

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pencemaran Lingkungan Oleh Logam Berat Tembaga

Pencemaran lingkungan adalah menurunnya kualitas lingkungan atau tidak berfungsinya lingkungan sesuai kegunaannya karena masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan komponen lain pada lingkungan tersebut (Undang-Undang No. 23 tahun 1997). Berdasarkan penelitian Susanti dkk., (2014), sumber pencemaran sungai di Jawa Tengah ialah karena adanya aktivitas industri makanan, industri obat, limbah rumah tangga, peleburan timah, pembuangan oli, industri minyak dan industri batik, aktivitas tersebut menghasilkan limbah sebagian besar mengandung logam berat Cu yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kadar logam berat Hg, Cd, Cu, Zn, Cr, dan Pb pada sedimen sungai berdasarkan sumber cemarannya

Sumber cemaran	Kadar Logam Berat (ppm)					
	Hg	Cd	Cu	Zn	Cr	Pb
Industri makanan	$<8 \times 10^{-5}$	$<0,39$	49,78	254,12	12,63	12,255
Industri obat	$4,433 \times 10^{-2}$	$<0,39$	38,62	211,65	14,20	57,40
Rumah tangga	0,616	$<0,39$	30,766	151,56	12,954	12,658
Peleburan timah	0,4697	$<0,39$	30,01	122,02	10,36	13,60
Pembuangan oli	0,68933	$<0,39$	27,98	124,65	15,75	10,63
Limbah minyak	0,2118	$<0,39$	16,195	127,42	8,538	4,875
Limbah batik	0,1074	$<0,39$	25,697	133,417	10,71	9,76

(Sumber: Susanti dkk, 2014).

Berdasarkan pada Tabel 1 industri makanan, industri obat, limbah rumah tangga, peleburan timah, pembuangan oli, industri minyak dan industri batik, aktivitas tersebut menghasilkan limbah yang sebagian besar mengandung logam berat Cu, dan limbah tersebut dapat masuk ke badan sungai sehingga tercemar (Susanti dkk, 2014). Industri kerajinan perak dan tambang nikel juga menyumbangkan pencemar logam berat ke lingkungan karena menghasilkan logam berat seperti tembaga (Cu), besi (Fe), dan arsen (As) (Sekarwati dkk., 2015).

Logam tembaga (Cu) memiliki nomor atom 29, titik lebur 1083°C , masa atom 63,548, jari-jari atom ialah $1,173 \text{ \AA}$, jari-jari atom ialah $0,96 \text{ \AA}$ dan memiliki titik didih 2310°C (Kundari dkk., 2008). Logam Cu memiliki sifat yang toksik atau tidak mudah terurai dan mudah diabsorpsi oleh biota laut sehingga logam berat Cu dapat terakumulasi di dalam tubuh biota laut melalui permukaan tubuh, terserap insang dan dapat melalui rantai makanan yang mengakibatkan bioakumulasi (Palar, 2004).

Tembaga (II) Klorida (CuCl_2) adalah senyawa yang biasa digunakan dalam pembuatan pewarna gelas dan keramik, maupun digunakan dalam pengawet kayu dan pabrik tinta (Purnamawati dkk., 2015). Logam berat dapat berasosiasi dalam sistem rantai makanan biota di perairan sehingga dapat sampai ke tubuh manusia yang mengkonsumsinya (Ahmad, 2009). Logam berat tembaga pada air minum jika lebih dari $0,1 \text{ mg/L}$ maka air minum tersebut sudah dianggap tercemar. PP MenLH no 3 tahun 2010, menyatakan bahwa baku mutu Cu pada limbah industri ialah 2 mg/l (Effendi, 2003).

Menurut Suhendrayatna (2001), tanaman dapat menyerap logam Cu dengan kandungan batasan konsentrasi sebesar 0,1 ppm, jika lebih dari 0,1 ppm di dalam jaringan tanaman maka tanaman kemungkinan dapat menyebabkan kematian dan kemungkinan lainnya respon tanaman terhadap logam berat yang berlebihan ialah terjadinya resistensi sehingga dapat bertahan hidup dan berakhir dengan berkembangbiak dan kemungkinan lainnya ialah pada tanaman yang sensitif dapat mengakibatkan kematian (Widoretno, 2003).

