2 Organel Subseluler	58
3.2.2.1 Tingkat dan Lamanya Paparan	59
3.2.2.2 Bentuk Kimia.....	59
3.2.2.3 Kompleks Protein Logam Berat	60
3.2.2.4 Faktor Penjamu.....	61

BAB 4 JENIS-JENIS LOGAM BERAT 62

4.1 Arsenik (As)	63
4.2 Kadmium (Cd)	66
4.3 Chromium	70
4.4 <i>Aluminium</i> (Al).....	73
4.5 Besi (Fe)	75
4.6 Timbal (Pb)	76
4.7 Merkuri.....	81

BAB 5 TEKNIK PENANGGULANGAN LOGAM

BERAT.....	87
5.1 Pentingnya Penanggulangan Logam Berat	88
5.2 Teknik Penanganan Cemaran Logam Berat	92
5.2.1 <i>Bioremoval</i> dan Bioabsorpsi.....	93
5.2.2 <i>Fitoteknologi</i>	98
5.2.2.1 Program Penempatan Pemulihan Pada Teknik Fitomerediasi.....	108
5.2.2.2 Tanaman Sebagai Struktur Teknik.....	109
5.2.2.4 Pemulihan dengan Kontaminan Penahan	110
5.2.2.5 <i>Fitoteknologi</i> Pada Tanah yang Terkontaminasi Logam	112
5.2.2.6 <i>Fitoteknologi</i> Pada Tanah Organik yang Terkontaminasi	117
5.2.2.7 Kebutuhan Penelitian Terkait dengan Fitomerediasi	121
5.2.3 Teknologi Bersih dengan Metode AOP (<i>Advance Oxidation Processes</i>).....	125
5.2.4 Teknik Biodegradasi dan Bioremediasi.....	135
5.2.4.1 Definisi Teknik Bioremediasi	135
5.2.4.2 Peran Mikroba dalam Proses Bioremediasi.....	141
5.2.4.3 Degradasi Secara Enzimatis.....	142

5.2.4.4 Faktor Pembatas Degradasi	143
5.2.4.5 Tipe atau Teknik Bioremediasi.....	152
5.2.4.6 Kelebihan dan Kekurangan Teknik Bioremediasi.....	163
5.2.4.6.1 Keuntungan.....	163
5.2.4.6.2 Kekurangan.....	164

BAB 6 PENURUNAN TINGKAT PENCEMARAN

LOGAM BERAT 167

6.1. Penurunan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) Pada Kondisi Air Tergenang.....	167
6.2. Penurunan Tingkat Pencemaran Merkuri Pada Kondisi Air Mengalir	177
6.3. Pemulihan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) untuk Kualitas Air Irigasi.....	186
6.4. Pemulihan Pencemaran Merkuri (Hg) di Daerah Irigasi Batang Hari	193
6.5 Pemulihan Pencemaran Logam Berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) untuk Kualitas Air Perikanan dan Pertanian.....	205
6.6 Pemulihan Pencemaran Logam Berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) Pada Daerah Irigasi Batang Harau.....	215

6.7 Penurunan Konsentrasi Merkuri (Hg) dengan Bongkahan Bangunan Pada Kondisi Metoda Air Tergenang	230
6.8 Penurunan Konsentrasi Merkuri (Hg) dengan Bongkahan Bangunan Pada Kondisi Metoda Air Mengalir.....	238
DAFTAR PUSTAKA.....	248
PENULIS 1	272
PENULIS 2	278

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Batas Maksimum Cemaran Arsen (As) dalam Pangan.....	24
Tabel 2. Batas Maksimum Cemaran Kadmium (Cd) dalam Pangan.....	27
Tabel 3. Batas Maksimum Cemaran Merkuri (Hg) dalam Pangan.....	29
Tabel 4. Batas Maksimum Cemaran Timah (Sn) dalam Pangan.....	31
Tabel 5. Batas Maksimum Cemaran Timbal (Pb) dalam Pangan.....	32
Tabel 6. Persyaratan kandungan logam berat dalam kosmetika	35
Tabel 7. Penggolongan Ion-Ion Logam Berdasarkan Toksisitas (3).....	57
Tabel 8. Jenis-Jenis Mikroorganisme yang Dapat Digunakan untuk Bioremoval Logam Berat	95
Tabel 9. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L.....	169
Tabel 10. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,04 mg/L.....	170

Tabel 11. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,06 mg/L.....	172
Tabel 12. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,08 mg/L.....	173
Tabel 13. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,1mg/L.....	175
Tabel 14. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L.....	180
Tabel 15. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,04 mg/L.....	182
Tabel 16. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,06 mg/L.....	183
Tabel 17. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,08 mg/L.....	184
Tabel 18. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,1mg/L.....	185
Tabel 19. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Debit 50 ml/detik	190
Tabel 20. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Debit 60 ml/detik	191
Tabel 21. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Debit 70 ml/detik	192

Tabel 22. Penurunan Konsentrasi Kadar Merkuri (Hg) Pada Minggu Pertama	196
Tabel 23. Penurunan Konsentrasi Kadar Merkuri (Hg) Pada Minggu Kedua	199
Tabel 24. Penurunan Konsentrasi Kadar Merkuri (Hg) Pada Minggu Ketiga.....	201
Tabel 25. Kadar Kadmium (Cd) pada Larutan dengan Debit 50, 60 dan 70 ml/detik	209
Tabel 26. Kadar Plumbum (Pb) pada Larutan dengan Debit 50, 60 dan 70 ml/detik	211
Tabel 27. Kadar Kromium (Cr) pada Larutan dengan Debit 50, 60 dan 70 ml/detik	213
Tabel 28. Penurunan Konsentrasi Kadmium (Cd) dan Efisiensi Penyisihannya (%).....	217
Tabel 29. Penurunan Konsentrasi Plumbum (Pb) dan Efisiensi Penyisihannya (%).....	219
Tabel 30. Penurunan Konsentrasi Kromium (Cr) dan Efisiensi Penyisihannya (%).....	221
Tabel 31. Penurunan Konsentrasi Kadmium (Cd) dan Efisiensi Penyisihannya (%).....	223
Tabel 32. Penurunan Konsentrasi Plumbum (Pb) dan Efisiensi Penyisihannya (%).....	225

Tabel 33. Penurunan Konsentrasi Kromium (Cr) dan Efisiensi Penyisihannya (%).....	228
Tabel 34. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L dengan Perlakuan Bata Bekas.....	233
Tabel 35. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L dengan Perlakuan Beton Bekas.....	234
Tabel 36. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L dengan Perlakuan Keramik Bekas	236
Tabel 37. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Perlakuan Bata Bekas.....	242
Tabel 38. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Perlakuan Beton Bekas.....	244
Tabel 39. Kadar merkuri (Hg) pada Larutan dengan Perlakuan Keramik Bekas	246

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Proses Yang Terjadi bila Logam Berat Masuk ke Lingkungan Perairan	13
Gambar 2. Mekanisme toksisitas merkuri dalam tubuh manusia.....	86
Gambar 3. Menuju perubahan ideal	131
Gambar 4. Tiadanya visi maka rencana kegiatan bingung	131
Gambar 5. Tiadanya keterampilan terjadi kegelisahan kegiatan	132
Gambar 6. Tiadanya insentif terjadi perubahan merayap ..	132
Gambar 7. Tiadanya sumber daya akan terjadi frustrasi	132
Gambar 8. Contoh Reaksi Hidrolase.....	142
Gambar 9. Contoh Reaksi Oksidoreduktase	144
Gambar 10. Teknik Bioremediasi dengan <i>Bioventing</i>	156
Gambar 11. Teknik bioremediasi dengan penghalang reaktif biologis	157
Gambar 12. Teknik bioremediasi dengan <i>biosparging</i>	158
Gambar 13. Teknik Bioremediasi dengan <i>Bioslurping</i>	159
Gambar 14. Teknik Bioremediasi dengan <i>Landfarming</i>	161

BAB 1

DEFINISI LOGAM

Dalam kehidupan sehari-hari, kita tidak terpisahkan dari benda-benda yang bersifat logam. Keberadaan logam eksis hampir pada semua bidang baik itu industri, pertanian, kesehatan, transportasi, pertahanan, dan sebagainya. Benda ini kita gunakan sebagai alat perlengkapan rumah tangga seperti sendok, garpu dan pisau, sampai pada tingkat perhiasan mewah yang tidak dapat dimiliki semua orang seperti emas dan perak.

Logam berat adalah zat dengan konduktivitas listrik yang tinggi dan distribusinya di atmosfer dipantau oleh sifat dari logam yang diberikan dan oleh berbagai faktor lingkungan [1,2].

Secara langsung, menurut dalam konotasi keseharian kita beranggapan bahwa logam diidentikkan dengan besi yang padat, berat, keras dan sulit dibentuk. Istilah logam biasanya diberikan kepada semua unsur-unsur kimia dengan

ketentuan atau kaidah kaidah tertentu. Unsur ini dalam kondisi suhu kamar, tidak selalu berbentuk padat melainkan ada yang berbentuk cair misalnya hidrargyrum atau merkuri (Hg), serium (Ce) dan gallium (Ga) [3,4].

Logam mempunyai daya hantar panas dan listrik yang tinggi. Logam berat merupakan unsur-unsur kimia dengan bobot jenis lebih besar dari 5 gr/cm^3 . Logam berat dalam toksisitasnya merupakan logam berat essensial (dalam jumlah tertentu dibutuhkan tubuh) dan non essensial (bersifat racun dalam tubuh). Upaya pemulihan perlu dilakukan untuk mengurangi kadar logam berat dengan salah satu metode yang mampu menangani masalah pencemaran logam berat pada tanah yaitu *Fitoteknologi* [4].

Penamaan logam berat telah dipergunakan secara luas, khususnya dalam pustaka ilmiah, sebagai suatu yang menggambarkan bentuk dari logam tertentu [5]. Logam digolongkan kedalam dua katagori, yaitu logam berat dan logam ringan. Logam berat ialah logam yang mempunyai berat 5 g atau lebih untuk setiap cm^3 , dengan sendirinya logam yang beratnya kurang dari 5 g setiap cm^3 termasuk logam ringan [6,2].

Logam berat tergolong kriteria yang sama dengan logam lainnya. Hal yang membedakan adalah pengaruh yang

dihasilkan saat logam berat berikatan dan atau masuk ke dalam organisme hidup. Contoh ketika unsur logam besi atau Fe masuk ke dalam tubuh, walaupun dengan kadar berlebihan, seringkali tidak menimbulkan dampak negatif bagi tubuh. Karena sejatinya unsur besi (Fe) diperlukan dalam darah untuk mengikat oksigen. Lain hal dengan unsur logam berat, baik itu logam berat beracun yang dipentingkan seperti tembaga atau Cu, bila masuk kedalam tubuh dengan kadar yang berlebih akan menimbulkan dampak negatif terhadap fungsi fisiologi tubuh. Ketika unsur logam berat beracun seperti hidrargyrum atau merkuri (Hg) atau disebut juga dengan air raksa, masuk kedalam tubuh organisme hidup maka dapat dipastikan organisme tersebut akan langsung keracunan [3,2].

Logam berat merupakan unsur penting yang diperlukan makhluk hidup. Pada kadar yang tidak berlebihan, sebagai *trace element*, logam berat esensial seperti tembaga (Cu), selenium (Se), Besi (Fe) dan Zink (Zn) dibutuhkan untuk menjaga metabolisme tubuh manusia. Sebaliknya logam berat yang nonesensial (elemen mikro) tidak mempunyai fungsi didalam tubuh manusia, dan bahkan sangat berbahaya hingga dapat menyebabkan keracunan (toksik) pada manusia

diantaranya: timbal (Pb), merkuri (Hg), arsenik (As) dan cadmium (Cd). Logam berat merupakan komponen alami yang terdapat di kulit bumi yang tidak dapat didegradasi ataupun dihancurkan dan merupakan zat yang berbahaya karena dapat terjadi *Bioakumulasi*. *Bioakumulasi* adalah peningkatan konsentrasi zat kimia dalam tubuh makhluk hidup dalam waktu yang cukup lama, dibandingkan dengan konsentrasi zat kimia yang terdapat di alam [7,2].

DAMPAK LOGAM BERAT TERHADAP KEHIDUPAN MANUSIA

2.1 Kondisi Logam Berat di Lingkungan

Bioakumulasi adalah peningkatan konsentrasi zat kimia di dalam tubuh makhluk hidup pada jangka waktu lama, dibandingkan dengan kadar zat kimia di alam. Kadar berlebihan menyebabkan logam berat tidak dapat dimetabolisme dan tidak dapat mengalami biotransformasi ke bentuk senyawa lain. Logam berat hanya dapat diekskresikan oleh tubuh melalui ginjal dalam bentuk ion dan ion ini dapat menyebabkan gangguan fungsi ginjal [9].

Selain secara alamiah, penyebab kandungan logam berat dalam tanah antara lain adalah bahan-bahan agrokimia berupa pupuk dan pestisida, kontaminasi dari asap kendaraan bermotor, bahan bakar minyak, buangan limbah rumah tangga, limbah industri, dan pertambangan. Kandungan

logam berat di dalam tanah dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti keasaman tanah, bahan organik, suhu, tekstur, mineral liat, dan kadar unsur lain. Derajat keasaman (pH) merupakan faktor penting dalam proses transformasi logam. Pada pH rendah, ketersediaan beberapa logam berat dapat meningkat [9,8].

Dapat disebutkan bahwa semua logam berat dapat menjadi racun yang meracuni tubuh makhluk hidup. Misalnya logam air raksa (Hg), kadmium (Cd), timbal (Pb), dan khrom (Cr). Sebagian dari logam-logam berat tersebut tetap dibutuhkan oleh makhluk hidup dalam kadar yang sangat sedikit. Logam yang diperlukan tersebut dinamakan logam atau mineral esensial tubuh. Beberapa nama logam-logam berat esensial adalah tembaga (Cu), seng (Zn), dan nikel (Ni) [10].

Air limbah menjadi tempat paling sering ditemukan dalam logam berat termasuk arsenik, kadmium, kromium, tembaga, timah, nikel, dan seng, yang semuanya menimbulkan risiko bagi kesehatan manusia dan lingkungan [11]. Berbagai sumber logam berat termasuk erosi tanah, pelapukan alami kerak bumi, pertambangan, limbah industri, limpasan perkotaan, pembuangan limbah, agen pengendalian

serangga atau penyakit diterapkan untuk tanaman, dan banyak lainnya [12].

Sifat logam berat yang dapat membahayakan lingkungan dan manusia adalah:

- a. Logam berat sulit didegradasi, sehingga cenderung akan terakumulasi pada lingkungan
- b. Logam berat dapat terakumulasi dalam tubuh organisme dan konsentrasi dapat semakin tinggi, atau dapat mengalami *Bioakumulasi* dan biomagnifikasi
- c. Logam berat mudah terakumulasi pada sedimen, sehingga konsentrasi selalu lebih tinggi daripada konsentrasi logam dalam air [13].

2.2 Kondisi Logam Berat di Perairan

Cemaran adalah zat yang mempunyai pengaruh menurunkan kualitas lingkungan atau menurunkan nilai lingkungan itu. Sedangkan kontaminan adalah zat yang menyebabkan perubahan dari susunan normal dari suatu lingkungan. Kontaminan tidak digolongkan sebagai cemaran bila tidak menimbulkan penurunan kualitas lingkungan. Pencemaran adalah peristiwa adanya penambahan bermacam-macam bahan sebagai hasil dari aktivitas manusia ke dalam

lingkungan yang biasanya memberikan pengaruh berbahaya terhadap lingkungan itu. Logam berat merupakan salah satu unsur pencemar perairan yang bersifat toksik dan harus terus diwaspadai keberadaannya [14].

Penyebab utama logam berat menjadi bahan pencemar berbahaya karena logam berat tidak dapat dihancurkan (*non degradable*) oleh organisme hidup di lingkungan dan terakumulasi ke lingkungan, terutama mengendap di dasar perairan membentuk senyawa kompleks bersama bahan organik dan anorganik secara absorpsi dan kombinasi. Biota air yang hidup dalam perairan yang tercemar logam berat, dapat mengakumulasi logam berat tersebut pada jaringan tubuhnya.

Makin tinggi kandungan logam dalam perairan akan semakin tinggi pula kandungan yang terakumulasi dalam tubuh hewan tersebut [15].

Logam berat merupakan bahan buangan yang sudah sering menimbulkan pencemaran laut atau pantai di negara-negara yang sedang berkembang. Masuknya limbah ini ke perairan laut telah menimbulkan pencemaran terhadap perairan [16]. Secara garis besar sumber pencemaran perairan pesisir dan lautan dapat dikelompokkan menjadi tujuh kelas yaitu limbah industri, limbah pemukiman (*sewage*), limbah

cair perkotaan (*urban storm water*), pertambangan, pelayaran (*shipping*), pertanian dan perikanan budidaya. Sedangkan bahan pencemar utama yang terkandung dalam buangan limbah dari ketujuh sumber tersebut berupa sedimen, unsur hara (*nutrient*), logam beracun (*toxic metal*), pestisida, organisme eksotik, organisme patogen, sampah dan *oxygen depleting substance* (bahan yang menyebabkan oksigen terlarut dalam air berkurang) [17].

Logam berat merupakan salah satu bahan kimia beracun yang dapat memasuki ekosistem bahari. Logam berat seringkali memasuki rantai makanan di laut dan berpengaruh pada hewan-hewan, serta dari waktu ke waktu dapat berpindah-pindah dari sumbernya. Beberapa biota laut tertentu juga dapat mempertinggi pengaruh toksik berbagai unsur kimia, karena memiliki kemampuan untuk mengakumulasi zat di tubuhnya jauh melebihi yang terkandung di perairan sekitarnya. Adanya logam berat di perairan, berbahaya baik secara langsung terhadap kehidupan organisme, maupun efeknya secara tidak langsung terhadap kesehatan manusia [18].

Jenis kerang-kerangan merupakan jenis organisme khas yang dapat mengakumulasi logam berat, dikarenakan kerang

mempunyai mobilitas yang rendah sehingga adanya logam berat di dalam tubuhnya dipandang dapat mewakili keberadaan logam berat yang terdapat di habitatnya. Kerang merupakan biota yang potensial terkontaminasi logam berat, karena sifatnya yang *filter feeder*, sehingga biota ini sering digunakan sebagai hewan uji dalam pemantauan tingkat akumulasi logam berat pada organisme laut [19].

Logam berat yang ada di perairan suatu saat akan turun dan mengendap pada dasar perairan, membentuk sedimentasi bersama lumpur, hal ini akan menyebabkan organisme yang mencari makan di dasar perairan (kerang, udang, dan rajungan) akan memiliki peluang yang besar terpapar logam berat yang telah terikat di dasar perairan dan membentuk sedimen [20].

Oleh karena itu, hasil tangkapan laut perlu diwaspadai terhadap pencemaran logam berat, khususnya jenis kerang yang habitatnya berada di dasar perairan atau lumpur. Mengingat pencemaran terjadi secara terus menerus karena adanya penambahan industri, diduga akan berpengaruh pada terjadinya perubahan konsentrasi logam berat di perairan dari waktu ke waktu. Selain itu, analisis logam berat pada biota perairan memberikan informasi penting mengenai dampak

potensial dari konsumsi makanan laut pada kesehatan masyarakat masih sangat minim.

Sumber pencemaran logam berat terbagi menjadi dua sumber yaitu sumber alami dan sumber buatan. Sumber alami cirinya [13] :

1. Berasal dari daerah pantai (*coastal supply*), yang bersumber dari sungai, abrasi oleh aktivitas gelombang;
2. Berasal dari logam yang dibebaskan aktivitas gunung berapi dan logam yang dibebaskan proses kimiawi;
3. Berasal dari lingkungan daratan dan dekat pantai, termasuk logam yang dibawa oleh ikan dari atmosfer berupa partikel debu.

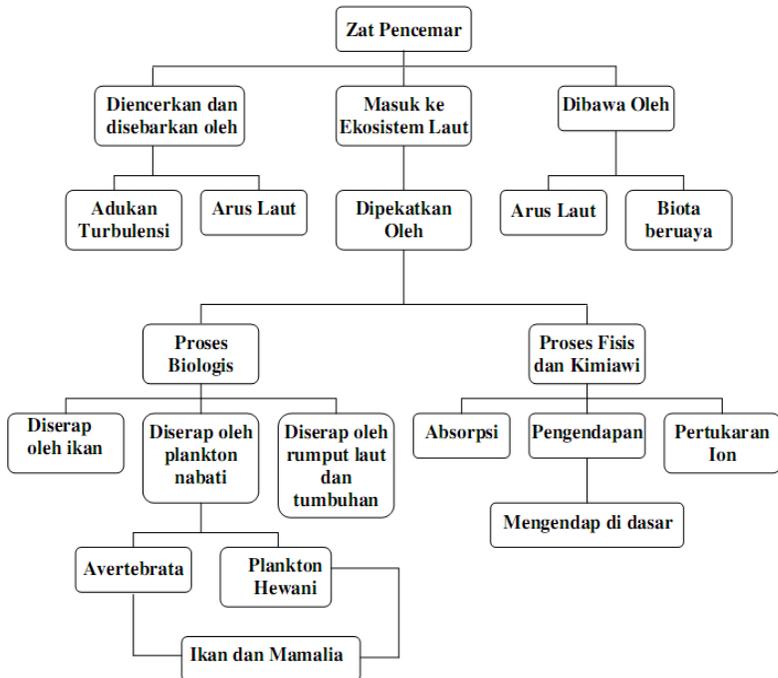
Sumber buatan berupa logam-logam berat yang dibebaskan oleh proses atau kegiatan pertambangan. Beberapa jenis logam yang termasuk kategori logam berat ini adalah sebagai berikut: *Aluminium* (Al), *Antimony* (Sb), *Cadmium* (Cd), *Chromium* (Cr), *Cobalt* (Co), *Merkuri* (Hg), *Cufrum* (Cu), *Ferrum* (Fe), *Manganese* (Mn), *Molybdenum* (Mo), *Salenium* (Se), *Silver* (Ag), *Tin* (Sn), *Plumbum* (Pb), *Vanadium* (V) dan *Zinc* (Zn). *Logam* berat seperti;

Merkuri (Hg), Cadmium (Cd), Plumbum (Pb), Chromium (Cr), Cufrum (Cu), Cobalt (Co) sangat berbahaya bila kadar yang terlarut dalam tubuh manusia cukup tinggi atau melebihi ambang batas baku. Logam-logam berat tersebut bersifat sangat toksik yang dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui beberapa cara yaitu makanan, pernafasan dan penetrasi kulit [13].

Logam berat merupakan salah satu bahan pencemar perairan. Keberadaan logam-logam ini sangat berbahaya, meskipun dalam jumlah yang kecil. Berbagai aktivitas manusia seperti penambangan logam, pelapisan dan pencampuran logam, industri minyak dan pigmen, pembuatan pestisida dan industri penyamakan kulit sangat berpotensi menghasilkan limbah yang mengandung logam berat [21].

Logam berat biasanya ditemukan sangat sedikit dalam air secara alamiah, yaitu kurang dari 1 mg/l. Bila terjadi erosi alamiah, konsentrasi logam tersebut dapat meningkat. Beberapa macam logam biasanya lebih dominan daripada logam lainnya dan dalam air biasanya tergantung pada asal sumber air (air tanah dan air sungai). Disamping itu jenis air (air tawar, dan air laut) juga mempengaruhi kandungan logam di dalamnya [22].

Bila bahan cemaran masuk ke dalam lingkungan perairan, maka bahan cemaran ini akan mengalami tiga proses akumulasi yaitu proses fisik, kimia dan biologis seperti pada Gambar 1 [23].



Gambar 1. Proses Yang Terjadi bila Logam Berat Masuk ke Lingkungan Perairan

2.3 Kondisi Logam Berat pada Pertanian

Logam berat merupakan zat yang beracun serta umumnya bersifat karsinogenik. Oleh karena itu pengolahan dan penghilangan logam berat dari perairan sangatlah diperlukan [24]. *Port de entrée* (pintu masuk) logam berat bisa melalui makanan, air minum, atau udara. Tembaga, selenium, atau seng merupakan jenis logam berat yang dalam kadar tertentu diperlukan untuk metabolisme tubuh manusia. Namun logam ini dapat menjadi berbahaya pada kadar yang lebih tinggi [15].

Pada tanah pertanian, pemasok logam berat berasal dari bahan agrokimia seperti pupuk dan pestisida, asap kendaraan bermotor, bahan bakar minyak, pupuk organik, buangan limbah dari rumah tangga, industri, dan pertambangan. Dari segi lingkungan yang terkena dampak dari logam berat adalah keasaman tanah, bahan organik, suhu, tekstur, mineral liat, dan kadar unsur lain. Faktor pH adalah penting dan menentukan transformasi logam, dimana penurunan pH dapat meningkatkan ketersediaan logam berat kecuali Mo dan Se [24].

Terserapnya logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) ke tanaman dipengaruhi oleh pH tanah dan KTK tanah yang rendah. Pb dan Cd tidak akan larut ke dalam tanah jika

tanah tidak terlalu masam. Bahan organik (BO) adalah salah satu komponen terpenting didalam tanah. Berperan dalam perkembangan struktur tanah dan mengatur perpindahan polutan dan bahan pencemar didalam tanah, dan berperan penting didalam siklus perputaran serta penyimpanan hara dan air. Senyawa humat juga berperan dalam membentuk ikatan kompleks dengan logam-logam. Adanya pembentukan kompleks mempengaruhi kereaktifan dan efek toksik dari logam [9].

Pada pembentukan logam berat terdapat tujuh macam proses geologi. Pertama pelonggokan logam berat ialah segregasi dalam magma. Butiran mineral berkerapatan lebih besar mengendap lewat magma lumer (*fluid*) sewaktu kristalisasi masih berlangsung. Salah satu lenggokan yang terjadi sekarang ini ialah kronit (FeCr_2O_4), cebakan (ore) pokok Cr yang berkerapatan $4,4 \text{ g cm}^{-3}$ [25].

Proses kedua adalah metamorfisme singgung. Dalam kejadian ini larutan kimia yang sangat aktif dikandung magma mengubah batuan yang mengelilingi sebagai penukar komponen-komponen yang ada dalam batuan. Sebagai contoh, suatu lapisan batuan gamping diganti dengan cebakan

besi yang terdiri atas mineral hematit (Fe_2O_3) dan magnesit [$\text{Fe}(\text{FeO}_2)_2$], atau cebakan Cu, Zn, atau Pb.

Proses ketiga adalah pembentukan tubuh pegmatite yaitu lenggokan bahan berbutiran lebih kasar di dalam massa batuan plutonik induk yang besar berbutiran lebih halus. Tubuh pegmatite dapat menjalar ke dalam batuan yang mengelilingi berupa urat-urat. Logam berat yang ditemukan dalam pegmatit ialah Ta (tantalum), Nb (Niobium), U (Uranium), Th (Thorium), dan beberapa logam tanah langka yang lain.

Proses keempat berlangsung dengan pelibatan larutan hidrotermal. Zat logam meninggalkan magma sewaktu tahap terakhir kristalisasi dan diendapkan dalam rekahan batuan membentuk urat-urat mineral, atau dipancarkan dalam massa batuan yang sangat besar. Larutan hidrotermal bergerak ke atas menuju ke permukaan bumi. Maka terbentuk cebakan logam dangkal, bahkan dapat muncul sebagai endapan dari mata-air panas. Emas, perak dan Hg banyak ditemukan sebagai cebakan dangkal.

Proses kelima berkenaan dengan pengaruh daya larutan yang bergerak ke bawah di dalam mintakat (zone) aerasi dan di dalam mintakat air tanah. Endapan endapan sedikit disana sini didalam mitakat aerasi terlarutkan dalam air meteoric

yang berperkolasi, terkumpulkan dan terpekatkan dan akhirnya terlonggokkan di atas mintakat air tanah menjadi cebakan, karena menyangkut pengayaan endapan mineral, proses ini disebut proses sekunder.

Proses keenam yang merupakan proses sekunder oleh daya pengaruh air meteoric, namun berlawanan dengan proses kelima, membentuk longgokan secara residual. Air meteoric yang berinfiltrasi dan berperkolasi, atau bergerak ke samping sebagai aliran limpas atau resapan (seepage) memindahkan lebih banyak zat yang lebih mudah larut daripada zat yang mengandung logam.

Proses ketujuh ialah pelonggokan secara sedimentasi lewat pengangkutan oleh aliran air dan gelombang. Sedimentasi dapat terjadi di darat atau di laut. Batuan lebih dulu mengalami pelapukan, bahan lapukan diangkut oleh aliran limpas masuk ke sungai. selanjutnya diangkut ke hilir dan sibir (fragment) batuan yang mengandung logam berat akan mengendap lebih dulu di sebelah hulu daripada yang tidak mengandung logam berat karena berat jenis lebih tinggi.

Tanaman mampu menyerap dan mengakumulasikan logam-logam yang ada baik dari tanah melalui sistem perakarannya maupun dari udara melalui daunnya.

Akumulasi atau pencemaran yang berlebihan dari logam berat menyebabkan penurunan produktifitas tanaman. Tanaman menyerap mineral nutrisi dari dalam tanah melalui akar untuk kelangsungan proses metabolisme, bersamaan dengan itu apabila terdapat logam berat dalam tanah akan terserap juga oleh akar dan masuk ke dalam jaringan.

Keracunan merkuri pada manusia akibat konsumsi tanaman yang bermerkuri masuk melalui jaringan tanaman dalam jumlah yang sedikit serta pada tanaman mengakibatkan rusaknya sistem jaringan sehingga tanaman menjadi mati atau dengan cara merkuri akan terlarut dan sebagian lagi akan meresap ke dalam tanah dan ada juga yang masuk ke metabolisme tanaman dan terakumulasi pada semua jaringan tanaman yang berdampak hasil dari tanaman tersebut mengandung merkuri dalam jumlah yang cukup besar pada tanaman seperti padi, rumput, beberapa jenis leguminosa untuk pakan ternak, dan sayuran serta dampak lainnya, mengurangi jumlah klorofil tanaman hijau, mengurangi pertumbuhan tanaman, merusak pertumbuhan akar dan fungsi serta merusak daun dan menurunkan produksi. [25].

2.4 Kondisi Logam Berat pada Makanan

Pangan dan makanan mempunyai fungsi yang sangat amat penting untuk manusia karena merupakan kebutuhan utama dan menentukan kelangsungan hidup manusia. Hak atas pangan adalah hak asasi yang paling penting setelah hidup. Oleh karena itu setiap manusia berhak atas pangan yang memadai baik kualitas dan kuantitasnya [26].

Pangan yang dikonsumsi sehari-hari merupakan hasil pertanian. Pangan seharusnya memenuhi kriteria ASUH (Aman, Sehat, Utuh dan Halal). Salah satu parameter tersebut, yaitu Aman, termasuk dalam masalah mutu. Mutu dan keamanan pangan berpengaruh langsung terhadap kesehatan masyarakat dan perkembangan sosial. Makanan yang bermutu baik dan aman diperlukan untuk meningkatkan kesehatan, kesejahteraan individu dan kemakmuran masyarakat [27].

Makanan yang aman merupakan faktor yang penting untuk meningkatkan derajat kesehatan masyarakat. Menurut undang-undang RI No 7 tahun 1996, keamanan pangan didefinisikan sebagai kondisi dan upaya yang diperlukan untuk mencegah pangan dari dari kemungkinan cemaran biologis, kimia, benda lain yang dapat mengganggu,

merugikan dan membahayakan kesehatan manusia. Penyakit melalui makanan (*food borne disease*) dapat berasal dari berbagai sumber yaitu organisme pathogen termasuk bakteri, kapang, parasit dan virus, dari bahan kimia seperti racun alami, logam berat, pestisida, hormon, antibiotik, bahan tambahan berbahaya dan bahan-bahan pertanian lainnya [28].

Sumber kontaminasi logam berat ada dua, yaitu lewat pencemaran udara dan dari bahan makanan. Pencemaran lewat udara terutama berasal dari asap buangan kendaraan bermotor. Data yang dikeluarkan Badan Pengawasan Dampak Lingkungan (Bapedal) DKI tahun 1998, kadar timbal di udara Jakarta rata-rata telah mencapai 0,5 mg per meter kubik udara. Untuk kawasan tertentu, seperti terminal bus dan daerah padat lalu lintas, kadar timbal bisa mencapai 2-8 mg per meter kubik udara [29].

Logam berat masuk kedalam tubuh manusia melalui mulut, yaitu makanan yang terkontaminasi oleh alat masak, wadah (minum/makanan kaleng) dan juga melalui pernapasan seperti asap dari pabrik, proses industri dan buangan limbah. Kontaminasi makanan juga bisa terjadi dari tanaman pangan (bidang pertanian) yang diberi pupuk dan pestisida yang mengandung logam [6].

Logam berat terserap kedalam jaringan tanaman melalui akar dan daun, yang selanjutnya melalui siklus rantai makanan [30]. Sumber utama kontaminan logam berat sesungguhnya berasal dari udara dan air yang mencemari tanah. Selanjutnya semua tanaman yang tumbuh di atas tanah yang telah tercemar akan mengakumulasikan logam-logam tersebut pada bagian akar, batang, daun dan buah. Logam akan terakumulasi pada jaringan tubuh dan dapat menimbulkan keracunan pada manusia, hewan, dan tumbuhan apabila melebihi batas toleransi. Di Indonesia, kadar residu pestisida yang terkandung dalam bahan pangan sayuran, seperti wortel, kentang, sawi, bawang merah, cabe merah dan kubis dari berbagai tempat budi daya sayuran di Jawa Barat dan Jawa Tengah pada tahun 1992 diketahui mengandung residu yang melampaui batas maksimum [31].

Sayuran merupakan sumber pangan yang mengandung banyak vitamin dan mineral yang secara langsung berperan meningkatkan kesehatan. Oleh karena itu, higienitas dan keamanan sayuran yang dikonsumsi menjadi sangat penting agar tidak menimbulkan gangguan kesehatan. Namun banyak jenis sayuran yang beredar di masyarakat tidak terjamin keamanannya karena diduga telah terkontaminasi logam-

logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), atau merkuri (Hg). Logam-logam berat tersebut bila masuk ke dalam tubuh lewat makanan akan terakumulasi secara terus-menerus dan dalam jangka waktu lama dapat mengakibatkan gangguan sistem syaraf, kelumpuhan, dan kematian dini serta penurunan tingkat kecerdasan anak-anak [29].

Selain timbal (Pb), sayuran juga rentan terhadap kontaminasi logam berat tembaga (Cu). Cemaran tembaga (Cu) terdapat pada sayuran dan buah-buahan yang disemprot dengan pestisida secara berlebihan. Penyemprotan pestisida banyak dilakukan untuk membasmi siput dan cacing pada tanaman sayur dan buah. Selain itu, garam Cu juga digunakan sebagai bahan dari larutan “bordeaux” yang mengandung 1-3% CuSO_4 untuk membasmi jamur pada sayur dan tanaman buah. Senyawa CuSO_4 juga sering digunakan untuk membasmi siput sebagai inang dari parasit, cacing dan untuk mengobati penyakit pada kuku domba [6].

Penelitian yang dilakukan oleh salah satu dosen Universitas Diponegoro Semarang pada tahun 2006, ditemukan kadar Pb (timbal) pada hati sapi sebesar 2,48 ppm, pada sapi yang digembalakan ditempat pembuangan sampah di Solo dan Semarang [32]. Ternak akan memanen logam-logam berat yang ada pada tanaman dan sampah dan

menumpuknya dibagian-bagian dagingnya. Lalu manusia yang termasuk ke dalam kelompok omnivore (pemakan segalanya), akan tercemar logam tersebut jika mengkonsumsinya.

Tanpa disadari, kontaminasi timbal juga terjadi dalam rumah kita sendiri, dari pipa air yang berkarat. Lebih mengkhawatirkan karena timbal dapat terakumulasi dalam setiap makhluk hidup dan keseluruhan rantai makanan. Manusia dapat terkontaminasi logam berbahaya ini melalui makanan (65%), air (20%), maupun udara (15%). Sementara itu diketahui bahwa timbal (Pb) tidak memiliki fungsi apapun bagi tubuh manusia. Jadi penyerapan timbal (Pb) melalui makanan, air, udara hanyalah menimbulkan kerugian saja [33].

