

**FITOAKUMULASI ION LOGAM Fe(III) DAN Mn(II) OLEH TANAMAN
BAYAM MERAH (*Amaranthus Tricolor* L.) PADA
TANAH TERCEMAR**

PUTRI YUNITA MONIQUE

H311 16 018



**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

**FITOAKUMULASI ION LOGAM Fe(III) DAN Mn(II) OLEH TANAMAN
BAYAM MERAH (*Amaranthus Tricolor* L.) PADA
TANAH TERCEMAR**

*Skripsi ini diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar sarjana sains*

Oleh:

PUTRI YUNITA MONIQUE

H311 16 018



**MAKASSAR
2020**

SKRIPSI

**FITOAKUMULASI ION LOGAM Fe(III) DAN Mn(II) OLEH TANAMAN
BAYAM MERAH (*Amaranthus Tricolor* L.) PADA
TANAH TERCEMAR**

Disusun dan diajukan oleh:

PUTRI YUNITA MONIQUE

H311 16 018

Skripsi ini telah diperiksa dan disetujui oleh:

Pembimbing Utama



Dr. Nursiah La Nafie, M.Sc
NIP. 19580523 198710 2 001

Pembimbing Pertama



Dr. Syarifuddin Liong, M.Si
NIP. 19520505 197403 1 002

Mengetahui
Ketua Program Studi Kimia


Dr. Abd. Karim, M.Si
NIP. 19620710 198803 1002

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Putri Yunita Monique

Nomor Mahasiswa : H31116018

Program Studi : KIMIA

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 27 November 2020



Putri Yunita Monique

PRAKATA



Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi dengan judul “**Fitoakumulasi Ion Logam Fe(III) dan Mn(II) oleh Tanaman Bayam Merah (*Amaranthus Tricolor* L.) pada Tanah Tercemar**”. Shalawat dan salam penulis kirimkan kepada Nabi Muhammad SAW, beserta para sahabat dan keluarga Beliau yang telah memberikan tauladan dalam menjalani kehidupan di dunia dan di akhirat. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, semangat dan doa dari berbagai pihak. Terkhusus kepada kedua orang tua penulis yang senantiasa memberikan kasih sayang, perhatian, dukungan, dan dengan penuh kesabaran, mendidik serta mendoakan penulis untuk menyelesaikan jenjang perkuliahan ini. Terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya penulis ucapkan kepada **Ibu Dr. Nursiah La Nafie, M.Sc** selaku pembimbing utama dan **Bapak Dr. Syarifuddin Liong, M.Si** selaku pembimbing pertama yang selalu mengarahkan, meluangkan waktu dan tenaga dalam membimbing dan memotivasi penulis dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

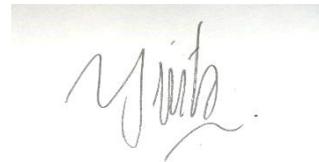
1. **Bapak Dr. Eng. Amiruddin, M.Si.** sebagai Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam serta seluruh staf FMIPA yang telah memberikan fasilitas dan kemudahan dalam rangka penyusunan skripsi ini.

2. **Bapak Dr. Abd. Karim, M.Si.** selaku Ketua Departemen Kimia dan **Ibu Dr. St. Fauziah, M.Si.** selaku Sekretaris Departemen Kimia yang telah memberikan banyak kemudahan dan bantuan kepada penulis dalam menjalani studi dan dalam penyusunan skripsi ini.
3. **Ibu Dr. Rugaiyah A. Arfah, M.Si** dan **Ibu Syadza Firdausiyah, S.Si, M.Sc** selaku Dosen Penguji yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan kritikan dan saran kepada penulis untuk menyempurnakan tulisan ini.
4. Bapak dan Ibu Dosen di lingkungan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam khususnya program studi kimia yang telah membimbing dan memberikan ilmunya kepada penulis.
5. Seluruh staf pegawai dan Analis Laboratorium di Departemen Kimia, terkhusus untuk **Kak Fiby** selaku analis Laboratorium Kimia Analitik atas bantuan serta arahannya selama penelitian berlangsung.
6. **Bapak, mama, kakak, adik** serta segenap **keluarga** yang senantiasa memberikan doa dan dukungan baik moril maupun materi selama menjalani studi dan dalam penyusunan skripsi ini.
7. **Bapak Muhiddin** dan **Ibu Amina** yang senantiasa memberikan doa, dukungan dan motivasi serta selalu bertanya kapan saya menyelesaikan skripsi sehingga bisa wisuda.
8. **Abang** saya yang senantiasa menemani, membantu dan memberikan motivasi selama penelitian dan penyusunan skripsi ini.
9. **Bayam Merah Squad (Fian dan Watsay)** yang setia membantu serta mendukung penulis selama penelitian dan penyusunan skripsi ini.

10. **Manusia Gentayangan (Yusha, Watsay, Filia dan Madya) dan B Aja (Nani, Yuni dan Darwini)** yang senantiasa sabar menemani dan membantu penulis selama menjalani studi dan dalam penyusunan skripsi ini.
11. Seluruh teman-teman seperjuangan **Kimia 2016** dan **Kromofor** yang telah senantiasa sabar menemani dan membantu penulis selama menjalani studi dan dalam penyusunan skripsi ini. memberi warna dalam hari-hari penulis menjadi menyenangkan dan bermakna serta senantiasa membantu penulis dalam penyusunan skripsi ini.
14. Teman-teman **MIPA 2016** yang senantiasa membantu dan memberi motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan penyusunan skripsi ini.
15. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dalam penyelesaian penulisan skripsi ini.

Penulis sadar akan segala kekurangan dalam penulisan skripsi ini, maka penulis sangat menghargai apabila ada kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan tulisan ini. akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Makassar, 20 September 2020



Penulis

ABSTRAK

Limbah ion logam berat Fe(III) dan Mn(II) yang bersumber dari limbah domestik memiliki sifat toksik bila melebihi nilai ambang batas. Pengolahan limbah ion logam Fe dan Mn dapat dilakukan dengan teknik fitoremediasi menggunakan tanaman bayam merah. Kandungan protein dalam bayam merah yang mengandung gugus polar amina (-NH₂), gugus karboksil (-COOH), juga gugus sulfidril (-SH) dapat mengikat ion logam. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kemampuan bayam merah dalam mengakumulasi ion logam Fe(III) dan Mn(II) dan mekanisme fitoremediasi yang digunakan. Penelitian ini dilakukan secara duplo dan waktu panen selama 30 hari. Konsentrasi ion logam Fe(III) dan Mn(II) pada jaringan tanaman dianalisis dengan menggunakan metode spektrofotometri serapan atom (SSA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa akumulasi ion logam Fe(III) yang diserap sebanyak 47,51 mg/kg berat kering dan ion logam Mn(II) yang diserap sebanyak 256,28 mg/kg berat kering. Nilai faktor biokonsentrasi < 1 dan faktor translokasi < 1. Berdasarkan data ini bayam merah memiliki mekanisme fitoremediasi yaitu fitoekstraksi dan tidak berpotensi sebagai tanaman hiperakumulator terhadap ion logam Fe(III) dan Mn(II).

Kata Kunci: Fe(III), Mn(II), fitoremediasi, bayam merah, hiperakumulator

ABSTRACT

Heavy metal ion waste Fe (III) and Mn (II) originating from domestic waste has toxic properties if it exceeds the threshold value. Fe and Mn metal ion waste processing can be done by phytoremediation techniques using red spinach plants. The protein in red spinach contains a polar amine group (-NH₂), a carboxyl group (-COOH), also a sulfidril group (-SH) which can bind metal ions. The purpose of this study was to determine the ability of red spinach to accumulate Fe (III) and Mn (II) metal ions and the phytoremediation mechanism used. This research was conducted in duplicate and the harvest time was 30 days. The concentrations of Fe and Mn in plant tissues was analyzed using the atomic absorption spectrophotometry (AAS) method. The results showed that the adsorption of Fe (III) metal ions was 47.51 mg / kg dry weight and Mn (II) metal ions adsorbed were 256.28 mg / kg dry weight. The value of the bioconcentration factor <1 and the translocation factor <1. Based on this data, red spinach has a phytoremediation mechanism, namely phytoextraction and does not have the potential to be a hyperaccumulator plant against Fe (III) and Mn (II) metal ions.