Menurut Fery (2016), penyakit Wilson merupakan salah satu penyakit genetik yang disebabkan karena adanya akumulasi tembaga yang berlebihan di hati atau di otak. Penyakit Wilson disebabkan karena adanya mutasi gen *ATP7B* pada kromosom 13. *ATP7B* berfungsi untuk memindahkan tembaga intrasel ke empedu dan sintesis seruloplasmin (Fery, 2016).

Menurut Fery (2016), mekanisme penyakit Wilson yaitu adanya mutasi gen *ATP7B* yang mempunyai fungsi mengatur ekskresi tembaga ke dalam empedu dan menggabungkan tembaga dengan *apoceruloplasmin* untuk membentuk *ceruloplasmin*. *Ceruloplasmin* adalah suatu protein α_2 -globulin yang berfungsi mengikat ion tembaga untuk menyimpan tembaga dalam peredaran darah. Setelah mengikat tembaga, *ceruloplasmin* akan dilepaskan ke peredaran darah sehingga jika terjadinya mutasi gen *ATP7B* maka pembentukan *ceruloplasmin* akan menurun dan akan mengakibatkan kadar tembaga bebas dalam peredaran darah. Meningkatnya kadar tembaga di dalam peredaran darah akan menyebabkan akumulasi di dalam jaringan sel darah

merah, otak, hati dan kornea. Hal ini yang akan menyebabkan penyakit Wilson yaitu adanya kerusakan kerja otak, hati dan kornea mata (Palar 2004).

B. Fikoremediasi

Bioremediasi merupakan pemanfaatan mikroorganisme untuk mendegradasi bahan pencemaran seperti logam berat di lingkungan menjadi bentuk yang lebih sederhana dan aman bagi lingkungan tersebut (Lumbanraja, 2104). Tujuan bioremediasi ialah untuk mengabsorpsi senyawa polutan dari lingkungan dengan menggunakan mikroorganisme (Priadie, 2012). Fikoremediasi adalah teknik bioremediasi menggunakan kemampuan alga pada lingkungan perairan dengan kemampuan meremediasi dengan baik dan ramah lingkungan akibat area permukaan yang dapat menyerap substansi (Soeprbowati dan Hariyati, 2013).

Pengolahan limbah logam berat menggunakan metode bioremediasi berupa mikroorganisme dengan tahapan sebagai berikut: menumbuhkan mikroorganisme, kemudian mikroorganisme dimasukkan pada air yang tercemar logam berat yang sebelumnya lingkungan yang mendukung pertumbuhan untuk mikroorganisme dalam merombak sudah diatur seperti pH, suhu, salinitas, aerasi dan cahaya (Soeprbowati dan Hariyati, 2013). Proses bioremediasi dilakukan dalam jangka waktu tertentu agar mikroorganisme dapat berikatan dengan ion logam berat (Priadie, 2012).

Menurut Soeprbowati dan Hariyati (2013), faktor lingkungan sangat diperlukan untuk menjaga kelangsungan hidup mikroalga, faktor lingkungan tersebut meliputi suhu, salinitas, pH, cahaya dan aerasi.

1. pH

Penyerapan nutrisi oleh sel dipengaruhi oleh derajat keasaman (pH) yang akan menentukan kelarutan dan ketersediaan ion mineral (Wijanarko dkk., 2007). Enzim akan dipengaruhi oleh penurunan pH yang drastis sehingga dapat menghambat proses fotosintesis dan pertumbuhan beberapa mikroalga (Soeprbowati dan Hariyati, 2013). pH optimum *C. calcitrans* berkisar 7-9 (Suminto dan Chilmawati, 2018). Semakin tinggi kerapatan sel pada medium maka semakin tinggi pH sehingga menyebabkan meningkatnya kadar kebasahan pada kondisi medium kultur (Wijanarko dkk., 2007).

Pupuk Walne menyediakan nitrogen, yaitu amonium (NH_4^+), nitrit (NO_2^+) dan nitrat (NO_3^+) yang merupakan senyawa nitrogen organik di perairan yang telah mengalami penguraian. Menurut Goldman dan Horne (1983), reaksi pembentukan amonium adalah sebagai berikut:



Semakin reaksi bergeser ke kanan maka semakin meningkat amonium sehingga pH dalam medium semakin basa. Gas CO_2 yang terlarut dalam medium sebagai buffer alami sehingga pH tidak meningkat lagi (Purnamawati dkk., 2015). Nilai pH air (konsentrasi ion hidrogen) ialah untuk mengetahui kondisi keasaman pada air limbah. Skala pH berkisar antara 1–14. Kondisi asam termaksud pada kisaran nilai pH 1–7, sedangkan kondisi basa termaksud pada kisaran pH 7–14 termasuk kondisi basa, dan kondisi netral pada pH 7 (Kuncoro, 2008).

