

FITOTEKNOLOGI DAN EFEK FITOREMEDIASI

(BUKU AJAR PENDUKUNG MATA KULIAH BIOREMEDIASI)

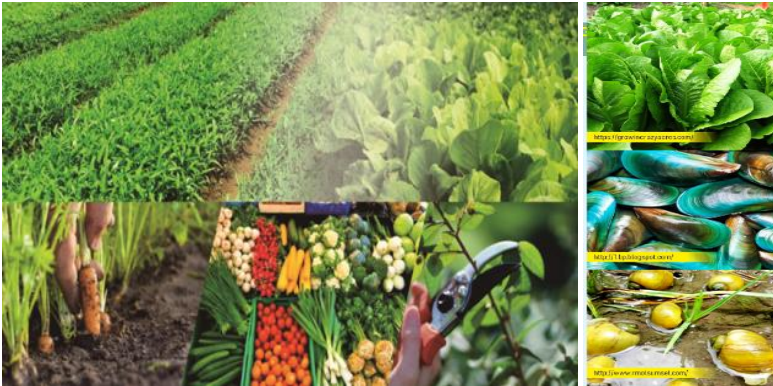
**Dr. HENING WIDOWATI, M.Si.
Dr. AGUS SUTANTO, M.Si.
WIDYA SARTIKA SULISTIANI, S.Si., M.Sc.**



**MAGISTER PENDIDIKAN BIOLOGI
PASCASARJANA UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH METRO
2018**

FITOTEKNOLOGI DAN EFEK FITOREMEDIASI

(BUKU AJAR PENDUKUNG MATA KULIAH BIOREMEDIASI)



Dr. HENING WIDOWATI, M.Si.

Dr. AGUS SUTANTO, M.Si.

WIDYA SARTIKA SULISTIANI, S.Si., M.Sc.

Dibiayai oleh:

Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat
Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan
Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi
Sesuai dengan Kontrak Penelitian
Nomor: 2108/SP2H/K2/KM/2018 Tanggal 12 April 2018

**MAGISTER PENDIDIKAN BIOLOGI
PASCASARJANA UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH METRO
2018**

FITOTEKNOLOGI DAN EFEK FITOREMEDIASI

xxxiv, 123 hlm, Tab., illus., 16 x 23 cm

Hak Cipta © 2018

Cetakan Perdana 2018

ISBN : 978-602-52714-6-5

Lay-out : Benten
Cover Designer: Benten

Hak Cipta dilindungi Undang-undang.
Dilarang memperbanyak karya tulis ini
dalam bentuk dan dengan cara apapun,
termasuk fotocopy, tanpa izin tertulis dari
penerbit. Pengutipan harap menyebutkan
sumbernya.

Sanksi Pelanggaran Pasal 72: Undang-undang No. 19
Tahun 2002, Tentang Hak Cipta:

1. Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)
2. Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, penulisan buku ajar Fitoteknologi berfokus pada topik Efek Bioremediasi ini dapat terselesaikan.

Terima kasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia, Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat Universitas Muhammadiyah Metro, dan Ketua Program Studi Pendidikan Biologi Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Metro, yang telah memberi kesempatan dan memfasilitasi tersusunnya Buku Ajar ini.

Buku Ajar ini merupakan penyempurnaan serta melengkapi buku ajar sebelumnya, yaitu "Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar", "Manajemen Budidaya Sayuran untuk Perlindungan Konsumen terhadap Cemaran Logam Berat", dan diharapkan dapat membantu mahasiswa dalam menambah wawasan dan mencapai tujuan mata kuliah Bioremediasi pada program pascasarjana S2 Pendidikan Biologi.

Temuan teknologi lama telah diketahui, tumbuhan dapat dimanfaatkan untuk perancangan dan proses sanitasi lingkungan, yang selanjutnya menjadi kajian utama fitoteknologi. Secara umum fitoteknologi ini merupakan penerapan ilmu dan teknologi untuk mengkaji dan menyiapkan solusi masalah lingkungan dengan menggunakan tumbuhan. Fitoremediasi merupakan metode perawatan lingkungan yang memanfaatkan kemampuan sebagian spesies tanaman untuk mengakumulasi elemen-elemen tertentu, termasuk logam berat, dengan jumlah melebihi kebutuhan nutrisi tanaman tersebut. Tanaman yang tumbuh secara spontan pada tanah antropogenik dan alami, mencerminkan adaptasinya terhadap kondisi pertumbuhan tertentu. Tanaman yang mengikat bentuk-bentuk elemen yang bisa berpindah "membersihkan" permukaan substrat tersebut sekaligus mengeringkan dan menstabilkannya. Tanaman ini juga memainkan peran sebagai benteng penghalang bagi area sekitarnya.

Pengetahuan tentang kapasitas akumulasi elemen biomassa yang memungkinkan dilakukannya pengembangan metode perawatan terhadap massa tanaman yang diperoleh nampaknya sangat penting, begitu juga asesmen terhadap kemungkinan sanitasi tanah melalui tanaman. Tanaman yang memiliki kemampuan tertentu untuk menyerap elemen dari udara, air, dan tanah serta mengakumulasinya dianggap sebagai indikator dan oleh sebab itu tanaman ini disebut fitoakumulator dan berperan sebagai bioakumulator. Cakupan vegetasi sangat penting dalam upaya remediasi lahan yang terkontaminasi karena langkah ini menstabilkan dan mengeringkannya, mengawasi proses biologis, dan juga memberikan perlindungan bagi area-area sekitarnya.

Namun, bagaimana apabila potensi fitoremediasi dan fitoakumulasi itu dilakukan pada tumbuhan yang dikonsumsi? Perilaku fitoremediasi dan bioakumulasi, tentu membutuhkan penanganan dan teknologi, agar menjadi solusi terhadap efek dan dampak negatif yang berpotensi muncul dalam peristiwa ini. Untuk itulah, dibutuhkan teknologi terkait peran tumbuhan yang dahsyat sekaligus antagonis dalam hubungan timbal baliknya sebagai pembersih sekaligus di sisi sebaliknya diperlukannya tumbuhan yang bebas polutan, sehingga dapat menyehatkan dan menjadi sumber kebaikan dalam lingkungan dan kehidupan. Didasarkan pada keadaan itu, dirasa penting memberikan wawasan kepada mahasiswa untuk menanggulangi hal ini. Demikian halnya yang terjadi pada biota lain di lingkungannya. Tidak terbatas tumbuhan yang memiliki peran dan peluang menyerap polutan. Semua biota di lingkungannya juga berpeluang untuk itu. Sehingga diperlukan pemahaman yang komprehensif terhadap penanganan polutan di lingkungannya, apalagi terjadi pada suatu biota yang menjadi alternatif bahan pangan dan dikonsumsi.

Mata kuliah bioremediasi adalah salah satu dari mata kuliah kelompok keahlian biologi Matakuliah ini mengkaji dan menganalisis tentang mikroorganisme, hewan, dan tumbuhan berkaitan dengan kemampuannya menguraikan polutan lingkungan, melalui teknologi-teknologi bioproses. Mata kuliah bioremediasi penting untuk memberikan pemahaman kepada mahasiswa sehingga menyadari kedudukannya sebagai makhluk Allah SWT yang diciptakan sebagai

ciptaan yang sempurna dan menjadikan berbagai makhluk hidup beranekaragam dengan struktur dan fungsi yang tertentu. Masing-masing memiliki peran dan manfaat yang berbeda, sesuai yang Dia kehendaki dalam penciptaan makhluk hidup, sehingga mahasiswa semakin tunduk kepada Allah SWT Penciptanya.

Akhir kata, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk perbaikan dan kesempurnaan buku ajar ini.

Penyusun

PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU AJAR/BAHAN BACAAN INI

Bacaan ini adalah Buku Ajar yang ditujukan sebagai bahan acuan pendukung mata kuliah Bioremediasi. Sebelum mempelajari isi buku ini, Sdr. diminta untuk mencermati tujuan pembelajaran dan rencana pembelajaran mata kuliah Bioremediasi, khususnya Kompetensi Dasar 7, 8, 9, yaitu 7. Menganalisis fitoremediasi; 8. Mengkaji peranan tumbuhan air sebagai fitoremediator pencemar, 9. Mengkaji Efek Fitoremediasi terhadap Gizi Pangan.

Konsekuensinya, sebelum masuk pada setiap bab baru, Sdr wajib memahami terlebih dahulu tujuan pembelajaran serta konsep-konsep yang dituntut untuk Sdr. temukan dengan menggali sumber-sumber pustaka alternatif, yang tertera pada teks buku, secara mandiri, atau melakukan kegiatan lain yang diminta. Akan lebih baik apabila Sdr menambah wacana konsep yang dimaksudkan pada bab tersebut, juga menggali pada sumber-sumber pustaka atau penelitian sebelumnya.

Camkanlah pernyataan-pernyataan terkait nilai-nilai Keislaman dan kandungan Al Qur'an pada setiap Bab nya. Selanjutnya untuk memahami materi, disediakan butir-butir kegiatan dan pertanyaan pemicu diskusi pematapan materi. Silahkan Sdr. mengembangkannya sehingga memperoleh pemahamannya secara mendalam.

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU	v
DAFTAR ISI	Vii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
RENCANA PEMBELAJARAN MATAKULIAH BIOREMEDIASI	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Panduan Mempelajari Bab I (Pendahuluan) ..	1
B. Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Bab I (Pendahuluan)..	1
C. Fitoteknologi dalam Pengelolaan Lingkungan.	3
1. Self Purification	3
2. Pencemaran	3
3. Logam Berat	3
4. Fitoteknologi dan Solusi Masalah Pencemaran.....	3 3
5. Fitoakumulator dan Bioakumulator	3
6. Pengertian Umum Fitoremediasi	3
7. Macam proses dalam fitoremediasi	3
8. Pengertian Umum Fitoekstraksi	3
9. Pengertian Umum Fitostabilisasi	3
D. Fitoremediasi dan Dampak Fitoremediator pada Tanaman yang Dikonsumsi	3
1. Akumulasi logam dan pencemar pada bahan pangan	3
2. Perjalanan logam dan pencemar dalam lingkungan	4
3. Proses-proses fitoremediasi	4
4. Rizofiltrasi	4
5. Fitofiltrasi	4
6. Fitomobilisasi	4
7. Fitodegradasi	4
8. Fitoekstraksi, fitoakumulasi, fitoabsorpsi, atau fitoresapan.....	4
9. Fitodegradasi, fitolignifikasi, atau fitotransformasi	4
10. Fitovolatilisasi	4
11. Fitoteknologi	4
12. Tumbuhan hiperakumulator	4
13. Hubungan transpirasi dengan fitoremediasi	4
14. Hubungan ciri & karakter tumbuhan (akar, batang, daun, dll) terhadap kemampuan	

fitoremediasi	4
15. Metode <i>wetland</i> secara <i>wastewater garden</i> (WWG) di Bali dan sistem saringan pasir tanaman dalam pengelolaan limbah	4
16. Potensi kangkung jenis sayuran sebagai fitoremediator berbagai logam berat di antaranya, As, Pb, Zn, Cu	4
17. Keuntungan pengolahan limbah secara biologi	4
18. Kerawanan keamanan pangan akibat pencemar	4
19. Sumber utama kontaminan logam berat pada bahan pangan	4
20. Jenis sayuran yang mudah menyerap logam berat	4
21. Logam berat dalam jaringan tanaman dan masuknya ke dalam siklus rantai makanan	4
22. Interaksi logam berat dengan enzim, protein, DNA serta metabolit lainnya, dan efeknya bagi kesehatan tubuh	4
E. Pemantapan Materi	5

BAB II CEMARAN LOGAM BERAT DAN EFEKNYA BAGI INDIVIDU DAN EKOSISTEM	7
A. Panduan Mempelajari Bab II	7
B. Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Materi Cemaran Logam Berat dan Efeknya bagi Individu dan Ekosistem	7
C. Pencemaran Logam Berat	12
1. Sumber Logam Berat dalam Lingkungan Perairan	12
a. Sumber pencemar logam berat utama	12
b. Tanah pertanian	12
c. Pupuk fosfat	12
d. Logam berat lain dalam pupuk fosfat, nitrat, kandang, kapur, dan kompos	12
e. Pestisida	12
2. Bentuk dan Perilaku Logam Berat dalam Lingkungan Perairan	13
a. Logam di lingkungan perairan	13
b. Kontrol kelarutan dari unsur-unsur logam berat dalam badan perairan oleh pH badan air, jenis dan konsentrasi logam, khelat, serta keadaan komponen mineral teroksidasi dan sistem yang berlingkungan redoks	13

D. Efek Logam Berat Pencemar bagi Individu dan Ekosistem	13
1. Empat faktor penting yang mempengaruhi daya racun logam berat yang terlarut dalam badan perairan	13
2. Mekanisme toksisitas ion-ion logam	14
3. Pola toksisitas logam	14
4. Urutan Toksisitas Ion Logam di dalam Ranah Makhluk Hidup	14
5. Pengaruh toksikan logam berat terhadap kerja enzim-enzim fisiologis tubuh	15
6. Exclusion/ akumulasi ion-ion yang toksik..	15
7. Pengaruh logam berat terhadap struktur ekologis	16
8. Pengaruh logam berat terhadap struktur komunitas suatu habitat	16
9. Dampak langsung pencemaran logam berat secara ekologis	16
10. Efek masing-masing logam berat pencemar terhadap organisme dan ekosistemnya	17
a. Kadmium (<i>Cadmium/Cd</i>)	17
1) Pada Tumbuhan	17
2) Pada manusia	19
b. Timbal/Timah Hitam (<i>Pb/Plumbum</i>)	19
1) Pada Tumbuhan	19
2) Pada manusia dan hewan	21
c. Tembaga (<i>Cuprum/Cu</i>)	22
1) Pada tumbuhan	22
2) Pada manusia	25
d. Kromium/<i>Chromium (Cr)</i>	25
1) Pada Tumbuhan	25
2) Pada Manusia	27
e. Arsenik (<i>As</i>)	28
1) Pada Tumbuhan	29
2) Pada Hewan dan Manusia	30
f. Seng (<i>Zinc/Zn</i>)	30
1) Pada Tumbuhan	30
2) Pada hewan dan manusia	31
g. Merkuri (<i>Hydrargyrum/Hg</i>)	31
1) Pada Manusia	31
2) Pada Tumbuhan	32
h. Nikel (<i>Nickel/Ni</i>)	33
1) Pada Manusia	33
2) Pada Tumbuhan	33

	i. Selenium (Se)	34
	1) Pada Hewan	34
	2) Pada Tumbuhan	34
	E. Pematapan Materi	35
BAB III	PERJALANAN POLUTAN LOGAM BERAT KE RANTAI MAKANAN	37
	A. Panduan Mempelajari Bab III	37
	B. Nilai-nilai Ke-Islaman Materi Perjalanan Polutan Logam Berat ke Rantai Makanan.....	37
	C. Pengambilan Logam Berat oleh Biota dari Lingkungan Perairan	42
	1. Tiga proses utama pengambilan awal logam oleh makhluk hidup air	42
	2. Penyerapan logam oleh fotoautotrof, kemoatotrof	42
	3. Penyerapan pada makhluk heterotrofik	43
	D. Proses Pengaturan Kepekatan Logam, Toleransi, dan Penyelamatan Diri	43
	Penyelamatan diri makhluk hidup terhadap logam	43
	E. Toleransi dan Biotransformasi Logam Berat	44
	1. Mekanisme Toleransi Makhluk Hidup terhadap Logam Berat	44
	2. Biotransformasi Logam Berat	45
	F. Bioakumulasi	45
	1. Jenis Logam yang Diakumulasi	45
	2. Faktor Penentu Kapasitas Bioakumulasi	46
	G. Perpindahan Logam Berat dalam Rantai Makanan dan Biomagnifikasi	46
	1. Faktor Penentu Terjadinya Perpindahan Logam dan Biomagnifikasi	46
	2. Diagram Distribusi Logam Berat dalam Rantai Makanan	47
	H. Pematapan Materi	48
BAB IV	SAYURAN, BAHAN PANGAN DAN MEDIA AKUMULATOR POLUTAN LOGAM BERAT	49
	A. Panduan Mempelajari Bab IV	49
	B. Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Materi Sayuran, Bahan Pangan dan Media Akumulator Polutan Logam Berat	50
	C. Potensi Sayuran sebagai Akumulator Polutan Logam Berat	54
	1. Karakter dan Kebiasaan Hidup Tanaman Sayuran	54
	2. Profil Tanaman Sayuran	54

3.	Hasil Penelitian tentang Potensi Jenis Tanaman Sayuran sebagai Akumulator Logam	55
D.	Teknik Fitoteknologi dan Penanganan Pascaguna Fitoremediator	56
1.	Teknik Keberlanjutan Fitoremediator	56
2.	Penanganan Tumbuhan Fitoremediator/Pasca Fitoremediasi	57
E.	Ambang Batas Logam Berat pada Sayuran yang Aman Konsumsi Serta Hubungannya dengan Bahaya Kesehatan dan Kerusakan Gizinya	58
1.	Fakta dan Penelitian Menunjukkan Berbagai Jenis Sayuran Mengandung Logam Berat Melebihi Ambang Batas yang Diperbolehkan	58
2.	Pengaruh Faktor Antropogenik dan Alamiah dalam Ketersediaan Logam	59
3.	Logam Berat yang Berperan Radikal Bebas	60
4.	Efek Radikal Bebas Logam	61
5.	Mekanisme Pertahanan Spesies Toleran Logam	61
6.	Efek Polutan Logam Berat terhadap Penurunan Gizi Sayuran	64
F.	Antisipasi Dampak Logam Berat pada Sayuran sebagai Strategi Pemecahan Masalah Gizi Defisiensi Vitamin A dan C serta Penyakit Degeneratif dalam Pola Hidup Modern di Era Globalisasi	66
G.	Peranan Sayuran dalam Memenuhi Gizi Keluarga dan Tata Cara Pengamanannya	71
H.	Pemantapan Materi	72
BAB V	MANAJEMEN SAYURAN UNTUK ANTISIPASI DAMPAK LOGAM BERAT PENCEMAR	73
A.	Panduan Mempelajari Bab V	73
B.	Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Materi Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar	73
C.	Manajemen Penanaman dan Waktu Panen Sayuran untuk Melindungi Konsumen dari Penurunan Gizi dan Keamanan Pangan	78
1.	Bukti Temuan dan Konsep Manajemen Penanaman dan Waktu Memanen Penting untuk Pertahanan Keamanan Pangan	78
2.	Diagram dan Grafik Temuan Pendukung Konsep	79
D.	Manajemen Pemanfaatan Bagian Sayuran untuk Keamanan Pangan dan Efektivitas	79

Kandungan Gizi	84
1. Bukti Temuan dan Konsep Manajemen Pemanfaatan Bagian Sayuran untuk Keamanan Pangan dan Efektivitas Kandungan Gizi	84
2. Diagram dan Grafik Temuan Pendukung Konsep	84
E. Manajemen Pengelolaan Bahan Sayuran Tercemar Logam Berat untuk Mutu Gizi dan Aman Konsumsi Melalui Pencucian dan Pengolahan/Pemasakan yang Tepat	85
1. Bukti Temuan dan Konsep Manajemen Pengelolaan Bahan Sayuran Tercemar Logam Berat untuk Mutu Gizi dan Aman Konsumsi Melalui Pencucian dan Pengolahan/Pemasakan yang Tepat	85
2. Diagram dan Grafik Temuan Pendukung Konsep	87
F. Pemasarakatan Profil Sayuran Sehat, Bergizi Cukup, dan Aman bagi Kesehatan	92
1. Bukti Temuan dan Konsep Profil Sayuran Sehat, Bergizi Cukup, dan Aman bagi Kesehatan	92
2. Diagram dan Grafik Temuan Pendukung Konsep	98
G. Pemantapan Materi	100
BAB VI MODEL DAN TEKNOLOGI TEPAT GUNA MANAJEMEN BUDIDAYA, PEMANFAATAN, DAN PENGOLAHAN BAHAN PANGAN TERCEMAR LOGAM BERAT	101
A. Panduan Mempelajari Bab VI	101
B. Kegiatan Pembelajaran	101
BAB VII PENUTUP	103
A. Kesimpulan	103
B. Saran	105
DAFTAR PUSTAKA	107
KATA-KATA PENTING/GLOSARIUM ..	115
BIODATA PENULIS	124

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Urutan Toksisitas Ion Logam di dalam Ranah Makhluk Hidup	14

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Skema Penghalangan Kerja Enzim oleh Logam Berat ...	15
3.1 Distribusi Logam Berat dalam Rantai Makanan	47
4.1 Mekanisme Aktivitas Vitamin Sebagai Antioksidan	63
4.2 Grafik Rerata Akumulasi Cd, Pb, serta Penurunan Vitamin A dan Vitamin C pada semua Jenis Sayuran ...	66
4.3 Mekanisme Karsinogen pada Organisme	68
5.1 Perbedaan Serapan Logam Berat Pencemar pada Daun Kangkung yang dipangkas (P) dan Tidak dilakukan Pemangkas (TP)	79
5.2 Grafik Perbandingan Akumulasi Logam Berat Serta Penurunan Vitamin A Dan Vitamin C Pada Bagian Batang Dan Daun Sayuran	83
5.3 Pengaruh Pencucian tanpa Pengolahan Terhadap Kadar Cd	86
5.4 Pengaruh Perlakuan Pencucian tanpa Pengolahan terhadap Kadar Vitamin C	86
5.5 Pengaruh Perlakuan Pengolahan tanpa Pencucian terhadap Kadar Cd	87
5.6 Pengaruh Pengelolaan Tanpa Pencucian terhadap Kadar Vitamin C Sayuran	87
5.7 Pengaruh bersama-sama Pencucian dan Pengelolaan Bahan Pangan Nabati terhadap Cd	91
5.8 Pengaruh Bersama-sama Pencucian dan Pengelolaan Bahan Pangan Hewani terhadap Cd	92
5.9 Ilustrasi Penurunan Skala Warna Hijau Akibat Penyerapan Logam Berat Cd, serta Campuran Cd dan Pb	100

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN BIOLOGI (S2)
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH METRO**

**RENCANA PEMBELAJARAN MAHASISWA (RPM) DAN
KONTRAK KULIAH**

A. IDENTITAS

Nama Mata Kuliah	: BIOREMEDIASI
Program Studi	: Pendidikan Biologi S2
Kode/Status	: BIO 009/Matakuliah Pilihan
SKS/Semester	: 2/III
Kelas/Waktu	:
Nama Dosen	: Dr. Agus Sutanto, M.Si./ Dr. Hening Widowati, M.Si.
NIP	: 196208271988031001 196305241992032001
Email	: sutanto11@gmail.com/ hwummetro@gmail.com <i>sutanto11.wordpress.com</i> <i>grup: Pendidikanbio20...</i>
No. HP	: 0815.4092.6645/ 0858.5577.7336

B. DISKRIPSI DAN URGENSI MATA KULIAH

Mata kuliah bioremediasi adalah salah satu dari mata kuliah kelompok keahlian biologi. Matakuliah ini mengkaji dan menganalisis tentang mikroorganisme, hewan, dan tumbuhan berkaitan dengan kemampuannya menguraikan polutan lingkungan, melalui teknologi teknologi bioproses. Mata kuliah Bioremediasi penting untuk memberikan pemahaman kepada mahasiswa sehingga menyadari kedudukannya sebagai makhluk Allah SWT yang diciptakan sebagai ciptaan yang sempurna dan menjadikan berbagai makhluk hidup beranekaragam dengan struktur dan fungsi yang tertentu. Masing-masing memiliki peran dan manfaat yang berbeda, sesuai yang Dia kehendaki dalam penciptaan

mahluk hidup, sehingga mahasiswa semakin tunduk kepada Allah SWT, Penciptanya.

C. STANDAR KOMPETENSI

Setelah mengikuti perkuliahan selama satu semester, mahasiswa Program Pascasarja S2 Pendidikan Biologi:

1. Memahami ruang lingkup, perkembangan bioremediasi, dan peranannya dalam kehidupan manusia;
2. Mengidentifikasi berbagai metode bioremediasi dan aplikasinya dalam pembangunan berkelanjutan;
3. Mampu menganalisis kasus-kasus yang terjadi pada pencemaran lingkungan air, tanah, udara, serta pemecahannya melalui proses dan mekanisme bioremediasi;
4. Mampu mengaplikasikan aktivitas mikroba dalam teknologi bioremediasi.
5. Mengevaluasi kegiatan berkaitan aplikasi bioremediasi untuk pembangunan berkelanjutan.

D. KOMPETENSI DASAR

Setelah berakhirnya perkuliahan Bioremediasi mahasiswa program Pascasarjana S2 Pendidikan Biologi akan dapat:

1. Memahami ruang lingkup, perkembangan bioremediasi, dan peranannya dalam kehidupan manusia
2. Menganalisis metode bioremediasi
3. Menganalisis Pengolahan Limbah secara biologis
4. Mengkaji kasus Bioremediasi Hidrokarbon Minyak Bumi.
5. Mengkaji kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Batubara
6. Mengkaji Kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Emas
7. Menganalisis fitoremediasi
8. Mengkaji peranan tumbuhan air sebagai fitoremediator pencemar
9. Mengkaji Efek Fitoremediasi terhadap Gizi Pangan
10. Mengkaji Efek Bioremediasi pada Biota di Lingkungannya
11. Mengaplikasikan Teknologi Bioproses
12. Evaluasi kegiatan Agroindustri berbasis *Green Market* (perencanaan-observasi-pelaporan-seminar hasil)

E. TUJUAN PERKULIAHAN

Pada akhir perkuliahan ini, mahasiswa Program Pascasarja S2 Pendidikan Biologi yang mengambil matakuliah ini dapat:

1. Memahami ruang lingkup, perkembangan bioremediasi, dan perannya dalam kehidupan manusia
2. Menganalisis metode bioremediasi
3. Menganalisis Pengolahan Limbah secara biologis
4. Mengkaji kasus Bioremediasi Hidrokarbon Minyak Bumi.
5. Mengkaji kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Batubara
6. Mengkaji Kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Emas
7. Menganalisis fitoremediasi
8. Mengkaji peranan tumbuhan air sebagai fitoremediator pencemar
9. Mengkaji Efek Fitoremediasi terhadap Gizi Pangan
10. Mengkaji Efek Bioremediasi pada Biota di Lingkungannya
11. Mengaplikasikan Teknologi Bioproses
12. Evaluasi kegiatan Agroindustri berbasis *Green Market* (perencanaan-observasi-pelaporan-seminar hasil)
13. Memiliki kesadaran akan pentingnya peran mikroba sebagai ciptaan-Nya

F. KEGIATAN PERKULIAHAN

Kegiatan perkuliahan yang akan dilakukan untuk mencapai kompetensi tersebut di atas adalah:

1. Ceramah oleh Tim Dosen Pembina atau dosen tamu
2. Diskusi antara Dosen Pembina-mahasiswa dan antar mahasiswa
3. Pemanfaatan pembelajaran berbasis Web
4. Tugas Kelompok dan Tugas individual
5. Kunjungan lapangan untuk studi kasus dan evaluasi Perancangan dan evaluasi Agroindustri berbasis *Green Market*
6. Ujian tengah dan akhir semester

G. JABARAN KEGIATAN KE DALAM PERTEMUAN KELAS

PERTEMUAN KE	POKOK BAHASAN	PELAKSANA
1	<p><i>Overview</i> (Pembahasan SAP, Kontrak Perkuliahan)</p> <p>PENDAHULUAN</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ruang lingkup - Perubahan lingkungan abad ke-21 - Peranan Makhluk hidup dalam remediasi <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sutanto, Agus. 2010. <i>Bioremediasi Limbah Cair Nanas</i>. Malang: UMM Press. - Waluyo Lud. 2009. <i>Mikrobiologi Lingkungan</i>. Malang: UMM Press 	Tim Dosen Pembina
2	<p>BIOREMEDIASI 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Remediasi berbasis mikroba, tumbuhan, hewan. - Bioremediasi in situ, ex situ, bantuan surfaktan. <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Surtikanti Hertien. 2009. <i>Toksikologi Lingkungan</i>. Bandung: Prima Press Prodiaktama. - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai sumber oleh mahasiswa 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa
3	<p>BIOREMEDIASI 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mekanisme bioremediasi - Metabolisme bakteri - Interaksi konsorsia bakteri dengan limbah <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sutanto, Agus. 2010. <i>Bioremediasi Limbah Cair Nanas</i>. Malang: UMM Press - Waluyo, Lud. 2009. <i>Mikrobiologi Lingkungan</i>. Malang: UMM Press. - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai sumber oleh mahasiswa 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa

4	<p>STUDI KASUS 1 (Analisis Kritis Artikel): PENGOLAHAN LIMBAH CAIR SECARA BIOLOGIS.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Peranan mikroorganismen dalam pengolahan limbah - Macam-macam proses pengolahan limbah <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sutanto, Agus. 2010. <i>Bioremediasi Limbah Cair Nanas</i>. Malang: UMM Press - Waluyo, Lud. 2009. <i>Mikrobiologi Lingkungan</i>. Malang: UMM Press. - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh mahasiswa 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa
5	<p>STUDI KASUS 2a (analisis kritis artikel): BIOREMEDIASI HIDROKARBON MINYAK BUMI.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Minyak bumi dan bioremediasi - Mikroba hidrokarbonoklastik - Biodegradasi senyawa hidrokarbon <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nugroho, Astri. 2006. <i>Bioremediasi Hidrokarbon Minyak Bumi</i>. Jakarta: Graha Ilmu. - Waluyo, Lud. 2009. <i>Mikrobiologi Lingkungan</i>. Malang: UMM Press. - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai sumber oleh mahasiswa 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa
6	Ujian Tengah Semester (UTS)	Dosen Pembina
7	<p>STUDI KASUS 3 (Analisis Kritis Artikel): BIOREMEDIASI PENCEMARAN TANAH</p> <p>Bahan Bacaan:</p> <p>Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh mahasiswa</p>	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa

8	<p>STUDI KASUS 4 (Analisis Kritis Artikel): BIOREMEDIASI PENCEMARAN INDUSTRI BATUBARA</p> <p>Bahan Bacaan: Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh mahasiswa</p>	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa
9	<p>STUDI KASUS 5 (Analisis Kritis Artikel): BIOREMEDIASI PENCEMARAN INDUSTRI EMAS</p> <p>Bahan Bacaan: Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh mahasiswa</p>	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa
10	<p>FITOREMEDIASI</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pengertian dan mekanisme fitoremediasi - Tanaman hiperakumulator - Proses fitoremediasi - Faktor yang mendukung kesuksesan fitoremediasi - Keuntungan dan kelemahan <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh mahasiswa - Widowati, Hening. 2000. Peranan Tumbuhan Air sebagai Fitoremediator Pencemaran Akibat Kegiatan Industri Batik. <i>Tesis</i>.Yogyakarta: Pascasarjana Universitas Gadjah Mada - Widowati, Hening. 2010. Pengaruh Akumulasi Logam Berat terhadap Protein dan Vitamin Sayuran Air serta Pemanfaatannya untuk Penyusunan Bahan Bacaan Efek Fitoremediasi. <i>Disertasi</i>. Malang: Universitas Negeri Malang. - Widowati, Hening. 2011. 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa

	<i>Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar. Malang: UMMPress.</i>	
11	<p>STUDI KASUS 6 (Analisis Kritis Artikel): Peranan Tumbuhan Air Sebagai Fitoremediator Pencemar</p> <ul style="list-style-type: none"> - Aplikasi Fitoteknologi dalam Pengelolaan Lingkungan - Peranan Ragam Proses Fitoremediasi bagi Individu dan Eksistem - Perjalanan Polutan ke Rantai Makanan - <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh mahasiswa - Widowati, Hening. 2000. Peranan Tumbuhan Air sebagai Fitoremediator Pencemaran Akibat Kegiatan Industri Batik. <i>Tesis</i>. Yogyakarta: Pascasarjana Universitas Gadjah Mada - Widowati, Hening. 2010. Pengaruh Akumulasi Logam Berat terhadap Protein dan Vitamin Sayuran Air serta Pemanfaatannya untuk Penyusunan Bahan Bacaan Efek Fitoremediasi. <i>Disertasi</i>. Malang: Universitas Negeri Malang. - Widowati, Hening. 2011. <i>Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar</i>. Malang: UMMPress. 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa
12	<p>STUDI KASUS 7 (Analisis Kritis Artikel): Efek Fitoremediasi terhadap Gizi Pangan</p> <ul style="list-style-type: none"> - Penghalangan kerja enzim oleh polutan pada sel dan makhluk hidup - Kerusakan protein sel dan tubuh - Kerusakan Vitamin Antioksidan (A, 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa

	<p>C, E)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pelepasan dan pengikatan logam tertentu yang merusak bahan dan sel tubuh - Mekanisme karsinogen pada organisme <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh mahasiswa - Widowati, Hening. 2000. Peranan Tumbuhan Air sebagai Fitoremediator Pencemaran Akibat Kegiatan Industri Batik. <i>Tesis</i>. Yogyakarta: Pascasarjana Universitas Gadjah Mada - Widowati, Hening. 2010. Pengaruh Akumulasi Logam Berat terhadap Protein dan Vitamin Sayuran Air serta Pemanfaatannya untuk Penyusunan Bahan Bacaan Efek Fitoremediasi. <i>Disertasi</i>. Malang: Universitas Negeri Malang. - Widowati, Hening. 2011. <i>Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar</i>. Malang: UMM Press. 	
13	<p>STUDI KASUS 7 (Analisis Kritis Artikel): Manajemen Budidaya Tanaman Antisipasi Akumulasi Pencemar</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cara tanam yang baik - Pemanenan yang tepat - Memanfaatkan bagian tanam secara tepat - Memperhatikan faktor dan kondisi lingkungan internal dan eksternal tanaman - Pengelolaan Bahan Pangan Tercemar Logam Berat: Pencucian; Pengolahan/Pemasakan. <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/sumber oleh 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa

	<p>mahasiswa</p> <ul style="list-style-type: none"> - Widowati, Hening. 2000. Peranan Tumbuhan Air sebagai Fitoremediator Pencemaran Akibat Kegiatan Industri Batik. <i>Tesis</i>. Yogyakarta: Pascasarjana Universitas Gadjah Mada - Widowati, Hening. 2010. Pengaruh Akumulasi Logam Berat terhadap Protein dan Vitamin Sayuran Air serta Pemanfaatannya untuk Penyusunan Bahan Bacaan Efek Fitoremediasi. <i>Disertasi</i>. Malang: Universitas Negeri Malang. - Widowati, Hening. 2011. <i>Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar</i>. Malang: UMMPress. - Widowati, Hening; Agus Sutanto; Widya Sartika Sulistiani. 2017. Pengaruh Proses Pengolahan terhadap Kadar Logam Berat dan Kadar Gizi Kacang Panjang. <i>Jurnal Bioedukasi Pendidikan Biologi UMMetro</i> Vol.8. nomor 2 (2017) e ISSN 2442-9805 P ISSN 2086-4701. 	
14	<p>TEKNOLOGI BIOPROSES I</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perkembangan bioteknologi - Kinetika proses mikrobioal - Kinetika reaksi enzimatik <p>Bahan Bacaan:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mangunwijaya, dkk. 1993. <i>Teknologi Bioproses</i>. Jakarta: Penebar Swadaya. - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/ sumber oleh mahasiswa 	Tim Dosen Pembina dan Kelompok mahasiswa
15	<p>TEKNOLOGI BIOPROSES 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Perancangan bioreaktor - Pengendalian bioproses dan sistem bioreaktor - Penerapan teknologi bioproses dalam industr 	Tim Dosen Pembina dan mahasiswa

	Bahan Bacaan: - Mangunwijaya, dkk. 1993. Teknologi Bioproses. Jakarta: Penebar Swadaya. - Dikembangkan dan ditelusuri dari berbagai artikel/ sumber oleh mahasiswa	
16	KUNJUNGAN LAPANGAN Agroindustri berbasis <i>Green Market</i> (perencanaan-observasi-pelaporan- seminar hasil) UJIAN AKHIR SEMESTER	Individu

*pembagian tugas moderator, pembahas 2 mhs.

G. KEGIATAN PEMBELAJARAN

1. Perkuliahan dilakukan dalam bentuk diskusi kelas yang pada setiap pertemuan dibahas 1 materi. Untuk mengantisipasi adanya halangan sewaktu-waktu, pada setiap pertemuan disiapkan 2 materi, materi pertama adalah yang wajib dipresentasikan sesuai urutan, sedangkan yang kedua sebagai cadangan.
2. Materi disampaikan oleh pemakalah (kelompok mahasiswa, masing-masing kelompok terdiri dari 2 mahasiswa) dengan materi yang telah ditentukan. Pemateri terdiri dari 2 mahasiswa, masing-masing sebagai moderator & penyampai materi. Sebelumnya, kelompok pemateri telah menunjuk 2 mahasiswa lain pada kelompok berikutnya sebagai pembahas untuk mengkritisi materi yang dibahas, serta wajib memberikan masukan dan bertanya. Demikian seterusnya untuk pemakalah berikutnya. Dosen dan mahasiswa yang lain juga memiliki kesempatan untuk mencermati kesalahan konsep, bertanya, dan menambahkan konsep penting yang disampaikan oleh pemateri. Setiap pemateri diberi kesempatan presentasi dan tanya jawab dalam waktu maksimal 60 menit. Makalah yang direvisi, dikumpulkan sebagai komponen tugas pada evaluasi perkuliahan.
3. Setelah pemaparan makalah dan diskusi selesai, bila dipandang perlu dosen memberikan arahan dan masukan terhadap isi makalah. Berikutnya dosen mengulas xxx

materi dan menganalisis permasalahan-permasalahan yang ada.

4. Prosedur penyusunan tugas:

NO.	AKTIVITAS	PEMAK ALAH (P)	MAHASI SWA SATU KELAS (M)	DOSEN (D)	KETERANGAN
1.	Penentuan, pelacakan sumber, makalah penyusunan (H-7 sd. H-3)	P			
	Distribusi makalah (H-3)	P	M	D	Dalam bentuk softcopy dikirim melalui grup
	Koreksi/pengayaan makalah, penyampaian pertanyaan, tanggapan (H-3 sd. H-1)	P	M		Dalam bentuk softcopy dikirim melalui grup
	Penyampaian Koreksi/pengayaan makalah, penyampaian pertanyaan, tanggapan (H-3 sd. H-1)	P		D	Untuk membahas dalam bentuk hardcopy
	Tanggapan dan jawaban pertanyaan tertulis (H-2 sd. H-1)	P			
	Presentasi dan diskusi makalah (H)	P	M	D	Untuk dosen dan pembahas dalam bentuk hardcopy
	Penyempurnaan makalah dan tanggapan atas pertanyaan (H+1 s.d. H+3)	P			
	Distribusi Makalah dan tanggapan pertanyaan yang telah disempurnakan (H+3)	P	M	D	Untuk dosen hardcopy dan softcopy, mhs softcopy lewat email/grup.