Menyikapi permasalahan ini, Badan Standarisasi Nasional Indonesia pada SNI:7387:2009 tentang Batas Maksimum Cemar Logam Berat dalam Pangan menetapkan sebagai berikut [34]:

Tabel 1. Batas Maksimum Cemaran Arsen (As) dalam Pangan

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
01.0	Produk-produk susu dan analognya, kecuali yang termasuk kategori 02.0	
	Susu dan hasil olahannya	0,1 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Es krim	0,5 mg/kg
02.0	Lemak, minyak dan emulsi minyak	
	Lemak dan minyak nabati	0,1 mg/kg
	Lemak dan minyak hewani	0,1 mg/kg
	Mentega	0,1 mg/kg
	Margarin	0,1 mg/kg
	Minarin	0,1 mg/kg
03.0	Es untuk dimakan (edible ice), termasuk sherbet dan sorbet	
	Es lilin	0,5 mg/kg
04.0	Buah dan sayur (termasuk jamur, umbi, kacang termasuk kacang kedelai dan lidah buaya), rumput laut, biji-bijian	
	Acar buah	1,0 mg/kg
	Acar sayuran	1,0 mg/kg
	Selai dan sejenisnya	1,0 mg/kg
	Tomat dan hasil olahannya	1,0 mg/kg
05.0	Kembang gula/permen dan cokelat	
	Coklat bubuk	1,0 mg/kg
06.0	Sereal dan produk sereal yang merupakan produk turunan dari biji sereal, akar dan umbi, kacang dan <i>empelur</i> (bagian dalam batang tanaman), tidak termasuk produk bakeri dari kategori 07.0 dan tidak termasuk kacang dari kategori 04.2.1 dan 04.2.2	
	Tepung dan hasil olahannya	0,5 mg/kg
07.0	Produk bakeri	
	Produk bakeri	0,5 mg/kg
08.0	Daging dan produk daging, termasuk daging unggas dan daging hewan buruan	

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
	Daging dan hasil olahannya	0,5 mg/kg
	Jeroan	1,0 mg/kg
	<i>Edible gelatin</i>	2,0 mg/kg
09.0	Ikan dan produk perikanan termasuk moluska, krustasea dan ekinodermata serta amfibi dan reptil	
	Ikan dan hasil olahannya	1,0 mg/kg
	Kekerangan (bivalve) Moluska dan teripang	1.0 mg/kg
	Udang dan krustasea lainnya	1,0 mg/kg
10.0	Telur dan produk-produk telur	
	Telur dan produk-produk telur	0,5 mg/kg
11.0	Pemanis, termasuk madu	
	Gula pasir, glukosa	1,0 mg/kg
	Fruktosa	1,0 mg/kg
	Madu	1,0 mg/kg
12.0	Garam, rempah, sup, saus, salad, produk protein	
	Garam	0,1 mg/kg
	Rempah/bumbu	0,1 mg/kg
	Sup dan kaldu	0,5 mg/kg
	Kecap	0,5 mg/kg
	Saus	1,0 mg/kg
	Ragi	2,0 mg/kg
13.0	Produk pangan untuk keperluan gizi khusus	
	Susu formula bayi	0,05 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Susu formula lanjutan	0,05 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap santap	0,1 mg/kg

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) biskuit	0,1 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap masak	0,38 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) bubuk instan	0,38 mg/kg
14.0	Minuman, tidak termasuk produk susu	
	Air mineral alami	0,05 mg/l
	Air minum dalam kemasan	0,01 mg/l
	Nektar buah	0,1 mg/kg
	Sari buah	0,1 mg/kg
	Sari buah konsentrat	0,5 mg/kg
	Minuman ringan siap minum	0,1 mg/kg
	Sirup	0,5 mg/kg
	Minuman bubuk	0,5 mg/kg
	Kopi bubuk	1,0 mg/kg
	Teh	1,0 mg/kg
	Minuman beralkohol	0,2 mg/kg

Tabel 2. Batas Maksimum Cemaran Kadmium (Cd) dalam Pangan

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
04.0	Buah dan sayur (termasuk jamur, umbi, kacang termasuk kacang kedelai dan lidah buaya), rumput laut, biji-bijian	
	Buah dan sayur (termasuk jamur, umbi, kacang termasuk kacang kedelai dan lidah buaya), rumput laut, biji-bijian	0,2 mg/kg
05.0	Kembang gula/permen dan cokelat	
	Coklat dan produk kakao	0,5 mg/kg
06.0	Sereal dan produk sereal yang merupakan produk turunan dari biji sereal, akar dan umbi, kacang dan <i>empelur</i> (bagian dalam batang tanaman), tidak termasuk produk bakeri dari kategori 07.0 dan tidak termasuk kacang dari kategori 04.2.1 dan 04.2.2	
	Sereal tanpa dedak dan lembaga selain biji gandum dan beras	0,1 mg/kg
	Beras dan tepung beras	0,4 mg/kg
	Dedak, lembaga, biji gandum.	0,2 mg/kg
08.0	Daging dan produk daging, termasuk daging unggas dan daging hewan buruan	
	Daging dan hasil olahannya	0,3 mg/kg
	Jeroan	0,5 mg/kg
09.0	Ikan dan produk perikanan termasuk moluska, krustasean ekinodermata serta amfibi dan reptil	
	Ikan dan hasil olahannya	0,1 mg/kg
	Ikan predator misalnya cucut, tuna, marlin dan lain-lain	0,5 mg/kg
	Kekerangan (bivalve) Moluska dan teripang	1,0 mg/kg
	Udang dan krustasea lainnya	1,0 mg/kg
12.0	Garam, rempah, sup, saus, salad, produk protein	
	Garam	0,5 mg/kg

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
13.0	Produk pangan untuk keperluan gizi khusus	
	Susu formula bayi	0,01 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Susu formula lanjutan	0,01 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap santap	0,05 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) biskuit	0,05 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap masak	0,05 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) bubuk instan	0,05 mg/kg
14.0	Minuman, tidak termasuk produk susu	
	Air mineral alami	0,003 mg/l
	Air minum dalam kemasan	0,003 mg/l

Tabel 3. Batas Maksimum Cemaran Merkuri (Hg) dalam Pangan

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
01.0	Produk-produk susu dan analognya, kecuali yang termasuk kategori 02.0	
	Susu dan hasil olahannya	0,03 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
02.0	Lemak, minyak dan emulsi minyak	
	Margarin	0,03 mg/kg
	Mentega	0,03 mg/kg
	Minyak nabati yang dimurnikan	0,05 mg/kg
04.0	Buah dan sayur (termasuk jamur, umbi, kacang termasuk kacang kedelai dan lidah buaya), rumput laut, biji-bijian	
	Tomat dan hasil olahannya	0,03 mg/kg
05.0	Kembang gula/permen dan cokelat	
	Coklat bubuk	0,03 mg/kg
06.0	Sereal dan produk sereal yang merupakan produk turunan dari biji sereal, akar dan umbi, kacang dan <i>empelur</i> (bagian dalam batang tanaman), tidak termasuk produk bakeri dari kategori 07.0 dan tidak termasuk kacang dari kategori 04.2.1 dan 04.2.2	
	Tepung dan hasil olahannya	0,05 mg/kg
07.0	Produk bakeri	
	Produk bakeri	0,05 mg/kg
08.0	Daging dan produk daging, termasuk daging unggas dan daging hewan buruan	
	Daging dan hasil olahnya	0,03 mg/kg
09.0	Ikan dan produk perikanan termasuk moluska, krustase dan ekinodermata serta amfibi dan reptil	
	Ikan dan hasil olahannya	0,5 mg/kg
	Ikan predator seperti cucut, tuna, marlin dan lain-lain	1,0 mg/kg
	Kekerangan (bivalve) Moluska	1,0 mg/kg

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
	dan teripang	
	Udang dan krustasea lainnya	1,0 mg/kg
12.0	Garam, rempah, sup, saus, salad, produk protein	
	Garam	0,1 mg/kg
	Kecap	0,05 mg/kg
13.0	Produk pangan untuk keperluan gizi khusus	
	Susu formula bayi	0,03 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Susu formula lanjutan	0,03 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap santap	0,03 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) biskuit	0,03 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap masak	0,114 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) bubuk instan	0,114 mg/kg
14.0	Minuman, tidak termasuk produk susu	
	Air mineral alami	0,001 mg/l
	Air minum dalam kemasan	0,001 mg/l
	Sari buah	0,03 mg/kg
	Sari buah konsentrat	0,03 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Kopi bubuk	0,03 mg/kg
	Teh	0,03 mg/kg
	Minuman keras	0,03 mg/kg

Tabel 4. Batas Maksimum Cemaran Timah (Sn) dalam Pangan

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
08.0	Daging dan produk daging, termasuk daging unggas dan daging hewan buruan	
	Daging dan hasil olahannya dalam kemasan kaleng	200,0 mg/kg
13.0	Produk pangan untuk keperluan gizi khusus	
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) bubuk instan	152 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) biskuit	40 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap masak	152 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap santap	40 mg/kg
14.0	Minuman, tidak termasuk produk susu	
	Minuman dalam kemasan kaleng	150,0 mg/kg

Tabel 5. Batas Maksimum Cemaran Timbal (Pb) dalam Pangan

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
01.0	Produk-produk susu dan analognya, kecuali yang termasuk kategori 02.0	
	Produk susu	0,02 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
02.0	Lemak, minyak dan emulsi minyak	
	Lemak dan minyak nabati	0,1 mg/kg
	Lemak dan minyak hewani	0,1 mg/kg
	Mentega	0,1 mg/kg
	Margarin	0,1 mg/kg
	Minarin	0,1 mg/kg
04.0	Buah dan sayur (termasuk jamur, umbi, kacang termasuk kacang kedelai dan lidah buaya), rumput laut, biji-bijian	
	Buah dan sayur serta hasil olahannya	0,5 mg/kg
	Pasta tomat	1,0 mg/kg
05.0	Kembang gula/permen dan cokelat	
	Kembang gula/permen dan cokelat	1,0 mg/kg
06.0	Sereal dan produk sereal yang merupakan produk turunan dari biji sereal, akar dan umbi, kacang dan <i>empelur</i> (bagian dalam batang tanaman), tidak termasuk produk bakeri dari kategori 07.0 dan tidak termasuk kacang dari kategori 04.2.1 dan 04.2.2	
	Sereal dan produk sereal	0,3 mg/kg
	Tepung terigu	1,0 mg/kg
07.0	Produk bakeri	
	Produk bakeri	0,5 mg/kg
08.0	Daging dan produk daging, termasuk daging unggas dan daging hewan buruan	
	Daging dan hasil olahannya	1,0 mg/kg
	Jeroan sapi, babi, kambing, unggas	1,0 mg/kg
09.0	Ikan dan produk perikanan termasuk moluska, krustase dan ekinodermata serta amfibi dan reptil	

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
	Ikan dan hasil olahannya	0,3 mg/kg
	Ikan predator misalnya cucut, tuna, marlin dan lain-lain	0,4 mg/kg
	Kekerangan (bivalve) Moluska dan teripang	1,5 mg/kg
	Udang dan krustasea lainnya	0,5 mg/kg
	Terasi	1,0 mg/kg
11.0	Pemanis, termasuk madu	
	Madu	2,0 mg/kg
12.0	Garam, rempah, sup, saus, salad, produk protein	
	Garam	10,0 mg/kg
	Rempah/Bumbu	7,0 mg/kg
	Kecap	1,0 mg/kg
	Ragi	5,0 mg/kg
	Saus	1,0 mg/kg
13.0	Produk pangan untuk keperluan gizi khusus	
	Susu formula bayi	0,02 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Susu formula lanjutan	0,02 mg/kg (dihitung terhadap produk siap konsumsi)
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap santap	0,3 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) biskuit	0,3 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) siap masak	1,14 mg/kg
	Makanan Pendamping ASI (MP-ASI) bubuk instan	1,14 mg/kg
14.0	Minuman, tidak termasuk produk susu	
	Air mineral alami	0,01 mg/l
	Air minum dalam kemasan	0,005 mg/l
	Sari buah dan nectar buah	0,2 mg/kg

No. Kategori pangan	Kategori pangan	Batas maksimum
	Sari buah konsentrat	1,0 mg/kg
	sirup	1,0 mg/kg
	Minuman ringan	0,2 mg/kg
	Minuman bubuk	1,0 mg/kg
	Minuman beralkohol	0,2 mg/kg
	Kopi bubuk	2,0 mg/kg
	Teh	2,0 mg/kg

2.5 Kondisi Logam Berat pada Kosmetik

Kosmetik merupakan zat atau sediaan berupa campuran dari beragam jenis senyawa kimia alami maupun sintesis. Kosmetik biasa digunakan dan kontak langsung dengan bagian tubuh luar manusia seperti epidermis, rambut, kuku, bibir, gigi, dan organ genital eksternal. Tujuan pemakaian kosmetik adalah untuk membersihkan, memberi aroma, melindungi, mengubah penampilan, dan menjaga permukaan tubuh agar selalu dalam kondisi baik dan nyaman. Walaupun telah banyak regulasi yang mengatur produk-produk kosmetik di pasaran, namun masih terdapat hal pantas dikhawatirkan akan dampak negatif terhadap kesehatan manusia. Senyawa-senyawa kimia pada kosmetik, termasuk kontaminan dan logam berat, mempunyai efek kurang baik pada kulit. Konsumen dengan kebutuhan jangka panjang memiliki resiko lebih buruk pada kesehatan kulitnya [35].

Logam berat seperti timbal, arsen, kadmium, dan merkuri perlu diwaspadai karena sering terkandung dalam kosmetik. Senyawa tersebut biasanya digunakan dalam proses produksi sebagai bahan dasar atau bahan pembantu agar warna pigmen menjadi lebih cemerlang. Ketika logam berat tersebut tertelan, terhirup, atau dan kontak dengan kulit secara berulang maka logam tersebut akan terabsorpsi dan selanjutnya dapat masuk ke dalam darah. Hal tersebut mampu mengganggu fungsi organ- organ tubuh atau secara sistemik dapat menyebabkan penyakit [8].

Badan Pengawas Obat dan Makanan (BPOM) Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2014 mengatur tentang persyaratan jumlah kandungan logam berat di dalam kosmetika [36]. Persyaratan tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Persyaratan kandungan logam berat dalam kosmetika

Jenis Logam	Persyaratan
Merkuri (Hg)	Tidak lebih dari 2 mg/kg atau 1 mg/l (1 ppm)
Timbal (Pb)	Tidak lebih dari 20 mg/kg atau 20 mg/l (20 ppm)
Arsen (As)	Tidak lebih dari 5 mg/kg atau 5 mg/l (5 ppm)
Kadmium (Cd)	Tidak lebih dari 5 mg/kg atau 5 mg/l (5 ppm)

Kulit merupakan bagian tubuh terluar dan seharusnya mampu memfilter senyawa-senyawa dengan dampak negatif, sehingga tidak terabsorpsi lebih dalam ke organ tubuh. Penetrasi logam secara perkutan (ke dalam kulit) dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti oksidasi, berat molekul, lipofilitas, reaktivitas, dan sifat dari senyawa logam. Parameter untuk melihat kecepatan penetrasi logam ke dalam kulit adalah permeabilitas konstan (K_p), dinyatakan dalam cm/jam. Beberapa logam menembus kulit tanpa suatu urutan tertentu dan kemudian membentuk allergen yang akan mengikat protein epidermis. Setelah 24 jam, kebanyakan logam akan terakumulasi di dalam stratum korneum [37].

Merkuri dalam semua bentuk kimianya (organik dan anorganik) akan diserap dengan mudah melalui kulit beserta senyawa organik, uap logam, dan beberapa garam lipofilik. Merkuri paling banyak terdapat dalam kosmetika dalam bentuk merkuri anorganik, yaitu berupa merkuri II klorida ($HgCl_2$). Penyerapan merkuri melalui kulit lengan terukur dalam jangka waktu 15 – 45 menit. Nilai K_p berkisar 0,61-2,41 cm/jam. Sekitar setengah dari serapan senyawa akan tereliminasi akibat pergantian kulit secara alami (*desquamation*) dalam 5-6 minggu [37].

Kandungan logam berat pada beberapa produk kosmetik diantaranya [8]:

2.5.1 Logam Berat pada Lipstik

Produk kosmetika paling umum dan paling sering digunakan oleh kaum wanita adalah lipstik. Lipstik merupakan salah satu bentuk kosmetik riasan (dekoratif) dimana penggunaannya bertujuan untuk menambahkan efek psikologis berupa percaya diri. Lipstik berfungsi untuk mewarnai dan melembabkan bibir. Namun, apabila mengandung logam berat, lipstik dapat menjadi tidak aman dan menimbulkan efek buruk terhadap kesehatan. Beberapa logam berat seperti timbal, merkuri, cadmium, kromium, dan nikel bisa terdapat di dalam lipstik.

Logam berat jenis kadmium dan timbal berbahaya bila terkandung di dalam lipstik. Kadmium adalah elemen sangat toksik dengan waktu paruh cukup lama, dan timbal di dalam tubuh akan masuk ke dalam peredaran darah kemudian dapat terakumulasi dalam jaringan, terutama tulang [36,38]. Logam timbal dapat memberikan efek racun terhadap beberapa fungsi organ di dalam tubuh. Keracunan akibat keberadaan logam timbal di dalam tubuh akan berpengaruh terhadap

sistem syaraf, sistem ginjal, sistem reproduksi, sistem endokrin, dan jantung [8].

Penggunaan timbal bertujuan untuk membuat lipstik tahan dari pengoksidasian udara (*oxidation*) dan tahan air (*waterproof*). Hal ini didasari dari sifat unsur timbal yang berada pada urutan ke 13 dari 19 deret Volta, karena jika unsur semakin ke arah kanan deret maka akan menunjukkan sifat semakin kurang reaktif atau semakin sulit mengalami oksidasi. Timbal dapat dengan mudah diserap oleh kulit dan mengalami absorpsi cepat (*rapid absorption*) melalui kelenjar keringat (*sweat gland*) serta folikel rambut (*hair follicle*). Namun terabsorpsi lebih lambat melalui rute transepidermal [39, 40].

Timbal oksida dapat masuk melewati kulit manusia dengan jumlah rata-rata pada 24 jam sebesar 2,90 mg/cm². Penetrasi ini meningkat sembilan kali lipat ketika terpapar pada kulit yang rusak karena terkelupas (*damaged skin sample*) [41]. Walaupun kulit hanya terpapar timbal oksida selama 30 menit dan langsung dilakukan dekontaminasi, timbal akan tetap ditemukan terpenetrasi ke dalam kulit [8].

Keberadaan dari timbal dan kadmium pada lipstik dapat disebabkan karena kesengajaan dari produsen pembuat lipstik ataupun ketidaksengajaan saat proses pembuatan. Logam bisa

saja secara tidak sengaja terkontaminasi dari peralatan produksi seperti solder kadmium/timbal atau dari cat dengan kandungan kadmium/timbal [42]. Peralatan seperti alat *mixing, rolling*, penghalus, pencetak dan pengemas lipstik dapat memungkinkan terjadinya kontaminasi, dikarenakan logam timbal sering digunakan sebagai bahan pelapis alat-alat tersebut karena bersifat tahan terhadap korosi atau karat [3].

Pada lipstik juga terdapat kandungan logam kromium dan nikel. Hasil deteksi jumlah kromium total pada 50 % (15 dari 30) sampel lipstik adalah kisaran 0,45 ppm sampai 17,83 ppm. Sedangkan hasil deteksi nikel pada 43,30 % (13 dari 30) sampel lipstik adalah kisaran 0,57 ppm sampai 9,18 ppm [43]. Namun berdasarkan peraturan dari *Food and Drug Administration* (FDA), tidak ada batasan penggunaan kromium pada kosmetik, terutama ketika kromium berada dalam kosmetik sebagai impurities. FDA juga belum dapat memastikan akan bahaya dan dampak kesehatan akibat kandungan logam nikel dan kromium pada kosmetik karena kandungan kedua logam ini biasanya sering ditemukan berjumlah sangat kecil [44].

2.5.2 Logam Berat pada Krim Pemutih Kulit

Krim pemutih kulit merupakan kosmetik untuk mempercerah dan membuat warna kulit lebih muda dari pada warna kulit aslinya. Krim pemutih kulit juga dapat digunakan untuk memperbaiki warna kulit yang telah terpapar oleh sinar matahari ataupun menghilangkan noda-noda dan bintik-bintik hitam akibat hiperpigmentasi. Krim pemutih sangat populer, terutama dikalangan wanita. Namun, telah banyak diketahui pula bahwa pada krim pemutih ini terdapat kemungkinan adanya kandungan logam-logam berat. Logam berat ini dikhawatirkan dapat memberikan efek bahaya pada manusia. Logam berat pada krim pemutih dapat berasal dari bahan dasar pembuatan kosmetik ataupun dari zat pengotor pada mesin/alat produksi. Logam berat merkuri (Hg) paling sering dijumpai terdapat pada krim pemutih kulit. Hal ini dikarenakan kemampuan dari garam merkuri untuk menghambat pembentukan melanin, sehingga akan dihasilkan efek warna kulit lebih cerah [45].

Merkuri termasuk logam berat berbahaya. Dalam konsentrasi kecil pun, merkuri dapat bersifat racun. Pemakaian merkuri dalam krim pemutih dapat menimbulkan berbagai hal, mulai dari perubahan warna kulit secara cepat, timbulnya bintik-bintik hitam pada kulit, alergi, serta iritasi

kulit. Pada pemakaian dosis tinggi, merkuri dapat menyebabkan kerusakan permanen pada otak dan ginjal, serta menyebabkan gangguan perkembangan pada janin. Paparan jangka pendek merkuri dalam dosis tinggi dapat menyebabkan mual, muntah-muntah, diare, kerusakan paru-paru, hingga resiko terjadinya kanker [46].

Merkuri juga tergolong bahan *teratogenik*, yaitu dapat menimbulkan kerusakan pada janin dan gangguan pertumbuhan pada bayi. Merkuri di dalam tubuh ibu hamil dapat mengalir ke janin kandungannya dan terakumulasi sehingga mengakibatkan gangguan pada janin bahkan dapat menyebabkan keguguran. Merkuri juga dapat masuk ke tubuh anak melalui ASI, sehingga mengakibatkan kerusakan otak, retardasi mental, kebutaan, dan bisu, selain itu dapat juga terjadi gangguan pencernaan dan gangguan ginjal [36].

Saat ini, masih banyak produk krim pemutih di pasaran dengan kandungan merkuri melebihi persyaratan dari BPOM. Bahkan beberapa kosmetika terkadang tidak mencantumkan kandungan merkuri di dalam komposisi produknya. Menurut WHO [45], tanda-tanda produk dengan kadar merkuri sangat tinggi adalah biasanya berwarna lebih keabu-abuan atau krem. Petunjuk pada kemasan untuk menghindari kontak

dengan perak, emas, karet, alumunium, serta perhiasan juga merupakan tanda-tanda keberadaan merkuri pada produk tersebut [8].

2.5.3 Logam Berat pada Bedak

Bedak, baik berbentuk tabur maupun *compact*, digunakan hampir setiap hari oleh kalangan wanita sebagai kosmetika pada wajah. Bedak dibuat dari berbagai macam campuran bahan, dan bahan-bahan tersebut sangat mungkin mengandung logam berat. Keberadaan logam pada bedak dapat terjadi secara tidak sengaja karena berasal dari mesin produksi atau memang ditambahkan secara sengaja. Logam dapat digunakan untuk menambah daya tarik warna produk dan membuatnya lebih tahan lama di kulit. Jenis logam berat pada bedak biasanya berupa kadmium, timbal, merkuri dan kromium [47].

Kromium dikenal sebagai *sensitizer* penyebab alergi dan dermatitis kontak pada kulit. Sejumlah studi melaporkan bahwa permeasi kromium pada kulit menunjukkan peningkatan seiring dengan penambahan jumlah konsentrasi paparan. Peningkatan pH juga mengakibatkan permeasi kromium melalui kulit semakin tinggi sekaligus terjadinya retensi pada kulit [48]. Hasil investigasi permeasi bubuk

kromium melalui kulit pada pH 4,5 dan ditemukan bahwa kromium terpermeasi sempurna ke dalam kulit. Keringat dengan pH 4,5 dapat mengoksidasi kromium menjadi ion, kemudian bentuk ion tersebut akan masuk ke dalam kulit. Dilaporkan juga bahwa jumlah kromium yang masuk pada kulit rusak secara signifikan lebih besar daripada jumlah kromium pada kulit normal. Ion kromium memiliki afinitas kuat pada epitel dan jaringan kulit. Mereka dapat membentuk kompleks dan akan memperlambat laju difusi [41].

Logam merkuri juga seringkali disalahgunakan dalam kosmetik, terutama pada krim pemutih dan bedak. Padahal, penggunaan merkuri ini dapat menimbulkan iritasi, noda/bintik hitam, serta penipisan pada kulit. Bahkan dalam jangka panjang dapat menyebabkan kanker kulit. Merkuri pada kosmetik ini dapat diserap oleh kulit dan diedarkan oleh darah ke seluruh tubuh. Efek toksisitas merkuri terutama pada organ ginjal dan susunan saraf pusat [36].

Hasil deteksi kandungan timbal dan kadmium pada beberapa sampel bedak di pasaran. Tercatat nilai tertinggi kandungan timbal pada sampel bedak tersebut adalah sebesar 0,38 $\mu\text{g/g}$ dan kadmium sebesar 0,02 $\mu\text{g/g}$. Logam kadmium dapat digunakan sebagai pengganti pigmen kuning pada

kosmetik, dan sebagian besar terdapat dalam lipstik dan bedak wajah. Karena itu, penggunaan kadmium pada produk kosmetik banyak digunakan sebagai pigmen warna [3, 49].

Kemungkinan akan timbulnya alergi kulit dan dermatitis kontak dapat meningkat akibat kandungan logam berat pada bedak. Dari 20 merek bedak yang berbeda di Nigeria, terkandung cemaran kromium dan kadmium [50]. Keduapuluh sampel bedak tersebut berasal baik dari merek sederhana (*lower class brand*) maupun dari merek terkenal (*higher class brand*). Konsentrasi cemaran tertinggi terdapat pada sampel-sampel bedak merek sederhana. Paparan kromium terhadap kulit dapat menyebabkan iritasi, alergi, serta dermatitis kontak [51].. Kadmium menyebabkan ketoksikan pada beberapa organ dan jaringan, serta pada beberapa *toxicological end points* seperti ketoksikan pada reproduksi, neurotoksisitas, dan karsinogenisitas [8].

Kromium dikenal sebagai *sensitizer* penyebab alergi dan dermatitis kontak pada kulit. Sejumlah studi melaporkan bahwa permeasi kromium pada kulit menunjukkan peningkatan seiring dengan penambahan jumlah konsentrasi paparan. Peningkatan pH juga mengakibatkan *permeasi kromium* melalui kulit semakin tinggi sekaligus terjadinya retensi pada kulit [48].

2.5.4 Logam Berat pada Maskara dan *Eye Shadow*

Maskara adalah kosmetika pada mata untuk menghitamkan, menebalkan dan memanjangkan bulu mata, sedangkan *eye shadow* merupakan kosmetika mata untuk memberi warna pada kelopak mata agar tampak lebih menarik dan berkilau. Kedua kosmetika ini digunakan dengan cara kontak langsung dengan area sekitar mata. Adanya kandungan logam berat pada maskara dan *eye shadow* menyebabkan timbul resiko bahaya pada mata seperti iritasi dan kerusakan mata.

Pewarna maskara dan *eye shadow* sering dicampur dengan bahan-bahan logam berat seperti timbal dan kromium. Logam-logam ini dapat mempengaruhi struktur faal sel kulit. Timbal dan kromium sering digunakan karena berfungsi untuk memberikan tampilan lebih baik dan berfungsi sebagai pewarna. Disamping itu, keberadaan logam berat pada kosmetika ini mungkin juga terjadi disebabkan kurangnya pengawasan terhadap asal usul dari bahan baku produk. Bahan baku produk biasanya diperoleh dari lingkungan, sehingga tanpa disadari dapat terjadi kontaminasi pada produk akhir akibat cemaran dari bahan baku awal [52]. Ada 2 jenis kromium yang diizinkan untuk digunakan

sebagai bahan pewarna pada kosmetika area sekitar mata, yakni kromium jenis *hydroxide green* dan *oxide green*. Namun, dengan jumlah kandungan yang sesuai dengan persyaratan [44].

Selain timbal dan kromium, logam seperti arsen juga mungkin terdapat pada *eye shadow*. Arsen digunakan dalam berbagai produk seperti tekstil, pengawet, pigmen warna, hingga pestisida. Arsen jika terkandung pada kosmetika, dapat memungkinkan terjadinya penyerapan logam berat melalui kulit. Di dalam darah, arsen akan didistribusikan ke seluruh tubuh dan dapat ditemukan di hati, ginjal, paru-paru, dan limpa.

Paparan arsen dalam jangka panjang dapat menimbulkan mual, diare, mati rasa pada tangan dan kaki, penebalan atau perubahan warna kulit, gangguan pada sistem kekebalan tubuh, penurunan produksi sel darah, serta kerusakan pembuluh darah. Bahkan, IARC menyatakan bahwa arsen merupakan senyawa karsinogenik (menyebabkan terjadinya kanker pada kulit). Jika terhirup dalam jangka panjang, arsen dapat menyebabkan gangguan kulit, gangguan peredaran darah, gangguan saraf perifer, hingga peningkatan resiko kanker paru-paru, kanker saluran cerna, dan kanker saluran kemih [36].

2.5.6 Logam Berat pada Pewarna Rambut

Pewarna rambut adalah sediaan kosmetika tata rias rambut untuk mewarnai rambut, baik untuk mengembalikan warna rambut ke warna asalnya atau untuk mengubah menjadi warna lain. Secara umum, komponen pewarna rambut terdiri dari pewarna, antioksidan, alkalis, ammonia, sabun, agen pembersih, dan beberapa bahan kimia lainnya. Oksida logam seperti titanium dioksida dan besi oksida sering digunakan sebagai pigmen pada pewarna rambut [8,52].

Besi oksida berfungsi untuk mentransfer proses warna pada produk pewarna rambut. Logam ini tidak toksik jika diaplikasikan pada permukaan kulit dan belum ada laporan akan adanya alergi. Namun, kadar besi yang berlebihan dan dipaparkan dalam jangka panjang kepada tubuh, dapat menyebabkan *hemokromatosis*. *Hemokromatosis* adalah gangguan genetik dimana tubuh menyerap terlalu banyak zat besi dan menyebabkan tubuh mengalami kelebihan kandungan zat besi. *Hemokromatosis* merupakan penyakit serius dan dapat merusak organ-organ tubuh, terutama hati. Gejala awal kondisi ini meliputi kelelahan, penurunan berat badan, dan nyeri sendi, tetapi jika hemokromatosis tidak

diobati, dapat menyebabkan masalah serius pada hati, penyakit jantung, dan diabetes [15].

Logam berat lainnya, seperti timbal asetat digunakan sebagai penambah zat warna. Timbal asetat dapat menggelapkan rambut secara gradual. Warna gelap ini terjadi karena timbal asetat berikatan dengan sulfur dari protein rambut menjadi senyawa timbal sulfida. Namun, senyawa logam ini memiliki banyak efek toksik. Timbal asetat dapat meracuni sistem enzim dengan cara serius, berefek neurotoksik pada saraf pusat, serta mempengaruhi respon imun. Logam ini meningkatkan produksi radikal bebas, serta menggusur unsur-unsur penting untuk membentuk campuran metallo-enzim [53].

Ada kandungan timbal, kadmium, tembaga, dan besi di beberapa produk pewarna rambut dengan merek berbeda. Timbal merupakan satu dari kandungan logam paling berbahaya dan paling toksik, namun pada penelitian ini ditemukan bahwa jumlah kandungan timbal, tembaga, kadmium, dan besi masih sesuai batasan [8,54].

Penggunaan produk-produk pewarna rambut dengan kandungan logam berat secara konstan, dapat menyebabkan penumpukan dari logam-logam tersebut di dalam tubuh. Hal ini dapat menyebabkan timbulnya reaksi berbahaya dan

serius. Penggunaan secara berkepanjangan juga harus dihindari karena kandungan esensial dan kandungan toksik dari produk akan meningkat dalam tubuh seiring dengan peningkatan frekuensi penggunaan produk. Jika unsur-unsur ini tidak dieliminasi pada tingkat *Bioakumulasi*, maka dapat menyebabkan resiko serius seperti kerusakan otak, ginjal, sistem saraf, sistem reproduksi, dan bahkan menyebabkan kanker hingga kematian [8,54].

2.5.7 Logam Berat pada Tabir Surya (*Sunblock* /*Sunscreen*)

Sediaan kosmetika tabir surya atau biasa dikenal sebagai *sunscreen* atau *sunblock*, berfungsi untuk menghamburkan dan memantulkan sinar *ultraviolet* (UV) agar tidak masuk ke dalam tubuh (tabir surya fisik) atau mengabsorpsi radiasi sinar ultraviolet (tabir surya kimia), sehingga dapat mencegah terjadinya gangguan kulit akibat cahaya matahari [55,56].

Tabir surya fisik secara umum adalah berupa oksida logam. Bahan ini menunjukkan perlindungan tinggi terhadap sinar UVA dan UVB. Namun, bahan ini kurang diterima kebanyakan orang disebabkan biasanya membentuk lapisan

film penghalang pada kulit dan menimbulkan rasa kurang nyaman pada kulit. *Zink oksida* merupakan tabir surya fisik yang lebih efektif dibandingkan dengan titanium dioksida (TiO_2). Namun, penggunaannya dalam formulasi kosmetik di beberapa negara tidak diperkenankan, seperti di Eropa dan Jepang [55]. FDA membatasi kandungan titanium dioksida dan zink oksida di dalam produk tabir surya sebanyak maksimal 25 % [8].

FDA juga membatasi secara ketat penggunaan merkuri dalam sediaan tabir surya, karena merkuri dapat terserap oleh kulit dan menyebabkan reaksi alergi dan gejala neurologis yang kronis. Konsentrasi merkuri tidak boleh melebihi 65 bagian per juta untuk kosmetika area mata dan tidak boleh melebihi 1 bagian per juta pada kosmetika jenis lain [44].

3.1 Sifat Toksisitas Logam Berat

Logam berat adalah bahan pencemar yang tidak dapat didegradasi atau dihancurkan, sehingga akan terakumulasi di alam dan di dalam tubuh organisme. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi toksisitas setiap jenis logam berat, antara lain: bentuk senyawa, daya kelarutan logam berat di dalam cairan, ukuran partikel dan beberapa sifat kimia dan fisika lainnya [22].

Toksisitas logam berat dapat menurunkan tingkat energi dan merusak fungsi otak, paru-paru, ginjal, liver, komposisi darah dan organ penting lainnya. Paparan jangka panjang dapat menyebabkan secara bertahap maju proses degeneratif fisik, otot, dan saraf yang meniru penyakit seperti *multiple sclerosis*, penyakit Parkinson, penyakit Alzheimer dan distrofi otot. Diulang paparan jangka panjang dari beberapa logam dan senyawa mereka bahkan dapat menyebabkan kanker [57].

Tingkat toksisitas dari beberapa logam berat dapat tepat di atas konsentrasi latar belakang yang hadir secara alami di lingkungan. Pengetahuan maka menyeluruh logam berat agak penting karena mengizinkan untuk memberikan langkah-langkah defensif yang tepat terhadap kontak yang berlebihan [58].

Mekanisme toksisitas logam berat di dalam tubuh organisme dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga) kategori yaitu [13]:

1. Logam berat dapat memblokir dan menghalangi kerja gugus biomolekul esensial proses metabolisme;
2. Logam berat dapat menggantikan ion-ion logam esensial yang terdapat dalam molekulterkait;
3. Logam berat dapat mengadakan modifikasi atau perubahan bentuk dari gugus aktif yang dimiliki biomolekul.

Klasifikasi toksisitas dapat digolongkan menjadi [22]:

1. Berdasar durasi waktu timbulnya efek toksisitas dikelompokkan menjadi : toksisitas akut sifatnya mendadak, waktu singkat, efeknya *reversibel*, serta kronis,

durasi lama, konstan serta terus menerus, efeknya permanen atau *irreversibel*.

2. Berdasar tempat bahan kimia (toksikan) tersebut berefek: yaitu toksikan lokal (efek terjadi pada tempat aplikasi atau *exposure*, diantara toksikan dan sistem biologis) dan toksisitas sistemik (toksikan diabsorpsi ke dalam tubuh dan didistribusi melalui aliran darah dan mencapai organ dimana akan terjadi efek).
3. Berdasar respons yang terjadi dan organ di manabahan kimia tersebut mempunyai efek toksisitas dibedakan : *hepatotoksin, nefrotoksin, neurotoksin, imunotoksin, teratogenik karsinogenik* serta *allergen sensitizers* atau bahan kimia/fisika yang bisa merangsang timbulnya reaksi alergi, karsinogenik.

Sifat-sifat logam berat secara umum yaitu [13] :

1. Sulit didegradasi, sehingga mudah terakumulasi dalam lingkungan perairan dan keberadaannya secara alami sulit terurai (dihilangkan).
2. Dapat terakumulasi dalam organisme termasuk kerang dan ikan, dan akan membahayakan kesehatan manusia yang mengkomsumsi organisme tersebut.

3. Mudah terakumulasi di sedimen, sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari konsentrasi logam dalam air. Disamping itu sedimen mudah tersuspensi karena pergerakan masa air yang akan melarutkan kembali logam yang dikandungnya ke dalam air, sehingga sedimen dapat menjadi sumber pencemar potensial dalam skala waktu tertentu.

Keberadaan logam di badan perairan dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan diantaranya adalah suhu, pH, dan salinitas. Dalam lingkungan perairan, bentuk logam antara lain berupa ion-ion bebas, pasangan ion organik, dan ion kompleks. Kelarutan logam dalam air dikontrol oleh pH air. Kenaikan pH menurunkan logam dalam air, karena kenaikan pH mengubah kestabilan dari bentuk karbonat menjadi hidroksida yang membentuk ikatan dengan partikel pada air, sehingga akan mengendap membentuk lumpur [2,3].

Kepekatan garam yang tinggi kation alkali dan alkalin dapat bersaing untuk tempat penyerapan pada partikel padat dengan cara mengganti ion logam yang telah diserap [59].

Efek dari interaksi kimia (*sinergis, potensiasi, dan antagonis*) yang memungkinkan timbulnya efek toksik yaitu [22]:

1. *Sinergis* apabila dua bahan kimia yang mempunyai sifat toksik yang sama digabungkan mempunyai efek toksik yang jauh lebih besar dibanding dari hasil perhitungan atau penjumlahan efek dari keduanya.
2. *Potensiasi* apabila zat kimia tidak mempunyai efek toksik sama sekali namun apabila ditambahkan zat kimia lain yang mempunyai efek toksik maka akan meningkatkan toksisitas dari zat kimia kedua,
3. *Antagonis* apabila beberapa zat kimia digabungkan akan saling mengurangi efek toksik dari masing-masing zat kimia tersebut.

Toksisitas setiap logam dalam perairan berbeda-beda. Daya toksisitas logam berat dalam perairan terhadap makhluk hidup di dalamnya, dipengaruhi oleh bentuk logam dalam air, keberadaan logam-logam lain, pengaruh lingkungan, dan kemampuan organisme beraklimatisasi terhadap bahan toksik logam. Toksisitas logam dapat diklasifikasikan dalam tiga kategori yakni: menahan gugus fungsi biologis yang esensial

dalam biomolekul, menggantikan ion logam esensial dalam biomolekul, serta mengubah konformasi aktif biomolekul [61,60].

Logam berat ke dalam tiga kelompok, yaitu:

1. Logam-logam yang dengan mudah mengalami reaksi kimia bila bertemu dengan unsur oksigen atau disebut juga logam kelas A.
2. Logam-logam yang dengan mudah mengalami reaksi kimia bila bertemu dengan unsur nitrogen atau belerang yang disebut juga logam kelas B.
3. Logam antara atau logam transisi yang memiliki sifat khusus sebagai logam pengganti untuk logam-logam atau ion-ion logam dari kelas A dan kelas B. [62].

Ion-ion logam kelas B merupakan yang paling toksik dan efektif untuk berikatan dengan kelompok -SH (misalnya *sistein*) dan kelompok yang mengandung nitrogen (misalnya *lisin* dan *histidin imidazol*) pada enzim. Ion-ion pada kelas B dapat mengganti ion-ion esensial dalam tubuh misalnya Zn pada *metaloenzim* yang menyebabkan enzim tidak aktif. Selain itu, ion-ion golongan B dapat membentuk ion organometalik yang larut dalam lemak, termasuk Hg,

As, Sn, dan Pb yang mampu menembus membran biologi dan berakumulasi di dalam sel dan organel [3].

Tabel 7. Penggolongan Ion-Ion Logam Berdasarkan Toksisitas (3)

Kelas A	Kelas Antara	Kelas B
Ca ²⁺	Cr ²⁺	Hg ²⁺
Mg ²⁺	Ni ²⁺	Pb ²⁺
Ba ²⁺	As ²⁺	Cu ⁺
Be ²⁺	Mn ²⁺	Ti ⁺
Al ³⁺	Cd ²⁺	Ag ⁺

3.2 Mekanisme Kerja Logam

Mekanisme kerja logam berat pada manusia adalah pada lokasi-lokasi sebagai berikut [13].

3.2.1 Pada Enzim

Kerja utama logam berat adalah menghambat kerja enzim, dan enzim memiliki kerentanan yang berbeda-beda. Kerja logam berat menghambat enzim biasanya terjadi akibat adanya interaksi logam berat dengan gugus sulfida seperti *disulfida* (-S-S) dan *sulThidril* (-SH) pada enzim tersebut. Gugus *sulfida* mampu mengikat logam berat yang masuk ke

dalam tubuh dan terikat di dalam darah, karena logam berat memiliki afinitas yang tinggi terhadap gugus *sulfida*.

Kerja enzim dapat pula dihambat melalui mekanisme pengusuran *kofaktorlogam* yang penting pada enzim. Misalnya, Pb dapat menggantikan Zn di dalam enzim sebagai kofaktor, seperti enzim asam *d-aminolevulinat hidratase* (ALAD). Mekanisme lain yang dapat mengganggu kerja enzim adalah melalui penghambatan sintesis enzim. Misalnya nikel (Ni) dan platina (Pt) dapat menghambat asam *d-aminovulinat sintetase* (ALAS), sehingga mengganggu *sintesis hem*, zat yang merupakan komponen penting untuk pembentukan hemoglobin dan sitokrom [13].

3.2.2 Organel Subseluler

Munculnya efek toksik logam berat dapat juga terjadi akibat adanya reaksi antara logam berat dengan komponen intraseluler. Untuk dapat menimbulkan efek toksik pada sel, maka logam berat harus masuk ke dalam sel. Logam berat yang mudah masuk ke dalam sel melalui membran sel adalah logam berat *lipofilik*, seperti metil merkuri. Setelah masuk ke dalam sel, logam berat dapat mempengaruhi berbagai organel seperti Retikulum Endoplasma (RE) yang mengandung

berbagai enzim. Enzim mikrosom pada RE dapat dihambat oleh kadmium (Cd) dan mengacaukan struktur RE [13].

Terdapat pula hasil penelitian yang menemukan bahwa kromium heksavalen (Cr⁶⁺) dapat menyebabkan kematian sel (*apoptosis*) pada *sel fibroblast* dari organ paru. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi toksisitas logam berat adalah [13]:

3.2.2.1 Tingkat dan Lamanya Paparan

Telah diketahui bahwa logam berat mempunyai sifat bioakumulatif dan biomagnifikasi. Dengan demikian, semakin tinggi dan lama tingkat paparan logam berat maka akan semakin tinggi pula konsentrasi logam berat di tubuh organisme termasuk manusia dan efek toksiknya akan semakin besar.

3.2.2.2 Bentuk Kimia

Bentuk kimia logam berat dapat mempengaruhi toksisitas logam berat tersebut. Sebagai contoh merkuri dalam bentuk HgCl₂ lebih toksik daripada dalam bentuk merkuro (HgCl). Ini disebabkan bentuk divalen lebih mudah larut daripada bentuk monovalen. Selain itu, bentuk HgCl₂

lebih cepat dan mudah diabsorpsi sehingga toksisitasnya lebih tinggi. Merkuri anorganik seperti HgCl dan HgCl_2 dikenal sebagai toksikan ginjal, sedangkan merkuri organik seperti metil merkuri dan dikenal bersifat toksik terhadap susunan syaraf pusat.

3.2.2.3 Kompleks Protein Logam Berat

Beberapa logam berat dapat berikatan dengan protein karena sifat afinitas yang tinggi terhadap gugus S. Protein dan mengandung asam amino yang memiliki gugus S seperti *methionine* (*met*) dan *cysteine* (*cys*), sehingga mudah berikatan dengan logam berat. Sebagai contoh logam berat yang membentuk kompleks protein logam adalah yang dibentuk oleh timbal, bismut dan *merkuri-selenium*. Besi (Fe) dapat bergabung dengan protein untuk membentuk feritin yang bersifat larut dalam air, atau hemosiderin yang tidak dapat larut dalam air. *Kadmium* (Cd) dan beberapa logam air, misalnya *tembaga* (Cu) dan *seng* (Zn) dapat bergabung dengan metalotionein, yaitu suatu protein yang memiliki berat molekul rendah. Kompleks Cd tidak terlalu toksik bila dibandingkan dengan Cd^{2+} , tetapi di dalam sel tubulus ginjal, kompleks Cd *metalotionein* akan melepaskan Cd^{2+} dan menimbulkan efek toksik.

3.2.2.4 Faktor Penjamu

Faktor penjamu (*host*) seperti umur, jenis kelamin, ras, kondisi fisiologis dan anatomi tubuh, yang dapat mempengaruhi toksisitas logam berat di dalam tubuh manusia. Anak kecil cenderung lebih rentan terhadap efek toksik logam berat dibandingkan orang dewasa karena anak kecil lebih peka dan tingkat penyerapan di dalam saluran pencernaannya juga lebih besar. Kondisi fisiologis seperti kehamilan juga mempengaruhi toksisitas logam berat. Logam berat tertentu seperti *timbal* (Pb) dan *merkuri* (Hg), dapat masuk ke dalam plasenta dan mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan janin. terdapat di [13].

JENIS-JENIS LOGAM BERAT

Ada 35 logam yang menjadi perhatian bagi kita karena paparan perumahan atau pekerjaan, dan 23 diantara logam berat tersebut adalah sebagai berikut: *antimon, arsenik, bismuth, kadmium, cerium, kromium, kobalt, tembaga, gallium, emas, besi, timah, mangan, merkuri, nikel, platinum, perak, telurium, thallium, timah, uranium, vanadium, dan seng* [63]. Logam berat biasanya ditemukan di lingkungan. Dalam jumlah kecil mereka diwajibkan untuk menjaga kesehatan yang baik tetapi dalam jumlah yang lebih besar mereka dapat menjadi beracun atau berbahaya [57].