2. Suhu

Suhu optimum *Chaetoceros calcitrans* berkisar 25-30°C. Dampak suhu di bawah 16°C akan menyebabkan kecepatan pertumbuhan menurun sedangkan jika suhu di atas 36°C akan menyebabkan kerusakan dinding sel pada fitoplankton sehingga laju adsorpsi menurun (Buhani dkk., 2006), dan akan berujung kematian (Wiryadi dan Witono, 2018).

3. Salinitas

Peningkatan suhu dan aerasi akan memengaruhi salinitas. Salinitas sangat memengaruhi metabolisme, pertumbuhan dan fotosintesis fitoplankton (Soeder dan Stengel, 1974). Salinitas optimum *C. calcitrans* ialah 24-34 ppt (Suminto dan Chilmawati, 2018), jika kadar salinitas tidak optimum maka metabolisme, pertumbuhan dan fotosintesis yang menunjang kehidupan fitoplankton untuk hidup akan terhambat (Poedjirahajoe, 2007).

4. Aerasi

Aerasi digunakan sebagai pengadukan media kultur dalam kultivasi mikroalga, yang bertujuan mencegah terjadinya pengendapan sel sehingga nutrisi dapat tersebar merata. Penyebaran nutrisi yang merata baik bagi mikroalga karena mendapatkan nutrisi yang sama, meningkatkan pertukaran gas dari udara ke media dan mencegah perbedaan suhu dalam medium (Wiryadi dan Witono, 2018). Aerasi juga berfungsi sebagai penyuplai oksigen untuk keperluan pertumbuhan mikroalga (Androv dan Harjanto, 2017). Aerasi menggunakan aerator difusi ini memasukan udara

atau oksigen ke dalam badan air dalam bentuk gelembung dan oksigen ditransfer dari gelembung ke dalam air. Prinsip kerjanya mencampurkan udara beroksigen dalam air sehingga dapat membuat nutrisi tersebar (Arsaf dan Hasyimrosma, 2018).

5. Cahaya

Intensitas cahaya berkisar 500-10.000 lux merupakan intensitas cahaya optimum untuk pertumbuhan mikroalga (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995). Intensitas cahaya sangat berguna menentukan pertumbuhan mikroalga karena sebagai sumber energi yang digunakan dalam proses fotosintesis untuk pembentukan senyawa karbon organik (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995).

6. Nutrisi

Nutrisi diperlukan mikroalga sebagai penunjang pertumbuhan, nutrisi terdiri dari 2 yaitu mikro dan makro. Makro nutrien seperti NaNO_3 dan mikro nutrien seperti Fe, Cu, Mn, Si, Mo dan Co yang sudah ada dalam pupuk Walne (Tabel 2). Kandungan NaNO_3 berfungsi sebagai metabolisme karbohidrat, protein dan lemak (Suminto, 2009), kandungan Si berfungsi sebagai pembentukan dinding sel, sedangkan Fe dan Na berfungsi sebagai pembentukan klorofil (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995). Cu berfungsi sebagai mikronutrient yang terlibat dalam reaksi redoks ($\text{Cu}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Cu}^+$) atau transport elektron dalam fotosintesis. Hasil dari fotosintesis ini akan menghasilkan sumber energi utama yaitu adenosin trifosfat (ATP), dan ATP

ini berfungsi dalam sintesis protein, lemak dan membran sel (Munawar, 2011 dalam Supriyantini, 2018).

Tabel 2. Komposisi Pupuk Walne

Komposisi	Walne (gram)
Larutan Nutrien:	
NaH ₂ PO ₄ .2H ₂ O	20
NaNO ₃	100
Na ₂ EDTA	5
Na ₂ SiO ₃	40
MnCl ₂ .H ₂ O	0,36
FeCl ₃	1,3
H ₃ BO ₃	10
Aquades	1000 ml
Larutan Trace Metal:	
ZnCl ₂	21
CoCl ₂ .6H ₂ O	2
(NH ₄) ₈ .Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	0,9
CuSO ₄ .7H ₂ O	20
FeCl ₃ .6H ₂ O	3,15
Aquades	100 ml
Vitamin	
Vitamin B ₁₂	0,1
Thiamin	20
Biotin	0,1