*pembagian tugas mederator, pembahas 2 mhs.

H. REFERENSI

1. Hambali E. 2007. *Teknologi Bioenergi*. Jakarta:Agromedia Pustaka.
2. Mangunwijaya D.1994. *Teknologi Bioproses*. Jakarta:Penebar Swadaya
3. Nugroho Astri.2006. Bioremedisi Hidrokarbon Minyak Bumi. Yogyakarta: Graha Ilmu.
4. Surtikanti HK.2008 *Toksikologi Lingkungan*. Bandung:Prisma Press.
5. Sutanto Agus. 2010. Bioremediasi Limbah Cair Nanas. Malang:UMM Press.
6. Waluyo, Lut. 2009. Mikrobiologi Lingkungan. Malang: UMM Press.
7. Widowati, Hening. 2011. Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam BeratPencemar. Malang: UMM Press.
8. Widowati, Hening; Agus Sutanto; Widya Sartika Sulistiani. 2017. Pengaruh Proses Pengolahan terhadap Kadar Logam Berat dan Kadar Gizi Kacang Panjang. *Jurnal Bioedukasi Pendidikan Biologi UMM*Metro Vol.8. nomor 2 (2017) e ISSN 2442-9805 P ISSN 2086-4701.

I. EVALUASI

a. Prosedur

1. Penilaian poses belajar melalui pengamatan, observasi, tanya jawab, dan tugas.
2. Penilaian hasil belajar melalui tugas individu dan kelompok, UTS, UAS.

b. Bentuk

1. UTS : 20 % (N1)
2. UAS : 30 % (N2)
3. Penugasan : 30 % (N3)
4. Performan & partisipasi kuliah : 20 % (N4)

J. TUGAS KULIAH:

Selama mengikuti kuliah, mahasiswa mendapatkan tugas individu dan kelompok:

1. Tugas Individu:

Membuat dan mengumpulkan pengembangan materi kuliah, pertanyaan dan refleksi kuliah setiap pertemuan,

didasarkan pada analisis sumber-sumber pustaka pendukung yang relevan/dapat dipertanggungjawabkan.

2. Tugas Kelompok:

- a. Membuat makalah Analisis Kritis dari sumber yang dipilih sesuai materi yang ditentukan, untuk dipresentasikan dan dipertanggungjawabkan dalam diskusi. Format makalah disusun berdasarkan PPKI (Panduan Penulisan Karya Ilmiah) gaya selingkung Universitas Muhammadiyah Metro, dengan panjang makalah minimal 5 halaman ukuran kertas A4 dengan spasi 1,5, tipe huruf Time Roman, font 12.
- b. Menyiapkan power point untuk presentasi sekitar 10-15 menit;
- c. Powerpoint dibuat memenuhi standar media, seminimal mungkin kalimat/kata-kata, diperbanyak gambar, flash ataupun video fakta unik.
- d. Menentukan kelompok petugas penyaji materi, pembahas, dan moderator pada setiap kali pertemuan secara tertib dan berkesinambungan; yang pada setiap pertemuan membahas 1 materi.
- e. Menyusun materi yang telah dipresentasikan dan direvisi dalam bentuk hard dan soft copy untuk didokumenkan, sesuai kelompok topik bahasan

K. ATURAN PERKULIAHAN YANG DISEPAKATI

1. Aturan yang terdapat pada Pedoman Akademik tingkat Universitas, Fakultas tentang Proses Belajar Mengajar (PBM), serta tingkat jurusan dan program studi, khususnya Program Pascasarjana ;
2. Yang berhak mengikuti Ujian Akhir Semester (UAS) adalah mahasiswa yang mengikuti perkuliahan tatap muka minimal 80%;
3. Toleransi waktu terlambat adalah 10 menit;
4. Penyelesaian tugas terstruktur merupakan persyaratan wajib yang harus dikerjakan oleh setiap mahasiswa paling lambat 3 hari sebelum ujian Akhir Semester.

L. EVALUASI

1. Prosedur
 - a. Penilaian poses belajar melalui pengamatan, observasi, tanya jawab, dan tugas.
 - b. Penilaian hasil belajar melalui tugas individu dan kelompok, UTS, UAS.

2. Bentuk
 - a. UTS : 20 % (N1)
 - b. UAS : 30 % (N2)
 - c. Penugasan : 30 % (N3)
 - d. Performan & partisipasi kuliah : 20 % (N4)

3. Kriteria Penilaian mengikuti aturan Pedoman Akademik yang berlaku:

NILAI AKHIR	HURUF MUTU (HM)	ANGKA MUTU (AM)
7,95-10,0	A	4,0
7,65-7,94	A-	3,6
7,25-7,64	B+	3,3
6,85-7,24	B	3,0
6,45-6,84	B-	2,6
6,05-6,44	C+	2,3
5,65-6,04	C	2,0
5,25-5,64	C-	1,6
4,85-5,24	D	1,0
<4,85	E (HARUS MENGULANG)	0

4. Alat penilaian:

LEMBAR OBSERVASI PERFORMAN

Nama:..... NPM: Kelas:

No.	Indikator	Penilaian				
		4	3	2	1	0
1	<p>Diskusi Kelas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kemampuan menyampaikan ide • Kemampuan menyampaikan argumentasi pada saat menjawab pertanyaan • Sikap pada saat menyampaikan ide dan menjawab pertanyaan • Kerjasama antar anggota kelompok 					
2	<p>Proses KBM</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kehadiran (Ijin/sakit/alpa) • Sikap menyimak perkuliahan • Sikap pada saat menyampaikan ide dan menjawab pertanyaan dari dosen maupun dari teman • Ketajaman analisis saat mengemukakan argumen 					
3	<p>Personality</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kemampuan bernalar • Kedisiplinan • Performansi berpakaian (termasuk tampilan rambut, sepatu, dll) • Refleksi akhlak • Refleksi sikap penghayatan nilai ke Islaman 					

NILAI :

Metro
Dosen Mata Kuliah:

Dr. Agus Sutanto. M.Si. Dr. Hening Widowati, M.Si.

**Disetujui Mahasiswa,
Wakil Mahasiswa Kelas**

(_____)

BAB I PENDAHULUAN

A. Panduan Mempelajari Bab I:

Bab I PENDAHULUAN

Merupakan submateri dan pengayaan wawasan, untuk mencapai:
Standar Kompetensi 1, 2, 3, 4, 5:

1. Memahami ruang lingkup, perkembangan bioremediasi dan peranannya dalam kehidupan manusia
2. Mengidentifikasi berbagai metode bioremediasi dan aplikasinya dalam pembangunan berkelanjutan.
3. Mampu menganalisis kasus-kasus yang terjadi pada pencemaran lingkungan air, tanah, udara, serta pemecahannya secara bioremediasi.
4. Mampu mengaplikasikan aktivitas mikroba dalam teknologi bioremediasi.
5. Mengevaluasi kegiatan berkaitan aplikasi bioremediasi untuk pembangunan berkelanjutan.

Standar Kompetensi 1, 2, 3, 7,8:

1. Memahami ruang lingkup, perkembangan bioremediasi dan peranannya dalam kehidupan manusia
2. Menganalisis metode bioremediasi
3. Menganalisis Pengolahan Limbah secara biologis
7. Menganalisis fitoremediasi
8. Mengkaji peranan tumbuhan air sebagai fitoremediator pencemar.

B. Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Bab I

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ

الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ﴿٥١﴾

قُلْ سِيرُوا فِي الْأَرْضِ فَانظُرُوا كَيْفَ كَانَ عَاقِبَةُ الَّذِينَ مِنْ قَبْلُ

﴿٥٢﴾ كَانَ أَكْثَرُهُمْ مُشْرِكِينَ

“Telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan perbuatan manusia, supaya Allah merasakan kepada mereka sebagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka kembali (ke jalan yang benar). Katakanlah : Adakanlah perjalanan dimuka

bumi dan perhatikanlah bagaimana kesudahan orang-orang yang dulu. Kebanyakan dari mereka itu adalah orang-orang yang mempersekutukan (Allah).” (Ar Rum [30]: 41-42)

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ
اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ ﴿٥٦﴾
وَهُوَ الَّذِي يُرْسِلُ الرِّيْحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ ۗ حَتَّىٰ إِذَا
أَقْلَّتْ سَحَابًا ثِقَالًا سُقْنَاهُ لِبَلَدٍ مَّيِّتٍ فَأَنْزَلْنَا بِهِ الْمَاءَ فَأَخْرَجْنَا بِهِ مِنْ
كُلِّ الشَّجَرَاتِ ۚ كَذَٰلِكَ نُخْرِجُ الْمَوْتَىٰ لَعَلَّكُمْ تَذَكَّرُونَ ﴿٥٧﴾
وَالْبَلَدُ الطَّيِّبُ يَخْرُجُ نَبَاتُهُ بِإِذْنِ رَبِّهِ ۗ وَالَّذِي خَبثَ لَا يَخْرُجُ إِلَّا
نَكِثًا ۚ كَذَٰلِكَ نَصْرَفُ الْأَيَّاتِ لِقَوْمٍ يَشْكُرُونَ ﴿٥٨﴾

“Dan janganlah kamu berbuat kerusakan di muka bumi sesudah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepadanya rasa takut (tidak akan diterima) dan harapan (akan dikabulkan). Sesungguhnya rahmat Allah amat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik. Dan dialah yang meniupkan angin sebagai pembawa berita gembira sebelum kedatangan rahma Nya (hujan) hingga apabila angin itu telah membawa awan mendung, kami halau ke suatu daerah yang tandus, lalu kami turunkan hujan di daerah itu. Maka kami keluarkan dengan sebab hujan itu berbagai macam buah-buahan. Seperti itulah kami membangkitkan orang-orang yang telah mati, mudah-mudahan kamu mengambil pelajaran. Dan tanah yang baik, tanam-tanamannya tumbuh dengan seizin Allah, dan tanah yang tidak subur, tanaman-tanamannya hanya tumbuh merana. Demikianlah kami mengulangi tanda-tanda kebesaran (Kami) bagi orang-orang yang bersyukur.” (QS Al A’raaf [7] : 56-58)

C. Fitoteknologi dalam Pengelolaan Lingkungan

Milyaran tahun yang lampau, Allah menciptakan alam semesta sedemikian sempurnanya. Termasuk bumi, disediakan begitu lengkap untuk kebutuhan kehidupan secara keseluruhan dan sebagai tempat hunian yang serba tercukupi. Proses-proses yang terjadi di bumi dan alam semesta yang demikian rumitnya, bahkan disediakan bentuk solusinya dengan ditunjukkan berbagai proses dan peristiwa yang memungkinkan terjadinya keseimbangan kembali, sehingga alam semesta kembali dapat menjalankan fungsinya secara baik. Sebagaimana tersirat dalam kalam Illahi QS: Ar Rum [30]: 41-42 dan QS Al A'raaf [7] : 56-58.

Untuk memahami materi ini, Sdr. wajib menggali, di antaranya melalui sumber-sumber pustaka yang ditunjukkan, sehingga akan ditemukan konsep-konsep penting berikut, meliputi:

1. *Self purification*;
2. Pencemaran;
3. Pengertian logam berat (Connel & Miller, 2006; Notohadiprawiro, 1993; Widowati, 2010)
4. Pengertian fitoteknologi dan solusi masalah pencemaran (Mangkoedihardjo, 2008);
5. Fitoakumulator dan Bioakumulator (Porebska *et al.*, 1999);
6. Pengertian fitoremediasi menurut Peer, *et al.* (2003);
7. Macam proses dalam fitoremediasi (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010);
8. Konsep fitoekstraksi (Lombi *et al.*, 2001 & Salt *et al.*, 1998);
9. Konsep rizofiltrasi (Salt *et al.*, 1998)
10. Konsep fitostabilisasi (Weis & Weis, 2004; Pilon-Smits, 2005).

D. Fitoremediasi dan Dampak Fitoremediator pada Tanaman yang Dikonsumsi

Untuk memahami materi ini, Sdr. wajib menggali, di antaranya melalui sumber-sumber pustaka yang ditunjukkan dalam sumber pustaka pendukung, sehingga akan ditemukan konsep-konsep penting berikut, meliputi:

1. Akumulasi logam dan pencemar pada bahan pangan (Astawa, 2008)
2. Perjalanan logam dan pencemar dalam lingkungan (Connel & Miller, 2006)

3. Proses-proses fitoremediasi (Mangkoedihardjo, 2008)
4. Rizofiltrasi
5. Fitofiltrasi
6. Fitoimobilisasi
7. Fitodegradasi
8. Fitoekstraksi, fitoakumulasi, fitoabsorpsi, atau fitoresapan
9. Fitodegradasi, fitolignifikasi, atau fitotransformasi
10. Fitovolatilisasi
11. Fitoteknologi
12. Tumbuhan hiperakumulator (Cong Tu *et al.*, 2002).
13. Hubungan transpirasi dengan fitoremediasi (Alex-Alan, 2007 & Peer, *et al.*, 2003)
14. Hubungan ciri & karakter tumbuhan (akar, batang, daun, dll) terhadap kemampuan fitoremediasi (Berti & Cuningham, 2000; Siresh & Ravishankar, 2004).
15. Metode *wetland* secara *wastewater garden* (WWG) di Bali dan sistem saringan pasir tanaman dalam pengelolaan limbah (Ditjen Tata Perkotaan dan Tata Perdesaan, 2003; Suyasa, 2007)
16. Potensi kangkung jenis sayuran sebagai fitoremediator berbagai logam berat di antaranya, As, Pb, Zn, Cu (Prihantoro, 1995, Widowati, 2000).
17. Keuntungan pengolahan limbah secara biologi (Cong Tu, 2002; Poppy, dkk, 2006; Porebska, 1999).
18. Kerawanan keamanan pangan akibat pencemar (Rahardjo, 2008).
19. Sumber utama kontaminan logam berat pada bahan pangan (Astawa, 2008).
20. Jenis sayuran yang mudah menyerap logam berat (Bucheveer, 1973; Haghiri, 1973).
21. Logam berat dapat terserap ke dalam jaringan tanaman melalui akar dan stomata daun, selanjutnya akan masuk ke dalam siklus rantai makanan (Alloway, 1990).
22. Logam berat yang masuk ke dalam tubuh manusia akan **berinteraksi dengan enzim, protein, DNA serta metabolit** lainnya, yang bila terakumulasi jumlahnya berlebih akan meracuni dan berbahaya bagi kesehatan tubuh karena bekerja sebagai bahan karsinogenik yang memicu timbulnya kanker serta mutasi pada organisme lainnya (Linder, 1992).

Setelah Sdr. memahami konsep-konsep tentang fitoremediasi dan dampak fitoremediator pada tanaman yang dikonsumsi di atas, silahkan menyelesaikan soal berikut, sebagai pemantapan materi dan mengukur tentang pemahaman konsep tentang fitoremediasi dan dampak fitoremediator pada tanaman yang dikonsumsi.

E. Pemantapan Materi:

1. Proses apa sajakah yang terjadi pada tumbuhan sehingga memungkinkan tumbuhan berperan dalam remediasi area tercemar?
2. Bagaimanakah hubungan antara fitoremediasi dengan fitoteknologi pengelolaan lingkungan?
3. Mengapa fitoremediator perlu diwaspadai?
4. Tunjukkan proses-proses yang terjadi pada fitoremediasi, dan buatlah analisis, mana yang merugikan dan mana yang menguntungkan terhadap tumbuhan yang dimanfaatkan untuk dikonsumsi!
5. Jelaskan hubungan manfaat tumbuhan dengan kandungan Al Qur'an QS Al-An'aam [6]: 99 dan 141!

BAB II CEMARAN LOGAM BERAT DAN EFEKNYA BAGI INDIVIDU DAN EKOSISTEM

A. Panduan Mempelajari Bab II

BAB II CEMARAN LOGAM BERAT DAN EFEKNYA BAGI INDIVIDU DAN EKOSISTEM

Merupakan substansi materi dan pengayaan wawasan untuk mencapai Standar Kompetensi 3

1. Mampu menganalisis kasus-kasus yang terjadi pada pencemaran lingkungan air, tanah, udara, serta pemecahannya secara bioremediasi.

Kompetensi Dasar 1, 4, 5, 6:

1. Memahami ruang lingkup, perkembangan bioremediasi dan peranannya dalam kehidupan manusia
4. Mengkaji kasus Bioremediasi Hidrokarbon Minyak Bumi.
5. Mengkaji kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Batubara
6. Mengkaji Kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Emas

B. Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Pembahasan Cemar Logam Berat dan Efeknya bagi Individu dan Ekosistem

وَإِذَا قِيلَ لَهُمْ لَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ قَالُوا إِنَّمَا نَحْنُ مُصْلِحُونَ ﴿١١﴾

"Janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi" Mereka menjawab: "Sesungguhnya kami orang-orang yang mengadakan perbaikan." (Al Baqarah [02] : 11)

ذَلِكَ الْكِتَابُ لَا رَيْبَ فِيهِ هُدًى لِّلْمُتَّقِينَ ﴿٢﴾

"Ingatlah, sesungguhnya mereka itulah orang-orang yang membuat kerusakan, tetapi mereka tidak sadar". (Al Baqarah [02]: 12)

فَإِن تَوَلَّوْا فَإِنَّ اللَّهَ عَلِيمٌ بِالْمُفْسِدِينَ ﴿٦٣﴾

"Kemudian jika mereka berpaling (dari kebenaran), maka sesungguhnya Allah Maha Mengetahui orang-orang yang berbuat kerusakan". (Ali 'Imran [03] : 63)

وَلَا تَبْخَسُوا النَّاسَ أَشْيَاءَهُمْ وَلَا تَعَثُوا فِي الْأَرْضِ مُمْسِدِينَ ﴿١٨٣﴾

“Dan janganlah kamu merugikan manusia pada hak-haknya dan janganlah kamu merajalela di muka bumi dengan membuat kerusakan”. (Asy Syu'araa' [26] : 183)

فَهَلْ عَسَيْتُمْ إِنْ تَوَلَّيْتُمْ أَنْ تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ وَتَقَطَّعُوا

أَرْحَامَكُمْ ﴿٢٢﴾

“Maka apakah kiranya jika kamu berkuasa kamu akan membuat kerusakan di muka bumi dan memutuskan hubungan kekeluargaan?”(QS. Muhammad [47] : 22)

وَإِذِ اسْتَسْقَىٰ مُوسَىٰ لِقَوْمِهِ فَقُلْنَا اضْرِبْ بِعَصَاكَ الْحَجَرَ ۖ فَانفَجَرَتْ

مِنْهُ اثْنَتَا عَشْرَةَ عَيْنًا قَدْ عَلِمَ كُلُّ أُنَاسٍ مَّشْرَبَهُمْ ۖ كُلُوا وَاشْرَبُوا

مِنْ رِزْقِ اللَّهِ وَلَا تَعَثُوا فِي الْأَرْضِ مُمْسِدِينَ ﴿٦٠﴾

.... Makan dan minumlah rezki (yang diberikan) Allah, dan janganlah kamu berkeliaran di muka bumi dengan berbuat kerusakan” (Al Baqarah [02]: 60)

وَلَا تُطِيعُوا أَمْرَ الْمُسْرِفِينَ ﴿١٥١﴾

الَّذِينَ يُفْسِدُونَ فِي الْأَرْضِ وَلَا يُصْلِحُونَ ﴿١٥٢﴾

“Dan janganlah kamu mentaati perintah orang-orang yang melewati batas, yang membuat kerusakan di muka bumi dan tidak mengadakan perbaikan.” (Asy Syu'araa' [26]: 151- 152)

وَالَّذِينَ كَفَرُوا بَعْضُهُمْ أَوْلِيَاءُ بَعْضٍ ۚ إِلَّا تَعْمَلُوهُ تَكُن فِتْنَةٌ فِي الْأَرْضِ

وَفَسَادٌ كَبِيرٌ ﴿٧٣﴾

“Adapun orang-orang yang kafir, sebagian mereka menjadi pelindung bagi sebagian yang lain. Jika kamu (hai para muslimin) tidak melaksanakan apa yang telah diperintahkan Allah itu,

niscaya akan terjadi kekacauan di muka bumi dan kerusakan yang besar". (Al Anfaal [8]: 73)

وَقَضَيْنَا إِلَىٰ بَنِي إِسْرَائِيلَ فِي الْكِتَابِ لَتُفْسِدُنَّ فِي الْأَرْضِ

مَرَّتَيْنِ وَلَتَعْلُنَّ عُلُوقًا كَبِيرًا ﴿٤﴾

Dan telah Kami tetapkan terhadap Bani Israil dalam Kitab itu: "Sesungguhnya kamu akan membuat kerusakan di muka bumi ini dua kali dan pasti kamu akan menyombongkan diri dengan kesombongan yang besar." (Al Israa' [17]: 4)

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ

الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ﴿٤١﴾

"Telah tampak kerusakan di darat dan dilaut disebabkan karena perbuatan tangan manusia; Allah menghendaki agar mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka kembali (kejalan yang benar)." (Ar Ruum [30]: 41)

الَّذِينَ كَفَرُوا وَصَدُّوا عَن سَبِيلِ اللَّهِ زِدْنَاهُمْ عَذَابًا فَوْقَ

الْعَذَابِ بِمَا كَانُوا يُفْسِدُونَ ﴿٨٨﴾

"Orang-orang yang kafir dan menghalangi (manusia) dari jalan Allah, Kami tambahkan kepada mereka siksaan di atas siksaan disebabkan mereka selalu berbuat kerusakan". (An Nahl [16]: 88)

وَإِذْ قَالَ رَبُّكَ لِلْمَلَائِكَةِ إِنِّي جَاعِلٌ فِي الْأَرْضِ خَلِيفَةً

قَالُوا أَتَجْعَلُ فِيهَا مَنْ يُفْسِدُ فِيهَا وَيَسْفِكُ الدِّمَاءَ وَنَحْنُ نُسَبِّحُ

بِحَمْدِكَ وَنُقَدِّسُ لَكَ قَالَ إِنِّي أَعْلَمُ مَا لَا تَعْلَمُونَ ﴿٣٠﴾

Ingatlah ketika Tuhanmu berfirman kepada para Malaikat: "Sesungguhnya Aku hendak menjadikan seorang khalifah di muka bumi." Mereka berkata: "Mengapa Engkau hendak menjadikan (khalifah) di bumi itu orang yang akan membuat kerusakan padanya dan menumpahkan darah, padahal kami senantiasa

bertasbih dengan memuji Engkau dan mensucikan Engkau?" Tuhan berfirman: "Sesungguhnya Aku mengetahui apa yang tidak kamu ketahui." (Al Baqarah [2]: 30)

وَأَتَّبِعْ فِي مَآءَاتِدِكَ اللَّهُ الدَّارَ الْآخِرَةَ وَلَا تَنْسَ نَصِيبَكَ مِنَ الدُّنْيَا وَأَحْسِنْ
كَمَا أَحْسَنَ اللَّهُ إِلَيْكَ وَلَا تَبْغِ الْفَسَادَ فِي الْأَرْضِ إِنَّ اللَّهَ لَا يُحِبُّ

الْمُفْسِدِينَ ﴿٧٧﴾

"Dan carilah pada apa yang telah dianugerahkan Allah kepadamu (kebahagiaan) negeri akhirat, dan janganlah kamu melupakan bahagianmu dari (kenikmatan) duniawi dan berbuat baiklah (kepada orang lain) sebagaimana Allah telah berbuat baik, kepadamu, dan janganlah kamu berbuat kerusakan di (muka) bumi. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berbuat kerusakan". (Al Qashash [28]: 77)

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ

اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ ﴿٥٦﴾

"Dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi, sesudah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut (tidak akan diterima) dan harapan (akan dikabulkan). Sesungguhnya rahmat Allah amat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik". (Al A'raaf [7]: 56)

قَالَ رَبِّ أَنْصُرْنِي عَلَى الْقَوْمِ الْمُفْسِدِينَ ﴿٣٠﴾

Luth berdoa: "Ya Tuhanku, tolonglah aku (dengan menimpakan azab) atas kaum yang berbuat kerusakan itu." (Al 'Ankabut [29]: 30)

تِلْكَ الدَّارُ الْآخِرَةُ نَجْعَلُهَا لِلَّذِينَ لَا يُرِيدُونَ عُلُوًّا فِي الْأَرْضِ وَلَا فَسَادًا

وَالْعَذِيبَةَ لِمُنْتَقِبِينَ ﴿٨٣﴾

"Negeri akhirat itu, Kami jadikan untuk orang-orang yang tidak ingin menyombongkan diri dan berbuat kerusakan di (muka) bumi.

Dan kesudahan (yang baik) itu adalah bagi orang-orang yang bertakwa". (Al Qashash [28]: 83)

إِنَّمَا جَزَاءُ الَّذِينَ يُحَارِبُونَ اللَّهَ وَرَسُولَهُ وَيَسْعَوْنَ فِي الْأَرْضِ فَسَادًا أَنْ يُقَتَّلُوا أَوْ يُصَلَّبُوا أَوْ تُقَطَّعَ أَيْدِيهِمْ وَأَرْجُلُهُمْ مِنْ خَلْفٍ أَوْ يُنْفَوْا مِنَ الْأَرْضِ ذَلِكَ لَهُمْ خِزْيٌ فِي الدُّنْيَا وَلَهُمْ فِي الْآخِرَةِ عَذَابٌ

عَظِيمٌ ﴿٣٣﴾

“Sesungguhnya pembalasan terhadap orang-orang yang memerangi Allah dan Rasul-Nya dan membuat kerusakan di muka bumi, hanyalah mereka dibunuh atau disalib, atau dipotong tangan dan kaki mereka dengan bertimbal balik, atau dibuang dari negeri (tempat kediamannya). Yang demikian itu (sebagai) suatu penghinaan untuk mereka didunia, dan di akhirat mereka beroleh siksaan yang besar,”(Al Maa'idah [5]: 33)

وَالَّذِينَ يَنْقُضُونَ عَهْدَ اللَّهِ مِنْ بَعْدِ مِيثَاقِهِ وَيَقْطَعُونَ مَا أَمَرَ اللَّهُ بِهِ أَنْ يُوصَلَ وَيُفْسِدُونَ فِي الْأَرْضِ أُولَٰئِكَ لَهُمُ اللَّعْنَةُ وَلَهُمْ

سُوءُ الدَّارِ ﴿٣٥﴾

“Orang-orang yang merusak janji Allah setelah diikrarkan dengan teguh dan memutuskan apa-apa yang Allah perintahkan supaya dihubungkan dan mengadakan kerusakan di bumi, orang-orang itulah yang memperoleh kutukan dan bagi mereka tempat kediaman yang buruk (Jahannam)”. (Ar Ra'd [13] : 25)

فَلَوْلَا كَانَ مِنَ الْقُرُونِ مِنْ قَبْلِكُمْ أُولُوا بَقِيَّةً يَنْهَوْنَ عَنِ الْفَسَادِ فِي الْأَرْضِ إِلَّا قَلِيلًا مِمَّنْ أَنْجَيْنَا مِنْهُمْ وَاتَّبَعَ الَّذِينَ ظَلَمُوا مَا أُتْرِفُوا

فِيهِ وَكَانُوا مُجْرِمِينَ ﴿١١٦﴾

“Maka mengapa tidak ada dari umat-umat yang sebelum kamu orang-orang yang mempunyai keutamaan yang melarang daripada

(mengerjakan) kerusakan di muka bumi, kecuali sebahagian kecil di antara orang-orang yang telah Kami selamatkan di antara mereka, dan orang-orang yang zalim hanya mementingkan kenikmatan yang mewah yang ada pada mereka, dan mereka adalah orang-orang yang berdosa”. (Hud [11]: 116)

وَمِنْهُمْ مَّنْ يُؤْمِنُ بِهِءِ وَمِنْهُمْ مَّنْ لَا يُؤْمِنُ بِهِءِ وَرَبُّكَ

أَعْلَمُ بِالْمُفْسِدِينَ ﴿٤٠﴾

“Di antara mereka ada orang-orang yang beriman kepada Al Quran, dan di antaranya ada (pula) orang-orang yang tidak beriman kepadanya. Tuhanmu lebih mengetahui tentang orang-orang yang berbuat kerusakan”. (Yunus [10]: 40)

C. Pencemaran Logam Berat

1. Sumber Logam Berat dalam Lingkungan Perairan

Untuk memahami tentang materi ini, Sdr. dapat mencermati sumber-sumber pustaka yang tertuang dalam konsep penting berikut:

- a. Sumber pencemar logam berat utama (Connell & Miller, 2006).
- b. Tanah pertanian dapat menjadi kaya akan logam berat dari sisa tumbuhan dan hewan, pupuk fosfat, herbisida dan fungisida tertentu, serta melalui pemakaian cairan limbah atau lumpur sebagai sumber makanan tanaman.
- c. Pupuk fosfat mengandung *Pb* 5-156 ppm dan 7 ppm *Cd* (Kurnia dkk, 1999)
- d. Logam berat lain di antaranya *B, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Sb, Se, U, V, Zn* umum ditemukan dalam pupuk fosfat, nitrat, kandang, kapur, dan kompos (Alloway, 1995).
- e. Pestisida juga memberikan masukan logam berat yang penting dalam pertanian, utamanya menyumbangkan As dalam lingkungan pertanian (Direktorat Perlindungan Tanaman Pangan, 2000 dalam Charlena 2004).

2. Bentuk dan Perilaku Logam Berat dalam Lingkungan Perairan

- a. Logam di lingkungan perairan umumnya berada dalam bentuk ion, berupa ion-ion bebas, pasangan ion organik, ion-ion kompleks dan bentuk-bentuk ion lainnya, terlarut dalam air, sehingga berpeluang besar terserap oleh akar tumbuhan (Palar, 2004).
- b. Kelarutan dari unsur-unsur logam berat dalam badan perairan dikontrol oleh pH badan air, jenis dan konsentrasi logam, khelat, serta keadaan komponen mineral teroksidasi dan sistem yang berlingkungan redoks. Logam-logam umumnya dapat membentuk ikatan dengan bahan-bahan organik alam maupun bahan organik buatan. Perilaku logam berat selain dipengaruhi bentuk logamnya, dalam badan perairan juga dipengaruhi oleh interaksi yang terjadi antara air dengan sedimen (endapan). Terutama di dasar perairan, ion-ion dan kompleks-kompleksnya yang terlarut dengan cepat akan membentuk partikel-partikel yang lebih besar (Connel & Miller (2006).

D. Efek Logam Berat Pencemar bagi Individu dan Ekosistem

1. Ada **4 faktor penting yang mempengaruhi daya racun logam berat yang terlarut** dalam badan perairan (Connel & Miller, 2006), yaitu (a) **bentuk logam dalam air** (dalam bentuk senyawa organik yang larut dapat diserap dengan mudah oleh biota perairan); (b) **keberadaan logam lain** (beberapa logam tertentu yang **sinergis** dapat membentuk persenyawaan yang dapat berubah fungsi menjadi racun yang sangat berbahaya dan atau daya racunnya menjadi berlipat ganda, atau sebaliknya **antagonis** sehingga daya racunnya berkurang);(c) **fisiologis dari biotanya** (ada organisme tertentu yang mampu menetralsiasi/**toleran** terhadap logam berat atau sebaliknya); (d) **kondisi biota (fase kehidupan** tertentu biota, sensitif, misalnya telur dan embryo, atau sebaliknya tahan ketika fase dewasa). Logam-logam berat yang terlarut dalam badan perairan pada konsentrasi tertentu dapat menjadi sumber racun bagi kehidupan perairan. Meskipun daya racun yang ditimbulkan oleh satu jenis logam berat terhadap semua biota perairan

tidak sama, namun kehancuran dari satu kelompok dapat menjadikan terputusnya satu mata rantai kehidupan. Pada tingkat lanjutnya, keadaan tersebut dapat menghancurkan satu tatanan ekosistem perairan.

2. Ochiai (1977), membagi **mekanisme toksisitas ion-ion logam** ke dalam tiga kategori: (a) menahan gugus fungsi biologis yang esensial dalam biomolekul (misalnya, protein, enzim); (b) menggantikan ion logam esensial dalam molekul; dan (c) mengubah konformasi aktif biomolekul.
3. Berdasarkan toksisitas, Nieboer & Richardson (1980), berkesimpulan bahwa terdapat pola yang hampir sama sekalipun untuk makhluk yang berbeda. Kemiripan urutan toksisitas dapat diterangkan oleh penggolongan ion logam yang sesuai dengan kesukaannya terhadap pengikatan, yaitu: (a) Kelas A, **pencari oksigen**, menyebabkan deaktivasi enzim, meliputi *Cs, K, Na, Li, Ba, Ca, Sr, Mg, La, Gd, Lu, Y, Sc, Be, Ai*; (b) Kelas B, **pencari nitrogen atau sulfur**, merupakan yang paling toksik, menyebabkan enzim tidak aktif, mampu menembus membrane biologis dan berakumulasi di dalam sel dan organel, meliputi *Au, Ag, Tl, Cu, Hg, Bi*; dan (c) Bentuk antara, menyebabkan **pengurangan aktivitas enzim dan kelainan fungsional**, meliputi *Pb, Sn, Cd, Cu, Fe, Co, Ni, Cr, Li, Mn, Zn, V, In, Sb, As, Se, Ga*.
4. **Toksitas logam terhadap berbagai ranah makhluk hidup** dapat dituangkan dalam Tabel 2.1. Urutan Toksitas Ion Logam di dalam Ranah Makhluk Hidup berikut.

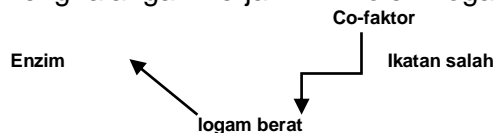
Tabel 2.1 Urutan Toksitas Ion Logam di dalam Ranah Makhluk Hidup

No	Makhluk Hidup	Urutan
1.	Ganggang	Hg>Cu>Cd>Fe>Cr>Zn>Ni>Co>Mn
2.	Jamur	Ag>Hg>Cu>Cd>Cr>Ni>Pb>Co>Zn>Fe>Ca
3.	Tanaman berbunga	Hg>Pb>Cu>Cd>Cr>Ni>Zn
4.	Protozoa	Hg>Pb>Ag>Cu,Cd>Ni,Co>Mn>Zn

5. Platyhelminthes	Hg>Ag>Au>Cu>Cd>Zn>H>Ni>Co>Cr>Pb
6. Annelida	Hg>Cu>Zn>Pb>Cd
7. Vertebrata	Ag>Hg>Cu>Pb>Cd>Au>Al>Zn>H>Ni>Cr
8. Mammalia	Ag,Hg,Tl,Cd>Cu,Pb,Co,Sn,Be,In,B,Mn,Zn,Ni,Fe, Cr>Y,La>Sr,Se>Cs,Li,Al

Sumber: Nieboer & Richardson (1980)

- Keberadaan toksikan logam berat akan mempengaruhi kerja enzim-enzim fisiologis tubuh (Palar, 2004). Akibatnya suatu bentuk reaksi metabolisme akan gagal terjadi. Keadaan itu akan mengakibatkan terjadinya ketidakseimbangan dalam sistem fisiologis, yang pada akhirnya menjadi dasar munculnya penyakit-penyakit sebagai manifestasi keracunan oleh suatu logam. Pengaruh logam berat terhadap **penghalangan kerja enzim** dapat dilihat pada Gambar 2.2 Skema Penghalangan Kerja Enzim oleh Logam Berat berikut.



Gambar 2.1 Skema Penghalangan Kerja Enzim oleh Logam Berat (Palar, 2004)

- Mekanisme toleransi untuk ion-ion yang khusus pada berbagai makhluk hidup menyebabkan exclusion atau akumulasi ion-ion yang toksik. **Akumulasi logam yang berlebih dapat memberikan pengaruh:** (a) **letal/kematian** (misalnya LC₅₀ 96 jam pada ikan mas oleh 12,6 mg/L Cd) dan (b) sub letal pada berbagai jenis organisme. Pengaruh keracunan oleh logam berat dapat bersifat akut maupun kronis. Pengaruh **subletal** yang telah diteliti adalah sebagai perubahan dalam: (a) morfologi/histologi; (b) fisiologi (pertumbuhan, perkembangan, kemampuan berenang, pernapasan, sirkulasi); (c) biokimiawi (keadaan kimia darah, kegiatan enzim, endokrinologi); (d) perilaku/neurofisiologi; dan (e) perkembangbiakan (Bryan, 1976b; Alabaster & Lloyd, 1980). Pengaruh subletal keracunan logam berat pada akhirnya dapat menimbulkan berbagai **penyakit** yang berhubungan dengan sistem syaraf, kardiovaskular, respirasi, urinaria, ekskresi, reproduksi, endokrin, tulang, bahkan logam berat berperan

sebagai karsinogen yaitu pemicu kanker. Pengaruh keracunan oleh logam berat dapat bersifat **akut maupun kronis** (Palar, 2004).

7. **Selain berpengaruh terhadap individu, logam berat juga memberikan pengaruh ekologis.** Connel & Miller (2006), menyebutkan pada perairan yang menerima limbah pertambangan, kotoran, buangan industri, atau endapan lumpur yang mengandung logam berat, ada tanggapan dari makhluk hidup air yang paling nyata yaitu **jumlah yang relatif terbatas**.
8. Ward & Young (1982) melaporkan penelitiannya terhadap **struktur komunitas** dari fauna rumput laut epibentik dekat peleburan timah hitam, terjadi penurunan 20 spesies umum, sebagian besar ikan, berhubungan dengan kepekatan logam pencemar Cd, Cu, Pb, Mn, dan Zn di dalam sedimen. Oleh karena itu Ward & Young (1982), menyimpulkan logam berat pencemar dan ukuran partikel sedimen sangat menentukan struktur komunitas suatu habitat.
9. Dampak langsung pencemaran logam berat secara ekologis pernah diteliti Weatherley *et al.* (1967 dalam Connel & Miller, 2006), bahwa pencemaran pembuangan air tambang *Cu*, *Fe*, dan *Zn* di Sungai Molongo Australia, menemukan bahwa di daerah yang tidak tercemar selalu mengandung 30-45 spesies fauna invertebrata bentik. Tepat di bawah pembuangan limbah, jumlah spesies berkurang mendekati 4, dan perbaikan yang lambat menjadi jumlah spesies yang normal terdapat di hilir. Jumlah individu hewan juga mengikuti pola yang mirip dengan jumlah spesies, yaitu berkurang di perairan pembuangan limbah. Menurut Connel & Miller (2006), ada beberapa ciri umum toksisitas logam dalam populasi dan komunitas perairan: (a) Ion-ion logam dan senyawanya memperlihatkan ranah toksisitas yang luas pada makhluk hidup air laut dan air tawar. Pada umumnya moluska, krustasea, oligochaeta, dan jamur merupakan taksa yang paling peka terhadap Zn (Alabaster & Lloyd, 1980).