Toksisitas logam berat dapat menurunkan tingkat energi dan merusak fungsi otak, paru-paru, ginjal, liver, komposisi darah dan organ penting lainnya. Paparan jangka panjang dapat menyebabkan secara bertahap menuju proses degeneratif fisik, otot, dan saraf yang meniru penyakit seperti

multiple sclerosis, penyakit parkinson, penyakit alzheimer dan distrofi otot. Paparan jangka panjang dari beberapa logam secara berulang dapat menyebabkan kanker [57].

Pengetahuan secara menyeluruh tentang logam berat sangat penting karena memberikan langkah-langkah defensif yang tepat terhadap kontak yang berlebihan dengan logam berat tersebut [58]. Berikut ini beberapa jenis logam berat berbahaya yang berada disekitar kita diantaranya:

4.1 Arsenik (As)

Arsen merupakan satu unsur paling beracun dan dijumpai dalam tanah, air dan udara. Secara alami arsen dihasilkan dari letusan gunung vulkanik yang dapat melepaskan sekitar 3000 ton setiap tahun. Meskipun demikian aktivitas manusia yang diduga bertanggung jawab atas pelepasan arsen lebih dari 80.000 ton tiap tahun karena pembakaran bahan bakar dari fosil dan berbagai kegiatan industri. Arsen banyak ditemukan di dalam air tanah, terbagi dalam dua bentuk, yaitu bentuk tereduksi, terbentuk dalam kondisi anaerobik, sering disebut arsenit. Arsenat adalah bentuk teroksidasi yang terjadi pada kondisi aerobik [63].

Kontaminasi arsenik telah terjadi sebagai akibat dari proses geologi alam dan kegiatan manusia. Sumber antropogenik arsenik bisa berasal dari kegiatan manusia seperti penambangan dan pengolahan bijih. Proses peleburan bisa melepaskan logam berat yang dapat mempengaruhi kualitas air permukaan melalui tanah dan limpasan. Cara lain kontaminasi air tanah adalah melalui sumber geologi seperti mineral arsenik [64].

Sebagian besar cat, pewarna, sabun, logam, semikonduktor dan obat-obatan mengandung arsenik. Pestisida tertentu, pupuk dan operasi makanan hewan juga melepaskan arsenik ke lingkungan dalam jumlah yang lebih tinggi. Bentuk-bentuk organik arsenik seperti arsenit dan arsenat yang ditemukan lebih berbahaya bagi kesehatan manusia. Mereka sangat karsinogenik dan dapat menyebabkan kanker paru-paru, hati, kandung kemih dan kulit. Manusia yang terkena arsenik bisa berasal dari udara, makanan dan air. Minum air yang terkontaminasi dengan arsenik adalah salah satu penyebab utama keracunan arsenik di lebih dari 30 negara di dunia [8,65].

Jika tingkat arsenik dalam air tanah adalah 10-100 kali nilai yang diberikan dalam pedoman WHO untuk air (10 mg/L) minum, dapat menjadi ancaman bagi kesehatan

manusia [66]. Air dapat terkontaminasi melalui bahan kimia arsenik yang dijual, pestisida arsenik atau deposit mineral alami. Toksisitas arsenik dapat berupa toksisitas arsenik akut atau kronis dan kronis disebut sebagai arsenikosis. Sebagian besar laporan toksisitas arsenik kronis pada pria fokus pada manifestasi kulit karena kekhususan dalam diagnosis. Pigmentasi dan keratosis adalah penyakit kulit tertentu yang menunjukkan toksisitas arsenik kronis [67].

Tingkat yang lebih rendah dari paparan arsenik dapat menyebabkan mual dan muntah, mengurangi produksi eritrosit dan leukosit, detak jantung tidak normal, sensasi menusuk di tangan dan kaki, dan kerusakan pembuluh darah. Paparan jangka panjang dapat menyebabkan pembentukan lesi kulit, kanker internal, masalah neurologis, penyakit paru, penyakit pembuluh darah perifer, hipertensi dan penyakit kardiovaskular dan diabetes mellitus [68]. Hasil arsenikosis kronis di banyak perubahan ireversibel pada organ vital dan tingkat kematian lebih tinggi. Terlepas dari besarnya toksisitas berpotensi mematikan ini, tidak ada pengobatan yang efektif untuk penyakit ini [8,69].

Kontaminasi arsenik telah terjadi sebagai hasil proses geologi alami dan aktivitas manusia. Sumber *anthropogenic*

arsenik meliputi aktivitas manusia seperti pertambangan dan pemrosesan bijih. Proses peleburan, dahulu dan sekarang, dapat melepaskan arsenik ke dalam air dan tanah. Manusia juga dapat terpapar arsenik melalui udara, makanan dan air. Air minum terkontaminasi arsenik adalah salah satu penyebab umum keracunan arsenik pada lebih dari 30 negara di dunia . Kontaminasi air tanah dapat disebabkan oleh sumber geologi seperti mineral arsenik. Banyak cat, pewarna, sabun, logam, semi konduktor dan obat-obatan mengandung arsenik. Pestisida tertentu, pupuk dan makanan hewan juga melepaskan arsenik ke lingkungan dalam jumlah lebih banyak [65].

4.2 Kadmium (Cd)

Kadmium adalah produk sampingan dari produksi seng. Tanah dan batuan, termasuk batu bara dan mineral pupuk, mengandung kadmium. Kadmium memiliki banyak aplikasi, *misalnya* dalam baterai, pigmen, plastik dan coating logam dan secara luas digunakan dalam *elektroplating* [67]. Kadmium dan senyawanya diklasifikasikan sebagai karsinogen bagi manusia oleh Badan Internasional untuk Penelitian Kanker [70].

Sumber alami dan *anthropogenic* kadmium termasuk buangan industri, penggunaan pupuk dan lumpur tanah pertanian dapat menyebabkan pencemaran tanah. Hal tersebut mengakibatkan peningkatan pengambilan kadmium oleh hasil panen dan sayuran untuk konsumsi manusia. Proses pengambilan kadmium tanah oleh tanaman akan meningkat pada pH rendah [57].

Kadmium merupakan produk sampingan dari produksi zink dan bisa terpapar ke manusia atau hewan di tempat kerja maupun lingkungan. Setelah kadmium terserap oleh tubuh manusia, logam ini akan terakumulasi di dalam tubuh sepanjang hidup. Manusia bisa terpapar logam ini utamanya melalui inhalasi dan mulut sehingga dapat menyebabkan keracunan akut maupun kronis [57].

Merokok adalah sumber paparan kadmium paling besar. Pemantauan biologi terhadap kadmium pada populasi umum telah menunjukkan bahwa merokok dapat menyebabkan peningkatan signifikan kadar kadmium darah (B-Cd/ *blood cadmium*). Konsentrasi pada perokok berada pada rata-rata 4 hingga 5 kali lebih tinggi dari bukan perokok. Namun, rokok hanya sedikit berkontribusi pada keseluruhan muatan kadmium di dalam tubuh [57].

Kadmium dilepaskan ke lingkungan melalui kegiatan alam seperti letusan gunung berapi, pelapukan, transportasi sungai dan beberapa aktivitas manusia seperti pertambangan, peleburan, merokok tembakau, pembakaran limbah, dan pembuatan pupuk. Meskipun emisi kadmium telah terasa berkurang di negaranegara yang paling maju, itu adalah sumber tersisa ketakutan bagi para pekerja dan orang-orang tinggal yang di daerah tercemar. Kadmium dapat menyebabkan intoksikasi baik yang akut dan kronis [71].

Kadmium sangat beracun ke ginjal dan terakumulasi dalam sel tubulus proksimal dalam konsentrasi yang lebih tinggi. Kadmium dapat menyebabkan mineralisasi tulang baik melalui kerusakan tulang atau gangguan fungsi ginjal. Studi pada manusia dan hewan telah menunjukkan bahwa osteoporosis (kerusakan tulang) adalah efek penting dari paparan kadmium bersama dengan gangguan dalam metabolisme kalsium, pembentukan batu ginjal dan hiperkalsiuria [72].

Menghirup tingkat yang lebih tinggi kadmium dapat menyebabkan kerusakan parah pada paru-paru. Jika kadmium yang tertelan dalam jumlah yang lebih tinggi, dapat menyebabkan iritasi lambung dan mengakibatkan muntah dan diare. Pada waktu pemaparan yang sangat lama pada

konsentrasi yang lebih rendah, dapat menjadi disimpan di ginjal dan akhirnya menyebabkan penyakit ginjal, tulang rapuh dan kerusakan paru-paru [73].

Kadmium dan senyawanya sangat larut dalam air dibandingkan dengan logam lain. Bioavailabilitas mereka sangat tinggi dan karena itu cenderung *Bioakumulasi*. Paparan jangka panjang untuk kadmium dapat mengakibatkan perubahan *morphopathological* pada ginjal. Perokok lebih rentan untuk keracunan kadmium dibandingkan non-perokok. Tembakau adalah sumber utama penyerapan kadmium pada perokok seperti tembakau. Non-perokok terkena kadmium melalui makanan dan beberapa jalur lainnya. Namun kadmium penyerapan melalui jalur lain jauh lebih rendah [74].

Kadmium berinteraksi melalui nutrisi yang menyebabkan efek toksisitas. Analisis eksperimental pada hewan telah menunjukkan bahwa 50% dari kadmium akan diserap di paru-paru dan sisanya dalam saluran pencernaan. Selama kehamilan manusia jika paparan kadmium yang tinggi maka bayi akan lahir prematur dan mengurangi berat badan lahir bayi [70].

Makanan adalah sumber paling penting dari paparan kadmium pada populasi bukan perokok di kebanyakan negara-negara [51]. Kadmium berada di kebanyakan bahan makanan tetapi kadarnya sangat bervariasi. Pengambilan individu juga bervariasi berdasarkan perbedaan kebiasaan makan. Wanita biasanya memiliki pemasukkan kadmium harian lebih rendah karena konsumsi energi lebih rendah daripada laki-laki. Penyerapan gastrointestinal terhadap kadmium kemungkinan juga dipengaruhi oleh faktor nutrisi seperti status zat besi [57].

Blood-cadmium umumnya merefleksikan paparan saat ini, namun juga sebagian paparan sepanjang hidup. Kadar kadmium dalam urin (*U-Cd/ urine cadmium*) utamanya dipengaruhi oleh muatan tubuh. *Urinecadmium* proporsional dengan kadar di ginjal. Perokok dan seseorang yang tinggal di area terkontaminasi memiliki kadar kadmium di urin lebih tinggi. Perokok memiliki kadar kadmium 2 kali lebih tinggi dari bukan perokok [57].

4.3 Chromium (Cr)

Chromium hadir dalam batuan, tanah, hewan dan tumbuhan. Senyawa chromium sangat banyak terdapat dalam sedimen air. Chromium dapat terjadi di banyak negara yang

berbeda seperti *divalen*, empat *valent*, lima *valent* dan negara *heksavalent*. Cr (VI) dan Cr (III) adalah bentuk paling stabil dan paparannya ke manusia lebih tinggi [75]. Senyawa *chromium* (VI), seperti kalsium kromat, kromat seng, strontium kromat dan kromat memimpin, sangat beracun dan karsinogenik di alam. Kromium (III), di sisi lain, adalah suplemen gizi yang penting bagi hewan dan manusia dan memiliki peran penting dalam *metabolisme glukosa*. [8].

Penyerapan senyawa *chromium heksavalen* melalui saluran udara dan saluran pencernaan lebih cepat daripada senyawa *chromium trivalen*. Sumber pekerjaan kromium termasuk pelapis logam pelindung, paduan logam, pita magnetik, pigmen cat, karet, semen, kertas, pengawet kayu, penyamakan kulit dan logam *plating* [67].

Pencemaran kromium berasal dari buangan industri-industri pelapisan krom, pabrik tekstil, pabrik cat, penyamakan kulit, pabrik tinta dan pengilangan minyak. Hal tersebut berasal dari natrium kromat dan natrium dikromat yang merupakan spesies krom (VI) bersifat *toksik* sebagai bahan pokok untuk memproduksi bahan kimia krom, seperti bahan pewarna krom, garam-garam krom yang dipergunakan penyamakan kulit, pengawetan kayu, bahan anti korosif pada

peralatan otomotif, ketel dan pengeboran minyak. Keterangan ini menunjukkan perlu adanya upaya mengurangi sifat toksisitas krom (VI) tersebut dengan cara mengadsorpsi atau mendegradasinya.

Beberapa literatur hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat toksik logam berat krom (VI) jauh lebih toksik dibandingkan krom (III). Dalam SK Menteri Negara LH yang bernomor Kep 03/MENKLH/11/1991 disebutkan bahwa kadar maksimum krom total yang diperbolehkan dalam perairan adalah 0,1 ppm sedang kadar krom (VI) 0,05 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa dalam jumlah yang lebih sedikit keberadaan krom (VI) telah dapat menyebabkan masalah bagi lingkungan. Dilaporkan bahwa rokok mengandung 390g/ kg dari Cr, tapi belum ada laporan yang signifikan diterbitkan pada jumlah *chromium* dihirup melalui rokok. Sampai batas ini dari [8].

Ketika kulit rusak terjadi kontak dengan semua jenis senyawa *chromium*, sebuah lubang dalam penetrasi akan terbentuk. Paparan jumlah yang lebih tinggi dari senyawa kromium pada manusia dapat menyebabkan penghambatan *eritrosit glutathione reduktase*, yang pada gilirannya menurunkan kapasitas untuk mengurangi *methemoglobin* dengan hemoglobin [76,77]. Hasil yang diperoleh dari

berbagai *invitro* dan *invivo* percobaan telah menunjukkan bahwa senyawa kromat dapat menyebabkan kerusakan DNA dalam berbagai cara dan dapat menyebabkan pembentukan *adduct* DNA, penyimpangan kromosom, pertukaran kromatit, perubahan dalam replikasi dan transkripsi dari DNA [78].

4.4 Aluminium (Al)

Rute utama dari konsumsi *aluminium* oleh manusia adalah dengan menghirup, menelan dan dermal kontak dan sumber paparan minum air, makanan, minuman, dan *aluminium* yang mengandung obat. *Aluminium* secara alami ada dalam makanan. *Aluminium* dan senyawanya buruk diserap pada manusia, meskipun tingkat di mana mereka bisa diserap belum jelas dipelajari. Gejala yang menunjukkan adanya jumlah yang lebih tinggi dari *aluminium* dalam tubuh manusia adalah mual, sariawan, bisul kulit, ruam kulit, muntah, diare dan nyeri rematik. [79].

Paparan *Aluminium* mungkin merupakan faktor risiko untuk timbulnya penyakit *Alzheimer (AD)* pada manusia, sebagai hipotesis oleh WHO, 1992. Dermatitis kontak dan dermatitis iritan terlihat pada orang yang terkena *aluminium* di tempat kerja mereka. *Aluminium* menunjukkan efek buruk

pada sistem saraf dan menyebabkan hilangnya memori, masalah dengan keseimbangan dan hilangnya koordinasi [80].

Orang yang menderita penyakit ginjal merasa sulit untuk menghilangkan *aluminium* dari tubuh, menyebabkan akumulasi *aluminium* dalam tubuh yang menyebabkan kerusakan tulang dan otak. Beberapa faktor yang mungkin akan menjadi alasan untuk pengembangan toksisitas *aluminium* hidup di lingkungan berdebu, nutrisi intravena jangka panjang, fungsi ginjal berkurang, hemodialisis, minum atau menelan zat-zat yang tinggi kandungan *aluminium*, bekerja di lingkungan yang berisi tingkat tinggi *aluminium* [81].

Pasien yang menjalani dialisis ginjal mungkin bisa terkena hadir *aluminium* di dialisat yang terkontaminasi dan pengikat *fosfat*. Tingkat yang lebih tinggi dari paparan *aluminium* dapat mengubah *evolusi hiperparatiroidisme* sekunder, yang mengarah ke penyakit lain seperti penyakit tulang dinamik *aluminium*-diinduksi dan *osteomalacia aluminium* yang disebabkan, baik yang ditandai dengan remodeling tulang. Beberapa komplikasi lain yang terkait dengan *toksisitas aluminium* masalah paru-paru, anemia,

gangguan penyerapan zat besi, masalah sistem saraf, Dan lain-lain. [2,82].

4.5 Besi (Fe)

Besi atau *ferrum (Fe)* adalah logam transisi paling melimpah di kerak bumi. Aspek biologisnya adalah nutrisi paling penting bagi makhluk hidup karena merupakan kofaktor bagi banyak protein penting dan *enzim*. Reaksi yang dimediasi besi mendukung sebagian besar *organisme aerobik* dalam proses respirasi mereka. Jika tidak terlindung dengan baik, ia dapat mengkatalisis reaksi yang melibatkan pembentukan radikal yang dapat merusak biomolekul, sel, jaringan dan seluruh organisme. Keracunan besi selalu menjadi topik yang menarik terutama untuk dokter spesialis anak. Anak-anak sangat rentan terhadap keracunan besi karena mereka terkena maksimal produk *iron containing* [83].

Iron toksikosis terjadi dalam empat tahap. Tahap pertama yang terjadi setelah 6 jam dari *overdosis* besi ditandai dengan efek gastrointestinal seperti *gastro intestinal* perdarahan, muntah dan diare [84]. Tahap kedua berlangsung dalam waktu 6 sampai 24 jam dari overdosis dan dianggap

sebagai periode laten, periode pemulihan medis jelas. Tahap ketiga terjadi antara 12-96 jam setelah timbulnya gejala klinis tertentu. Tahap ini ditandai dengan guncangan, hipotensi, lesu, takikardia, nekrosis hati, asidosis metabolik dan kadang-kadang kematian. Tahap keempat terjadi dalam 2-6 minggu *overdosis* besi. Tahap ini ditandai dengan pembentukan *ulserasi gastrointestinal* dan pengembangan striktur. Penyerapan zat besi berlebih merupakan masalah serius di negara-negara maju. Mengonsumsi daging juga rentan terpapar keracunan zat besi dan meningkatkan risiko kanker. Data menunjukkan pekerja konstruksi sangat rentan terpapar asbes yang berkonsentrasi hampir 30% [85].

4.6 Timbal (Pb)

Timbal tersebar di alam dalam jumlah yang sangat sedikit. Penyebaran logam ini diseluruh lapisan bumi hanya sekitar 0,0002% dari kerak bumi [3]. Timbal dapat berbentuk logam murni maupun senyawa inorganik dan organik. Dalam bentuk apapun logam ini memiliki dampak toksisitas yang sama bagi makhluk hidup [22].

Timbal sifatnya lunak dan berwarna coklat kehitaman, serta mudah dimurnikan dari pertambangan. Senyawa ini banyak ditemukan dalam pertambangan seluruh dunia [5].

Logam ini bertitik lebur rendah, mudah dibentuk, mempunyai sifat kimia yang aktif, sehingga dapat digunakan untuk melapisi logam untuk mencegah perkaratan. Bila dicampur dengan logam lain, membentuk logam campuran yang lebih bagus daripada logam murninya, mempunyai kepadatan melebihi logam lain [6].

Kegiatan manusia seperti pertambangan, manufaktur dan pembakaran bahan bakar fosil telah mengakibatkan akumulasi timbal dan senyawanya di lingkungan, termasuk udara, air dan tanah. Timbal digunakan untuk produksi baterai, kosmetik, produk logam seperti amunisi, solder dan pipa, dll” [2,67].

Sifat toksik dari Pb memberikan efek klinis, seperti [86]:

1. Pada saluran cerna terjadi kolik usus disertai konstipasi berat pada sistem *hematopoitik* menghambat aktivitas enzim *ä-aminolevulenat dehidratase* (ALAD) dalam *eritroblas* sumsum tulang dan eritrosit, sehingga memperpendek umur sel darah merah
2. Efek pada sistem syaraf (organ yang paling sensitif), keracunan Pb dapat mengakibatkan epilepsi, halusinasi, dilerium, dan kerusakan otak besar

3. Pada ginjal dan urinaria terjadinya kerusakan ginjal oleh adanya gagal ginjal
4. Pada sistem reproduksi terjadi penurunan kemampuan reproduksi
5. Pada jantung pada anak-anak ditemukan ketidaknormalan fungsi jantung
6. Pada sistem indokrin mengakibatkan kekurangan iodium.

Timbal sangat beracun dan karenanya penggunaannya dalam berbagai produk, seperti cat, bensin, dll, telah sangat berkurang saat ini. Sumber utama paparan timbal adalah cat memimpin berbasis, bensin, kosmetik, mainan, debu rumah tangga, tanah yang terkontaminasi, emisi industri. Keracunan timbal yang disebabkan oleh pekerjaan dapat terjadi dalam industri baterai, cat, percetakan, pembuatan tembikar, dan proses peleburan timbal [87].

Paparan timbal dapat terjadi selama proses pembuatan tangki, pemasangan pipa, dan peralatan lain yang membawa gas dan cairan yang bersifat korosif superkonduktor, teknologi serat optik, selama *magnetic resonance imaging* (MRI) obat-obatan *nuclear*. Tanpa disadari, timbal dapat mengontaminasi tubuh melalui udara tercemar, timbal yang terhirup, berkontak dengan kulit, makanan dan minuman

yang tercemar, serta benda-benda mengandung timbal yang tertelan.

Efek keracunan timbal secara akut dan subakut sangat khas, berkaitan dengan paparan dosis yang relatif tinggi, waktu paparan yang relatif singkat, baik dalam hitungan hari atau bulan. Efek keracunan timbal secara akut juga dapat terjadi secara dramatis, kematian yang tiba-tiba, kram perut yang parah, anemia, perubahan perilaku, dan kehilangan nafsu makan. Pada kejadian keracunan timbal, tidak semua efek yang telah dipaparkan muncul secara lengkap, tetapi hanya sebagian efek saja yang teramati dengan jelas [88].

Efek keracunan timbal kronis terjadi sebagai akibat paparan timbal yang terakumulasi pada kurun waktu bulanan hingga tahunan. Efek keracunan timbal kronis biasanya menimbulkan gejala yang tidak spesifik pada hampir semua sistem tubuh. Efek negatif keracunan timbal kronis pada manusia terdiri atas penurunan libido dan kesuburan (jantan dan betina), keguguran dan kelahiran prematur, masalah kecerdasan, hipertensi, penyakit kardiovaskuler, lebih agresif, serta gangguan fungsi ginjal.

Keracunan timbal dianggap penyakit klasik dan tanda-tanda yang terlihat pada anak-anak dan orang dewasa

terutama yang berkaitan dengan sistem saraf pusat dan saluran pencernaan [88]. Keracunan timbal juga dapat terjadi dari air minum. Pipa yang membawa air dapat terbuat dari timah dan senyawanya yang dapat mencemari air. Menurut Badan Perlindungan Lingkungan (EPA), timbal dianggap karsinogen. Timbal memiliki efek besar pada bagian tubuh yang berbeda. Distribusi memimpin dalam tubuh awalnya tergantung pada aliran darah ke berbagai jaringan dan hampir 95% dari timah diendapkan dalam bentuk fosfat tidak larut dalam tulang skeletal [89].

Toksisitas timbal, juga disebut keracunan timbal, dapat berupa akut atau kronis. Akut dapat menyebabkan hilangnya nafsu makan, sakit kepala, hipertensi, nyeri perut, gangguan fungsi ginjal, kelelahan, sulit tidur, arthritis, halusinasi dan vertigo. Akut terutama terjadi di tempat kerja dan di industri manufaktur yang menggunakan timbal. Paparan kronis timbal dapat menyebabkan keterbelakangan mental, cacat lahir, psikosis, autisme, alergi, disleksia, penurunan berat badan, hiperaktif, kelumpuhan, kelemahan otot, kerusakan otak, kerusakan ginjal dan bahkan dapat menyebabkan kematian [67].

Meskipun keracunan timbal dapat dicegah masih tetap menjadi penyakit yang berbahaya yang dapat mempengaruhi

sebagian besar organ tubuh. Membran plasma bergerak ke dalam ruang interstitial otak ketika darah otak terkena peningkatan kadar konsentrasi timbal, mengakibatkan edema otak menjadi rusak [90]. Ini mengganggu sistem utusan kedua intraseluler dan mengubah fungsi sistem saraf pusat, yang perlindungan sangat penting. Sumber lingkungan dan domestik ion timbal merupakan penyebab utama dari penyakit ini tetapi dengan tindakan pencegahan yang tepat adalah mungkin untuk mengurangi risiko yang terkait dengan toksisitas timbal [2].

4.7 Merkuri

Air raksa atau merkuri (Hg) adalah logam yang ada secara alami, merupakan satu-satunya logam yang pada suhu kamar berwujud cair. Logam murni berwarna keperakan/putih keabu-abuan, cairan tak berbau, dan mengkilap. Bila dipanaskan sampai suhu 357°C, Hg akan menguap. Walaupun Hg hanya terdapat dalam konsentrasi 0,08 mg/kg kerak bumi, logam ini banyak tertimbun di daerah pertambangan. Merkuri dianggap logam berat paling beracun di lingkungan.

Keracunan merkuri disebut sebagai *acrodynia* atau penyakit pink. Merkuri dilepaskan ke lingkungan oleh kegiatan industri seperti farmasi, kertas dan pengawet pulp, industri pertanian, dan klorin serta industri produksi soda kaustik [12]. Merkuri memiliki kemampuan untuk menggabungkan dengan unsur-unsur lain dan membentuk merkuri organik dan anorganik. Paparan peningkatan kadar logam, merkuri organik dan anorganik dapat merusak otak, ginjal dan janin yang sedang berkembang [91].

Merkuri hadir di sebagian besar makanan dan minuman di kisaran < 1 sampai 50 mg/kg. Dalam makanan laut sering terlihat di tingkat yang lebih tinggi. Merkuri organik dapat dengan mudah menyerap seluruh *biomembranes* dan karena mereka lipofilik di alam, merkuri hadir dalam konsentrasi yang lebih tinggi di sebagian besar spesies ikan berlemak dan dalam hati ikan ramping [92].

Mikroorganisme mengkonversi hadir merkuri di dalam tanah dan air menjadi metil merkuri, racun yang dapat terakumulasi dengan usia ikan dan dengan meningkatnya tingkat tropik. EPA telah menyatakan merkuri klorida dan metil merkuri menjadi sangat karsinogenik. Sistem saraf sangat sensitif terhadap semua jenis merkuri. Peningkatan paparan merkuri dapat mengubah fungsi otak dan

menyebabkan rasa malu, tremor, masalah memori, mudah marah, dan perubahan dalam penglihatan atau pendengaran [67].

Paparan uap merkuri logam pada yang lebih tinggi tingkat untuk jangka waktu yang lebih singkat dapat menyebabkan kerusakan paru-paru, muntah, diare, mual, ruam kulit, peningkatan denyut jantung atau tekanan darah. Gejala keracunan merkuri organik termasuk depresi, masalah memori, tremor, kelelahan, sakit kepala, rambut rontok, dan lain-lain. Sejak gejala ini umum juga dalam kondisi lain, mungkin sulit untuk mendiagnosa kasus tersebut [67]. Karena efek kesehatan kelebihan yang berhubungan dengan paparan merkuri, standar hadir untuk air minum telah ditetapkan pada tingkat yang lebih rendah dari 0,002 mg/L dan 0,001 mg/L dengan Undang-Undang Perlindungan Lingkungan dan Organisasi Kesehatan Dunia [45].

Kebanyakan sumber pencemaran merkuri meliputi aktivitas *anthropogenic* seperti pertanian, pembuangan limbah air kota besar, pertambangan, pembakaran dan pembuangan limbah air industri [93]. Merkuri juga dilepaskan ke lingkungan melalui aktivitas beberapa industri seperti industri farmasi, kertas, pengawet bubur kertas dan

klorin [12]. Kelompok pekerjaan terbesar yang terpapar merkuri adalah staf perawatan gigi. Selama tahun 1970-an, kadar udara di beberapa tempat operasi gigi mencapai $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [57].

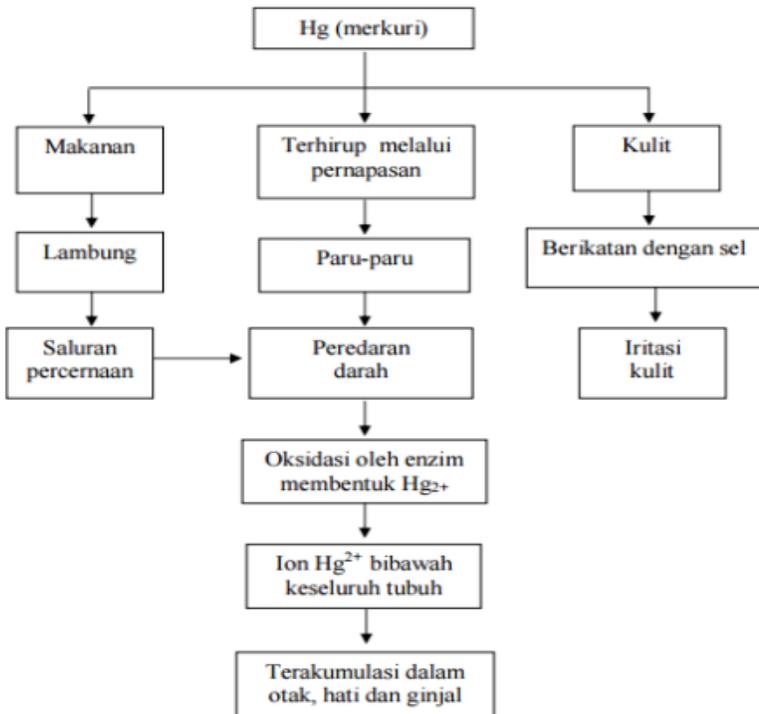
Merkuri anorganik diubah menjadi senyawa organik, seperti metil merkuri, yang sangat stabil dan terakumulasi pada rantai makanan. Hingga tahun 1970, metil merkuri umumnya digunakan untuk pengendalian jamur pada biji gandum. Populasi umum utamanya terpapar merkuri melalui makanan. Ikan menjadi sumber terbesar paparan metil merkuri kemudian amalgam gigi [51]. Beberapa percobaan telah menunjukkan bahwa aroma merkuri dilepaskan dari pengisian amalgam [94]. Senyawa merkuri organik seperti alkil-merkuri, menjadi penyebab sekitar 80% dari peristiwa keracunan akibat merkuri. Senyawa-senyawa tersebut biasa digunakan sebagai pestisida dalam bidang pertanian dan sebagai katalis dalam industri kimia [2,3].

Tersebarnya logam Hg di tanah, perairan, ataupun udara bisa melalui berbagai jalur, seperti pembuangan limbah industri secara langsung, baik limbah padat maupun cair ke tanah, udara, dan air. Merkuri pada kerak bumi sebesar $0,08 \text{ mg}/\text{kg}$ banyak tertimbun di daerah penambangan. Apabila masuk ke dalam perairan, merkuri mudah berikatan dengan

klor dan membentuk ikatan HgCl. Dalam bentuk tersebut, Hg mudah masuk ke dalam plankton dan dapat berpindah ke biota laut lain. HgCl akan berubah menjadi metil merkuri (CH₃Hg) oleh peran *mikroorganisme* pada sedimen di dasar perairan. Mikroorganisme kemudian termakan oleh ikan sehingga konsentrasi merkuri dalam ikan meningkat [95].

Merkuri terkenal sebagai logam berbahaya. Toksisitasnya adalah penyebab umum dari keracunan akut logam berat dengan jumlah kasus sebanyak 3.596 di tahun 1997 berdasarkan data *American Association of Poison Control Center*. Metil merkuri adalah senyawa neurotoksik yang bertanggung jawab terhadap kerusakan mikrotubul, keusakan mitokondria, peroksidasi lipid dan akumulasi molekul neurotoksik seperti serotonin, aspartat dan glutamat [96]. Jumlah keseluruhan pengeluaran merkuri ke lingkungan telah dinilai sebesar 2.200 metrik/tahun [97]. Hewan terpapar merkuri telah menunjukkan perubahan nurologis dan kebiasaan. Kelinci ketika terpapar 28,8 mg/m³ uap merkuri selama 1 hingga 13 minggu telah menunjukkan perubahan patologi yang tidak jelas, ditandai oleh kemunduran dan nekrosis otak pada kelinci. [98].

Mekanisme toksisitas merkuri dalam tubuh manusia dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme toksisitas merkuri dalam tubuh manusia

TEKNIK PENANGGULANGAN LOGAM BERAT

Manusia dapat menciptakan teknologi dan memanfaatkannya untuk mengolah sumber daya alam terbaru maupun sumber daya alam yang tak terbaru, sehingga mampu menghasilkan produk barang dan jasa pelayanan untuk memenuhi kebutuhan dasar manusia dan kebutuhan lainnya. Perkembangan dunia industri saat ini tergolong maju karena ditemukannya teknologi. Semakin tinggi perkembangan dunia industri semakin tinggi pula pertumbuhan ekonomi nasional. Proses dan produk bersih dimunculkan dan digerakkan oleh *The United Nations Environmental Programm (UNEP) Working Group for Cleaner Production*.

Salah satu teknologi ramah lingkungan adalah pemanfaatan *Bioteknologi* modern dengan bantuan mikroba untuk mengonversi sumber daya alam menjadi produk baru

tanpa menghasilkan limbah. *Bioteknologi* modern dicirikan dengan rekayasa genetika dan teknologi DNA rekombinan. DNA adalah makromolekul yang mampu menyimpan informasi hereditas sel dan kode kimiawi sebagai dasar gen.

Revolusi penerapan *Bioteknologi* baik tradisional maupun *Bioteknologi* modern memberikan kontribusi pemanfaatan teknologi terhadap kehidupan manusia yang lebih nyaman dan lebih sehat sehingga *Bioteknologi* sebagai:

"Renewable frontier and a new era biological frontier and biotechnology" dan "Frontier area of science".

Perkembangan *Bioteknologi* maju pesat karena adanya rekayasa protein untuk menghasilkan biokatalisator unggul yang ditemukan oleh para ahli baik dalam negeri maupun luar negeri. Biokatalisator berfungsi sebagai katalisator untuk mengonversi sumber daya alam menjadi produk baru.

5.1 Pentingnya Penanggulangan Logam Berat

Proses pencegahan terjadinya pencemaran lebih baik daripada penanggulangan pencemaran yang telah terjadi. Usaha-usaha tersebut dapat dilakukan, diantaranya melalui menjaga air tanah agar tetap bersih misalnya [62] :

1. Menempatkan daerah industri atau pabrik jauh dari daerah perumahan atau pemukiman
2. Pembuangan limbah industri diatur sehingga tidak mencermari lingkungan atau ekosistem
3. Pengawasan terhadap penggunaan jenis pestisida dan zat-zat kimia lain yang dapat menimbulkan pencemaran
4. Memperluas gerakan penghijauan
5. Tindakan tegas terhadap perilaku pencemaran lingkungan
6. Memberikan kesadaran terhadap masyarakat tentang arti lingkungan hidup sehingga manusia lebih mencintai lingkungan hidupnya
7. Melakukan intensifikasi pertanian

Pencegahan adalah lebih baik dari pengobatan. Artinya, ini kembali pada soal koordinasi unsur-unsur masyarakat terkait. Khususnya untuk kasus PETI (Penambangan Emas Tanpa Izin), kebijakan publik, Gubernur, Bupati, dan Kementerian Pertambangan sangat menentukan dalam mengurangi pencemaran sungai. Hal ini bisa dilakukan dengan memberikan penyuluhan pada masyarakat penambang [2,62].

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam rangka pengamanan logam beracun adalah sebagai berikut [27]:

- a. Mengendalikan pencemaran atau polusi industri
- b. Memastikan praktek pengelolaan limbah yang baik dan benar
- c. Mendorong penghapusan penggunaan timbal(Pb) dalam cat
- d. Memperlengkapi petugas di SPBU dengan alat pelindung diri yang sesuai untuk menghindari paparan timbal (Pb) dalam bensin
- e. Mengurangi penggunaan rodentisida, pestisida dan herbisida yang mengandung logam beracun dan menggantinya dengan bahan lain yang lebih aman bagi manusia dan lingkungan
- f. Mengidentifikasi bahan kimia yang mengandung logam beracun yang digunakan dalam mainan dan pilihan pengganti yang aman bagi anak-anak.
- g. Batasi konsumsi makanan yang berasal dari perairan yang menjadi tempat pembuangan limbah
- h. Jauhkan termometer merkuri dari jangkauan anak-anak.

Pada prinsipnya ada 2 (dua) usaha untuk menanggulangi pencemaran, yaitu penanggulangan secara non-teknis dan secara teknis. Penanggulangan secara non teknis adalah usaha untuk mengurangi pencemaran lingkungan dengan cara menciptakan peraturan perundangan yang dapat merencanakan, mengatur dan mengawasi segala macam bentuk kegiatan industri dan teknologi sehingga tidak terjadi pencemaran. Peraturan perundangan ini hendaknya dapat memberikan gambaran secara jelas tentang kegiatan industri yang akan dilaksanakan, misalnya meliputi AMDAL, pengaturan dan pengawasan kegiatan dan menanamkan perilaku disiplin. Sedangkan penanggulangan secara teknis bersumber pada perlakuan industri terhadap perlakuan buangnya, misalnya dengan mengubah proses, mengelola limbah atau menambah alat bantu yang dapat mengurangi pencemaran [99].

Mengingat dampak bahaya yang mungkin ditimbulkan akibat pencemaran logam berat, upaya pengendalian pencemaran logam berat harus mendapat perhatian yang serius dari pemerintah dan masyarakat. Perkembangan ilmu pengetahuan pada dasarnya telah menghasilkan berbagai teknologi yang dapat digunakan oleh manusia untuk

mengendalikan pencemaran termasuk juga pencemaran logam berat [99].

Pengendalian pencemaran logam berat dengan memanfaatkan proses fisika dan kimia telah banyak digunakan selama ini ternyata membutuhkan biaya yang sangat mahal dan hasil yang kurang efektif karena dihasilkan limbah baru dari proses yang dilakukan. Kemajuan dalam bidang *Bioteknologi* tanaman telah berhasil menemukan bahwa tanaman memiliki kemampuan untuk menyerap logam berat dari lingkungan tanah dan perairan, sehingga dampak bahaya logam berat dapat dilokalisir [100].

Teknik secara kimia adalah netralisasi logam berat yang aktif menjadi senyawa yang kurang aktif dengan menambahkan senyawa tertentu, kemudian dilepas ke lingkungan perairan, namun pembuangan logam berat non-aktif juga menjadi masalah karena dapat dengan mudah mengalami degradasi oleh lingkungan menjadi senyawa yang dapat mencemari lingkungan [101].

5.2 Teknik Penanganan Cemar Logam Berat

Teknik-teknik yang dapat dimanfaatkan untuk mengatasi cemaran logam berat sebenarnya cukup banyak. Namun penting untuk mengkaji dampak balik dari teknik

yang dilakukan agar tidak menimbulkan permasalahan baru dikemudian hari. Selain itu nilai ekonomi pada setiap teknik yang akan diterapkan penting untuk dikaji khususnya apabila teknik tersebut akan diterapkan pada penanganan skala besar.

Berikut ini beberapa teknik penanggulangan cemaran logam berat yang umum diterapkan, diantaranya:

5.2.1 *Bioremoval* dan Bioabsorpsi

Istilah bioabsorpsi tidak dapat dilepaskan dari istilah *bioremoval* karena bioabsorpsi merupakan bagian dari *bioremoval*. *Bioremoval* dapat diartikan sebagai terkonsentrasi dan terakumulasinya bahan penyebab polusi atau polutan dalam suatu perairan oleh material biologi, dan material tersebut mempunyai kemampuan untuk *recovery* polutan sehingga dapat dibuang dan ramah terhadap lingkungan. Sedangkan berdasarkan kemampuan untuk membentuk ikatan antara logam berat dengan mikroorganisme maka bioabsorpsi merupakan kemampuan material biologi untuk mengakumulasikan logam berat melalui media metabolisme atau jalur psiko kimia. Proses bioabsorpsi ini dapat terjadi karena adanya material biologi yang disebut biosorben dan adanya larutan yang mengandung

logam berat dengan afinitas yang tinggi sehingga mudah terikat pada biosorben [2].

Beberapa jenis mikroorganisme yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bioabsorpsi terutama adalah dari golongan alga yakni alga dari divisi *Phaeophyta*, *Rhodophyta* dan *Chlorophyta*. Logam yang dapat diabsorpsi adalah logam berat beracun, logam esensial dan radionuklida. Jenis mikroorganisme yang dapat digunakan untuk bioremoval dan bioabsorpsi logam berat dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Jenis-Jenis Mikroorganisme yang Dapat Digunakan untuk Bioremoval Logam Berat

Mikroorganisme	Logam berat
Mucor mucedo, Rhizopus	Cu
stolonifer, Aspergillus orizae,	Cu,Cd,Zn,U,Pb
Penecillium chrysogenum,	Cu Cu
Ecklonia radiata, Saccharomyces	Cu,Pb,Cd,Cr
cerevisie, Chlorella vulgaris,	Cu,Pb,Cd,Ni
Phellinus badius	Pb,As Pb,Cd
Pinus radiate, Sargassum sp.,	Pb,Cd Cu,Cr,Fe
Durvillea potatorum, Chiarella	Zn Pb,Zn,Cu Cu
vulgaris, Ganoderma lucidum,	Cr,Cu Cr,Cu
Aspergillus niger, Pseudomonas	Hg,Zn,Cd
syringae, Solanum	Cu,Cr,Pb,Ni,Zn
elaegnifolium, Phanerochaete	Ni,Cu,Pb
chrysosporium, Absidia sp.	Pb,U,Cu

1. Mekanisme Proses Bioabsorps

Sebagian besar mekanisme pembersihan logam berat oleh mikroorganisme adalah proses pertukaran ion yang mirip pertukaran ion pada resin. Mekanisme pertukaran ion ini dapat dirumuskan sebagai: $A^{2+} + (2B\text{-biomassa}) \rightarrow B^{2+} + (A\text{ biomassa})$. Mekanisme ini dapat dibagi atas 3 cara yakni

berdasarkan metabolisme sel. Sedangkan jika berdasarkan posisi logam berat di-*remove*, dapat dibagi atas; akumulasi ekstraseluler (presipitasi), akumulasi intraseluler dan penyerapan oleh permukaan sel. Untuk mekanisme yang terakhir adalah berdasarkan cara pengambilan (absorpsi) logam berat. Cara pengambilan (absorpsi) logam berat dapat dibagi menjadi 2 (dua), yaitu [27]:

a. *Passive Uptake*

Proses ini terjadi ketika ion logam berat terikat pada dinding sel biosorben. Mekanisme *passive uptake* dapat dilakukan dengan dua cara, pertama dengan cara pertukaran ion di mana ion pada dinding sel digantikan oleh ion-ion logam berat; dan kedua adalah pembentukan senyawa kompleks antara ion-ion logam berat dengan gugus fungsional seperti karbonil, amino, thiol, hidroksi, fosfat, dan hidroksi karboksil secara bolak balik dan cepat. Sebagai contoh adalah pada *Sargassum sp.* dan *Eklonia sp.* Di mana Cr(6) mengalami reaksi reduksi pada pH rendah menjadi Cr(3) dan Cr(3) di-*remove* melalui proses pertukaran kation.

b. Active Uptake

Mekanisme masuknya logam berat melewati membran sel sama dengan proses masuknya logam esensial melalui sistem transpor membran, hal ini disebabkan adanya kemiripan sifat antara logam berat dengan logam esensial dalam hal sifat fisika kimia secara keseluruhan. Proses aktif uptake pada mikroorganisme dapat terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan dan akumulasi intraselular ion logam.