(Sumber : Jati dkk., 2012)

C. *Chaetoceros calcitrans*

C. calcitrans merupakan mikroalga perairan laut yang potensial untuk dikembangkan, hal ini karena manfaat dari *C. calcitrans*, menurut Syahputra (2012), *C. calcitrans* dapat dijadikan pengolahan limbah yang relatif murah dan ramah bagi lingkungan. *C. calcitrans* mempunyai kemampuan berkembang biak dengan cepat (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995). Menurut Fitriyanto dkk., (2016), *C. calcitrans* dapat berkembang biak sekitar $2,8 \times 10^6$ sel/ml dalam 7 hari dengan kepadatan awal 10.000 sel/ml.

C. calcitrans merupakan sel tunggal yang dapat membentuk rantai menggunakan duri yang saling berhubungan dari sel yang berdekatan (Perry, 2003). *C. calcitrans* berbentuk persegi panjang dengan lebar sel 12–14 μm dan panjang sel 15-17 μm , *C. calcitrans* mempunyai duri yang menonjol dari bagian pojok yang dapat dilihat pada Gambar 1. *C. calcitrans* dapat membentuk rantai sebanyak 10-20 sel dan mencapai panjang 200 μm (Perry, 2003). *C. calcitrans* memiliki kandungan kadar abu 28%, lemak 6,9%, karbohidrat 6,6% dan protein 35% (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995). Kandungan protein berfungsi adsorpsi yaitu mengikat ion logam berat (Buhani dkk., 2006), protein juga berfungsi dalam proses absorpsi yaitu sebagai bahan utama pembentukan fitokelatin (Cobbett, 2000). *C. calcitrans* memiliki pigmen yaitu klorofil dan karoten. Pigmen karoten menyebabkan sel *C. calcitrans* berwarna coklat keemasan dan *C. calcitrans* mempunyai kloroplas yang berperan dalam fotosintesis (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995).



Gambar 1. Morfologi *C. calcitrans* (Sumber: Umebayashi, 1960)

Keterangan gambar:

- A : Dinding sel
- B : Duri
- C : Kloroplas

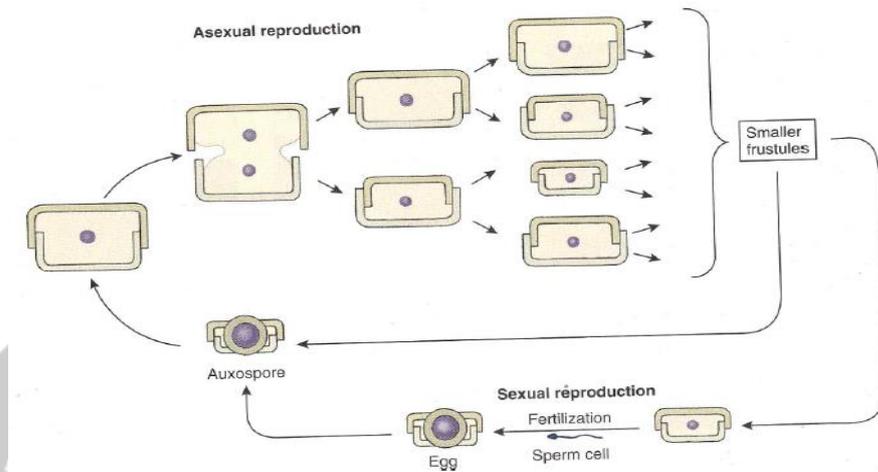
C. calcitrans bereproduksi secara aseksual (vegetatif) dan seksual (generatif) (Nontji, 2008). Reproduksi secara aseksual yaitu sel membelah secara mitosis (profase, metafase, anafase, telofase dan sitokenesis). Proses mitosis yaitu protoplasma membelah dua bagian dan kedua belah bagian ini mendapatkan satu sel anak epiteka dan satu sel anak hipoteka. Bagian epiteka merupakan bagian yang akan menyerupai ukuran induknya dan bagian ini juga tempat sel baru untuk tumbuh. Bagian sel hipoteka merupakan bagian sel yang tumbuh lebih kecil dari pada induknya. (Nontji, 2008).