Ganggang dan serangga memperlihatkan perbedaan pengaruh yang luas, tetapi tanaman dan invertebrata air lebih toleran dibandingkan ikan (Ward & Young, 1982); (b) Pada sungai yang tercemar, terjadi modifikasi struktur komunitas yang nyata, yaitu **pengurangan jumlah spesies, termasuk hilangnya sama sekali spesies yang peka**; (c) Terjadi **pengurangan jumlah individu spesies yang selamat** sesuai dengan keadaan logam. Beberapa ciri umum ini menunjukkan pola pengaruh ekologis racun logam terhadap ekosistem, yaitu adanya zat-zat toksik mengakibatkan pengurangan keseluruhan jumlah spesies dan individu yang ada berhubungan dengan kuatnya tekanan racun. Perkembangan toleransi terhadap logam pada beberapa spesies meningkatkan kapasitas mereka untuk mengakumulasi logam dengan kepekatan yang relatif tinggi dan dapat menyebabkan beberapa modifikasi pada struktur komunitas yang berubah setiap waktu.

10. Efek masing-masing logam berat pencemar terhadap organisme dan ekosistemnya dapat diuraikan sebagai berikut.

a. Kadmium (*Cadmium/Cd*)

- 1) Pada tanaman: pada tanaman, logam berat *Cd* memicu terjadinya serangkaian reaksi yang mengakibatkan: (a) gangguan (Schutzendubel & Polle, 2002) atau **penurunan pertumbuhan bagian aerial dan sistem akar** (Mendelssohn *et al.*, 2001); (b) **induksi produksi fitoselatin** (Cobbet&Goldsbrough, 2002); (c) **gangguan biosintesis klorofil dan aktivitas enzim tertentu**, seperti peroksidase, peroxidase askorbat, catalase, *glutathione synthetase*, *guaiacol peroxidase*, *mono-dehydroascorbat reductase* (Vassilev *et al.*, 2002); (d) **induksi benda apoptotik dan fragmen DNA oligonucleosomal** (Souza, 2007); (e) **induksi tekanan oksidatif** (Souza, 2007); (f) **kerusakan kloroplas** (Vollenweider *et al.*, 2006); (g) **penurunan tingkat transpirasi dan fotosintesis**; (h) **induksi senesense dan klorosis daun yang terlalu dini**

(Souza, 2007); serta (i) **stimulasi metabolisme sekunder, lignifikasi, dan yang terakhir kematian sel** (Schutzendubel & Polle, 2002).

Kadmium merupakan logam berat yang paling toksik bagi tanaman. Pada sebagian spesies, logam ini bisa menimbulkan **penurunan produksi kering hingga 50%**. Lebih jauh lagi, logam ini **bisa diserap dengan mudah dan ditranslokasi menuju bagian tanaman yang berbeda** (Souza, 2007). Spesies tanaman yang berbeda menunjukkan kapasitas variabel yang sangat tinggi untuk mengakumulasi *Cd* sejalan dengan konsentrasi yang ditemukan pada substrat tempat tanaman tersebut tumbuh (Vassilev *et al.*, 2002). Bahkan di antara para petani yang menanam spesies yang sama, variasi penyerapan dan pentranslokasian *Cd* bisa jauh berbeda-beda. Ketika diserap, logam ini melekat pada konstituen dinding sel dan pada makromolekul lainnya di dalam interior sel (Vassilev *et al.*, 2002).

Konsentrasi *Cd* dalam jaringan tanaman meningkat seiring **peningkatan konsentrasinya dalam cairan nutrisi dan seiring lamanya waktu paparan** (Souza, 2007), **konsentrasi di dalam akar menjadi lebih tinggi daripada di dalam bagian aerial**. Menurut Souza, (2007) **peningkatan konsentrasi *Cd* di dalam akar bukan karena penambahan absorpsi elemen ini, tetapi disebabkan oleh penurunan akumulasi bahan kering secara bersamaan**. Meskipun terdapat konsentrasi *Cd* dalam jumlah besar di dalam akar, logam ini juga ditemukan di dalam daun dan batang, yang menunjukkan bahwa **elemen logam ini tidak seluruhnya ditahan di dalam bagian akar, tapi ditranslokasikan juga menuju bagian aerial**.

Sudah banyak diketahui bahwa *Cd* bisa **menyebabkan defisiensi nutrisi penting dan bahkan penurunan konsentrasi makronutrien lainnya** di dalam tanaman (Siedleska, 1995). *Cd* bisa **mempengaruhi absorpsi *Cu*, *Fe*, *Zn*, dan *Mn*** karena **kompetisi penyerapan** yang terjadi di

tempat itu atau proses yang dialami oleh kation ini. **Klorosis**, salah satu karakteristik defisiensi *Fe*, merupakan salah satu gejala keracunan *Cd* yang disebabkan oleh kompetisi kedua elemen yang ada di satu tempat absorpsi dalam membran plasma.

Logam ***Cd*** memasuki lingkungan terutama sekali merupakan efek samping aktivitas manusia. Semua bidang industri yang melibatkan *Cd* menjadi sumber pencemaran *Cd*, di antaranya **industri pengolahan roti, pengolahan ikan, makanan, pencelupan tekstil, bahan kimia, pengolahan lemak, bakery, minuman, es krim, laundry** (Klein et al. 1974 dalam Palar, 2004).

- 2) Pada manusia: sampai sekarang, belum diterima bahwa *Cd* esensial untuk pertumbuhan manusia (Linder, 1992). Seperti halnya *Pb*, kontaminasi lingkungan, bahan makanan dengan *Cd* lebih banyak mendapat perhatian. ***Cd* memasuki tubuh manusia melalui bahan makanan dan seafood, terutama biji-bijian. Penyerapan meningkat bila defisiensi *Fe*.** Efisiensi penyerapan dipengaruhi oleh konsentrasi relatif *Zn* dan *Cu*. Setelah masuk ke dalam tubuh, berakumulasi dalam korteks ginjal, hati, dan sedikit dalam hampir semua jaringan lain termasuk tulang dan gigi. *Cd* berakumulasi bersama umur. Konsentrasi 200 µg/g atau lebih dalam ginjal akan menyebabkan kerusakan permanen tubuli ginjal. Seseorang yang mengkonsumsi 200-300 µg *Cd*/hari akan mencapai titik kritis kerusakan ginjal pada umur sekitar 50 tahun. Merokok dan lingkungan industri akan melipatgandakan konsumsi *Cd*. Itai-itai merupakan salah satu kerapuhan tulang karena *Cd*. Selain itu ***Cd* dapat menyebabkan gangguan pertumbuhan, reproduksi, hipertensi, teratogenesis bahkan kanker** (Linder, 1992).

b. Timbal/Timah Hitam (*Pb/Plumbum*)

- 1) Pada Tumbuhan: **tanaman menyerap *Pb* dan mengakumulasinya di dalam akar, batang, daun, nodul akar, biji, dan sebagainya.** Penyerapan *Pb*

diatur oleh pH, ukuran partikel, dan kapasitas pertukaran kation tanah serta eksudasi dan parameter fisika-kimia lainnya (Sharma & Dubey, 2005). Peningkatan penyerapan bergantung pada kenaikan tingkat *Pb* eksogen (Patra *et al.*, 2004). **Sebagian besar *Pb* yang diserap oleh tanaman terkumpul dalam akar, dan hanya sebagian kecil saja yang ditranslokasikan menuju bagian aerial** (Patra *et al.*, 2004). Terjadinya penyimpanan *Pb* dalam akar adalah karena pengikatan pada tempat pertukaran ion dan presipitasi ekstrasel, terutama dalam bentuk karbonat *Pb*, dan kedua mekanisme ini terjadi pada dinding sel. Namun, *Pb* tidak selalu menembus endodermis akar dan memasuki *stele*. Di tempat ini, endodermis bertindak sebagai penghalang penyerapan *Pb* dan penetrasi ke dalam bagian interior *stele* serta pentransportasiannya menuju bagian aerial tanaman (Weis & Weis, 2004).

Sekali diserap oleh tanaman, ***Pb* menyebabkan efek langsung dan tak langsung berkali-kali terhadap pertumbuhan dan metabolisme** (Sharma & Dubey, 2005). **Efeknya bergantung konsentrasinya, jenis garam, pH, dan spesies tanaman yang dilibatkan.** Efek timbal menjadi lebih berat pada konsentrasi tinggi dan jangka waktu paparan yang lama. Pada sebagian kasus, logam ini mampu merangsang proses metabolisme pada konsentrasi rendah (Patra *et al.*, 2004). Namun, kandungan *Pb* yang berlebihan bisa: (a) mempengaruhi perkecambahan bibit; (b) menyebabkan **pertumbuhan yang lambat, klorosis dan kerusakan sistem akar** (Sharma & Dubey, 2005); (c) mengakibatkan **penurunan konduktansi stomata** (*stomatal conductance*) dan **ukuran stomata** (meskipun bisa meningkatkan jumlah stomata) (Xiong, 1997); (d) **menurunkan aktivitas sebagian enzim** (Patra *et al.*, 2004); (e) **menghambat fotosintesis** karena adanya gangguan pada reaksi transfer elektron (Sharma dan Dubey, 2005); (f) **menurunkan tingkat respirasi** (Romanowska *et al.*, 2002); dan (g) **mengganggu nutrisi mineral serta keseimbangan air, merubah**

status hormon serta mempengaruhi permeabilitas dan struktur membran (Sharma & Dubey, 2005).

Gejala keracunan *Pb* yang bisa dilihat meliputi **bercak klorosis dan luka akibat nekrosis di permukaan daun, perlambatan pertumbuhan** (Patra *et al.*, 2004) serta **senesense daun yang didorong oleh penurunan jumlah klorofil, DNA, RNA, protein, dan biomassa kering, penurunan rasio aktivitas asam firofosfat: alkali dan penurunan aktivitas protease dan Rnase** (Patra *et al.*, 2004). Klorosis dan nekrosis bisa disebabkan oleh gangguan pada membran stromal dan tilakoid, yang mengakibatkan penurunan fotosintesis dan berakibat terjadinya penurunan ketersediaan fotosintat untuk akumulasi biomassa (Sharma & Dubey, 2005). Tek ⁴⁵ oksidatif yang dipicu oleh *Pb* bisa memunculkan \cdot , $\cdot\cdot$ \cdot es yang reaktif terhadap oksigen dalam jumlah besar, seperti superoksida, hidroksida, peroksida, dan oksigen (Sharma & Dubey, 2005), yang melibatkan semua area metabolisme aerobik dan biasanya berkaitan dengan kerusakan membran dan peroksidasi lipid.

Keefektifan *Pb* dalam memindahkan sebagian logam kationis dari akar telah diketahui, yang menyatakan bahwa *Pb* bisa memainkan peranan dalam destabilisasi penghalang fisiologis pergerakan cairan dalam akar, sehingga membatasi ketersediaan nutrisi bagi tanaman (Sharma & Dubey, 2005). Beberapa kajian telah menunjukkan bahwa keberadaan *Pb*, *Cd*, *Zn*, dan *Cu* dalam substrat bisa **menurunkan absorpsi dan pentransportasian makronutrien dalam tanaman**. Defisiensi makronutrien pada tanaman sering merupakan manifestasi dari efek toksik yang disebabkan oleh logam berat. Sebagian makroelemen, termasuk *Ca*, *Mg* dan *P* memainkan peranan protektif melawan efek toksik yang ditimbulkan oleh logam berat. Timbal bersaing dengan *Ca* untuk memperebutkan tempat menyatu dengan sel. Selain itu, *Pb* bisa disalurkan melalui saluran *Ca* menuju simpas.

- 2) Pada manusia dan hewan: kelebihan *Pb* mempengaruhi **metabolisme sel darah merah, menghambat enzim**

biosintesis heme dan ferrochelatase, serta menyebabkan anemia; mengganggu aktivitas resorpsi sel-sel tubuli ginjal, sehingga menyebabkan glukosuria dan aminoasiduria; hipertensi; **di otak menyebabkan hiperaktivitas dan keterbelakangan intelektual** (Linder, 1992). Polutan *Pb* bersumber dari makanan segar yang tercemar tanah terkontaminasi *Pb* karena pencemaran oleh buangan industri kabel telepon dan listrik, bahan peledak, pewarna, pengkilap keramik, pembangkit listrik tenaga panas, baterai, konstruksi pabrik kimia, kontainer; pembakaran mesin bermotor; pengalengan, tutup botol agar tidak mengalami korosi; pipa aliran air minum PDAM; pewarna cat (Palar, 2004).

c. Tembaga (*Cuprum/Cu*)

- 1) Pada tumbuhan: Rendahnya mobilitas tanah terhadap *Cu*, yang disebabkan adanya hubungan yang erat dengan koloid-koloid organik dan anorganik, mempercepat terjadinya akumulasinya hingga mencapai tingkatan toksik bagi tanaman. Dari jumlah total kandungan *Cu* dalam tanah, hanya sedikit sekali yang tersedia dalam bentuk mudah larut. Namun, karena lamanya waktu pajanan yang meningkatkan absorpsi, maka terjadilah akumulasi yang cukup besar di dalam tanaman (Peer *et al.*, 2003).

Sebagian besar *Cu* yang diserap oleh tanaman tersimpan di dalam akar. **Meskipun logam ini merupakan nutrisi esensial bagi tanaman, bila diserap dalam jumlah besar, logam ini bisa menyebabkan beberapa jenis kerusakan pada tingkat biokimia dan ultrastruktural, morfologis** (Peer *et al.*, 2003). ***Cu* dengan konsentrasi berlebihan bisa memicu tekanan oksidatif, yang menggiring pembentukan fitoselatin, melekat pada sebagian ligan (*Cu* chaperones, metallothioneins, fitoselatin), dan disimpan dalam vacuoles.** Lebih jauh lagi, ion *Cu* bebas mampu melekat erat pada kelompok SH yang terlibat dalam aksi katalitis atau kesatuan struktural protein.

Cu dapat menyebabkan **gangguan pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan memberikan pengaruh yang merusak pada proses fisiologis penting** di dalam tanaman. Tanaman yang tumbuh di atas lahan dengan kadar *Cu* tinggi biasanya menunjukkan penurunan biomassa dan gejala klorotik. *Cu* yang berlebihan mempengaruhi bagian aerial sekaligus pertumbuhan akar, yang menghalangi pemanjangan sel karena terjadi peningkatan permeabilitas plasmalema dan lignifikasi dinding sel. Gangguan pertumbuhan akar dikenal sebagai salah satu gejala yang paling marak yang diakibatkan oleh toksisitas *Cu*, yang menyebabkan perkembangan dan pemanjangan akar secara lateral menjadi lebih sensitif daripada pertumbuhan akar pertama kali (Kahle, 1993 dalam Peer *et al.*, 2003).

Pada tingkatan sel, *Cu* memainkan peranan penting dalam memberikan sinyal transkripsi dan struktur lalu lintas protein, fosforilasi oksidatif dan mobilisasi logam. Kelebihan kandungan *Cu* juga mengganggu aktivitas beberapa enzim dan dalam beberapa aspek antara lain berkaitan dengan fotosintesis, sintesis pigmen, asam lemak dan metabolisme protein, respirasi, proses fiksasi N dan integritas membran. Sebagian protein kloroplas dan enzim glutamin synthase (GS) serta synthase glutamat yang tergantung pada ferredoksin (Fd-GOGAT), yang dilibatkan dalam asimilasi NH_4 , sangat rentan terhadap toksisitas logam berat, terutama Fd-GOGAT terhadap kelebihan kadar *Cu*. Mungkin efek terpentingnya berhubungan dengan kerusakan sistem transport elektron fotosintetis, yang memacu pertumbuhan radikal yang memicu reaksi rantai peroksidatif, yang melibatkan lipid membran (Ducic & Polle, 2005 dalam Peer *et al.*, 2003). Selain itu, kelebihan *Cu* bisa menyebabkan perubahan pada sumber: *zinc relationship*, lenyapnya kebutuhan untuk produk fotosintetik, dan produk yang mengatur enzim siklus calvin (Maksymiec, 1997 dalam Peer *et al.*, 2003).

Gejala umum senesense yang dipicu oleh *Cu* meliputi gugur daun, klorosis intervenal dan perubahan pigmentasi daun. Dinyatakan bahwa ***Cu* mengganggu biosintesis perlengkapan fotosintesis yang bertugas memodifikasi komposisi pigmen dan protein membran fotosintetis.** Salah satu penyebab terjadinya klorosis adalah ketersediaan *Fe* yang rendah, karena *Cu* menurunkan translokasi *Fe* menuju bagian aerial, bahkan meski kandungan *Cu* sedikit lebih tinggi daripada yang biasanya didapati pada jaringan tanaman, dan bisa memacu pembentukan beberapa radikal bebas yang berbahaya, seperti spesies yang reaktif terhadap reaktif, dan senyawa peroksidatif. Klorosis daun dan penurunan fotosintesis selanjutnya juga merupakan faktor yang memberikan kontribusi terhadap terhambatnya pertumbuhan tanaman secara normal.

Sering dilaporkan terjadi perubahan klorofil dan konsentrasi karotenoid pada tanaman yang diberi perawatan *Cu*. Kandungan klorofil yang lebih rendah dan perubahan struktur kloroplas serta komposisi membran tilakoid didapati pada daun tanaman yang tumbuh pada lahan dengan kandungan *Cu* tinggi (Quartacci *et al.*, 2000 dalam Peer *et al.*, 2003).

Selain itu, ***Cu* juga bisa menggantikan *Mg* dalam molekul klorofil yang terdapat pada antena kompleks dan pusat reaksi, sehingga merusak struktur dan fungsinya** (Liu *et al.*, 2004). Di sisi lain, peningkatan relatif pada rasio a:b klorofil menyatakan bahwa *Cu* mempengaruhi senyawa kompleks PSII yang mengumpulkan cahaya (*light collector complex of PSII*) secara berbeda-beda, tempat klorofil b berada, bukannya klorofil a pusat reaksi. Peningkatan b-karotin dalam jumlah kecil, yang disebabkan oleh adanya *Cu*, bisa diakibatkan oleh resistansinya terhadap degradasi, karena b-karotin merupakan pigmen yang relatif stabil yang memiliki peran protektif.

Polutan ***Cu* ada karena peristiwa alam atau dari aktivitas manusia yaitu kegiatan industri bahan pengawet pengelolaan kayu, industri warna**

dan cat, fungisida dan insektisida, metalurgi, fotografi, petroleum, dan buangan rumah tangga.

Dalam jumlah sangat kecil esensial untuk metabolisme seperti halnya *Fe*. Toksisitas baru diperlihatkan bila telah masuk dalam jumlah melebihi ambang batas toleransi.

- 2) Pada manusia: Kebutuhan manusia dewasa terhadap *Cu* cukup tinggi sekitar 30 µg *Cu*/kg berat tubuh, anak-anak 40 µg *Cu*/kg, bayi 80 µg *Cu*/kg (WHO, dalam Palar, 2004), untuk sistem enzim oksidatif, pembentuk haemoglobin, kolagen, pembuluh darah dan myelin otak. Meskipun demikian, *Cu* yang berlebih akan meracuni. Debu *Cu* 3,5 mg/kg menyebabkan kematian. Pada manusia, efek keracunan utama akibat terpapar debu atau uap logam *Cu* dari industri peleburan bijih *Cu* dan pengelasan logam yang mengandung *Cu* adalah terjadinya **gangguan pernafasan sebelah atas, muntah-muntah, diare, pendarahan gastrointestinal, nekrosis hati, timbulnya penyakit Wilson (*hepatic cirrhosis*, kerusakan pada otak, demyelinase, penurunan kerja ginjal, pengendapan *Cu* di kornea), penyakit Kinsky** (terbentuknya rambut yang kaku dan kemerahan) (Palar, 2004).

d. Kromium/Chromium (Cr)

- 1) Pada Tumbuhan: Logam *Cr* dilaporkan menimbulkan beberapa efek stimulan (Samantaray *et al.*, 1998 dalam Peer *et al.*, 2003), tanpa memuat mekanisme spesifik bagaimana logam ini diserap. Pada sebagian kasus, pertumbuhan tanaman dirangsang saat konsentrasi *Cr* berada pada kadar rendah; akan tetapi, pada konsentrasi tinggi, logam ini menunjukkan efek yang jelas merusak. **Toksisitas kromium mempengaruhi panjang akar utama dan memacu perubahan arsitektur akar secara keseluruhan.** Efek pengganggu *Cr* pada pertumbuhan akar (Barbosa *et al.*, 1996 dalam Peer *et al.*, 2003) dan efek toksiknya terhadap pembelahan sel berasal dari fiksasi Cr^{3+} oleh jaringan tanaman dan gangguan hubungan osmotis yang menimbulkan pembatasan pada

pentransportasian Ca^{2+} melalui membran plasma menuju sitoplasma (Liu *et al.*, 1992).

Stres yang diakibatkan oleh *chromium* bisa menyebabkan terjadinya modifikasi metabolis pada tanaman, misalnya perubahan fotosintesis, degradasi pigmen fotosintesis dan induksi tekanan oksidatif (Panda & Choudhury, 2005). Lebih jauh lagi, *Cr* menyebabkan penyempitan area daun dan perubahan biokimia yang bertanggung jawab terhadap terhambatnya sintesis klorofil serta diorganisasi ultrastruktur kloroplas (Panda & Choudhury, 2005). Tekanan *chromium* juga menyebabkan munculnya klorosis dan nekrosis daun, kerusakan oksidatif pada biomolekul seperti lipid dan protein, gangguan nutrisi mineral, peningkatan produksi *glutathione* dan asam askorbat, perubahan *metabolic pool* yang menjembatani produksi fitoselatin dan histidin, gangguan terhadap aktivitas reduktase nitrat, reduktasi Fe^{3+} akar, -ATPase H^+ membran plasma, -ATPase yang terikat pada Na^{2+}/K^+ , -ATPase yang terikat pada Ca^{2+} , fosfatase alkali, dismutase superoksida, katalase dan peroksidase, dan yang terakhir, menurunnya pertumbuhan tanaman, yang menghambat perkembangannya dan pada akhirnya, bisa menyebabkan kematian tanaman itu (Patra, 2004).

Efek ion *Cr* dalam fotosintesis dan pemindahan energi eksitasi bisa juga disebabkan oleh abnormalitas dalam ultrastruktur kloroplas yang berkaitan dengan perkembangan sistem lamellar, dengan banyak ruang thylakoid dan hampir tidak terdapat *grana* (Van Assche & Clijsters, 1983 dalam Peer *et al.*, 2003). Disorganisasi ultrastruktur kloroplas, gangguan terhadap proses transport elektron dan deviasi elektron dari tempat PSI donor menuju Cr^{6+} bisa menjadi penjas bagi turunnya tingkat fotosintesis yang disebabkan oleh *Cr*.

Karena kemiripan struktur dengan sebagian elemen esensial lain, *Cr* bisa mempengaruhi nutrisi mineral tanaman dengan cara yang sangat rumit. Sekali terakumulasi dan terdistribusi di dalam tanaman, elemen ini bisa berinteraksi dengan elemen esensial lainnya dan memberi pengaruh signifikan terhadap konsentrasi dan distribusi nutrisi di dalam tanaman, sekaligus memodifikasi

morfologi dan sebagian proses fisiologisnya. Formasi senyawa kompleks *Cr* dengan asam organik bisa berperan sangat penting dalam efek pengganggu dan stimulator yang ditimbulkan oleh *Cr* terhadap pentranslokasian nutrisi mineral yang berbeda-beda (Panda dan Choudhury, 2005). Kelebihan kandungan *Cr* bisa mengganggu absorpsi *Na*, *Fe*, *Mn*, *Cu*, *N*, *P*, *K*, dan *Mg*.

Salah satu alasan menurunnya absorpsi sebagian nutrisi pada tanaman yang mengalami stres akibat kandungan *Cr* adalah terganggunya aktivitas membran plasma $H^+ATPase$. *Cr* sangat mengganggu penyatuan *P*, *K*, *Ca*, *Mg*, *Fe*, *Mn*, *Zn*, dan *Cu* di dalam konstituen sel yang berbeda-beda pada *Coconut nucifera*. Efek penghambat yang ditimbulkan *Cr* terhadap pertumbuhan tanaman adalah akibat dari interaksi spesifik antara *Cr* dan *P*, *Cr* dan *Fe* atau *Cr* dan *Cu*. Interaksi semacam ini bisa dikaitkan dengan sifat kimia logam ini, misalnya muatannya (Cr^{3+} dan Fe^{3+}) serta radius ionis efektifnya (*Cr* dan *Cu*).

Klorosis daun yang disebabkan oleh Cr^{3+} bisa merupakan akibat dari gangguan penyerapan *Fe* atau penurunan transport *N*. Konsentrasi *Cr* yang tinggi bisa mengganggu ultrastruktur kloroplas sehingga juga mengganggu proses fotosintesis (Panda & Choudhury, 2005). Penurunan rasio klorofil *a:b* yang disebabkan oleh *Cr* mengindikasikan bahwa toksisitas *Cr* mungkin bisa menurunkan ukuran bagian periferal antena kompleks. Penurunan jumlah klorofil *a* bisa terjadi karena destabilisasi dan degradasi protein pada bagian periferal. Inaktivasi enzim yang terdapat dalam jalur biosintesis klorofil juga bisa memberi kontribusi terhadap penurunan kandungan klorofil secara umum pada kebanyakan tanaman yang mengalami stres *Cr* (Shanker *et al.*, 2005 dalam Panda & Choudhury, 2005).

- 2) Pada Manusia: *Cr* dimanfaatkan manusia secara luas sebagai bahan pelapis (plating) peralatan rumah tangga sampai mobil, anti karat, alat pemotong, penyamakan, pencelupan, fotografi, pewarnaan, bahan peledak, mobilisasi bahan-bahan bakar (Palar, 2004). Logam atau

persenyawaan *Cr* yang masuk dalam tubuh akan ikut dalam proses metabolisme, akan berinteraksi dengan bermacam-macam unsur biologis, yang menyebabkan **terganggunya fungsi-fungsi tertentu yang bekerja dalam proses metabolisme. Senyawa-senyawa yang mempunyai berat molekul rendah, seperti yang terdapat dalam sel darah, dapat melarutkan *Cr* dan seterusnya ikut terbawa ke seluruh tubuh bersama peredaran darah. Ion-ion *Cr* akan menghalangi atau menghambat kerja enzim, di antaranya benzopiren hidrosilase (penghambat pertumbuhan kanker yang disebabkan oleh asbestos) yang mengakibatkan perubahan dalam kemampuan pertumbuhan sel, sehingga sel-sel menjadi tumbuh liar dan tidak terkontrol.** Banyaknya *Cr* dalam paru-paru menjadi dasar hipotesis bahwa *Cr* merupakan salah satu bahan yang dapat menyebabkan timbulnya kanker paru-paru. Karena itu *Cr* digolongkan sebagai bahan karsinogen. Selain itu diketahui, *Cr* dapat mengendapkan *DNA* dan *RNA* pada pH 7, serta menyebabkan denaturasi albumin (Palar, 2004).

e. Arsenik (As)

As merupakan metaloid yang terjadi secara alami, yang telah digunakan dalam pestisida dan bahan pengawet kayu, sehingga akhirnya dia mengalir ke tempat-tempat yang terkontaminasi As (Meharg & Hartley-Whitaker, 2002 dalam Peer *et al.*, 2003). Misalnya, Canberra, wilayah pinggiran kota di Australia memiliki kontaminasi As yang berasal dari tumpahan pestisida dan telah dilaporkan terjadi kontaminasi tanah setempat yang berasal dari penggunaan As dalam kayu-kayu yang diperlakukan dengan menggunakan tekanan. Di dataran aluvial di Banglades dan Bengali barat, India, kontaminasi As pada air tanah yang berasal dari degradasi mikrobial pada kayu yang digunakan untuk bahan bakar telah menghasilkan kontaminasi pada sumur dan menimbulkan resiko kesehatan. Irigasi telah menyebarkan kontaminasi As ke tanah sekitar, sehingga mengakibatkan keracunan As pada manusia dan binatang lain (McArthur *at al*, 2001 dalam Peer *et al.*, 2003). Kontaminasi serupa tampak terjadi di sub-sub tanah di seluruh dunia.

1. Pada Tumbuhan: Arsenite (AsO_2 atau As(III)) dan arsenate (AsO_4 atau As(V)) merupakan *moietis* arsenik anorganik yang dominan yang ditemukan dalam tanaman-tanaman terestrial. Kedua bentuk tersebut bersifat fitotoksik, kendati melalui mekanisme yang berbeda. Arsenate, bentuk dominan yang ditemukan dalam tanah aerobik merupakan analog fosfat. Pembentukan senyawa ADP-As bukannya ATP menyebabkan kematian sel; arsenite bisa menyebabkan kematian sel dengan mengikat pada dan menghambat enzim yang memiliki kelompok sulfidril. Arsenate sering ditandai sebagai zat bersifat lebih fitotoksik pada dua spesies arsen namun toksisitas relatifnya bersifat khusus-spesies. Karena klon toleran rumput *H. lanayus* memiliki proporsi lebih kecil dari total As-nya seperti halnya arsenit yang dibandingkan dengan klon non toleran (Qeaghebeur & Rengel 2003 dalam Peer *et al.*, 2003), begitu pula tumbuhan pakis *Pteris vittata* (pakis *Chinese Brake*) hampir semata-mata mengakumulasi arsenit dalam daunnya. Bila non akumulator memiliki ambang batas fitotoksik sekitar 5-100 mg kg⁻¹ bobot kering As, *H. lanatus* bisa mengakumulasi hingga 560 mg kg⁻¹ As, dan *P. vittata* bisa mengakumulasi sampai 27.000 mg kg⁻¹ bobot kering As, dengan gejala-gejala fitotoksik yang muncul sekitar 10.000 mg kg⁻¹ bobot kering As (Peer *et al.*, 2003).

Pteris cretica, *Pteris longifolia* dan *Pteris umbrosa* merupakan spesies paku yang juga mampu mengakumulasi As secara berlebihan. *Pteris vittata* mengakumulasi As dalam tanah baik yang terkontaminasi dan tak terkontaminasi. Hal ini menyatakan bahwa hiperakumulasi merupakan sifatnya yang menyolok (Wang *et al.*, 2002 dalam Peer *et al.*, 2003). Akumulasi arsenik berkorelasi dengan konsentrasi fosfor media yang mengitari kehidupan *P. vittata*. Wang *et al.* (2002 dalam Peer *et al.*, 2003) menemukan bahwa **kekurangan fosfat mengakibatkan peningkatan sebesar 2,5 kali penyerapan bersih As, sementara keberadaan fosfat dalam media yang ada menurunkan influx (masuknya) arsenat.** Peningkatan penyerapan P/As dalam kondisi kekurangan ini diperantarai oleh peningkatan ekspresi gen pengangkut fosfat dan peningkatan berikutnya jumlah protein. Arsenit tidak

bersaing dengan fosfat dalam hal melakukan penyerapan ke akar *P. vittata*. Hal ini memperlihatkan bahwa ada mekanisme lain bagi penyerapan arsenit.

Dalam *Pteris vittata*, arsenit lebih efisien ditranslokasikan dari akar ke daun dibandingkan arsenat. Dalam *B. juncea*, penambahan dimerkaptosusinat selator As ditiol ke larutan nutrisi meningkatkan transpor arsenit dari akar ke tunas (Pickering *et al.*, 2000 dalam Peer *et al.*, 2003), namun belum jelas apakah arsenit itu diuraikan sebelum pembebanan xilem dan transpor dalam *P. vittata*. Sejalan dengan kompetisi arsenat untuk mendapatkan situs transpor fosfat, tingginya tingkatan fosfor ternyata mengakibatkan penurunan yang besar konsentrasi As pada daun *P. vittata*.

- 2) Pada Hewan dan Manusia: **As lebih dikenal sifat racunnya, namun penting dalam pengobatan.** Asam arsenilik dan bentuk nitrofenil dari arsen **digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan, kesehatan, dan efisiensi penggunaan makanan pada unggas; yang bekerja serupa antibiotik dalam dosis rendah.** Banyak pengamatan epidemiologi pada hewan dan manusia menunjukkan bahwa As bersifat karsinogenik/Co-karsinogen terutama untuk kulit, paru-paru dan saluran limfe (Linder, 1992).

f. Seng (Zinc/Zn)

Zinc merupakan elemen mikro esensial, namun bersifat toksik bagi hewan dan tanaman bila konsentrasi *Zn* ini tinggi (Cobbett & Goldsbrough, 2002).

- 1) Pada Tumbuhan: Hiperakumulator *Zn* pertama yang diidentifikasi adalah *T. caerulescens*. Tanaman ini dilaporkan mengakumulasi antara 25.000 dan 30.000 $\mu\text{g g}^{-1}$ total *Zn* sebelum memperlihatkan gejala toksisitas, *T.caerulescens* bisa mengakumulasi bobot kering maksimum 40.000 $\mu\text{g g}^{-1}$ *Zn* di tunasnya. *Arabidopsis halleri* juga ternyata meningkat sejalan dengan konsentrasi *Zn* di tunasnya dari 300 $\mu\text{g g}^{-1}$ berat kering pada μM *Zn* hingga 32.000 $\mu\text{g g}^{-1}$ pada 1000 μM *Zn* tanpa fitotoksitas. *Arabidopsis lyrata* ssp. Friedensville mengakumulasi konsentrasi *Zn* yang tinggi pada daun di ladang, namun

memperlihatkan akumulasi yang beragam pada jaringan aksenik.

Keluarga ZIP protein (protein seperti ZRT/IRT) mentranspor Zn ke dalam tanaman (Grotz *et al.*, 1998 dalam Peer *et al.*, 2003). ZNT 1 dari *T.caerulscens* memperantarai afinitas rendah penyerapan Zn sebagaimana harapan pada tanaman yang tumbuh dengan memiliki konsentrasi Zn yang tinggi. Ekspresi ZNT 1 lebih tinggi pada hiperakumulator *T.caerulscens* dibandingkan pada non-akumulator *T. arvense*, yang kemungkinan menggiring ke arah densitas yang lebih tinggi transporter Zn pada membran plasma sel akar. Perbedaan konsentrasi transporter ini bisa menjelaskan pengamatan bahwa hiperakumulator dan nonakumulator memiliki afinitas yang sama untuk Zn namun hiperakumulator ini memiliki tingkat kecepatan penyerapan yang lebih tinggi.

Meskipun lebih rendahnya tingkat kecepatan penyerapan, akar *T. arvense* ternyata mengkumulasikan Zn jauh lebih besar dibandingkan akar *T. caerulsecens* (Lasat *et al.*, 1996 dalam Peer *et al.*, 2003). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan lebih bagusnya transpor ke daun dalam hiperakumulatornya. *T. caerulsecens* memiliki Zn getah xylem lima kali lebih banyak dan sepuluh kali lebih banyak Zn ditranslokasikan ke tunas pada *T. caerulsecens* dibandingkan pada *T. arvense*. Sel daun hiperakumulator ini mampu mengakumulasikan lebih banyak Zn bila bagian daunnya diberi kondisi Zn yang tinggi (lmM).

- 2) Pada hewan dan manusia: Zn adalah mikromineral yang ada di semua jaringan hewan dan manusia dan terlibat dalam fungsi berbagai enzim dalam proses metabolisme. Seng merupakan mikromineral yang paling kurang beracun. Dalam **dosis tinggi, Zn dapat merusak pankreas** (Linder, 1992).

g. Merkuri (*Hydrargyrum*/Hg)

- 1) Pada Manusia: Merkuri bersifat toksik bagi manusia dan bergantung pada bentuknya bisa menyebabkan gangguan neurologis yang parah (Carty dan Malone, 1979). Paparan Merkuri pada manusia kebanyakan melalui konsumsi ikan, karena Hg dibiomagnifikasikan melalui rantai makanan

encer dan campuran untuk tambalan gigi (amalgm dental fillings). Selama abad yang lalu, beberapa ribu ton Hg telah dilepaskan ke lingkungan akibat aktivitas manusia (Andren dan Nriagu 1979). Banyak negara berkembang menggunakan praktik penambangan campuran Hg-Au elemental yang mengakibatkan kontaminasi Hg yang signifikan terhadap air dan tanah sekitar. Contohnya adalah tambang Au artisanal di Suriname dan lembah Amazon (Gray et al., 2000). Merkuri dalam tanah bisa diubah menjadi *cinnabar* (HgS) sebagai akibat dari reduksi sulfat sesudah deposisi dan penimbunan tanah yang terkontaminasi merkuri. Namun, pelepasan merkuri dari bentuk padat, seperti cinnabar juga bisa menimbulkan bahaya lingkungan. Studi terhadap tanah terkontaminasi dari penimbunan merkuri industri di daerah hulu East Fork Poplar Creek di Oak Ridge, TN, dan dalam studi Florida Everglades menunjukkan bahwa benda organik bisa meningkatkan mobilisasi merkuri dari cinnabar dan mempengaruhi bioavailabilitas merkuri (Barnett et al., 1997; Ravichandran et al., 1998).

- 2) Pada Tumbuhan: Bentuk merkuri yang paling toksik adalah organomercurial seperti methyl-Hg dan phenyl mercuric acetate, diikuti oleh ionic Hg(II), dengan Hg(O) elemental sebagai bentuk merkuri yang paling tidak bersifat toksik. Organomercurial dan ionic Hg bersifat toksik bagi tanaman dan hingga kini tanaman yang mengakumulasikan Hg secara berlebihan belum teridentifikasi. Namun, jamur penghiperakumulasi Hg *Amanita muscaria* ternyata mengakumulasikan 96-1900 ng g⁻¹ bobot kering di capingnya (topinya) dan 61-920 ng g⁻¹ bobot kering pada tangkainya, tergantung pada tempat diambilnya jamur itu (Falandysz et al., 2003). Sebuah kajian mutakhir yang menyelidiki akumulasi Hg di antara *Salix spp* menemukan bahwa mayoritas Hg diakumulasikan dan disimpan dalam dinding sel akar dan hanya sebesar 0,45-0,65% ditranslokasikan ke bagian pucuknya (Wang dan Greger 2004).

h. Nikel (*Nickel/Ni*)

Ni merupakan unsur esensial yang bisa bersifat toksik dan kemungkinan karsinogenik bila konsentrasinya tinggi (ATSDR 2003).

- 1) Pada Manusia: Toksisitas *Ni* pada manusia biasanya berasal dari pajanan berulang akibat pekerjaan sehingga mengakibatkan **dermatitis, asma atau sakit kepala** (Dabies 1986; Akeeson dan Skerfing 1985).
- 2) Pada Tumbuhan: kontaminasi *Ni* pada tanaman terutama terbatas pada kawasan-kawasan sekitar tempat pencairan *Ni* seperti Sudbury, Ontario dan Harare, Zimbabwe (Johnson dan Hale 2004; Lupankwa dkk., 2004). *As*, *Cd* dan *Pb* sering ada pada pertambangan *Ni* dan limbah cair dan konsentrasi logam besar pada air dan tanah dari operasi penambangan *Ni* bisa melebihi batas keamanan yang ditetapkan pemerintah (Lupankwa dkk., 2004). Tanah ultamafik dan sepertine secara alami terjadi di kawasan yang tinggi konsentrasi *Ni*-nya yang dicoraki oleh flora unik yang toleran terhadap *Ni*. Mayoritas hiperakumulator *Ni* telah dikumpulkan dari tanah-tanah tersebut.