Keywords: Fe (III), Mn (II), phytoremediation, red spinach, hyperaccumulator

DAFTAR ISI

	Halaman
PRAKATA.....	v
ABSTRAK.....	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
DAFTAR SINGKATAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Maksud dan Tujuan.....	5
1.3.1 Maksud Penelitian.....	5
1.3.2 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Logam Berat.....	6
2.2 Logam Besi.....	10
2.3 Logam Mangan.....	15
2.4 Bayam Merah.....	19
2.5 Mekanisme Fitoremediasi Logam.....	24
BAB III METODE PENELITIAN.....	31

3.1 Bahan Penelitian.....	31
3.2. Alat Penelitian.....	31
3.3 Waktu dan Tempat Penelitian.....	31
3.4 Prosedur Penelitian.....	31
3.4.1 Penyiapan Media Tanah.....	31
3.4.2 Destruksi dan Analisis Kadar Ion Fe(III) dan Mn(II) pada Tanah dan Pupuk Kompos.....	32
3.4.3 Penentuan Kadar Parameter Sifat Kimia dalam Tanah.....	32
3.4.3.1 Analisis Kadar Fosfor Metode Olsen.....	32
3.4.3.2 Analisis Kadar KTK dan Kalium.....	33
3.4.3.3 Analisis Kadar Nitrogen Metode Kjeldhal.....	33
3.4.3.4 Analisis pH.....	34
3.4.3.5 Analisis Karbon Organik Metode Walkley & Black.....	34
3.4.4 Pembuatan Tanah Terkontaminasi Ion Logam Fe(III) dan Mn(II).....	34
3.4.5 Penyiapan Media Tanam	34
3.4.6 Penanaman Bayam Merah	35
3.4.7 Perlakuan Sampel.....	35
3.4.7.1 Preparasi Sampel.....	35
3.4.7.2 Penentuan Kadar Air.....	35
3.4.7.3 Destruksi dan Analisis Kadar Ion Fe(III) dan Mn(II) pada Akar, Batang dan Daun.....	35
3.4.8 Penentuan Kadar Ion Logam.....	36
3.4.8.1 Pembuatan Larutan Baku Induk Fe.....	36
3.4.8.2 Pembuatan Larutan Baku Induk Mn.....	36
3.4.8.3 Pembuatan Larutan Baku Intermediet Fe dan Mn.....	36

3.4.8.4 Pembuatan Deret Larutan Standar Fe dan Mn.....	36
3.4.8.5 Penentuan Konsentrasi Ion Logam.....	37
3.4.9 Penentuan Mekanisme Fitoakumulasi Ion Logam.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Konsentrasi Ion Logam Fe(III) dan Mn(II) dalam Tanah dan Pupuk Kompos.....	39
4.2 Konsentrasi Sifat Kimia dalam Tanah.....	40
4.3 Kadar Air pada Tanaman Bayam Merah.....	42
4.4 Konsentrasi Ion Logam Fe(III) dan Mn(II) pada Akar, Batang dan Daun Tanaman Bayam Merah.....	42
4.5 Nilai <i>Bio-Concentration Factors</i> (BCF) dan <i>Translocation Factors</i> (TF).....	45
4.6 Mekanisme Akumulasi Ion Logam Fe(III) dan Mn(II) pada Tanaman Bayam Merah.....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	48
5.1 Kesimpulan.....	48
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49
LAMPIRAN.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi Asam Basa Keras Lunak.....	10
2. Mekanisme Akumulasi Tanaman.....	30
3. Konsentrasi Ion Logam Fe(III) dan Mn(II) dalam Tanah dan Pupuk Kompos.....	39
4. Konsentrasi Sifat Kimia dalam Tanah	40
5. Kadar Air pada Akar, Batang dan Daun Bayam Merah.....	42
6. Konsentrasi Ion Logam Fe(III) dan Mn(II) pada Akar, Batang dan Daun Tanaman Bayam Merah.....	43
7. Nilai BCF dan TF dalam Tanaman Bayam Merah terhadap Ion Logam Fe(III) dan Mn(II).....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Logam Besi.....	11
2. Logam Mangan.....	15
3. Vitamin C dan A.....	23
4. Tanaman Bayam Merah.....	23
5. Struktur Fitokelatin.....	27
6. Mekanisme Fitokelatin Mengikat Logam Fe.....	27
7. Mekanisme Fitokelatin Mengikat Logam Mn.....	28

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Skema Kerja Penelitian.....	58
2. Bagan Kerja.....	59
3. Perhitungan.....	72
4. Dokumentasi	84

DAFTAR SINGKATAN

BCF : *Bioconcentration Factors*

TF : *Translocation Factors*

SSA : Spektrofotometer Serapan Atom

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan ekonomi diartikan sebagai ukuran kuantitatif yang menggambarkan perkembangan pembangunan suatu perekonomian. Salah satu penggerak pembangunan ekonomi di negara-negara berkembang termasuk Indonesia adalah sektor industri. Oleh karena itu, sektor industri dipersiapkan agar mampu menjadi penggerak (*the leading sector*) terhadap perkembangan sektor perekonomian lainnya (Saragih, 2010). Industri di suatu wilayah dapat membantu meningkatkan perekonomian masyarakat setempat (Widiyanto dkk., 2015).

Berkembangnya sektor industri, selain memberikan dampak positif, juga memberikan dampak negatif. Dampak positifnya berupa perluasan lapangan pekerjaan dan peningkatan pendapatan penduduk, sedangkan dampak negatifnya adalah tingginya laju perubahan penggunaan lahan yang tidak sesuai dengan kaidah ekologi, urbanisasi yang kurang terkendali, pertumbuhan penduduk yang tinggi, serta pencemaran perairan akibat pembuangan limbah yang melampaui ambang batas (Setiawan, 2014).

Limbah dapat didefinisikan sebagai zat atau bahan buangan yang dapat mengganggu kesehatan hewan, manusia, kualitas kehidupan dan juga fungsi alami dari ekosistem. Limbah ada yang mudah terdegradasi (sampah dari bahan organik) dan yang sukar terdegradasi seperti pestisida, fungisida, insektisida, petrokimia, logam berat dan lainnya (Akhtar dkk., 2013).

Limbah yang dihasilkan dari industri mengandung berbagai macam senyawa berbahaya bagi kehidupan manusia, salah satu diantaranya adalah logam berat. Logam berat secara alami sudah ada di dalam tanah dan tidak dapat terdegradasi, dapat menetap di tanah dan air untuk waktu yang lama, sehingga akan terus meningkat dari waktu ke waktu (Govindasamy dkk., 2011). Di Indonesia, pencemaran logam berat cenderung meningkat sejalan dengan meningkatnya proses industrialisasi. Pencemaran logam berat dalam lingkungan bisa menimbulkan bahaya bagi kesehatan, baik bagi manusia, hewan, tanaman maupun lingkungan (Widowati dkk., 2008).

Keberadaan logam berat yang membahayakan bagi kehidupan ekosistem, maka sudah selayaknya untuk diketahui logam-logam berat tersebut di lingkungan sekitar. Untuk itu perlu diketahui tingkatan (kuantitas) kandungan logam berat yang terdapat di lingkungan sekitar. Kuantitas logam berat dalam suatu ekosistem dapat menunjukkan kualitas lingkungan ekosistem tersebut, khususnya bila ditinjau dari parameter pencemaran logam berat (Kariada dan Irsadi, 2014).

Menurut Palar (2004), logam berat masuk ke dalam tubuh makhluk hidup melalui pernapasan atau penetrasi melalui kulit. Penyebaran logam berat di tanah, perairan, ataupun udara dapat melalui berbagai hal, seperti pembuangan secara langsung limbah industri, baik limbah padat maupun limbah cair, dapat pula melalui udara karena banyak industri yang membakar begitu saja limbahnya dan membuang hasil pembakaran ke udara tanpa melalui pengolahan lebih dulu.

Dua logam berat yang biasa ditemukan pada limbah industri adalah Fe dan Mn. Konsentrasi yang ditemukan sebagian besar di perairan alami dan pada

umumnya konsentrasi rendah zat besi dan mangan kurang berisiko terhadap kesehatan (Anonim, 2007). Besi dan mangan juga dapat berpengaruh terhadap kesehatan makhluk hidup jika dalam konsentrasi yang melebihi ambang batas (Darmono, 2001). Kadar Fe dalam air tanah yang lebih dari 1 mg/L akan menyebabkan terjadinya iritasi pada mata dan kulit. Apabila kelarutan besi dalam air tanah melebihi 10 mg/L akan menyebabkan air berbau seperti bau karatan. Kadar Mn yang lebih dari 0,5 mg/L dalam air tanah bersifat neurotoksik (Laila dan Astrid, 2014). Keekeruhan, korosi dan kesadahan disebabkan karena adanya besi dan mangan dalam air (Mandasari dan Purnomo, 2016). Air yang mengandung logam besi dan mangan apabila digunakan untuk mandi, kulit akan menjadi kering. Jika digunakan untuk mencuci pakaian dan peralatan yang berwarna putih, maka benda yang dicuci akan mengalami perubahan warna yaitu menjadi kuning kecoklatan dan akan menimbulkan endapan pada bak penampung air (Febrina dan Ayuna, 2015).

Pencemaran yang diakibatkan oleh logam-logam berat dalam air sangat penting untuk diperhatikan karena beberapa logam berat sangat berbahaya untuk hewan dan manusia (Darmono, 1995). Usaha yang dapat dilakukan untuk mengurangi pencemaran logam berat ialah dengan cara penyerapan logam berat oleh tumbuhan atau fitoremediasi. Menurut Walker (2011), Arsyad dan Rustiadi (2008), pembersihan kawasan tercemar dapat dilakukan dengan menggunakan tumbuhan. Tumbuhan menyimpan bahan kimia di dalam batang dan daunnya namun bahan kimia yang terakumulasi tidak akan membahayakan tumbuhan tersebut. Tumbuhan dapat melakukan proses fitoakumulasi terhadap zat kontaminan atau pencemar di sekitarnya.

Masalah pencemaran logam berat dapat diminimalisir dengan teknik fitoremediasi yang tidak menimbulkan efek samping (Erari dkk., 2011). Fitoremediasi adalah penggunaan tumbuhan untuk menghilangkan polutan dari tanah atau perairan yang terkontaminasi. Akhir-akhir ini teknik reklamasi dengan fitoremediasi mengalami perkembangan pesat karena terbukti lebih murah dibandingkan metode lainnya (Juhaeti dkk., 2004). Keragaman jenis tumbuhan endemik (lokal) yang ada di Indonesia sangat tinggi. Jenis flora yang dimiliki Indonesia sangat banyak sehingga dapat diperkirakan banyak pula jenis tumbuhan yang memiliki potensi untuk meremediasi pencemaran dari lingkungan yang tercemar (Juhaeti dkk., 2004).