2. Menghitung Jumlah Logam berat yang Teradsorpsi

Untuk mengetahui jumlah logam berat yang mengalami proses bioadsorpsi oleh mikroorganisme dapat dihitung dengan pendekatan konstanta Langmuir yaitu :

$$Q = \frac{Q_{\max} \times b \times C_{eq}}{1 + b \times C_{eq}}$$

Dimana:

Q = miligram logam yang akan diakumulasi per gram

C_{eq} = besar konsentrasi logam pada larutan

Q_{max} = maksimum serapan spesifik dari biosorben

b = rasio biosorpsi

Salah satu contoh penelitian yang menggunakan konstanta Langmuir untuk menghitung jumlah logam berat yang teradsorpsi oleh mikroorganisme adalah penelitian oleh Voleski (2005), pada penelitiannya terhadap 3 jenis *Sargassum* untuk menyerap logam berat Cd, Cu dan Uranium (U) diperoleh data bahwa penyerapan Cd pada pH 4,5 adalah 87 mg Cd/g untuk *Sargassumvulgare*, 80 mg Cd/g untuk *Sargassum fluitans* dan 74 mg Cd/g untuk *Sargassum filipendula*. Sedangkan untuk penyerapan Cu pada *Sargassum vulgare* adalah 59 mg Cu/g, *Sargassum filipendula* 56 mg Cu/g, *Sargassumfluitans* 51 mg Cu/g dan untuk penyerapan Uranium oleh *sargassum* adalah > 500 mg U/g [27,2].

5.2.2 Fitoteknologi

Konsep yang memusatkan peran tumbuhan sebagai teknologi alami untuk menyelesaikan permasalahan lingkungan dikenal dengan istilah *Fitoteknologi*. Dalam tinjauan teknologi dan proses memperjelas *Fitoteknologi* sebagai cara pendekatan berbasis alam dalam penyelesaian permasalahan lingkungan. *Fitoteknologi* didasari pada kajian transformasi efek zat dalam ekotoksikologi. Sehingga perlu disikapi efek negatif zat sebagai penjagaan kesehatan dan keberlanjutan kehidupan [102].

Fitoteknologi dapat dikembangkan untuk *fitostruktur*, *fitodrainase*, *fitoproteksi*, *fitoproses*, *Fitoteknologi*, *fitomonitoring* maupun *fitoforensik* terhadap pencemaran lingkungan. Oleh karena pencemar dari lingkungan dapat berpindah ke dalam jaringan tumbuhan, maka tumbuhan dapat digunakan sebagai indikator maupun akumulator terhadap pencemar. *Fitomonitoring*, tumbuhan menjadi indikator untuk memetakan pencemaran lingkungan. Metode *fitomonitoring* ini dapat digunakan dalam penyelidikan permasalahan lingkungan yang merupakan pendekatan dalam *fitoforensik* [103,104].

Penggunaan tanaman hijau untuk membunuh, menyingkirkan dan mengubah lingkungan yang telah tercemar juga merupakan bagian yang di definisikan sebagai *Fitoteknologi*. Proses ini menerapkan semua jenis tanaman yang telah terpengaruh prosesnya baik secara biologis, kimia, dan fisikia dan membantu dalam pemulihan zat yang telah tercemar. *Fitoteknologi* bukanlah pemahaman yang baru. Penggunaan tanaman-tanaman untuk memperlakukan air limbah yang telah dilakukan dalam kurun waktu 300 tahun dan metode pemulihan berdasarkan tanaman untuk mengeruk

bubur-bubur material dan tanah yang terkontaminasi logam telah mengajukan penelitian ini sejak pertengahan 1970 [2].

Pemulihan berdasarkan tanaman juga telah berkembang pengaturannya dalam polusi udara dalam ruangan dan asap perkotaan. Perkembangan teknologi dan pencarian untuk penyelesaian yang lebih baik dan harga yang efektif melengkapi keterbaharuan *Fitoteknologi*. Tanaman, bersamaan dengan mikroflora, digunakan pada strategi pemulihan penahanan dan desinfeksi untuk tanah yang terkontaminasi.

Teknologi *Fitoteknologi* memanfaatkan tanaman melalui beberapa mekanisme yang mampu dilakukan oleh tubuh tanaman, yaitu *fitoekstraksi* (*phytoextraction*), fitostabilisasi (*phytostabilization*), fitostimulasi (*phytostimulation*), fitovolatilisasi (*phytovolatilization*), penghalang hidrolis untuk melokalisasi pergerakan air tanah dan vegetasi penutup yang dapat melokalisasi pergerakan lindi. Selain dapat berfungsi untuk memulihkan lingkungan yang tercemar logam berat, *Fitoteknologi* juga dapat berfungsi sebagai pengendali erosi. Teknologi *Fitoteknologi* sangat berkembang pesat karena teknologi ini mempunyai beberapa keunggulan diantaranya secara ekonomi relatif

mudah bila dibandingkan dengan metoda konvensional dengan penghematan biaya sebesar 75-85% [105,2].

Dalam menyerap dan mengakumulasi berbagai unsur, tanaman mempunyai beberapa mekanisme yang kemudian dimanfaatkan dalam teknik *Fitoteknologi*, sehingga *Fitoteknologi* dikelompokkan berdasarkan mekanisme yang terlibat, yaitu ekstraksi bahan pencemar dari tanah ke air tanah; konsentrasi atau akumulasi bahan pencemar dalam jaringan tanaman; degradasi bahan pencemar dengan berbagai proses biotik dan abiotik; volatilisasi atau transpirasi bahan pencemar yang bersifat volatil dari tanah ke udara; immobilisasi bahan pencemar pada zona akar; pengendalian *hidraulic* pada air tanah yang terkontaminasi; dan pengendalian *runoff*, erosi, dan infiltrasi oleh vegetasi penutup. Masing-masing mekanisme *Fitoteknologi* diaplikasikan dalam pemulihan lingkungan sesuai dengan jenis bahan pencemar yang akan dihilangkan dan media yang akan diremediasi [15].

Tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam berat dari media lingkungan [100]. Percobaan terhadap daya serap tumbuhan secara alami terhadap konsentrasi Pb dan Cd adalah 8 mg/l [106]. Pada daun konsentrasi toksisitas untuk

Pb adalah 30-300 ppm dan Cd adalah 5-30 ppm [107]. Namun jenis tumbuhan yang dipergunakan dalam *Fitoteknologi* lingkungan masih sangat terbatas. Sehingga jenis tumbuhan lokal dan liar di alam perlu dikonservasi dan digali kemampuannya terhadap pencemaran logam berat [108].

Mekanisme penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tumbuhan terjadi pada 3 proses [108]:

1. Penyerapan oleh akar;
2. Translokasi logam dari akar ke bagian tumbuhan
3. Lokalisasi logam pada sel dan jaringan.

Meskipun demikian respon tumbuhan terhadap logam berat untuk setiap jenis tumbuhan sangat beragam dalam kemampuan tumbuhan toleran ataupun tidak toleran terhadap keracunan unsur logam [109]. Tumbuhan memiliki 3 strategi dasar untuk tumbuh pada media yang tercemar logam berat, yaitu [110].

1. ***Metal excluder***, tumbuhan mencegah masuknya logam dari bagian aerial atau menjaga agar konsentrasi logam tetap rendah dalam tanah;

2. ***Metal indicator***, tumbuhan mentoleransi keberadaan konsentrasi logam dengan menghasilkan senyawa pengikat logam atau mengubah susunan logam dengan menyimpan logam pada bagian yang tidak sensitif;
3. ***Metal accumulator***, tumbuhan mengkonsentrat konsentrasi logam yang tinggi pada bagian aerial tumbuhan, tumbuhan ini menyerap kadar kontaminan yang tinggi dan diendapkan dalam akar, batang, daun atau tunas [2].

Sebagai upaya untuk mencegah keracunan logam terhadap sel dan jaringan, tumbuhan mempunyai mekanisme detoksifikasi, misalnya dengan menimbun logam di dalam organ tertentu seperti akar. Adanya akumulasi logam merupakan usaha lokalisasi yang dilakukan oleh tumbuhan, dengan mengumpulkan dalam satu organ.

Dalam sel tumbuhan logam *melewati plasmalema, sitoplasma, dan vakuola*, dimana logam akan ilokalisasi/terakumulasi dalam *vakuola*. Bagian *vakuola* menjaga agar logam tidak menghambat *metabolisme*. Sehingga logam tidak akan berhubungan dengan proses fisiologi sel tumbuhan. Pada jaringan akar, logam masuk korteks dan diakumulasi di dekat endodermis. Endodermis

berfungsi sebagai *partial barrier* terhadap pemindahan logam dari akar. Hal ini yang diduga sebagai salah satu alasan adanya akumulasi logam lebih besar di akar [111].

Analisis unsur-unsur logam berat seperti Pb dan Cd dalam biota air tawar dapat digunakan dalam pengendalian dan pemantauan dampak lingkungan. Biota air dapat mengakumulasi logam esensial dan non esensial secara biologis sudah terbentuk dengan baik. Terdapat biokonsentrasi dan *Bioakumulasi* beberapa logam di dalam tumbuhan dan hewan. Faktor kepekatan (perbandingan kepekatan logam pada hewan, dalam $\mu\text{g}/\text{kg}$, terhadap air sekeliling, dalam $\mu\text{g}/\text{L}$) untuk beragam jenis makhluk air berkisar antara 102 dan 106 [112]. *Bioakumulasi* merupakan proses yang menentukan keberadaan logam tertentu di dalam biota. Beberapa jenis logam yang dapat terlibat dalam proses *Bioakumulasi* adalah As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, dan Zn. [113].

Ada beberapa antioksidan yang dapat menangkal ROS (*Reactive Oxygen Species*) yang dipicu dari terakumulasinya ion-ion logam berat pada tubuh manusia, sehingga menonaktifkan enzim-enzim antioksidan. Berikut beberapa antioksidan yang dapat menangkal ROS [114].

Vitamin C atau asam askorbat sangat penting bagi tubuh yang berfungsi sebagai antioksidan bagi tubuh kita

yang keberadaannya didalam paru-paru dan mata. Vitamin C juga berfungsi untuk mengkorversi H_2O_2 menjadi H_2O . Asam askorbat tidak dapat disintesis dalam tubuh manusia sehingga asam askorbat didapat dari buah, sayur-sayuran dan hewani.

Sintesis asam askorbat dalam hewan di sintesis dengan jalur metabolisme asam glukuronik, metabolisme ini memakai jalur metabolisme gula dibawah normal, dalam kondisi sakit dan regulasi fungsi psikologi. Ini merupakan jalur penting detoksifikasi. Metabolisme asam askorbat terjadi dalam liver dan sebagian lagi terjadi pada ginjal. Dalam metabolisme, Asam askorbat akan kehilangan 2 elektron hidrogen yang akan menghasilkan Dehydroaskorbat (DHA) yang dapat memicu terjadinya askorbat radikal bebas (AFR). Masuknya vitamin C lewat makanan yang kita konsumsi akan menambah daya tahan tubuh kita dari radikal bebas karena Vitamin C dapat berfungsi sebagai antioksidan untuk melindungi tubuh kita.

1. Vitamin E

Vitamin E berperang dalam sistem imunitas dan juga dalam perbaikan DNA akibat dari kerusakan yang dapat menyebabkan penyakit karsinogenik dan juga berfungsi dalam proses metabolisme. Kandungan antioksidan dari

vitamin E ini memiliki potensi yang besar untuk melindungi tubuh kita dari keracunan yang disebabkan oleh logam berat seperti *cadmium*. Vitamin E merupakan antioksidan untuk proses peroksida asam lemak tak jenuh (GAS) yang terdapat pada *fosfolipid* membran seluler.

Vitamin E sendiri mempunyai kemampuan untuk menurunkan kadar kreatinkinase yang menyebabkan kerusakan otot, Vitamin E juga mampu menurunkan kadar malondialdehid (MDA). Vitamin E juga mampu melindungi DNA dari kerusakan, serta mampu juga menurunkan jumlah produk peroksida lipid dari mitokondria.

2. Karotenoid

Karotenoid adalah salah satu sumber antioksidan alami yang dibutuhkan oleh tubuh kita guna sebagai penangkal radikal bebas, karotenoid bersumber dari hewan dan tumbuhan yang bertanggung jawab dalam pewarnaan seperti warna kuning, oranye, dan merah dan mendampingi klorofil dalam proses fotosintesis.

3. Flavanoid

Senyawa Flavanoid salah satu antioksidan yang terdapat pada buah, sayuran, flavanoid merupakan senyawa

yang tidak dapat disintesis oleh tubuh manusia sehingga untuk mendapatkan senyawa kaya antioksidan perlu kita mengkonsumsi buah dan sayuran dalam bentuk yang bervariasi seperti dalam bentuk jus dan flavanoid merupakan senyawa *fenol* dalam tumbuhan. Banyak manfaat *farmakologi flavanoid* yang berhubungan dengan sistem biologi tubuh manusia seperti dapat menangkal radikal bebas dan logam *kelat* (logam kompleks dengan asam amino), *flavanoid* juga berfungsi sebagai anti *inflamatori*, *antialergi*, dan juga dapat mencegah penyakit *kardiovaskuler* dan *neurodegenerative*.

Flavanoid banyak ditemukan pada buah, sayuran, biji-bijian, kulit batang, akar, bunga, teh, anggur. *Flavanoid* memiliki kemampuan untuk mencegah radikal bebas dan dapat juga menstabilkan ROS yang dapat berikatan dengan radikal bebas penyebab penyakit degeneratif dengan cara menonaktifkan radikal bebas. Ketika ROS bereaksi dengan besi (Fe) maka akan menghasilkan peroksida lipid yang akan memicu radikal bebas maka *Flavanoid* spesifik akan menghilangkan besi sehingga tidak akan menghasilkan radikal bebas.

5.2.2.1 Program Penempatan Pemulihan Pada Teknik Fitomerediasi

Banyak teknologi yang tersedia untuk menempati kinerja pemulihan. Semua penempatan program pemulihan, bagaimanapun, mengikuti baik penahanan kontaminan (juga mengacu sebagai penstabilan) atau pengurangan penahanan (mengacu sebagai strategi pembersih). Pada penahanan kontaminan, ada pengurangan dalam penahanan kontaminan yang dimunculkan, tetapi risiko secara kesehatan dan lingkungan dikurangi untuk tingkatan yang diterima dengan penyelewengan fisika atau kimia dari penempatan tersebut.

Contoh dari teknik strategi dalam kategori ini adalah pembuatan sumbatan, kolong, dan isolasi hidrolis pelindung. Contoh terbaru teknik ini adalah perkembangan metode pemantapan tanah yang tergantung pada perubahan kimia tanah dan pertumbuhan tanaman. Dalam strategi pengurangan kontaminan in-situ termasuk penurunan berdasarkan *bicrobial*, pembilasan tanah, pelubangan tanah, pemanasan dan *elektroosmosis*. Teknik terbaru dalam pengurangan penahanan in-situ adalah strategi desinfeksi berdasarkan tanaman.

5.2.2.2 Tanaman Sebagai Struktur Teknik

Teknik untuk mengatur paradigma tentang agronomis tanaman dan menjelaskan secara rinci konsep dari *Fitoteknologi* kepada peneliti yang paham akan istilah teknik ini berguna untuk menggambarkan dan menjelaskan keberadaan sebuah tanaman. Pada tingkat dasar, tanaman hijau dalam tenaga surya yang dibawa oleh sistem pompa dan sistem pengubah yang mempunyai beban inheren, sifat pengurai, dan kapasitas yang tercemar. Akar tanaman adalah tahapan ekstraktor cairan yang tereksplorasi yang bisa menemukan, mengubah atau memindahkan elemen dan senyawa terhadap gradient kimia yang besar. Permukaan akar mendukung biofilm bakteri dan jamur aktif yang secara signifikan menambah kontak permukaan tanah, kapasitas metabolis, dan bisa mengubah ukuran fisika dan kima dari tanah yang dapat diukur [2].

Bukan sesuatu yang baru jika adanya keterlibatan tanah dengan lingkungan yang mengandung racun. Melalui evolusi, tanaman telah berkembang secara mekanis untuk bertahan hidup dalam lingkungan yang saling bertikai. Tanaman dalam kebanyakan lingkungannya, saling menyerang satu sama lainnya dengan sebuah racun organik dan metalis dan telah

berkembang secara mekanisme untuk beradaptasi, bertahan hidup, bahkan berkembang biak pada kondisi ini. Beberapa tanaman patogen, mikroba tanah, dan gulma menghasilkan beragam senyawa racun, dimana tanaman-tanaman telah berkembang untuk melindungi diri.

Mekanisme hidup yang lebih lama sebelum antropomorfik dari tanah muncul terdapat pada pertumbuhan tanaman yang tanahnya kaya akan logam. Beberapa tanaman berkembang pada mekanisme akar yang menghentikan logam dalam akar dan membatasi pemindahan pada daun tanaman dimana sebuah kerusakan bisa terjadi. Tanaman seperti ini adalah pembuktian yang berguna pada strategi penahanan. Tanaman lainnya telah berkembang dengan baik untuk menyerap, memindahkan, dan menahan kuantitas racun dalam logam berat. Tanaman ini dimulai untuk membuktikan penggunaannya dalam strategi pemulihan pengurangan kontaminan. [2].

5.2.2.4 Pemulihan dengan Kontaminan Penahan

Mengontrol aliran air dalam area polusi sebagaimana aliran dari keluaran air yang tercemar pada zona penahanan merupakan sebuah aspek penting dalam kebijakan penahan. Tanaman-tanaman unggul pada penemuan dan aliran air yang

sedang dialiri telah digunakan tujuannya. Tanaman juga mengontrol erosi tanah dan perpindahan tempat dari kontamina berikutnya). Kebanyakan sumbatan biasanya menggunakan sebuah tutup tanaman. Sebagai tambahannya, tanaman sering digunakan untuk mempertahankan bobot dari saluran dan tanggul [2].

Beberapa kumpulan biji tertentu menyediakan biji dari rumput yang sehat untuk tujuan tertentu. Akar tanaman, khususnya pada daerah yang basah, juga mengurangi konsentrasi ion dan potensi disekeliling akarnya. Dalam penggunaannya, akar tersebut mengubah substrat dan menghentikan perpindahan kontaminan pada air melalui area basah. Kejadian ini dimanfaatkan dalam skema pengurangan limbah air termasuk daerah basah diciptakan sebagaimana pada alang-alang untuk pengobatan. Tanaman juga menyerap tanah bio yang terkontaminan pada akar dan memilih tanaman dengan batasan perpindahan kedalam daun tanaman dalam strategi penahanan digunakan dalam Skema Pemulihan. [2].

5.2.2.5 *Fitoteknologi Pada Tanah yang Terkontaminasi Logam*

Ketersediaan logam dalam kandungan yang terkontaminasi mempengaruhi kemampuan tanaman dalam menyerap logam. Perubahan pada kimia tanah, seperti penurunan pH atau batasan masukan anion kedalam sistem, dapat meningkatkan ketersediaan logam pada akar yang menyerap. Banyak tanaman dapat dibuat untuk membuat tingkatan yang dapat dipertimbangkan pada logam pada beberapa kondisi tanah. Perubahan pada *microbial* dari *rizosfer* (contoh, pada mikrorizae) juga mempunyai pengaruh yang besar (baik positif maupun negatif) pada penyerapan logam dengan akar tanaman). *Fitoteknologi* hanya akan efektif secara ekonomi melalui penggunaan dengan apa yang disebut sebagai *Hiper-akumulator* tanaman. Kondisi ini menjadi konsensus umum peneliti. [2].

Ada tanaman yang melebihi konsentrasi logam pada tanah dengan penyerapan, pemindahan tempat, dan penyimpanan logam dalam kawasan tanpa racun. Banyak tanaman telah berkembang pada tanah yang kaya akan logam. Beberapa jenis tanaman yang mempunyai kemampuan untuk mengumpul sampai dengan 3% (bobot kering) pada logam berat sampai dengan 25% (bobot kering) pada getah/latex

tanpa kerusakan yang jelas adalah hasil penelitian dalam dua dekade terakhir. *Geobotantist* telah meletakkan tipe yang sama pada tanaman dinegara seperti UK, Jerman, Switzerland, Spanyol, Prancis, Italia, Bulgaria, Yunani, Cekoslovakia, Zaire, Filipina, Kaledoina, Selandia Baru, Jepang dan Amerika Serikat. Hal ini mendokumentasikan bahwa penggabungan dari elemen ini tergantung pada tanaman, logam dan kondisi lingkungan. [2].

Daya tahan dan penyerapan yang besar pada konsentrasi yang tinggi terhadap logam dalam dedaunan tanaman telah dituju ke penelitian ini menentukan mekanisme ini. Mekanisme daya tahan termasuk didalamnya penggabungan zink pada dinding sel, nikel bercampur dengan pectin dalam sel besar, nikel, kobal, dan zink dimasukkan pada asam malat; zink dicampurkan dengan pitoselatin, nikel kelasi dengan sitrat, dan kobal dicampurkan dengan kalsium oksalat kristal dalam jaringan tanaman.

Pengetahuan dan pemahaman pada mekanisme daya tahan akan membantu menemukan ciri-ciri genetik yang diperlukan pada perubahan daya tahan logam terhadap tanaman yang mampu secara besar menghasilkan biomassa dan dengan ciri-ciri akan yang lebih dalam. Telah disarankan

bahwa tanah yang terkontaminasi dengan logam bisa didekontaminasi lagi menggunakan tanaman hiperakumulator. Acuan yang menjadi sumber selanjutnya juga menyarankan bahwa dalam beberapa kasus pasa biomassa yang dihasilkan yang kaya akan logam (bio-ore) bias dipakai secara ekonomis. [2].

Berikut ini beberapa penerapan fitomediasi pada berbagai kondisi lahan yang terkontaminasi logam berat, diantaranya:

1. Teknik *Fitoteknologi* dengan *Alnus Firma*

Fitoteknologi dianggap sebagai salah satu cara memperbaiki atau menghilangkan logam berat di alam. *Fitoteknologi* sendiri merupakan proses bioremediasi yang menggunakan berbagai tanaman untuk menghilangkan, memindahkan, dan atau menghancurkan kontaminan dalam tanah dan air bawah tanah. *Alnus firma* dapat bertahan hidup di banyak lokasi pertambangan di Korea. Yang membuat *Alnus firma* sukses menahan stres dalam kondisi cemaran logam berat terletak pada bakteri di akarnya yang mampu beraksi positif dengan logam berat seperti As, Cu, Cd, Ni, Pb, dan Zn.

Cara interaksinya sangat unik yakni, *Alnus firma* menyediakan enzim yang kaya nutrisi untuk mendukung kehidupan mikroba dan mikroba membantu menyerap lingkungan *xenobiotic* yang ada dan mengisolasinya. Simbiosis ini berlangsung seterusnya yang saling menguntungkan kedua belah pihak. Tanaman *Alnus firma* mampu tumbuh baik secara natural di lahan dengan tingkat logam berat yang relatif tinggi [15].

Hal ini didukung oleh isolasi yang dilakukan bakteri *Bacillus thuringiensis* GDB-1 di akar tanaman *Alnus firma*. GDB-1 mengacu pada penamaan selama penelitian, kemudian ditemukan bahwa dalam sampling merupakan bakteri *B. thuringiensis*. Simbiosis antara tanaman ini dan bakteri *rhizosphere* mengisolasi logam berat sekaligus mengurangi tingkat stres tanaman terhadap kehadiran polutan logam berat. Kinerja bakteri ini optimal dalam pH 4-9, pada pH ini kemampuan bakteri berlangsung hingga 90% isolasi logam berat [115].

2. Teknik *Fitoteknologi* pada Lahan Pertambangan

Pencemaran yang sering terjadi yakni di lokasi pertambangan, dimana limbah hasil pertambangan (*tailing*) pasti menghasilkan limbah yang mengandung logam berat.

Pada sebuah kasus pengolahan lahan tercemar yang berada di Iran, lebih tepatnya di pertambangan Angouran. Berdasarkan hasil penelitian diantara 5 tanaman yang diuji sebagai akumulator logam berat di area pertambangan, yakni *Amaranthus retroflexus*, *Polygonum aviculare*, *Gundelia tournefortii*, *Noaea mucronata*, dan *Scariola orientalis*, didapatkan hasil bahwa pada tanah yang tercemar logam berat N [2].

Mucronata adalah tanaman yang paling baik pada penyerapan logam Pb, Zn, Cu, Cd, dan Ni. Sedangkan logam besi (Fe) paling baik diakumulasikan oleh *A. retroflexus*. Pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa *N. mucronata* sanggup mengakumulasi kandungan kadmium 14 mg/Kg.

3. Teknik Fitoteknologi dengan *Eichhornia crassipes*

Eichhornia crassipes merupakan jenis tanaman yang hidup di air yang dikenal sebagai enceng gondok. Adanya peningkatan penyerapan logam berat yang terdapat dalam air. Enceng gondok lebih dulu dibakar hingga membentuk bubuk. Selanjutnya, larutan yang mengandung logam berat dibubuhi oleh bubuk enceng gondok. Optimalisasi dilakukan pada pH 5.0- 6.0 serta dalam suhu 30°C. Penyerapan ini melibatkan pertukaran ion pada larutan, yaitu ion logam berat

yang menyatu pada Enceng Gondok. Analisa dikemukakan dengan bantuan X-ray photoelektron spektroskopi.

4. Teknik *Fitoteknologi* dengan *Paulownia tomentosa*

Paulownia tomentosa dikatakan sebagai tanaman alternatif dalam teknik *Fitoteknologi* yang dapat menyerap logam berat. Tanaman ini termasuk jenis tanaman fitoekstraksi yang memindahkan polutan dari dalam tanah ke area sekitar tanaman atau ke batang tanaman. Ketahanan *P. tomentosa* dalam menahan polutan logam berat tidak terlalu signifikan. Hal ini karena batasan jumlah daun dan diameter batang. Semakin besar tanaman, maka semakin besar pula kemampuan *P. tomentosa* untuk menyerap logam yang terakumulasi dalam tanah [116, 95].

5.2.2.6 *Fitoteknologi* Pada Tanah Organis yang Terkontaminasi

Banyak tanaman hama (jamur, bakteri dan gulma) membuat susunan agen biosida dimana tanaman mengembangkan mekanisme daya tahannya. Tanaman selalu diserang oleh susunan biologi senyawa organis aktif seperti ini. Dengan perkembangan industri pestisida saat ini kita harus memulai untuk menghargai kemampuan metabolisme

pada sistem tanaman. Banyak herbisida yang tergantung pada tanaman yang dipilih pada perbedaan metabolismedan jenisnya. Kemampuan ini adalah jutaan kekuatan dari herbisida yang dipilih untuk dipasaran.

Tanaman yang diinginkan akan memetabolisir pestisida dengan cepat sebesar senyawa tanpa racun, dimana rumput liar dibasmi dengan herbisida ini. Kemampuan metabolisme dari tanaman ini menyebar secara luas, secara pokok dan dapat diindukasikan. Pada strategi pemulihan ini, tanaman menyerap polutan dari tanah dan memetabolisir mereka kedalam materi tanpa racun atau menggabungkan kedalam sebuah komponen sel yang stabil (contoh lignin). Kemampuan tanaman ini untuk mendetoksifikasi senobiotik dikenal secara menyeluruh. Sejalan dengan sistem detoksifikasi mamalia, tanaman telah dijelaskan sebagai *tanaman hidup*

Kemampuan kita secara genetik menumbuhkan tanaman telah meningkat, banyak peneliti memulai penggabungan antara metabolisme gen *prokariotik* dan *eukariotik* kedalam gen tanaman. Menumbuhkan tanaman untuk meningkatkan daya tahan terhadap herbisida yang terdaftar, kemudian meningkatkan penggunaan herbisida pada varietas yang lebih luas dalam kondisi agronomi adalah

target industri akhir-akhir ini. Banyak konsep, teknik, dan gagasan digunakan dalam menghasilkan tanaman dengan metabolisme herbisida yang meningkat yang mungkin juga menemukan kedudukan yang sesuai pada pasaran pemulihan. Hak cipta telah dikeluarkan dalam area ini. Meskipun kemampuan untuk memetabolisir senobiotik, tanaman secara umum berguna dan bukan menghancurkan organisme. Dibandingkan dengan metabolisme mikrobial, tanaman berperan pada jangkauan kecil pada substrat, menampilkan langkah pengurai yang lebih sederhana, dan secara umum tidak mengurangi *senobiotik* kedalam titik akhir.

Hal ini membuat logika dan intuisi menyatu dalam teknik pembangunan dan sifat autotrof dari tanaman dengan kemampuan pengurai mikroba. Salah satu contoh penyusunan tanaman mikroba ada pada daerah disekitar akar dari tanaman (rizofera). Penelitian awal menampilkan hal yang dijanjikan) dan berkesinambungan dengan tulisan lainnya. Co-metabolisme dari polutan yang kecil akan mikrobial substrat terjadi pada zone rizopora aktif secara metabolisme dimana hal ini mencapai 25% dari semua tanaman biomasa bisa dikuliti. Penelitian rizofera akhir-akhir ini termasuk pemilihan tanaman, pola akar, komposisi dari tanaman yang

menghasilkan akar eksudat, penyebabnya pada lingkungan mikrobia dan penyuntikan rizofera dengan kemampuan mikroba pada efisiensi penurunan senobiotik.

Tanaman dan akarnya bisa membuat sebuah lingkungan tanah yang kaya akan aktifitas mikroba, dapat mengubah ketersediaan kontaminan organik atau meningkatkan penurunan pada kontaminan organik tertentu seperti minyak hidrokarbon. Sebuah penurunan dalam jumlah kontaminan minyak hidrokarbon yang dapat dipulihkan sebanyak 80% ketika endapan ditempatkan pada lingkungan yang lebih tinggi, diberi pupuk, dan dipotong pada rumput Bermuda oleh danau endapan yang terkontaminasi dengan minyak *hidrokarbon*.

Dalam mengkaji penggunaan dan *Fitoteknologi* pada tanah yang terkontaminasi, kita harus mengacu pada pembelajaran, perkembangan, dan pencatatan pada pestisida yang digunakan. Menggunakan cara pada ketersediaan, penyerapan, dan aliran dari *xenobiotic* dalam tanaman kita dapat membuat hal umum secara tertentu. Industri pestisida sering berusaha memprediksi nasib dan pengaruh sebuah pestisida dari pengukuran yang dapat dihitung secara sederhana. Salah satu alat ukur yang berguna adalah koefisien sekat air oktanol (K_{ow}).

Kontaminan dengan log Kow (<-1) sangat larut dalam air dan bisa diprediksi menyebabkan pencemaran air tanah tahap system hidrologis atau pola batasan air hujan. Sebagai tambahan, tanaman tidak berkumpul pada senyawa larut air ini pada jangkauan yang melebihi aliran dalam aliran sungai. Senyawa dengan daya larut tinggi diprediksi bergerak pada xylem dan floem tanaman. Dalam beberapa kasus, hal ini bisa mengacu pada penumbukan besar; bagaimanapun, botani, kimia, fisika, dan batasan-batasan perturan menyarankan bahwa senyawa ini akan menyediakan target yang kecil hubungannya pada *Fitoteknologi*.

5.2.2.7 Kebutuhan Penelitian Terkait dengan Fitomerediasi

Penelitian *Fitoteknologi* pada mulanya adalah sebuah rentangan dasar dan penelitian yang digunakan, dibutuhkan untuk membuat teknologi pada sesuatu yang dapat hidup terhadap situs-situs yang bertebaran. Pemahaman terhadap fisiologi, molekul biologi, dan penyerapan kimiawai, perpindahan, daya tahan, dan detoksifikasi dari polutan oleh tanaman diperlukan dalam strategi untuk merancang, memilih dan mengembangkan *Fitoteknologi*.

Fitoteknologi sebagai teknologi stabilisasi tetap membutuhkan masukan dari kimia tanah dan mikrobiologi untuk menentukan hubungan tingkatan dari stabilisasi, menentukan tempat luar dari materi dan menetapkan hubungan risiko terhadap teknik dan tempat pemulihan. Tanaman dengan pemindahan yang dikurangi, ditanaman pada tanah. Pollutan ditetapkan dengan memanipulasi kimia tanah dan *mikrobiologi* untuk diterima sebuah teknik pemulihan pada simpanan selama 50 tahun lamanya. Dalam konteks ini dibutuhkan pekerjaan dengan memantapkan protokol, standar dan teknik penggunaan untuk penelitian, teknik pemulihan dan peraturan kewenangan.

Teknik dekontaminasi dalam menemukan tanaman-tanaman dengan penyerapan logam tinggi, biomassa besar dan daya tahan dalam kesatuan besar pada kondisi lingkungan dan batas-batasannya sangat dibutuhkan oleh peneliti. Meskipun usaha terbaik dalam geobotantis, tanaman ini tidak dapat ditemukan. Tanaman yang ideal membutuhkan perkembangbiakan, pemilihan, atau strategi biologi molekuler untuk dikembangkan. Pada akhirnya, ahli molekul, ahli botani, ahli ilmu tanah, dan ilmuwan tanah akan bersatu untuk mengembangkan sistem *Fitoteknologi* yang dapat digunakan. Usaha bersama pada ahli ini berada pada

lingkungan yang berbeda sebagai ilmuwan perairan dan biologi molecular akan butuhkan untuk mewujudkan keketahanan pada tanaman yang berbasis pemulihan.

Dekontaminasi pada tanah yang terkontaminasi dengan organik membutuhkan pemahaman dasar yang baik terhadap interaksi antara tanaman dan tanah. Disiplin ilmu seperti; biologi, fisiologi, mikrobiologi, *microbial* dan genetik tanaman diperlukan untuk menyelesaikan masalah ini. Fokusnya adalah pada interaksi tanaman dan lingkungan mikrobialnya pada tanah yang terkontaminasi. Perlu usaha ekstra dalam meningkatkan kapasitas pengurai terhadap tanaman pada tahapan awal. Gen pengurai, berkloning dengan sistem prokariotik dan eukariotik mulai untuk dinyatakan dalam jaringan tanaman. Banyak kumpulan kecil kimia pertanian bergabung dengan gen herbisida kedalam plasma nuftah tanaman. Temuan, kloning dan target pengurai gen terhadap kumpulan *pollutant* tidak terlalu jauh diakhir riset. Beberapa dari sistem ini berfungsi sebagai daya tamping, tetapi kebanyakan tidak diuji perannya. Penggunaan sistem enzim simpanan, kofaktor, dan jaringan pengubah tanaman adalah hal yang baik dan banyak berpengaruh pada banyak laboratorium. Struktur tanaman tidak pernah

dioptimalkan pada pemulihan ini. Kedalaman akar, struktur dan kepadatannya diubah untuk meningkatkan keefesienan pengurai. Secara teori, praktek dan pengetahuan yang digunakan telah memantapkan teknik-teknik yang digunakan untuk memecahkan masalah *Fitoteknologi* terhadap tanah yang terkontaminasi.

Perusahaan dan pengalaman pemerintah terhadap pemulihan telah menunjukkan bahwa metode yang digunakan selama ini terhadap permukaan pembersih tanah dari logam dan organik non-volatil sedikit kaku, mahal dan mengganggu secara fisik. *Fitoteknologi* adalah teknologi yang muncul yang menjanjikann sebuah pemulihan hidup ketika polutan; i) dekat dengan permukaan, ii) adanya hubungan dengan tanpa pelindian, dan iii) sedikit berisiko pada kesehatan atau lingkungan. Beberapa polutan telah diremediasi menggunakan tanaman. Para komunitas teknik mempunyai keraguan teknologi *Fitoteknologi*.

Komunitas ilmu tanah, mewajibkan sebuah perusahaan berbasis teknis dan menyarankan tanaman itu benar-benar diambil logamnya, diserap racunnya dan organis detoksifikasi tertentu. Sepasang hiper-akumulasi dari logam dan penurunan yang ditingkatkan atau penyerapan organis dengan biomasa yang lebih besar dan sistem akar yang lebih dalam, akan

menghasilkan teknologi *Fitoteknologi* yang besar yang nantinya akan menyediakan pilihan penulihan yang lebih murah, permanen dan sedikit invasi. Ahli tanaman dan tanah telah mengembangkan teknologi-teknologi yang jika disatukan akan memungkinkan tanaman-tanaman dibuat secara khusus pada *Fitoteknologi* untuk menjadi sesuatu yang nyata dimasa yang akan datang. Teknis, ekonomi, dan peraturan cuaca untuk kesempurnaan penelitian diperlukan guna menyempurnakan keberadaan teknologi ini. Kita meyakini bahwa penggunaan dan perkembangan ilmu pada bidang hubungan lingkungan tanaman adalah hal yang penting dalam perkembangan teknologi *Fitoteknologi*.

5.2.3 Teknologi Bersih dengan Metode AOP (Advance Oxidation Processes)

Saat ini, telah diperkenalkan teknologi bersih pengolahan air limbah, yang lebih dikenal dengan metode AOP (*Advance Oxidation Processes*). Metode ini diperkenalkan pada awal tahun 1990, dan seiring perkembangannya maka AOP ini sudah dapat di aplikasikan di industri dengan kemampuan yang lebih maju dibandingkan dengan metode pengolahan air limbah yang ada. AOP adalah salah satu kombinasi dari beberapa proses seperti *ozon*,

hydrogen peroksida, sinar ultraviolet, titanium oksida, fotokatalis, sonolisis, plasma serta beberapa proses lain yang menghasilkan radikal hidroksil. Kombinasi ozon dan sinar *ultraviolet* sangat potensial untuk mengoksidasi berbagai senyawa organik dan bakteri yang mungkin ada dalam limbah cair [117].

Beberapa teknologi bersih dengan metode AOP (*Advance Oxidation Processes*) diantaranya:

1. Teknologi Bersih

Produksi bersih adalah mengaplikasikan penggunaan teknologi, seni, konsep, dan manajemen untuk mengurangi dampak lingkungan. Produksi bersih mencari dan menerapkan pengurangan sumber limbah, daur ulang dan penggunaan kembali limbah yang dihasilkan oleh dunia industri, memurnikan produk sekunder, meningkatkan citra pemerintah, mengurangi biaya pengelolaan pembuangan limbah.

Dewasa ini penelitian yang terkait dengan AOP meningkat pesat, karena radikan hidroksil tidak hanya memiliki kemampuan untuk menguraikan senyawa senyawa organik, namun sekaligus dapat menghilangkan kandungan senyawa senyawa turunan yang mungkin terbentuk selama

proses oksidasi berlangsung. Hal ini ditunjukkan dengan adanya CO₂ dan H₂O saja sebagai hasil akhir dari proses oksidasi dengan AOP, sehingga air hasil proses AOP ini dapat dipergunakan kembali sebagai air baku dalam proses manufaktur. Sedangkan untuk logam berat yang terkandung di dalam senyawa organik dapat teroksidasi sehingga dapat dengan mudah dilakukan proses pemisahan dari air yang telah diproses. Selanjutnya logam berat tersebut didaur ulang kembali dengan menggunakan proses selanjutnya [117].

Tujuan dari penerapan teknik proses dan produk bersih adalah:

1. Penerapan terpadu terus-menerus dan strategi pencegahan lingkungan untuk proses dan produk bersih guna mengurangi risiko terhadap umat manusia dan lingkungan,
2. Cara penghematan penggunaan bahan baku dan energi, mengurangi toksik dalam bahan baku, dan mengurangi jenis dan jumlah toksisitas emisi,
3. Strategi mengurangi dampak lingkungan melalui siklus hidup dan

4. Menerapkan keahlian, perbaikan teknologi dan mengubah sikap dan perilaku masyarakat.

Pada penerapan teknik teknologi bersih terdapat sikap produksi tradisional. Beberapa perbedaan sikap produksi tradisional maupun produksi bersih dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada produksi tradisional, sumber pencemaran dilakukan dengan penyaringan dan metode perlakuan kimia, fisika, dan biologi. Sedangkan pada produksi bersih, sumber pencemaran dilakukan dengan metode pengurangan sumber limbah di setiap unit produksi dalam sistem produksi.
2. Pada produksi tradisional, evaluasi pencemaran dilakukan jika proses sudah dikembangkan dan timbulnya limbah. Sedangkan pada produksi bersih pencegahan terpadu pencemaran dilakukan sebagai bagian dari proses dan produk bersih.
3. Pada produksi tradisional, pengendalian pencemaran dan perbaikan lingkungan difokuskan pada faktor dampak negatif dunia industri. Sedangkan pada produksi bersih, sumber limbah merupakan sumber daya dan dapat

diproses dengan teknologi menjadi produk barang yang mempunyai nilai ekonomi.