Alyssum lesbiacum dan *Thlaspi goesingense* keduanya merupakan tanaman hiperakumulasi *Ni* dalam keluarga Brassicaceae. Dalam genus *Alyssum* sendiri, telah ditemukan sebanyak 48 spesies yang berbeda yang mengandung antara 1000 µg g⁻¹ dan 30000 µg g⁻¹ *Ni* pada biomasa kering daun (Baker dan Brooks 1989; Kerkeb dan Kramer 2003). *Thlaspi goesingense* dilaporkan mampu mengakumulasikan sebanyak 9490 mg *Ni* g⁻¹ berat kering (Freeman et al., 2004; Kramer et al., 1997; Reeves dan Brooks, 1983).

Nicotianamine dipandang terlibat dalam detoksifikasi *Ni* pada *T. caerulea* (Vacchina et al., 2003). *Nicotianamine synthase (NAS)* secara konsisten diekspresikan pada tingkat yang tinggi dalam *T. caerulea* dan *A. halleri* yang benar-benar menyatakan adanya peran bagi nicotianamine dalam hiperakumulasi *Ni/Zn* (Becher et al., 2004; Vacchina et al., 2003; Weber et al., 2004).

Spesies yang berbeda dari hiperakumulator *Alyssum Ni* telah dievaluasi pada fitoremediasi situs-situs pertambangan (McGrath dan Zhao 2003) dan hibrida

Alyssum telah dikembangbiakkan sehingga memiliki sifat-sifat yang cocok untuk memfitominasi *Ni* pada tanah serpentine di Oregon dan Washington (Chaney et al, 1999; Li et al, 2003b) dan teknologi fitomin ini telah dikomersialisasikan (Li et al. 2003a). Hiperakumulator logam lain sedang diselidiki untuk digunakan dalam fitomisasi *Ni*, thallium, dan emas dari tanah (Anderson et al. 1999; Boominathan et al., 2004).

i. Selenium (Se)

- 1) Pada Hewan: Se merupakan unsur esensial bagi hewan, tapi sejauh ini belum diperlihatkan merupakan unsur esensial bagi tanaman. **Se-glutathione peroxidase (peroksidase glutathion Se) mamalia melindungi dari tekanan oksidatif** (Michiels dkk., 1994) dan **Se juga memiliki aktivitas pencegahan anti-kanker/kanker yang terdapat pada senyawa-senyawa seperti *methylselenocysteine* (MeSeCys)** (Ellis et al., 2004). Hewan ternak di AS tenggara yang memiliki tanah rendah Se memperlihatkan deformitas terkait dengan nutrisi, sementara hewan ternak yang merumput di tanah yang kandungan Se-nya tinggi di AS bagian Barat memperlihatkan gejala toksisitas (Cosgrove 2001). Se secara alami terlepas dari tanah, namun Se menjadi terkonsentrasi dimana *leachate* dari tanah yang bagus irigasinya atau lepasan limbah dari **pengilangan minyak terakumulasi hingga mencapai tingkatan toksik di tanah basah atau kawasan air tanah yang dangkal**. Kesterson National Wildlife Refuge di California bisa dijadikan contoh yang bagus akumulasi Se yang menimbulkan **toksik yang mengakibatkan deformitas unggas yang hidup di air dan satwa liar lain**.
- 2) Pada Tumbuhan: Hiperakumulator Se seperti *Astragalus bisulcatus*, ***two-grooved milkvetch***, ternyata telah mengakumulasi Se hingga sebesar 0,65% (w/w) (Pickering et al., 2003) dan *B. juncea* mengakumulasikan 50 mg kg⁻¹ masa kering di ladang (Banuelos et al., 1997). *A. bisulcatus* mengakumulasikan **konsentrasi tinggi** Se-methylseleno-Cysteine (Se-MeSeCys) pada daun muda, sementara daun yang sudah tua memiliki selenate dan 40 hingga 60 kali lebih rendah Se-MeSeCys-nya. Seleno-Cys methyl transferase

(SMTI) yang mengkatalisasikan Se-MeSeCys dari seleno-Cys (SeCys) dan S-methyl-transferase, masih terdapat pada daun baik yang muda maupun tua. Hal ini menyatakan bahwa sintesis Se-MeSeCys pada daun yang lebih tua harus dihambat pada langkah metabolis awal dan daun yang sudah tua tidak bisa mengurangi selenate (SeO_4^{2-}) hingga ke selenite (SeO_3^{2-}). (Pickering et al., 2003).

Shibagaki et al. (2002) telah memperlihatkan bahwa selenate diambil melalui transporter sulfat *Sultr1:2* (Gambar 3). Mutan *Arabidopsis* pada gen transporter sulfat *Sultr1:2* resistan terhadap selenate, dan ekspresi *Sultr1:2* dilokalisasi pada pucuk akar, korteks akar dan akar lateral (Shibagaki et al., 2002).

E. Pemantapan Materi

Agar memperoleh pemahaman yang baik tentang bab II, silahkan Sdr. selesaikan soal berikut.

PEMANTAPAN MATERI:

1. Mengapa logam berat di lingkungan perlu dicermati?
2. Efek apakah yang membahayakan karena/akibat logam berat pencemar terhadap individu organisme?
3. Efek apakah yang membahayakan karena/akibat logam berat pencemar terhadap lingkungan?
4. Al Baqarah 02 : 11: Dan bila dikatakan kepada mereka: "Janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi" Mereka menjawab: "Sesungguhnya kami orang-orang yang mengadakan perbaikan." Jelaskan pernyataan tersebut hubungannya dengan pencemaran!

BAB III PERJALANAN POLUTAN LOGAM BERAT KE RANTAI MAKANAN

A. Panduan Mempelajari Bab III

BAB III PERJALANAN POLUTAN LOGAM BERAT KE RANTAI MAKANAN

Merupakan substansi materi dan pengayaan wawasan untuk mencapai Standar Kompetensi 3:

3. Mampu menganalisis kasus-kasus yang terjadi pada pencemaran lingkungan air, tanah, udara, serta pemecahannya secara bioremediasi.

Kompetensi Dasar 2, 3, 4, 5, 6:

2. Menganalisis metode bioremedasi
3. Menganalisis Pengolahan Limbah secara biologis
4. Mengkaji kasus Bioremediasi Hidrokarbon Minyak Bumi.
5. Mengkaji kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Batubara
6. Mengkaji Kasus Bioremediasi Pencemaran Industri Emas

B. Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Pembahasan Perjalanan Polutan Logam Berat ke Rantai Makanan

وَإِذَا قِيلَ لَهُمْ لَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ قَالُوا إِنَّمَا نَحْنُ مُصْلِحُونَ ﴿١١﴾

"Janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi" Mereka menjawab: "Sesungguhnya kami orang-orang yang mengadakan perbaikan." (Al Baqarah [02]: 11)

أَلَا إِنَّهُمْ هُمُ الْمُفْسِدُونَ وَلَكِن لَّا يَشْعُرُونَ ﴿١٢﴾

"Ingatlah, sesungguhnya mereka itulah orang-orang yang membuat kerusakan, tetapi mereka tidak sadar". (Al Baqarah [02]: 12)

فَإِن تَوَلَّوْا فَإِنَّ اللَّهَ عَلِيمٌ بِالْمُفْسِدِينَ ﴿٦٣﴾

"Kemudian jika mereka berpaling (dari kebenaran), maka sesungguhnya Allah Maha Mengetahui orang-orang yang berbuat kerusakan". (Ali 'Imran [03] : 63)

وَلَا تَبْخَسُوا النَّاسَ أَشْيَاءَهُمْ وَلَا تَعَثُوا فِي الْأَرْضِ مُمْسِدِينَ ﴿١٨٣﴾

“Dan janganlah kamu merugikan manusia pada hak-haknya dan janganlah kamu merajalela di muka bumi dengan membuat kerusakan”. (Asy Syu'araa' [26]: 183)

فَهَلْ عَسَيْتُمْ إِنْ تَوَلَّيْتُمْ أَنْ تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ وَتَقَطَّعُوا

أَرْحَامَكُمْ ﴿٢٢﴾

“Maka apakah kiranya jika kamu berkuasa kamu akan membuat kerusakan di muka bumi dan memutuskan hubungan kekeluargaan?”(QS Muhammad [47]: 22)

وَإِذِ اسْتَسْقَىٰ مُوسَىٰ لِقَوْمِهِ فَقُلْنَا اضْرِبْ بِعَصَاكَ الْحَجَرَ ۖ فَانفَجَرَتْ

مِنْهُ اثْنَتَا عَشْرَةَ عَيْنًا قَدْ عَلِمَ كُلُّ أُنَاسٍ مَّشْرَبَهُمْ ۖ كُلُوا وَاشْرَبُوا

مِنْ رِزْقِ اللَّهِ وَلَا تَعَثُوا فِي الْأَرْضِ مُمْسِدِينَ ﴿٦٠﴾

... Makan dan minumlah rezki (yang diberikan) Allah, dan janganlah kamu berkeliaran di muka bumi dengan berbuat kerusakan” (Al Baqarah [02]: 60)

وَلَا تُطِيعُوا أَمْرَ الْمُسْرِفِينَ ﴿١٥١﴾

الَّذِينَ يُفْسِدُونَ فِي الْأَرْضِ وَلَا يُصْلِحُونَ ﴿١٥٢﴾

“Dan janganlah kamu mentaati perintah orang-orang yang melewati batas, yang membuat kerusakan di muka bumi dan tidak mengadakan perbaikan.” (Asy Syu'araa' [26]: 151- 152)

وَالَّذِينَ كَفَرُوا بَعْضُهُمْ أَوْلِيَاءُ بَعْضٍ ۚ إِلَّا تَعْمَلُوهُ تَكُن فِتْنَةٌ فِي الْأَرْضِ

وَفَسَادٌ كَبِيرٌ ﴿٧٣﴾

“Adapun orang-orang yang kafir, sebagian mereka menjadi pelindung bagi sebagian yang lain. Jika kamu (hai para muslimin) tidak melaksanakan apa yang telah diperintahkan Allah itu

,niscaya akan terjadi kekacauan di muka bumi dan kerusakan yang besar". (Al Anfaal [8]: 73)

وَقَضَيْنَا إِلَىٰ بَنِي إِسْرَائِيلَ فِي الْكِتَابِ لَتُفْسِدُنَّ فِي الْأَرْضِ

مَرَّتَيْنِ وَلَتَعْلُنَّ عُلُوقًا كَبِيرًا ﴿٤﴾

Dan telah Kami tetapkan terhadap Bani Israil dalam Kitab itu: "Sesungguhnya kamu akan membuat kerusakan di muka bumi ini dua kali dan pasti kamu akan menyombongkan diri dengan kesombongan yang besar." (Al Israa' [17]: 4)

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ

الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ﴿٤١﴾

"Telah tampak kerusakan di darat dan dilaut disebabkan karena perbuatan tangan manusia; Allah menghendaki agar mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka kembali (kejalan yang benar)." (Ar Ruum [30]: 41)

الَّذِينَ كَفَرُوا وَصَدُّوا عَن سَبِيلِ اللَّهِ زِدْنَاهُمْ عَذَابًا فَوْقَ

الْعَذَابِ بِمَا كَانُوا يُفْسِدُونَ ﴿٨٨﴾

"Orang-orang yang kafir dan menghalangi (manusia) dari jalan Allah, Kami tambahkan kepada mereka siksaan di atas siksaan disebabkan mereka selalu berbuat kerusakan". (An Nahl [16]: 88)

وَإِذْ قَالَ رَبُّكَ لِلْمَلَائِكَةِ إِنِّي جَاعِلٌ فِي الْأَرْضِ خَلِيفَةً

قَالُوا أَتَجْعَلُ فِيهَا مَن يُفْسِدُ فِيهَا وَيَسْفِكُ الدِّمَاءَ وَنَحْنُ نُسَبِّحُ

بِحَمْدِكَ وَنُقَدِّسُ لَكَ قَالَ إِنِّي أَعْلَمُ مَا لَا تَعْلَمُونَ ﴿٣٠﴾

Ingatlah ketika Tuhanmu berfirman kepada para Malaikat: "Sesungguhnya Aku hendak menjadikan seorang khalifah di muka bumi." Mereka berkata: "Mengapa Engkau hendak menjadikan (khalifah) di bumi itu orang yang akan membuat kerusakan padanya dan menumpahkan darah, padahal kami senantiasa

bertasbih dengan memuji Engkau dan mensucikan Engkau?" Tuhan berfirman: "Sesungguhnya Aku mengetahui apa yang tidak kamu ketahui." (Al Baqarah [2]: 30)

وَأَتَّبِعْ فِي مَآءَاتِكَ اللَّهُ الدَّارَ الْآخِرَةَ وَلَا تَنْسَ نَصِيبَكَ مِنَ الدُّنْيَا وَأَحْسِنْ

كَمَا أَحْسَنَ اللَّهُ إِلَيْكَ وَلَا تَبْغِ الْفَسَادَ فِي الْأَرْضِ إِنَّ اللَّهَ لَا يُحِبُّ

الْمُفْسِدِينَ ﴿٧٧﴾

"Dan carilah pada apa yang telah dianugerahkan Allah kepadamu (kebahagiaan) negeri akhirat, dan janganlah kamu melupakan bahagianmu dari (kenikmatan) duniawi dan berbuat baiklah (kepada orang lain) sebagaimana Allah telah berbuat baik, kepadamu, dan janganlah kamu berbuat kerusakan di (muka) bumi. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang-orang yang berbuat kerusakan". (Al Qashash [28]: 77)

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ خَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ

اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ ﴿٥٦﴾

"Dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi, sesudah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut (tidak akan diterima) dan harapan (akan dikabulkan). Sesungguhnya rahmat Allah amat dekat kepada orang-orang yang berbuat baik". (Al A'raaf [7]: 56)

قَالَ رَبِّ أَنْصُرْنِي عَلَى الْقَوْمِ الْمُفْسِدِينَ ﴿٣٠﴾

Luth berdoa: "Ya Tuhanku, tolonglah aku (dengan menimpakan azab) atas kaum yang berbuat kerusakan itu." (Al 'Ankabut [29]: 30)

تِلْكَ الدَّارُ الْآخِرَةُ نَجْعَلُهَا لِلَّذِينَ لَا يُرِيدُونَ عُلُوًّا فِي الْأَرْضِ وَلَا فَسَادًا

وَالْعَذِيبَةَ لِلْمُنْتَقِينَ ﴿٨٣﴾

"Negeri akhirat itu, Kami jadikan untuk orang-orang yang tidak ingin menyombongkan diri dan berbuat kerusakan di (muka) bumi.

Dan kesudahan (yang baik) itu adalah bagi orang-orang yang bertakwa". (Al Qashash [28]: 83)

إِنَّمَا جَزَاءُ الَّذِينَ يُحَارِبُونَ اللَّهَ وَرَسُولَهُ وَيَسْعَوْنَ فِي الْأَرْضِ فَسَادًا أَنْ يُقَتَّلُوا أَوْ يُصَلَّبُوا أَوْ تُقَطَّعَ أَيْدِيهِمْ وَأَرْجُلُهُمْ مِنْ خَلْفٍ أَوْ يُنْفَوْا مِنَ الْأَرْضِ ذَلِكَ لَهُمْ خِزْيٌ فِي الدُّنْيَا وَلَهُمْ فِي الْآخِرَةِ عَذَابٌ

عَظِيمٌ ﴿٣٣﴾

“Sesungguhnya pembalasan terhadap orang-orang yang memerangi Allah dan Rasul-Nya dan membuat kerusakan di muka bumi, hanyalah mereka dibunuh atau disalib, atau dipotong tangan dan kaki mereka dengan bertimbal balik, atau dibuang dari negeri (tempat kediamannya). Yang demikian itu (sebagai) suatu penghinaan untuk mereka didunia, dan di akhirat mereka beroleh siksaan yang besar,”(Al Maa'idah [5]: 33)

وَالَّذِينَ يَنْقُضُونَ عَهْدَ اللَّهِ مِنْ بَعْدِ مِيثَاقِهِ وَيَقْطَعُونَ مَا أَمَرَ اللَّهُ بِهِ أَنْ يُوصَلَ وَيُفْسِدُونَ فِي الْأَرْضِ أُولَٰئِكَ لَهُمُ اللَّعْنَةُ وَلَهُمْ

سُوءُ الدَّارِ ﴿٢٥﴾

“Orang-orang yang merusak janji Allah setelah diikrarkan dengan teguh dan memutuskan apa-apa yang Allah perintahkan supaya dihubungkan dan mengadakan kerusakan di bumi, orang-orang itulah yang memperoleh kutukan dan bagi mereka tempat kediaman yang buruk (Jahannam)”. (Ar Ra'd [13]: 25)

فَلَوْلَا كَانَ مِنَ الْقُرُونِ مِنْ قَبْلِكُمْ أُولُوا بَقِيَّةٍ يَنْهَوْنَ عَنِ الْفَسَادِ فِي الْأَرْضِ إِلَّا قَلِيلًا مِمَّنْ أَنْجَيْنَا مِنْهُمْ وَاتَّبَعَ الَّذِينَ ظَلَمُوا مَا أُتْرِفُوا

فِيهِ وَكَانُوا مُجْرِمِينَ ﴿١١٦﴾

“Maka mengapa tidak ada dari umat-umat yang sebelum kamu orang-orang yang mempunyai keutamaan yang melarang daripada

(mengerjakan) kerusakan di muka bumi, kecuali sebahagian kecil di antara orang-orang yang telah Kami selamatkan di antara mereka, dan orang-orang yang zalim hanya mementingkan kenikmatan yang mewah yang ada pada mereka, dan mereka adalah orang-orang yang berdosa”. (Hud [11]: 116)

وَمِنْهُمْ مَّنْ يُؤْمِنُ بِهِ ۖ وَمِنْهُمْ مَّنْ لَا يُؤْمِنُ بِهِ ۗ وَرَبُّكَ

أَعْلَمُ بِالْمُفْسِدِينَ ﴿٤٠﴾

“Di antara mereka ada orang-orang yang beriman kepada Al Quran, dan di antaranya ada (pula) orang-orang yang tidak beriman kepadanya. Tuhanmu lebih mengetahui tentang orang-orang yang berbuat kerusakan”. (Yunus [10]: 40)

C. Pengambilan Logam Berat oleh Biota dari Lingkungan Perairan

1. Tiga proses utama pengambilan awal logam oleh makhluk hidup air (Connell & Miller, 2006): (1) dari air melalui permukaan pernapasan (misalnya, insang); (2) penyerapan dari air ke dalam permukaan tubuh; dan (3) dari makanan, partikel atau air yang dicerna melalui sistem pencernaan makanan.

2. Penyerapan logam oleh fotoautotrof, kemoautotrof

Dalam kasus makhluk hidup fotoautotrof dan kemoautotrof, pengambilan logam terjadi langsung dari larutan atau dari tanaman tingkat tinggi melalui akar. Fitoplankton, sebagai contoh, tampaknya cepat menyerap logam pada permukaan sel, dari tempat mereka berdifusi ke dalam membrane sel dan diserap atau diikat pada protein (tempat pertukaran ion) di dalam sel. Umumnya pengambilan logam berat oleh tumbuhan air menjadi proses pasif yang dapat dipengaruhi secara tidak langsung oleh metabolisme (Bryan, 1976b). Namun, beberapa jenis kemoautotrof, sebagai contoh, yaitu yang aktif dalam pembentukan cairan buangan tambang yang asam, dapat memetabolisme logam langsung dari senyawa anorganik seperti sulfide logam (Prosi, 1979 dalam Connell & Miller, 2006)

- 3. Penyerapan pada makhluk heterotrofik:** Pada heterotrofik, cara pemasukan logam lebih besar daripada makhluk hidup autotrofik dan sangat beragam menurut jenisnya. Penyerapan dari larutan oleh sebagian besar hewan terjadi dengan difusi pasif, kemungkinan sebagai senyawa logam yang larut melalui tahap yang disebabkan oleh penyerapan pada permukaan tubuh dan pengikatan oleh unsur pokok tubuh (Bryan, 1976b). Kecepatan penyerapan dipengaruhi oleh perubahan dalam faktor fisika kimiawi (misalnya, suhu, pH, kadar garam) dan ciri-ciri fisiologi dan perilaku makhluk hidup tersebut. Untuk beberapa logam, kecepatan penyerapan secara langsung sesuai dengan tingkatan ketersediaannya di lingkungan (Bryan, 1979).

Perbandingan pengambilan logam dari sumber makanan dengan penyerapan langsung dari larutan merupakan kepentingan mendasar bagi makhluk hidup heterotrofik. Kejadiannya sangat terbatas tetapi menunjukkan bahwa makanan dan partikulat merupakan sumber yang lebih penting bagi logam daripada air untuk hewan besar seperti, ikan dan udang (Bryan, 1976b, 1979). Di dalam lingkungan perairan yang tercemar kesukaan terhadap bahan makanan atau kebiasaan makan sangat penting disebabkan oleh penambahan logam di dalam sedimen, partikulat, dan detritus. Prosi (1979) menyarankan bahwa kebiasaan makan, yaitu (1) *fitofage* (misalnya, gastropoda, krustasea); (2) makan dengan cara menyaring (misalnya, zooplankton, remis, lokan); (3) pemakan sedimen (misalnya, polichaeta, oligochaeta); (4) pemakan detritus (misalnya, gastropoda, isopoda dan amfipoda, larva chironomid); dan (5) karnivora (misalnya, zooplankton, polichaeta, gastropoda, sefalopoda, krustasea, larva srangga air tawar, ikan); harus dipertimbangkan dalam hubungannya dengan kepekatan logam.

D. Proses Pengaturan Kepekatan Logam, Toleransi, dan Penyelamatan diri

Penyelamatan diri makhluk hidup terhadap logam

Walaupun makhluk hidup air mudah menyerap logam, mereka mempunyai kemampuan mengatur kepekatan abnormal yang menentukan toleransi dan faktor penentu penyelamatan diri. Beberapa hewan, seperti ikan dan krustasea, mampu mengeluarkan banyak logam yang terserap secara tidak normal dan mengakibatkan pengaturan kepekatan dalam tubuh pada tingkat yang paling normal (Bryan, 1976b). Umumnya hal ini lebih sering terjadi pada logam esensial yang relatif banyak jumlahnya, seperti *Cu*, *Zn*, dan *Fe* daripada logam nonesensial seperti *Hg* dan *Cd*. Pengaturan atau ekskresi terjadi melalui insang, usus, kotoran, dan urin.

Tumbuh-tumbuhan air dan *bivalves* merupakan pengatur logam yang relatif lemah, khususnya jenis non esensial. Pengurangan dapat terjadi melalui difusi pada tumbuh-tumbuhan air, atau difusi dan beberapa mekanisme lainnya pada moluska; meliputi ekskresi sebagai granula dari ginjal pada remis, lapisan yang menonjol (*spheres pinched off*) dari sel-sel pencernaan pada *Cardium edule*, dan bentuk partikulat dari ujung pada *oysters* (Bryan, 1976b).

E. Toleransi dan Biotransformasi Logam Berat

1. Mekanisme Toleransi Makhluk Hidup terhadap Logam Berat

Banyak makhluk hidup yang tercemar mampu untuk mentolerir kepekatan logam yang lebih dari kebutuhan fisiologis. Pada beberapa keadaan apabila terjadi peningkatan, maka enzim penghambat akan bekerja. Makhluk hidup yang toleran terhadap logam mungkin mengandung logam dengan kepekatan dua atau tiga kali lebih besar daripada normal (Connell & Miller, 2006). Mekanisme detoksifikasi dapat melibatkan penyimpanan logam pada tempat yang tidak aktif di dalam tubuh makhluk hidup untuk sementara atau lebih permanen. Bryan (1976b) di antaranya menyebutkan, pada *Mammalia* singa laut (*Zalophus californianus*) logam *Pb* disimpan dalam tulang, pada anjing laut (*Phoca vitulina*) *Cd* disimpan di ginjal, pada dolphin (*Delphinus delphis*) *Hg*, *Se* disimpan di hati; pada ikan *Makaira ampla* *Hg* disimpan di hati dan otot; pada krustasea *Procambarus clarkia* *Cu* dan *Fe* disimpan

di hepatopankreas; pada udang *Lysemata seticauda* Cd di rangka luar; pada remis *Pecten maximus* Ag, Cd, Cu di kelenjar pencernaan makanan; pada Polichaeta *Nereis diversicolor* Cu, Pb di epidermis. Penyimpanan sementara pada umumnya dengan terikatnya logam pada protein, polisakarida, dan asam amino di dalam jaringan lunak atau cairan tubuh. Metallothionein, secara efektif menyimpan Cd di dalam hati dan ginjal. Tempat penyimpan seperti, tulang, bulu, rambut atau rangka luar untuk mengurangi beberapa logam Pb, Cg, dan Hg.

2. Biotransformasi Logam Berat

Dalam biotransformasi terjadi suatu bentuk transformasi atau pengiriman zat atau material termasuk logam berat tertentu dalam tubuh yang terjadi selama berlangsungnya proses fisiologis tubuh atau proses metabolisme tubuh (Palar, 2004).

Perubahan bentuk secara kimiawi dan penggabungan juga penting, meskipun tidak begitu dipahami. Pengambilan metilmerkuri tampaknya didetoksifikasi sampai tingkatan tertentu oleh demetilasi dan disimpan dalam jaringan sebagai bentuk anorganik yang kurang toksik. Banyak makhluk hidup yang mungkin mampu mengubah selenium dan arsen anorganik menjadi bentuk organik yang kurang toksik (Wood, 1974; Forstner, 1979b). Hubungan yang kuat antara kepekaan merkuri dan selenium pada banyak hewan bertulangbelakang mengarah pada anggapan bahwa selenium dapat menghambat kegiatan toksik merkuri (Forstner, 1979b).

F. Bioakumulasi

1. Jenis Logam yang Diakumulasi

Kemampuan makhluk hidup air untuk mengakumulasi logam yang esensial maupun tidak esensial secara biologis, sudah terbentuk dengan baik. Jenkins (1980a, b) telah menunjukkan data biokonsentrasi dan bioakumulasi beberapa logam di dalam tumbuhan dan hewan. Faktor kepekatan (perbandingan kepekatan logam pada hewan ug/kg terhadap air sekeliling, ug/L untuk beragam jenis makhluk air beranah antara 10^2 dan 10^6 (Wright, 1978;

Phillips, 1980). Callahan et al. (1979) berkesimpulan, dalam suatu tinjauan pencemar yang diutamakan, bahwa bioakumulasi merupakan proses nyata yang menentukan keberadaan logam tertentu, yaitu As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, dan Zn di dalam biota; tetapi tidak bagi Sb dan Ni; dan pada beberapa kasus kedudukan Be, Se, Ag, dan Tl tidak tentu.

2. Faktor Penentu Kapasitas Bioakumulasi

Menurut Phillips (1980), perbedaan inter dan intraspecies nyata dalam kapasitas bioakumulasi logam secara individual, dan logam yang berbeda menunjukkan keragaman kinetika pada setiap spesies. Bentuk kimiawi yang berbeda dari setiap logam, diserap dan diekskresikan dengan kecepatan yang berbeda.

Pada bioakumulasi ini terjadi penumpukan logam-logam berat dan senyawa kimia beracun lainnya, yang terjadi dalam tubuh organisme hidup termasuk manusia (Palar, 2004).

G. Perpindahan Logam Berat dalam Rantai Makanan dan Biomagnifikasi

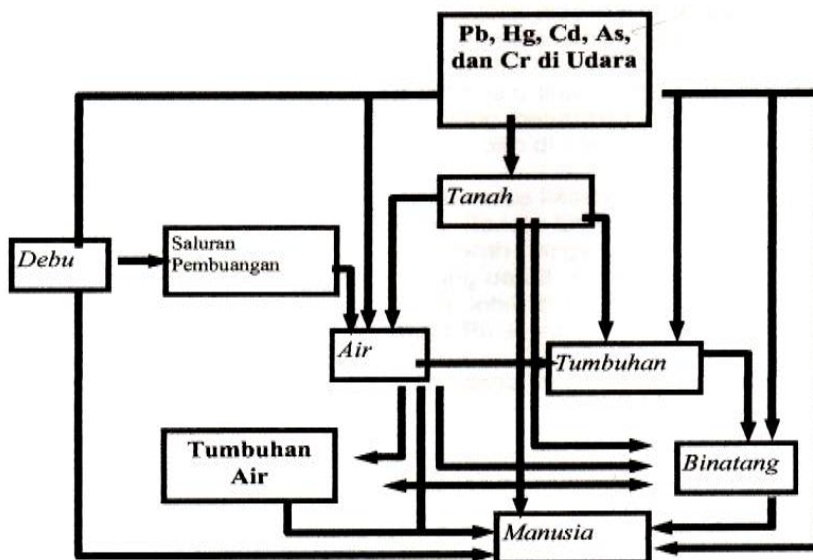
1. Faktor penentu Terjadinya Perpindahan Logam dan Biomagnifikasi

Tentang perpindahan logam berat dalam rantai makanan dan biomagnifikasi, Prosi (1979 dalam Connell & Miller, 2006) memberikan kesimpulan yang berbeda dengan banyak peneliti yang beranggapan bahwa biomagnifikasi logam pada dasarnya analog dengan perilaku DDT di dalam rantai makanan. Menurut Prosi (1979), penambahan logam pada rantai makanan di perairan tidak terjadi, pada umumnya ada kecenderungan terabaikannya beberapa faktor penentu yang berhubungan dengan pengambilan dan akumulasi logam oleh makhluk hidup perairan; yang secara rinci disimpulkan bahwa: (a) Ketersediaan logam secara biologi untuk hewan pada tingkat trofik yang lebih tinggi, pada umumnya lebih ditentukan oleh perpindahan dari air dibandingkan dari makanan; (b) Makhluk hidup pemangsa bersaring diketahui mengakumulasi logam di dalam jaringannya dengan

kandungan yang lebih tinggi, tetapi memindahkan hanya sebagian kecil saja pada makhluk predator; (c) Sedimen dan detritus biasanya mengandung kepekatan logam tertinggi di dalam sistem tercemar dan hewan pemangsa sedimen dan detritus cenderung untuk mengakumulasi logam dengan kepekatan yang lebih tinggi dibandingkan hewan pada tingkat trofik yang lebih tinggi; (d) Jangka waktu hidup hewan pada tingkat trofik yang lebih tinggi biasanya lebih besar daripada makhluk hidup pada tingkat yang lebih rendah. Dengan demikian, penambahan yang berhubungan dengan umur dapat merupakan faktor yang nyata yang mempengaruhi tingkat penambahan logam pada tingkat trofik yang lebih tinggi; (e) Terjadi suatu pemilihan atas dasar kesukaan terhadap pengambilan dan pengeluaran berbagai logam bentuk yang berbeda.

2. Diagram Distribusi Logam Berat dalam Rantai Makanan

Peristiwa bioakumulasi dan biomagnifikasi dapat dijelaskan dengan memperhatikan diagram Distribusi Logam Berat dalam Rantai Makanan, sebagai berikut.



Gambar 3.1 Distribusi Logam Berat dalam Rantai Makanan (Modifikasi: Mukono, 2002)

H. Pemanthapan Materi

Agar pemahaman terhadap materi pembahasan ini lebih jelas, silahkan Sdr. selesaikan soal pemanthapan materi pembahasa tersebut, sebagai berikut.

PEMANTAPAN MATERI:

1. Bagaimanakah perjalanan polutan logam berat ke dalam rantai makanan
2. Jelaskan hubungan antara biotransformasi, bioakumulasi, dan biomagnifikasi!
3. Al Baqarah [02]: 11:Dan bila dikatakan kepada mereka: "Janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi" Mereka menjawab: "Sesungguhnya kami orang-orang yang mengadakan perbaikan."
Jelaskan pernyataan tersebut dengan akibat pencemaran!

BAB IV SAYURAN, BAHAN PANGAN DAN MEDIA AKUMULATOR POLUTAN LOGAM BERAT

A. Panduan Mempelajari Bab IV

BAB IV SAYURAN, BAHAN PANGAN DAN MEDIA AKUMULATOR POLUTAN LOGAM BERAT

Merupakan substansi materi dan pengayaan wawasan untuk mencapai Standar Kompetensi: 2, 3, 4, 5

2. Mengidentifikasi berbagai metode bioremediasi dan aplikasinya dalam pembangunan berkelanjutan.
3. Mampu menganalisis kasus-kasus yang terjadi pada pencemaran lingkungan air, tanah, udara, serta pemecahannya secara bioremediasi.
4. Mampu mengaplikasikan aktivitas mikroba dalam teknologi bioremediasi.
5. Mengevaluasi kegiatan berkaitan aplikasi bioremediasi untuk pembangunan berkelanjutan.

Kompetensi Dasar: 1, 2, 3, 7, 8, 9

1. Memahami ruang lingkup, perkembangan bioremediasi dan peranannya dalam kehidupan manusia
2. Menganalisis metode bioremediasi
3. Menganalisis Pengolahan Limbah secara biologis
7. Menganalisis fitoremediasi
8. Mengkaji peranan tumbuhan air sebagai fitoremediator pencemar
9. Mengkaji Efek Fitoremediasi Terhadap Gizi Pangan

B. Nilai-nilai Keislaman dalam Pembahasan Sayuran, Bahan Pangan dan Media Akumulator Polutan Logam Berat

وَهُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ نَبَاتَ كُلِّ شَيْءٍ فَأَخْرَجْنَا
مِنْهُ خَضِرًا نُخْرِجُ مِنْهُ حَبًّا مُتَرَاكِبًا وَمِنَ النَّخْلِ مِن طَلْعِهَا قِنْوَانٌ دَانِيَةٌ
وَجَنَّاتٍ مِّنْ أَعْنَابٍ وَالزَّيْتُونَ وَالرُّمَّانَ مُشْتَبِهًا وَغَيْرَ مُتَشَبِهٍ ۗ أَنْظُرُوا
إِلَى ثَمَرِهِ إِذَا أَثْمَرَ وَيَنْعِهِ ۗ إِنَّ فِي ذَٰلِكُمْ لَآيَاتٍ لِّقَوْمٍ يُؤْمِنُونَ ﴿٩٩﴾

“Dan dialah yang menurunkan air hujan dari langit, lalu kami tumbuhkan dengan air itu segala macam tumbuh-tumbuhan, maka kami keluarkan dari tumbuh-tumbuhan itu tanaman yang menghijau. kami keluarkan dari tanaman yang menghijau itu butir yang banyak; dan dari mayang korma mengurai tangkai-tangkai yang menjulai, dan kebun-kebun anggur, dan (Kami keluarkan pula) zaitun dan delima yang serupa dan yang tidak serupa. perhatikanlah buahnya di waktu pohonnya berbuah dan (perhatikan pulalah) kematangannya. Sesungguhnya pada yang demikian itu ada tanda-tanda (kekuasaan Allah) bagi orang-orang yang beriman”. [Al-An'aam [6]:99]

وَهُوَ الَّذِي أَنْشَأَ جَنَّاتٍ مَّعْرُوشَاتٍ وَغَيْرِ مَعْرُوشَاتٍ وَالنَّخْلَ
وَالزَّرْعَ مُخْتَلِفًا أَكْلُهُ ۗ وَالزَّيْتُونَ وَالرُّمَّانَ مُتَشَبِهًا وَغَيْرَ
مُتَشَبِهٍ ۗ كُلُوا مِنْ ثَمَرِهِ إِذَا أَثْمَرَ وَعَآثُوا حَقَّهُ ۗ يَوْمَ حَصَادِهِ
وَلَا تُسْرِفُوا ۚ إِنَّهُ لَا يُحِبُّ الْمُسْرِفِينَ ﴿١٤١﴾

"Dan Dialah yang menjadikan kebun-kebun yang berjunjung dan yang tidak berjunjung, pohon korma, tanam-tanaman yang bermacam-macam buahnya, zaitun dan delima yang serupa (bentuk dan warnanya) dan tidak sama (rasanya). makanlah dari buahnya (yang bermacam-macam itu) bila dia berbuah, dan tunaikanlah haknya di hari memetik hasilnya (dengan

disedekahkan kepada fakir miskin); dan janganlah kamu berlebih-lebihan. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang yang berlebih-lebihan. [Al-An'aam [6]:141]

الَّذِي جَعَلَ لَكُمُ الْأَرْضَ مَهْدًا وَسَلَكَ لَكُمْ فِيهَا سُبُلًا وَأَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ

مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ أَزْوَاجًا مِّن نَّبَاتٍ شَتَّى ﴿٥٣﴾

“Maka kami tumbuhkan dengan air hujan itu berjenis-jenis dari tumbuh-tumbuhan yang bermacam-macam”. [Thaahaa [20]: 53]

وَأَنْزَلْنَا مِنَ الْمُعْصِرَاتِ مَاءً ثَجَّاجًا ﴿٥٤﴾

لِنُخْرِجَ بِهِ حَبًّا وَنَبَاتًا ﴿٥٥﴾

وَجَنَّاتٍ أَلْفَافًا ﴿٥٦﴾

“Dan kami turunkan dari awan air yang banyak tercurah, Supaya kami tumbuhkan dengan air itu biji-bijian dan tumbuh-tumbuhan, Dan kebun-kebun yang lebat”. (An-Naba' [78]: 14-16)

تَبْصِرَةً وَذِكْرَىٰ لِكُلِّ عَبْدٍ مُّنِيبٍ ﴿٥٨﴾

وَالْأَرْضَ مَدَدْنَاهَا وَأَلْقَيْنَا فِيهَا رَوَاسِيَ وَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِن كُلِّ زَوْجٍ بَهِيجٍ

﴿٥٧﴾

وَنَزَّلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً مُّبَدَّرًا فَأَنْبَتْنَا بِهِ جَنَّاتٍ

وَحَبِّ الْحَصِيدِ ﴿٥٩﴾

وَالنَّخْلَ بَاسِقَاتٍ لَّهَا طَلْعٌ نَّضِيدٌ ﴿٦٠﴾

رِزْقًا لِلْعِبَادِ وَأَحْيَيْنَا بِهِ بَلْدَةً مَّيْتًا كَذَلِكَ الْخُرُوجُ ﴿٦١﴾

“Dan kami hamparkan bumi itu dan kami letakkan padanya gunung-gunung yang kokoh dan kami tumbuhkan padanya segala macam tanaman yang indah dipandang mata, Untuk menjadi

pelajaran dan peringatan bagi tiap-tiap hamba yang kembali (mengingat Allah). Dan kami turunkan dari langit air yang banyak manfaatnya lalu kami tumbuhkan dengan air itu pohon-pohon dan biji-biji tanaman yang diketam, Dan pohon kurma yang tinggi-tinggi yang mempunyai mayang yang bersusun-susun, Untuk menjadi rezki bagi hamba-hamba (Kami), dan kami hidupkan dengan air itu tanah yang mati (kering). seperti Itulah terjadinya kebangkitan. [Qaaf [50]: 7-11]

هُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً لَكُمْ مِنْهُ شَرَابٌ وَمِنْهُ شَجَرٌ

فِيهِ تُسَيَّمُونَ ﴿١٠﴾

يُنْبِتُ لَكُمْ بِهِ الزَّرْعَ وَالزَّيْتُونَ وَالنَّخِيلَ وَالْأَعْنَابَ وَمِنْ

كُلِّ الثَّمَرَاتِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِّقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ ﴿١١﴾

“Dia-lah, yang Telah menurunkan air hujan dari langit untuk kamu, sebahagiannya menjadi minuman dan sebahagiannya (menyuburkan) tumbuh-tumbuhan, yang pada (tempat tumbuhnya) kamu menggembalakan ternakmu. Dia menumbuhkan bagi kamu dengan air hujan itu tanam-tanaman; zaitun, korma, anggur dan segala macam buah-buahan. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar ada tanda (kekuasaan Allah) bagi kaum yang memikirkan”. [An-Nahl (16): 10-11]

وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَّاهُ فِي الْأَرْضِ وَإِنَّا

عَلَىٰ ذَهَابٍ بِهِ لَقَادِرُونَ ﴿١٨﴾

فَأَنْشَأْنَا لَكُمْ بِهِ جَنَّاتٍ مِّنْ نَّخِيلٍ وَأَعْنَابٍ لَّكُمْ فِيهَا فَوَاحٍ كَثِيرَةٌ

وَمِنْهَا تَأْكُلُونَ ﴿١٩﴾

وَشَجَرَةً تَخْرُجُ مِنْ طُورِ سَيْنَاءَ تَنْبُتُ بِالذَّهْنِ وَصِبْغٍ لِلْأَكْلِينَ ﴿٢٠﴾

“Dan kami turunkan air dari langit menurut suatu ukuran; lalu kami jadikan air itu menetap di bumi, dan Sesungguhnya kami benar-

benar berkuasa menghilangkannya. Lalu dengan air itu, kami tumbuhkan untuk kamu kebun-kebun kurma dan anggur; di dalam kebun-kebun itu kamu peroleh buah-buahan yang banyak dan sebahagian dari buah-buahan itu kamu makan, Dan pohon kayu keluar dari Thursina (pohon zaitun), yang menghasilkan minyak, dan pemakan makanan bagi orang-orang yang makan”. [Al-Mu'minuun (23): 18-20]

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَأَخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ
وَالْمُلْكِ الَّتِي تَجْرِي فِي الْبَحْرِ بِمَا يَنْفَعُ النَّاسَ وَمَا أَنْزَلَ
اللَّهُ مِنَ السَّمَاءِ مِنْ مَّاءٍ فَأَحْيَا بِهِ الْأَرْضَ بَعْدَ مَوْتِهَا وَبَثَّ
فِيهَا مِنْ كُلِّ دَابَّةٍ وَتَصْرِيفِ الرِّيْحِ وَالسَّحَابِ الْمُسَخَّرِ
بَيْنَ السَّمَاءِ وَالْأَرْضِ لِقَوْمٍ يَعْقِلُونَ ﴿١٦٤﴾

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, silih bergantinya malam dan siang, bahtera yang berlayar di laut membawa apa yang berguna bagi manusia, dan apa yang Allah turunkan dari langit berupa air, lalu dengan air itu Dia hidupkan bumi sesudah mati (kering)-nya dan Dia sebarkan di bumi itu segala jenis hewan, dan pengisaran angin dan awan yang dikendalikan antara langit dan bumi; sungguh (terdapat) tanda-tanda (keesaan dan kebesaran Allah) bagi kaum yang memikirkan”. QS. Al-Baqarah [2] : 164

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَأَخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ
لَآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَلْبَابِ ﴿١٩٠﴾

الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَمًا وَقَعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ
السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَذَا بَطْلًا سُبْحَانَكَ فَقِنَا عَذَابَ

النَّارِ ﴿١٩١﴾

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal, (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadaan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata): "Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa neraka". (QS. 'Ali `Imran [3] : 190-191)

C. Potensi Sayuran sebagai Akumulator Polutan Logam Berat

1. Karakter Tanaman Sayuran

Memperhatikan potensi **habitat dan kebiasaan tumbuh** tanaman sayuran, mempunyai peluang menjadi fitoremediator karena dapat hidup baik pada limbah. Jenis-jenis sayuran ini biasa ditemukan hidup di saluran air, kolam, sungai bahkan pada lingkungan yang teraliri limbah, **sehingga memungkinkan dapat mengakumulasi polutan termasuk logam berat**. Sayuran air merupakan jenis tumbuhan yang mudah menyerap logam berat (Bucheever, 1973; Haghiri, 1973).