Beberapa tanaman telah teruji potensinya dalam meremediasi logam berat di tanah, diantaranya adalah dari genus *Amaranthus*. Tanaman ini juga dipilih karena mudah tumbuh, mudah didapatkan dan mudah diperbanyak. Priyanti dan Yunita (2013), menggunakan tumbuhan genjer (*Limnocharis flava*) yang mampu menyerap logam besi (Fe) sebesar 2,24-9,72 ppm dan menyerap logam mangan (Mn) sebesar 0,31-1,06 ppm. Suchaida dkk., (2015), menggunakan tanaman kangkung darat (*Ipoema reptans poir*) yang mampu menyerap logam besi (Fe) sebesar 13,9 % dan logam aluminium (Al) sebesar 11 %. Pemilihan ion logam Fe(III) dan Mn(II) pada penelitian ini disebabkan karena kedua ion logam tersebut berada dalam keadaan paling stabil ketika berada dilingkungan. Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini dilakukan untuk menentukan fitoakumulasi ion logam Fe(III) dan Mn(II) oleh tanaman bayam merah (*Amaranthus Tricolor L.*) pada tanah tercemar.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. berapa konsentrasi ion logam Fe(III) dan Mn(II) yang terakumulasi pada tanaman bayam merah (*Amaranthus Tricolor L.*)?
2. apakah *Amaranthus tricolor L.* termasuk tumbuhan hiperakumulator terhadap ion logam Fe(III) dan Mn(II)?
3. bagaimana mekanisme akumulasi *Amaranthus tricolor L.* terhadap ion logam Fe(III) dan Mn(II)?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

1.3.1 Maksud Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan *Amaranthus tricolor L.* dalam mengakumulasi ion logam Fe(III) dan Mn(II).

1.3.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. menentukan konsentrasi ion logam Fe(III) dan Mn(II) yang terakumulasi pada tanaman bayam merah (*Amaranthus Tricolor L.*).
2. menentukan kemampuan *Amaranthus tricolor L.* dalam mengakumulasi ion logam Fe(III) dan Mn(II).
3. menentukan mekanisme akumulasi *Amaranthus tricolor L.* terhadap ion logam Fe(III) dan Mn(II).

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai kemampuan *Amaranthus tricolor L.* dalam mengakumulasi ion logam Fe(III) dan Mn(II), juga potensi *Amaranthus tricolor L.* sebagai tumbuhan hiperakumulator.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Logam Berat

Logam berat adalah zat pencemar yang mendapat banyak perhatian dari masyarakat. Hal ini disebabkan karena efek toksisitasnya yang sangat berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungan. Selain itu, logam berat sangat mudah terakumulasi pada tubuh makhluk hidup khususnya manusia baik melalui udara, perairan dan makanan. Jika jumlah logam berat melampaui ambang batas pada tubuh makhluk hidup dapat mengakibatkan keracunan kronis bahkan kematian karena logam berat termasuk dalam bahan beracun (B3) (Arba, 2017).

Logam berat merupakan unsur-unsur kimia dengan densitas lebih besar dari 5 g/cm^3 , terletak di sudut kanan bawah pada sistem periodik unsur, mempunyai afinitas yang tinggi dan biasanya bernomor atom 22 sampai 92, dari periode 4 sampai 7 (Miettinen, 1977 dalam Ernawati, 2010). Logam berat mempunyai sifat fisik umum seperti berwujud padat, bertitik leleh tinggi, lentur (tidak mudah patah), mudah dibentuk (dapat ditempa atau ditarik), penghantar panas dan listrik yang baik, dan dapat dibuat paduan antar sesama logam (*alloy*). Sementara sifat kimianya adalah unsur yang elektropositif, umumnya dapat membentuk senyawa basa dan senyawa ionik (Mulyono, 2008).

Menurut Sutamihardja (1982), sifat-sifat logam berat adalah, sebagai berikut:

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

3. mudah terakumulasi di sedimen, sehingga konsentrasinya selalu lebih tinggi dari dalam air.

Disamping itu sedimen mudah tersuspensi karena pergerakan massa air yang akan melarutkan kembali logam yang dikandungnya ke dalam air, sehingga sedimen dapat menjadi sumber pencemar potensial dalam skala waktu tertentu (Sutamihardja, 1982).

Logam berat dibagi menjadi logam berat esensial dan nonesensial, menurut peranannya dalam sistem biologis. Logam berat esensial dibutuhkan oleh organisme dalam jumlah yang sedikit untuk menjalankan fungsi vital psikologis dan biokimia, contohnya yaitu Fe, Mn, Cu, Zn dan Ni. Sedangkan logam nonesensial sama sekali tidak dibutuhkan oleh tubuh atau bahkan bersifat racun, seperti logam Cd, Pb, As, Hg dan Cr (Fitria dkk., 2016). Daya racun yang dimiliki akan bekerja sebagai pengahalang kerja enzim, selain itu logam berat juga akan bertindak sebagai penyebab alergi, mutagen atau karsinogen bagi manusia (Putra, 2006).

Menurut Goyer (1986), logam-logam berat beracun terbagi dalam 4 kelompok, sebagai berikut:

1. logam-logam penting (*major metals*) yang menyebabkan pengaruh ganda (*multiple effect*), seperti Arsenik (As), Berilium (Be), Kadmium (Cd), Kromium (Cr), Timbal (Pb), Merkuri (Hg), Nikel (Ni),
2. logam-logam esensial tetapi berpotensi menyebabkan keracunan, Tembaga (Cu), Mangan (Mn), Molibdenum (Mo), Selenium (Se), Seng (Zinc),
3. logam-logam beracun yang berhubungan dengan terapi medis seperti Aluminium (Al), Bismuth (Bi), Galium (Ga), Emas (Gold-Au), Litium (Li), Platanium (Pt).
4. logam-logam beracun minor (*minor metals*), seperti Antimoni (Sb), Barium (Ba), Indium (In), Mangan (Mn), Perak (Silver-Ag), Telurium (Te), Timah (Tin), Uranium (U) dan Vanadium (V).

Unsur-unsur logam berat potensial yang menimbulkan pencemaran pada lingkungan adalah Fe, As, Cd, Pb, Hg, Mn, Ni, Cr, Co, Zn dan Cu, karena unsur ini lebih intensif penggunaannya demikian pula dengan tingkat toksisitasnya yang tinggi. United States Environment Protection Agency (US EPA) menganalisa logam berat yang merupakan pencemar utama berbahaya yaitu Sb, Ag, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Sr, As, Ag dan Zn. Namun terdapat pula logam berat seperti Zn, Cu, Fe, Mn dan Mo yang merupakan unsur hara mikro yang esensial bagi tanaman, tetapi bila jumlahnya terlalu besar akan mengganggu tumbuhnya tanaman (Saeni, 2002).

Logam berat dibutuhkan setiap makhluk hidup dalam trace element. Logam berat yang esensial seperti tembaga (Cu), selenium (Se), besi (Fe) dan zink (Zn) penting untuk menjaga metabolisme tubuh manusia dalam jumlah yang tidak berlebihan, jika berlebihan akan menimbulkan toksik pada tubuh. Logam yang termasuk elemen mikro merupakan kelompok logam berat yang nonesensial yang tidak mempunyai fungsi sama sekali dalam tubuh. Logam tersebut bahkan sangat berbahaya dan dapat menyebabkan keracunan (toksik) pada manusia seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), arsenik (As) dan Cadmium (Cd). Logam berat tidak dapat didegradasi ataupun dihancurkan, merupakan zat berbahaya karena dapat terjadi bioakumulasi. Bioakumulasi adalah peningkatan konsentrasi zat kimia dalam tubuh makhluk hidup dalam waktu yang cukup lama, dibandingkan dengan konsentrasi zat kimia yang terdapat di alam (Panggabean dkk., 2008).

Logam berat masuk kedalam tubuh manusia melalui mulut, yaitu makanan yang terkontaminasi oleh alat masak, wadah (makanan/minuman kaleng) dan juga melalui pernapasan seperti asap dari pabrik, proses industri dan buangan limbah (Darmono, 1995). Limbah yang mengandung logam berat berasal dari pabrik kimia,

listrik dan elektronik, logam dan penyepuhan elektro (*electroplating*), kulit, metalurgi, cat dan bahan pewarna. Limbah padat bekas permukiman juga mengandung logam berat (Yong dkk., 1992). Logam berat juga bisa terkontaminasi dalam makanan dari tanaman pangan (bidang pertanian) yang diberi pupuk dan pestisida yang mengandung logam (Darmono, 1995). Logam berat terserap kedalam jaringan tanaman melalui akar dan daun, selanjutnya masuk ke dalam siklus rantai makanan (Alloway, 1990).

Meskipun semua logam berat dapat mengakibatkan keracunan pada makhluk hidup, namun sebagian dari logam berat tersebut tetap dibutuhkan dalam jumlah yang sangat kecil. Bila kebutuhan yang sangat sedikit itu tidak dipenuhi, maka dapat berakibat fatal bagi kelangsungan hidup organisme (Rusman, 2010). Faktor yang menyebabkan logam tersebut dikelompokkan ke dalam zat pencemar yaitu logam berat tidak dapat terurai melalui biodegradasi seperti pencemar organik, logam berat dapat terakumulasi dalam lingkungan terutama sedimen sungai dan laut karena dapat terikat dengan senyawa organik dan anorganik, melalui proses adsorpsi dan pembentukan senyawa kompleks (Said dkk., 2009).

Prinsip yang digunakan secara luas dalam reaksi asam-basa Lewis adalah prinsip *Hard Soft Acid Base* (HSAB) yang dikembangkan Pearson dalam Huheey dkk., (1997). Prinsip ini didasarkan pada polarisabilitas unsur yang dikaitkan dengan kecenderungan unsur (asam atau basa) untuk berinteraksi dengan unsur lainnya. Ion logam yang berukuran kecil, bermuatan positif besar, elektron terluarnya tidak mudah terdistorsi dan memberikan polarisabilitas kecil dikelompokkan dalam asam lunak. Sedangkan ligan dengan atom yang sangat elektronegatif dan berukuran kecil merupakan basa keras dan ligan dengan atom yang elektron terluarnya mudah terpolarisasi akibat pengaruh ion dari luar merupakan basa lemah.