4. Pada produksi tradisional, masalah lingkungan menjadi tugas para ahli, sedangkan pada produksi bersih, masalah lingkungan menjadi beban dan tanggung jawab organisasi.
5. Pada produksi tradisional, perbaikan lingkungan diarahkan dengan menggunakan teknologi dan rekayasa. Pada produksi bersih, perbaikan lingkungan meliputi teknologi, rekayasa dan pendekatan non-teknis.

Metode AOP pada teknik teknologi bersih dengan kombinasi ozon dan sinar ultraviolet memiliki beberapa keunggulan diantaranya adalah [117].

- a. Areal instalasi pengolahan air limbah yang dibutuhkan tidak luas
- b. Waktu pengolahan cepat
- c. Penggunaan bahan kimia sedikit
- d. Penguraian senyawa organik efektif
- e. Keluaran limbah berupa lumpur sedikit
- f. Air hasil pengolahan dapat dipergunakan kembali

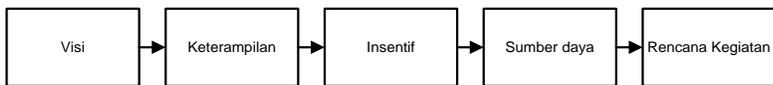
Metode AOP dengan kombinasi ozon dan sinar ultraviolet ini radikal hidroksilnya sangat efektif dalam menghilangkan warna dan bau yang terkandung dalam limbah cair [117].

Perkembangan dunia industri di Indonesia maju pesat dan industri selalu menimbulkan limbah. Mutual dalam produksi bersih, seluruh anggota organisasi baik pimpinan puncak, menengah dan karyawan berkewajiban untuk mengurangi dan menghilangkan limbah yang terjadi. Pada produksi tradisional, sikap terhadap limbah, proses, dan pencemar bersifat reaktif, sedangkan pada produksi bersih modern, sikap terhadap proses, limbah dan pencemar bersifat pro-aktif.

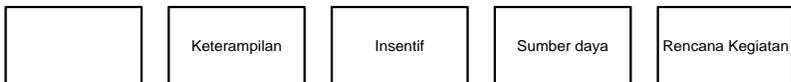
Pada produksi tradisional, perlakuan limbah dilakukan dengan pedoman ujung-pipa (*end of pipe*), sedangkan pada produksi bersih modern, perlakuan limbah dengan pedoman pencegahan limbah, pengendalian dan diminasi limbah pada sumbernya. Pada produksi tradisional, pengendalian kualitas hanya digunakan untuk memenuhi permintaan di pihak konsumen, sedangkan pada produksi bersih modern, pengendalian kualitas dengan *Total Quality Management*, *Continuous Improvement* dan penerapan sistem penjaminan kualitas (*Quality Assurance*) wajib dilakukan.

Perubahan teknologi, sikap, manajemen dapat dilakukan jika organisasi memiliki visi yang jelas, diikuti dengan keterampilan (*skill*), insentif, sumber daya dan rencana kegiatan yang nyata sehingga diperoleh perubahan yang optimal. Sebaliknya, organisasi yang hanya memiliki visi, keterampilan, insentif dan rencana kegiatan namun tidak memiliki sumber daya yang maksimal maka akan muncul keadaan frustrasi bagi seluruh anggota organisasi.

Pada organisasi yang hanya memiliki visi, keterampilan, insentif, sumber daya namun tidak memiliki rencana kegiatan yang nyata, maka pada awal memulai kegiatan akan jatuh dan rencana yang dibuat sulit dilaksanakan di lapangan. Gambaran masalah budaya limbah dalam organisasi terlihat pada Gambar (3-7).



Gambar 3. Menuju perubahan ideal



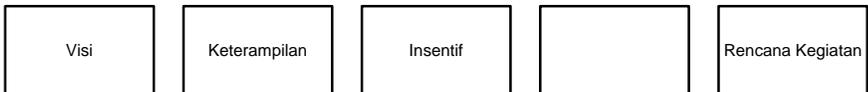
Gambar 4. Tiadanya visi maka rencana kegiatan bingung



Gambar 5. Tiadanya keterampilan terjadi kegelisahan kegiatan



Gambar 6. Tiadanya insentif terjadi perubahan merayap



Gambar 7. Tiadanya sumber daya akan terjadi frustrasi

2. Teknologi Plasma

Berbagai kasus pencemaran limbah beracun berbahaya (B3) dari penambangan minyak di Indonesia, hingga saat ini belum ditangani secara serius. Kasus pencemaran akibat *oil sludge* atau endapan pada tangki penyimpanan minyak industri perminyakan, seperti di Tarakan (Kalimantan Timur), Riau, Sorong (Papua) dan terakhir kasus pencemaran di Indramayu sudah seharusnya menjadi catatan penting bagi para pengelola penambangan minyak akan pentingnya

pengolahan limbah *oil sludge*. Salah satu metode/teknik pengolahan limbah yang banyak diterapkan untuk mengolah limbah adalah teknologi plasma. Plasma tidak hanya dapat mengolah *oil sludge*, tetapi sekaligus dapat mendaur ulang limbah yang umumnya mengandung 40% minyak.

Proses pengolahan dengan plasma ini lebih efektif jika diaplikasikan pada limbah *oil sludge* yang memiliki kandungan hidrokarbon di atas 10% dan selanjutnya kandungan hidrokarbon pada residu yang dihasilkan berkisar dibawah 0,01% dari total hidrokarbon [117].

3. Reverse Osmosis (RO)

Metode Reverse Osmosis (RO) adalah proses pemisahan logam berat oleh membrane semi permeable dengan menggunakan perbedaan tekanan luar dengan tekanan *osmotic* dari limbah. Teknik elektrodialisis menggunakan membran ion selektif permeabel berdasarkan perbedaan potensial antara 2 elektroda yang menyebabkan perpindahan kation dan anion, juga menimbulkan kerugian yakni terbentuknya senyawa logam-hidroksi yang menutupi membran, sedangkan melalui ultrafiltrasi yaitu penyaringan dengan tekanan tinggi melalui membran berpori, juga

merugikan karena menimbulkan banyak *sludge* (lumpur). Resin penukar ion berprinsip pada gaya elektrostatis di mana ion yang terdapat pada resin ditukar oleh ion logam dari limbah. Kelemahan metode ini adalah biaya yang mahal sehingga sulit terjangkau oleh industri di Indonesia [117].

4. Elektrodialisis

Metode elektrodialisis menggunakan membran ion selektif permeable berdasarkan perbedaan potensial antara 2 elektroda yang menyebabkan perpindahan kation dan anion. Kelemahan metode ini adalah terbentuknya senyawa-senyawa logam hidroksi yang menutupi membran [117].

5. Ultrafiltrasi

Metode ultrafiltrasi yaitu penyaringan dengan tekanan tinggi melalui membran berpori. Kelemahan metode ini adalah dapat menimbulkan banyak *sludge*(lumpur).

6. Penukar Ion

Metode ini berprinsip pada gaya elektrostatis di mana ion yang terdapat pada resin ditukar oleh ion logam dari limbah. Kelemahan metode ini adalah biaya sangat besar dan menimbulkan ion yang terremove sebagian [117].

5.2.4 Teknik Biodegradasi dan Bioremediasi

5.2.4.1 Definisi Teknik Bioremediasi

Bioremediasi berasal dari dua asal kata, yaitu bio (organisma hidup) dan remediasi (menyehatkan kembali), sehingga secara bersama diartikan bioremediasi menjadi suatu cara penggunaan organisme dalam upaya penyehatan kembali lingkungan yang sudah rusak atau tercemar. Dalam teknologi ini organisme hidup yang paling banyak digunakan selain tumbuhan adalah mikroorganisme, yang digunakan untuk pemecahan atau degradasi bahan pencemar lingkungan menjadi bentuk yang lebih sederhana dan aman bagi lingkungan. Saat bioremediasi terjadi, enzim-enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme memodifikasi polutan beracun dengan mengubah struktur kimia polutan tersebut, sebuah peristiwa yang disebut biotransformasi [118].

Bioremediasi pada tempat-tempat yang terkontaminasi adalah sebuah usaha yang baru, banyak teknologi yang baru maupun yang telah diubah muncul. Bagaimanapun, penggunaan proses mikoroba menghancurkan bahan kimia baik dengan ide yang baru maupun teknologi yang baru. Proses ini telah digunakan dalam dekade terakhir untuk menghapuskan bahan kimia dari limbah sungai industri yang

mempunyai sistem perawatan biologis untuk anak sungainya, diketahui maupun tidak, kerusakan bahan kimia dari limbah rumah tangga ataupun industri dilakukan dengan sistem perawatan limbah perkotaan. Fakta bahwa banyak senyawa yang tidak hancur juga tidak perlu dalam hasil sebuah *biodegradatif mikroflora*. Sistem ini tidak dioptimalkan pada tujuan-tujuan yang berbeda.

Untuk menurunkan limbah organik kedalam konsentrasi baik yang dapat dideteksi ataupun jika terdeteksi, konsentrasi dibawah batasan yang telah ditetapkan akan aman maupun dapat diterima dengan perantara pengaturan adalah Tujuan dari Bioremediasi. Bioremediasi digunakan untuk menghancurkan bahan kimia dalam tanah, dasar air, air limbah, endapan, sistem limbah industri, dan gas. Daftar senyawa yang memungkinkan penghancuran biologis dengan satu sistem bioremediasi ataupun yang lainnya memakan waktu lama. Karena mereka tersebar luas, kesehatan atau ekologi yang berbahaya, mereka rentan terhadap penghancuran mikroba. Perhatian akan bioremediasi difokuskan pada minyak dan produksi minyak, bensin dan unsur pokoknya, polisiklik aromatik hidrokarbon, klorinatif alipatis seperti TCE dan *tetrakloreotilen* (juga disebut Perklorotilen atau PCE) dan klorinatif aromatik

hidrokarbon. Meskipun mereka tidak biodegraded, unsur baja merupakan bioremediasi karena bisa diubah dan sedikit berbahaya pada mikroorganisme.

Pada banyak kasus, biotransformasi berujung pada biodegradasi, dimana polutan beracun terdegradasi, strukturnya menjadi tidak kompleks, dan akhirnya menjadi metabolit yang tidak berbahaya dan tidak beracun. Bioremediasi merupakan pengembangan dari bidang *Bioteknologi* lingkungan dengan memanfaatkan proses biologi dalam mengendalikan pencemaran atau polutan. Hal yang termasuk dalam polutan antara lain logam-logam berat, petroleum hidrokarbon, dan senyawa-senyawa organik terhalogenasi seperti pestisida, herbisida, dan lain-lain. Bioremediasi mempunyai potensi menjadi salah satu teknologi lingkungan yang bersih, alami, dan paling murah untuk mengantisipasi masalah-masalah lingkungan.

Bioremediasi diartikan sebagai proses pendegradasian bahan organik berbahaya secara biologis menjadi senyawa lain seperti karbondioksida (CO₂), metan, dan air. Ia juga menyatakan bahwa bioremediasi merujuk pada penggunaan secara produktif proses biodegradatif untuk menghilangkan atau mendetoksi polutan (biasanya kontaminan tanah, air dan

sedimen) yang mencemari lingkungan dan mengancam kesehatan masyarakat. Jadi bioremediasi adalah salah satu teknologi alternatif untuk mengatasi masalah lingkungan dengan memanfaatkan bantuan mikroorganisme. Mikroorganisme yang dimaksud adalah khamir, fungi (*mycoremediasi*), yeast, alga dan bakteri yang berfungsi sebagai agen bioremediator [118].

Biodegradasi secara harfiah mengandung pengertian “*degrade*” dengan arti penguraian, dan “*bio*” dengan arti biologi organisme. Biodegradasi dapat diartikan sebagai proses transformasi sebuah substrat menjadi substrat baru melalui reaksi secara biokimia dengan keterlibatan mikroorganisme seperti bakteri, dan jamur dalam prosesnya. Reaksi secara biokimia menitikberatkan pada proses metabolisme dan melibatkan enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme, sehingga disebut juga reaksi enzimatik [199,120].

Bioremediasi secara harfiah mengandung pengertian “*remediate*” dengan arti pemulihan dan “*bio*” artinya hidup. Bioremediasi dengan demikian, diartikan sebagai respon biologis menuju perbaikan substrat pada lingkungan yang telah rusak atau tercemar. Bioremediasi adalah penggunaan organisme yang hidup, utamanya mikroorganisme untuk menguraikan pencemar di lingkungan menjadi bentuk

pencemar yang kurang berbahaya atau tidak berbahaya. Bioremediasi sebagai pemanfaatan potensi metabolik organisme dan enzim yang diproduksinya untuk menguraikan bahan tercemar berbahaya. Pengertian biodegradasi dan bioremediasi memiliki kemiripan karena keduanya melibatkan biologi organisme dalam prosesnya. Namun biodegradasi lebih bertitik berat pada proses yang terjadi, sementara bioremediasi lebih menekankan pada aplikasi dari proses tersebut [121,122,123].

Mikroba lokal (*indigenous*) melakukan proses penguraian senyawa organik dan memanfaatkannya sebagai sumber karbon dan energi. Laju proses degradasi yang sangat bervariasi, tergantung pada jenis dan besarnya populasi mikroba, sifat fisik, dan kimia senyawa organik serta kondisi lingkungan. Proses tersebut terjadi secara alami pada lingkungan yang terkontaminasi tanpa ada campur tangan manusia. Ketika proses tersebut melibatkan intervensi manusia dengan harapan laju biodegradasi dapat dipercepat maka istilah bioremediasi kemudian muncul dan menjadi populer. Bioremediasi juga adalah usaha untuk mengakselerasikan terjadinya penguraian material bersifat

toksik secara alami melalui optimalisasi faktor tumbuh pada kondisi sub optimum [121,125].

Konsep bioremediasi ini kemudian menjadi sebuah metode yang menawarkan proses pemulihan lingkungan tercemar menjadi kembali normal dan aman bagi kehidupan. Sebelumnya, untuk mengembalikan lingkungan tercemar, dilakukan serangkaian operasi dengan metode konvensional, seperti: insinerasi, solidifikasi, desorpsi thermal (*thermal desorption*), dan pencucian. Biaya yang dikeluarkan untuk pemulihan lingkungan tercemar dengan metode konvensional tersebut sangat mahal, untuk insinerasi (975US\$/ m³), solidifikasi (350US\$/m³), desorpsi thermal (125US\$/m³), dan pencucian (237US\$/m³) [124].

Logam berat yang mengkontaminasi di beberapa kawasan di India telah menghabiskan biaya sekitar US \$ 3 Miliar. Di USA, upaya pengembalian lahan yang terkontaminasi telah menghabiskan biaya sebesar US \$ 1,7 Triliun. Haritash dan Kaushik Hidayat, 2017 menyebutkan bahwa metode pemulihan lingkungan terkontaminasi dengan metode konvensional: secara fisik (insinerasi, pencucian), dan kimia (ekstraksi, reaksi kimia, pengenceran). Pada banyak kasus hanya merupakan proses memindahkan pencemar dari satu fase ke fase yang lain (satu tempat ke

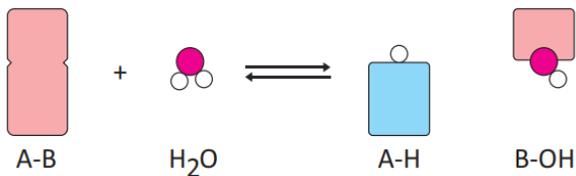
tempat yang lain). Berbeda ketika metode bioremediasi yang dipilih untuk digunakan, metode ini menjadi sangat menarik, terjadi secara alami, ramah lingkungan, dan diterima secara luas oleh masyarakat. Begitu juga biaya yang harus dikeluarkan jauh lebih murah (95US\$/m³) dibandingkan dengan metode konvensional [125].

5.2.4.2 Peran Mikroba dalam Proses Bioremediasi

Proses bioremediasi sangat tergantung pada keberadaan mikroba pengurai. Prosesnya akan terjadi apabila kondisi lingkungan mendukung bagi mikroba pengurai untuk tumbuh dan aktif melakukan proses penguraian. Proses bioremediasi sering terjadi dengan laju penguraian yang sangat lambat dan hanya dengan adanya mikroba yang tepat sehingga proses tersebut terjadi dengan baik. Mikroba pengurai akan memanfaatkan proses metabolismenya, mengkonversi polutan menjadi produk yang menguntungkan atau produk antara (*intermediate*) melalui reaksi kimia organik yang membutuhkan energi aktivasi yang rendah. Keberadaan enzim yang dihasilkan oleh mikroba akan mempercepat terjadinya reaksi karena enzim berfungsi sebagai katalis [125].

5.2.4.3 Degradasi Secara Enzimatik

Enzim adalah biomolekul berupa protein atau glikoprotein yang memiliki paling tidak satu polipeptida. Terdapat daerah aktif pada enzim yang terlibat langsung dan bertanggung jawab dalam proses katalisis. Penamaan enzim dibuat berdasarkan mekanisme reaksi. Tata nama enzim, *Enzymes Commission* (E.C.), dikembangkan oleh *International Union of Biochemistry and Molecular Biology* yang dikelompokkan ke dalam 6 kategori [121]. 1) EC 1 Oksidoreduktase, mengkatalisis reaksi oksidasi atau reduksi; 2) EC 2 Transferase, mentransfer gusur fungsi; 3) EC 3 Hidrolase, mengkatalisis hidrolisis berbagai ikatan; 4) EC 4 *Liase*, memutuskan berbagai ikatan kimia selain melalui hidrolisis dan oksidasi; 5) EC 5 *Isomerase*, mengkatalisis isomerisasi sebuah molekul tunggal; dan 6) EC 6 *Ligase*, menggabungkan dua molekul dengan ikatan kovalen [125].



Gambar 8. Contoh Reaksi Hidrolase

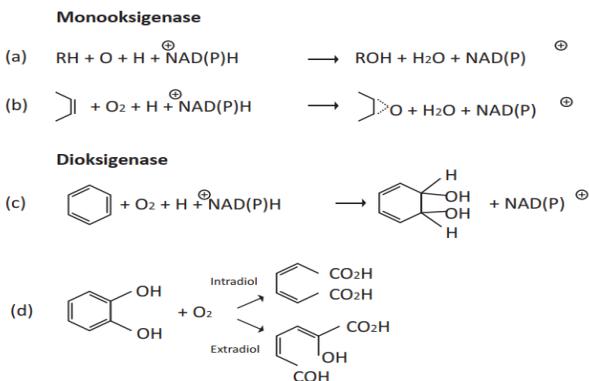
5.2.4.4 Faktor Pembatas Degradasi

Mikroba sebagai agen dalam proses bioremediasi telah banyak ditemukan baik yang bersifat *indigenous* (lokal) atau *exsogenous* (introduksi). Umumnya hanya efektif ketika proses degradasi dilakukan pada skala laboratorium karena kondisi lingkungan dapat dikontrol sepenuhnya. Kebanyakan polutan berada pada lingkungan yang tidak berpihak bagi mikroba pendegradasi. Oleh karena itu, proses bioremediasi harus diawali dengan pemahaman terhadap faktor spesifik yang membatasi terjadi proses degradasi supaya tidak menyebabkan terjadinya proses degradasi yang menyimpang, seperti produk hasil degradasi menjadi lebih toksik dibanding sebelumnya. Ketersediaan mikroba yang tepat adalah senjata utama agar proses bioremediasi dapat berlangsung. Apabila banyak kondisi yang mendukung maka proses degradasi akan berlangsung dengan cepat dibandingkan dengan proses yang terjadi secara alami.

Beberapa faktor penting dalam proses degradasi diuraikan sebagai berikut [125]:

1. Terminal Elektron Akseptor

Tersedianya terminal elektron akseptor, seperti molekul oksigen, nitrat, sulfat, besi, mangan, dan karbon dioksida diperlukan untuk penyediaan energi. Ketika degradasi terjadi pada kondisi oksigen tersedia (aerobik) maka mekanisme degradasi terjadi melalui: 1) molekul O₂ mensuplai satu atom oksigen (monooksigenase), 2) molekul O₂ mensuplai kedua atomnya (dioksigenasi), dan 3) aktivasi oksidase dan peroksidase seperti gambar 9 berikut.



Gambar 9. Contoh Reaksi Oksidoreduktase

Namun ketika oksigen tidak tersedia, degradasi terjadi dengan menggunakan molekul inorganik sebagai elektron akseptor atau dikenal dengan istilah respirasi anaerobik. Sebagai contoh, reduksi terjadi melalui oksidasi *nitrate* → *nitrogen* (atau *nitrous oxide*), *sulfate* → *sulfide*, *carbonate* → *methane*, *fumarate* → *succinate*, *trimethylamine-N-oxide* (TMAO) → *trimethylamine*, atau *dimethylsulfoxide* → *dimethyl sulfide*.

2. Kadar pH Tempat Tumbuh

Kondisi pH di tanah atau air sangat memengaruhi aktivitas mikroba dan laju bioremediasi (Ajoku, Oduola 2013 dalam Hidayat). Kadar pH netral sangat cocok untuk berkembang dan tumbuh subur mikroba. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kisaran pH 6.5–7.5 sangat cocok bagi mikroba pengurai hidrokarbon. Secara spesifik mikroba hanya akan aktif tumbuh pada satu kisaran pH tertentu, seperti: pH asam (*acidophiles*), netral (*neutarophiles*), dan basa (*alkaliphiles*). Lahan terkontaminasi biasanya mengalami perubahan sifat dan karakteristik kimia dari kondisi awalnya.

Perubahan sangat ekstrim sering terjadi di lapangan, pH menjadi sangat asam atau sangat basa. Hal ini mengakibatkan mikroba lokal sangat sulit untuk berkembang sehingga tidak jarang laju degradasi menjadi sangat lambat atau bahkan tidak terjadi. Keadaan pH tanah juga memengaruhi keterlarutan fosfor dan nutrisi lain yang diperlukan oleh mikroba, reaksi biotik kontaminan, dan transformasi unsur berbahaya dalam koloid tanah (pengendapan atau mobilisasi). Perubahan pH juga mengakibatkan polutan pencemar menjadi mudah terjerap kuat pada partikel liat tanah dan proses penguraian menjadi terhambat [125].

3. Suhu Lingkungan Tumbuh

Suhu tempat tumbuh harus berada dalam kondisi yang tepat untuk mendukung kehidupan mikroba pengurai. *Psychrophiles* adalah mikroba yang tumbuh pada suhu dingin ($< 15^{\circ}\text{C}$), *mesophiles* adalah mikroba yang tumbuh pada suhu moderat ($15\text{--}40^{\circ}\text{C}$) dan *thermophiles* adalah mikroba yang tumbuh pada suhu tinggi ($< 80^{\circ}\text{C}$). Degradasi minyak mentah oleh mikroba hampir tidak ditemukan pada suhu di atas 80°C (*hyper thermophiles*), meskipun ada beberapa mikroba yang mampu mengurai polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) pada suhu mendekati 80°C , seperti *Thermus* dan *Bacillus*

bahwa degradasi tumpahan minyak mentah juga ditemukan terjadi pada suhu di bawah 0°C.

Bioremediasi umumnya terjadi pada suhu yang moderat atau sedang. Suhu optimal selama proses degradasi sangat ditentukan oleh sifat dan karakteristik mikroba. Ketika mikroba mengsekresikan enzim peroxidase, dan ketika itu juga, seandainya enzim peroxidase dipercaya sebagai enzim yang paling bertanggung jawab dalam proses penguraian, maka suhu optimal harus dipilih agar enzim tersebut dapat secara optimal bekerja. Degradasi *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR) oleh *Phanerhaeta chrysosporium* terjadi sangat cepat pada suhu 37°C. Meskipun pertumbuhan *P. chrysosporium* relatif sama pada suhu 28°C, namun tidak berlaku untuk laju degradasi yang melibatkan enzim. Contoh lain, enzim lakase yang diisolasi dari *Polyporus sp. S133* mampu mengurai *anthraquinone dyes* sampai dengan suhu 40°C [125].

3. Struktur tanah

Tanah terdiri dari fase padat, cair, dan gas. Fase padat terdiri dari bahan mineral serta organik, dan merupakan porsi terbesar dari volume tanah. Fase cair dan gas berada pada pori-pori tanah yang komposisinya berubah-ubah tergantung

pada musim dan proses pengolahan tanah. Berdasarkan ukurannya, tanah terdiri dari fraksi pasir (2.00–0.05 mm), debu (0.05–0.002), dan liat (<0.002 mm). Jumlah pori-pori yang terisi oleh air dan udara ditentukan oleh komposisi ketiga fraksi tanah tersebut.

Kadar air tanah sangat penting untuk banyak alasan termasuk pertumbuhan mikroba tanah. Air pada tanah dengan fraksi pasir yang tinggi akan mudah menguap. Sementara tanah dengan fraksi liat yang tinggi, mengandung kadar air yang tinggi. Air yang terlalu banyak dan kuat terjepit pada permukaan koloid tanah mengakibatkan jumlah dan populasi mikroba menjadi minimal [125].

Polutan yang sulit terurai akan mengalami proses perpindahan massa yang rumit melalui kombinasi difusi, enkapsulasi, dan adsorpsi. Gabungan dari proses tersebut lebih dikenal dengan proses penjerapan polutan ke permukaan partikel tanah. Semakin lama polutan berada di dalam tanah, maka mereka akan sulit diakses oleh mikroba. Kompleksitas penyerapan polutan ditentukan oleh tekstur tanah, kandungan bahan organik, sifat polutan, dan lamanya waktu polutan tercecer [125].

4. Air dan Kelembapan Tanah

Air sangat diperlukan oleh mikroba sebagai media asupan oksigen terlarut dan ion mineral. Air yang mengandung ion garam dalam jumlah yang banyak akan menghambat pertumbuhan populasi mikroba, dan mengakibatkan turunnya laju degradasi. Pada kondisi di mana kandungan garam dilarutan tanah cukup tinggi, maka pemilihan jenis mikroba harus disesuaikan, yaitu dengan memilih mikroba yang sangat tahan dan membutuhkan garam untuk hidupnya (*halophilic*). Kelembapan akan memengaruhi laju penguapan, kandungan air tersedia dan pertumbuhan mikroba. Pada kondisi di mana kelembapan udara berkisar 60–90%, dengan kandungan air tanah 23,1%, masih dimungkinkan bagi mikroba untuk mendegradasi ceceran minyak dari konsentrasi awal 5000 ppm menjadi 500 ppm selama 30 hari.

5. Nutrisi

Secara umum komposisi sel mikroba terdiri karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), belerang (S), besi (Fe), kalsium (Ca), magnesium (Mg) dan klorida (Cl) dengan rasio rata-rata 50% C: 14% N: 3% P: 2% K: 1% S: 0.2% Fe: 0,5% Ca, Mg, dan Cl. Unsur-unsur tersebut berada dalam molekul

yang berbeda dan secara alamiah terdistribusi untuk semua jenis kehidupan dalam sebuah ekosistem. Keragaman metabolisme yang ada dalam mikroba memastikan bahwa unsur-unsur tersebut tersedia dalam bentuk yang tepat. Apabila salah satu unsur tidak tersedia maka keadaan tersebut akan membatasi pertumbuhan mikroba dan menyebabkan laju penguraian menjadi lambat [126].

6. Bioavailabilitas

Proses biodegradasi sangat tergantung dari aksesibilitas dan bioavailabilitas polutan. Sebagian besar polutan memiliki sifat kelarutan dalam air yang sangat rendah. Bioavailabilitas mereka ditentukan oleh sifat senyawa pencemar, tipe tanah, kandungan air, temperatur, dan faktor lain. Ketika polutan masuk ke dalam tanah, polutan akan terikat dalam bahan organik dan mineral tanah (fase padat) melalui proses fisika dan kimia. Bioavailabilitas terjadi ketika polutan yang terikat dalam tanah dapat dilepas atau dipindahkan ke dalam sel mikroba melalui proses difusi polutan dari agregat tanah. Apabila proses perpindahan tersebut sangat lambat maka proses degradasi juga akan terhambat.

Selanjutnya sifat polutan yang memiliki nilai kelarutan dalam air yang rendah akan menyebabkan proses degradasi

menjadi terbatas. Mikroba harus berusaha menjadikan polutan cukup tersedia untuk diakses dan diurai melalui penambahan surfaktan (diintroduksi atau diproduksi sendiri oleh mikroba). Surfaktan adalah molekul yang memiliki gugus polar (bersifat hidrofilik) dan gugus non-polar (bersifat lipofilik). Kedua gugus ini membantu mengurangi tegangan permukaan dan interspasial (ruang antara) sehingga kelarutan polutan dalam air meningkat. Surfaktan akan efektif bila konsentrasinya mendekati titik *critical micelle concentration* (CMC). Konsentrasi surfaktan yang berlebihan tidak langsung berkorelasi positif dengan penurunan tegangan permukaan. Surfaktan juga berfungsi sebagai pemicu dalam produksi enzim, sumber karbon dan energi alternatif untuk mikroba.

7. Keberadaan Senyawa Lain yang Bersifat Toksik

Tanah yang terkontaminasi polutan biasanya mengandung kombinasi beberapa senyawa organik, baik yang secara alami sudah tersedia (melalui pembusukan) maupun yang berasal dari aktifitas manusia (penambahan). Ketika campuran bahan organik tersebut tersedia, mikroba akan beraksi secara selektif. Mereka akan mengurai terlebih dahulu senyawa organik yang paling disukai. Senyawa

organik yang lainnya akan diabaikan untuk sementara. Kondisi ini disebut dengan fenomena “*diauxy*” dan berimplikasi serius pada proses degradasi senyawa/substrat/polutan yang ditargetkan.

Kandungan polutan yang terlalu rendah menyebabkan bioavailabilitas bahan pencemar menurun. Sebaliknya bila konsentrasi polutan tinggi, bahan pencemar tersebut menjadi sangat toksik. Pada kondisi ini, proses penguraian akan terhambat. Pada beberapa kasus, senyawa produk antara (*intermediate*) yang dihasilkan selama proses degradasi dapat bersifat lebih toksik atau dapat juga bersifat menguntungkan, misalnya pada kasus *chlorinated phenols* menjadi *chlorocatechols* (bersifat lebih toksik) dan pada kasus *vinyl chloride* menjadi *trichloroethylene* (bersifat lebih mudah terurai).

5.2.4.5 Tipe atau Teknik Bioremediasi

Penerapan aplikasi bioremediasi untuk memulihkan lingkungan terkontaminasi dapat dilakukan dengan beberapa teknik atau tipe bioremediasi. Teknik bioremediasi selalu mengalami perubahan, perkembangan, dan perbaikan sehingga informasi yang akan dijelaskan pada bagian ini akan

memiliki keterbatasan dalam hal keterbaruan. Berikut tipe dan teknik bioremediasi diantaranya [121]:

1. Bioremediasi *In-situ*

Teknik bioremediasi secara *in-situ* umumnya terdiri dari upaya penambahan dan tanpa penambahan perlakuan (instrinsik). Kedua teknik bioremediasi *in-situ* ini benar-benar mengandalkan proses penguraian kontaminan secara alamiah tanpa dan atau dengan penambahan stimulan (biostimulasi). Laju dan lama waktu proses penguraian sangat ditentukan oleh jenis, konsentrasi kontaminan, dan karakterisasi lingkungan. Ketika teknik bioremediasi ini dipilih maka proses evaluasi dan pemantauan harus dilakukan untuk memastikan bahwa mayoritas proses penguraian terjadi secara biologis dan benar adanya. Pengambilan sampel untuk tujuan pengujian, evaluasi, dan monitoring pada proses penguraian dilakukan dengan mempertimbangkan alat analisis yang paling tepat agar dapat memperkecil bias dan mewakili heterogenitas populasinya.

a. Bioremediasi Intrinsik

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa bioremediasi intrinsik sangat bergantung terhadap proses penguraian secara alami tanpa menambahkan sedikit pun stimulan. Teknik bioremediasi ini dikendalikan dengan cara memantau proses penguraian untuk memastikan bahwa proses bioremediasi masih berlangsung. Bioremediasi intrinsik biasanya dilakukan pada lokasi di mana laju penguraian terjadi lebih besar daripada laju perpindahan kontaminan ke tempat lain. Proses yang terjadi secara alami ini tidak hanya terbatas pada proses bioremediasi (reaksi biologis) tetapi juga pada proses lain, meliputi pengenceran, dispersi, penyerapan, penguapan, reaksi kimia seperti oksidasi, reduksi, dan stabilisasi.

Sebelum aplikasi bioremediasi intrinsik dilakukan, penilaian secara menyeluruh terhadap proses tadi perlu dan wajib dilakukan sebagai dasar pengembangan model atau disain. Penerapannya harus dilakukan secara hati-hati, baik monitoring maupun pengendalian sehingga konsentrasi kontaminan benar benar berada pada batas ambang yang aman bagi manusia dan lingkungan. Proses monitoring memerlukan rentang waktu yang cukup lama, dan lebih mahal dibandingkan dengan proses bioremediasi yang

dilakukan secara aktif. Kegagalan proses bioremediasi intrinsik ini harus dapat dihindari, seperti terbentuknya produk pengurai berupa senyawa yang lebih beracun.

b. Bioremediasi Biostimulasi

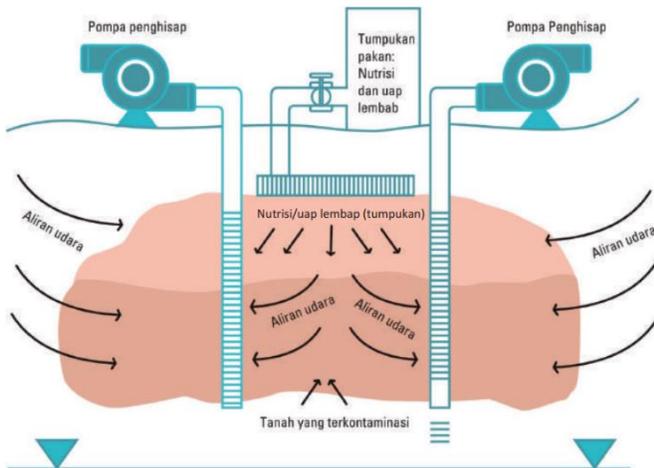
Peningkatan laju penguraian dengan cara penambahan stimulan untuk memodifikasi lingkungan dan meminimalisasi faktor pembatas disebut dengan bioremediasi biostimulasi. Stimulasi harus mampu mengaktifkan mikroba lokal (*indigenous*) sebagai agen pengurai. Bioremediasi ini biasanya diaplikasikan di zona vedosa tanah, air tanah, dan sedimen.

2. Bioremediasi pada Zona Vedosa Tanah

Zona tanah yang berada di antara permukaan tanah dan muka air tanah disebut zona vedosa. Zona ini bersifat penting untuk menahan pergerakan pencemar ke dalam air tanah. Pergerakan pencemar pada zona vedosa ditentukan oleh sifat, karakteristik fisik, dan kimia tanah serta jenis pencemar. Pada saat kontaminan berada dalam zona ini, aktivitas biologis sangat miskin. Penambahan perlakuan atau stimulasi dilakukan untuk mengaktifkan baik mikroba aerobik dan juga

anaerobik. Teknologi yang umum digunakan adalah *bioventing* [127].

Berdasarkan pemberian stimulan, *bioventing* dipisahkan menjadi *bioventing* aerobik (suplai oksigen dan nutrisi), *bioventing* anaerobik (tanpa suplai oksigen, penambahan nutrisi, dan donor elektron), dan *bioventing* ko-metabolik (penambahan substrat organik, seperti *propane*). Gambar 10 menggambarkan contoh teknik *bioventing* secara umum.

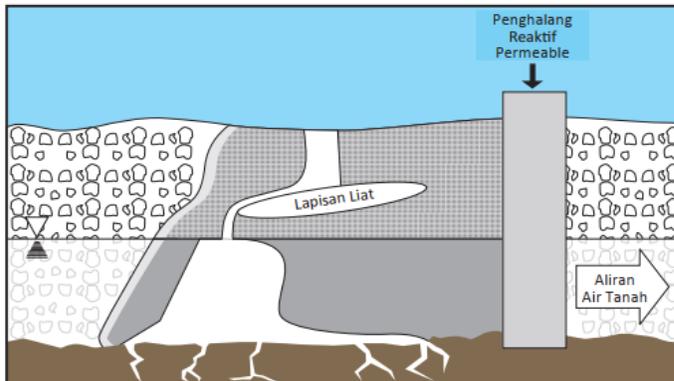


Gambar 10. Teknik Bioremediasi dengan *Bioventing*

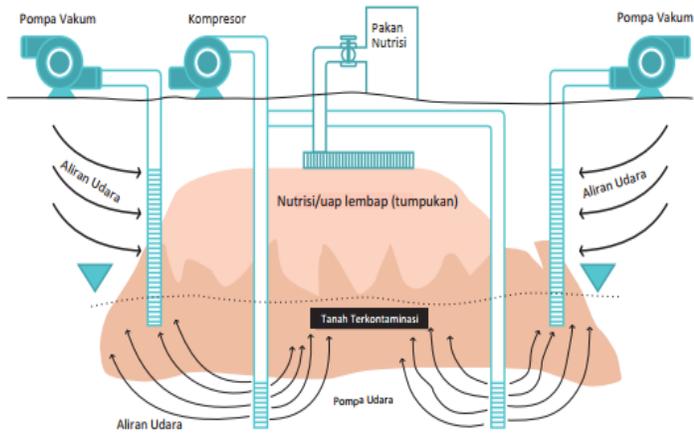
3. Bioremediasi pada Air Tanah dan Zona Tanah Jenuh

Aplikasi bioremediasi pada zona ini dapat dilakukan dengan membuat penghalang reaktif biologi, *biosparging*, dan *bioslurping*. Penghalang reaktif biologis terletak pada zona tertentu yang aktif melakukan proses bioremediasi, memanfaatkan mikroba aerobik dan anaerobik. Materi penghalang tersusun atas campuran pasir, nutrisi (bahan organik seperti pupuk kandang, kompos), dan materi lain yang bersifat oksidator atau reduktor.

Kontaminasi akan terurai ketika air tanah melewati dan terperangkap dalam penghalang reaktif biologis seperti gambar 11 dan gambar 12 berikut.



Gambar 11. Teknik bioremediasi dengan penghalang reaktif biologis

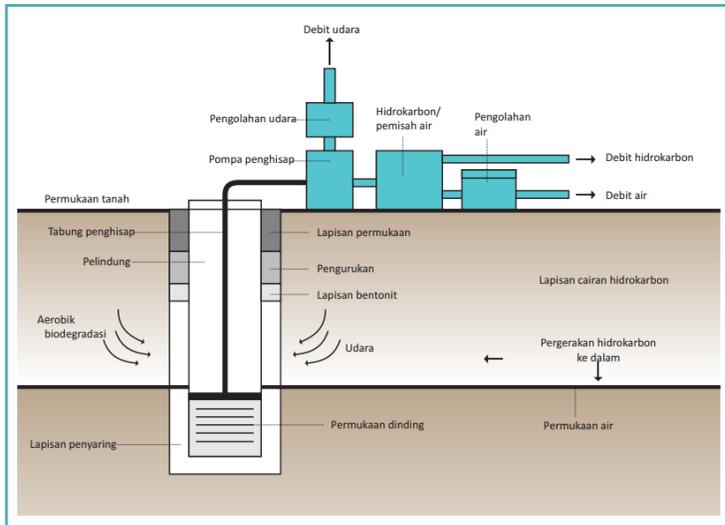


Gambar 12. Teknik bioremediasi dengan *biosparging*

Biosparging melibatkan injeksi gas (baca: oksigen) ke dalam air tanah. Injeksi juga terkadang dikombinasikan dengan penambahan beberapa nutrisi. Mikroba akan menjadi aktif dan laju penguraian meningkat. Melalui teknik ini kontak antara tanah dan air tanah akan meningkat.

Bioslurping merupakan penggabungan teknik *bioventing* dan vakum. Teknik ini sangat cocok digunakan untuk jenis senyawa kontaminan yang mengapung di atas permukaan air dan mudah menguap. *Bioventing* merangsang mikroba areobik tanah menjadi aktif, sementara vakum akan menghisap uap (kontaminan yang mudah menguap) menuju sebuah perangkat atau pemisah. Penghisapan ini mampu

meningkatkan aerasi dalam tanah sehingga proses penguraian secara aerobik dapat meningkat. Keterbatasan yang menonjol dari teknik ini adalah aplikasinya yang terbatas sampai kedalaman 25 meter.