2. Profil Tanaman Sayuran

Sayuran air umumnya memiliki profil organ yang memungkinkan berpotensi sebagai fitoakumulator dan fitoremediator polutan yang sangat baik. Umumnya sayuran air memiliki **jenis akar yang panjang, lebat, dalam, dan kuat; batang sayuran air umumnya memiliki rongga-rongga penyimpan air; dan daunnya umumnya tipis, jumlahnya banyak, dan lebar yang kaya stomata, sehingga transpirasinya tinggi. Sayuran juga memiliki produktivitas yang tinggi karena tingkat pertumbuhannya cepat, sehingga biomasnya tinggi**. Sebagaimana diketahui, jenis fitoremediator yang ideal

adalah spesies yang bisa menghasilkan biomassa dalam jumlah besar, tumbuh dengan cepat, punya sistem akar yang sangat panjang, dan harus bisa ditanam dan dipanen dengan mudah (Porebska *et al.*, 1999).

3. Hasil Penelitian tentang Potensi Jenis Tanaman Sayuran sebagai Akumulator Logam

Berbagai penelitian telah dilakukan, menyebutkan dalam fitoremediasi, genjer di sekitar dam *tailing* terdegradasi penambangan emas di Bogor mampu menyerap sianida 9,59 ppm (Juhaeti dkk, 2004), sehingga berpotensi sebagai fitoremediator dan hiperakumulator yang dapat dimanfaatkan untuk membersihkan kontaminan lahan yang tercemar. Penelitian tentang kemampuan kangkung air dalam menyerap logam berat telah dilakukan di antaranya oleh Juhaeti (2004) bahwa tanaman ini di sekitar dam *tailing* penambangan emas di Bogor telah mengakumulasi sianida 35,70 ppm dan Pb 7,3 ppm. Dalam waktu 6 minggu kangkung mampu menyerap Pb pada bagian batang dan daunnya sebesar 2,09 mg/kg sampel Survei yang dilakukan Dahlia (2006), menunjukkan selada air ditemukan di aliran sungai Brantas yang tercemar logam berat dan diketahui telah mengakumulasi Cr dan Zn melebihi kangkung air dan genjer. Berbagai pangan di Indonesia, baik sayuran, buah-buahan maupun makanan pokok ternyata masih banyak mengandung bahan berbahaya. Bahan cemaran itu antara lain residu pestisida, cemaran mikroba, dan kontaminasi berbagai logam berat (Rahardjo, 2008). Kenyataan bahwa sayuran air memiliki potensi besar dalam remediasi dan akumulasi polutan jelas menunjukkan, penting diwaspadainya sayuran sebagai mediator terdistribusinya polutan khususnya logam berat dalam ekosistem serta peluangnya sebagai penyebab berbagai penyakit pada makhluk hidup yang mengkonsumsinya. Dengan kata lain, sayuran yang hidup di tempat tercemar merupakan bahan pangan yang belum tentu aman, baik bagi kesehatan manusia maupun ekosistem pada umumnya.

D. Teknik Fitoteknologi dan Penanganan Pascaguna Fitoremediator

Pengetahuan mengenai kemampuan tumbuhan pengolah lingkungan spesifik kondisi Indonesia masih sangat terbatas (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010). Berbagai jenis tanaman telah digunakan dalam berbagai aplikasi fitoremediasi. Surtikanti (2009) menyatakan *Alfalfa, poplar, willow, aspen, gandum* adalah jenis tanaman dalam aplikasi fitotransformasi fitoremediasi tanah, air tanah, *landfill leachate*, air limbah kontaminan herbisida aromatik dan limbah amunisi. *Muberry*, apel, tanaman air untuk bioremediasi rhizosfer tanah, sedimen, air limbah kontaminan organik (pestisida dan PAHs); Tanaman yang memiliki sistem perakaran yang padat, rumput yang memiliki serat akar yang banyak, tanaman yang dapat melakukan transpirasi air yang lebih banyak, digunakan untuk fitostabilisasi tanah dan sedimen kontaminan logam berat dan hydrophobic organics; bunga matahari, dandelion, mustard untuk fitoekstraksi tanah, sedimen, brownfields kontaminan logam berat; tanaman air untuk rhizofiltrasi air tanah, air, air limbah kontaminan logam berat, radioaktif, dan senyawa organik hydrophobic. Mangkoedihardjo & Samudro (2010) menambahkan, eceng gondok merupakan wakil tumbuhan air yang unggul dalam mengolah media cairan tercemar berbagai zat organik dan anorganik. Bunga matahari adalah wakil tumbuhan tanah yang unggul dalam mengolah media udara dan tanah tercemar berbagai zat organik dan anorganik.

Tumbuhan yang sengaja digunakan dalam fitoteknologi khususnya sebagai fitoremediator pencemaran perlu dipelihara untuk keberlanjutan pendayagunaan, dengan berbagai cara (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010).

1. Teknik Keberlanjutan Fitoremediator

Tumbuhan yang sengaja digunakan dalam fitoteknologi khususnya sebagai fitoremediator pencemaran perlu dipelihara untuk keberlanjutan pendayagunaan, dengan berbagai cara (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010).

- a. **Pemangkasan** dahan, ranting, dan daun dengan pola selang-seling, untuk memaksimalkan penyerapan karbondioksida;
- b. **Pemupukan**, utamanya zat anorganik NPK dalam takaran yang efisien untuk mempertahankan pertumbuhan sehingga masa pakainya menjadi panjang, serta dapat menstimuli pertumbuhan mikroba tanah dan air untuk membantu pemulihan media tercemar.

Bagian tumbuhan atau tumbuhan seutuhnya yang telah digunakan untuk mengolah lingkungan, terutama air limbah, sampah atau memulihkan mutu lingkungan tercemar, perlu mendapat penanganan (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010); dan tidak boleh dikonsumsi (Surtikanti, 2009). Oleh karena tumbuhan tersebut mengakumulasi berbagai zat pencemar, penanganan diperlukan sehingga tidak menjadi masalah baru.

Prinsip penanganan tumbuhan yang telah digunakan dalam pengelolaan lingkungan adalah distribusi kesetimbangan zat dalam ekosistem. Zat tidak dapat dihilangkan, namun dapat berpindah media, dan di dalam tumbuhan mengalami transformasi zat. Perpindahan zat dari udara, air atau tanah, maka mutu media lingkungan membaik. Ketika pindah ke dalam tumbuhan melalui proses transpirasi dan penyerapan, membawa konsekuensi, tumbuhan menjadi penampung pencemar, sehingga mutu media tumbuhan memburuk.

2. Penanganan Tumbuhan Fitoremediator

Penanganan tumbuhan penampung pencemar dapat melalui beberapa teknologi dalam upaya memusnahkan zat pencemar (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010; Surtikanti, 2009), misalnya:

- a. Pengomposan dan penguraian anaerobik;
- b. Penimbunan, misalnya dalam *landfill*;
- c. Pembakaran, sebaiknya dalam *incinerator*;
- d. Solidifikasi;
- e. Ekstraksi.

Proses ini menjadikan perpindahan pencemar dari tumbuhan ke dalam kompos dan udara. Demikian seterusnya, terdapat perpindahan zat antar media lingkungan, namun yang terpenting adalah perpindahan itu dalam konsentrasi zat yang tidak merusak fungsi tiap media, yang berarti tidak menimbulkan perpindahan pencemaran (Mangkoedihardjo & Samudro, 2010).

E. Ambang Batas Logam Berat pada Sayuran yang Aman Konsumsi Serta Hubungannya dengan Bahaya Kesehatan dan Kerusakan Gizinya

1. Fakta dan Penelitian: Berbagai Jenis Sayuran Mengandung Logam Berat Melebihi Ambang Batas yang Diperbolehkan

Terhadap jenis sayuran kangkung air, selada air, eceng gondok, dan genjer, penelitian yang dilakukan oleh Dahlia (2006), menyebutkan kangkung air, selada air, eceng gondok, dan genjer yang ditemukan di daerah aliran sungai Brantas telah mengakumulasi logam berat *Pb*, *Cr*, *Cd*, *Cu* dan *Zn* bahkan sebagian telah mencapai daun pada tingkat kadar yang membahayakan. Demikian juga penelitian Widowati (2009), menemukan berbagai jenis sayuran ditemukan di perairan tercemar *As*, *Cd*, *Cr*, *Cu*, *Pb*, *Zn*, dan telah mengakumulasi dalam organ sayuran yang dikonsumsi. Dua jenis logam berat yaitu *Cd* dan *Pb* telah terserap tiga jenis sayuran yaitu genjer, kangkung air, dan selada air melebihi ambang batas yang boleh dikonsumsi.

Fitoremediasi oleh genjer di sekitar dam *tailing* terdegradasi penambangan emas di Bogormampu menyerap sianida 9,59 ppm (Juhaeti dkk, 2004). Penelitian kemampuan kangkung air dalam menyerap logam berat oleh Juhaeti (2004), bahwa tanaman ini di sekitar dam *tailing* penambangan emas di Bogor telah mengakumulasi sianida 35,70 ppm dan *Pb* 7,3 ppm. Dalam waktu 6 minggu kangkung mampu menyerap *Pb* pada bagian batang dan daunnya sebesar 2,09 mg/kg. Survei yang dilakukan Dahlia (2006), menunjukkan selada air ditemukan di aliran sungai Brantas yang

tercemar logam berat dan diketahui telah mengakumulasi Cr dan Zn melebihi kangkung air dan genjer.

Sebagaimana diketahui batas maksimum cemaran logam dalam makanan telah diatur oleh pemerintah melalui Keputusan Direktur Jendral Pengawasan Obat dan Makanan Nomor 03725/B/SK/VII/89, untuk *Pb* 2 mg/kg, *Cu* 20 mg/kg, *Cd* 0,1 mg/kg, *Zn* 40 mg/kg, *Cr* 0,4 mg/kg. Data penelitian mengenai akumulasi logam berat dalam sayuran menunjukkan telah jauh melebihi ketentuan yang diperbolehkan dikonsumsi.

SK Gubernur Jawa Timur Nomor 45 Tahun 2002 tentang Baku Mutu Limbah Cair, Peraturan Pemerintah RI Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air Kriteria Mutu Air Kelas IV (air untuk pertanian) dan Nomor 173/MenKes/Per NIII/73 tahun 1977 tentang pencemaran air yang berhubungan dengan kesehatan, membatasi kandungan maksimal logam berat dalam air kelas IV untuk *Pb* 1mg/L, *Cr* heksavalen 1mg/L, *Cd* 0,01 mg/L, *Cu* 0,2mg/L, *Zn* 2 mg/L; *As* 1mg/L. Pada berbagai penelitian diketahui aliran sungai yang ditumbuhi sayuran air, umumnya telah mengakumulasi logam berat melebihi ambang batas yang diijinkan dalam ketentuan tersebut. Pengukuran yang dilakukan di Kali PT *SIER* (*Surabaya Industrial Estate Rungkut*) Sidoarjo Jawa Timur pada tahun 1991 (Notohadiprawiro dkk, 1991) menyebutkan *sludge/sari* kering limbah industri mengandung *Zn*, *Cu*, *Pb*, dan *Ni*. Penelitian oleh Widowati (2009) di Kali PT *SIER* juga menemukan ada perbedaan yang signifikan dengan kondisi perairan di daerah Batu Jawa Timur yang menjadi sentra produksi sayuran yang menggunakan sumber air langsung dari mata air pegunungan, dimana kandungan logam beratnya telah banyak melebihi ketentuan.

2. Pengaruh Faktor Antropogenik dan Alamiah dalam Ketersediaan Logam

Faktor antropogenik dan alamiah mempengaruhi bioavailabilitas (ketersediaan hayati) logam. Konsentrasi *Cd*, *Pb*, *Cu*, dan *Cr* yang berasal dari kegiatan penambangan (Prasad & Freitas, 2003) atau karena

tindakan antropogenik misalnya pembuangan residu toksik ke sungai, danau, pantai dan di udara, karena aktivitas industri, penggunaan pupuk pertanian dan pestisida, pembakaran residu industri dan sampah pedesaan, antara lain, telah menyebabkan efek yang berbahaya bagi lingkungan (Ahluwalia & Goyal, 2007). Polutan yang sangat toksik ini memunculkan risiko terhadap kehidupan air dan darat, terutama bagi tanaman, binatang, dan manusia. Interaksi yang terjadi dalam sistem tanaman dan tanah sifatnya sangat kompleks. Asimilasi elemen sisaoleh tanaman sangat bervariasi sebagai fungsi kondisi tanah. Konsentrasi logam tinggi dalam tanah tidak selalu mengindikasikan adanya tingkat kandungan logam yang tinggi pula dalam tanaman; tingkat kandungan ini bergantung beberapa faktor, misalnya pH, kapasitas pertukaran kation, bahan organik, kelembaban, dan lainnya (Albasel & Cottenie, 1985). Ion logam toksik menembus sel menggunakan proses yang sama seperti absorpsi ion nutrisi esensial. Kuantitas yang diabsorpsi oleh tanaman bergantung pada konsentrasi dan spesifikasi kandungan logam dalam cairan tanah, serta pergerakan perpindahannya dari tanah menuju permukaan akar dan dari akar ke bagian aerial (Patra *et al.*, 2004). Pentranslokasian ion logam menuju bagian aerial ini bergantung spesies tanaman, logam yang dilibatkan dan kondisi lingkungan (Liu *et al.*, 2007). Efek genotoksik logam/racun lainnya bergantung pada keadaan oksidasi logam, konsentrasi dan durasi pajanannya, serta menjadi semakin besar pada konsentrasi tinggi dan setelah waktu pajanan lama (Cosio *et al.*, 2005). Setelah memasuki tubuh makhluk hidup, logam berat akan berperan sebagai radikal bebas yang siap merusak molekul target dalam tubuh dan memberikan efek yang membahayakan bagi tubuh.

3. Logam Berat yang Berperan Radikal Bebas

Sebenarnya radikal bebas banyak terdapat di lingkungan sekitar, dapat berasal dari polutan udara, asap tembakau, penguapan alkohol yang berlebihan, bahan pengawet dan pupuk, sinar ultra violet, *x-rays*, bahan

berbahaya beracun, logam berat, bahan-bahan kimia dan ozon. Radikal bebas dapat merusak sel-sel tubuh organisme termasuk tanaman, bila tubuh kekurangan zat antioksidan atau saat tubuh kelebihan radikal bebas. Pada hewan dan manusia, hal ini dapat menyebabkan berkembangnya sel-sel kanker, penyakit hati, arthritis, katarak, dan penyakit degeneratif lainnya, bahkan mempercepat proses penuaan.

4. Efek Radikal Bebas Logam

Pengaruh logam pada tanaman menyebabkan meningkatnya pembentukan radikal bebas, yang berakibat rusaknya berbagai enzim yang dapat menurunkan jumlah protein pada organ-organ tanaman. Untuk menghilangkan efek negatif radikal bebas, tumbuhan mengembangkan berbagai mekanisme pertahanan diri. Penerapan sistem antioksidan merupakan usaha bertahan terhadap cekaman polutan yang ditandai hilang/menurunnya kandungan vitamin antioksidan (vitamin A, C, dan E) (Kong *et al.*, 2000 dalam Munzuroglu *et al.*, 2005).

5. Mekanisme Pertahanan Spesies Toleran Logam

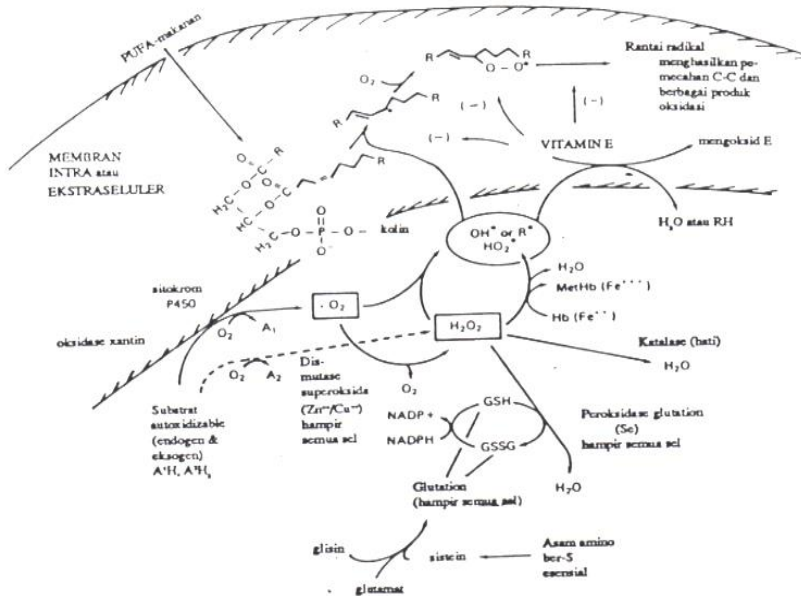
Telah banyak diamati bahwa spesies yang toleran terhadap logam memiliki mekanisme pertahanan yang berkaitan dengan antioksidan sel dan enzim antioksidan yang melindungi beberapa proses fisiologis vital untuk mencegah kerusakan yang diakibatkan oleh bentuk-bentuk oksigen reaktif karena stres yang disebabkan oleh kandungan logam (Panda & Choudhury, 2005). Terdapat juga laporan-laporan yang memuat tentang hiperaktivitas enzim oksidan serta akumulasi antioksidan sel pada beberapa spesies tanaman yang mengalami stres akibat *Cu* dan *Pb* (Ali *et al.*, 2003). Beberapa spesies yang resistan terhadap *Cu* telah ditemukan di area-area yang tidak terkontaminasi maupun yang terkontaminasi (Liu *et al.*, 2004). Menurut Devos *et al.* (1992), toleransi terhadap *Cu* berkaitan dengan fungsi glutathione sebagai substansi antioksidan melawan radikal bebas dan hidrogen peroksida yang terbentuk karena adanya kelebihan

kandungan *Cu*. Ames (1981, dalam Linder, 1992), menunjukkan bahwa tanaman melindungi diri dari cedera akibat proses oksidatif oksigen di sekitarnya dengan jalan produksi β -karoten yang sangat banyak. β -karoten dapat menurunkan pembentukan karsinogen endogen. Penelitian ini lebih banyak menaruh perhatian pada pengaruh peningkatan diferensiasi dari vitamin terhadap sel-sel epidermis, misalnya melalui kromatin sel dan/atau pembentukan glikoprotein seluler.

Tingginya polutan logam berat pada tumbuhan merupakan faktor cekaman yang dapat merusak enzim-enzim proteinase sehingga pembentukan protein akan mengalami tekanan, akibatnya kadar protein sayuran akan mengalami penurunan. Di sisi lain, logam berat juga akan berpeluang menjadi radikal bebas yang merusak sel-sel jaringan tumbuhan. Vitamin A dan C dalam sayuran akan bekerja sebagai zat antioksidan untuk melumpuhkan logam berat yang terakumulasi dalam organ tumbuhan, sehingga vitaminnya akan mengalami penurunan.

Penelitian tentang kemampuan tumbuhan mengatasi pengaruh cekaman hujan asam dan mempertahankan produktivitasnya, berhubungan dengan kemampuan penetralan H_2O_2 (hidrogen peroksida), OH^\cdot (radikal hidroksil) dan O_2^\cdot (radikal superoksida). Katalase (CAT) dan peroksida (PID) merupakan dua sistem utama untuk enzim penghilang H_2O_2 pada tanaman. Pada kondisi normal organisme diproteksi melawan kerusakan oksidatif dengan adanya berbagai sistem antioksidan. Sistem nonenzimatik meliputi vitamin antioksidan seperti vitamin A, E, dan C. Vitamin-vitamin tersebut menunjukkan reaksi terhadap radikal bebas organik dan melindungi biomembran dari kerusakan yang diinduksi oleh radikal-radikal bebas tersebut (Munzuruglu *et al.*, 2005). Hasil penelitian setelah penyemprotan hujan asam 24 dan 48 jam pada tanaman stroberi, terjadi pengurangan kadar vitamin A, E, C berturut-turut 28,87%, 44,38%, 70,68% untuk 24 jam ($p < 0,05$) dan 26,43%, 35,57%, 61,43% untuk 48 jam ($p < 0,01$).

Mekanisme aktivitas vitamin antioksidan dapat dilihat pada Gambar 4.1 Mekanisme Aktivitas Vitamin sebagai Antioksidan.



Gambar 4.1 Mekanisme Aktivitas Vitamin sebagai Antioksidan (Scott, 1980 dalam Linder, 1992)

Keterangan:

- GSH: glutathion bentuk reduksi;
- GSSG: glutathion bentuk oksidasi;
- NADP+/NADPH: nikotinamid adenin dinukleotida fosfat bentuk oksidasi/reduksi;
- metHb: methemoglobin

Superoksida radikal anion ($O_2^{\cdot-}$) diproduksi oleh interaksi dari berbagai substrat yang dapat teroksidasi dan molekul oksigen, dengan melibatkan oksidase xantin dan sitokrom P_{450} . Superoksida dikonversi menjadi peroksida (H_2O_2) (karena oksidasi substrat ekso/endogen (A^1H ; A^2H_2)) atas pertolongan enzim *dismutase superoksida* yang membutuhkan Cu dan Zn; atau berinteraksi dengan peroksida untuk membentuk beberapa radikal seperti OH atau HO_2 .

Peroksida juga membentuk beberapa radikal dengan berinteraksi dengan Hb atau substrat lain. Radikal-radikal tersebut dapat memulai reaksi berantai panjang dalam dinding sel yang melibatkan asam lemak tidak jenuh dan fosfolipid. Akhirnya dapat mengoksidasi asam-asam lemak tidak jenuh dari fosfolipid mitokondria, mikrosom (endoplasmik retikulum) dan membran plasma melalui peroksida dalam suatu reaksi rantai (Bland, 1980).

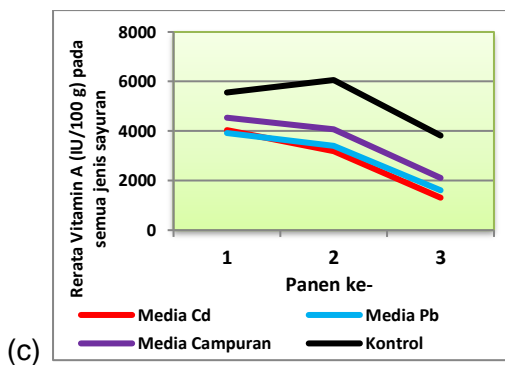
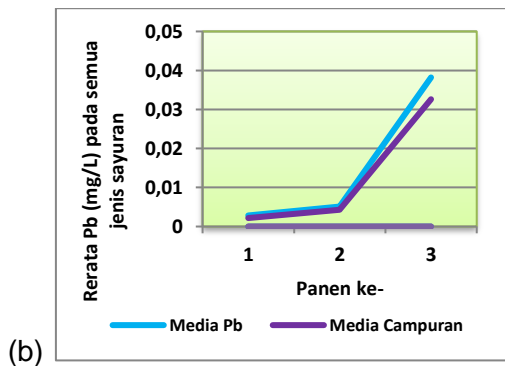
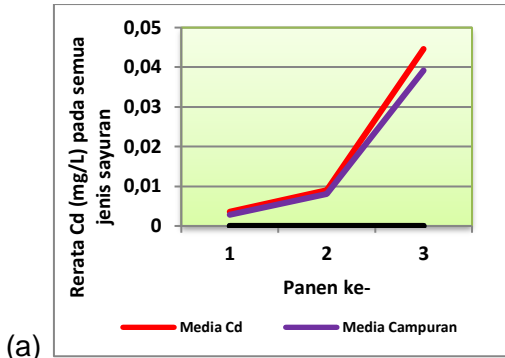
Pembentukan radikal oksigen bebas merupakan hal yang selalu ada pada makhluk hidup yang menggunakan gas oksigen dalam metabolismenya. Ada banyak faktor cekaman lingkungan yang dapat menyebabkan meningkatnya pembentukan radikal bebas. Untuk menghilangkan efek negatif radikal bebas, organisme mengembangkan berbagai mekanisme pertahanan diri. Kong *et al.* (2000), menyatakan cekaman menyebabkan meningkatnya radikal oksigen dan menurunnya jumlah protein pada organ-organ tanaman. Penerapan sistem antioksidan sebagai usaha bertahan terhadap cekaman ditandai hilang/reduksinya kandungan vitamin.

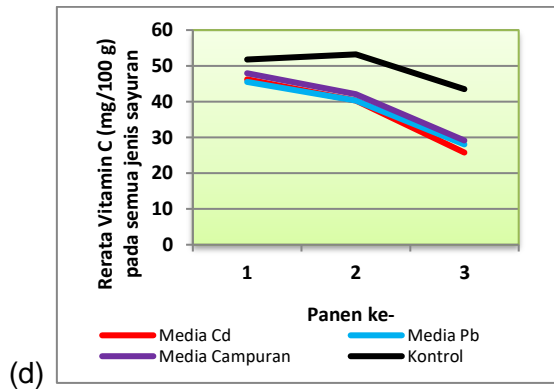
6. Efek Polutan Logam Berat terhadap Penurunan Gizi Sayuran

Penelitian yang dilakukan Widowati (2009), pengaruh logam berat terhadap penurunan vitamin A dan vitamin C antioksidan pada sayuran dapat dicermati grafik pada Gambar 4.2. Diagram Kenaikan Serapan Enam Macam Logam Berat serta Penurunan Protein, Vitamin A, dan Vitamin C pada Genjer, Kangkung Air, dan Selada Air.

Oleh peneliti yang sama (Widowati, 2010), pengujian di laboratorium pada medium yang dicemari Cd, Pb, campuran Cd&Pb, serta kontrol (tanpa dicemari logam berat) menunjukkan akumulasi logam berat Cd, Pb dan penurunannya terhadap vitamin A dan vitamin C pada variasi panen 1 (sebelum kebiasaan dipanen), 2 (tepat kebiasaan dipanen, dan 3 (setelah kebiasaan dipanen) hasilnya dapat digambarkan dalam grafik yang termuat dalam Gambar 4.3 Grafik Rerata Akumulasi Cd, Pb, serta

Penurunan Vitamin A dan vitamin C pada Semua Jenis Sayuran.





Gambar 4.2. Grafik Rerata Akumulasi Cd, Pb, serta Penurunan Vitamin A dan vitamin C pada Semua Jenis Sayuran

Dari Gambar 4.2 Grafik Rerata Akumulasi Cd, Pb, serta Penurunan Vitamin A dan vitamin C pada Semua Jenis Sayuran, dapat diketahui akumulasi logam berat lebih banyak terjadi pada medium tercemar logam berat yang tunggal daripada yang campuran. Akumulasi logam berat Cd lebih tinggi daripada Pb. Terhadap penurunan vitamin A maupun vitamin C penurunannya juga lebih besar pada medium tercemar logam berat tunggal, yaitu terbesar pada medium tercemar Cd, selanjutnya Pb, dan terendah pada medium campuran. Pada medium kontrol (yang tidak tercemar logam berat), vitamin mengalami kenaikan sampai waktu panen ke 2, yang mengindikasikan penentuan waktu panen yang telah menjadi kebiasaan di masyarakat produksi sayuran sudah tepat.

F. Antisipasi Dampak Logam Berat pada Sayuran sebagai Strategi Pemecahan Masalah Gizi Defisiensi Vitamin A dan C serta Penyakit Degeneratif dalam Pola Hidup Modern di Era Globalisasi.

Logam berat merupakan salah satu jenis radikal bebas yang dapat merusak membran sel dan merubah DNA, merubah zat kimia dalam tubuh, dapat meningkatkan resiko kanker serta merusak dan menonaktifkan protein. Zat antioksidan

(karoten/sumber vitamin A, vitamin C, vitamin E dan mineral Zinc dan Selenium) dapat memperbaiki sel-sel tubuh, menetralkan atau menghancurkan radikal bebas yang berupa jenis oksigen yang memiliki tingkat reaktif yang tinggi dan secara alami ada di dalam tubuh sebagai hasil dari reaksi biokimia di dalam tubuh. Vitamin C mencegah oksidasi pada molekul berbasis cairan, sedangkan vitamin E larut dalam lemak bekerja pada sel lipid dan sirkulasi kolesterol (Online) (<http://www.eyethindonesia.com>).

Karotenoid (sumber vitamin A) berinteraksi dengan vitamin C dan E sebagai zat antioksidan. Cara kerja vitamin E sebagai antioksidan adalah dengan menyumbangkan elektron kepada radikal bebas, karena itu, vitamin E yang kaku akan berubah menjadi vitamin E yang radikal. Untuk menjinakkannya, diperlukan vitamin C, yang akhirnya akan membuat vitamin C juga menjadi radikal. Disinilah, glutathion akan muncul untuk menetralkan vitamin C. Karoten berperan dalam meningkatkan sistem imunitas melalui efek antioksidan. Vitamin C bersama vitamin E dapat melindungi sel dari perlawanan peroksida lemak (termasuk radikal bebas lainnya). Vitamin E bekerja dengan cara mencari, bereaksi, dan merusak rantai reaksi radikal bebas, sehingga dapat mencegah kanker, penyakit hati, dan memperbaiki sistem kekebalan tubuh. Mekanisme kerja antioksidan secara umum adalah menghambat oksidasi lemak yang akan diubah menjadi radikal bebas. Dalam proses melumpuhkan radikal bebas, vitamin E menjadi pelopor diikuti oleh vitamin C dan dengan bantuan senyawa glutathion, betakaroten, seng, mangan, dan selenium akan memudahkan pelumpuhan radikal bebas (Online) (<http://www.eyethindonesia.com>).

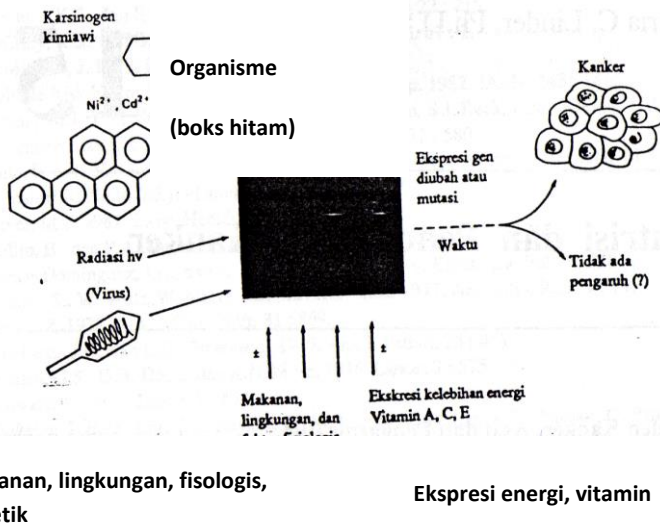
Antioksidan bekerja sebagai sebuah sistem untuk menghentikan kerusakan akibat radikal bebas. Oleh karena itu, para ahli nutrisi menyarankan agar sering mengonsumsi produk yang mengandung banyak variasi antioksidan, kombinasi vitamin, dan mineral yang berkhasiat antioksidan (Online) (<http://www.cyberforums.us>).

Pada semua macam organisme, faktor makanan mempengaruhi potensi oksidatif jaringan. Kerusakan oksidatif terhadap jaringan biologi tergantung oleh banyak faktor, termasuk komposisi substrat (misalnya komposisi asam lemak),

konsentrasi oksigen, dan prooksidan (contohnya, *reactive oxygen species*/ROS, logam transisi, protein yang mengandung besi dan enzim) (Tuminah, 2000). ROS dilibatkan dalam patofisiologi, seperti kanker, kardiovaskuler, dan juga penyakit neurogeneratif seperti alzheimer dan parkinson.

ROS merupakan radikal bebas, adalah molekul yang mempunyai atom dengan elektron yang tidak berpasangan, tidak stabil dan mempunyai reaktivitas yang tinggi. Jika bebas tidak diinaktivasi, reaktivitasnya dapat merusak seluruh tipe makromolekul seluler, termasuk karbohidrat, lipid dan asam nukleat. Dampak perusakan pada protein oleh radikal bebas menyebabkan katarak, dampak pada lipid menyebabkan aterosklerosis dan dampak pada DNA menyebabkan kanker. Ilustrasi mekanisme mutasi dan karsinogen pada organisme karena cekaman oksidan termasuk logam berat dapat dilihat pada Gambar 4.3 Mekanisme Karsinogen pada Organisme.

626 M.C. Linder



Gambar 4.3. Mekanisme Karsinogen pada Organisme (Linder, 1992).

Organisme yang diekspos zat-zat karsinogen dalam berbagai mekanisme yang melibatkan waktu akan menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan termasuk

tumor-tumor, yang dihambat oleh berbagai faktor (makanan, lingkungan, faktor fisiologik, tendensi genetik, ekskresi kelebihan energi, vitamin A, C, E), sehingga menentukan ada/tidaknya respons gen atau mutasi yang akhirnya dapat menyebabkan terbentuknya tumor malignan. Makanan berperan penting dalam memodulasi/menyesuaikan pengaruh karsinogen (Linder, 1992).

Lebih lanjut Tuminah (2000), menyatakan tubuh mempunyai beberapa mekanisme untuk bertahan terhadap radikal bebas dan ROS lainnya. Pertahanan yang bervariasi saling melengkapi satu dengan yang lain karena bekerja pada oksidan yang berbeda atau dalam bagian seluler yang berbeda. Suatu garis pertahanan yang penting adalah sistem enzim, termasuk *superoksida dismutase/ (SOD)*, *katalase*, dan *glutathion peroksidase*. SOD merupakan golongan enzim antioksidan yang penting dalam pendekomposisi katalitik radikal superoksida menjadi hidrogen peroksida dan oksigen. Katalase secara spesifik mengkatalisis dekomposisi hidrogen peroksida. Glutathion peroksida merupakan golongan enzim antioksidan yang mengandung selenium yang penting dalam mengurangi hidroperoksidase, sebagai contoh hasil oksidasi lipid.