Asam keras cenderung mengikat basa keras, asam lunak mengikat basa lunak. Dalam teori *Hard Soft Acid Base* (HSAB), ion Fe(III) dan Mn(II) digolongkan ke dalam asam keras sehingga akan lebih mudah berinteraksi dengan gugus aktif yang terdapat pada tumbuhan bayam merah (*Amaranthus tricolor* L.) yaitu gugus amina (-NH) dan gugus hidroksi (-OH) yang merupakan basa keras (Robert, 1992).

Berikut merupakan Tabel 1 klasifikasi asam basa keras lunak:

Tabel 1. Klasifikasi Asam Basa Keras Lunak

Keras	Menengah	Lunak
<p>Asam H^+, Li^+, Na^+, K^+, Be^{2+}, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cr^{2+}, Cr^{3+}, SO_3, BF_3, Fe^{3+}, Mn^{2+}, BCl_3, $B(OR)_3$, Al^{3+}, Co^{3+}</p> <p>Basa F^-, Cl^-, OH^-, H_2O, O^{2-}, ROH, RO^-, R_2O, $CH_3CO_2^-$, NO_3^-, NH_3, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, ClO_4^-, SO_4^{2-}</p>	<p>Fe^{2+}, CO^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, SO^2, BBr^3, SO_2, Rh^{3+}</p> <p>NO_2^-, SO_3^{2-}, Br^-, N_3^-, N_2, $C_6H_5NH_2$</p>	<p>Cu^+, Au^+, Ag^+, Tl^+, Hg_2^{2+}, Pd^{2+}, Cd^{2+}, Pt^{2+}, Pt^{4+}, Hg^{2+}, BH_3</p> <p>H^-, R^-, CN^-, CO, I^-, SCN^-, R_3P, C_6H_5, R_2S, HS^-, H_2S, S_2^-</p>

2.2 Logam Besi

Besi adalah salah satu elemen kimiawi yang dapat ditemui pada hampir setiap tempat di bumi, pada semua lapisan geologis dan semua badan air. Besi merupakan unsur logam yang termasuk golongan VIII, dengan berat atom 55,84, titik lebur 1538 °C dan titik didihnya 2862 °C. Pada umumnya, besi yang ada di dalam air dapat bersifat solvent sebagai Fe^{2+} (fero) atau Fe^{3+} (feri), tersuspensi sebagai butir koloidal (diameter <1 μm) atau lebih besar, seperti Fe_2O_3 , FeO , $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$. Besi berada dalam tanah dan batuan sebagai ferrioksida (Fe_2O_3) dan ferihidroksida ($Fe(OH)_3$). Dalam air, besi berbentuk ferobikarbonat ($Fe(HCO_3)_2$), ferohidroksida ($Fe(OH)_2$), ferosulfat ($FeSO_4$) dan besi organik kompleks. Air tanah mengandung besi terlarut berbentuk ferro (Fe^{2+}). Jika air tanah dipompakan keluar dan

kontak dengan udara (oksigen) maka besi (Fe^{2+}) akan teroksidasi menjadi ferihidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Besi dibutuhkan tubuh dalam pembentukan hemoglobin (Febrina dan Ayuna, 2015).



Gambar 1. Besi (Fe) (Nurjamal, 2018)

Besi adalah unsur bersifat logam, berwarna putih abu-abu dan dapat ditempa. Besi merupakan unsur keempat terbanyak penyusun kerak bumi dan tergolong unsur sisi utama. Besi dapat berada dalam empat bentuk alotrop, yaitu sebagai besi- α , besi- β , besi- γ dan besi- δ dengan titik transisi pada $770\text{ }^{\circ}\text{C}$, $928\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $1530\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bentuk α bersifat magnet tetapi bila berubah menjadi bentuk β , maka sifat magnet akan hilang. Logam besi sangat reaktif dan mudah berkarat terutama dalam kondisi udara lembab atau suhu tinggi. Besi bereaksi dengan unsur non logam pada pemanasan, dapat membentuk senyawa besi(II) dan besi(III). Kegunaan logam ini telah dikenal luas dalam kehidupan, misalnya dalam bentuk paduan baja digunakan untuk badan mesin, rekonstruksi bangunan, jembatan dan kendaraan, untuk peralatan mekanik dan rumah tangga (Mulyono, 2008).

Besi (Fe) dibutuhkan tubuh dalam pembentukan hemoglobin. Besi dalam tubuh dikendalikan oleh fase adsorpsi. Tubuh manusia tidak dapat mengekskresikan besi (Fe), karenanya mereka yang sering mendapat transfusi darah, warna kulitnya

menjadi hitam karena akumulasi Fe. Air minum yang mengandung besi cenderung menimbulkan rasa mual apabila dikonsumsi. Sekalipun Fe diperlukan oleh tubuh, tetapi dalam dosis yang besar dapat merusak dinding usus. Kematian sering disebabkan oleh rusaknya dinding usus ini. Kadar Fe yang lebih dari 1 mg/l akan menyebabkan terjadinya iritasi pada mata dan kulit. Apabila kelarutan besi dalam air melebihi 10 mg/l akan menyebabkan air berbau seperti telur busuk. Debu Fe juga dapat diakumulasi dalam alveoli dan menyebabkan berkurangnya fungsi paru-paru (Slamet, 2004).

Kadar Fe yang terlalu tinggi bisa mengakibatkan kerusakan sel akibat radikal bebas. Pasien mengalami dialisis ginjal bila diberi Fe melalui injeksi yang akhirnya mengakibatkan stress. Salah satu penyebab serangan jantung adalah tingginya kadar Fe dalam tubuh. Wanita *premenopause* kurang beresiko terserang penyakit jantung karena mampu mengurangi kelebihan Fe saat menstruasi, sementara itu wanita *menopause* lebih beresiko terserang penyakit jantung koroner (Darmono, 1995).

Besi dalam tubuh berasal dari tiga sumber, yaitu hasil perusakan sel-sel darah merah (hemolisis), dari penyimpanan di dalam tubuh dan hasil penyerapan pada saluran pencernaan (Darmono, 1995). Dari ketiga sumber tersebut, Fe hasil hemolisis merupakan sumber utama. Bentuk-bentuk senyawa yang ada adalah senyawa heme (hemoglobin, mioglobin dan enzim heme) dan poliporfirin (tranfirin, ferritin dan hemosiderin). Sebagian besar Fe disimpan dalam hati, limpa dan sumsum tulang (Brown dkk., 2004).

Air minum tidak seharusnya mengandung besi karenakan memberi rasa pahit dan konsentrasi zat besi yang berlebihan menyebabkan gangguan saluran pencernaan dan terlebih lagi noda pada kain, gigi, gusi dan peralatan rumah tangga. Besi merupakan unsur penting dalam nutrisi manusia. Ini terkandung dalam protein

biologis yang signifikan seperti hemoglobin dan sitokrom dan dalam bentuk enzim reduksi oksidasi. Anemia yang disebabkan oleh kekurangan zat besi adalah kekurangan gizi yang paling umum di dunia. Jumlah normal zat besi sangat penting, namun jumlah yang tidak normal secara negatif mempengaruhi sistem manusia dan menghasilkan kondisi yang dikenal sebagai *haemochromatosis* dimana jaringan rusak akibat akumulasi besi berkepanjangan. Demikian pula endapan zat besi pada kulit menimbulkan pigmentasi karakteristik. Garam besi(II) diendapkan sebagai hidroksida besi(III) tak larut, yang mengendap sebagai endapan berwarna karat. Air seperti ini sering terasa menyengat dan merusak warna cucian dan *plumbing*. Besi yang mengendap dalam distribusi bila konsentrasi zat besi melebihi nilai yang diijinkan yaitu 0,3 mg/L (Raju, 2006).

Zat besi merupakan unsur yang sangat reaktif sehingga mampu berinteraksi dengan oksigen. Dalam keadaan tereduksi, zat besi kehilangan dua elektron sehingga memiliki dua sisa muatan positif (Fe^{2+} /fero). Dalam keadaan teroksidasi, zat besi kehilangan tiga elektron sehingga memiliki tiga sisa muatan positif (Fe^{3+} /feri). Karena dapat berada dalam dua bentuk ion ini, zat besi berperan dalam proses respirasi sel, yaitu sebagai kofaktor bagi enzim-enzim yang terlibat dalam reaksi oksidasi-reduksi. Selain itu, sebagian besar zat besi berada dalam hemoglobin (Hb), Hb di dalam darah membawa oksigen dari paru-paru ke seluruh jaringan tubuh dan membawa kembali karbon dioksida dari seluruh sel ke paru-paru untuk di keluarkan dari tubuh. Zat besi juga berperan dalam imunitas dalam pembentukan sel-sel limfosit (Ridwan, 2012). Zat besi bukan hanya diperlukan dalam pembentukan darah, tetapi sebagai bagian dari beberapa enzim hemoprotein (Dhur dkk., 1989). Enzim ini memegang peran penting dalam proses oksidasi-reduksi dalam sel. Sitokrom merupakan senyawa hemoprotein yang bertindak sebagai agen dalam perpindahan

elektron pada reaksi oksidasi-reduksi di dalam sel. Zat besi mungkin diperlukan tidak hanya untuk pigmentasi bulu merah yang diketahui mengandung unsur besi, tetapi juga berfungsi dalam penyusunan enzim dalam proses pigmentasi (Lee dkk., 1999).