Gambar 13. Teknik Bioremediasi dengan *Bioslurping*

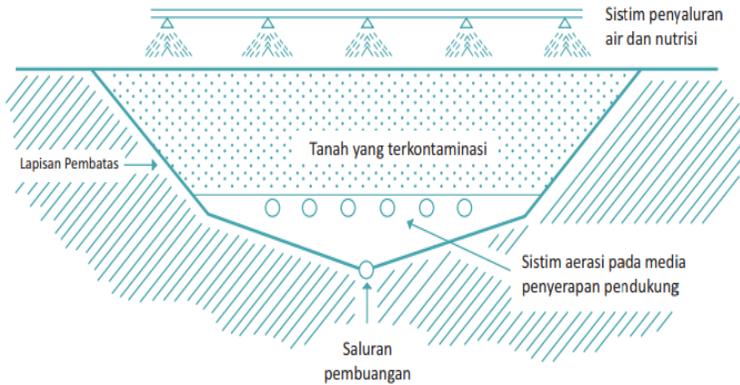
4. Bioremediasi *Ek-situ*

Melalui bioremediasi *ek-situ*, matriks yang terkontaminasi harus dipisahkan dan diangkut ke tempat lain. Di tempat yang baru ini, beberapa perlakuan diberikan. Bioremediasi *ek-situ* yang dikembangkan sangat tergantung dari matriks yang terkontaminasi, apakah berupa tanah,

campuran antara air dan tanah (*slurry*) serta air. Uraian di bawah akan difokuskan pada pembahasan tentang teknik bioremediasi *ek-situ* pada matriks tanah. Tiga teknik bioremediasi *eksitu* yang umum digunakan untuk tanah yang terkontaminasi adalah *landfarming*, *composting*, dan *biopiles*.

a. *Landfarming*

Landfarming atau juga disebut mekanisme pengolahan tanah mengandalkan mikroba aerobik sebagai agen pengurai. Teknik ini sangat cocok untuk penguraian jenis senyawa kontaminan yang memiliki sifat fisika tidak mudah menguap. Pengolahan tanah dilakukan secara periodik dengan harapan agar mikroba aerobik secara aktif hidup dan melimpah. Perlakuan berupa pengendalian kelembapan, penambahan nutrisi, dan stabilisasi pH diperlukan untuk memfasilitasi tumbuh serta berkembangnya mikroba lokal. Teknik ini merupakan teknik bioremediasi yang paling mudah. Meskipun teknik ini diuraikan pada bagian bioremediasi *ek-situ*, tetapi aplikasi teknik ini dapat diaplikasikan secara *in-situ*.



Gambar 14. Teknik Bioremediasi dengan *Landfarming*

Mekanisme pengolahan tanah dan pemberian perlakuan sangat bergantung dari jumlah dan tipe senyawa kontaminan. Apabila kontaminan memiliki sifat mudah terurai maka teknik ini sangat cocok untuk diaplikasikan. Ketika kontaminan memiliki sifat yang lebih sulit terurai, seperti PAH, pestisida, atau senyawa organik terklorinasi maka pengujian awal perlu dilakukan untuk menverifikasi dan menentukan teknik pengolahan yang paling sesuai. *Landfarming* hanya mampu mengurai kontaminan yang berada pada kedalaman 10–35 cm di atas permukaan tanah.

b. Composting (Pengomposan)

Composting adalah teknik bioremediasi dengan mengkombinasikan tanah tercemar dengan limbah organik yang tidak berbahaya (*bulk agents*), meliputi: limbah pertanian, serasah, jerami, kayu, dan lain-lain. Selama proses pengomposan terjadi, populasi dan jenis mikroba sangat dinamik untuk berubah. Hal ini dikarenakan proses pengomposan terjadi melalui 3 tahap, yaitu mesofilik, termofilik, dan tahap akhir (maturasi). Pada saat awal proses *composting*, bakteri mesofilik sangat dominan dan setelah suhu mencapai lebih dari 40°C, bakteri termofilik dan jamur muncul. Pada saat suhu mencapai 60°C maka aktivitas mikroba akan menurun dan saat suhu kembali normal (baca dingin) mesofilik mikroba kembali aktif.

c. Biopiles

Biopiles dapat dikatakan sebagai teknik bioremediasi yang merupakan perbaikan dari teknik *landfarming* dan *composting*. Pipa-pipa disetting sedemikian rupa pada tumpukan kontaminan sehingga aerasi menjadi meningkat. Dengan demikian *indigenous* mikroba terstimulasi untuk tumbuh secara aktif. *Biopiles* sangat cocok diaplikasikan di mana kontaminan berada pada lapisan atas. Pipa aerasi

ditempatkan pada kedalaman 2–3 meter, sementara tanah terkontaminasi berada di atasnya. Laju aliran udara yang diberikan harus diatur untuk mengoptimalkan proses degradasi dan mencegah terjadinya penguapan. Jika konsentrasi kontaminan banyak (tinggi) dan mudah menguap, tanah terkontaminasi harus ditutup rapat. Mikroba yang hadir adalah mesofilik, bekerja pada suhu antara 10–45°C.

5.2.4.6 Kelebihan dan Kekurangan Teknik Bioremediasi

Keuntungan dan kelebihan teknik bioremediasi jika dibandingkan dengan teknik lain, sebagai berikut [125]:

5.2.4.6.1 Keuntungan

Keuntungan dari penerapan teknik bioremediasi pada penanggulangan cemaran logam berat pada lingkungan antara lain:

1. Proses penguraian terjadi secara alami. Populasi mikroba akan meningkat ketika proses penguraian terjadi dan akan menurun ketika proses penguraian selesai. Produk akhir penguraian adalah senyawa yang aman, berupa air dan CO₂.

2. Bioremediasi adalah metode sederhana dan mudah diaplikasikan untuk menguraikan secara permanen berbagai macam tipe kontaminan. Merubah senyawa berbahaya menjadi senyawa yang kurang atau tidak berbahaya. Bukan merupakan proses memindahkan kontaminan dari fase atau matriks.
3. Dapat dilakukan pada lokasi terjadinya pencemaran (*in-situ*), dan tidak menyebabkan kerusakan lain yang lebih parah.
4. Teknologi dengan biaya yang sangat murah, 10 kali lebih murah dibandingkan secara fisika dan kimia.
5. Fleksibel, dan cocok bila dikombinasikan dengan berbagai macam perlakuan dan teknologi lain.
6. Ramah lingkungan (*Environmental friendly*) dan diterima secara luas.

5.2.4.6.2 Kekurangan

Adapun kekurangan dari penerapan teknik bioremediasi pada penanggulangan cemaran logam berat pada lingkungan antara lain:

1. Sangat dibatasi oleh tipe kontaminan yang sulit terurai dan proses penguraian terkadang berjalan lambat.

2. Beberapa hasil penguraian menghasilkan bahan dengan toksisitas yang lebih berbahaya dibanding dengan senyawa awalnya.
3. Memerlukan penanganan yang khusus dan *rijid*. Beberapa faktor perlu dipertimbangkan agar proses penguraian benar-benar berjalan dengan baik. Hasilnya sulit diprediksi atau diinterpolasi. Perlu monitoring evaluasi yang matang dan reguler yang dapat dipertanggungjawabkan.
4. Perencanaan yang matang untuk aplikasi bioremediasi dimulai dari identifikasi tipe kontaminan, lingkungan, ketersediaan mikroba lokal, bioavailabilitas, dan biodegradabilitas. Perencanaan dibuat didasarkan dari hasil penelitian awal baik pada skala laboratorium dan juga projek pilot. Tidak ada konsistensi hasil yang diperoleh dari uji coba laboratorium, pilot, dan lapangan. Aplikasi di lokasi tertentu mungkin saja tidak bisa diaplikasikan pada lokasi lain sehingga membutuhkan kajian ulang.
5. Membutuhkan waktu yang relatif lebih lama jika dibandingkan dengan teknologi lain.

6. Belum adanya regulasi yang dapat diterima untuk menetapkan kriteria bioremediasi secara menyeluruh. Persepsi tentang sebuah teknologi baru (baca: belum teruji keberadaannya) mungkin saja memengaruhi pemilihan teknik bioremediasi.

BAB 6

PENURUNAN TINGKAT PENCEMARAN LOGAM BERAT

Pada bab ini akan diuraikan berbagai penelitian yang penulis lakukan berkaitan dengan penurunan tingkat pencemaran merkuri (Hg), Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) dengan beberapa media tanaman dan bongkahan bekas bangunan. Beberapa tanaman itu adalah kiambang (*Salvinia molesta*), enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan kayu apu (*Pistia stratiotes*), sebagaimana diuraikan pada sub bab selanjutnya.

6.1. Penurunan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) Pada Kondisi Air Tergenang

Penelitian pertama dilakukan menggunakan metode eksperimen pada kondisi air tergenang dengan skala laboratorium untuk menguji kemampuan tiga tanaman air sebagai agen *Fitoteknologi* yaitu kiambang (*Salvinia molesta*), enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dan kayu

apu (*Pistia stratiotes*) untuk menurunkan pencemaran logam berat merkuri (Hg) [128, 129]. Kadar merkuri (Hg) yang diuji untuk diturunkan melalui perlakuan *Fitoteknologi* dengan ketiga tanaman adalah lima tingkat konsentrasi yaitu 0.02 mg/L, 0.04 mg/L, 0.06 mg/L, 0.08 mg/L dan 0,1 mg/L.

Tahapan berikut memasukkan larutan logam berat kedalam *box* plastik berukuran 80 x 54 x 50 cm sesuai dengan tinggi permukaan air yang diinginkan yaitu 20 cm. Pengamatan dilakukan setiap lima (5) hari sampai konsentrasi Hg di dalam air tersebut mencapai baku mutu untuk irigasi yaitu 0.005 mg/L. Setiap akan dilakukan pengambilan sampel air maka tinggi air dalam ember diusahakan seperti keadaan awal yaitu 20 cm. Pengamatan selesai jika penurunan konsentrasi logam berat telah berada pada baku air untuk pertanian atau kelas IV.

Metode analisis yang digunakan untuk analisis konsentrasi logam Hg adalah metode absorpsi dengan menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS).

Hasil Analisis

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,02 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L

No.	Hari ke	Kiambang	Kayu Apu	Enceng Gondok
		(mg/L)		
1.	0	0.020	0.020	0.020
2.	5	0.018	0.018	0.016
3.	10	0.010	0.008	0.007
4.	15	0.005	0.005	0.001

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 9 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian dengan konsentrasi awal Hg 0,02 mg/L. Untuk semua perlakuan baku mutu tercapai setelah pengambilan sampel hari ke-15. Pada perlakuan dengan kiambang dan kayu apu pada hari ke-15 konsentrasi Hg yang

tertinggal dalam larutan tepat pada batas baku mutu kualitas air untuk pertanian yaitu 0,005 mg/L. Pada perlakuan dengan tanaman enceng gondok pada hari ke-15 konsentrasi Hg di wadah penelitian hanya tersisa 0,001 mg/L atau sudah jauh berada dibawah batas kualitas air untuk pertanian.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuti (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,04 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,04 mg/L

No.	Hari ke	Kiambang	Kayu Apu	Enceng Gondok
		(mg/L)		
1.	0	0.040	0.040	0.040
2.	5	0.032	0.032	0.028
3.	10	0.021	0.021	0.019
4.	15	0.011	0.011	0.009
5.	20	0.005	0.004	0.004

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 10 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,04 mg/L. Untuk semua perlakuan baku mutu tercapai setelah pengambilan sampel hari ke-20. Pada perlakuan dengan kiambang pada hari ke-20 konsentrasi Hg yang tertinggal dalam larutan tepat pada batas baku mutu kualitas air untuk pertanian yaitu 0,005 mg/L. Pada perlakuan dengan tanaman kayu apu dan enceng gondok pada hari ke-20 konsentrasi Hg di wadah penelitian hanya tersisa 0,004 mg/L atau sudah berada dibawah batas kualitas air untuk pertanian.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,06 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,06 mg/L

No.	Hari ke	Kiambang	Kayu Apu	Enceng Gondok
		(mg/L)		
1.	0	0.060	0.060	0.060
2.	5	0.049	0.049	0.048
3.	10	0.040	0.037	0.036
4.	15	0.019	0.019	0.018
5.	20	0.008	0.008	0.007
6.	25	0.005	0.004	0.001

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 11 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,06 mg/L. Untuk semua perlakuan baku mutu tercapai setelah pengambilan sampel hari ke-25. Pada perlakuan dengan kiambang pada hari ke-25 konsentrasi Hg yang tertinggal dalam larutan tepat pada batas baku mutu kualitas air untuk pertanian yaitu 0,005 mg/L. Pada perlakuan dengan tanaman kayu apu dan enceng gondok pada hari ke-25 konsentrasi Hg

di wadah penelitian hanya tersisa 0,004 mg/L dan 0,001 mg/L atau sudah berada dibawah batas kualitas air untuk pertanian.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuti (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,08 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,08 mg/L

No.	Hari ke	Kiambang	Kayu Apu	Enceng Gondok
		(mg/L)		
1.	0	0.080	0.080	0.080
2.	5	0.075	0.069	0.068
3.	10	0.060	0.059	0.053
4.	15	0.060	0.060	0.054
5.	20	0.042	0.040	0.032
6.	25	0.014	0.012	0.009
7.	30	0.005	0.003	0.001

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 12 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,08 mg/L. Untuk semua perlakuan baku mutu tercapai setelah pengambilan sampel hari ke-30. Pada perlakuan dengan kiambang pada hari ke-30 konsentrasi Hg yang tertinggal dalam larutan tepat pada batas baku mutu kualitas air untuk pertanian yaitu 0,005 mg/L. Pada perlakuan dengan tanaman kayu apu dan enceng gondok pada hari ke-30 konsentrasi Hg di wadah penelitian hanya tersisa 0,003 mg/L dan 0,001 mg/L atau sudah berada dibawah batas kualitas air untuk pertanian.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,1 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,1mg/L

No.	Hari ke	Kiambang	Kayu Apu	Enceng Gondok
		(mg/L)		
1.	0	0.100	0.100	0.100
2.	5	0.084	0.083	0.080
3.	10	0.075	0.073	0.069
4.	15	0.075	0.073	0.069
5.	20	0.057	0.052	0.049
6.	25	0.032	0.031	0.029
7.	30	0.015	0.015	0.013
8.	35	0.003	0.002	0.002

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 13 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,1 mg/L atau konsentrasi perlakuan tertinggi diantara perlakuan yang lain. Untuk semua perlakuan baku mutu tercapai setelah pengambilan sampel hari ke-35, bahkan konsentrasi merkuri (Hg) sudah berada dibawah baku mutu kualitas air untuk

pertanian. Pada perlakuan dengan tanaman kiambang, kayu apu dan enceng gondok pada hari ke-35 konsentrasi Hg di wadah penelitian hanya tersisa 0,003 mg/L, sedangkan untuk perlakuan tanaman kayu apu dan enceng gondok konsentrasi merkuri (Hg) hanya tersisa 0,002 mg/L dalam larutan.

Berdasarkan hasil data penelitian dari Tabel 9 sampai dengan Tabel 13, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Ketiga tanaman air yang digunakan yaitu Kiambang (*Salvinia molesta*), Kayu Apu (*Pistia stratiotes*) dan Enceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) dapat menurunkan konsentrasi logam berat Hg sampai tercapai baku mutu kualitas air untuk pertanian.
2. Perlakuan dengan tanaman Enceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan yang tercepat dalam menurunkan konsentrasi merkuri sampai mencapai baku mutu kualitas air untuk pertanian dengan berbagai tingkat konsentrasi awal perlakuan mulai dari 0.02 mg/L sampai 0,1 mg/L.
3. Untuk konsentrasi awal perlakuan 0,02 mg/L, perlakuan dengan Enceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) membutuhkan waktu sekitar 11,67 hari untuk mencapai baku mutu kualitas air untuk pertanian (0,005 mg/L),

sedangkan untuk konsentrasi awal tertinggi 0,1 mg/L baku mutu kualitas air untuk pertanian tercapai pada hari ke-33,64.

6.2. Penurunan Tingkat Pencemaran Merkuri Pada Kondisi Air Mengalir

Penelitian kedua ini dilakukan untuk melihat kemampuan tanaman air enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dengan berbagai konsentrasi merkuri (Hg) menggunakan mekanisme secara *continue batch reaktor*. Percobaan dilakukan dengan pola aliran *horizontal subsurface flow* untuk menentukan penurunan konsentrasi logam berat merkuri (Hg) pada kondisi terbaik dari variasi konsentrasi merkuri [130]. Air yang diperlakukan untuk dipulihkan terdiri dari lima tingkatan konsentrasi merkuri (Hg) yaitu 0.02 mg/L, 0.04 mg/L, 0.06 mg/L, 0.08 mg/L dan 0.1 mg/L

Reaktor digunakan sebanyak 15 buah, dengan fungsi reaktor mengalirkan lima konsentrasi yang berbeda dengan tiga kali ulangan. Semua reaktor ditanami enceng gondok. Ukuran reaktor 70 cm x 60 m x 40 cm dan terbagi dari 3 ruang. Ruang pertama berukuran 15 cm x 60 cm x 40 cm, yang berfungsi sebagai *inlet* bertujuan untuk menjaga aliran

laminer, ruang kedua sebagai ruang sebagai ruang proses dengan ukuran 40 cm x 60 cm x 30 cm, dan ruang *outlet* yang berfungsi untuk menampung air hasil proses sebelum dikeluarkan melalui keran *outlet*.

Reaktor yang digunakan berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pengolahan larutan yang tersusun atas media filter dan dilengkapi dengan tumbuhan enceng gondok. Reaktor berupa bak segiempat yang terbuat dari bahan *fiber glass* transparan. Reaktor dilengkapi dengan beberapa peralatan penunjang sebagai berikut:

1. Bak larutan, berguna untuk menampung larutan yang akan digunakan selama proses pada reaktor. Bak larutan berupa bak silinder yang terbuat dari plastik dengan ukuran diameter 100 cm dan volume 250 liter.
2. Selang plastik, berfungsi mengalirkan larutan dari bak larutan ke reaktor. Diameter selang plastik yang digunakan adalah 1 inci dengan panjang 40 cm;
3. Keran *outlet*, berfungsi untuk mengalirkan larutan hasil olahan reaktor ke ember sebagai penampung. Diameter keran *outlet* yang digunakan $\frac{1}{2}$ inci;
4. Ember kecil 3 liter, berfungsi untuk menampung efluen hasil olahan reaktor.

Pemasangan reaktor sejajar dengan tangki larutan diletakkan pada elevasi yang lebih tinggi dari reaktor sehingga dapat mengalirkan larutan secara gravitasi. Hanya terdapat pipa *outlet* pada reaktor pipa *Fitoteknologi* ini karena pada inlet dialirkan melalui tepi reaktor yang berdekatan dengan tangki larutan. Terdapat dua sekat yang merupakan pembatas antara media tumbuh tanaman eceng gondok, *inlet*, dan ruang penampung sebelum menuju pipa *outlet*. Sambungan pipa *outlet* dipasang pada ketinggian 10 cm dari bagian bawah reaktor. Setiap reaktor dilengkapi dengan ember.

Pengamatan pada penelitian terhadap masing-masing perlakuan dilakukan setiap 10 menit. Pengamatan selesai jika air yang diperlakukan dalam wadah penampungan habis semuanya. Metode analisis yang digunakan untuk analisis konsentrasi logam Hg adalah metode absorpsi dengan menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS).

Hasil Analisis

Hasil pengujian sampel air setelah perlakuan ditampilkan dalam angka rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,02 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	0	0.01994
2.	10	0.01994
3.	20	0.01994
4.	30	0.01904
5.	40	0.01892
6.	50	0.01879
7.	60	0.01867
8.	70	0.01864
9.	80	0.01844

Dari Tabel 14 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,02 mg/L selama pengamatan terjadi penurunan. Namun

penurunan tersebut belum terjadi pada awal-awal pengambilan data. Pada menit ke-0 sampai menit ke-30 kadar logam Hg dalam larutan masih sama yaitu sebesar 0.01994 mg/L. Memasuki menit ke-40 baru terjadi penurunan konsentrasi logam berat Hg menjadi 0.01892 mg/L dan seterusnya pada pengamatan menit ke-80 konsentrasi yang tertinggal dalam larutan tersisa 0.01844 mg/L.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,04 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,04 mg/L

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	0	0.03686
2.	10	0.03686
3.	20	0.03686
4.	30	0.03683
5.	40	0.03683
6.	50	0.03681
7.	60	0.03679
8.	70	0.03677
9.	80	0.03675

Dari Tabel 15 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,04 mg/L. Seperti halnya pada konsentrasi awal 0.02 mg/L, pada konsentrasi awal 0.04 mg/L juga belum menampakkan penurunan konsentrasi logam berat Hg pada awal-awal pengambilan sampel sampai menit ke-20. Penurunan konsentrasi Hg dalam larutan secara berkelanjutan terlihat terus menerus mulai menit ke-40. Setelah pengamatan pada menit ke-80 konsentrasi yang tertinggal dalam larutan tersisa 0.03675 mg/L.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuti (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,06 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,06 mg/L

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	0	0.05967
2.	10	0.05967
3.	20	0.05955
4.	30	0.05940
5.	40	0.05915
6.	50	0.05691
7.	60	0.05682
8.	70	0.05629
9.	80	0.05305

Dari Tabel 16 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,06 mg/L. Umumnya untuk semua sampel yang diambil per 10 menit terjadi penurunan dari waktu ke waktu. Pada akhir

pengambilan sampel yakni menit ke-80 konsentrasi tersisa dalam larutan sebesar 0.05305 mg/L.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuti (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,08 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,08 mg/L

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	0	0.07737
2.	10	0.07712
3.	20	0.07520
4.	30	0.07510
5.	40	0.07433
6.	50	0.07391
7.	60	0.07388
8.	70	0.07200
9.	80	0.07017

Dari Tabel 17 terlihat Rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,06 mg/L. Penurunan konsentrasi akibat perlakuan dengan tanaman enceng gondok juga terlihat seiring dengan waktu

penyisihan. Pada akhir perlakuan yakni pengambilan sampel menit ke-80 konsentrasi tersisa dalam larutan sebesar 0.07017 mg/L.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuti (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal tertinggi yaitu 0,1 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 18.

Tabel 18. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,1mg/L

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	0	0.09318
2.	10	0.09243
3.	20	0.09184
4.	30	0.09144
5.	40	0.08837
6.	50	0.08827
7.	60	0.08732
8.	70	0.08731
9.	80	0.08662

Dari Tabel 18 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,1 mg/L atau konsentrasi perlakuan tertinggi diantara perlakuan yang lain. Seperti halnya pada perlakuan untuk konsentrasi awal 0.08 mg/L, untuk perlakuan awal 0.1 mg/L juga terjadi hal yang sama dimana tanaman enceng gondok juga bisa menurunkan kadar konsentrasi Hg dari waktu ke waktu dalam larutan.

Berdasarkan hasil data penelitian dari Tabel 6 sampai Tabel 10 tanaman enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dapat menurunkan konsentrasi logam berat Hg dalam larutan. Namun untuk semua perlakuan mulai dari 0.02 mg/L sampai dengan 0.1 mg/L, konsentrasi yang larutan setelah perlakuan selama 80 menit belum bisa mencapai konsentrasi yang diperbolehkan untuk kualitas air pertanian sebesar 0.005 mg/L.

6.3. Pemulihan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) untuk Kualitas Air Irigasi

Penelitian ketiga dilakukan dengan pola aliran *horizontal subsurface flow* untuk menentukan efisiensi penurunan konsentrasi logam berat merkuri (Hg) pada kondisi terbaik dari variasi debit aliran air pada tanaman enceng

gondok (*Eichhornia crassipes*). Penelitian ini dilakukan masih dalam skala laboratorium[131, 132].

Reaktor digunakan sebanyak 9 buah, dengan fungsi reaktor mengalirkan tiga debit aliran air dengan tiga kali ulangan. Semua reaktor ditanami enceng gondok. Perbedaan masing-masing reaktor terletak pada debit air yang dialirkan. Ukuran reaktor 70 cm x 60 m x 40 cm dan terbagi dari 3 ruang. Ruang pertama berukuran 15 cm x 60 cm x 40 cm, yang berfungsi sebagai *inlet* bertujuan untuk menjaga aliran laminer, ruang kedua sebagai raung sebagai ruang proses dengan ukuran 40 cm x 60 cm x 30 cm, dan ruang *outlet* yang berfungsi untuk menampung air hasil proses sebelum dikeluarkan melalui keran *outlet*.

Reaktor yang digunakan berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pengolahan larutan yang tersusun atas media filter dan dilengkapi dengan tumbuhan enceng gondok. Reaktor berupa bak segiempat yang terbuat dari bahan *fiber glass* transparan. Reaktor dilengkapi dengan beberapa peralatan penunjang sebagai berikut:

1. Bak larutan, berguna untuk menampung larutan yang akan digunakan selama proses pada reaktor. Bak larutan berupa

bak silinder yang terbuat dari plastik dengan ukuran diameter 100 cm dan volume 250 liter.

2. Keran *outlet*, berfungsi untuk mengalirkan larutan hasil olahan reaktor ke ember sebagai penampung. Diameter keran *outlet* yang digunakan $\frac{1}{2}$ inchi;
3. Ember kecil 3 liter, berfungsi untuk menampung efluen hasil olahan reaktor.

Pemasangan reaktor sejajar dengan tangki larutan diletakkan pada elevasi yang lebih tinggi dari reaktor sehingga dapat mengalirkan larutan secara gravitasi. Hanya terdapat pipa *outlet* pada reaktor pipa *Fitoteknologi* ini karena pada inlet dialirkan melalui tepi reaktor yang berdekatan dengan tangki larutan. Terdapat dua sekat yang merupakan pembatas antara media tumbuh tanaman eceng gondok, *inlet*, dan ruang penampung sebelum menuju pipa *outlet*. Setiap *outlet* reaktor dilengkapi dengan ember.

Pengamatan pada penelitian terhadap masing-masing perlakuan dilakukan setiap 10 menit.. Pengamatan selesai jika air yang diperlakukan dalam wadah penampungan habis semuanya. Metode analisis yang digunakan untuk analisis konsentrasi logam Hg adalah metode absorpsi dengan menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass*

Spectrometry (ICP-MS). Pengukuran kandungan logam berat merkuri (Hg) pada air yang digunakan sebagai media tumbuh enceng gondok berasal dari air pada daerah irigasi (DI) Batang Hari. Perlakuan debit air terdiri atas tiga tingkatan yaitu 50 ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik.

Hasil Analisis

Hasil pengujian sampel air setelah perlakuan ditampilkan dalam angka rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan debit 50 ml/detik selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 19.

Tabel 19. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Debit 50 ml/detik

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	10	0.0092
2.	20	0.0086
3.	30	0.0080
4.	40	0.0074
5.	50	0.0068
6.	60	0.0064
7.	70	0.0059
8.	80	0.0054
9.	90	0.0050
10.	100	0.0046

Dari Tabel 19 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan debit 50 ml/detik selama pengamatan terjadi penurunan. Penurunan tersebut telah mulai terjadi sejak awal penelitian atau pengambilan data. Pada menit ke-90 kadar logam Hg dalam larutan telah berada dibawah baku mutu kualitas air untuk pertanian yaitu sebesar 0.00497 mg/L.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuti (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan debit 50 ml/detik selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 20.

Tabel 20. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Debit 60 ml/detik

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	10	0.0093
2.	20	0.0086
3.	30	0.0080
4.	40	0.0075
5.	50	0.0070
6.	60	0.0065
7.	70	0.0060
8.	80	0.0056
9.	90	0.0052
10.	100	0.0049

Dari Tabel 20 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan debit 60 ml/detik selama pengamatan terjadi seperti halnya pada debit 50 ml/detik juga terjadi penurunan. Namun, penurunan tersebut sedikit agak

lambat bila dibandingkan dengan perlakuan 50 ml/detik. Walaupun penurunan konsentrasi merkuri (Hg) tetap terjadi tetapi baku mutu baru tercapai pada pengambilan sampel menit ke-100. Hal ini berarti 10 menit lebih lambat bila dibandingkan dengan perlakuan dengan debit 50 ml/detik.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan debit 70 ml/detik selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 21.

Tabel 21. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Debit 70 ml/detik

No.	Menit Ke	Konsentrasi (mg/L)
1.	10	0.0093
2.	20	0.0087
3.	30	0.0081
4.	40	0.0077
5.	50	0.0072
6.	60	0.0067
7.	70	0.0060
8.	80	0.0056
9.	90	0.0053
10.	100	0.0050

Dari Tabel 21 terlihat rata-rata konsentrasi Hg yang ada pada wadah penelitian, dengan debit 70 ml/detik selama pengamatan terjadi seperti halnya pada debit 50 ml/detik dan 60 ml/detik juga terjadi penurunan. Namun, penurunan tersebut terlihat paling lambat bila dibandingkan dengan kedua kecepatan dibawahnya. Walaupun terjadi pelambatan penurunan konsentrasi merkuri (Hg) tetapi baku mutu kualitas air untuk pertanian tetap tercapai pada pengambilan sampel terakhir yaitu menit ke-100.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut di atas, didapatkan bahwa tanaman enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dapat menurunkan konsentrasi logam berat Hg sampai ambang batas kualitas air untuk pertanian. Efisiensi penyisihan kadar logam berat merkuri (Hg) tertinggi didapatkan pada perlakuan dengan debit terkecil atau debit 50 ml/detik sedangkan efisiensi terendah didapat pada perlakuan dengan debit terbesar atau debit 70 ml/detik.

6.4. Pemulihan Pencemaran Merkuri (Hg) di Daerah Irigasi Batang Hari

Penelitian keempat dilaksanakan di lapangan atau sumber pencemaran yaitu pada Daerah Irigasi (DI) Batang

Hari, dengan menggunakan tanaman air enceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Penelitian bertujuan melihat kemampuan tanaman enceng gondok menurunkan konsentrasi logam berat merkuri sampai ke batas kualitas air untuk pertanian yaitu 0,005 mg/L. Penelitian dilakukan pada kolam atau sawah bagian hulu yang dijadikan treatment untuk *Fitoteknologi*. Sawah yang ada di bagian hulu dirubah menjadi kolam untuk perlakuan yang ditanami enceng gondok (*Eichhornia crassipes*), sebanyak 3 buah kolam perlakuan. Dari kolam yang diperlakukan tersebut air yang telah mengalami perlakuan *Fitoteknologi* dialirkan pada sawah yang berada di bawahnya [133].

Tanaman enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) diperoleh dari perairan sekitar lokasi penelitian. Tanaman dipilih berdasarkan panjang akar 20 cm, tinggi dan jumlah tangkai daun yang relatif sama pada setiap perlakuan penelitian. Pengujian sampel air terutama Hg dilakukan sebelum dan sesudah melewati kolam *Fitoteknologi*. Pengamatan dilakukan setiap minggu selama 3 minggu.

Untuk mengetahui penurunan kadar konsentrasi logam berat dilakukan analisa sampel air di laboratorium dengan menggunakan alat *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS). Hasil analisa dibandingkan dengan

standar baku mutu air untuk irigasi. Pengamatan pada penelitian terhadap masing-masing perlakuan dilakukan setiap hari untuk mengetahui kecenderungan penurunan konsentrasi logam Hg.

Hasil Analisis

Hasil pengurangan logam berat merkuri (Hg) selama berlangsungnya pengamatan dalam jangka tiga (3) minggu dapat dilihat pada Tabel 22, 23, dan 24.

Tabel 22. Penurunan Konsentrasi Kadar Merkuri (Hg) Pada Minggu Pertama

IPAL	Pengamatan menit-ke	Konsentrasi Hg Sebelum Perlakuan (mg/L)	Konsentrasi Hg Sesudah Perlakuan (mg/L)	Penurunan Konsentrasi Hg (mg/L)
Kolam I	10	0.00508	0.00239	0.00269
	20	0.00553	0.00263	0.00290
	30	0.00528	0.00249	0.00279
	40	0.00560	0.00269	0.00291
	50	0.00610	0.00290	0.00320
Rata-rata		0.00552	0.00262	0.00290
Kolam II	10	0.00521	0.00254	0.00267
	20	0.00569	0.00275	0.00294
	30	0.00598	0.00292	0.00306
	40	0.0055	0.00265	0.00285
	50	0.00548	0.00264	0.00284
Rata-rata		0.00557	0.00270	0.00287
Kolam III	10	0.00547	0.00272	0.00275
	20	0.00500	0.00249	0.00251
	30	0.00548	0.00270	0.00278
	40	0.00591	0.00291	0.00300
	50	0.00578	0.00285	0.00293
Rata-rata		0.00553	0.00273	0.00279

Pada Tabel 22, dapat dilihat hasil proses *Fitoteknologi* selama 50 menit pengamatan, dimana pengambilan sampel air sebagai data awal sebelum masuk ke kolam *Fitoteknologi* dan setelah dibiarkan berproses dalam kolam instalasi pengolahan *Fitoteknologi* selama 10 menit. Hal ini dilakukan berulang-ulang selama lima (5) kali pengambilan sampel sebelum proses *Fitoteknologi* dan lima (5) kali setelah proses *Fitoteknologi* berlangsung atau berlangsung selama 50 menit. Pada kolam pertama perlakuan *Fitoteknologi*, rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00552 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00262 mg/L atau turun sebesar 0.00290 mg/L. Pada kolam kedua perlakuan *Fitoteknologi*, rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00557 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00270 mg/L atau turun sebesar 0.00287 mg/L. Sementara itu, pada kolam ketiga perlakuan *Fitoteknologi*, rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00553 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00270 mg/L atau turun sebesar 0.00279 mg/L. Dari semua kolam pengolahan limbah, terlihat bahwa hasil proses *Fitoteknologi* dengan menggunakan enceng gondok ternyata bisa menekan atau menurunkan konsentrasi merkuri (Hg) dari sebelumnya

melewati ambang batas kualitas air untuk pertanian baik pada kolam pertama, kedua dan ketiga, sehingga menjadi tidak berbahaya lagi pada tanaman atau sudah berada di bawah ambang batas kualitas air yang dipersyaratkan untuk pertanian atau semua perlakuan telah bisa menurunkan konsentrasi merkuri menjadi di bawah 0.005 mg/L.

Tabel 23. Penurunan Konsentrasi Kadar Merkuri (Hg) Pada Minggu Kedua

IPAL	Pengamatan menit-ke	Konsentrasi Hg Sebelum Perlakuan (mg/L)	Konsentrasi Hg Sesudah Perlakuan (mg/L)	Penurunan Konsentrasi Hg (mg/L)
Kolam I	10	0.00563	0.00268	0.00295
	20	0.00585	0.00279	0.00306
	30	0.00575	0.00273	0.00302
	40	0.00506	0.00245	0.00261
	50	0.00599	0.00285	0.00314
Rata-rata		0.00566	0.00270	0.00296
Kolam II	10	0.00507	0.00248	0.00259
	20	0.00593	0.00285	0.00308
	30	0.00503	0.00248	0.00255
	40	0.00562	0.00271	0.00291
	50	0.00506	0.00243	0.00263
Rata-rata		0.00534	0.00259	0.00275
Kolam III	10	0.00584	0.00291	0.00293
	20	0.0058	0.00288	0.00292
	30	0.00509	0.00245	0.00264
	40	0.00552	0.00276	0.00276
	50	0.00574	0.00284	0.0029
Rata-rata		0.00560	0.00277	0.00283

Pada Tabel 23, dapat dilihat bahwa pada kolam pertama perlakuan *Fitoteknologi*, rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00556 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00270 mg/L atau turun sebesar 0.00296 mg/L. Pada kolam kedua perlakuan *Fitoteknologi*, rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00534 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00259 mg/L atau turun sebesar 0.00275 mg/L. Sementara itu, pada kolam ketiga perlakuan *Fitoteknologi*, rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00560 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00277 mg/L atau turun sebesar 0.00283 mg/L.

Dari semua kolam pengolahan limbah, seperti hal pada pengambilan sampel minggu pertama, terlihat bahwa hasil proses *Fitoteknologi* dengan menggunakan enceng gondok pada minggu kedua ternyata juga bisa menekan atau menurunkan konsentrasi merkuri (Hg) dari sebelumnya melewati ambang batas kualitas air untuk pertanian baik pada kolam pertama, kedua dan ketiga, sehingga menjadi tidak berbahaya lagi pada tanaman atau sudah berada di bawah ambang batas kualitas air yang dipersyaratkan untuk pertanian atau semua perlakuan telah bisa menurunkan konsentrasi merkuri menjadi di bawah 0.005 mg/L.

Tabel 24. Penurunan Konsentrasi Kadar Merkuri (Hg) Pada Minggu Ketiga

IPAL	Pengamatan n menit-ke	Konsentras i Hg Sebelum Perlakuan (mg/L)	Konsentras i Hg Sesudah Perlakuan (mg/L)	Penurunan Konsentras i Hg (mg/L)
Kola m I	10	0.00533	0.00261	0.00272
	20	0.00580	0.00276	0.00304
	30	0.00574	0.00273	0.00301
	40	0.00508	0.00246	0.00262
	50	0.00500	0.00236	0.00264
Rata- rata		0.00539	0.00258	0.00281

Kola m II	10	0.00507	0.00247	0.00260
	20	0.00584	0.00282	0.00302
	30	0.00505	0.00246	0.00259
	40	0.00551	0.00270	0.00281
	50	0.00598	0.00288	0.00310
Rata- rata		0.00549	0.00267	0.00282
Kola m III	10	0.00570	0.00283	0.00287
	20	0.00585	0.00292	0.00293
	30	0.00501	0.00250	0.00251
	40	0.00535	0.00267	0.00268
	50	0.00584	0.00289	0.00295
Rata- rata		0.00555	0.00276	0.00279

Pada Tabel 24, pada kolom pertama perlakuan *Fitoteknologi*, rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00539 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00258 mg/L atau turun sebesar 0.00281 mg/L. Pada kolom kedua perlakuan *Fitoteknologi*, konsentrasi

merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00549 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00267 mg/L atau turun sebesar 0.00282 mg/L. Sementara itu, pada kolam ketiga perlakuan *Fitoteknologi*, konsentrasi merkuri (Hg) sebelum perlakuan sebesar 0.00555 mg/L dan sesudah perlakuan menjadi 0.00276 mg/L atau turun sebesar 0.00279 mg/L. Dari semua kolam *Fitoteknologi*, seperti halnya pada pengambilan sampel pada minggu pertama dan kedua, pada sampel minggu ketiga juga terlihat bahwa hasil proses *Fitoteknologi* dengan menggunakan enceng gondok ternyata juga bisa menekan atau menurunkan konsentrasi merkuri (Hg) dari sebelumnya melewati ambang batas kualitas air untuk pertanian baik pada kolam pertama, kedua dan ketiga, sehingga juga menjadi tidak berbahaya lagi pada tanaman atau sudah berada di bawah ambang batas kualitas air yang dipersyaratkan untuk pertanian atau semua perlakuan telah bisa menurunkan konsentrasi merkuri menjadi di bawah 0.005 mg/L.

Hasil yang didapatkan dari proses *Fitoteknologi* selama tiga minggu perlakuan tersebut selaras dengan yang didapatkan penelitian penulis pada skala laboratorium dimana *Fitoteknologi* dengan enceng gondok bisa menurunkan

konsentrasi merkuri (Hg) dari 0.01 mg/L menjadi dibawah standar kualitas air untuk pertanian pada menit ke-90 pada debit 50 ml/detik [134].

Berdasarkan rangkaian penelitian di atas maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Tanaman Enceang gondok (*Eichhornia crassipes*) dapat menurunkan konsentrasi logam berat Hg sampai ambang batas kualitas air untuk pertanian.
2. Konsentrasi air irigasi yang digunakan untuk mengalir tanaman rata-rata mengandung konsentrasi Hg sebesar 0.00548 mg/L setelah diperlakukan dengan *Fitoteknologi* yang menggunakan enceng gondok, air ternyata mengalami penurunan konsentrasi menjadi 0.00268 mg/L atau terjadi rata-rata penurunan sebesar 51.40%. Hal ini berarti bahwa perlakuan *Fitoteknologi* sangat baik digunakan untuk menurunkan konsentrasi logam berat Hg, sehingga tidak membahayakan pada tanaman padi sawah atau berada di bawah ambang batas untuk kualitas air pertanian.

6.5 Pemulihan Pencemaran Logam Berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) untuk Kualitas Air Perikanan dan Pertanian.

Penelitian kelima dilakukan dengan pola aliran *horizontal subsurface flow* untuk menentukan efisiensi penurunan konsentrasi logam berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) pada kondisi terbaik dari variasi debit aliran air [135].

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan skala laboratorium dengan menggunakan tanaman air enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) sebagai tanaman air dalam menurunkan Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr). Kadar Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) yang diuji untuk diturunkan melalui perlakuan *Fitoteknologi* dengan ketiga tanaman adalah berturut-turut adalah 0,020 mg/l, 0,080 mg/L dan 0,050 mg/L. Kadar logam berat tersebut merupakan kadar tertinggi masing-masing logam berat di Sungai Batang Harau (Hukama, 2014). Dari penelitian ini diharapkan kadar masing-masing logam berat tersebut akan berkurang menjadi 0,010 mg/l untuk Kadmium, 0,030 mg/L untuk Timbal (Pb) dan 0,050 mg/L untuk Kromium (Cr) atau sesuai dengan konsentrasi logam

Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) yang bisa ditolerir untuk kualitas perikanan dan pertanian berdasarkan PP Nomor 82 Tahun 2001.

Reaktor digunakan sebanyak 27 buah, dengan fungsi reaktor mengalirkan 3 tanaman yang berbeda dan tiga debit aliran air dengan tiga kali ulangan. Perbedaan masing-masing reaktor terketak pada jenis tanaman dan debit air yang dialirkan. Ukuran reaktor 70 cm x 60 m x 40 cm dan terbagi dari 3 ruang. Ruang pertama berukuran 15 cm x 60 cm x 40 cm, yang berfungsi sebagai *inlet* bertujuan untuk menjaga aliran laminer, ruang kedua sebagai raung sebagai ruang proses dengan ukuran 40 cm x 60 cm x 30 cm, dan ruang *outlet* yang berfungsi untuk menampung air hasil proses sebelum dikeluarkan melalui keran *outlet*.

Reaktor yang digunakan berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pengolahan larutan yang tersusun atas media filter dan dilengkapi dengan tumbuhan enceng gondok. Reaktor berupa bak segiempat yang terbuat dari bahan *fiber glass* transparan. Reaktor dilengkapi dengan beberapa peralatan penunjang sebagai berikut:

6.1 Bak larutan, berguna untuk menampung larutan yang akan digunakan selama proses pada reaktor. Bak larutan

berupa bak silinder yang terbuat dari plastik dengan ukuran diameter 100 cm dan volume 250 liter.