Nutrisi berperan pokok dalam menjaga pertahanan enzim tubuh terhadap radikal bebas. Beberapa mineral esensial termasuk selenium, tembaga, dan seng dilibatkan dalam susunan atau aktivitas katalitik enzim-enzim tersebut. Apabila katalis yang larut air, seperti tembaga digunakan, fenolat hidrofilik dan askorbat sering tampak menjadi antioksidan yang lebih efektif daripada antioksidan hidrofobik, seperti tokoferol (Decker, 1997, dalam Tuminah, 2000). Antioksidan adalah substansi yang menghentikan atau menghambat kerusakan oksidatif terhadap molekul target (Gutteridge, 1996 dalam Tuminah, 2000).

Mekanisme pertahanan berikutnya adalah senyawa dengan berat molekul kecil yang bekerja sebagai antioksidan, bereaksi dengan mengoksidasi senyawa kimia, mengurangi kapasitas efek yang merusak. Beberapa, seperti glutathion, ubiquinol dan asam urat, diproduksi oleh metabolisme normal. Ubiquinol adalah satu-satunya antioksidan larut lemak yang disintesis oleh sel-sel hewan yang diyakini memainkan peranan

penting dalam pertahanan seluler terhadap kerusakan oksidatif (Langseth, 1995 dalam Tuminah, 2000).

Antioksidan dengan berat molekul kecil lainnya ditemukan dalam makanan, yang diketahui adalah vitamin E, vitamin C dan karotenoid (provitamin A). Sejumlah penelitian epidemiologis telah menguji peranan spesifik nutrisi antioksidan dalam pencegahan penyakit. Konsumsi vitamin C yang tinggi dikaitkan dengan penurunan resiko kanker. Vitamin C atau glutathion dapat membersihkan OH yang sangat reaktif (Palmer, 1997 dalam Tuminah, 2000). Vitamin E mencegah penyebaran kerusakan oleh radikal bebas dalam membran biologik dengan kemampuannya membersihkan radikal proksil. Seperti karoten, vitamin A juga disarankan menjadi nutrisi antikarsinogen. Vitamin A sebagian besar berasal dari hewan, sementara karoten berasal dari tanaman. Mekanisme aktivitas vitamin antioksidan dapat dilihat pada Gambar 4.2. Mekanisme Aktivitas Vitamin sebagai Antioksidan, sebagaimana telah diuraikan di bagian depan.

Sebagaimana ditemukan dalam penelitian (Widowati, 2010), bahwa akumulasi logam telah menurunkan vitamin A dan vitamin C, antioksidan yang bekerja dalam menetralkan pengaruh racun logam berat terhadap tubuh tanaman sayuran. Telah digambarkan dalam grafik yang termuat dalam Gambar 4.2. Grafik Rerata Akumulasi Cd, Pb, serta Penurunan Vitamin A dan vitamin C pada Semua Jenis Sayuran pada bagian depan.

Memperhatikan hasil analisis hasil penelitian, interaksi jenis sayuran, variasi media, dan macam organ sayuran, sampai dengan W2 bahkan pada media yang tercemar logam berat tunggal Cd maupun Pb sekalipun, kadar vitamin A, khususnya pada bagian batang masih memenuhi kebutuhan orang dewasa perhari yaitu 3.500 IU vitamin A dan 30 mg vitamin C (kadarnya masih berkisar 3571,379838 – 3.935,93155 IU). Apalagi vitamin A pada medium kontrol bahkan sampai panen W3 walaupun sudah mengalami penurunan baik pada batang (3521,90193 IU) maupun daun (4114,41644 IU) masih memenuhi kebutuhan orang dewasa perhari. Demikian juga untuk kadar vitamin C-nya, untuk semua jenis sayuran baik pada batang maupun daun sampai dengan W2 termasuk yang tercemar logam tunggal baik Cd maupun Pb

masih memenuhi kebutuhan vitamin C orang dewasa perhari 30 mg perhari dalam 100 g sayuran (pada W2 vitamin C kadar berkisar 39,739 – 42,097 mg/100g). Pada media kontrol bahkan pada W3 masih memenuhi kebutuhan vitamin C juga, yaitu 44,248 mg/100 pada batang dan 42,735 mg/100 g. Memperhatikan data dan analisis data ini, menunjukkan bahwa sayuran sebagai sumber vitamin A dan vitamin C pada sayuran yang hidup di daerah tercemar masih bisa dimanfaatkan, paling tidak untuk keperluan jangka pendek mengingat lingkungan yang bebas logam berat semakin sulit untuk diupayakan dalam memproduksi sayuran.

G. Peranan Sayuran dalam Memenuhi Gizi Keluarga dan Tata Cara Pengamanannya

Memasyarakatkan membiasakan sayuran sebagai sumber vitamin A dan vitamin C adalah lebih baik, karena lebih aman, mudah di dapat, dan lebih murah. Tetapi kalau tidak memperhatikan kemungkinan adanya logam berat di dalam organ sayuran, dapat sia-sia, karena sayuran yang mengandung logam berat selain menurunkan kadar vitamin A dan vitamin C dapat mendatangkan penyakit bahkan kematian.

Sebagaimana diungkapkan oleh Winarno (2004), sayuran hijau banyak mengandung karoten sumber vitamin A. Lebih lanjut Winarno (2004) menambahkan, berbagai makanan hewani yang relatif mahal, seperti susu, keju, kuning telur, hati, dan berbagai ikan yang tinggi kandungan lemaknya merupakan sumber utama retinol (provitamin A hewani), demikian juga beberapa sayuran dan buah-buah yang berwarna merah atau kuning, terutama wortel. Sayuran hijau mekipun tidak tinggi kandungan vitamin A-nya, tetap penting artinya sebagai sumber vitamin A karena murah dan mudah didapat. Bahkan sayuran hijau ternyata juga tinggi kadar proteinnya. Bila ditakar berdasar berat kering, daun hijau mengandung protein 30-40%, kira-kira mendekati kandungan protein kedelai. Konsumsi 100 g sayuran hijau saja, atau sekitar 2 sendok makan setelah dimasak, dapat menambah 15% dari seluruh konsumsi protein hari itu, di samping menambah sebanyak 100% atau lebih kalsium dan zat besi; dan ternyata mencukupi keperluan vitamin A dan vitamin

C untuk orang dewasa per hari yaitu 3.500 IU vitamin A dan 30 mg vitamin C.

Memperhatikan data dan analisis hasil penelitian, dan ditunjukkan pada gambar grafik menunjukkan bahwa sayuran sebagai sumber vitamin A dan vitamin C pada sayuran yang hidup di daerah tercemar masih bisa dimanfaatkan, paling tidak untuk keperluan jangka pendek mengingat lingkungan yang bebas logam berat semakin sulit untuk diupayakan dalam memproduksi sayuran. Hanya saja, karena lingkungan yang bebas polutan khususnya logam berat sulit diupayakan maka harus memperhatikan waktu panen, yaitu tidak menunda kebiasaan dipanen, serta memilih yang muda khususnya daun, serta diambil dari bididaya yang selalu dilakukan regenerasi (secara berkala dipangkas, misalnya) untuk mengurangi akumulasi logam berat maupun polutan lainnya serta menghindari penurunan vitamin A dan vitamin C-nya sebagai sumber gizi mengkonsumsi sayuran.

H. Pemantapan Materi

Untuk mendapatkan pemahaman yang dalam tentang Bab ini, silahkan Sdr. selesaikan soal pada Pemantapan Materi berikut.

PEMANTAPAN MATERI:

1. Ciri-ciri apakah yang mendukung tumbuhan dan khususnya sayuran sebagai akumulator polutan logam berat?
2. Mengapa sayuran penting dalam kesehatan tubuh?
3. Walaupun mutlak penting mengkonsumsi sayuran untuk kesehatan, tetapi juga berpeluang sebagai sumber bencana. Jelaskan!
4. Hubungkan peran akumulator sayuran dengan pernyataan: "Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal, (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata): "Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa neraka". (QS. 'Ali `Imran [3] : 190-191)

BAB V

MANAJEMEN SAYURAN UNTUK ANTISIPASI DAMPAK LOGAM BERAT PENCEMAR

A. Panduan Mempelajari Bab V

BAB V MANAJEMEN SAYURAN UNTUK ANTISIPASI DAMPAK LOGAM BERAT PENCEMAR

Merupakan substansi materi dan pengayaan wawasan untuk mencapai standar kompetensi 2, 3, 4, 5:

2. Mengidentifikasi berbagai metode bioremediasi dan aplikasinya dalam pembangunan berkelanjutan.
3. Mampu menganalisis kasus-kasus yang terjadi pada pencemaran lingkungan air, tanah, udara, serta pemecahannya secara bioremediasi.
4. Mampu mengaplikasikan aktivitas mikroba dalam teknologi bioremediasi.
5. Mengevaluasi kegiatan berkaitan aplikasi bioremediasi untuk pembangunan berkelanjutan.

Kompetensi dasar 8, 9:

8. Mengkaji peranan tumbuhan air sebagai fitoremediator pencemar
9. Mengkaji Efek Fitoremediasi terhadap Gizi Pangan.

B. Nilai-nilai Ke-Islaman dalam Pembahasan: Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar

وَهُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ نَبَاتَ كُلِّ شَيْءٍ فَأَخْرَجْنَا مِنْهُ خَضِرًا نُخْرِجُ مِنْهُ حَبًّا مُتَرَاكِبًا وَمِنَ النَّخْلِ مِنَ طَلْعِهَا قِنْوَانٌ دَانِيَةٌ وَجَنَّاتٍ مِنْ أَعْنَابٍ وَالزَّيْتُونَ وَالرُّمَّانَ مُشْتَبِهًا وَغَيْرَ مُتَشَبِهٍ انظُرُوا إِلَى ثَمَرِهِ إِذَا أَثْمَرَ وَيَنْعِهِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَاتٍ لِقَوْمٍ يُؤْمِنُونَ ﴿٩٩﴾

“Dan Dialah yang menurunkan air hujan dari langit, lalu kami tumbuhkan dengan air itu segala macam tumbuh-tumbuhan, maka

kami keluarkan dari tumbuh-tumbuhan itu tanaman yang menghijau. kami keluarkan dari tanaman yang menghijau itu butir yang banyak; dan dari mayang korma mengurai tangkai-tangkai yang menjulai, dan kebun-kebun anggur, dan (Kami keluarkan pula) zaitun dan delima yang serupa dan yang tidak serupa. perhatikanlah buahnya di waktu pohonnya berbuah dan (perhatikan pulalah) kematangannya. Sesungguhnya pada yang demikian itu ada tanda-tanda (kekuasaan Allah) bagi orang-orang yang beriman". [Al-An'aam [6]: 99]

﴿ وَهُوَ الَّذِي أَنْشَأَ جَنَّاتٍ مَّعْرُوشَاتٍ وَغَيْرَ مَعْرُوشَاتٍ وَالنَّخْلَ
 وَالزَّرْعَ مُخْتَلِفًا أَكْلُهُ وَالزَّيْتُونَ وَالرُّمَّانَ مُتَشَابِهًا وَغَيْرَ
 مُتَشَابِهٍ كُلُوا مِنْ ثَمَرِهِ إِذَا أَثْمَرَ وَعَآثُوا حَقَّهُ يَوْمَ حَصَادِهِ
 وَلَا تُسْرِفُوا إِنَّهُ لَا يُحِبُّ الْمُسْرِفِينَ ﴾

"Dan Dialah yang menjadikan kebun-kebun yang berjunjung dan yang tidak berjunjung, pohon korma, tanam-tanaman yang bermacam-macam buahnya, zaitun dan delima yang serupa (bentuk dan warnanya) dan tidak sama (rasanya). makanlah dari buahnya (yang bermacam-macam itu) bila dia berbuah, dan tunaikanlah haknya di hari memetik hasilnya (dengan disedekahkan kepada fakir miskin); dan janganlah kamu berlebih-lebihan. Sesungguhnya Allah tidak menyukai orang yang berlebih-lebihan. [Al-An'aam [6]:141]

﴿ الَّذِي جَعَلَ لَكُمْ الْأَرْضَ مَهْدًا وَسَلَكَ لَكُمْ فِيهَا سُبُلًا وَأَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ
 مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ أَزْوَاجًا مِّنْ نَّبَاتٍ شَتَّى ﴾

"Maka kami tumbuhkan dengan air hujan itu berjenis-jenis dari tumbuh-tumbuhan yang bermacam-macam". [Thaahaa [20]: 53]

وَأَنْزَلْنَا مِنَ الْمُعْصِرَاتِ مَاءً ثَجَّاجًا ﴿١٤﴾

لِنُخْرِجَ بِهِ حَبًّا وَنَبَاتًا ﴿١٥﴾

وَجَنَّاتٍ أَلْفَافًا ﴿١٦﴾

“Dan kami turunkan dari awan air yang banyak tercurah, Supaya kami tumbuhkan dengan air itu biji-bijian dan tumbuh-tumbuhan, Dan kebun-kebun yang lebat”. [An-Naba' [78]: 14-16]

وَالْأَرْضَ مَدَدْنَاهَا وَأَلْقَيْنَا فِيهَا رَوَاسِيَ وَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ زَوْجٍ بَهِيجٍ

﴿٧﴾

تَبْصِرَةً وَذِكْرَى لِكُلِّ عَبْدٍ مُنِيبٍ ﴿٨﴾

وَنَزَّلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً مُبْرَكًا فَأَنْبَتْنَا بِهِ جَنَّاتٍ

وَحَبِّ الْحَصِيدِ ﴿٩﴾

وَالنَّخْلَ بَاسِقَاتٍ لَهَا طَلْعٌ نَضِيدٌ ﴿١٠﴾

رِزْقًا لِلْعِبَادِ وَأَحْيَيْنَا بِهِ بَلْدَةً مَيِّتًا كَذَلِكَ الْخُرُوجُ ﴿١١﴾

“Dan kami hamparkan bumi itu dan kami letakkan padanya gunung-gunung yang kokoh dan kami tumbuhkan padanya segala macam tanaman yang indah dipandang mata, Untuk menjadi pelajaran dan peringatan bagi tiap-tiap hamba yang kembali (mengingat Allah). Dan kami turunkan dari langit air yang banyak manfaatnya lalu kami tumbuhkan dengan air itu pohon-pohon dan biji-biji tanaman yang diketam, Dan pohon kurma yang tinggi-tinggi yang mempunyai mayang yang bersusun-susun, Untuk menjadi rezki bagi hamba-hamba (Kami), dan kami hidupkan dengan air itu tanah yang mati (kering). seperti Itulah terjadinya kebangkitan. (QS Qaaf [50]: 7-11)

هُوَ الَّذِي أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً لَكُمْ مِنْهُ شَرَابٌ وَمِنْهُ شَجَرٌ

فِيهِ تُسَيَّمُونَ ﴿١٠﴾

يُنْبِتُ لَكُمْ بِهِ الزَّرْعَ وَالزَّيْتُونَ وَالنَّخِيلَ وَالْأَعْنَابَ وَمِنْ

كُلِّ الثَّمَرَاتِ إِنَّ فِي ذَلِكَ لَآيَةً لِقَوْمٍ يَتَفَكَّرُونَ ﴿١١﴾

“Dia-lah, yang Telah menurunkan air hujan dari langit untuk kamu, sebahagiannya menjadi minuman dan sebahagiannya (menyuburkan) tumbuh-tumbuhan, yang pada (tempat tumbuhnya) kamu menggembalakan ternakmu. Dia menumbuhkan bagi kamu dengan air hujan itu tanam-tanaman; zaitun, korma, anggur dan segala macam buah-buahan. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar ada tanda (kekuasaan Allah) bagi kaum yang memikirkan”. [An-Nahl (16): 10-11]

وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً بِقَدَرٍ فَأَسْكَنَتْهُ فِي الْأَرْضِ وَإِنَّا

عَلَى ذَهَابٍ بِهِ لِقَادِرُونَ ﴿١٨﴾

فَأَنْشَأْنَا لَكُمْ بِهِ جَنَّاتٍ مِّنْ نَّخِيلٍ وَأَعْنَابٍ لَّكُمْ فِيهَا فَوَاكِهُ كَثِيرَةٌ

وَمِنْهَا تَأْكُلُونَ ﴿١٩﴾

وَشَجَرَةً تَخْرُجُ مِنْ طُورِ سَيْنَاءَ تَنْبُتُ بِالذَّهْنِ وَصِبْغٍ لِلْأَكْلِينَ ﴿٢٠﴾

“Dan kami turunkan air dari langit menurut suatu ukuran; lalu kami jadikan air itu menetap di bumi, dan Sesungguhnya kami benar-benar berkuasa menghilangkannya. Lalu dengan air itu, kami tumbuhkan untuk kamu kebun-kebun kurma dan anggur; di dalam kebun-kebun itu kamu peroleh buah-buahan yang banyak dan sebahagian dari buah-buahan itu kamu makan, Dan pohon kayu keluar dari Thursina (pohon zaitun), yang menghasilkan minyak, dan pemakan makanan bagi orang-orang yang makan”. [Al-Mu'minuun (23): 18-20]

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَأَخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ
 وَالْفُلْكِ الَّتِي تَجْرِي فِي الْبَحْرِ بِمَا يَنْفَعُ النَّاسَ وَمَا أَنْزَلَ
 اللَّهُ مِنَ السَّمَاءِ مِنْ مَّاءٍ فَأَحْيَا بِهِ الْأَرْضَ بَعْدَ مَوْتِهَا وَبَثَّ
 فِيهَا مِنْ كُلِّ دَابَّةٍ وَتَضْرِيفِ الرِّيحِ وَالسَّحَابِ الْمُسْحَرِ
 بَيْنَ السَّمَاءِ وَالْأَرْضِ لَآيَاتٍ لِقَوْمٍ يَعْقِلُونَ ﴿١٦٤﴾

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, silih bergantinya malam dan siang, bahtera yang berlayar di laut membawa apa yang berguna bagi manusia, dan apa yang Allah turunkan dari langit berupa air, lalu dengan air itu Dia hidupakan bumi sesudah mati (kering)-nya dan Dia sebarkan di bumi itu segala jenis hewan, dan pengisaran angin dan awan yang dikendalikan antara langit dan bumi; sungguh (terdapat) tanda-tanda (keesaan dan kebesaran Allah) bagi kaum yang memikirkan”. QS. Al-Baqarah [2] : 164

إِنَّ فِي خَلْقِ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ وَأَخْتِلَافِ اللَّيْلِ وَالنَّهَارِ
 لَآيَاتٍ لِّأُولِي الْأَلْبَابِ ﴿١٩٠﴾
 الَّذِينَ يَذْكُرُونَ اللَّهَ قِيَمًا وَقُعُودًا وَعَلَىٰ جُنُوبِهِمْ وَيَتَفَكَّرُونَ فِي خَلْقِ
 السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ رَبَّنَا مَا خَلَقْتَ هَذَا بَطْلًا تُسَبِّحُكَ فَقِينَا عَذَابَ
 النَّارِ ﴿١٩١﴾

“Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal, (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya

berkata): "Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa neraka". (QS. 'Ali `Imran [3] : 190-191)

C. Manajemen Penanaman dan Waktu Panen Sayuran untuk Melindungi Konsumen dari Penurunan Gizi dan Keamanan Pangan

1. Bukti Temuan dan Konsep Manajemen Penanaman dan Waktu Memanen Penting untuk Pertahankan Keamanan Pangan

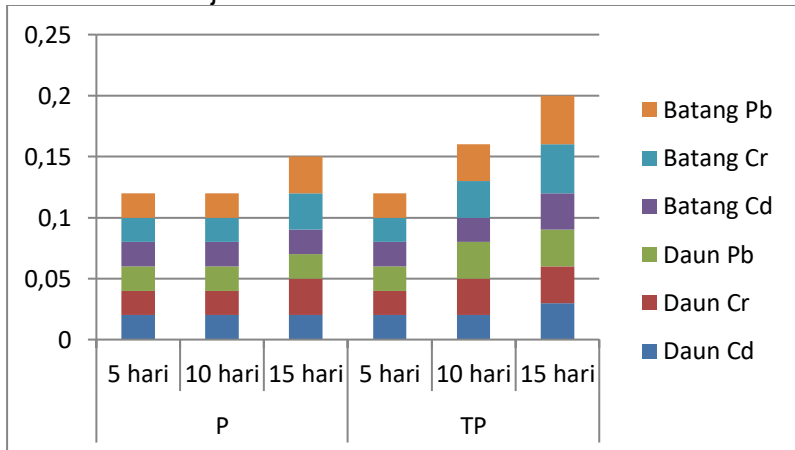
Adanya sifat bioakumulasi, biotransformasi, dan biomagnifikasi polutan termasuk logam berat dalam biota dan ekosistem; tanaman sayuran yang mudah hidup di lingkungan tercemar perlu mendapat perhatian khusus. Sifat-sifat tersebut memungkinkan logam berat dapat terakumulasi dalam jumlah besar, dapat dipindahkan ke organisme lain termasuk manusia yang mengkonsumsinya, dan menimbulkan pengaruh negatif di antaranya berbagai gangguan sistem-sistem tubuh dan penyakit. Oleh karena pencemaran logam berat sulit dikendalikan, perlu diambil langkah-langkah antisipasi pengaruh negatif polutan logam berat ini terhadap biota dan ekosistem.

Penelitian pengaruh akumulasi logam berat terhadap protein dan vitamin sayuran air oleh Widowati (2010) menemukan beberapa konsep, di antaranya adalah:

1. Ada perbedaan akumulasi logam berat antara sayuran yang baru ditanam dengan sayuran yang sudah lama hidup liar di suatu lokasi. Sayuran yang sudah hidup lama di suatu lingkungan tercemar, mengakumulasi logam berat dalam jumlah relatif besar dibandingkan pada tanaman yang baru saja ditanam. Oleh karena itu peneliti berasumsi, sistem regenerasi tanaman secara berkala, di antaranya misalnya peremajaan dengan stek atau sistem lainnya, pemangkasan, misalnya, dapat menurunkan bioakumulasi logam berat dalam organ sayuran, karena tanaman baru membutuhkan waktu untuk menumbuhkan sistem perakaran penyerap hara termasuk polutan logam berat terlebih dahulu sebelum siap menyerap hara dan polutan di lingkungannya.

Kondisi ini dibuktikan dengan penelitian (Widowati, dkk, 2015), bahwa tanaman sayuran yang secara berkala dilakukan pemangkasan, maka berkurang serapan logam pencemarnya.

2. Diagram dan Grafik Temuan Pendukung Konsep Kondisi ini ditunjukkan dalam Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Perbedaan Serapan Logam Berat Pencemar pada Daun Kangkung yang Dipangkas (P) dan Tidak Dilakukan Pemangkasan (TP)

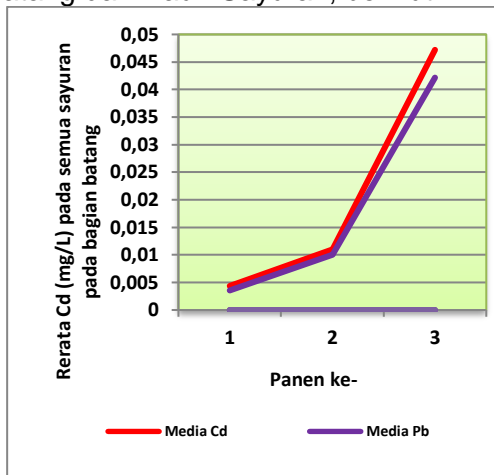
Pada tanaman yang secara berkala dilakukan pemangkasan (P), maka serapan logam berat/polutannya relatif rendah. Sebaliknya pada tanaman yang tidak dilakukan pemangkasan (TP), maka serapan logam beratnya relatif tinggi.

3. Ada perbedaan akumulasi logam berat antara sayuran yang hidup di lingkungan terbuka dengan lingkungan tertutup, dalam hal ini greenhouse sebagai laboratorium. Lingkungan terbuka, dimana berbagai faktor lingkungan terlibat, memungkinkan adanya sistem sinergi sehingga dapat mengurangi efek negatif logam berat terhadap biota. Oleh karena itu pada lingkungan dimana banyak faktor yang terlibat, walaupun dalam konsentrasi polutan logam berat relatif tinggi, pengaruhnya terhadap tanaman relatif

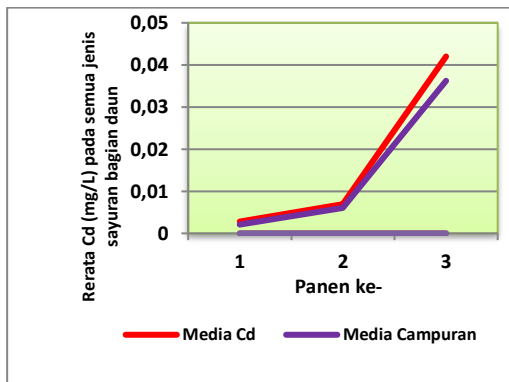
berkurang. Sebaliknya pada sistem tertutup, apalagi polutan logam berat tunggal, pengaruhnya terhadap biota menjadi lebih nyata, yaitu memberikan pengaruh lebih buruk terhadap biota, di antaranya akumulasi logam berat lebih besar, demikian juga penurunan vitamin A dan vitamin C-nya juga semakin besar. Keadaan ini dapat dicermati dari hasil penelitian, sayuran pada medium tercemar logam berat tunggal terjadi akumulasi logam berat dan penurunan vitamin A dan vitamin C yang lebih tinggi dibandingkan dengan media campuran, seperti tertera pada Gambar 2.6 Grafik Rerata Akumulasi Cd, Pb, serta Penurunan Vitamin A dan vitamin C pada Semua Jenis Sayuran pada pembahasan sebelumnya. Dalam penelitian Widowati dkk (2015) menunjukkan macam dan kadar logam berat pencemar terhadap serapannya dalam batang, daun, dan buah sayuran dipengaruhi wilayah/lokasi penelitian. Semua logam berat yang umum ditemukan sebagai pencemar adalah Cd, Cr, Pb, dan terbanyak di wilayah industri. Berturut kemudian jalan raya, serta pertanian.

4. Waktu pemanenan penting menjadi acuan untuk mengurangi akumulasi polutan logam berat dalam organ sayuran yang dikonsumsi. Apabila diprediksi sayuran hidup di lingkungan tercemar, hendaknya dipanen lebih awal untuk mengurangi akumulasi polutan logam berat serta penurunan kadar vitamin A dan vitamin C-nya. Sebagaimana tertuang dalam Gambar 5. Grafik Rerata Akumulasi Cd, Pb, serta Penurunan Vitamin A dan vitamin C pada Semua Jenis Sayuran, bahwa akumulasi logam berat semakin meningkat sesuai lamanya waktu memanen, sedangkan vitamin A dan vitamin C menurun, kecuali pada medium kontrol, akan mengalami kenaikan sampai dengan W2 standar kebiasaan dipanen. Walaupun demikian, pada media tercemar logam berat, vitamin A dan vitamin C sayuran masih dapat untuk mencukupi kebutuhan orang dewasa bila dipanen paling lama pada W2, yaitu pada saat standar kebiasaan dipanen;
5. Untuk lebih amannya kesehatan tubuh, apabila terpaksa mengkonsumsi sayuran dari lingkungan tercemar, hendaknya dipilih bagian daunnya, karena akumulasi logam berat relatif lebih rendah, dan kandungan vitamin A dan C-nya masih lebih tinggi dibandingkan pada batang. Penelitian

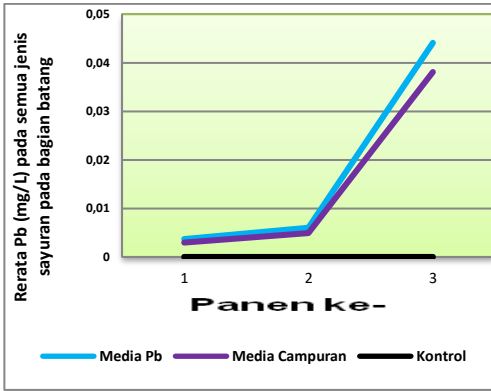
(Widowati, 2010) menunjukkan hasil seperti tertera pada Gambar 5.1 Grafik Perbandingan Akumulasi Logam Berat serta Penurunan Vitamin A dan Vitamin C pada Bagian Batang dan Daun Sayuran, berikut.



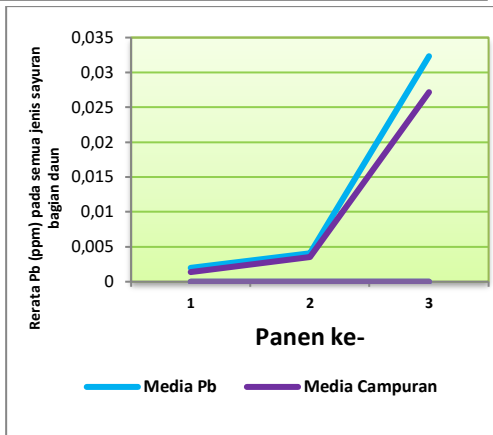
(a)



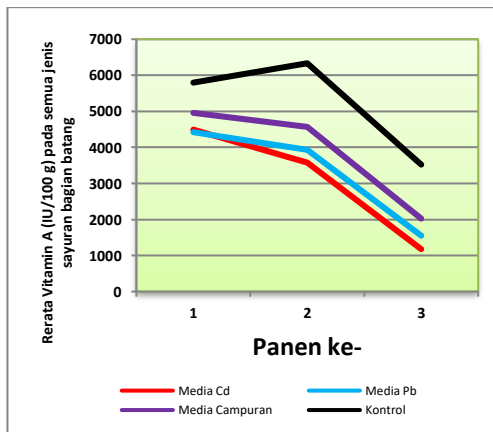
(b)



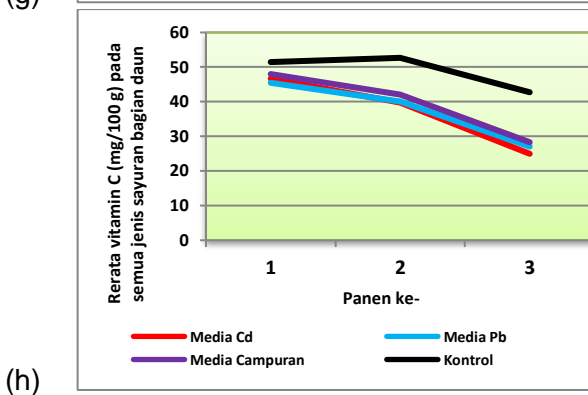
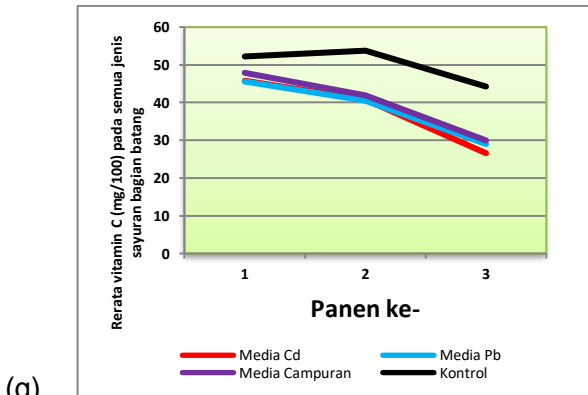
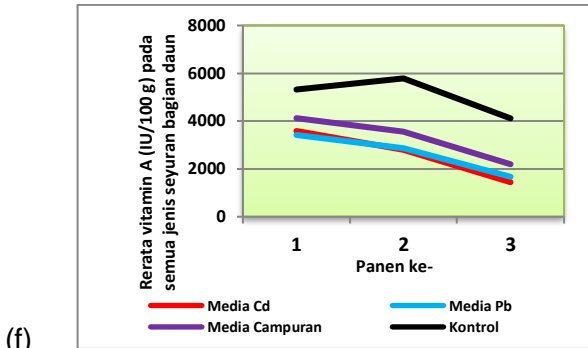
(c)



(d)



(e)



Gambar 5.2 Grafik Perbandingan Akumulasi Logam Berat serta Penurunan Vitamin A dan Vitamin C pada Bagian Batang dan Daun Sayuran

D. Manajemen Pemanfaatan Bagian Sayuran untuk Keamanan Pangan dan Efektivitas Kandungan Gizi

Didasarkan pada fakta-fakta penelitian yang tertuang pada bab V bagian A tentang Manajemen Penanaman dan Waktu Panen, memberikan indikasi bahwa untuk kebutuhan keamanan pangan khususnya sayuran yang tumbuh di habitat/tanah/air tempat hidupnya tercemar logam berat, maka dapat diketahui, bahwa bagian yang lebih dekat dengan akar memiliki peluang, logam berat pencemar yang terserap dan terakumulasi dalam jaringannya lebih besar/tinggi. Sehingga untuk aman konsumsi, lebih baik mengkonsumsi bagian daun daripada batang, karena akumulasi pada daun relatif lebih kecil/rendah. Hal ini juga didasarkan fakta yang ada, juga diketahui, penurunan gizi (protein, vitamin A, vitamin C) juga relatif rendah (kadar masih bertahan relatif tinggi), karena belum terpengaruh logam berat. Sehingga protein dalam jaringan masih bertahan, serta vitamin A dan C nya belum dimanfaatkan dalam mekanisme antioksidan dalam mengatasi logam berat yang dapat mengganggu metabolisme dan kerusakan sel/jaringan yang ada.

Fakta-fakta ini menunjukkan bahwa, untuk aman dari ancaman logam berat pencemar yang dapat merugikan konsumen sayuran, maka lebih baik memanfaatkan bagian daun sayuran daripada batangnya, termasuk nilai gizinya juga masih lebih baik dan relatif tinggi. Apalagi pada sayuran yang tidak dilakukan regenerasi pemangkasan dan dalam waktu yang lama tidak dipanen, tentu logam berat sudah terlanjur tertranslokasikan di bagian lain organ tanaman, dari akar, menuju batang, daun, atau yang lainnya, sehingga selain menjadi tidak aman konsumsi karena akumulasi logam sudah tinggi, juga kadar gizinya sudah menurun karena telah digunakan dalam mekanisme antioksidan dan mempengaruhi metabolisme tubuh tanaman sayuran yang bersangkutan.

E. Manajemen Pengelolaan Bahan Sayuran Tercemar Logam Berat untuk Mutu Gizi dan Aman Konsumsi Melalui Pencucian dan Pengolahan/Pemasakan yang Tepat

1. Pengaruh Pencucian terhadap Kadar Logam Berat dan Kadar Gizi Sayuran

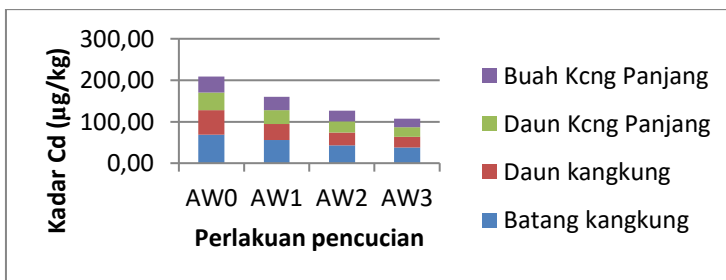
Hasil analisis dan uji hipotesis menunjukkan bahwa variasi pencucian memberikan pengaruh sangat signifikan $\text{sig.p} < 0,01$, dalam penurunan logam berat, kecuali terhadap kadar protein. Antar perlakuan variasi pencucian juga berpengaruh positif terhadap penurunan logam berat Cd dan Pb, tetapi justru tidak berbeda dalam mempengaruhi kadar gizi protein sayuran dan vitamin C. Ini memberi arti bahwa untuk mengkonsumsi sayuran sudah suatu keharusan dicuci terlebih dahulu, berkali-kali. Pencucian memungkinkan logam berat berkurang/mengalami penurunan, dan tidak berakibat turunnya gizi sayuran.

Sebagaimana Munarso, dkk. (2005) menyebutkan, pada tingkat keluarga, usaha yang dapat dilakukan untuk menanggulangi cemaran logam berat antara lain dengan mencuci sayuran, sehingga khususnya cemaran logam berat yang masih menempel pada permukaan sayuran dapat dihilangkan. Cara ini penting dilakukan sebelum sayuran dikonsumsi atau diolah lebih lanjut. Dari data yang diperoleh, kadar logam sebelum sayuran dicuci masih relatif tinggi. Setelah dilakukan pencucian, apalagi dengan pencucian berkali-kali terjadi penurunan kadar logam Cd pada daun kangkung dari 0,0684ppm menjadi 0,03728ppm atau turun 54,48%; pada daun kangkung 49,78%, pada daun kacang panjang 43,53% dan pada buahnya 41,60%.

Terhadap kadar gizi, pencucian sayuran tidak secara signifikan mempengaruhi penurunan protein, vitamin A, maupun vitamin C. Karena secara berturut-turut masing-masing setelah dicuci, kadar gizinya pada daun kangkung misalnya mengalami perubahan yaitu kenaikan 0,03%, turun 0,78%, turun 0,015%. Dari analisis ini dapat diketahui bahwa pencucian relatif tidak merubah kadar gizi sayuran.

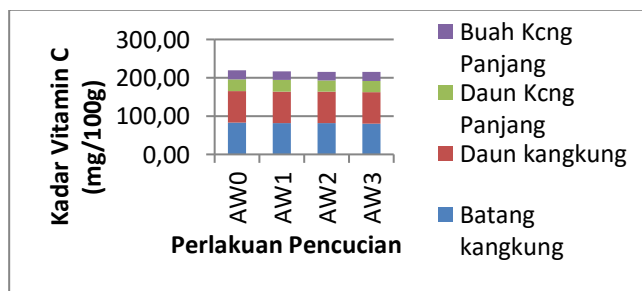
Secara umum kangkung memiliki kadar protein 3,0g, vitamin A 6300 SI, vitamin C 32mg (Haryanto, 2009). Pada penelitian ditemukan kadar sebelum dicuci 2,85mg setelah

dicuci berkali-kali menjadi 2,88mg (0,0003%); vitamin A 3008,16SI menjadi 2930,01SI (0,7815%); kadar vitamin C 82,90mg menjadi 81,36mg (0,0154%). Dengan demikian dapat diketahui, pencucian sayuran relatif tidak akan mengubah kadar gizi sayuran. Walaupun tidak secara signifikan meningkatkan kadar gizi atau sebaliknya menurunkan kadar gizi, tentu saja pencucian juga penting untuk menghilangkan benda-benda asing yang tidak dikehendaki yang paling tidak menempel pada permukaan sayuran baik dalam bentuk polutan, debu, kuman, maupun zat asing lainnya yang mengganggu pencernaan dan kesehatan konsumen. Perubahan-perubahan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.2, dan seterusnya berikut ini.



Gambar 5.3. Pengaruh Pencucian tanpa Pengolahan terhadap Kadar Cd

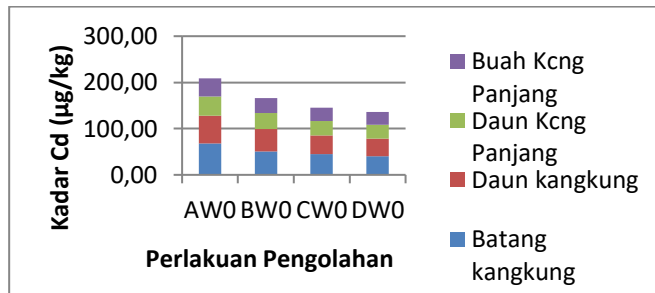
Pengaruh pencucian terhadap vitamin C sayuran, dituangkan dalam Gambar 5.3. berikut.