Kadar besi dalam tubuh rata-rata sebesar 3-4 gram. Sebagian besar (± 2 gram) terdapat dalam bentuk hemoglobin dan sebagian kecil (± 130 mg) dalam bentuk mioglobin. Simpanan besi dalam tubuh terutama terdapat dalam hati dalam bentuk feritin dan hemosiderin. Dalam plasma, transferin mengangkut 3 mg besi untuk dibawa ke sumsum tulang untuk eritropoesis dan mencapai 24 mg per hari. Sistem retikulo endoplasma akan mendegradasi besi dari eritrosit untuk dibawa kembali ke sumsum tulang untuk eritropoesis (Susiloningtyas, 2012). Sedangkan yang mengontrol pemasukan Fe dalam tubuh adalah di dalam usus halus. Bagian usus ini berfungsi untuk absorpsi dan sekaligus juga sebagai ekskresi Fe yang tidak diserap. Besi dalam usus diabsorpsi dalam bentuk ferritin, dalam bentuk Fe(II) lebih mudah diabsorpsi dari pada bentuk Fe(III). Ferritin masuk ke dalam darah dan berubah bentuk menjadi senyawa transferrin. Besi di dalam darah mempunyai status sebagai besi trivalent yang kemudian ditransfer ke hati atau limfa yang kemudian disimpan dalam organ tersebut dalam bentuk ferritin dan hemosiderin. Diet Fe per hari setiap orang sekitar 10-15 mg Fe dan hanya sebagian kecil yang diabsorpsi, sedangkan dosis letal minimum (MLD) adalah sekitar 200-250 mg/kg berat badan (Darmono, 2001).

Sumber utama besi dalam air tanah terjadi secara alami dari erosi batuan dan mineral. Beberapa sumber pencemar besi juga dipengaruhi oleh limbah industri, pembuangan air asam tambang, limbah dan lindi TPA (Anonim, 2007). Sedangkan sumber utama pencemaran udara oleh Fe ialah pabrik besi dan baja. Inhalasi Fe oksida dari asap dan debu yang sering terjadi di lokasi pertambangan, dapat

menyebabkan radang paru-paru *Benigma pneumoconiosis*. Pemeriksaan sinar rontgen terhadap pasien yang mengalami radang paru-paru, terlihat adanya endapan Fe (siderosis) dalam alveoli paru-paru (Darmono, 2001).

2.3 Logam Mangan

Mangan merupakan unsur logam yang termasuk golongan VII, dengan berat atom 54,93, titik lebur 1247 °C dan titik didihnya 2032 °C (BPPT, 2004). Menurut Slamet (2007), mangan (Mn) adalah metal berwarna kelabu-kemerahan, di alam mangan (Mn) umumnya ditemui dalam bentuk senyawa dengan berbagai macam valensi. Air yang mengandung mangan (Mn) berlebih menimbulkan rasa, warna (coklat/ungu/hitam) dan kekeruhan (Fauziah, 2010). Mangan termasuk logam berat dan sangat rapuh tetapi mudah teroksidasi. Logam dan ion mangan bersifat paramagnetik. Hal ini dapat dilihat dari orbital d yang terisi penuh pada konfigurasi elektron. Mangan ditemukan di alam dalam bentuk *pyrolusite* (MnO_2), *brownite* (Mn_2O_3), *housmannite* (Mn_2O_4), *manganite* ($Mn_2O_3 \cdot H_2O$), *psilomelane* [$(BaH_2O) \cdot Mn_5O_{10}$] dan *rhodochrosite* ($MnCO_3$) (Manahan, 1994).



Gambar 2. Mangan (Wafda, 2017)

Mangan merupakan unsur logam yang mirip besi hanya lebih keras dan lebih mengkilap, bersifat reaktif dan bereaksi dengan unsur nonlogam pada suhu tinggi. Dalam keadaan murni Mn berada dalam empat bentuk alotrop, misalnya bentuk α (stabil pada suhu kamar) dan bentuk γ bersifat elastik, lunak, dapat dipotong dan mudah berubah menjadi bentuk α pada suhu kamar. Unsur mangan dapat mendorong kinerja vitamin B dalam tubuh. Selain itu senyawa KMnO_4 digunakan sebagai oksidator kuat dan dalam tambak perikanan sebagai potas, sedangkan MnO_2 digunakan sebagai katalis, depolarisator dalam baterai dan penyerap warna hijau pada gelas dengan adanya Fe (Mulyono, 2008).

Mangan cukup berlimpah sekitar 0,1 % di kulit bumi. Meskipun bentuk unsur murni dari mangan tidak dapat ditemukan di alam, namun mangan ditemukan lebih dari 100 bentuk mineral, hidroksida, serta oksidanya. Bentuk mineral Mn yang paling umum adalah mangan dioksida, mangan karbonat dan mangan silikat. Jumlah logam Mn sangat besar di dalam tanah, dalam bentuk oksida maupun hidroksida. Senyawa Mn secara alami berbentuk padat di lingkungan dan hanya sebagian kecil yang berada dalam air dan di udara sebagai debu. Bila kadar Mn relatif tinggi dalam air maka kualitas air menurun sehingga tidak layak digunakan baik untuk industri maupun keperluan rumah tangga (Anonim, 2003).

Mangan tidak direkomendasikan untuk digunakan setiap hari, mangan sebagai bahan esensial yang diperlukan pada fungsi tertentu pada beberapa sistem enzim, membangun struktur tulang normal dan fungsi otak (Anonim, 2003). Mangan merupakan unsur renik penting tetapi bersifat toksik. Mangan masuk ke atmosfer melalui suspensi partikulat akibat emisi industri, erosi tanah, emisi vulkanik dan pembakaran. Aktivitas manusia merupakan salah satu penyebab terhadap sebagian besar kontaminasi mangan di air dan di beberapa daerah (Tadiboyina dan Rao, 2016).

Senyawa mangan diperoleh melalui reaksi dari berbagai unsur dan senyawa dengan bijih mangan atau besi(II) mangan. Beberapa senyawa mangan yang

umumnya ditemukan adalah mangan klorida, mangan sulfat, mangan(II) oksida dan mangan(III) oksida, mangan dioksida dan kalium permanganat. Senyawa Mn ini bervariasi dan dilepaskan di lingkungan secara meluas. Sekitar 80 % kalium permanganat digunakan di Amerika Serikat dikeluarkan secara signifikan dalam pengolahan air limbah dan air minum. Mangan dioksida digunakan dalam produksi korek api, baterai sel kering, kembang api dan sebagai prekursor senyawa mangan lainnya. Mangan klorida juga digunakan sebagai prekursor senyawa mangan. Sebagian besar (60 %) mangan sulfat di Amerika Serikat digunakan sebagai pupuk, sedangkan sisanya digunakan dalam pernis, fungisida dan sebagai suplemen pakan ternak. Senyawa mangan organik, seperti trikarbonil mangan metilsiklopentadienil (TMM) digunakan sebagai aditif *antiknock* pada bensin tanpa timbal yang akhirnya dilarang pada tahun 1977 (Anonim, 2003).

Hanya 1 % mangan dari alam yang dilepaskan ke air. Sumber utama mangan yang mencemari permukaan dan pelepasan air tanah adalah buangan limbah industri, pembuangan akhir, pelindian tanah dan injeksi bawah tanah. Mangan dalam bentuk potasium permanganat dapat digunakan dalam pengolahan air minum untuk mengoksidasi dan menghilangkan zat besi dan kontaminan lainnya. Selain itu mangan juga digunakan dalam penyinaran air limbah industri dan pengurangan bau. Distribusi dan partisi mangan dalam air bergantung pada kelarutan senyawaan mangan. Bentuk kimiawi Mn dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti pH, potensi reduksi oksidasi dan keberadaan anion. Seringkali, mangan dalam air akan berkoagulasi menjadi sedimen tersuspensi (Anonim, 2003).

Sumber utama mangan dalam tanah adalah pembuangan limbah yang mengandung mangan ke tanah. Kemampuan senyawa mangan untuk diasorpsi ke dalam tanah dan sedimen bergantung pada dua faktor utama, yaitu kapasitas

pertukaran kation dan kandungan organik tanah atau sedimen. Aktivitas mikroba oksidatif dapat meningkatkan pengendapan mineral mangan dan meningkatkan peledakan unsur mangan di bawah permukaan tanah (Anonim, 2003). Kadar Mn yang tinggi dalam tanah bisa bersifat toksik dan pH rendah pada tanah dapat menyebabkan defisiensi Mn pada tanaman. Tingginya konsentrasi Mn pada tanah bisa mengakibatkan pembengkakan dinding sel, mengeringkan daun dan munculnya bercak coklat pada daun (Syuhada, 2018).

Dima dkk., (2006), melakukan penelitian mengenai nilai standar logam berat pada permukaan air salah satunya adalah Mn. Konsentrasi mangan dibawah 0,5 mg/L tidak menimbulkan resiko kesehatan, meskipun menyebabkan perubahan warna, rasa atau bau pada air. Mangan pada permukaan air yang sangat bersih dengan ekosistem organisme air berkembang baik memiliki standar nilai di bawah 0,1 mg/L. Air ini dapat dikonsumsi oleh masyarakat dengan perlakuan umum terlebih dahulu, dijadikan sebagai konservasi binatang air tawar, tempat memancing dan rekreasi. Mangan pada permukaan air yang agak kotor memiliki konsentrasi 0,3 mg/L. Air ini dapat dikonsumsi setelah dilakukan perlakuan khusus dan pertanian. Sementara itu, mangan pada permukaan air yang agak bersih memiliki konsentrasi 0,8 mg/L. Air ini dapat dikonsumsi setelah dilakukan beberapa proses khusus dan sebagai air industri.