- 6.2 Selang plastik, berfungsi mengalirkan larutan dari bak larutan ke reaktor. Diameter selang plastik yang digunakan adalah 1 inci dengan panjang 40 cm;
- 6.3 Keran *outlet*, berfungsi untuk mengalirkan larutan hasil olahan reaktor ke ember sebagai penampung. Diameter keran *outlet* yang digunakan $\frac{1}{2}$ inci;
- 6.4 Ember kecil 3 liter, berfungsi untuk menampung efluen hasil olahan reaktor.

Pemasangan reaktor sejajar dengan tangki larutan diletakkan pada elevasi yang lebih tinggi dari reaktor sehingga dapat mengalirkan larutan secara gravitasi. Hanya terdapat pipa *outlet* pada reaktor pipa *Fitoteknologi* ini karena pada inlet dialirkan melalui tepi reaktor yang berdekatan dengan tangki larutan. Terdapat dua sekat yang merupakan pembatas antara media tumbuh tanaman eceng gondok, *inlet*, dan ruang penampung sebelum menuju pipa *outlet*. Sambungan pipa *outlet* dipasang pada ketinggian 10 cm dari bagian bawah reaktor. Setiap reaktor dilengkapi dengan ember.

Pengamatan pada penelitian terhadap masing-masing perlakuan dilakukan setiap 10 menit untuk mengetahui kecenderungan penurunan konsentrasi Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr). Pengamatan selesai jika air yang diperlakukan dalam wadah penampungan habis semuanya.

Metode analisis yang digunakan untuk analisis konsentrasi logam Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) adalah metode absorpsi dengan menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS).

Pengukuran kandungan logam berat pertanian dan perikanan pada air yang digunakan sebagai media tumbuh enceng gondok berasal dari air pada daerah irigasi (DI) Batang Harau. Alat yang digunakan untuk pengukuran sampel air tersebut adalah *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS).

Setelah dilakukan analisis laboratorium terhadap sampel air yang digunakan sebagai media tanam enceng gondok, baru dilakukan perlakuan kecepatan air atau debit aliran dari wadah penampung air ke wadah perlakuan enceng gondok. Perlakuan debit air terdiri atas tiga tingkatan yaitu 50 ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik.

Hasil Analisis

Logam Berat Kadmium (Cd)

Hasil pengujian sampel air setelah perlakuan ditampilkan dalam angka rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat kadmium (Cd) dalam larutan (wadah penelitian) dengan debit 50 ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 19.

Tabel 25. Kadar Kadmium (Cd) pada Larutan dengan Debit 50, 60 dan 70 ml/detik

No.	Menit Ke	Debit 50 ml/detik	Debit 60 ml/detik	Debit 70 ml/detik
		Konsentrasi (mg/L)		
1.	0	0.020	0.020	0.020
2.	10	0.019	0.019	0.019
3.	20	0.017	0.017	0.018
4.	30	0.017	0.016	0.017
5.	40	0.015	0.016	0.016
6.	50	0.014	0.015	0.015
7.	60	0.013	0.014	0.014
8.	70	0.012	0.013	0.013
9.	80	0.010	0.011	0.012
10.	90	0.009	0.010	0.011

No.	Menit Ke	Debit 50 ml/detik	Debit 60 ml/detik	Debit 70 ml/detik
		Konsentrasi (mg/L)		
11.	100	0.008	0.009	0.010

Dari Tabel 25 terlihat rata-rata konsentrasi kadmium (Cd) yang ada pada wadah penelitian, dengan debit 50 ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik selama pengamatan terjadi penurunan. Penurunan tersebut telah mulai terjadi sejak awal penelitian atau pengambilan data. Pada debit 50 ml/detik, menit ke-80 kadar logam kadmium (Cd) dalam larutan telah berada pada baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan yaitu sebesar 0.010 mg/L. Sementara itu pada debit 60 ml/detik, baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan tercapai pada menit ke-90, sedangkan pada debit 70 ml/detik, baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan baru tercapai pada menit ke-100 atau diakhir perlakuan. Dalam hal ini terlihat bahwa pada debit yang lebih besar (70 ml/detik) membutuhkan waktu untuk mencapai baku mutu lebih lama dibandingkan dengan debit yang lebih kecil (50 ml/detik).

Logam Plumbum (Pb)

Hasil pengujian sampel air setelah perlakuan ditampilkan dalam angka rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat Plumbum (Pb) dalam larutan (wadah penelitian) dengan debit 50 ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik, dapat dilihat pada Tabel 26.

Tabel 26. Kadar Plumbum (Pb) pada Larutan dengan Debit 50, 60 dan 70 ml/detik

No.	Menit Ke	Debit 50 ml/detik	Debit 60 ml/detik	Debit 70 ml/detik
		Konsentrasi (mg/L)		
1.	0	0.050	0.050	0.050
2.	10	0.047	0.048	0.048
3.	20	0.043	0.046	0.046
4.	30	0.041	0.044	0.043
5.	40	0.037	0.041	0.040
6.	50	0.035	0.040	0.038
7.	60	0.033	0.037	0.036
8.	70	0.031	0.035	0.035
9.	80	0.029	0.031	0.034
10.	90	0.028	0.029	0.032
11.	100	0.027	0.028	0.029

Dari Tabel 26 terlihat rata-rata konsentrasi plumbum (Pb) yang ada pada wadah penelitian, dengan debit 50

ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik selama pengamatan terjadi penurunan. Penurunan tersebut seperti halnya pada logam berat kadmium (Cd) juga telah mulai terjadi sejak awal penelitian atau pengambilan data. Pada debit 50 ml/detik, menit ke-80 kadar logam plumbum (Pb) dalam larutan telah berada dibawah baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan yaitu sebesar 0.030 mg/L. Sementara itu pada debit 60 ml/detik, konsentrasi logam berat plumbum (Pb) baru berada dibawah baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan pada menit ke-90, sedangkan pada debit 70 ml/detik, konsentrasi logam berat plumbum (Pb) baru berada dibawah baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan tercapai pada menit ke-100 atau diakhir perlakuan. Hal ini berarti untuk semua debit yang diperlakukan, baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan bisa didapatkan, seperti halnya pada logam berat kadmium (Cd) untuk debit yang lebih besar pada logam berat plumbum (Pb) juga membutuhkan waktu untuk mencapai baku mutu tersebut lebih lama.

Logam Kromium (Cr)

Hasil pengujian sampel air setelah perlakuan ditampilkan dalam angka rata-rata konsentrasi (kadar) logam

berat kromium (Cr) dalam larutan (wadah penelitian) dengan debit 50 ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik.

Tabel 27. Kadar Kromium (Cr) pada Larutan dengan Debit 50, 60 dan 70 ml/detik

No.	Menit Ke	Debit 50 ml/detik	Debit 60 ml/detik	Debit 70 ml/detik
		Konsentrasi (mg/L)		
1.	0	0.080	0.080	0.080
2.	10	0.076	0.077	0.076
3.	20	0.070	0.074	0.073
4.	30	0.067	0.070	0.069
5.	40	0.064	0.067	0.067
6.	50	0.061	0.064	0.064
7.	60	0.056	0.059	0.059
8.	70	0.050	0.055	0.055
9.	80	0.048	0.050	0.052
10.	90	0.046	0.045	0.049
11.	100	0.042	0.043	0.045

Dari Tabel 27 terlihat rata-rata konsentrasi kromium (Cr) yang ada pada wadah penelitian, dengan debit 50 ml/detik, 60 ml/detik dan 70 ml/detik selama pengamatan terjadi penurunan. Penurunan tersebut seperti halnya pada logam berat kadmium (Cd) dan plumbum(Pb) juga telah

mulai terjadi sejak awal penelitian atau pengambilan data. Pada debit 50 ml/detik, menit ke-70 kadar logam plumbum (Pb) dalam larutan telah berada pada baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan yaitu sebesar 0.050 mg/L. Sementara itu pada debit 60 ml/detik, baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan tercapai pada menit ke-80, sedangkan pada debit 70 ml/detik, baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan baru tercapai pada menit ke-90.

Hal ini berarti untuk semua debit yang diperlakukan baku mutu kualitas air untuk pertanian dan perikanan bisa didapatkan, seperti halnya pada logam berat kadmium (Cd) dan plumbum (Pb) untuk debit yang lebih besar pada logam berat kromium (Cr) juga membutuhkan waktu untuk mencapai baku mutu tersebut lebih lama. Pencapaian baku mutu kualitas air untuk perikanan dan pertanian pada logam berat kromium (Cr) terjadi lebih cepat 10 menit dari logam berat kadmium (Cd) dan plumbum (Pb).

6.6 Pemulihan Pencemaran Logam Berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) Pada Daerah Irigasi Batang Harau

Penelitian keenam ini bertujuan untuk menguji tanaman enceng gondok dalam menurunkan pencemaran logam berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) sampai mencapai batas kualitas air kelas 2 atau prasarana/sarana rekreasi air, budidaya ikan air tawar, mengairi pertanian dan peternakan pada Daerah Irigasi (DI) Batang Harau Kota Padang [136].

Penelitian ini menggunakan tanaman air enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dalam menurunkan konsentrasi Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr).

Penelitian dilakukan pada kolam atau sawah bagian hulu yang dijadikan treatment untuk *Fitoteknologi*. Sawah yang ada di bagian hulu dirubah menjadi kolam untuk perlakuan yang ditanami enceng gondok (*Eichhornia crassipes*), sebanyak 2 buah kolam perlakuan untuk 2 tingkatan instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Disamping itu, juga digunakan 1 buah kolam untuk 1 tingkatan instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Dari kolam yang diperlakukan tersebut air yang telah mengalami perlakuan *Fitoteknologi*

dialirkan pada sawah yang berada di bawahnya. Pengamatan dilakukan setiap minggu selama 9 minggu.

Untuk mengetahui penurunan kadar konsentrasi logam berat dilakukan analisa sampel air di laboratorium dengan menggunakan alat *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS). Hasil analisa dibandingkan dengan standar baku mutu air untuk irigasi.

Pengamatan pada penelitian terhadap masing-masing perlakuan dilakukan setiap hari untuk mengetahui kecenderungan penurunan konsentrasi logam Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr). Data yang diperoleh akibat penurunan pencemaran air oleh adanya enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dibandingkan dengan ambang batas kualitas perairan untuk irigasi.

Hasil Analisis

Satu Tingkatan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)

Penurunan konsentrasi kadmium (Cd) selama perlakuan *Fitoteknologi* dan efisiensi penyisihannya dengan memakai satu tingkat instalasi pengolahan air limbah, dapat dilihat pada Tabel 28.

**Tabel 28. Penurunan Konsentrasi Kadmium (Cd) dan Efisiensi
Penyisihannya (%)**

No.	Minggu ke	Kadar Kadmium (Cd)		Efisiensi Penyisihan (%)
		Pintu Masuk	IPAL	
		(mg/L)		
1.	1	0.038	0.026	31.58
2.	2	0.038	0.024	36.84
3.	3	0.041	0.028	31.71
4.	4	0.042	0.029	30.95
5.	5	0.044	0.026	40.91
6.	6	0.038	0.026	31.58
7.	7	0.042	0.027	35.71
8.	8	0.039	0.026	33.33
9.	9	0.041	0.029	29.27

Pada Satu Tingkatan IPAL
BM = 0.01 mg/L

Dari Tabel 28, terlihat bahwa selama sembilan (9) minggu pengamatan konsentrasi kadmium (Cd), selalu terjadi penurunan konsentrasi kadmium (Cd) setiap minggu pengambilan sampel setelah melewati instalasi pengolahan air limbah. Tingkat efisiensi setiap minggunya berkisar antara 29.27 sampai dengan 40.91%. Berkaitan dengan hal tersebut di atas, berarti bahwa selama sembilan (9) minggu perlakuan dengan enceng gondok sebagai *Fitoteknologi*

masih berjalan dengan baik, dengan kata lain enceng gondok masih bisa digunakan sebagai agen untuk menurunkan konsentrasi kadmium (Cd), walaupun sudah memasuki sembilan (9) minggu di lapangan atau di instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Meskipun, pada minggu ke sembilan (9) terlihat penurunan kemampuan dalam menurunkan konsentrasi Kadmium (Cd), dibandingkan dengan minggu-minggu sebelumnya.

Pada saat yang sama dengan kadmium (Cd), juga diamati penurunan konsentrasi plumbum (Pb) selama perlakuan *Fitoteknologi* dan efisiensi penyisihannya dengan memakai satu tingkat instalasi pengolahan air limbah, dapat dilihat pada Tabel 29.

**Tabel 29. Penurunan Konsentrasi Plumbum (Pb) dan Efisiensi
Penyisihannya (%)**

No.	Minggu ke	Kadar Plumbum (Pb)		Efisiensi Penyisihan (%)
		Pintu Masuk	IPAL	
		(mg/L)		
1.	1	0.055	0.037	32.73
2.	2	0.059	0.039	33.90
3.	3	0.057	0.036	36.84
4.	4	0.055	0.039	29.09
5.	5	0.052	0.037	28.85
6.	6	0.055	0.037	32.73
7.	7	0.057	0.039	31.58
8.	8	0.055	0.037	32.73
9.	9	0.057	0.039	31.58

Pada Satu Tingkatan IPAL

BM = 0.03 mg/L

Pada Tabel 29, terlihat bahwa selama sembilan (9) minggu pengamatan seperti halnya pada perlakuan penurunan konsentrasi kadmium (Cd), konsentrasi plumbum (Pb) setiap minggu pengambilan sampel setelah melewati instalasi pengolahan air limbah juga terlihat penurunan kemampuan tanaman enceng gondok dalam menurunkan konsentrasi logam berat plumbum (Pb) tersebut. Tingkat efisiensi setiap minggunya berkisar antara 28.85 sampai dengan 36.84%.

Seperti yang terlihat pada logam berat kadmium (Cd), selama sembilan (9) minggu perlakuan dengan enceng gondok sebagai *Fitoteknologi* juga masih berjalan dengan baik.

Selama pengamatan berlangsung, terjadi fluktuasi penurunan konsentrasi plumbum (Pb), dan diakhir pengamatan atau pada minggu ke sembilan, tingkat efisiensi penyisihan terlihat masih cukup tinggi yaitu sekitar 31.58%. Hal ini berarti tanaman enceng gondok masih bisa digunakan setelah melewati waktu pengamatan di lapangan. Selain dilakukan pengamatan terhadap kadmium (Cd) dan plumbum (Pb), juga dilakukan penelitian terhadap kromium (Cr). Hasil pengamatan terhadap penurunan konsentrasi kromium (Cr) dapat dilihat pada Tabel 30.

**Tabel 30. Penurunan Konsentrasi Kromium (Cr) dan Efisiensi
Penyisihannya (%)**

No.	Minggu ke	Kadar Kromium (Cr)		Efisiensi Penyisihan (%)
		Pintu Masuk	IPAL	
		(mg/L)		
1.	1	0.050	0.027	46.00
2.	2	0.054	0.029	46.30
3.	3	0.056	0.031	44.64
4.	4	0.058	0.034	41.38
5.	5	0.053	0.037	30.19
6.	6	0.050	0.027	46.00
7.	7	0.054	0.037	31.48
8.	8	0.056	0.039	30.36
9.	9	0.050	0.037	26.00

Pada Satu Tingkatan IPAL

BM = 0.05 mg/L

Berdasarkan data yang terlihat pada Tabel 30, untuk paramater kromium (Cr) selama sembilan (9) minggu pengamatan seperti halnya konsentrasi kadmium (Cd) dan konsentrasi plumbum (Pb) setiap minggu pengambilan sampel setelah melewati instalasi pengolahan air limbah juga terjadi penurunan. Tingkat efisiensi setiap minggunya berkisar antara 26.00 sampai dengan 46.30%. Seperti yang terlihat pada logam berat kadmium (Cd), tingkat efisiensi kromium

(Cr) pada minggu ke sembilan terlihat lebih rendah dibandingkan dengan minggu-minggu sebelumnya. Tiga minggu terakhir dari pengamatan, terjadi kecenderungan penurunan tingkat efisiensi penyisihan dari logam berat kromium (Cr). Meskipun demikian, penurunan logam kromium (Cr) ini cukup baik, hal ini berarti enceng gondok sebagai agen *Fitoteknologi* cukup handal digunakan untuk mengatasi pencemaran logam berat Cd, Pb dan Cr.

Dua Tingkatan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)

Hasil penurunan konsentrasi kadmium (Cd) selama perlakuan *Fitoteknologi* dengan menggunakan enceng gondok dan efisiensi penyisihannya dengan memakai dua tingkat instalasi pengolahan air limbah, dapat dilihat pada Tabel 31.

Tabel 31. Penurunan Konsentrasi Kadmium (Cd) dan Efisiensi Penyisihannya (%)

No.	Minggu ke	Kadar Kadmium (Cd)			Efisiensi Penyisihan (%)	
		Pintu Masuk	IPAL 1	IPAL 2		
		(mg/L)			IPAL 1	IPAL 2
1.	1	0.032	0.022	0.010	31.25	68.75
2.	2	0.029	0.020	0.009	31.03	68.97
3.	3	0.033	0.025	0.011	24.24	66.67
4.	4	0.028	0.021	0.008	25.00	71.43
5.	5	0.031	0.015	0.009	51.61	70.97
6.	6	0.043	0.025	0.011	41.86	74.42
7.	7	0.039	0.025	0.011	35.90	71.79
8.	8	0.036	0.020	0.012	44.44	66.67
9.	9	0.035	0.021	0.012	40.00	65.71

Pada Dua Tingkatan IPAL

BM = 0.01 mg/L

Berdasarkan data pada Tabel 31, untuk paramater kadmium (Cd) selama sembilan (9) minggu pengamatan dengan dua tingkatan instalasi hasilnya jauh lebih baik bila dibandingkan dengan hanya memakai satu tingkatan instalasi. Untuk satu instalasi atau hasil dari IPAL (kolam) pertama efisiensinya hanya berkisar antara 25 sampai dengan 51.61% saja. Sedangkan bila diteruskan ke instalasi (kolam) kedua, maka efisiensi penyisihan konsentrasi kadmium (Cd)

meningkat menjadi 65.71 sampai dengan 74.42%. Hal ini berarti, penambahan instalasi pengolahan limbah dari satu tingkat menjadi dua tingkat menyebabkan penurunan tingkat konsentrasi kadmium (Cd) juga menjadi signifikan. Dengan demikian, pencemaran yang diakibatkan oleh logam berat kadmium (Cd) menjadi sangat berkurang dan ambang batas yang diinginkan bisa tercapai.

Disamping itu, perlakuan enceng gondok masih bisa sangat efektif untuk menurunkan kadar pencemaran logam berat kadmium (Cd), walaupun sudah memasuki minggu ke sembilan. Hal ini berarti, kemampuan enceng gondok dalam menurunkan tingkat pencemaran kadmium (Cd), bisa bertahan secara efektif sampai minggu ke sembilan bahkan bila diteruskan kemungkinan besar masih bisa dipergunakan untuk meredam pencemaran kadmium (Cd) di lokasi penelitian.

Seperti halnya pada satu tingkat instalasi pengolahan limbah, pada perlakuan dengan dua tingkat instalasi pengolahan limbahpun juga dilakukan pengamatan terhadap penurunan konsentrasi plumbum (Pb) selama perlakuan *Fitoteknologi* dan efisiensi penyisihannya seperti terlihat pada Tabel 32.

**Tabel 32. Penurunan Konsentrasi Plumbum (Pb) dan Efisiensi
Penyisihannya (%)**

No.	Minggu ke	Kadar Plumbum (Pb)			Efisiensi Penyisihan (%)	
		Pintu Masuk	IPAL 1	IPAL 2	IPAL 1	IPAL 2
		(mg/L)				
1.	1	0.058	0.041	0.017	29.31	70.69
2.	2	0.064	0.046	0.019	28.13	70.31
3.	3	0.062	0.042	0.018	32.26	70.97
4.	4	0.056	0.042	0.019	25.00	66.07
5.	5	0.051	0.039	0.023	23.53	54.90
6.	6	0.060	0.040	0.016	33.33	73.33
7.	7	0.063	0.043	0.019	31.75	69.84
8.	8	0.053	0.036	0.014	32.08	73.58
9.	9	0.067	0.043	0.022	35.82	67.16

Pada Dua Tingkatan IPAL

BM = 0.03 mg/L

Melihat data pada Tabel 32, untuk paramater plumbum (Pb) selama sembilan (9) minggu pengamatan dengan dua tingkatan instalasi seperti halnya perlakuan pada logam berat Kadmium (Cd), hasilnya juga jauh lebih baik bila dibandingkan dengan hanya memakai satu tingkatan instalasi. Untuk satu instalasi atau hasil dari IPAL (kolam) pertama efisiensinya hanya berkisar antara 23.53 sampai dengan 35.82% saja. Sedangkan bila diteruskan ke instalasi

(kolam) kedua, maka efisiensi penyisihan konsentrasi plumbum (Pb) meningkat menjadi 54.90 sampai dengan 73.56%. Dengan demikian, peningkatan dari satu tingkat menjadi dua tingkat instalasi menyebabkan efisiensi penyisihan plumbum (Pb) menjadi dua kali lipat. Dengan demikian, pencemaran yang diakibatkan oleh logam berat plumbum (Pb) menjadi sangat berkurang dan ambang batas yang diinginkan bisa tercapai dengan penambahan instalasi pengolahan air limbah.

Seperti halnya kadmium (Cd), perlakuan enceng gondok untuk logam berat plumbum (Pb) juga masih bisa sangat efektif untuk menurunkan kadar pencemaran logam berat plumbum (Pb), walaupun sudah memasuki minggu ke sembilan. Hal ini berarti, kemampuan enceng gondok dalam menurunkan tingkat pencemaran plumbum (Pb), bisa bertahan secara efektif sampai minggu ke sembilan bahkan juga bila diteruskan pada waktu yang lebih lama, kemungkinan besar masih bisa dipergunakan untuk meredam pencemaran plumbum (Pb) di lokasi penelitian. Hal ini didasarkan pada masih tanaman enceng gondok sebagai tanaman *Fitoteknologi* masih hidup cukup baik atau belum layu apalagi mati.

Untuk dua tingkat instalasi pengolahan limbah, disamping melihat parameter logam berat kadmium (Cd) dan Plumbum (Pb), juga dilakukan pengamatan terhadap penurunan konsentrasi kromium (Cr) selama perlakuan *Fitoteknologi* dan efisiensi penyisihannya seperti terlihat pada Tabel 33.

Tabel 33. Penurunan Konsentrasi Kromium (Cr) dan Efisiensi Penyisihannya (%)

No.	Minggu ke	Kadar Kromium (Cr)			Efisiensi Penyisihan (%)	
		Pintu Masuk	IPAL 1	IPAL 2	IPAL 1	IPAL 2
		(mg/L)				
1.	1	0.055	0.044	0.029	20.00	47.27
2.	2	0.059	0.048	0.033	18.64	44.07
3.	3	0.057	0.046	0.027	19.30	52.63
4.	4	0.058	0.041	0.025	29.31	56.90
5.	5	0.055	0.043	0.027	21.82	50.91
6.	6	0.059	0.045	0.029	23.73	50.85
7.	7	0.056	0.041	0.026	26.79	53.57
8.	8	0.050	0.047	0.024	6.00	52.00
9.	9	0.062	0.045	0.021	27.42	66.13

Pada Dua Tingkatan IPAL
 BM = 0.05 mg/L

Berdasarkan data pada Tabel 33, untuk paramater kromium (Cr) selama sembilan (9) minggu pengamatan dengan dua tingkatan instalasi hasilnya juga jauh lebih baik bila dibandingkan dengan hanya memakai satu tingkatan instalasi. Namun bila dibandingkan dengan logam berat kalsium (Ca) dan Plumbum (Pb), penurunan konsentrasi kromium (Cr) ataupun efisiensi penyisihannya masih berada dibawah logam berat kalsium (Ca) dan Plumbum (Pb).

Untuk instalasi kolam pertama atau hasil dari IPAL 1 efisiensinya hanya berkisar antara 6.00 sampai dengan 29.31% saja. Sedangkan bila diteruskan ke instalasi kedua atau kolam kedua, maka efisiensi penyisihan konsentrasi kromium (Cr) meningkat menjadi 44.07 sampai dengan 66.13%. Walaupun demikian, karena pencemaran kromium (Cr) pada lokasi penelitiann tidak terlalu tinggi, maka dengan hanya melalui IPAL pertama saja baku mutu yang diinginkan telah tercapai.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Tanaman enceng gondok (*Eichhornia crassipes*) dapat menurunkan konsentrasi logam berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr).
2. Bila dibandingkan antara satu tingkat instalasi pengolahan limbah (IPAL) dengan dua tingkat instalasi pengolahan limbah (IPAL), maka dua tingkat instalasi pengolahan limbah (IPAL) jauh lebih baik dalam menurunkan konsentrasi logam berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr).

3. Perlakuan enceng gondok masih bisa sangat efektif untuk menurunkan kadar pencemaran logam berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr), walaupun sudah memasuki minggu ke sembilan.

6.7 Penurunan Konsentrasi Merkuri (Hg) dengan Bongkahan Bangunan Pada Kondisi Metoda Air Tergenang

Penelitian ketujuh adalah penelitian yang memakai metode eksperimen dengan skala laboratorium pada aliran tergenang (bath reaktor) menggunakan tiga bongkahan bekas bangunan yaitu beton bekas, bata bekas dan keramik bekas. Kadar merkuri (Hg) yang akan diuji untuk diturunkan melalui ketiga perlakuan yaitu 0.02 mg/L. Konsentrasi Hg pada analisis sampel digunakan sebagai konsentrasi pada larutan artifisial $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ [137, 138].

Beton bekas, bata bekas dan keramik bekas diperoleh dari bongkahan bangunan yang ada di Sumatera Barat. Bongkahan dipilih berdasarkan volume yang sama dan menutupi bagian bawah wadah penelitian dengan tiga ketebalan lapisan bongkahan bekas bangunan dari tiga jenis bongkahan bekas bangunan tersebut di atas. Ketebalan lapisan bongkahan bekas bangunan adalah 5 cm, 7.5 cm dan

10 cm. Wadah penelitian berbentuk *box* plastik berukuran 80 x 54 x 50 cm.

Tahapan berikut memasukkan larutan logam berat ke dalam wadah penelitian yang telah diisi dengan ketiga perlakuan sebagaimana disebutkan di atas. Larutan logam berat merkuri (Hg) dituangkan ke dalam wadah penelitian dengan volume 40 L.

Pengamatan dilakukan setiap minggu sampai konsentrasi Hg di dalam air tersebut mencapai baku mutu untuk irigasi yaitu 0.005 mg/L. Setiap akan dilakukan pengambilan sampel air maka tinggi air dalam ember diusahakan seperti keadaan awal yaitu dengan volume larutan esar 40 L.

Metode analisis yang digunakan untuk analisis konsentrasi logam Hg adalah metode absorpsi dengan menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS). Analisis parameter lain seperti pH dengan pH meter, sedangkan pengukuran *Dissolved Oxygen* (DO) dan suhu menggunakan DO meter. Data-data hasil percobaan dilakukan pengolahan data dan pembahasannya.

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

Dimana: η = Efisiensi penyisihan (%)

C_{in} = Konsentrasi Merkuri (Hg) pada larutan awal (mg/l)

C_{out} = Konsentrasi Merkuri (Hg) pada larutan saat kesetimbangan (mg/l)

Hasil Analisis

Pengujian sampel dilakukan di Laboratorium Teknik Lingkungan Universitas Andalas. Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,02 mg/L selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 34.

Tabel 34. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L dengan Perlakuan Bata Bekas

No.	Minggu ke	Kadar Merkuri (Hg) dengan Perlakuan Bata Bekas		
		Ketebalan 5 cm	Ketebalan 7.5 cm	Ketebalan 10 cm
		(mg/L)		
1.	0	0.0200	0.0200	0.0200
2.	1	0.0160	0.0164	0.0170
3.	2	0.0120	0.0127	0.0140
4.	3	0.0090	0.0086	0.0080
5.	4	0.0077	0.0077	0.0076
6.	5	0.0067	0.0069	0.0071
7.	6	0.0065	0.0063	0.0055
8.	7	0.0057	0.0049	0.0035
9.	8	0.0049	0.0034	0.0030

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 34 terlihat rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,02 mg/L. Untuk perlakuan dengan menggunakan bata bekas dengan ketebalan 10 cm dan 7.5 cm pada minggu ke-7 konsentrasi Hg telah berada di bawah baku mutu yang diinginkan yaitu sebesar 0.004 mg/L dan 0.0049 mg/L. Sementara itu, untuk ketebalan 5 cm konsentrasi Hg berada di bawah baku mutu yang diinginkan baru tercapai pada

minggu ke-8 yaitu sebesar 0.0049 mg/L. Dengan demikian, maka ketebalan lapisan bata bekas mempengaruhi penyerapan Hg. Semakin tebal bata bekas yang diperlakukan, maka semakin cepat penyisihan penurunan logam berat Hg yang didapatkan.

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,02 mg/L dengan perlakuan beton bekas, selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 35.

Tabel 35. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L dengan Perlakuan Beton Bekas

No.	Minggu ke	Kadar Hg dengan Perlakuan Beton Bekas		
		Ketebalan 5 cm	Ketebalan 7.5 cm	Ketebalan 10 cm
		(mg/L)		
1.	0	0.0200	0.0200	0.0200
2.	1	0.0150	0.0161	0.0166
3.	2	0.0100	0.0122	0.0131
4.	3	0.0085	0.0079	0.0072
5.	4	0.0075	0.0070	0.0067
6.	5	0.0070	0.0060	0.0062
7.	6	0.0065	0.0055	0.0053
8.	7	0.0057	0.0050	0.0043
9.	8	0.0050	0.0041	0.0033

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 35 terlihat rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,02 mg/L. Untuk perlakuan dengan menggunakan bata bekas dengan ketebalan 10 cm pada minggu ke-8 konsentrasi Hg telah berada di bawah baku mutu yang diinginkan yaitu sebesar 0.0043 mg/L. Sementara itu, untuk ketebalan 7.5 cm pada minggu kedelapan, konsentrasi Hg tepat berada pada baku mutu yang diinginkan yaitu sebesar 0.005 mg/L. Sedangkan, pada perlakuan dengan ketebalan 5 cm, konsentrasi Hg tepat berada pada baku mutu yang diinginkan yaitu sebesar 0.005 mg/L baru tercapai pada minggu ke-9. Dengan demikian, maka ketebalan lapisan beton bekas seperti halnya bata bekas juga mempengaruhi penyerapan merkuri (Hg).

Rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuti (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan konsentrasi awal 0,02 mg/L dengan perlakuan keramik bekas, selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 36.

Tabel 36. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Konsentrasi Awal Larutan 0,02 mg/L dengan Perlakuan Keramik Bekas

No.	Minggu ke	Kadar Merkuri (Hg) dengan Perlakuan Keramik Bekas		
		Ketebalan 5 cm	Ketebalan 7.5 cm	Ketebalan 10 cm
(mg/L)				
1.	0	0.0200	0.0200	0.0200
2.	1	0.0170	0.0171	0.0174
3.	2	0.0140	0.0143	0.0147
4.	3	0.0100	0.0098	0.0090
5.	4	0.0091	0.0088	0.0085
6.	5	0.0079	0.0083	0.0080
7.	6	0.0082	0.0079	0.0075
8.	7	0.0075	0.0077	0.0065
9.	8	0.0070	0.0067	0.0057
10.	9	0.0059	0.0058	0.0048
11.	10	0.0050	0.0049	0.0037

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 36 terlihat rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) yang ada pada wadah penelitian, dengan konsentrasi awal Hg 0,02 mg/L pada perlakuan keramik bekas. Untuk perlakuan dengan menggunakan keramik bekas untuk semua perlakuan ketebalan membutuhkan waktu yang lebih lama bila dibandingkan dengan perlakuan bata bekas dan beton bekas untuk mencapai baku mutu yang diinginkan pertanian.

Pada perlakuan dengan ketebalan 10 cm, kualitas air berada di bawah baku mutu yang diinginkan baru tercapai pada minggu ke-8.78. Sementara itu, untuk ketebalan 5 cm konsentrasi Merkuri (Hg) berada baku mutu yang diinginkan baru tercapai pada minggu ke-10.

Berdasarkan hasil data yang didapatkan dari laboratorium, maka didapatkan kesimpulan bahwa ketiga jenis bongkahan bangunan yaitu bata bekas, beton bekas dan keramik bekas ternyata dapat menurunkan konsentrasi Merkuri (Hg) dari 0.02 mg/L menjadi berada dibawah ambang batas kualitas air untuk pertanian (0.005 mg/L). Pencapaian ambang batas kualitas air pertanian tercepat tercapai dengan perlakuan bata bekas dengan ketebalan lapisan 10 cm yaitu sebelum minggu ke delapan, dan yang terlama didapatkan dengan perlakuan menggunakan keramik bekas dengan ketebalan lapisan 5 cm yaitu pada minggu ke sepuluh.

6.8 Penurunan Konsentrasi Merkuri (Hg) dengan Bongkahan Bangunan Pada Kondisi Metoda Air Mengalir

Penelitian kedelapan ini dilakukan untuk melihat kemampuan bongkahan bekas bangunan dengan tiga ketebalan lapisan bongkahan bekas bangunan dengan menggunakan mekanisme secara *continue batch reaktor*. Pada penelitian ini dilakukan dengan pola aliran *horizontal subsurface flow* untuk menentukan efisiensi penurunan konsentrasi logam berat merkuri (Hg) pada kondisi terbaik dari tiga ketebalan lapisan bongkahan bekas bangunan dan tiga jenis bongkahan bekas bangunan. Dari penelitian ini akan diketahui ketebalan lapisan bongkahan bekas bangunan serta jenis bongkahan bekas bangunan yang cepat dan efektif [137].

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan skala laboratorium dengan menggunakan bekas bangunan sebagai wadah pengelolaan limbah dalam menurunkan konsentrasi merkuri. Air yang diperlakukan untuk dipulihkan adalah air yang berasal dari air sungai yang tercemar merkuri (Hg), yaitu yang berasal dari Sungai Batang Hari Sumatera Barat (sungai yang tercemar logam berat akibat penambangan emas).

Reaktor digunakan sebanyak 27 buah dengan fungsi reaktor mengalirkan aliran air dengan konsentrasi awal perlakuan logam berat merkuri (Hg) sebesar sekitar 0.02 mg/L (konsentrasi Hg di lapangan atau lokasi tercemar di Batang Hari). Reaktor diberi bekas bangunan pada bagian bawahnya dengan tiga ketebalan yaitu 5 cm, 7.5 cm dan 10 cm. Ukuran reaktor 70 cm x 60 m x 40 cm dan terbagi dari 3 ruang.

Reaktor yang digunakan berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pengolahan larutan yang tersusun atas media filter dan dilengkapi dengan bahan bekas bangunan. Reaktor berupa bak segiempat yang terbuat dari bahan *fiber glass* transparan. Reaktor dilengkapi dengan beberapa peralatan penunjang sebagai berikut:

1. Bak larutan, berguna untuk menampung larutan yang akan digunakan selama proses pada reaktor. Bak larutan berupa bak silinder yang terbuat dari plastik dengan ukuran diameter 100 cm dan volume 250 liter.
2. Selang plastik, berfungsi mengalirkan larutan dari bak larutan ke reaktor. Diameter selang plastik yang digunakan adalah 1 inchi dengan panjang 40 cm;

3. Keran *outlet*, berfungsi untuk mengalirkan larutan hasil olahan reaktor ke ember sebagai penampung. Diameter keran *outlet* yang digunakan ½ inchi;
4. Ember kecil 3 liter, berfungsi untuk menampung efluen hasil olahan reaktor.

Pada reaktor bagian tengah diletakkan bahan bangunan bekas setebal 5 cm, 7.5 cm dan 10 cm, yang didapatkan dari bekas bongkaran bangunan yang didapatkan di sekitar Perumnas Belimbing, Kuranji, Kota Padang.

Pemasangan reaktor sejajar dengan tangki larutan diletakkan pada elevasi yang lebih tinggi dari reaktor sehingga dapat mengalirkan larutan secara gravitasi. Terdapat dua sekat yang merupakan pembatas antara media pengolahan limbah, *inlet*, dan ruang penampung sebelum menuju pipa *outlet*. Sambungan pipa *outlet* dipasang pada ketinggian 10 cm dari bagian bawah reaktor. Setiap reaktor dilengkapi dengan ember.

Pengamatan pada penelitian terhadap masing-masing perlakuan dilakukan setiap 10 menit untuk mengetahui kecenderungan penurunan konsentrasi logam Hg. Pengamatan selesai jika air yang diperlakukan dalam wadah penampungan habis semuanya.

Metode analisis yang digunakan untuk analisis konsentrasi logam Hg adalah metode absorpsi dengan menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS). Analisis parameter lain seperti pH dengan pH meter, sedangkan pengukuran *Dissolved Oxygen* (DO) dan suhu menggunakan DO meter.

Data-data hasil percobaan dilakukan pengolahan data dan pembahasannya. Pengolahan dan pembahasan data meliputi nilai pH, *Dissolved Oxygen* (DO), suhu, konsentrasi logam Hg, efisiensi kemampuan menggunakan bekas bangunan dalam penyisihan logam Hg menggunakan aliran kontinu, analisis hubungan yang terjadi antara variasi konsentrasi dengan efisiensi penyisihan logam Hg analisis dan hubungan DO dengan konsentrasi logam Hg. Besarnya efisiensi dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

Dimana: η = Efisiensi penyisihan (%)

C_{in} = Konsentrasi Hg pada larutan awal (mg/l)

C_{out} = Konsentrasi Hg pada larutan saat kesetimbangan (mg/l)

Hasil Analisis

Hasil pengujian sampel air setelah perlakuan pada kondisi air mengalir (continue batch reactor) ditampilkan dalam angka rata-rata konsentrasi (kadar) logam berat merkuri (Hg) dalam larutan (wadah penelitian) dengan perlakuan bata bekas selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 37.

Tabel 37. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Perlakuan Bata Bekas

No.	Menit ke	Kadar Hg dengan Perlakuan Bata Bekas		
		Ketebalan 5 cm	Ketebalan 7.5 cm	Ketebalan 10 cm
		(mg/L)		
1.	10	0.0152	0.0150	0.0138
2.	20	0.0147	0.0145	0.0132
3.	30	0.0140	0.0136	0.0118
4.	40	0.0127	0.0125	0.0094
5.	50	0.0123	0.0122	0.0083
6.	60	0.0117	0.0114	0.0081
7.	70	0.0107	0.0103	0.0069
8.	80	0.0098	0.0093	0.0057
9.	90	0.0083	0.0079	0.0051
10.	100	0.0077	0.0067	0.0047

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 37 terlihat rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) yang ada pada wadah penelitian, dengan perlakuan bata bekas untuk seluruh ketebalan selama pengamatan terjadi penurunan. Penurunan tersebut telah mulai terjadi sejak awal penelitian atau pengambilan data. Dari tiga perlakuan ketebalan bata bekas, hanya perlakuan dengan ketebalan 10 cm pada menit ke-100 atau akhir perlakuan, kadar logam Hg telah berada dibawah baku mutu kualitas air untuk pertanian yaitu sebesar 0.0047 mg/L. Sedangkan untuk perlakuan dengan ketebalan 7.5 cm dan 5 cm, sampai berakhirnya perlakuan atau menit ke-100 belum mencapai baku mutu kualitas air untuk pertanian.

Hasil pengujian sampel air dengan perlakuan beton bekas selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 38.

Tabel 38. Kadar Merkuri (Hg) pada Larutan dengan Perlakuan Beton Bekas

No.	Menit ke	Kadar Hg dengan Perlakuan Beton Bekas		
		Ketebalan 5 cm	Ketebalan 7.5 cm	Ketebalan 10 cm
		(mg/L)		
1.	10	0.0156	0.0155	0.0145
2.	20	0.0150	0.0142	0.0132
3.	30	0.0144	0.0138	0.0118
4.	40	0.0136	0.0134	0.0107
5.	50	0.0130	0.0125	0.0103
6.	60	0.0121	0.0117	0.0094
7.	70	0.0113	0.0105	0.0081
8.	80	0.0104	0.0094	0.0069
9.	90	0.0095	0.0081	0.0057
10.	100	0.0087	0.0069	0.0050

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 38 terlihat rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) yang ada pada wadah penelitian, dengan perlakuan beton bekas untuk seluruh ketebalan selama pengamatan terjadi seperti halnya perlakuan bata bekas juga mengalami penurunan. Penurunan tersebut juga telah terlihat mulai terjadi sejak awal penelitian atau pengambilan data. Bila dibandingkan dengan perlakuan bata bekas, perlakuan dengan

beton bekas, kemampuannya dalam menurunkan konsentrasi merkuri (Hg) terlihat sedikit lebih rendah. Bila pada perlakuan dengan bata bekas dengan ketebalan 10 cm pada menit ke-100 atau akhir perlakuan, kadar logam Hg telah berada dibawah baku mutu kualitas air untuk pertanian yaitu sebesar 0.0047 mg/L, untuk bata bekas konsentrasinya sebesar 0.005 mg/L. Sedangkan untuk perlakuan dengan ketebalan 7.5 cm dan 5 cm, sampai berakhirnya perlakuan atau menit ke-100 juga belum mencapai baku mutu kualitas air untuk pertanian dengan capaian konsentrasi yang juga masih lebih tinggi bila dibandingkan dengan perlakuan bata bekas pada ketebalan 7.5 cm dan 5 cm.

Hasil pengujian sampel air dengan perlakuan keramik bekas selama pengamatan dapat dilihat pada Tabel 39.