Gambar 5.4. Pengaruh Perlakuan Pencucian Tanpa Pengolahan terhadap Kadar Vitamin C

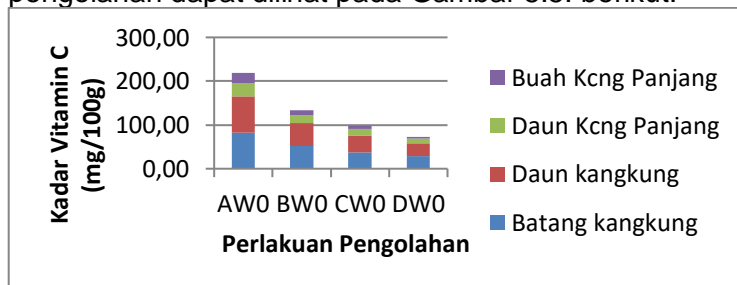
2. Pengaruh Pengolahan Sayuran terhadap Logam Berat dan Kadar Gizi Sayuran

Hasil analisis dan uji hipotesis menunjukkan bahwa variasi pengolahan memberikan pengaruh sangat signifikan $\text{sig.p} < 0,01$, dalam penurunan logam berat maupun kadar gizi sayuran. Antar perlakuan variasi pengolahan juga berpengaruh positif terhadap penurunan logam berat Cd dan Pb, juga dalam mempengaruhi kadar gizi protein sayuran dan vitamin C. Ini memberi arti bahwa untuk mengkonsumsi sayuran sudah suatu keharusan untuk diolah secara tepat. Pengolahan memungkinkan logam berat berkurang/mengalami penurunan, dan dapat berakibat turunnya gizi sayuran. Perubahan kadar logam berat dan mutu gizi dapat dilihat pada Gambar 5.4. berikut.



Gambar 5.5. Pengaruh Perlakuan Pengolahan Tanpa Pencucian terhadap Kadar Cd

Selanjutnya perubahan pada mutu gizi karena pengolahan dapat dilihat pada Gambar 5.5. berikut.



Gambar 5.6. Pengaruh Pengolahan Tanpa Pencucian terhadap Kadar Vitamin C Sayuran

Sebagaimana Munarso, dkk (2005) menyebutkan, pada tingkat keluarga, usaha yang dapat dilakukan untuk menanggulangi cemaran logam berat selain dengan pencucian juga dapat dengan pemberian pemanasan dalam suhu mendidih pada waktu yang singkat (1-5menit) yang bertujuan untuk mereduksi cemaran logam berat. Menurut Williams (1979), bahwa pemasakan dengan melibatkan panas merupakan salah satu proses pengolahan pangan yang banyak dilakukan baik pada skala rumah tangga atau skala industri. Beberapa cara pemasakan yang umum dilakuakn adalah perebusan, pengukusan, dan penumisan. Perebusan adalah proses pemasakan dalam air mendidih sekitar 100°C, dimana air sebagai media penghantar panas. Pengukusan merupakan proses pemasakan dengan medium uap air panas, yang dihasilkan oleh air mendidih. Sedangkan penumisan merupakan proses proses pemasakan dengan menggunakan sedikit minyak dan air.

Lebih lanjut dinyatakan, perebusan dapat menyebabkan senyawa pengikat logam pada tumbuhan melepaskan ikatannya, sehingga senyawa logam berat Pb yang terikat pada jaringan tumbuhan dapat terlepas (Winarno, 2004). Penelitian oleh Triani, dkk (2011), menemukan dengan perebusan, kadar Pb pada kangkung dapat mengalami penurunan dari 1,494 ppm, setelah perebusan selama 3, 5, 7 menit, mengalami penurunan menjadi 1,302, 1,300, dan 1,287ppm. Walaupun memberi efek pada menurunnya mutu sensoris (warna, tekstur, penerimaan keseluruhan) secara subjektif panelis yang mengkonsumsinya (Budiari, dkk, 2015). Semakin lama pencucian dan perebusan, maka kadar logam Pb semakin berkurang. Hal ini disebabkan karena rusaknya membran plasma dan membran organel pada sayuran akibat perebusan, sehingga memudahkan senyawa logam berat yang terakumulasi di dalamnya akan terurai dari jaringan tumbuhan (Kustina, 2006). Perebusan juga dapat memecah ikatan logam dalam jaringan tumbuhan, suhu tinggi juga dapat menyebabkan senyawa pengikat logam berat pada tumbuhan melepaskan ikatannya, sehingga

senyawa yang terikat pada tumbuhan dapat terlepas (Winarno, 2004).

Dari data dan analisis uji hipotesis menunjukkan pengolahan secara sangat signifikan berpengaruh terhadap penurunan logam berat pencemar dan mutu gizi sayuran. Secara berturut-turut yang paling besar menurunkan adalah pengolahan dengan menumis, selanjutnya adalah merebus, dan mengukus. Terkait dengan mutu gizinya, sayuran segar paling banyak menyediakan kadar gizi yang tertinggi. Tetapi apabila sayuran sudah tercemar logam berat, maka mutlak perlu diolah terlebih dahulu untuk mengurangi/menurunkan logam berat pencemarnya. Dalam penelitian, perlakuan pengolahan dengan teknik yang dilakukan masih memenuhi batas-batas toleransi tidak mengubah/mengurangi kadar gizi sayuran dan telah secara signifikan menurunkan kadar logam yang menempel di permukaan sayuran.

3. Pengaruh Pencucian dan Pengolahan Sayuran Secara Bersama-sama terhadap Logam Berat dan Kadar Gizi Sayuran

Pengaruh interaksi antar variabel X dapat ditunjukkan dalam uji hipotesis berikut. Dari Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Uji Hipotesis diketahui, bahwa untuk untuk semua perlakuan ketika bersama-sama, atau interaksi antara variabel X1-X2, X2-X3, X1-X3, X1-X2-X3, secara umum dapat menurunkan logam berat pencemar dengan $\text{sig. } p < 0,01$, hanya saja besar kontribusinya dalam mempengaruhi Y berbeda-beda. Umumnya lebih dari 90% (91,6% terhadap Cd, 94,3 terhadap Pb, 100% terhadap vitamin A, 95% terhadap vitamin C), kecuali terhadap kadar protein hanya sebesar 68%.

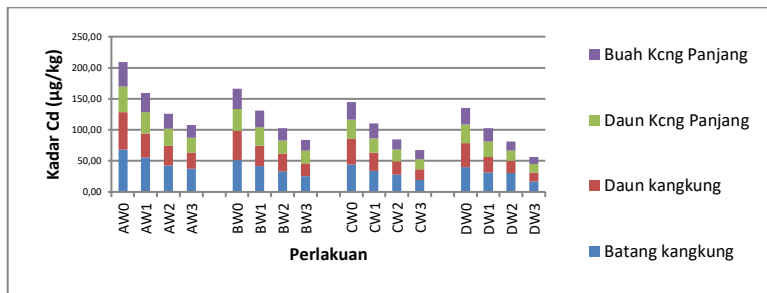
Sebagaimana Munarso, dkk (2005) menyebutkan, pada tingkat keluarga, usaha yang dapat dilakukan untuk menanggulangi cemaran logam berat selain dengan pencucian juga dapat dengan pemberian pemanasan dalam suhu mendidih pada waktu yang singkat (1-5menit) yang bertujuan untuk mereduksi cemaran logam berat.

Menurut Williams (1979), bahwa pemasakan dengan melibatkan panas merupakan salah satu proses pengolahan pangan yang banyak dilakukan baik pada skala rumah tangga atau skala industri. Beberapa cara pemasakan yang umum dilakuakn adalah perebusan, pengukusan, dan penumisan. Perebusan adalah proses pemasakan dalam air mendidih sekitar 100°C, dimana air sebagai media penghantar panas. Pengukusan merupakan proses pemasakan dengan medium uap air panas, yang dihasilkan oleh air mendidih. Sedangkan penumisan merupakan proses proses pemasaaan dengan menggunakan sedikit minyak dan air.

Lebih lanjut dinyatakan, perebusan dapat menyebabkan senyawa pengikat logam pada tumbuhan melepaskan ikatannya, sehingga senyawa logam berat Pb yang terikat pada jaringan tumbuhan dapat terlepas (Winarno, 2004). Penelitian oleh Triani, dkk (2011), menemukan dengan perebusan, kadar Pb pada kangkung dapat mengalami penurunan dari 1,494 ppm, setelah perebusan selama 3, 5, 7 menit, mengalami penurunan menjadi 1,302, 1,300, dan 1,287ppm. Walaupun memberi efek pada menurunnya mutu sensoris (warna, tekstur, penerimaan keseluruhan) secara subjektif panelis yang mengkonsumsinya (Budiari, dkk, 2015). Semakin lama pencucian dan perebusan, maka kadar logam Pb semakin berkurang. Hal ini disebabkan karena rusaknya membran plasma dan membran organel pada sayuran akibat perebusan, sehingga memudahkan senyawa logam berat yang terakumulasi di dalamnya akan terurai dari jaringan tumbuhan (Kustina, 2006). Perebusan juga dapat memecah ikatan logam dalam jaringan tumbuhan, suhu tinggi juga dapat menyebabkan senyawa pengikat logam berat pada tumbuhan melepaskan ikatannya, sehingga senyawa yang terikat pada tumbuhan dapat terlepas (Winarno, 2004).

Dari data dan analisis uji hipotesis menunjukkan signifikansi pengaruh interaksi secara umum juga menunjukkan sangat signifikan sig.p < 0,01. Hasil ini memberi arti bahwa apabila perlakuan variabel X dilakukan secara bersama-sama, maka lebih memberi peluang

mengurangi/menurunkan logam berat pencemar, dan memperhatikan pengolahan yang tepat dapat mempertahankan mutu gizi sayuran. Untuk menurunkan logam berat mutlak dicuci berkali-kali, semakin banyak kali mencuci akan menurunkan logam berat pencemar, tanpa mengurangi kadar gizi protein, vitamin A, dan vitamin C. Sedangkan untuk mempertahankan mutu gizi, untuk sayuran yang sudah terlanjur tercemar logam berat, makan perlu dicuci, dan diolah dengan tepat. Sayuran segar tanpa diolah paling tinggi, kadar gizinya. Tetapi karena sayuran telah tercemar logam berat, maka lebih baik diolah dengan memilih cara pengolahan/pemasakan yang tepat. Pengolahan paling baik adalah dikukus. Selanjutnya dari hasil penelitian ini, yang memberi peluang menurunkan mutu gizinya adalah secara berurutan sampai yang terburuk adalah mengukus, merebus, dan terjelek adalah menumis. Ilustrasi perubahan kadar logam berat dan mutu gizi sayuran, karena pengaruh secara bersama-sama pencucian dan pengolahan, dapat dilihat pada Gambar 5.6. berikut.

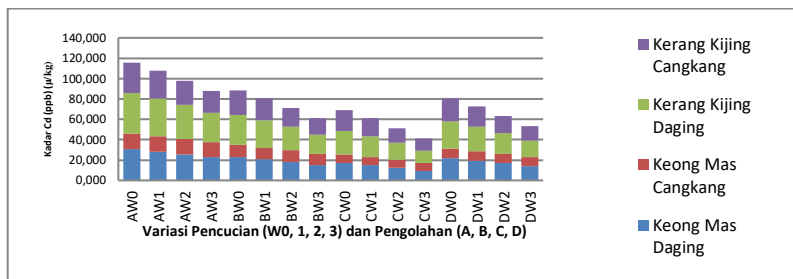


Gambar 5.7. Pengaruh bersama-sama Pencucian dan Pengolahan Bahan Pangan Nabati terhadap Cd

Dari data yang ditunjukkan pada diagram gambar 5 tersebut menunjukkan, bahwa pencucian dan pengolahan dapat menurunkan Cd bahan pangan nabati/sayuran.

Ketika pengelolaan bahan pangan berupa pencucian dan pengolahan dilakukan pada bahan pangan

hewani, dalam hal ini pada keongmas dan kerangkijing yang hidup di lingkungan habitat sayuran tersebut, maka diperoleh hasil, yang dikomunikasikan dalam diagram sebagai berikut.



Gambar 5.8. Pengaruh bersama-sama Pencucian dan Pengolahan Bahan Pangan Hewani terhadap Cd

Keterangan:

A. Sayuran Segar, tidak diolah, B. Dikukus; C. Direbus; D. Ditumis

W0= tidak dicuci; W1= dicuci 1X; W2= dicuci 2X; W3= dicuci 3X.

Secara umum, sama efektifnya perlakuan pencucian dan pengolahan dapat menurunkan Cd bahan pangan hewani/kerangkijing dan keongmas. Hanya hanya, penurunan logam berat pada keongmas dan kerangkijing secara berurutan semakin banyak penurunannya dengan cara dikukus, ditumis, dan terbanyak penurunannya dengan direbus.

F. Pemasarakan Profil Sayuran Sehat, Bergizi Cukup, dan Aman bagi Kesehatan

1. Bukti Temuan dan Konsep Profil Sayuran Sehat, Bergizi Cukup, dan Aman bagi Kesehatan

Sayuran merupakan salah satu unsur makanan yang sangat penting bagi tubuh, dan bukan sekedar sebagai pelengkap saja. Sayuran yang kaya gizi ini dapat menjadi penyeimbang (*balancing agent*) penting dalam diet menu

karena bahan pangan ini akan memasok protein, mineral, vitamin, energi dan serat yang dibutuhkan manusia (Redaksi Trubus, 2008). Sayuran, dalam hal ini bagian daunnya, merupakan "pabrik" yang mengolah berbagai unsur makanan dari dalam tanah sehingga menghasilkan zat yang dibutuhkan untuk pertumbuhannya. Untuk mengolah bahan makanan, daun juga memerlukan bahan-bahan mineral lainnya seperti kalsium, magnesium, dan besi.

Sayuran juga menghasilkan karbohidrat, yang terdiri dari selulose (serat), zat tepung dan gula. Di dalam tubuh manusia dan hewan, selulosa merupakan zat yang tidak dapat dicerna akan membantu proses pencernaan di usus. Oleh karena itu, bila hanya mengkonsumsi makanan pokok saja yang hanya sedikit sekali selulosanya, maka sistem pencernaan akan terganggu. Selain karbohidrat, daun juga menghasilkan vitamin yang berperan dalam kegiatan pertumbuhan tanaman. Sayuran juga mengandung lemak dalam jumlah terbatas.

Kandungan gizi yang ada pada sayuran sangat lengkap, sehingga di abad modern ini makin banyak orang memilih berpantang daging dan hanya mengkonsumsi sayuran dan buah-buahan saja (*vegetarian*). Para ahli gizi pun mengajurkan masyarakat untuk lebih banyak mengkonsumsi sayuran demi menjaga kesehatan dan kebugaran tubuh. Kesadaran penggunaan sayuran semakin meningkat karena pendidikan dan komunikasi yang lebih baik tentang manfaat kesehatan yang dapat diperoleh akibat mengkonsumsi sayuran. Di samping sebagai sumber gizi, vitamin dan mineral, sayuran juga menambah ragam, rasa, warna, dan tekstur makanan. Kecuali beberapa jenis, sayuran umumnya mengandung protein dan lemak yang rendah serta banyak di antaranya memiliki kadar air tinggi dan bahan kering rendah. Berbagai sayuran berdaun hijau umumnya menjadi sumber provitamin A dan vitamin C. Biasanya sayuran saja tidaklah cukup memenuhi kebutuhan gizi harian, dan perlu dikonsumsi dalam jumlah sangat besar untuk memenuhi seluruh pasokan gizi yang dibutuhkan. Sekitar dua pertiga dari jumlah penduduk dunia bergantung pada menu nabati (Rubatzky & Yamaguchi, 1998). Banyak faktor yang mempengaruhi zat gizi tanaman. Potensi genetik tanaman adalah pengendali utama yang menentukan jenis dan jumlah gizi yang dihasilkan.

Potensi tersebut sering tidak disadari karena ada faktor lain yang berpengaruh terhadap perkembangan, hasil dan kualitas tanaman. Melalui pemuliaan dan manipulasi genetik, potensi genetik tanaman akan diperbaiki lebih lanjut.

Lingkungan pertumbuhan adalah faktor penting lain yang mempengaruhi zat gizi tanaman. Suhu, kelembaban, cahaya, dan zat gizi tanaman secara sendiri-sendiri maupun secara kolektif berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman; jika salah satu komponen menjadi pembatas, maka pertumbuhan tanaman terhambat. Polusi atmosfer, polutan air, cara budidaya, persaingan antar tanaman, dan pematangan tanaman juga merupakan faktor yang berpengaruh yang dapat menurunkan hasil, karena itu menurunkan juga kandungan zat gizi tanaman.

Ber macam pangan di Indonesia, baik sayuran, buah-buahan maupun makanan pokok ternyata masih banyak mengandung bahan berbahaya. Bahan cemaran itu antara lain residu pestisida, cemaran mikroba, dan kontaminasi berbagai logam berat (Rahardjo, 2008). Dengan demikian, Indonesia dipastikan masih mempunyai masalah serius dalam keamanan pangan. Untuk itu penanganan produk segar perlu dilakukan secara komprehensif. Hasil penelitian yang dilakukan Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian (Wisnubroto, dalam Rahardjo, 2008) berupa analisis contoh sayuran kubis, tomat dan wortel yang diperoleh dari sentra produksi di Jawa Barat dan Jawa Timur menunjukkan secara umum cemaran logam besi (*Fe*) dan timbal (*Pb*) masih di atas batas maksimum residu (BMR). Sementara cemaran logam *As*, *Cd* dan *Zn* masih pada tingkat aman, walaupun juga perlu diwaspadai, khususnya pada padi tercatat sekitar 0,05-0,59 ppm, telah melebihi ambang batas. Sementara menurut Fardiaz (dalam Rahardjo, 2008), pemakaian bahan tambahan pada produk makanan agar tidak tercemar bahan kimia berbahaya yang dapat meracuni tubuh harus ditingkatkan pengawasan keamanannya.

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 mengakumulasi logam-logam tersebut pada semua bagian akar, batang, daun dan buah (Astawa, 2008).

Konsumsi jenis makanan tertentu yang tercemar logam berat, menyebarnya logam yang tak terkendali dalam lingkungan serta limbah perkotaan yang meningkat karena kepadatan penduduk memicu meningkatnya polutan logam yang berbahaya dan tidak dapat dihancurkan ini, yang akhirnya terakumulasi ke lingkungan, terutama mengendap di dasar perairan membentuk senyawa kompleks bersama bahan organik dan anorganik secara adsorpsi dan kombinasi. Tanaman yang tumbuh dalam lingkungan tersebut akhirnya menyerap dan mengakumulasi polutan tersebut ke bagian tubuhnya, yang selanjutnya akan menyebar sampai pada manusia atau organisme lain yang memakannya. Konsumen dalam ambang batas tertentu akan terpengaruh akibat mengakumulasi polutan secara berlebihan.

Jenis-jenis sayuran air, di antaranya kangkung air, selada air, dan genjer memiliki kebiasaan hidup liar di tempat-tempat perairan dengan kondisi yang tidak terjamin bersih dan aman bagi kesehatan. Padahal dilihat dari potensi tumbuhnya mempunyai peluang menjadi fitoremediator karena dapat hidup baik pada limbah. Ketiga jenis sayuran ini biasa ditemukan hidup di saluran air, kolam, sungai bahkan pada lingkungan yang teraliri limbah, sehingga dimungkinkan dapat mengakumulasi polutan termasuk logam berat. Sayuran air merupakan jenis tumbuhan yang mudah menyerap logam berat (Bucheveer, 1973; Haghiri, 1973). Penelitian yang dilakukan oleh Dahlia (2006), menyebutkan kangkung air, selada air, dan genjer yang ditemukan di daerah aliran sungai Brantas telah mengakumulasi logam berat *Pb*, *Cr*, *Cd*, *Cu* dan *Zn* bahkan sebagian telah mencapai daun pada tingkat kadar yang membahayakan. Batas maksimum cemaran logam dalam makanan telah diatur oleh pemerintah melalui Keputusan Direktur Jendral Pengawasan Obat dan Makanan Nomor 03725/B/SK/VII/89, untuk *Pb* 2 mg/kg, *Cu* 20 mg/ kg, *Cd* 0,2 mg/ kg, *Zn* 40 mg/ kg, *Cr* 0,4 mg/ kg. SK Gubernur Jatim Nomor 45 Tahun 2002 tentang Baku Mutu Limbah Cair, Peraturan Pemerintah RI Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air Kriteria Mutu Air Kelas IV (air untuk pertanian) dan Nomor 173/MenKes/Per NIII/73 tahun 1977 tentang pencemaran air yang berhubungan dengan kesehatan, membatasi kandungan

maksimal *Pb* 1mg/L, *Cr* heksavalen 1mg/L, *Cd* 0,01 mg/L, *Cu* 0,2mg/L, *Zn* 2 mg/L; *As* 1mg/L.

Sebagaimana diungkapkan oleh Winarno (2004), sayuran hijau banyak mengandung karoten sumber vitamin A. Ada hubungan langsung antara derajat kehijauan sayuran dengan kadar karoten. Semakin hijau semakin tinggi kadar karotennya, daun-daun yang pucat diketahui miskin karoten. Lebih lanjut Winarno (2004) menambahkan, berbagai makanan hewani yang relatif mahal, seperti susu, keju, kuning telur, hati, dan berbagai ikan yang tinggi kandungan lemaknya merupakan sumber utama retinol (provitamin A hewani), demikian juga beberapa sayuran dan buah-buah yang berwarna merah atau kuning, terutama wortel. Sayuran hijau mekipun tidak tinggi kandungan vitamin A-nya, tetap penting artinya sebagai sumber vitamin A karena murah dan mudah didapat. Bahkan sayuran hijau ternyata juga tinggi kadar proteinnya. Bila ditakar berdasar berat kering, daun hijau mengandung protein 30-40%, kira-kira mendekati kandungan protein kedelai. Konsumsi 100 g sayuran hijau saja, atau sekitar 2 sendok makan setelah dimasak, dapat menambah 15% dari seluruh konsumsi protein hari itu, di samping menambah sebanyak 100% atau lebih kalsium dan besi; dan ternyata mencukupi keperluan vitamin A dan vitamin C untuk orang dewasa per hari yaitu 3.500 IU vitamin A dan 30 mg vitamin C.

Memperhatikan hasil penelitian (Widowati, 2010), interaksi jenis sayuran, variasi media, dan macam organ sayuran, sampai dengan W2 tepat kebiasaan dipanen, bahkan pada media yang tercemar logam berat tunggal *Cd* maupun *Pb* sekalipun, kadar vitamin A, khususnya pada bagian batang masih memenuhi kebutuhan orang dewasa perhari (kadarnya masih berkisar 3571,379838 – 3935,93155 IU). Apalagi vitamin A pada medium kontrol bahkan sampai panen W3 walaupun sudah mengalami penurunan baik pada batang (3521,90193 IU) maupun daun (4114,41644 IU) masih memenuhi kebutuhan orang dewasa perhari. Demikian juga untuk kadar vitamin C-nya, untuk semua jenis sayuran baik pada batang maupun daun sampai dengan W2 termasuk yang tercemar logam tunggal baik *Cd* maupun *Pb* masih memenuhi kebutuhan vitamin C orang dewasa perhari 30 mg perhari

dalam 100 g sayuran (pada W2 vitamin C kadar berkisar 39,739 – 42,097 mg/100g). Pada media kontrol bahkan pada W3 masih memenuhi kebutuhan vitamin C juga, yaitu 44,248 mg/100 pada batang dan 42,735 mg/100 g. Memperhatikan hasil penelitian ini, menunjukkan bahwa sayuran sebagai sumber vitamin A dan vitamin C pada sayuran yang hidup di daerah tercemar masih bisa dimanfaatkan, paling tidak untuk keperluan jangka pendek mengingat lingkungan yang bebas logam berat semakin sulit untuk diupayakan dalam memproduksi sayuran.

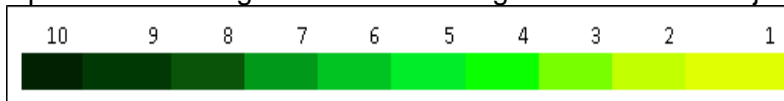
Masyarakat konsumen dapat mencegah dampak akumulasi logam berat dan pengaruhnya terhadap vitamin A dan vitamin C dengan mencermati perubahan warna hijau pada batang dan daun sayuran. Memperhatikan Interaksi antara S (jenis sayuran), M (media), dan O (macam Organ) antar Waktu Pemanenan, bahwa pada W1sebelum kebiasaan dipanen, menunjukkan tidak ada perbedaan skala warna pada semua jenis sayuran pada semua media baik pada batang dan daunnya. Ini memberi indikasi bahwa skala warna hijau paling rendah 5,5 pada batang dan daun masih aman untuk dikonsumsi; mengingat semakin rendah dari skala 5,5 menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan, termasuk pada akumulasi logam maupun penurunan vitamin A dan vitamin C-nya. Sebagaimana diketahui, pada saat masih muda sebagai bibit skala warna sekitar 4 – 5. Pada media kontrol masa pertumbuhan vegetatif batang dan daun sampai W1 berkisar 6,0833-7,333. Pada W2 media kontrol berkisar 6,9167 – 7,6667, sedangkan pada W3 mulai menurun kembali menjadi 5,6667 – 6,3333. Sebaliknya pada media perlakuan tercemar logam berat, skala warna sudah mengalami penurunan mulai W2.

Warna pada batang dan daun tanaman ditentukan oleh pigmen. Pigmen yang memberi ciri warna hijau adalah pigmen klorofil, yang terdiri atas klorofil a dan klorofil b. Apabila persentase klorofil a lebih besar, maka warna menjadi kuning-hijau (Abidin, 1984). Perbedaan klorofil a dengan klorofil b adalah bahwa pada klorofil a mempunyai methyl grup pada ring tiga, sedangkan pada klorofil b mempunyai gugusan aldehyde, yang menyebabkan lebih bersifat hidrophyllic. Pada tumbuhan berderajat tinggi, perbandingan klorofil a dengan

klorofil b berbanding antara 2-5 sampai dengan 3,5 : 1. Goodwin & Mercer (1972 dalam Abidin, 1984) menyatakan proporsi klorofil b pada tumbuhan yang terlindung, lebih besar daripada tumbuhan terbuka. Penelitian Widowati (2010) menunjukkan pada saat masih muda, persentase klorofil a lebih besar daripada klorofil b dengan jumlah total klorofil a + b besar; ketika tanaman menua, persentase klorofil a tetap lebih besar daripada klorofil b dengan jumlah total klorofil a + b kecil (menurun); sebaliknya pada tanaman yang tercemar logam berat persentase klorofil a lebih kecil daripada klorofil b dengan jumlah total klorofil a + b jauh lebih rendah dibandingkan karena menua pada medium yang tidak tercemar logam berat. Perbedaan jumlah klorofil, khususnya penurunan klorofil a ini berkaitan dengan rusaknya klorofil a mempercepat proses penuaan daun, sehingga klorofil a segera mengalami transformasi menjadi klorofil b, bahkan selanjutnya mengalami transformasi untuk pembentukan karotenoid dan menjadi berwarna kuning kecoklatan (Abidin, 1984). Sebagaimana diketahui, klorofil b dibentuk sebagai hasil lanjut transformasi klorofil a. Demikian juga karotenoid dalam proses penuaan daun, sehingga proses penuaan daun dipercepat, warna hijau batang dan daun yang awalnya hijau berubah menguning.

Hubungannya dengan kandungan Mg, semua mengalami penurunan ketika menua maupun yang tercemar logam berat, yang akhirnya mengalami klorosis, dengan penurunan Mg jauh lebih besar yang tercemar logam berat dibandingkan karena menua pada medium kontrol. Untuk lebih mudah memahaminya dapat dilihat pada Tabel 5.1 Rerata Perubahan Kadar Klorofil dan Mg Daun Awal dan Akhir Perlakuan.

Sebagai gambaran perubahan angka skala warna hijau dapat dicermati bagan Gambar 5.2 Bagan Skala Warna Hijau.



Gambar 5.9 Bagan Skala Warna Hijau

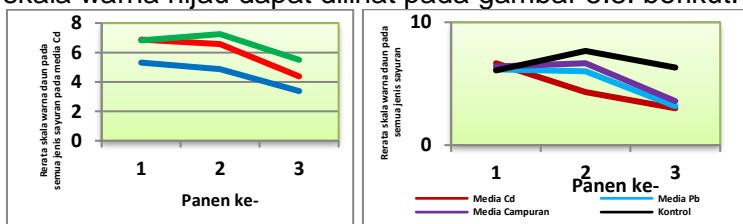
Dengan berpedoman pada bagan Gambar 5.2 Bagan Skala Warna Hijau, berarti konsumen dapat memprediksi,

apabila sayuran pada waktu siap dipanen dan dikonsumsi memiliki skala warna kurang dari 5,5 maka perlu waspada adanya kemungkinan telah tercemar logam berat, serta vitamin A dan vitamin C-nya telah mengalami penurunan.

Akumulasi logam berat yang semakin tinggi karena perbedaan waktu pemanenan, memungkinkan penurunan klorofil, seiring dengan kenaikan *Cd*, *Pb*. Di dalam jaringan tanaman, unsur logam termasuk *Cd*, *Pb* akan mendesak dan menggantikan *Mg* penyusun klorofil, sehingga merusak struktur kloroplas (Kovacs, 1992). Akibatnya warna hijau pada batang dan daun akan mengalami penurunan, sehingga pada pengamatan terjadi penurunan angka skala warna hijau pada batang dan daun sayuran air. *Mg* termasuk unsur hara makro, merupakan penyusun molekul klorofil. Unsur *Mg* termasuk paling kalah bersaing dengan kation lainnya (Jones, 1991 dalam Yuwono dkk, 2002). Dalam pengamatan selama penelitian, *Mg* dan kadar klorofil menurun seiring dengan kenaikan akumulasi logam dalam organ sayuran dan waktu pemanenan. Klorofil total pada genjer yang awalnya sekitar 704 mg/L, dengan total kadar *Mg* 0,409% setelah pemanenan W3 pada medium tercemar logam berat *Cd* mengalami penurunan klorofil tinggal 311 mg/L kadar *Mg* 0,046%; pada medium tercemar *Pb* klorofil genjer pada W3 336 mg/L kadar *Mg* 0,063%; pada medium tercemar *Cd*, *Pb* klorofil genjer pada W3 tinggal 321 mg/L kadar *Mg* 0,059%. Pada kangkung air awalnya 902 mg/L dengan total kadar *Mg* 0,454% setelah pemanenan W3 pada medium tercemar logam berat *Cd* mengalami penurunan klorofil 350 mg/L kadar *Mg* 0,056% pada medium tercemar *Pb* klorofil genjer pada W3 380 mg/L kadar *Mg* 0,065%; pada medium tercemar *Cd*, *Pb* klorofil genjer pada W3 tinggal 364 mg/L kadar 0,062*Mg* %. Sedangkan pada selada air awalnya 1153 mg/L dengan total kadar *Mg* 0,461% setelah pemanenan W3 pada medium tercemar logam berat *Cd* mengalami penurunan klorofil 723 mg/L kadar *Mg* 0,061% pada medium tercemar *Pb* klorofil genjer pada W3 tinggal 780 mg/L kadar *Mg* 0,070%; pada medium tercemar *Cd*, *Pb* klorofil genjer pada W3 tinggal 796 mg/L kadar *Mg* 0,072%. Penurunan kadar klorofil total dan *Mg* pada klorofil berakibat rusaknya struktur kloroplas pemberi warna hijau pada batang dan daun sayuran, sehingga warna

hijau akan menurun seiring dengan tingginya akumulasi logam berat dan menurunnya kadar vitamin A dan vitamin C sayuran air.

Ilustrasi keterkaitan kadar logam berat terserap dan penurunan kadar klorofil yang ditunjukkan dalam penurunan skala warna hijau dapat dilihat pada gambar 5.8. berikut.



Gambar 5.9. Ilustrasi Penurunan Skala Warna Hijau Akibat Penyerapan Logam Berat Cd, serta Campuran Cd&Pb

G. Pemantapan Materi

Untuk memperoleh pemahaman yang dalam terkait bab yang dibahas, silahkan Sdr. selesaikan soal pada pemantapan materi berikut.

PEMANTAPAN MATERI:

1. Mengapa menanam dan memanfaatkan sayuran perlu pengaturan?
2. Bagaimanakah manajemen sayuran agar tetap baik untuk kesehatan tubuh dan lingkungan?
3. Tunjukkan ciri-ciri sayuran sehat!
4. Berikanlah contoh manajemen tanaman sayuran yang baik dan aman !
5. Hubungkan fungsi manajemen sayuran dengan pernyataan: "Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, dan silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal, (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata): "Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia, Maha Suci Engkau, maka peliharalah kami dari siksa neraka". (QS. 'Ali `Imran [3] : 190-191)
6. Bagaimanakah strategi memasyarakatkan sayuran sehat? Buatlah kerangka proyek sosialisasinya!

BAB VI
MODEL DAN TEKNOLOGI TEPAT GUNA
MANAJEMEN BUDIDAYA, PEMANFAATAN, DAN
PENGOLAHAN BAHAN PANGAN
TERCEMAR LOGAM BERAT

A. Panduan Mempelajari Bab VI

BAB VI MODEL DAN TEKNOLOGI TEPAT GUNA
MANAJEMEN BUDIDAYA, PEMANFAATAN, DAN
PENGOLAHAN BAHAN PANGAN TERCEMAR LOGAM
BERAT

Merupakan substansi materi dan pengayaan wawasan untuk mencapai Standar Kompetensi 2, 4, 5:

2. Mengidentifikasi berbagai metode bioremediasi dan aplikasinya dalam pembangunan berkelanjutan.
4. Mampu mengaplikasikan aktivitas mikroba dalam teknologi bioremediasi.
5. Mengevaluasi kegiatan berkaitan aplikasi bioremediasi untuk pembangunan berkelanjutan.

Kompetensi Dasar 7, 8, 9, 10:

7. Menganalisis fitoremediasi
8. Mengkaji peranan tumbuhan air sebagai fitoremediator pencemar
9. Mengkaji Efek Fitoremediasi Terhadap Gizi Pangan
10. Mengaplikasikan Teknologi Bioproses

B. Kegiatan Pembelajaran:

Didasarkan pada materi yang telah dijelaskan pada topik bab-bab sebelumnya, silahkan Sdr. buat: model dan teknologi tepat guna manajemen budidaya, pemanfaatan, dan pengolahan bahan pangan tercemar logam berat, dengan menganalisis sebagai berikut: A. Kondisi ideal (kondisi ideal lingkungan, sebaiknya bagaimana? ; B. Keadaan realita di lapang (karena faktor dan pengaruh lingkungan tertentu, apa saja yang terlibat, silahkan ditunjukkan dan dianalisis mengapa demikian?, menjadi tidak dapat memerankan/menampilkan kondisi ideal); C. Solusi

penyelesaian masalah untuk merespons realita di lapang (tunjukkan beerapa alternatif yang dapat ditawarkan sebagai solusi, sehingga kembali bisa memerankan fungsinya, dan sistem kembali normal/ideal).

Model dapat dibuat dalam bentuk diagram alir atau secacamanya, yang dilengkapi gambar-gambar atau sesuai kreativitas Sdr. sehingga ditemukan solusi penanganan cemaran logam berat dari efek bioremediasi oleh biota yang berpotensi sebagai bahan pangan. Selamat berkreasi dan memberi manfaat bagi semuanya.

BAB VII PENUTUP

Kajian kemampuan tumbuhan sebagai solusi masalah lingkungan khususnya pencemaran logam berat, dapat mendatangkan masalah baru bagi manusia, apabila kemampuan tersebut dilakukan oleh tumbuhan yang dikonsumsi. Terlebih lagi dalam lingkungan, logam dapat terdistribusi, berinteraksi dengan semua unsur lingkungan baik biotik maupun abiotik, yang pada akhirnya proses-proses tersebut berpeluang dalam bioakumulasi, biotransformasi, dan biomagnifikasi. Oleh karena itu diperlukan kearifan manusia dalam memanfaatkan fitoteknologi. Kajian mengenai Manajemen Budidaya dan Pengolahan untuk Mempertahankan Mutu Sayuran Tercemar Logam Berat, yang merupakan dampak fitotemediator pada tanaman yang dikonsumsi menemukan kesimpulan dan saran sebagai berikut. Berdasarkan pada analisis kajian teori dan penelitian-penelitian yang dilakukan, diperoleh hasil dengan kesimpulan sebagai berikut.

A. Kesimpulan:

1. Tumbuhan dapat dimanfaatkan untuk menyelesaikan masalah lingkungan khususnya pencemaran, di antaranya karena kemampuannya dalam menyerap, mengambil, mengubah pencemar, dan melepaskan kontaminan dari suatu medium ke medium lainnya;
2. Kemampuan tumbuhan sebagai bio/fitoremediator dapat mendatangkan pengaruh negatif apabila proses tersebut dilakukan oleh tumbuhan yang dikonsumsi, sayuran misalnya;
3. Logam berat yang terserap tanaman sayuran berpengaruh menurunkan kadar protein, vitamin A, dan vitamin C sayuran air. Oleh karena itu, tidak disarankan mengkonsumsi sayuran yang ada di lingkungan tercemar.
4. Manajemen yang benar dalam produksi dan konsumsi sayuran yang hidup di lingkungan tercemar logam berat dapat menjadi langkah antisipasi dampak logam berat pencemar, yaitu dengan cara:
 - a. Memanen sayuran dengan tidak ditunda, lebih awal dipanen lebih baik untuk menghindari lebih banyak

- akumulasi logam berat, serta penurunan vitamin A dan vitamin C dalam sayuran ;
- b. Memanfaatkan bagian daun sayuran, karena akumulasi logam berat lebih rendah daripada bagian batang, serta kadar vitamin A dan vitamin C-nya lebih banyak;
 - c. Melakukan regenerasi yaitu peremajaan tanaman sayuran secara rutin untuk mencegah akumulasi logam berat yang lebih besar, di antaranya dengan pemangkasan, maupun penanaman kembali;
 - d. Mencermati perubahan warna hijau pada batang dan daun sayuran. Logam berat akan merusak struktur kloroplas, sehingga tanaman sayuran akan mengalami klorosis, yang ditunjukkan oleh batang dan daunnya yang menguning. Pada pertumbuhan batang dan daun siap konsumsi dengan skala warna hijau kurang dari 5,5 perlu untuk dicurigai kemungkinan adanya akumulasi logam berat;
 - e. Mencuci secara cermat dan berulang kali untuk mengurangi/menghilangkan bahan pencemar yang menempel di permukaan jaringan sayuran;
 - f. Mencuci tidak akan mengurangi kadar gizi sayuran, sehingga untuk mendapatkan sayuran sehat, apalagi dari lingkungan tercemar, mutlak harus dicuci terlebih dahulu sebelum diolah/dimasak, untuk menjamin kebersihannya serta mengurangi/ menghilangkan kontaminan yang menempel di permukaan bahan pangan;
 - g. Sayuran segar tanpa diolah/dimasak memiliki nilai/kadar gizi tertinggi. Tetapi sayuran dari lingkungan tercemar perlu diolah agar logam berat pencemar yang sudah terlanjur terserap/terakumulasi dapat dilepas dari ikatan dalam jaringannya sehingga polutannya dapat diminimalisir. Urutan pengolahan dengan pemasakan tertinggi sampai paling kurang, menurunkan kadar polutan logam berat adalah dengan menumis, merebus, mengukus.
 - h. Pengolahan yang terbaik dalam mempertahankan kadar gizi sayuran terbaik adalah dengan mengukus. Berturut-turut selanjutnya yang dapat menurunkan gizinya adalah dengan direbus, terlebih lagi dengan ditumis.