Toksisitas mangan relatif sudah tampak pada konsentrasi rendah. Kandungan mangan yang diizinkan dalam air yang digunakan untuk keperluan domestik yaitu dibawah 0,05 mg/L. Air yang berasal dari sumber tambang asam dapat mengandung mangan terlarut dengan konsentrasi ± 1 mg/L. Pada pH yang agak tinggi dan kondisi aerob terbentuk mangan yang tidak larut seperti MnO_2 , Mn_3O_4 atau $MnCO_3$ meskipun oksidasi dari Mn^{2+} itu berjalan relatif lambat (Febrina dan Ayuna, 2015). Syarat air minum kadar mangan diperbolehkan 0,1 ppm sedangkan untuk air bersih 0,5 ppm (Syuhada, 2018).

Dalam jumlah yang kecil (<0,5 mg/l), mangan (Mn) dalam air tidak menimbulkan gangguan kesehatan, melainkan bermanfaat dalam menjaga kesehatan otak dan tulang, berperan dalam pertumbuhan rambut dan kuku, serta membantu menghasilkan enzim untuk metabolisme tubuh untuk mengubah karbohidrat dan protein membentuk energi yang akan digunakan. Tetapi dalam jumlah yang besar (>0,5 mg/l), mangan (Mn) dalam air minum bersifat neurotoksik. Gejala yang timbul berupa gejala susunan syaraf, insomnia, kemudian lemah pada kaki dan otot muka sehingga ekspresi muka menjadi beku dan muka tampak seperti topeng/*mask* (Slamet, 2007). Pencemaran logam mangan berasal dari bahan zat aktif di dalam batu baterai yang telah habis digunakan dan dibuang ke sungai maupun pesisir (Palar, 1994). Selain itu sumber pencemaran logam mangan juga berasal dari pertambangan, saluran tambang atom. Kerja mikroba terhadap mineral mangan pada pE rendah (Manahan, 1994).

2.4 Bayam Merah

Bayam (*Amaranthus sp.*) merupakan tanaman sepanjang musim yang berasal dari daerah Amerika Tropis. Di Indonesia hanya dikenal dua jenis bayam budidaya, yaitu bayam cabut (*Amaranthus tricolor*) dan bayam kakap (*Amaranthus hybridus*). Bayam kakap disebut juga sebagai bayam tahun, bayam turus atau bayam bathok, dan ditanam sebagai bayam petik. Bayam cabut terdiri dari dua varietas, yang salah satunya adalah bayam merah (Saparinto, 2013).

Bayam merah mulai dikembangkan di Indonesia sejak abad ke-19. Bayam merah dapat dikembangkan karena di Indonesia memiliki iklim, cuaca dan tanah yang sesuai untuk pertumbuhannya. Selain itu, dapat tumbuh baik di tempat yang bersuhu panas maupun bersuhu dingin, sehingga dapat diusahakan dari dataran rendah maupun dataran tinggi. Bayam merah akan tumbuh baik pada ketinggian 5–2000 m dari permukaan laut (Hasanuddin, 1998).

Bayam merah termasuk salah satu jenis tanaman yang tahan air. Pada musim kemarau penyiraman dilakukan secara teratur. Tanaman ini cocok bila ditanam pada awal musim penghujan. Tanah yang cocok untuk ditanami adalah tanah gembur, banyak mengandung humus, subur, serta pembuangan airnya baik. Derajat kemasaman (pH) tanah yang optimum untuk pertumbuhannya adalah antara pH 6–7 (Susila, 2006). Bayam merupakan tumbuhan herba tegak tingginya 80-120 cm, daun berbentuk jantung terbalik, pada setiap ruas terdapat 2 daun berhadapan (oposita), ada yang berdaun hijau berurat, kemerah-merahan, lebar 5-7 kali, 3-4 cm dan bertangkai, bunga kecil-kecil, bermahkota seperti selaput, membentuk mayang pada ketiak daun dan di puncak batang. Buah bulat panjang kecil berbiji satu. Habitat 1-1400 mdpl (Anonim, 2007).

Kandungan besi pada bayam relatif lebih tinggi dari pada sayuran daun lain (besi merupakan penyusun sitokrom, protein yang terlibat dalam fotosintesis) sehingga berguna bagi penderita anemia (Magdalena, 2006). Alat reproduksi bayam yaitu secara generatif (biji) dan dari setiap tandan bunga dapat dihasilkan ratusan hingga ribuan biji. Bayam merah, dipanen pada saat tanaman berumur muda, sekitar 40 hari setelah sebar, dengan tinggi sekitar 20 cm. Bayam ini dicabut bersama akarnya yang kemudian dijual dalam bentuk ikatan (Bandini, 1995).

Bayam dipromosikan sebagai sumber protein nabati, karena berfungsi ganda bagi pemenuhan kebutuhan gizi maupun pelayanan kesehatan masyarakat. Manfaat lainnya adalah sebagai bahan obat tradisional dan juga untuk kecantikan. Akar bayam merah dapat digunakan sebagai obat penyembuh sakit disentri. Daun dan bunga bayam duri berkhasiat untuk mengobati penyakit asma dan eksim. Bahkan sampai batas tertentu, bayam dapat mengatasi berbagai jenis penyakit dalam. Untuk tujuan pengobatan luar, bayam dapat dijadikan bahan kosmetik (kecantikan). Biji

bayam digunakan untuk bahan makanan dan obat-obatan. Biji bayam dapat dimanfaatkan sebagai pencampur penyeling terigu dalam pembuatan roti atau dibuat bubur biji bayam. Ekstrak biji bayam berkhasiat sebagai obat keputihan dan pendarahan yang berlebihan pada wanita yang sedang haid (Anonim, 2007).

Secara umum, tanaman ini dapat meningkatkan kerja ginjal dan melancarkan pencernaan. Akar bayam merah memiliki khasiat sebagai obat untuk disentri. Selain itu, bayam dapat digunakan untuk membantu melancarkan proses buang air besar karena kandungan seratnya cukup banyak. Makanan berserat seperti bayam, baik bagi penderita kanker usus besar, kencing manis, kolesterol tinggi dan untuk menurunkan berat badan. Kegunaan bayam merah antara lain dapat meningkatkan kerja ginjal dan membersihkan darah sehabis bersalin (Magdalena, 2006).

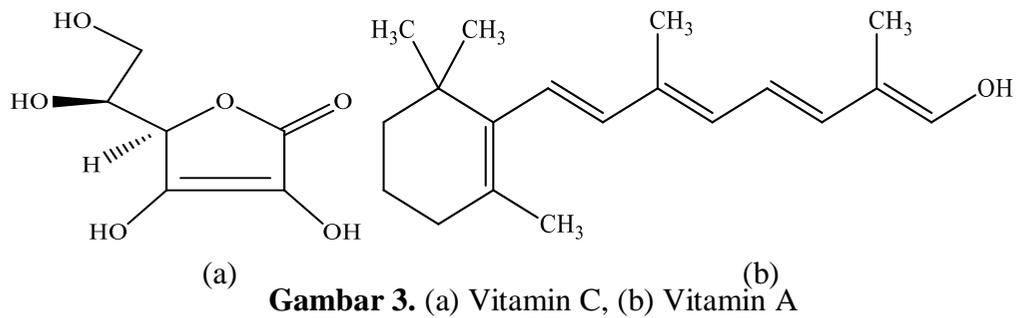
Salah satu kandungan paling kaya dalam bayam merah adalah zat besi. Inilah zat yang diperlukan tubuh untuk merangsang pembentukan sel-sel darah merah. Menyantap sayur bayam merah sama artinya dengan melindungi diri dari gejala-gejala penyakit kurang darah yang membuat tubuh menjadi lemas. Daun bayam merah baik untuk ginjal dan organ pencernaan oleh karena kandungan seratnya yang cukup tinggi sehingga dapat mengatasi sembelit dan melancarkan buang air besar. Kandungan nutrisi yang ada di bayam merah dapat menurunkan kolesterol, gula darah, melancarkan peredaran darah dan menurunkan tekanan darah yang berlebihan. Bayam merah juga dapat menyapu bersih sisa darah kotor (Magdalena, 2006).

Warna merah yang terdapat pada bayam merah dipengaruhi oleh pigmen antosianin yang bagi kesehatan sebagai sumber antioksidan. Peran antioksidan bagi kesehatan manusia yaitu dapat mencegah penyakit hati (hepatitis), kanker usus, stroke, diabetes, sangat esensial bagi fungsi otak dan mengurangi pengaruh penuaan

otak (Herani dan Rahardjo, 2005). Antosianin pada tanaman berfungsi sebagai tabir terhadap cahaya ultraviolet B dan melindungi kloroplas terhadap intensitas cahaya tinggi. Antosianin juga dapat berperan sebagai sarana transport untuk monosakarida dan sebagai pengatur osmotik selama periode kekeringan dan suhu rendah. Secara umum, antosianin diyakini dapat meningkatkan respon antioksidan tanaman untuk pertahanan hidup pada stres biotik atau abiotik (Susanti, 2012).

Antosianin merupakan golongan senyawa kimia organik yang dapat larut dalam pelarut polar, serta bertanggung jawab dalam memberikan warna orange, merah, ungu, biru, hingga hitam pada tumbuhan tingkat tinggi seperti bunga, buah-buahan, biji-bijian, sayuran dan umbi-umbian. Berdasarkan kepolarannya dalam pelarut universal, antosianin dalam tumbuhan berada dalam bentuk aglikon yang dikenal sebagai antosianidin dan antosianin dalam bentuk glikon sebagai gula yang diikat secara glikosidik membentuk ester dengan monosakarida (glukosa, galaktosa, ramnosa dan pentosa). Atau dapat dikatakan, adanya proses hidrolisis pada reaksi esterifikasi sebuah antosianidin (aglikon) dengan satu atau lebih glikon (gugus gula) dapat membentuk antosianin (Priska dkk., 2018).