**Tabel 39. Kadar merkuri (Hg) pada Larutan dengan Perlakuan
Keramik Bekas**

No.	Menit ke	Kadar Merkuri (Hg) dengan Perlakuan Keramik Bekas		
		Ketebalan 5 cm	Ketebalan 7.5 cm	Ketebalan 10 cm
		(mg/L)		
1.	10	0.0163	0.0157	0.0150
2.	20	0.0154	0.0152	0.0145
3.	30	0.0148	0.0145	0.0143
4.	40	0.0143	0.0138	0.0134
5.	50	0.0129	0.0127	0.0125
6.	60	0.0131	0.0124	0.0120
7.	70	0.0124	0.0113	0.0109
8.	80	0.0115	0.0107	0.0102
9.	90	0.0109	0.0094	0.0086
10.	100	0.0096	0.0081	0.0077

Keterangan : Baku Mutu Merkuri (Hg) untuk pertanian adalah 0,005 mg/L

Dari Tabel 39 terlihat rata-rata konsentrasi merkuri (Hg) yang ada pada wadah penelitian, dengan perlakuan keramik bekas untuk seluruh ketebalan selama pengamatan terjadi penurunan. Penurunan tersebut telah mulai terjadi sejak awal penelitian atau pengambilan data. Dari tiga perlakuan ketebalan keramik bekas, tidak satupun dari ketiga lapisan perlakuan sampai akhir perlakuan atau menit ke-100 yang membuat kadar merkuri (Hg) berada dibawah baku

mutu kualitas air untuk pertanian. Hal ini berarti bahwa bila dibandingkan dengan perlakuan bata bekas dan beton bekas, perlakuan dengan keramik bekas memiliki kemampuan yang paling rendah dalam menurunkan kadar merkuri (Hg).

Berdasarkan hasil data yang didapatkan dari laboratorium, maka didapatkan kesimpulan bahwa ketiga jenis bongkahan tersebut bata bekas merupakan yang tercepat dapat menurunkan konsentrasi logam berat merkuri (Hg) sampai ambang batas kualitas air untuk pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- Khelif, R., Hamza, & Chafai, A. (2010). Head and neck cancer due to heavy metal exposure via tobacco smoking and professional exposure : A review. *Toxicol Appl Pharmacol*, 248: 71–88.
- Adhani, R., & Husaini. (2017). *Logam Berat Sekitar Manusia*. Banjarmasin: Lambung Mangkurat University Press.
- Palar, H. (2008). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Raras, D. P., Yusuf, B., & Alimuddin . (2015). *Analisis Kandungan Ion Logam Berat (Fe, Cd, Cu dan Pb) pada Tanaman Apu-Apu (Pistia Stratiotes L) dengan menggunakan Variasi Waktu*. Samarinda: FMIPA Universitas Mulawarman.
- Titin, A. (2010). *Kontaminasi logam berat pada makanan dan dampaknya pada kesehatan*. Teknubuga ; 2(2): 53-65.
- Darmono. (1995). *Logam Dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*. Jakarta: UI Press.

- Yudo, S. (2006). *Kondisi pencemaran logam berat di perairan sungai*. DKI Jakarta: JAI; 2(1): 1-15.
- Irianti, T. T., Kuswandi, Nuranto, S., & Budiyantri, A. (2017). *Logam Berat & Kesehatan*. Yogyakarta: Grafika Indah.
- Taberina. (2004). *Peranan Mikroorganisme dalam Mengurangi Efek Toksik pada Tanah Terkontaminasi Logam Berat*. Bogor: IPB.
- Yatim, S., & Surtipanti, S. (1979). Distribusi logam berat dalam air permukaan Teluk Jakarta. *Majalah Batan*, 12:1-19.
- Lambert, M., Laven, B., & Green, R. (2000). *New methods of cleaning up heavy metal in soils and water*. Manhattan, KS: Environmental science and technology briefs for citizens, Kansas State University.
- Morawhois, S., Costa, F., & Pereira, M. (2012). Heavy metals and human health, in Environmental health—emerging issues and practice. *Oosthuizen J ed, InTech*, pp. 227–246.

- Sutamihardja. (2006). *Toksikologi Lingkungan. Buku Ajar Program Studi ilmu Lingkungan Universitas Indonesia*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Saeni, M.S. (1989). *Kimia Lingkungan*. Intitut Pertanian Bogor. Bogor.
- Kar, et al. (2008). Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Water. *International Journal on Environment, Science and*, 119-124.
- Djuangsih N, A., & Benito, H. (1982). *Aspek Toksikologi Lingkungan Laporan Analisis Dampak Lingkungan*. Bandung: Lembaga Ekologi Universitas Padjadjaran.
- Dahuri, R., & Arumsyah, S. (1994). *Ekosistem Pesisir. Makalah Pada Marine and Mangement Training*. Kupang, NTT: PSL UNDANA Kupang.
- Nybakken, W. (1992). *Biologi Laut Suatu Pendekatan Ekologis*. Jakarta: PT. Gramedia.
- Yennie, Y., & Murtini, J. T. (2005). Kandungan Logam berat Air Laut, Sedimen dan Daging Kerang Darah (Anadaragranosa) di Perairan Menthok dan Tanjung Jabung Timur. *Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*, 12(1):27- 32.12(1):27-32.

- Rahman, A. (2006). Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) pada Beberapa Jenis Krustasea Di Pantai Batakan dan akisung Kabupaten Tanah Laut Kalimantan Selatan. *Bioscientiae*, Volume 3, Nomor 2.
- Igwe, J., & Abia, A. (2006). A Bioseparation Process for Removing Heavy Metals from Waste Water Using Biosorbents. *African Journal of Biotechnology Vol.5 (12)*, 1167-1179.
- Darmono. (2001). *Lingkungan Hidup dan Pencemaran*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Hutagalung, HP. 1991. *Pencemaran Laut oleh Logam Berat. Dalam Status Pencemaran Laut di Indonesia dan Teknik Pemantauannya*. P30-LIPI. Jakarta.
- Kurniasari, L. (2010). Pemanfaatan Mikroorganisme dan Limbah pertanian Sebagai Bahan Baku Biosorben Logam Berat. *Majalah Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang, MOMENTUM, ISSN 0216 7395, Volume6 Nomor2, 5-8*.
- Arsentina, P. (2008). Logam Berat Pb (Timbal) Pada Jeroan Sapi. *Prosiding PPI Standardisasi*.

- Agustina, T. (2010). Kontaminasi Logam Berat Pada Makanan Dan Dampaknya Pada Kesehatan. *TEKNUBUGA Volume 2 No. 2*.
- Widaningrum, Miskiyah, & Suismono. (2007). Bahaya Kontaminasi Logam Berat dalam Sayuran dan Alternatif Pencegahan Cemarannya. *Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian Vol. 3*.
- Fardiaz. (1996). *Analisis Bahaya dan Pengendalian titik Kritis (HACCP) Makalah disampaikan pada pelatihan pengendalian Mutu dan Keamanan Pangan bagi Staf Pengajar Fakultas Teknologi Pertanian*. Bogor: IPB.
- Astawan, M. (2020, Januari 12). *Awas Koran Bekas!* Retrieved from Kompas cyber media: <http://www.kompas.com>
- Allowey, B., & Ayres. (1997). *Chemical Principles of Environmental Pollution (2nd Ed)*. London: Blackie Academic and Profesional Chapman and Hill.
- Gayatri, & Riza, V. (1994). *Bunga Rampai Residu Pestisida dan Alternatifnya*. Jakarta: PAN Indonesia.
- Charlena. (2009). *Pencemaran Logam Berat Timbal (Pb) dan Cadmium (Cd) Pada Sayur-Sayuran*. Bogor: IPB.

- Nissan, R. (2008). *Bahaya Kontaminasi Logam*. Malang: Kuliner Pesona Bumi Indonesia.
- Badan Standarisasi Nasional, 2009. Batas Maksimum Cemaran Logam Berat Dalam Pangan. Diakses dari:
http://sertifikasibbia.com/upload/logam_berat.pdf.
Tanggal 22 Maret 2020.
- Alsaffar, N., & Hussein, H. (2014). Determination of Heavy Metals in Some Cosmetics Available in Locally Markets. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)*, e-ISSN: 2319-2402, p; ISSN: 2319-2399. Vol 8, Issue 8 Ver. I. PP 09-12.
- BPOM. (2014). *Waspada Keracunan Akibat Kandungan Logam Berat pada Kosmetik*. Jakarta: Badan Pengawas Obat dan Makanan.
- Sartorelli, P., Montomoli, L., & Sisinni, A. (2012). Percutaneous Penetration of Metals and Their Effects on Skin. *Journal of Prevention and Research in Medicine*, 2 (2):158-164.
- Nnorom, I., Igwe, J., & Oji-Nnorom, C. (2005). Trace Metal Contents of Facial (Make-Up) Cosmetics

Commonly Used in Nigeria. *African Journal of Biotechnology Vol. 4 (10)*, PP 1133-1138.

Sihite, H. (2015). *Analisis Kandungan Timbal pada Lipstik Impor dan dalam Negeri Serta Tingkat Pengetahuan Konsumen dan Pedagang Terhadap Lipstik yang Beredar di Pasar Petisah Kota Medan Tahun 2015*. Medan: Fakultas Kesehatan Masyarakat USU.

Stauber, J., Florence, T., Gulson, B., & Dale, L. (1994). Percutaneous Absorption of Inorganic Lead Compounds. *Sci. Total Environ*, 145, 55-70.

Larese, F., Boeniger, M., Maina, G., Adami, G., Spinelli, P., & Damian, A. (2006). Skin Absorption of Inorganic Lead (PbO) and Effect of Skin Cleansers. *JOEM*, Vol. 48. No.7, 692-698.

Hepp, Nancy M, William R, M., & Cheng, J. (2009). Determination of Total Lead In Lipstick: Development and Validation of a Microwave-Assisted Digestion, Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometric Method. *J. Cosmet*, 60: 405-414.

- Sahu, R., Saxena, P., & Johnson, S. (2014). *Heavy Metals in Cosmetics*. New Delhi, India: Centre for Science and Environment, 2(2): 158-164.
- FDA. (2016). *Testing of Cosmetics for Arsenic, Cadmium, Chromium, Cobalt, Lead, Mercury, and Nickel Content*. USA: FDA's.
- WHO. (2011). *Preventing Disease Through Healthy Environments*. Geneva, Switzerland: WHO.
- BPOM. (2006). *Kosmetik Yang Mengandung Bahan Dan Zat Warna Yang Dilarang*. Jakarta: BPOM.
- Supriyadi. (2012). *Analisis Logam Timbal dan Krom pada Bedak Tabur Secara Spektrofotometri Serapan Atom*. Surakarta: Portal Garuda.
- Hansen, M., Johansen, J., & Manne. T. (2003). Chromium Allergy: Significance of Both Cr(III) and Cr(VI). *Contact Dermatitis*, 49, 206-212.
- Amit, S., Rekha, B., Atul, K., Sharad, S., & Dines. (2010). Determination of lead and cadmium in cosmetic products. *Journal of chemical and pharmaceutical research*, 2(6):92-97.
- EPA, U. (1998). *Toxicology Review of Trivalent Chromium*. Washington DC: US EPA.

- WHO. (1992). *Environmental Health Criteria 134: Cadmium: International Programme on Chemical Safety*. Geneva, Switzerland: WHO.
- Balsam, M., & Sagarin, E. (1972). *Cosmetic Science and Technology Volume I. Edisi Kedua, Hal. 63-80*. London: John Wiley and Sons.
- David, L. (2009). Hair Analysis and Heavy Metal. *Hidden Toxicity Detox*, Vol 20, No 2.
- Hussaein, H. (2013). Evaluation of the Concentration of Some Heavy Metals in Hair Dyes in Baghdad. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol. 4 Issue 9, ISSN (Online) : 2319-7064.
- Darelos, Diana. Z., Lauren. A., & Thaman. (2006). *Cosmetic Formulation of Skin Care Product. Taylor & Francis Group. New Yor*, p:137,141,146,157,159.
- Salvador, A., & Chisvert. A. (2007). *Analysis of Cosmetic Products, Elsevier. Oxfordshire: Elsevier, Oxford: 88,94*.
- Jarup.L. (2003). Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, Volume 68, Issue 1, December 2003, Pages 167–182,.
- Ferner, D. (2001). *Toxicity, heavy metals*. eMed J 2(5):1.

- Miller, G., & Connell, W. (1995). *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*. (diterjemahkan oleh Yanti Koestoer dan Sahati). Jakarta: UI Press, p. 366– 369.
- Lu, F. (1995). *Toksikologi Dasar*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.
- Fernanda, L. (2012). *Studi Kandungan Logam Berat Timbal (Pb), Nikel (Ni), Kromium (Cr) Dan Kadmium (Cd) Pada Kerang Hijau (Perna Viridis) Dan Sifat Fraksionasinya Pada Sedimen Laut*. Depok: FMIPA UI.
- Palar, H. (2004). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: Penerbit.
- Mosby CV, Glanze WD, & Anderson KN. (1996). *Mosby CV, Glanze WD, Anderson KN Mosby Medical Encyclopedia*. St. Louis: The Signet: Revised Edition.
- Smedley PL, & Kinniburgh DG. . (2002). *A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters*. *Appl Geochem* 17: 517–568.
- Chowdhury UK , & Biswas BK. (2000). *Groundwater arsenic contamination in Bangladesh and West*

- Bengal, India. *Environ Health Perspect*, 108(5): 393–397.
- Hoque MA, d. (2011). Delineating low-arsenic groundwater environments in the Bengal Aquifer System, Bangladesh. *Appl Geochem*, 26(4): 614–623.
- Martin S, G. (2009). Human health effects of heavy metals. *Environmental Science and Technology Briefs for Citizens*, (15): 1–6.
- Smith AH, Lingas EO, & Rahman M. (2000). Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. *Bull World Health Organ*, 78(9): 1093–1103.
- Mazumder, G. (2008). Chronic arsenic toxicity & human health. *Indian J Med Res*, 128(4): 436–447.
- Henson MC, & Chedrese PJ. (2004). Endocrine Disruption by Cadmium, a Common Environmental Toxicant with Paradoxical Effect on Reproduction. *Exp Biol Med (Maywood)*, 383–392.
- Chakraborty S, & Dutta AR. (2013). Ailing bones and failing kidneys: a case of chronic cadmium toxicity. *Ann Clin Biochem*, 50(5): 492–495.

- Arao, T., & S. Ishikawa. (2006). Review: Genotypic differences in Cadmium concentration and distribution of Soybean and Rice. *JARQ*, 40(1): 21-30.
- Bernard.A. (2008). Cadmium & its adverse effect on human health. *Indian J Med Res*, 128(4): 557–64.
- Mudgal.V. (2010). Effect of toxic metals on human health. *Open Nutraceuticals J*, 3: 94–99.
- Zhitkovich.A. (2005). Importance of chromium-DNA adducts in mutagenicity and toxicity of chromium (VI). *Chem Res Toxicol*, 18(1): 3–11.
- Koutras.GA. (1965). Studies on chromated erythrocytes. Mechanisms of chromate inhibition of glutathione reductase. *Br J Haematol*, 11 (3): 360– 369.
- Schlatter, C., & Kissling, U. (1973). Acute fatal bichromate poisoning. *Beitrag zur Gerichtlichen Medizin*, 30: 382–388.
- O'Brien, T., Xu, J., & Patierno. SR. (2001). *Patierno SR Effects of glutathione on chromium-induced DNA crosslinking and DNA polymerase arrest. In Molecular Mechanisms of Metal Toxicity and Carcinogenesis*. USA: (pp. 173–182). Springer US.

- Clayton. .DB. (1989). *Water pollution at Lowermoore North Cornwall: Report of the Lowermoore incident health advisory committee*, p 22. USA: Truro, Cornwall District Health Authority.
- Kwerski.D. (2009). Human health risk assessment for *aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide*. *JJ Toxicol Environ Health B Crit Rev*, 10(S1): 1–269.
- Rozak, A., & Rochyatun , E. (2007). *Pemantauan Kadar Logam Berat dalam Sedimen di Perairan Teluk Jakarta*. Jakarta: Makara Sains.
- Andia.JB. (1996). Aluminum toxicity: its relationship with bone and ironmetabolism. *Nephrol Dial Transplant 11 Suppl*, 3: 69–73.
- Albretsten. (2006). The toxicity of iron, an essential element. *Veterinary medicine*, 82–90.
- Oswelier.GD. (1985). Clinical and diagnostic veterinary toxicology. *Kendall/Hunt Publishing Company*.
- Hillman.RS. (2001). *Chapter 54. Hematopoietic agents: growth factors, minerals, and vitamins, in Goodman & Gilman's The Pharmacological Basis of Therapeutics, 10th Edition (Hardman JG,*

- Limbird LE, Gilman AG eds), pp. 1487–1518.*
New York: New York: McGraw-Hill.
- Palar. (1973). *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat, Litbang Teknologi Mineral Direktorat Jendral Pertambangan Umum.* Jakarta: Departemen Pertambangan dan Energi.
- Wong.W.W, Abbas, Liong, & Azhar. (2008). Modification of Durian Rind Pectin for Improving Biosorbent Ability. *International Food Research Journal*, 15(3), 363-365.
- Markowitz.M. (2000). Lead Poisoning. *Pediatr Rev*, 21 (10): 327–335.
- Papanikolaou.NC. (2005). Lead toxicity update. *A brief review.*
- Teo.J, Goh.K, Ahuja, & Poon.W. (1997). Intracranial vascular calcifications, glioblastoma multiforme, and lead poisoning. *AJNR*, 18: 576–579.
- Alina M, Azrina A, Mohd Yunus AS, & Mohd Zakiuddin S. (2012). Heavy metals (mercury, arsenic, cadmium, plumbum) in selected marine fish and shellfish along the Straits of Malacca. *Int Food Res J*, 19(1): 135–140.

- Reilly, C. (2007). *Pollutants in Food—Metals and Metalloids, in Mineral Components in Foods*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, pp. 363– 388: Szefer P, Nriagu JO eds.
- Chen, Cao, Zhang, & Qiao. (2010). Heavy Metals in Rice and Garden Vegetables and Their Potential Health Risk to Inhabitants in Industrial Zone in Jiangsu, China. *Journal of Environmental Sciences*, 22, 1792-1799.
- Lindh, Hudecek, Danersund, & Eriksson. (2002). Removal of Dental Amalgam and Other Metal Alloys Supported by Antioxidant Therapy Alleviates Symptoms and Improve Quality of Life in Patients With Amalgam- Associated Ill Health. *Neuroendocrinol Lett*, 23, 459–82.
- Widowati. (2009). *Efek Toksik Logam 2*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Patrick.L. (2003). Toxic Metals and Antioxidants: Part II., The Role of Antioxidants in Arsenic and Cadmium Toxicity. *Altern Med Rev*, 8(2), 106–128.
- Ferrara, Mazzolai, & Lanzillotta. (2000). Temporal trends in gaseous mercury evasion from the

- Mediterranean seawaters. *Sci Tot Enviro*, 259(1–3), 183– 190.
- Ashe, W., Largent, E., Dutra, F., & Hubbard. (1953). Behavior of Mercury in the Animal Organism Following Inhalation. *AMA Arch Ind Hyg Occup Med*, 7(1), 19–43.
- Soemirat.J. (2005). *Toksikologi Lingkungan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Irwan, A., Noer, K., & Yenny, E. (2008). *Kajian Penyerapan Logam Cd, Ni, dan Pb Dengan Variasi Konsentrasi Pada Akar, Batang dan Daun Tanaman Bayam*. Banjarmasin: FMIPA Universitas Lambung Mangkurat.
- Suryati, T., & Priyanto, B. (2003). Eliminasi Logam Berat Kadmium dalam Air Limbah Menggunakan Tanaman Air. *J.Tek.Ling P3TL-BPPT*, 4(3) : 143-147.
- Mangkoedihardjo, & Samudro. (2009). *Ekotoksikologi Teknosfer*. Surabaya: Guna Widya.
- Sorek. (2008). Phytoscreening : The use of trees for discovering subsurface contamination revision. *VOCs. Environ. Sci. Technol*, 42(2), 536–542.

- Burken, J., Vroblecky, & Balouet. (2011). Phytoforensics, Dendrochemistry, and Phytoscreening: New Green Tools for Delineating Contaminants from Past and Present. *Environmental Science and Technology*, 45, 6218-6226.
- Undang.dkk. (2008). *Teknologi pengendalian pencemaran lahan sawah. Tanah sawah dan teknologi pengelolaannya*. Jakarta: Puslitbang Tanah dan Agroklimat, Badan Litbang Departemen Pertanian.
- Neis, & Bittner, A. (1989). *Memfaatkan Air Limbah*. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Allow, B. (1990). *Heavy Metal in Soils*. New York: Jhon Willey and Sons Inc.
- Hardiani, H. (2009). Potensi Tanaman Dalam Mengakumulasi Logam Cu Pada Media Tanah Terkontaminasi Limbah Padat Industri Kertas. *Bioscience*, 44 (1), 27-40.
- Salisbury, & Ross. (1995). *Salisbury, F.B. & Ross, C.W.(1995). Fisiologi Tumbuhan. Jilid I*. Bandung: Penerbit ITB.
- Raskin.I. (Current opinion, Biotechnology,). Bioconcentration of Heavy Metal by Plants. *1994*, (5), 285-290.

- Siswanto. (2009). *Respon Pertumbuhan Kayu Apu (Pistia stratiotes L.) Jagung (Zea mays L.) dan Kacang Tolo (Vigna sinensis L.) terhadap Pencemar Timbal (Pb)*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Ginting.P. (1995). *Mencegah dan Mengendalikan Pencemaran Industri*. Jakarta: Pustaka Sinar Harapan.
- Shah.SL. (2005). Effects of heavy metal accumulation on the 96-h LC50 values in *Tecoma tinctoria* L., 1758. *Research article. Turk. J. Vet. Anim. Sci*, 29:139-144.
- Sorek, A. (2008). Phytoscreening : The use of trees for discovering subsurface contamination. *VOCs. Environ. Sci. Technol*, 42(2), 536–542.
- Babu, A., & Kim. (2013). Babu, A.G., Kim Enhancement of Heavy Metal Phytoremediasi by *Alnus firma* with Endophytic *Bacillus thuringiensis* GDB-1. *Journal of Hazardous Materials*, 250- 251 (2013) 477-483.
- Doumet, S., Lamperi, L., Checchini, L., Azzarello, L., & Azzarello. (2008). Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia*

- tomentosa, in a pilot- scale assisted phytoremediation study: Influence of different complexing agents. *Chemosphere* , 72 (2008) 1481 -1490.
- Muhammad, A., Shafeeq , A., Butt, M., Rizki, Z., Chungthai, M., & Rehman, S. (2008). Decolorization and removal of cod and bod from raw and biotreated textile dye bath effluent through advanced oxidation processes, (AOPS). *Braz. J. Chem. Eng*, 25, 453-459.
- Lumbanraja, P. (2014). *Mikroorganisma dalam Bioremediasi*. Medan: Sekolah Pascasarjana Universitas Sumatera Utara.
- Geological Survey. (2007). *Glossary--Biodegradation*. U.S: Geological Survey.
- (EPA), E. P. (2009). *Glossary of technical terms*. US: U.S. Environmental Protection Agency.
- Anwar, C., & Hidayat, A. (2017). *Telaah Mendalam tentang Bioremediasi: Teori dan Aplikasinya dalam Upaya Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: IPB Press.
- Vidali, M. (2001). Bioremediation An overview. *Pure and Applied Chemistry*, 73: 1163–1172.

- Watanabe, K. (2001). Microorganisms relevant to bioremediation. *Current Opinion in Biotechnology*, 12: 237–241.
- Dash, H., Mangwani, N., Chakraborty, J., & Kumari. (2013). Marine bacteria: potential candidate for enhanced bioremediasi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76: 561–571.
- Hidayat, A., & Anwar, C. (2017). *Telaah Mendalam tentang Bioremediasi: Teori dan Aplikasinya dalam Upaya Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: IPB Press.
- Singh, A., Vikineswary, S., Kapoor, A., & Sekaran, M. (World Journal of Microbiology & Biotechnology). Enzymes from spent mushroom substrate of *Pleurotus sajor-caju* for the decolourisation and detoxification of textile dyes. 2011, 27: 535–545.
- (EPA), E. P. (2000). *Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents: Fundamentals and Field Applications*, EPA-542-R00-008. Washington, DC: fffice of Solid Waste and Emergency Response, 2000.

Rusnam, Asmiwarti dan Efrizal. 2013. Metode Penurunan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) Dengan Menggunakan Berbagai Tanaman Air (Fitoremediasi) (Tahun 1). Dibiayai dengan Dana DP2M Dirjen Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI Melalui DIPA Unand No: Dipa 023.04.24.15061/2013.

Rusnam and Efrizal. 2016. The Ability of Water Plants to Reduce the Level of Mercury Pollution in Water Quality in Irrigation. *International Journal of Waste Resources*. Vol.6 (2) (2016) ISSN: 2252-5211. Pages : 1-5.

Rusnam, Efrizal dan Suarni. 2014. Metode Penurunan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) Dengan Menggunakan Berbagai Tanaman Air (Fitoremediasi) (Tahun 2). Dibiayai dengan Dana DP2M Dirjen Pendidikan Tinggi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI Melalui DIPA Unand No: Dipa 023.04.24.15061/2014.

Rusnam, Efrizal dan Suarni. 2015. Teknologi *Fitoteknologi* Dalam Pemulihan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) Dengan Menggunakan Tanaman Air Enceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) Untuk Irigasi (Tahun 1).

Dibiayai dengan Dana DP2M Dirjen Pendidikan Tinggi, Kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi. No:030/SP2H/PL/DIT.LITABMAS/II/2015.

Rusnam, Efrizal dan Suarni T. 2018. The Phytoremediation Technology in the Recovery of Mercury (Hg) Pollution by Using Water Hyacinth Plant (*Eichhornia crassipes*) for Water Quality of Irrigation. Journal of Industrial Pollution Control. Vol.32 (1) 2016. ISSN: 0970-2083. Pages 356-360.

Rusnam, Efrizal dan Suarni. 2016. Teknologi *Fitoteknologi* Dalam Pemulihan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg) Dengan Menggunakan Tanaman Air Enceng Gondok (*Eichhornia crassipes*) Untuk Irigasi (Tahun 2). Dibiayai Oleh Direktorat Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, No: 020/SP2H/LT/DPRM/II/2016.

Rusnam dan Efrizal. 2017. Pemulihan Tingkat Pencemaran Logam Berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) dengan Teknologi *Fitoteknologi* untuk Kualitas Air Perikanan dan Pertanian (Tahun 1). Dibiayai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi,

Kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi, sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian Nomor: 059/SP2H/PL/LT/DRPM/IV/2017.

Rusnam dan Efrizal. 2018. Pemulihan Tingkat Pencemaran Logam Berat Kadmium (Cd), Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) dengan Teknologi *Fitoteknologi* untuk Kualitas Air Perikanan dan Pertanian (Tahun 2). Dibiayai oleh Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian Nomor: 050/SP2H/PL/LT/DRPM/2018.

Rusnam, Efrizal dan Suarni T. 2018. The Phytoremediation Technology in the Recovery of Mercury (Hg) Pollution by Using Water Hyacinth Plant (*Eichhornia crassipes*) for Water Quality of Irrigation. *Journal of Industrial Pollution Control*. Vol.32 (1) 2016. ISSN: 0970-2083. Pages 356-360.

Rusnam, Efrizal dan N Azkha. 2018. Efektifitas Bongkahan Bekas Bangunan dalam Penurunan Tingkat Pencemaran Merkuri (Hg). Dibiayai oleh Universitas Andalas Sesuai dengan Kontrak Peneliti Nomor: 07/UN.16.17/PP.RGB/LPPM/2018.

Rusnam, Efrizal dan N Azkha. 2020. The Ability of Chunks of Building in the Recovery of Mercury (Hg) Pollution for Water Quality of Agriculture. International Conference of Sustainability Agriculture and Biosystem. IOP Publishing. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 515 (2020) 012080.

BIODATA PENULIS 1



Prof. Dr. Ir. Rusnam, MS lahir di Durian Ambalau Padang Sago Padang Pariaman, Sumatera Barat pada tanggal 4 September 1963. Menempuh pendidikan sekolah dasar di SDN 2 Padang Sago Padang Pariaman, lulus pada tahun 1976.

Selanjutnya menempuh pendidikan menengah pertama di SMP Padang Sago Padang Pariaman, lulus pada tahun 1980. Jenjang pendidikan menengah atas ditempuh di SMA Pariaman lulus pada tahun 1983.

Rusnam menempuh pendidikan Strata 1 (sarjana) dari jurusan Mekanisasi Pertanian Universitas Andalas Padang tahun 1987. Kemudian meraih gelar Magister Sains dari jurusan Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan Institut Pertanian Bogor (IPB) Bogor pada tahun 1993. Rusnam meraih gelar doktor dari jurusan *Soil and Water Engineering* Universiti Putra Malaysia (UPM) Serdang, Malaysia pada tahun 2006.

Rusnam telah menulis pada jurnal internasional sebagai berikut: (1) W Aimrun, MSM Amin, **M Rusnam**, D

Ahmad, MM Hanafi, AR Anuar. 2009. *Bulk soil electrical conductivity as an estimator of nutrients in the maize cultivated land*. European Journal of Scientific Research 31 (1), 37-51. (2)

Rusnam, A MS M, TS Lee. 2010. *Runoff quality index for area under maize cultivation*. The Institution of Engineers, Malaysia. (3)

Rusnam, Asmiwarti and Maidar Pratomo. 2013. *Reduction of Metal Mercury Concentration by The Plant's Eye catfish (*Azolla pinnata R. Br.*) For Irrigation Water*. International. Prosiding : The International Symposium on Agricultural and Biosystem Engineering (ISABE) 2013. (4)

Rusnam, A Asmiwarti, E Efrizal, A Sofyani. 2013. *The influence of Water Hyacinth to Decrease the Heavy Metals Mercury (Hg) Concentration for Irrigation*. International Journal of Advanced Science Engineering Information Technology, Vol. 3 (2013) No. 6, pages: 23-25. (5)

Rusnam. 2013. Analisis spasial besaran tingkat erosi pada tiap satuan lahan di sub das batang kandis. Jurnal Dampak 10 [2]. (6)

Rusnam, Efrizal and Suarni T. 2016. *The Phytoremediation Technology in The Recovery of Mercury Pollution by Using Water Hyacinth Plant (*Eichhornia crassipes*) for Water Quality of Irrigation*. Journal of Industrial Pollution Control. Vol. 32 No. 1, pages: 356-630. (7)

Rusnam M., Neni Gusmanizar, Farrah Aini Dahalan, Noor Azlina Masdor, Siti Aqlima Ahmad, Mohd. Shukri Shukor, Muhamad Akhmal Hakim Roslan, Mohd. Yunus Shukor. 2016. *Isolation and Characterization of a Molybdenum-Reducing*

and Amide-Degrading burkholderia SP. Strain Neni-11 in Soils from West Sumatera, Indonesia. IIOABJ. Vol. 7 No. 1, pages: 28-40. (8) **Rusnam** and Efrizal. 2016. *The Ability of Water Plants to Reduce the Level of Mercury Pollution in Water Quality in Irrigation*. International Journal of Waste Resources. Vol.6 No. 2 ISSN: 2252-5211. (9) **Rusnam**, Efrizal and Suarni T. 2016. *The phytoremediation Technology in the recorvery of Mercury (Hg) Pollution Plant by Using Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) for Water Quality of Irrigation*. Journal of Indusrial Pollution Control. Vol.32 No. 1. ISSN: 0970-2083. (10) **Rusnam**, Nola Yunita and Isril Berd. 2016. *The Effects of Irrigation Water Containing the Lowest Water Quality Threshold of Plumbum (Pb) on Spinach (Amaranthus sp)*. Taiwan Water Conservancy. Vol. 64 No. 4 (online-firs). ISSN: 04921550, 04921505. (11) N Gusmanizar, MIE Halmi, **Rusnam**, MFA Rahman, MS Shukor, NS Azmi .2016. *Isolation and characterization of a molybdenum-reducing and azo-dye decolorizing Serratia marcescens strain neni-1 from Indonesian soil*. Journal of Urban and Environmental Engineering 10 (1), 113. (12) MF Rahman, **Rusnam**, N Gusmanizar, NA Masdor, CH Lee, MS Shukor. 2016. *Molybdate-reducing and SDS-degrading Enterobacter sp. Strain Neni-13*. Nova Biotechnologica et Chimica 15 (2), 166-181. (13) **Rusnam**, N Gusmanizar, FA Dahalan, NA Masdor, SA Ahmad, MS Shukor. 2016. *Isolation and characterization of a molybdenum-reducing and amide-degrading burkholderia SP*.

Strain neni-11 in soils from west sumatera, Indonesia. The IIOAB Journal 7 (1), 28. (14) Efrizal and **Rusnam**. 2017. The Influence of Dietary Vitamin E on the Gonad Development of Blue Swimming Crab *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758). Australian Journal of Basic and Applied Sciences. Vol. 11 (2017) No. 1, pages: 7-15. (15) **Rusnam**, Nola Yunita and Isril Berd. 2017. *The Effects of Irrigation Water Containing the Lowest Water Quality Threshold of Plumbum (Pb) on Spinach (Amaranthus sp).* Taiwan Water Conservancy. Vol. 65 (2017) No. 1, pages: 39-43. (16) Neni Gusmanizar, Mohd Izuan Effendi Halmi, **Rusnam** Mansur, Mohd Fadhil Abd Rahman, Mohd Shukri Shukor, Nina Suhaity Azmi, Mohd Yunus Shukor. 2017. *Isolation and Characterization of a Molybdenum-Reducing and Azo-Dye Decolorizing Serratia Marcescens Strain Neni-1 From Indonesian Soil.* Journal of Urban and Environmental Engineering. Vol. 28 No. 1, pages: 69-90. (17) **Rusnam M**, Gusmanizar N, Roslan MA, Ahmad SA, Shukor MY. 2017. *Isolation and characterization of a Molybdenum reducing and Metanil Yellow Dye decolorizing Bacillus sp. Neni strain 10 in Soils from West Sumatra, Indonesia.* Tropical Life Sciences Research. Vol. 28 No. 1 ISSN: 1985-3718. (18) **Rusnam M**, N Gusmanizar. 2017. *Characterization of the growth on SDS by Enterobacter sp. strain Neni-13.* Journal of Biochemistry, Microbiology and Biotechnology 5 (2), 28-32. (19) **Rusnam**, N Gusmanizar, MAH Roslan, SA Ahmad, MY Shukor. 2017.

Isolation and Characterisation of a Molybdenum-reducing and Metanil Yellow Dye-decolourising Bacillus sp. strain Neni-10 in Soils from West Sumatera, Indonesia. Tropical life sciences research 28 (1), 69. (20) **Rusnam**. 2018. *Determination of IC50 values of Allivum sativum methanolic extract against Aeromonas hydrophila.* Journal of Biochemistry, Microbiology and Biotechnology. In press 2018 July issue. (21) **Rusnam**. 2018. *Bacterial inhibition activity of methanolic extract from Salvia officinalis: Determination of the IC50 value by nonlinear regression.* Journal of Environmental Microbiology and Toxicology. In press 2018 July issue. (22) Efrizal, **Rusnam**, Suryati, Yolanda, N., Syaiful, F.L., and Mardiah, A. 2019. *Evaluation of Formulated Diets Enriched by Spinach Extracts for the Broodstock Females, Portunus pelagicus (Linnaeus, 1758).* Pakistan Journal of Biological Sciences. 22 (6): 283-290, 2019. (23) [Efrizal Efrizal](#) , Zuhri Syam, **Rusnam**, Suryati Suryati. 2019. Growth performance and survival rate of *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) broodstock females fed varying doses of amaranth extracts [version 1; peer review: 2 approved with reservations]. F1000Research. (24) Efrizal, Indra J. Zakaria and **Rusnam**, 2020. *Effects of formulated diets supplemented with vitamin E on the egg quality and ovi somatic index of female*

Portunus pelagicus brookstock. AACL Bioflux, 2020, Volume 13, Issue 2. (25) **Rusnam**, Efrizal dan N Azkha. 2020. *The Ability of Chunks of Building in the Recovery of Mercury (Hg) Pollution for Water Quality of Agriculture*. International Conference of Sustainability Agriculture and Biosystem. IOP Publishing. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 515 (2020) 012080.

Rusnam pernah menjabat sebagai : (1) Sekretaris Jurusan Teknologi Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Andalas periode 1997 – 2000. (2) Sekretaris Dekan Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas, periode 2010 – 2012. (3) Wakil Dekan II Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas, periode 2012 – 2014. (4) Wakil Dekan II Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas, periode 2014 – 2018. (5) Koordinator Prodi Magister Teknik Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian, periode 2018 – 2022.

BIODATA PENULIS 2



Dr. Ir. Efrizal, MS lahir di Muara Rumbai, Pekanbaru, RIAU, pada tanggal 11 Mei 1969. Menempuh pendidikan sekolah dasar di SDN 4 Kijang, Kepulauan RIAU, lulus pada tahun 1982. Selanjutnya menempuh pendidikan menengah

pertama di SMPN 2 Tanjung Uban Bintan Utara, Kepulauan RIAU, lulus pada tahun 1985. Jenjang pendidikan menengah atas ditempuh di SMAN 2 Tanjung Pinang, Kepulauan RIAU, lulus pada tahun 1988.

Efrizal menempuh pendidikan Strata 1 (sarjana) dari jurusan Budidaya Perairan (BDP), Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Bung Hatta Padang tahun 1992. Kemudian meraih gelar Magister Sains dari program studi Biologi Reproduksi, Institut Pertanian Bogor (IPB) Bogor pada tahun 1995. Efrizal meraih gelar Doctor of Philosophy (PhD) dari jurusan Aquatic Biology, Faculty of Science, Universiti Putra Malaysia (UPM) Serdang, Malaysia pada tahun 2006.

Efrizal telah menulis pada jurnal internasional sebagai berikut: (1) Rusnam, A Asmiwarti, E Efrizal, A Sofyani. 2013. The influence of Water Hyacinth to Decrease the Heavy Metals Mercury (Hg) Concentration for Irrigation. International Journal of Advanced Science Engineering Information Technology, Vol. 3 (2013) No. 6, pages: 23-25. (2) Efrizal, A. Arshad, M.S. Kamarudin, C.R. Saad and S.M.N. Amin., 2015. Some Aspects of Reproductive Biology of Blue Swimming Crab *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) Under Laboratory Conditions. Journal of Fisheries and Aquatic Science. 1-13. (3) Rusnam, Efrizal and Suarni T. 2016. The Phytoremediation Technology in The Recovery of Mercury Pollution by Using Water Hyacinth Plant (*Eichhornia crassipes*) for Water Quality of Irrigation. Journal of Industrial Pollution Control. Vol. 32 No. 1, pages: 356-630. (4) Rusnam and Efrizal. 2016. The Ability of Water Plants to Reduce the Level of Mercury Pollution in Water Quality in Irrigation. International Journal of Waste Resources. Vol.6 No. 2 ISSN: 2252-5211. (5) Rusnam, Efrizal and Suarni T. 2016. The phytoremediation Technology in the recovery of Mercury (Hg) Pollution Plant by Using Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for Water

Quality of Irrigation. Journal of Industrial Pollution Control. Vol.32 No. 1. ISSN: 0970-2083. (6) Efrizal, 2017. Effects of stocking density on survival rate and larval development of blue swimming crab, *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) under laboratory conditions. AACL Bioflux. 10 (2): 217-226. (7) Efrizal and Rusnam. 2017. The Influence of Dietary Vitamin E on the Gonad Development of Blue Swimming Crab *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758). Australian Journal of Basic and Applied Sciences. Vol. 11 (2017) No. 1, pages: 7-15. (8) Efrizal, Rusnam, Suryati, Yolanda, N., Syaiful, F.L., and Mardiah, A. 2019. Evaluation of Formulated Diets Enriched by Spinach Extracts for the Broodstock Females, *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758). Pakistan Journal of Biological Sciences. 22 (6): 283-290, 2019. (9) Efrizal, Zuhri Syam, Rusnam, Suryati. 2019. Growth performance and survival rate of *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) broodstock females fed varying doses of amaranth extracts [version 1; peer review: 2 approved with reservations]. F1000Research. (10) : Indra Junaidi Zakaria, Rera Agung Syukra, Izmiarti and Efrizal. 2019. Growth rate and carbon absorption of coral transplantation by the binding and gluing methods at Taman Nirwana. Pakistan Journal of Biological Sciences. 22 (4): 188-195. (11) Efrizal, Indra J. Zakaria and

Rusnam, 2020. Effects of formulated diets supplemented with vitamin E on the egg quality and ovi somatic index of female *Portunus pelagicus* brookstock. *AACL Bioflux*, 2020, Volume 13, Issue 2. (12) Rusnam, Efrizal dan N Azkha. 2020. The Ability of Chunks of Building in the Recovery of Mercury (Hg) Pollution for Water Quality of Agriculture. International Conference of Sustainability Agriculture and Biosystem. IOP Publishing. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 515 (2020) 012080.

Efrizal pernah menjabat sebagai : (1) Kepala Pusat Komputer Universitas Bung Hatta periode 1997 – 2000. (2) Sekretaris Jurusan Budidaya Perairan (BDP Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Bung Hatta, periode 1998 – 2002. (3) Ketua Jurusan Budidaya Perairan (BDP Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Bung Hatta, periode 2007 – 2008. (4) Pimpinan Redaksi *Journal Garing*, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Bung Hatta, periode 1995 – 2007. (5) Ketua Badan Pengelola Pulau Pieh (Devisi Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat) Universitas Bung Hatta, periode 1996 – 2008. (6) Kepala Laboratorium Fisiologi Hewan Jurusan Biologi FMIPA Unand, periode 2011 – 2014