- i. Manajemen pengelolaan bahan pangan sayuran tercemar logam berat melalui variasi pencucian dan pengolahan/pemasakan menunjukkan hasil sama efektif dengan bahan pangan hewani keongmas dan kerang kijang, secara sangat signifikan menurunkan logam berat Cd, Pb. Semakin banyak kali dicuci semakin besar penurunannya. Mengolah berturut-turut terbesar menurunkan logam berat adalah dengan direbus, selanjutnya menumis, dan terakhir mengukus. Logam berat tanpa dicuci dan diolah, kadarnya relatif masih tinggi. Dengan dicuci saja logam berat Cd dapat menurun sampai 28,509%, Pb 6,353%, sedangkan dengan diolah dapat mengalami penurunan sampai 45,759% pada Cd, dan pada Pb 44,391%. Sedangkan pada bahan pangan nabati, pencucian menurunkan sampai 45,521% Cd, 37,531% Pb. Dengan pengolahan dapat menurunkan sampai 67,086% Cd, 62,282% Pb. Pada pangan nabati penurunan logam berat tertinggi dengan cara ditumis, sedang pada bahan pangan hewani penurunan tertinggi dengan cara merebus.
- j. Karena serapan logam berat masih sangat rendah dan di bawah ambang batas, maka untuk menurunkan kadar logam berat pencemar dan tetap mempertahankan kadar gizinya, lebih tepat sebelum bahan pangan berpotensi bioremediator akan dikonsumsi, maka dicuci terlebih dahulu pada air mengalir, dan diolah dengan cara dikukus, sehingga logam berat sudah mengalami penurunan dan kadar gizinya masih bisa dipertahankan.

B. Saran:

1. Tanaman sayuran memiliki potensi sebagai fitoremediator yang baik. Oleh karena itu tanaman sayuran yang hidup di lingkungan tercemar tidak disarankan untuk dikonsumsi, karena dimungkinkan telah terjadi akumulasi pencemar logam berat yang tinggi, dan kadar gizinya, khususnya vitamin A dan vitamin C-nya telah menurun/berkurang;

2. Karena lingkungan yang bebas pencemar logam berat saat ini sulit ditemukan, langkah antisipasi dengan cara memperhatikan waktu panen, bagian organ sayuran yang dikonsumsi, regenerasi bertahap di antaranya dengan memangkas, dan pemerataan warna hijau pada batang dan daun sayuran dapat diikuti. Sayuran di lingkungan tercemar yang dipanen tidak melebihi waktu kebiasaan dipanen, masih menyediakan vitamin A dan vitamin C dengan kadar mencukupi kebutuhan orang dewasa.
3. Mencuci cermat sayuran sebelum dikonsumsi dan mengolah/memasak secara tepat adalah langkah untuk menurunkan polutan dan mempertahankan kadar/mutu gizi sayuran.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z. 1984. *Dasar Pengetahuan Ilmu Tanaman*. Bandung: Penerbit Angkasa Bandung.
- Ahluwalia, S.S., Goyal, D. 2007. Microbial and Plant Derived Biomass for Removal of Heavy Metals from Wastewater. *Biores. Technol.* 98: 2243-2257.
- Alabaster, J.S. & Lloyd, R. 1980. *Water Quality Criteria for Freshwater Fish*. London: Butterworths.
- Ali, M.B., Vajpayee, P., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Singh, S.N. 2003. Phytoremediation of Lead, Nickel and Copper by *Salix acmophylla* Boiss.: Role of Antioxidant Substances. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 70: 462-469.
- Alloway, B.J. 1990. *Heavy Metals Soil*. New York: Jhon Willey and Sons Inc.
- Bryan, G.W. 1976a. *Heavy Metal Contamination in the Sea. Marine Pollution*. London: Academic Press.
- Bryan, G.W. 1976b. *Some Aspects of Heavy Metal Tolerance in Aquatic Organisms. Effects of Pollutants on Aquatic Organisms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bryan, G.W. & Hammerstone, L.G. 1973. Adaption of the Polychaeta *Nereis discolor* to Estuarine Sediments Containing High Concentrations of Zinc and Cadmium. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 53, 839.
- Buchaver, M. J. 1973. Contamination Soil and Vegetation Near Zinc Smelter by Zinc, Cadmium, Copper and Lead. *Environ. Science and Technol.* 7: 131-135.
- Callahan, M.A., Slimak, M.W, Gabel, N.W., May, I.P. 1979. Water-Related Environmental Fate of 129 Priority Pollutants. Vol. 1: Introduction and Technical Background, Metals and inorganics, Pesticides and PCB's. EPA-440/4-79-029A.
- Charlena. 2004. *Pencemaran Logam Berat Pb dan Cd pada Sayur-Sayuran*. Program Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Cobbet, C. & Goldsbrough, P. 2002. Phytochelatins and Metallothioneins: Role in Heavy Metal Detoxification and Homeostasis. *Annu. Rev. Plant Biol.* 53: 159-182.

- Connell, Des. W. & Miller, G.J. *Kimia dan Ekotoksikologi Pencemaran*. Terjemahan oleh Yanti Koestoer. 2006. Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press).
- Cyber Forums-Indonesian Cyber Community Kerja Antioksidan di Tubuh, (Online), (<http://www.cyberforums.us>). Diakses 23 April 2009 06:03:38 GMT).
- Dahlia. 2006. *Efektivitas Bioakumulasi Tanaman Sayuran Pengikat Logam Berat dan Upaya Pemberdayaan Masyarakat*. Disertasi. Tidak dipublikasikan. Jurusan Pendidikan Biologi. Pascasarjana. Malang: Universitas Negeri Malang.
- De Vos, C.H.R., Vonk, M.J., Vooijs, H., Schat, H. 1992. Glutathione Depletion Due to Copper-Induced Phytochelatatin Synthesis Causes Oxidative Stress in *Silene cucubalus*. *Plant Physiol.* 98: 853-858.
- Forstner, U. 1979. *Metal Transfer Between Solid and Aqueous Phases. Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Berlin: Springer-Verlag.
- Haghiri, F. 1973. Cadmium Uptake by Plants. *J. Environ. Qual.* 2: 92-96.
- Jenkins, D. 1980a. Biological Monitoring of Toxic Trace Metals. Vol. 1. Biological Monitoring and Surveillance. *National Technical Informations Service PB81-103475*.
- Jenkins, D. 1980b. Biological Monitoring of Toxic Trace Metals. Vol. 2. Toxic Trace Metals in Plants and Animals of the World. *National Technical Informations Service PB81-103483*.
- Juhaety, T., Syarif, F., Hidayati, N. 2004. Inventarisasi Tumbuhan Potensial untuk Fitoremediasi Lahan dan air Terdegradasi Penambangan Emas (Inventarization of Potensial Plant for Phytoremediation on degraded Land and Water Mined. *Biodiversitas*. Vol. 6 Nomor 1. Halaman 31-33.
- Kovacs, M. 1992. *Biological Indicators in Environmental Protection*. Market Cross House. England.
- Kurnia, U., Kurniawansyah, A.M, Sukristiyonubowo, & Subowo. 1999. Pengaruh Logam Berat Pb dalam Tanah terhadap Kandungan Pb, Pertumbuhan dan Hasil Tanam Caisem (*Brassica rapa*). *Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Tanah, Iklim dan Pupuk*. Puspittanak, Bogor.

- Linder, M. C. 1992. *Biokimia; Nutrisi dan Metabolisme*. Department of Chemistry, California State University. Fullerton, CA 92634.
- Liu Y-J.; Zhu Y-G.; Ding H. 2007. *Lead and Cadmium in Leaves of Deciduous Trees in Beijing, China*.
- Mangkoedihardjo, S. 2008. *Integritas Fitoteknologi dalam Sanitasi Lingkungan untuk Pembangunan Berkelanjutan*. Departemen Pendidikan Nasional: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mangkoedihardjo, S. & Samudro, G. 2010. *Fitoteknologi Terapan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Mendelssohn, I.A., McKee, K.L., Kong, T. 2001. A Comparison of Physiological Indicators of Sublethal Cadmium Stress in Wetland Plants. *Environ. Exp. Bot.* 46: 263-275.
- Mukono, H.J. 2002. *Epidemiologi Lingkungan*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Munzuroglu, O., Obek, E., Karatas, F. & Tatar, S. Y. 2005. Effects of Simulated Acid Rain on Vitamin A, E, and C in Strawberry (*Fragaria vesca*). *Pakistan Journal of Nutrition* 4(6): 402-406.
- Nieboer, E. & Richardson, D.H.S. 1980. The Replacement of the Nondescript Term "Heavy Metals" by a Biologically and Chemically Significant Classification of Metal Ions. *Environ. Pollut. Ser. B.* 1, 3.
- Palar, H. 2004. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Panda, S.K. & Choudhury, S. 2005. Chromium Stress in Plants. *Braz. J. Plant. Physiol.* 17: 95-102.
- Patra M.; Bhowmik N.; Bandyopadhyay, B.; Sharma A. 2004. Comparison of Mercury, Lead and Arsenic with Respect to Genotoxic Effect on Plant System and the Development of Genetic Tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 52: 199-223.
- Peer, W.A., Baxter, Ivan, R., Richards, Elizabeth, L., Freeman, John, L., Murphy, Angus, S. 2003. *Phytoremediation and Hyperaccumulator Plants*. Center for Phytoremediation, Purdue University, West Lafayette, IN 47907 USA.
- Phillips, D.J.H. 1977. The Use of Biological Indicator Organisms to Monitor Trace Metal Pollution in Marine and Estuarine Environments. A Review, *Environ. Pollut.* 13, 281.

- Phillips, D.J.H. 1980. *Quantitative Aquatic Biological Indicators*. London: Applied Science Publishers.
- Porebska, G & Ostrowska, A. 1999. Heavy Metal Accumulation in Wild Plants: Implications for Phytoremediation, *Polish Journal of Environmental Studies* Vol. 8, No. 6 (1999): 433-442.
- Prasad, M.N.V & Freitas, H.M.O. 2003. Metal Hyperaccumulation in Plants-Biodiversity Prospecting for Phytoremediation Technology. *Electr. J. Biotechnol.* 6: 285-321.
- Prosi, F. 1979. *Heavy Metals in Aquatic Organisms. Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Berlin: Springer-Verlag.
- Raharjo, S. 2008. Berbagai Pangan di Indonesia Belum Aman dari Bahan Berbahaya. (Online). (<http://Kmit.faperta.uqm.ac.id>). Diakses tanggal 09 Mei 2009 17:25.
- Redaksi Trubus. 2008. *Bertanam Sayuran di Lahan Sempit*. Seri Agrihobi. Cetakan XII. Jakarta: Penebar Swadaya.
- Rubatzky, V.E. & Yamaguchi, M. 1998. *Sayuran Dunia 1: Prinsip, Produksi, dan Gizi*. Penerbit: ITB Bandung.
- Schutzendubel, A. & Polle, A. 2002. Plant Responses to Abiotic Stresses: Heavy Metal-Induced Oxidative Stress and Protection by Mycorrhization. *J. Exp. Bot.* 53: 1351-1365.
- Sharma, P. & Dubey, R.S. 2005. Lead Toxicity in Plant. *Braz. J. Plant. Physiol.* 17: 35-52.
- Souza, V.L. 2007. Expressao Genica, Respostas Morfo-Fisiologicas e Morte Cellular Induzidas por Cadmio em *Genipa americana* L. (Rubiaceae). Ilheus. University Estadual de Santa Cruz. M.Sc. *Dissertation*.
- Surtikanti, H.K. 2009. *Toksikologi Lingkungan*. Bandung: Prisma Press.
- Tuminah, S. 2000. Radikal Bebas dan Anti Oksidan-Kaitannya dengan Nutrisi dan Penyakit Kronis. Pusat Penelitian Penyakit Tidak Menular. Badan Penelitian dan Pengembangan Kesehatan. Departemen Kesehatan RI Jakarta. *Cermin Dunia Kedokteran* (128): 49-51.
- Vassilev, A., Vangronsveld, J., Yordanov, I. 2002. Cadmium Phytoextraction: Present State, Biological Backgrounds and Research Needs. *Bulg. J. Plant Physiol.* 28: 68-95.

- Ward, T.J. & Young, P.C. 1982 Effects of Sediment Trace Metals and Particle Size on the Community Structure of Epibenthic Seagrass Fauna Near a Lead Smelter, South Australia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 9, 137.
- Weis, J.S. & Weis, P. 2004. Metal Uptake, Transport and Release by Wetland Plants: Implications for Phytoremediation and Restoration. *Environ. Int.* 30: 685-700.
- Widowati, H. 2000. Peranan Tumbuhan Air Sebagai Bioremediator Pencemaran Akibat Kegiatan Industri Batik. *Tesis: Ilmu Lingkungan, Pascasarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.*
- Widowati, H. 2009a. Pengaruh Logam Berat terhadap Protein dan Vitamin Sayuran Air. Artikel Ilmiah. *Jurnal Bioedukasi.* Universitas Negeri Jember. Volume VII (1): 47-55. April 2009.
- Widowati, H. 2009b. Studi Kemampuan Tumbuhan Air sebagai Fitoremediator Pencemaran untuk Model Pembelajaran Biologi Lingkungan yang Kontekstual pada Sekolah Hijau. Prosiding Seminar Nasional: Pendidikan untuk Pembangunan Berkelanjutan. Pusat Penelitian Lingkungan Hidup. Lembaga Penelitian Universitas Negeri Malang Bekerjasama dengan Badan Kerjasama Pusat Studi Lingkungan (BKPSL) Se Indonesia. 20 Juni 2009.
- Widowati, H. 2009c. Dampak Akumulasi Logam Berat Limbah Cair terhadap Nilai Gizi Sayuran Air dan Upaya Perlindungan Konsumen. *Prosiding Seminar Nasional: Biologi, Ilmu Lingkungan dan Pembelajarannya.* Pendidikan Biologi FPMIPA Universitas Negeri Yogyakarta. 4 Juli 2009.
- Widowati, H. 2009d. Potensi Logam Berat dalam Menurunkan Gizi Sayuran Air. Artikel Ilmiah. *Majalah Ilmiah Mentari Lembayung* . Universitas Muhammadiyah Metro. Volume 13(2): 81-87. Nopember 2009.
- Widowati, H. 2010. Pengaruh Logam Berat *Pb* terhadap Vitamin Sayuran Air. *Makalah Seminar Nasional Biologi dan Pembelajarannya* . Universitas Negeri Yogyakarta. Artikel Ilmiah. Universitas Negeri Jember. 3 Juli 2010.
- Widowati, H. 2010. Pengaruh Logam Berat *Cd* terhadap Vitamin A dan Vitamin C Sayuran Air. *Makalah Seminar Internasional Biologiteknologi. Biotechnology & 5th KBI Congress.* Artikel Ilmiah. Universitas Muhammadiyah Malang. 27-30 Juli 2010

- Widowati, H. 2010. Pengaruh Akumulasi Logam Berat terhadap Protein dan Vitamin Sayuran Air serta Pemanfaatannya untuk Penyusunan Bahan Bacaan Efek Fitoremediasi. *Disertasi*. Pascasarjana Universitas Negeri Malang. Tidak Dipublikasikan.
- Widowati, Hening. 2011. *Manajemen Sayuran untuk Antisipasi Dampak Logam Berat Pencemar*. Malang: UMMPress. ISBN: 978-979-796-192-0.
- Widowati, Hening. 2012. The Influence of Cadmium Heavy Metal on Vitamins in Aquatic Vegetables. *Makara Seri Sains Volume 16. April 2012. Nomor 1*. ISSN 1693-6671.
- Widowati, Hening. 2015a. Alternatif Model Budidaya Sayuran untuk Perlindungan Konsumen terhadap Logam Berat. *Makalah Seminar Nasional Symbion Symposium Pendidikan Biologi Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta: 4-5 April 2015*.
- Widowati, Hening; Kartika Sari; Widya Sartika Sulistiani. 2015b. Model Manajemen Budidaya Sayuran untuk Perlindungan Konsumen terhadap Pencemaran Logam Berat. *Laporan Akhir Tahun I Penelitian Hibah Bersaing*. Universitas Muhammadiyah Metro.
- Widowati, Hening; Kartika Sari; Widya Sartika Sulistiani. 2015c. Profil Logam Berat Cd, Cr(VI), dan Pb pada Lokasi Berbeda di Provinsi Lampung serta Bioakumulasinya pada Tanaman Pangan. *Bioedukasi Jurnal Pendidikan Biologi FKIP UM Metro. Volume 6 No. 2 Nopember 2015*. E ISSN 2442-9805 p ISSN 2086-4701. Universitas Muhammadiyah Metro.
- Widowati, Hening; Kartika Sari; Widya Sartika Sulistiani. 2015d. Pengaruh Lokasi yang Diprediksi sebagai Sumber Pencemar terhadap Serapan Logam Berat pada Bagian Sayuran dan Buah. *Prosiding Seminar Nasional: Transformasi Nilai-Nilai Islam dalam Meningkatkan SDM Bangsa Indonesia. 25 Nopember 2015*. ISBN 978-602-74135-0-4. Universitas Muhammadiyah Metro.
- Widowati, H; Kartika Sari; Widya Sartika Sulistiani. 2015e. Model Manajemen Budidaya Sayuran untuk Perlindungan Konsumen terhadap Pencemaran Logam Berat. *Laporan Akhir Penelitian Hibah Bersaing Tahun I*. Didanai

Kementerian Ristek Dikti. Metro: Universitas Muhammadiyah Metro.

- Widowati, Hening; Kartika Sari; Widya Sartika Sulistiani. 2015f. Pengaruh Lokasi yang Diprediksi sebagai Sumber Pencemar terhadap Serapan Logam Berat pada Bagian Sayuran dan Buah. *Prosiding Seminar Nasional: Transformasi Nilai-Nilai Islam dalam Meningkatkan SDM Bangsa Indonesia. 25 Nopember 2015. ISBN 978-602-74135-0-4.* Universitas Muhammadiyah Metro.
- Widowati, Hening; Kartika Sari; Widya Sartika Sulistiani. 2016. Model Manajemen Budidaya Sayuran untuk Perlindungan Konsumen terhadap Pencemaran Logam Berat. *Laporan Akhir Tahun II Penelitian Hibah Bersaing.* Universitas Muhammadiyah Metro.
- Widowati, Hening. 2017. Alternatif Solusi Penanggulangan Sayuran Tercemar Logam Berat untuk Aman Konsumsi. *Prosiding Konferensi Nasional Ke-5. Asosiasi Program Pascasarjana Perguruan Tinggi Muhammadiyah (APPPTM) di Universitas Muhammadiyah Sidoarjo Jawa Timur. Volume 3. 1 Maret 2017. Halm. 141-148.* ISBN: 978-602-19568-5-4. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Penerbit PPs UMY.
- Widowati, Hening; Widya Sartika Sulistiani; Agus Sutanto. 2017. Manajemen Budidaya dan Pengolahan untuk Mempertahankan Mutu Sayuran. *Laporan Akhir Tahun I Penelitian Produk Terapan.* LPPM. Universitas Muhammadiyah Metro.
- Widowati, Hening; Widya Sartika Sulistiani; Agus Sutanto. 2017. *Manajemen Budidaya Sayuran untuk Perlindungan Konsumen terhadap Cemaran Logam Berat.* Metro: Lembaga Penelitian Universitas Muhammadiyah Metro Press. ISBN: 978-602-74135-4-2.
- Widowati, Hening; Widya Sartika Sulistiani; Agus Sutanto. 2018. Manajemen Budidaya dan Pengolahan untuk Mempertahankan Mutu Sayuran. *Laporan Akhir Tahun II Penelitian Produk Terapan.* LPPM. Universitas Muhammadiyah Metro.
- Widowati, Wahyu; Astiana Sastiono; Rymond Jusuf Rumampuk. 2008. *Efek Toksikologi Logam. Pencegahan dan*

- Penanggulangan Pencemaran*. Yogyakarta: CV Andi Offset.
- Winarno, F.G. 2004. *Kimia Pangan dan Gizi*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Wirakartakusumah, M.A. 1994. Pangan & Gizi: Rekayasa Proses Menghadapi Tantangan Masa Depan Industri Pangan Indonesia. *Naskah Orasi Ilmiah Guru Besar*. Jurusan Teknologi Pangan dan Gizi. Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor. 10 September 1994
- Wolverton, B.J. & McDonald, R.J. 1979. *Water Hyacinth and Alligator for Removal of Lead and Mercury from Polluted Water*. NASA Tech. Memorandum, T. M-X-72723.
- Wyeth. 2009. Antioksidan: Pentingnya Anti Oksidan, Zat Antioksidan dan Radikal Bebas. (Online), (<http://www.eyethindonesia.com>). Diakses 23 April 2009 19:08:08 GMT)
- Xiong, T. 1997. Lead Uptake and Effects on Seed Germination and Plant Growth in a Pb Hyperaccumulator *Brassica pekinensis* Rupr. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 60: 285.

KATA-KATA PENTING/GLOSARIUM

- adaptasi : Proses penyesuaian diri terhadap sesuatu oleh makhluk hidup untuk tetap dapat bertahan dari pengaruh tertentu atau proses modifikasi yang dilewati makhluk hidup sehingga berfungsi lebih baik lagi pada suatu lingkungan.
- adisi : Efek kombinasi dua atau lebih zat beracun yang hasilnya sama dengan jumlah efek masing-masing zat itu.
- adsorption : Kemampuan yang dimiliki oleh suatu jaringan atau membran untuk menyerap senyawa asing ke bagian sebelah dalam.
- akumulasi : Peristiwa penunpukan logam-logam berat dan senyawa kimia beracun lainnya yang terjadi dalam tubuh organisme hidup termasuk manusia.
- alloy : Suatu bentuk persenyawaan padat yang dibentuk oleh suatu logam dengan satu atau lebih logam lainnya.
- ambang batas : Batas maksimum atas suatu parameter yang diperbolehkan /dijijinkan dari suatu ketentuan /keputusan pemerintah.
- antagonis : Berkurangnya daya racun yang dimiliki oleh suatu logam berat akibat yang ditimbulkan dari persenyawaan dengan logam lainnya; efek kombinasi dua atau lebih zat beracun yang hasilnya kurang dari jumlah efek masing-masing zat beracun.

- antioksidan : Zat yang dapat menghilangkan efek negatif radikal bebas prooksidan dengan memberikan elektron kepada radikal bebas sehingga menjadi tidak radikal lagi.
- bioavailable : Tidak dapat diserap oleh biota.
- biokatalisator : Senyawa-senyawa kimia yang dapat digunakan untuk mengkatalisis /memacu senyawa-senyawa lain dalam proses metabolisme tubuh (contoh: enzim).
- biomagnifikasi : Kemampuan yang dimiliki oleh biota untuk meningkatkan konsentrasi bahan pencemar baik dalam bentuk logam berat maupun persenyawaan kimia beracun lainnya dalam lingkungan perairan, dimana biota-biota tersebut hidup.
- biota : Semua makhluk yang ada, hidup, serta melakukan semua aktivitas kehidupannya dalam suatu ekosistem.
- biotransformasi : Semua bentuk transformasi atau pengiriman zat atau material dalam tubuh yang terjadi selama berlangsungnya proses fisiologis tubuh atau proses metabolisme tubuh; perubahan zat beracun oleh makhluk hidup.
- BOD : *Biological Oxygen Demand*/Kebutuhan Oksigen Biologi, yaitu kebutuhan oksigen yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk melangsungkan reaksi oksidasi senyawa-senyawa organik yang terlarut secara biokimiawi

- COD : *Chemical Oxygen Demand*/Kebutuhan Oksigen, yaitu kebutuhan oksigen yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk melangsungkan reaksi oksidasi senyawa-senyawa organik yang terlarut secara kimia.
- degradasi rhizosfer : Penguraian enzimatik polutan organik, dengan melibatkan aktivitas enzimatik mikrobial.
- detoksifikasi : Proses hilangnya sifat beracun suatu zat beracun melalui jalan biokimia atau proses lain.
- ekotoksikologi : Suatu kajian studi tentang efek dari polutan terhadap lingkungan hidup.
- enzim : Protein yang dihasilkan oleh sel hidup, yang mempengaruhi reaksi kimia dalam tubuh makhluk hidup, tanpa mengalami perubahan; katalisator aktivitas organisme. Mudah sekali rusak oleh pengaruh logam berat.
- fitodegradasi/
fitolignifikasi/
fitotransformasi : Penggunaan mikroorganisme untuk menguraikan polutan organik; penguraian kontaminan yang terserap melalui proses metabolik dalam tumbuhan.
- fitoekstraksi/
fitoakumulasi/
fitoabsorpsi/
fitoserapan : Fitroekstraksi melibatkan penghilangan toksin, terutama logam berat dan metaloid, dengan menggunakan akar tanaman yang melakukan transpor berikutnya ke organ tanaman aerial; proses penyerapan kontaminan dari medium tumbuh, selanjutnya terdistribusi/ditranslokasikan.
- fitofiltrasi/
fitoimobilisasi : Proses adsorpsi atau presipitasi kontaminan pada akar/penyerapan ke

- dalam akar.
- fitoremediasi : Sekelompok teknologi yang menggunakan tanaman sebagai alat untuk mengurangi, meniadakan, menurunkan atau melakukan imobilisasi toksin lingkungan, terutama toksin-toksin yang berasal dari antropogenis, dengan tujuan untuk memulihkan tempat kawasan-kawasan tertentu sehingga tercipta kondisi lingkungan yang bisa digunakan untuk keperluan pribadi maupun umum.
- fitoremediator : Tumbuhan yang berperan/mempunyai kemampuan dalam memperbaiki kondisi lahan yang terkontaminasi pencemar.
- fitorestorasi : Proses remediasi yang lengkap atas tanah yang terkontaminasi agar tanah tersebut bisa berfungsi secara penuh.
- Fitostabilisasi/
inaktivasi
tempat/
hiper
akumulasi : Proses akumulasi oleh akar tanaman atau pengendapan di tanah oleh akar mengurangi kontaminan tanah dan menyebabkan kontaminan tanah tersebut tidak bisa berpindah-pindah ke tempat lain; proses imobilisasi kontaminan dalam tanah.
- fitoteknologi : Penerapan ilmu dan teknologi untuk mengkaji dan menyiapkan solusi masalah lingkungan dengan menggunakan tumbuhan.
- fitovolatilisasi : Proses pelepasan kontaminan ke udara/menguapkan polutan setelah terserap tumbuha. Kontaminan yang bisa larut diambil menggunakan air oleh akar, ditranspor ke daun dan divolatilisasikan ke atmosfer melalui stomata.
- fungisida : Pestisida yang khusus digunakan untuk memberantas dan menghalangi serangan jamur pada tanaman pertanian.
- GSH-Px : Glutathion peroksidase, yaitu enzim antioksidan yang mengandung Selenium

- yang penting dalam mengurangi hydrogen peroksidase.
- hepatic cirrhosis* : Sering dikenal dengan penyakit Wilson, yaitu kerusakan pada otak, demyelinase, penurunan kerja ginjal, pengendapan *Cu* di kornea.
Penyakit lain karena akumulasi logam berat *Cu* yang berlebihan adalah penyakit Kinsky, yaitu terbentuknya rambut yang kaku dan kemerahan.
- herbisida : Suatu bahan kimia racun untuk membasmi gulma/tumbuhan pengganggu
- inhibitor : Suatu zat atau unsur atau senyawa yang mampu untuk menghalangi kerja enzim.
- inseksitida : Pestisida yang khusus digunakan untuk memberantas serangga.
- iritatif : Suatu sifat yang dimiliki oleh debu, uap, atau lainnya yang berasal dari senyawa kimia yang mampu mengakibatkan terjadinya perlukaan pada saluran pernafasan makhluk hidup.
- karsinogen : Kemampuan yang dimiliki oleh suatu senyawa kimia untuk merangsang pertumbuhan sel-sel secara liar sehingga menimbulkan kanker/pemicu kanker.
- katalase : Enzim yang mengkatalisis dekomposisi hydrogen peroksidase.
- keracunan akut : Keracunan yang terjadi dalam waktu yang singkat atau seketika, dapat terjadi karena keracunan dalam dosis tinggi dan atau akibat daya tahan tubuh penerima racun yang rendah.
- keracunan kronis : Keracunan yang terjadi akibat telah terjadinya penumpukan bahan racun dalam tubuh dan telah berlangsung dalam waktu yang sangat lama, sehingga tubuh tidak lagi mampu menetralsir racun.
- kloroplas : Suatu benda yang terdapat dalam sel yang menjadi tempat terjadinya proses

- fotosintesis.
- klorofil : Pigmen/zat warna yang memberi ciri warna hijau pada daun yang terdapat dalam kloroplas. Semua bentuk klorofil mengandung porphyrin yang sama, dengan kandungan 4 pyrole ring yang digabungkan oleh atom-atom nitrogen dengan magnesium.
- klorofil a : Pigmen/zat warna hijau daun yang terdapat dalam kloroplas, yang mempunyai methyl group pada ring tiga. Pada tumbuhan berderajat tinggi, perbandingan klorofil a:klorofil b adalah 2,5-3,5:1.
- klorofil b : Pigmen/zat warna hijau daun yang terdapat dalam kloroplas, yang mempunyai suatu gugusan aldehyd, sehingga bersifat lebih hidrofilik. Pada tumbuhan terlindung, proporsi klorofil b lebih besar dibanding pada tumbuhan pada tumbuhan terbuka.
- limbah : Semua kotoran dan atau bahan sisa yang tidak berguna (sampah) dan biasanya dibuang ke lingkungan.
- limbah domestik : Semua bentuk bahan sisa atau bahan buangan yang berasal dari aktivitas rumah tangga.
- limbah industri : Semua bentuk bahan sisa atau bahan buangan yang merupakan hasil samping dari proses kerja perindustrian dan tidak lagi berguna.
- metabolisme : Suatu proses kehidupan yang terjadi di dalam tubuh makhluk hidup, dimana merupakan rangkaian reaksi kimia yang dibedakan atas anabolisme (proses penyusunan/sintesis), dan reaksi katabolisme (pembongkaran).
- metalloprotein : Molekul-molekul protein yang mempunyai gugus metal/ logam.
- moluskisida : Bahan kimia racun mengandung bahan

- aktif *fentin asetat* 60%, berbentuk tepung yang dapat disuspensikan berwarna putih, memberi efek racun lambung untuk mengendalikan berbagai jenis molusca, di antaranya berbagai jenis siput trisipan, siput murbei pada tanaman padi.
- papar/ pajan (terpapar/ pemaparan pestisida) : Suatu bentuk perlakuan atau kejadian yang mengakibatkan masuknya bahan beracun ke dalam tubuh.
- polusi : Senyawa kimia beracun yang dibuat untuk memberantas hama tanaman pertanian, di antaranya tikus
- polusi : Suatu keadaan tercemar yang terjadi dalam suatu tatanan lingkungan.
- polutan : Semua bahan dan atau zat yang dapat mengakibatkan terjadinya polusi, atau dengan istilah lain sebagai "pencemar"
- prooksidan : Radikal bebas yang dapat merusak bagian sel-sel organisme utamanya protein dan enzim sehingga merusak sistem fisiologis tubuh dan berakibat munculnya berbagai penyakit. Dapat dinetralisir sifat radikalnya dengan suatu zat antioksidan, di antaranya vitamin A, C, E.
- radikal bebas : Molekul yang mempunyai atom dengan electron yang tidak berpasangan, tidak stabil, reaktivitas tinggi; jika tidak diinaktivasi reaktivitasnya dapat merusak seluruh tipe makromolekul seluler termasuk karbohidrat, lipid, asam nukleat; bersifat karsinogen.
- representatif : Sesuatu yang dapat mewakili hal lain yang diinginkan atau dituju.
- rhizofiltrasi : Istilah lainnya adalah fitofiltrasi/ fitoimobilisasi. Proses memanfaatkan tanaman dengan menggunakan akarnya untuk menyerap dan mengkonsentrasikan polutan.
- ROS (Reactive) : merupakan radikal bebas, bersifat

Oxygen
Species)

prooksidan; adalah molekul yang mempunyai atom dengan elektron yang tidak berpasangan, tidak stabil dan mempunyai reaktivitas yang tinggi. Jika bebas tidak diinaktivasi, reaktivitasnya dapat merusak seluruh tipe makromolekul seluler, termasuk karbohidrat, lipid, dan asam nukleat. Dapat menyebabkan kerusakan oksidatif terhadap jaringan biologi yang tergantung oleh banyak faktor, termasuk komposisi substrat (misalnya komposisi asam lemak, konsentrasi oksigen). Dampak perusakan pada protein oleh radikal bebas menyebabkan katarak, dampak pada lipid menyebabkan aterosklerosis dan dampak pada *DNA* menyebabkan kanker.

sinergisme : Efek kombinasi dua atau lebih zat yang efeknya lebih kuat daripada jumlah efek masing-masing zat, bila bekerja sendiri-sendiri/tidak bersama-sama

SOD : Superoksida dismutase, yaitu golongan enzim antioksidan yang mendekomposisi katalitik radikal superoksida menjadi hydrogen peroksida dan oksigen.

stres oksidatif : Tekanan oksidatif, adalah spesies yang reaktif terhadap oksigen, seperti superoksida, hidoksida, peroksida oleh karena cekaman logam berat atau radikal bebas lainnya.

toksik : Sifat racun yang dimiliki oleh unsur, senyawa, atau zat-zat, baik alami maupun sintesis/buatan.

toksikan : Setiap zat atau senyawa yang mempunyai kemampuan racun atau bersifat racun terhadap semua organisme hidup.

toksikologi : Suatu studi atau bagian bidang ilmu yang khusus membahas masalah-masalah racun.

- toksisitas : Kemampuan racun yang dimiliki oleh suatu zat, unsur, atau senyawa kimia.
- toleransi : Batas kemampuan organisme untuk menetralkan suatu zat racun yang masuk ke dalam tubuhnya.
- transpirasi : Proses kehilangan air dalam bentuk uap dari jaringan tumbuhan melalui stomata. Transpirasi sangat dipengaruhi luas permukaan daun, suhu lingkungan, jumlah dan distribusi stomata, serta faktor-faktor lain yang memicu absorpsi suatu tumbuhan. Semakin luas daun dan stomata banyak, maka transpirasi akan tinggi, sehingga absorpsi semakin besar, akibatnya pada lingkungan dengan polutan besar, maka yang terserap juga semakin besar.

FITOTEKNOLOGI DAN EFEK FITOREMEDIASI

(BUKU AJAR PENDUKUNG MATA KULIAH BIOREMEDIASI)



Dr. Hening Widowati, M.Si. lahir di Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta, tanggal 24 Mei 1963. Pendidikan formal dasar sampai sarjana stratum 2 dijalani di Yogyakarta. Pendidikan formal stratum 1 dijalani di Pendidikan Biologi IKIP Yogyakarta lulus 1987, sarjana stratum 2 di jurusan Ilmu Lingkungan Pascasarjana Universitas Gadjah Mada lulus tahun 2001, dan stratum 3 di Pendidikan Biologi Pascasarjana Universitas Negeri Malang. Penulis telah banyak melakukan penelitian berkaitan dengan bioremediasi utamanya fitoremediasi pada lingkungan tercemar. Hasil penelitiannya telah banyak dipublikasikan di berbagai seminar nasional maupun internasional, dan telah dikomunikasikan dalam berbagai jurnal ilmiah lokal dan nasional.



Dr. Agus Sutanto, M.Si. lahir di Gunungkidul, 27 Agustus 1962. Pendidikan SD, SMP, SMA ditempuh di Gunungkidul Yogyakarta. Tahun 1987 lulus S1 jurusan Pendidikan Biologi IKIP Karangmalang Yogyakarta. Tahun 2000 lulus S2 Ilmu Lingkungan Universitas Gadjah Mada Yogyakarta dan Tahun 2010 lulus S3 Pendidikan Biologi Program Pascasarjana Universitas Negeri Malang. Mulai tahun 1988 DPK Kopertis Wilayah II Palembang di Pendidikan Biologi Program Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Metro. Buku yang sudah diterbitkan: Bioremediasi Limbah Cair Nanas ISBN 978-979-796-195-4; Nata de Pina dari Limbah Cair Nanas ISBN 978-979-796-194-7, Mikrobiologi Lingkungan ISBN 978-602-74135-2-8, Pupuk Organik (proses ISBN). Paten pertama tentang: Komposisi Bioremediator Penetral pH Polutan Limbah Cair Nanas Sertifikat Paten No.IDP000044452, Paten kedua tentang: Komposisi Bakteri Indigen Pendegradasi Polutan Organik Limbah Cair Nanas Sertifikat paten No. IDP000043727.



Widya Sartika Sulistiani, S.Si., M.Sc. lahir di Bandar Lampung, 5 November 1985. Pendidikan S1 diselesaikan pada tahun 2009 di Universitas Lampung, jurusan Kimia dengan tugas akhir "Analisis Simultan Logam Berat Pb, Cu, Zn, Co, Cr, Mn, Ni, Fe, dan Cd pada Bioindikator Remis (*Eremophyrgus eganensis*) di Sungai Kuripan Lampung Menggunakan ICP-OES". Pendidikan S2 diselesaikan di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta dalam bidang Ilmu Kimia, dengan tugas akhir "Adsorpsi Fe(III) dan Cd(II) pada Polieugenol Tersambung Silang Bisfenol A Diglisidil Eter" pada tahun 2011. Hasil penelitian bersama penulis pertama, telah banyak dipublikasikan di berbagai seminar nasional maupun internasional, dan telah dikomunikasikan dalam berbagai jurnal ilmiah lokal dan nasional.



LPPM UMMetro Press

Jln. Ki Hajar Dewantara
No.116 Iringmulyo
Kota Metro, Lampung
Indonesia



9 786025 271465 >