Daun bayam merah mengandung senyawa protein, lemak, karbohidrat, kalsium, zat besi, karotenoid, vitamin C, fenolik, vitamin A, flavonoid, mineral dan serat (Khandaker dkk., 2010; Khanam dan Oba, 2013). Tanaman bayam merah telah dimanfaatkan sebagai adsorben karena mengandung protein yang memiliki gugus (NH_2). Selain gugus amina ($-\text{NH}_2$), juga terdapat gugus karboksil ($-\text{COOH}$), gugus sulfidril ($-\text{SH}$). Disamping itu, dalam jaringan tanaman terdapat dinding sel yang tersusun atas selulosa, lignin yang mengandung gugus hidroksil ($-\text{OH}$). Gugus-gugus polar ini mampu mengikat logam berat (Mohamad, 2012).



Saparinto (2013), mengklasifikasikan tumbuhan *Amaranthus tricolor* L., sebagai berikut:

Kingdom : Plantae

Divisi : Magnoliophyta

Kelas : Magnoliopsida

Ordo : Caryophyllales

Famili : Amaranthaceae

Subfamili : Amaranthoideae

Genus : Amaranthus

Spesies : *Amaranthus tricolor* L.



Gambar 4. Bayam Merah (*Amaranthus tricolor* L.) (Saparinto, 2013)

2.5 Mekanisme Fitoremediasi Logam

Subowo dkk., (1999), menyatakan bahwa logam berat dalam tanah pertanian dapat menurunkan produktivitas tanah dan mutu hasil pertanian. Metode alternatif dan ramah lingkungan untuk menurunkan cemaran logam berat di lingkungan yaitu metode fitoremediasi menggunakan tanaman air yang mempunyai kemampuan untuk menyerap dan mengakumulasi logam berat dan kebanyakan dari senyawa pencemar lingkungan seperti logam berat telah diketahui dapat dipindahkan melalui penerapan yang tepat dari teknik fitoremediasi, khususnya menggunakan spesies tumbuhan asli (Juhaeti, dkk., 2004 ; Tuwo, 2011).

Fitoremediasi berasal dari kata Inggris *phytoremediation*, kata ini sendiri tersusun atas dua bagian kata, yaitu *phyto* yang berasal dari kata Yunani *phyton* yang berarti tumbuhan dan *remediation* yang berasal dari kata Latin *remedium* yang berarti menyembuhkan. Dengan demikian fitoremediasi dapat didefinisikan sebagai penggunaan tumbuhan untuk menghilangkan, memindahkan, menstabilkan, atau menghancurkan bahan pencemar baik itu senyawa organik maupun anorganik (Purakayastha dan Chlonkar, 2010).

Fitoremediasi adalah upaya penggunaan tanaman dan bagian-bagiannya untuk dekontaminasi limbah dan masalah-masalah pencemaran lingkungan baik secara *ex-situ* menggunakan kolam buatan atau reaktormaupun *in-situ* (langsung di lapangan) pada tanah atau daerah yang terkontaminasi limbah (Morel dkk., 2006). Terdapat dua sifat penyerapan ion oleh tumbuhan, yang pertama faktor konsentrasi yaitu kemampuan tumbuhan dalam mengakumulasi ion sampai tingkat konsentrasi tertentu, bahkan dapat mencapai beberapa tingkat lebih besar dari konsentrasi ion di

dalam mediumnya dan yang kedua perbedaan kuantitatif akan kebutuhan hara yang berbeda pada tiap jenis tumbuhan. Sel-sel akar tumbuhan umumnya mengandung konsentrasi ion yang lebih tinggi dari pada medium di sekitarnya (Said dkk., 2009). Tumbuhan yang memiliki kemampuan untuk menyerap logam berat dari tanah dikenal sebagai tumbuhan hiperakumulator (Hardiani, 2009 dalam Yusuf, 2014).

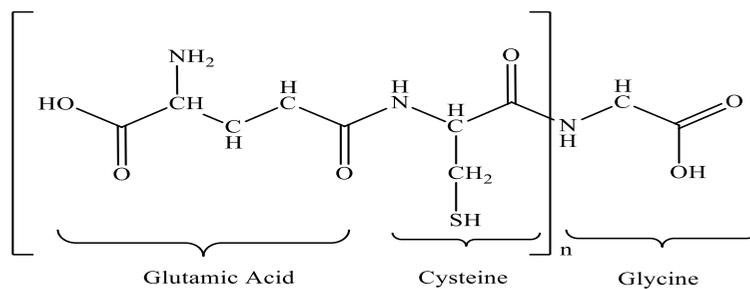
Tumbuhan hiperakumulator memiliki karakteristik tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi dan mampu mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju yang tinggi (Brown dkk., 1995 dalam Hidayati, 2005). Tanaman hiperakumulator merupakan tanaman yang dapat hidup pada keadaan dimana konsentrasi logam berat yang tinggi, tanaman ini juga dapat menyerap logam dalam tanah. Sehingga dengan tanaman hiperakumulator, konsentrasi logam berat dalam tanah akan berkurang (Ratnawati dan Fatmasari, 2018). Untuk menentukan tanaman yang dapat digunakan pada penelitian fitoremediasi dipilih tanaman yang mempunyai sifat cepattumbuh, mampu mengkonsumsi air dalam jumlah yang banyak pada waktu yang singkat, mampu meremediasi lebih dari satu polutan dan toleransi yang tinggi terhadap polutan (Morel dkk., 2006).

Menurut Pivetz (2001), terdapat enam mekanisme penyerapan zat kontaminan/pencemar secara alami oleh tumbuhan, yaitu:

1. fitoekstraksi yaitu tumbuhan menarik zat kontaminan dari media sehingga berakumulasi di sekitar akar tumbuhan dan selanjutnya ditranslokasi ke dalam organ tumbuhan. Proses ini adalah cocok digunakan untuk dekontaminasi zat-zat anorganik,
2. rizofiltrasi adalah proses adsorpsi atau pengendapan zat kontaminan oleh akar untuk menempel pada akar melalui sistem hidroponik, dimana kontaminan dalam air akan diabsorpsi oleh akar sehingga jenuh terhadap kontaminan,

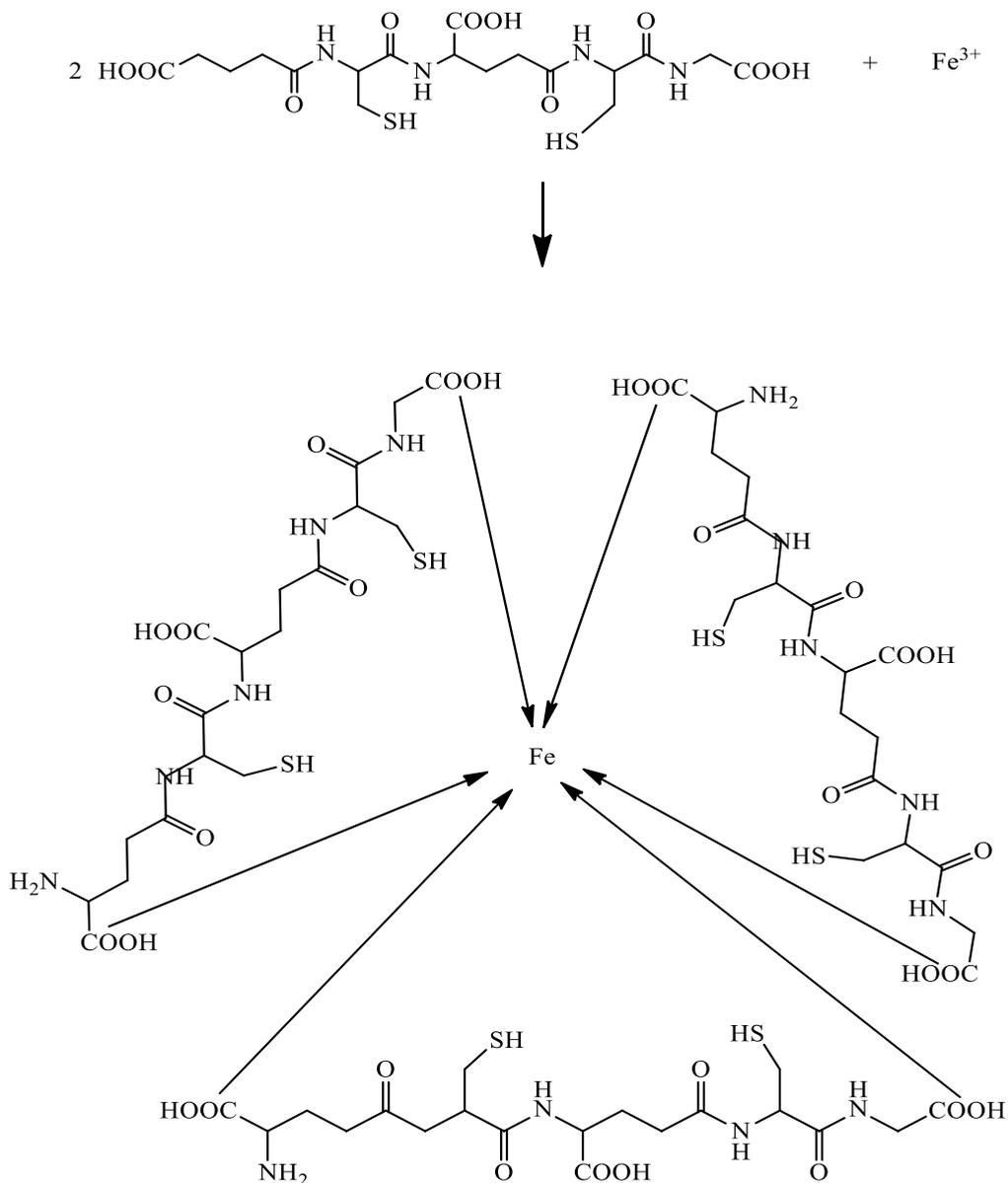
3. fitostabilisasi yaitu penempelan zat-zat kontaminan tertentu pada akar sehingga tidak akan terbawa oleh aliran air dalam media. Proses ini akan mengurangi mobilisasi kontaminan,
4. rizodegradasi yaitu penguraian zat-zat kontaminan oleh aktivitas mikroba yang berada di sekitar tumbuhan. Misalnya ragi, fungi atau bakteri,
5. fitodegradasi yaitu proses yang dilakukan tumbuhan untuk menguraikan zat kontaminan yang memiliki molekul kompleks menjadi bahan yang tidak berbahaya dengan susunan molekul yang lebih sederhana, yang dapat berguna bagi pertumbuhan tumbuhan itu sendiri,
6. fitovolatilisasi yaitu terjadi penarikan dan transpirasi zat kontaminan oleh tumbuhan dalam tanah sebagai bahan yang tidak berbahaya lagi untuk selanjutnya diupkan ke atmosfer. Teknik ini lebih tepat untuk fitoremediasi senyawa-senyawa organik yang pada umumnya bersifat volatil.

Tumbuhan yang tumbuh di daerah tercemar logam dapat mengakumulasi logam berat tersebut melalui penyerapan dari akar, diikuti pembentukan senyawa kelat dengan protein yang disebut fitokelatin, diakumulasi pada jaringan tubuh, kemudian didistribusikan ke batang, daun dan bagian lainnya (Hidayatus dkk., 2014). Pada saat tanaman terkena kontaminasi logam berat, tanaman tersebut akan menghasilkan fitokelatin yang dapat membantu untuk memfasilitasi penyerapan logam (Mohamad, 2012). Menurut Cobbett (2000), fitokelatin (GSH) dalam tumbuhan membentuk kompleks dengan logam berat dan berfungsi sebagai detoksifikasi tumbuhan dari logam berat.

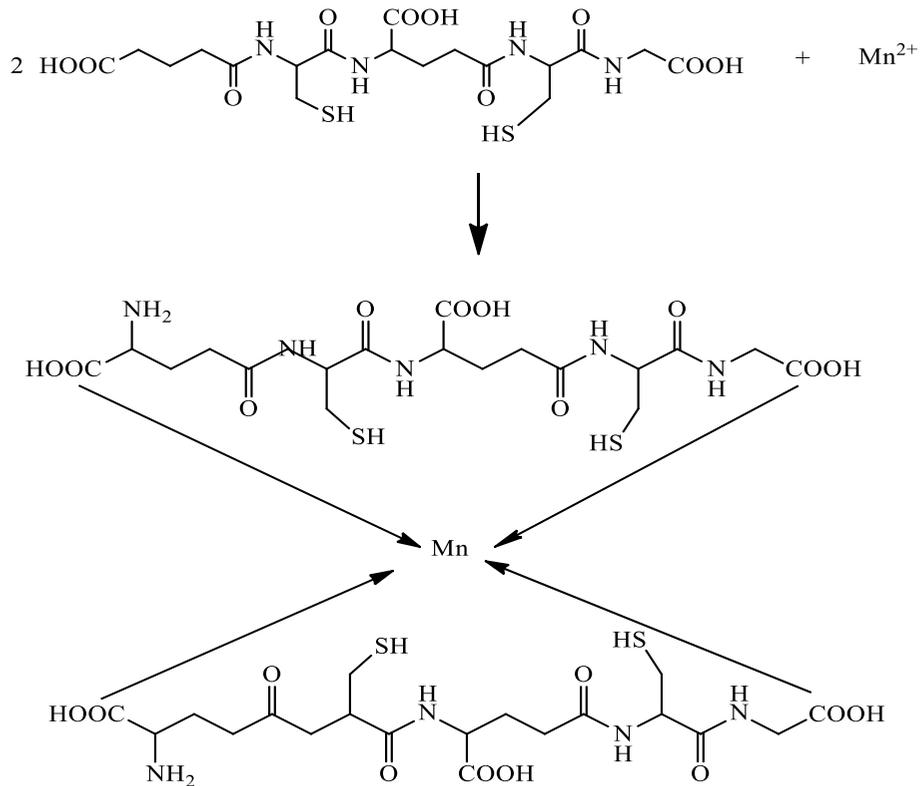


Gambar 5. Struktur Fitokelatin (Muliadi, 2010)

Berikut merupakan mekanisme fitokelatin yang mengikat logam besi (Fe) dan logam mangan (Mn) yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Mekanisme Fitokelatin Mengikat Logam Besi (Fe)



Gambar 7. Mekanisme Fitokelatin Mengikat Logam Mangan (Mn)

Hidayati (2005), mengatakan bahwa sejumlah tumbuhan terbukti dapat beradaptasi terhadap lingkungan marginal dan ekstrim seperti tanah limbah yang banyak terkontaminasi zat-zat beracun dan memiliki kualitas fisik, kimia maupun biologis sangat rendah. Tumbuhan yang memiliki kemampuan untuk menyerap logam berat dari tanah dikenal sebagai tumbuhan hiperakumulator (Hardiani, 2008). Semua tumbuhan mempunyaikemampuan menyerap logam tetapi dalam jumlah yang bervariasi (Fitria dkk., 2016). Menurut (Hardiani, 2009), tumbuhan hiperakumulator mampu mengakumulasi logam berat 100 kali lipat dibandingkan tanaman pada umumnya.

Menurut Nurlina dkk., (2016), tumbuhan Kiapu *Pistia stratiotes* L. mampu menyerap logam besi (Fe) dari air sumur selama pengukuran 2 minggu yaitu sebesar 1747.065 ppm dan 625.395 ppm. Triandy dkk., (2016), menggunakan tumbuhan bakau *Rhizophora mucronata* mampu menyerap logam besi (Fe) rata-rata

>500 mg/kg pada musim kemarau dan rata-rata >1.000 mg/kg pada musim hujan. Priyanti dan Yunita (2013), menggunakan tumbuhan genjer (*Limnocharis flava*) mampu menyerap besi (Fe) sebesar 2,24- 9,72 ppm dan menyerap mangan (Mn) sebesar 0,31-1,06 ppm. Suchaida dkk., (2015), menggunakan tanaman kangkung darat (*Ipoema reptans poir*) yang mampu menyerap logam besi (Fe) sebesar 13,9 % dan logam aluminium (Al) sebesar 11 %. Mohamad (2012), menggunakan tanaman bayam (*Amaranthus spinosus* L.) yang mampu menyerap logam kadmium (Cd) pada bagian akar sebesar 5,585 %, batang sebesar 6,429 % dan daun sebesar 7,659 %. Nurlela dkk., (2019), menggunakan tanaman hanjuang (*Cordyline fruticosa*) yang menyerap logam kadmium (Cd) dengan akumulasi tertinggi pada bagian akar pada konsentrasi 150 mg/kg sebesar 36,2167 mg/kg.

Perhitungan *Bioconcentration Factors* (BCF) dapat digunakan untuk mengetahui kemampuan tumbuhan dalam mengakumulasi logam dari tanah. *Bioconcentration Factors* (BCF) merupakan perbandingan antara konsentrasi logam yang terdapat pada akar dan yang terdapat pada tanah. Sedangkan untuk mengukur kemampuan suatu tumbuhan dalam mentranslokasi logam dari akar ke pucuk digunakan perhitungan *Translocation Factors* (TF), dimana *Translocation Factors* (TF) merupakan perbandingan antara konsentrasi logam yang terdapat pada pucuk dan yang terdapat pada akar (Yoon dkk., 2006).

Bioconcentration Factors dihitung sebagai nilai yang menunjukkan kemampuan suatu tumbuhan untuk menghilangkan logam dari tanah atau substrat dan logam terdapat lebih banyak di akar daripada tanah. Sedangkan *Translocation Factors* adalah nilai yang menunjukkan kemampuan logam berat didistribusi dari akar ke bagian tumbuhan. Nilai biokonsentrasi yang melebihi 2 dianggap sangat tinggi (Takarina dan Pin, 2017).

Berikut merupakan mekanisme akumulasi tanaman yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Mekanisme Akumulasi Tanaman

Mekanisme	Nilai	
	Bioconcentration Factors (BCF)	Translocation Factors (TF)
Fitostabilisasi	>1	<1
Fitoekstraksi	<1	>1
Fitoekstraksi dan Fitostabilisasi	<1	<1
Rizofiltrasi	>1	>1

Nilai TF > 1 menunjukkan bahwa tanaman mentranslokasikan pencemar dengan efektif dari tanah ke akar (Baker dan Brooks, 1989 dalam Irawanto dkk., 2015). Menurut Majid dkk., (2014) dalam Wahwaki dkk., (2017), kategori faktor transport dibagi menjadi dua, yaitu faktor transport (TF) > 1 termasuk ke dalam tanaman dengan mekanisme fitoekstraksi dan faktor transport (TF) < 1 termasuk ke dalam tanaman dengan mekanisme fitostabilisasi. Fitoekstraksi menunjukkan kemampuan tumbuhan untuk mentranslokasikan logam berat dari akar ke pucuk. Sedangkan fitostabilisasi hanya terjadi di akar yang menahan logam berat dengan cara logam tertempel pada akar sehingga mengurangi mobilisasi logam berat pada perairan yang tercemar, sedangkan rizofiltrasi hanya mengadsorpsi logam berat secara hidroponik sehingga logam berat suatu saat akan jenuh dan tidak dapat diadsorpsi (Takarina dan Pin, 2017).