Menurut Isnansetyo, dan Kurniastuty (1995), klasifikasi *Chaetoceros calcitrans* sebagai berikut:

Divisi	: Chrysophyta
Kelas	: Bacillariophyceae
Bangsa	: Centricoe
Suku	: Centroles
Marga	: <i>Chaetoceros</i>
Jenis	: <i>Chaetoceors calcitrans</i>

Pembelahan secara aseksual terus berlanjut sampai batas terkecil, kemudian isi sel akan keluar dari cangkang sel (protoplasma) dan membentuk aukspora kemudian aukspora akan membesar kembali dengan hingga ukurannya sama dengan induk sel pada semula dan membentuk cangkang (protoplasma) yang baru (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995).

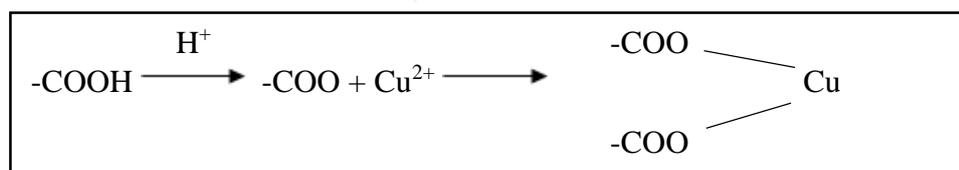
Reproduksi secara seksual terjadinya pembelahan secara meiosis dengan memproduksi sebanyak 32 gamet jantan dan betina yang kemudian gamet jantan dilepaskan dan akan berenang ke arah gamet betina dan membentuk auxospore. Pembentukan auxospore ini akan menghasilkan sel-sel baru (Gambar 2) (Isnansetyo dan Kurniastuty, 1995).



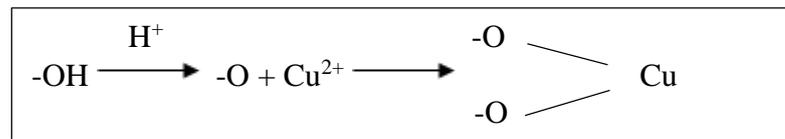
Gambar 2. Daur hidup Reproduksi seksual dan aseksual pada jenis *Chaetoceros* (Sumber : Castro & Huber 2006 dalam Aprimara, 2010).

D. Mekanisme Detoksifikasi Logam Oleh Fitoplankton

Mikroalga mempunyai kemampuan mengakumulasi logam berat sehingga dapat dimanfaatkan sebagai biosorben dalam penanganan perairan yang terkontaminasi (Hala dkk., 2012). Mekanisme pengambilan logam berat oleh mikroalga terdiri atas 2 proses yaitu absorpsi dan adsorpsi (Rahmadiani dan Aunurohim, 2013). Mekanisme adsorpsi yaitu secara fisik pada dinding sel *C. calcitrans* mempunyai gugus fungsi seperti hidroksil dan protein seperti karboksil dapat mengikat ion logam (Das dkk., 2008). Dinding sel mikroalga memiliki gugus karboksil (-COOH) dan hidroksil (-OH), jika di dalam air ion H^+ dapat lepas sehingga ion logam berat Cu^{2+} dapat terikat (Li dkk., 2010). Ikatan antara logam berat dan dinding sel mikroalga ini terbentuknya ikatan ionik (Gambar 3 dan 4) (Sulastri, 2008).



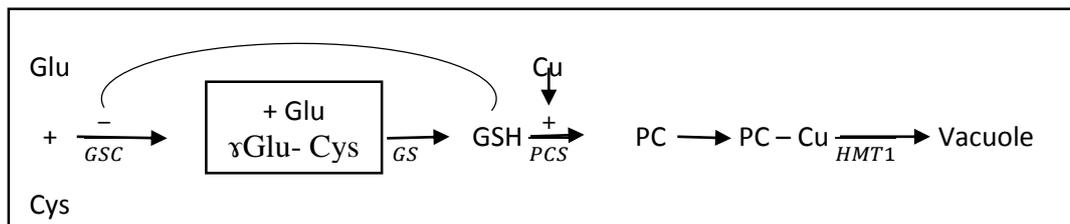
Gambar 3. Reaksi gugus karboksil dengan Cu^{2+} (Sumber: Ilyasa, 2016).



Gambar 4. Reaksi gugus hidroksil dengan Cu^{2+} (Sumber: Bijang dkk., 2018 dengan modifikasi).

Menurut Soeprbowati dan Haryati (2013), mekanisme absorpsi adalah kemampuan sel *C. calcitrans* menyerap logam berat secara aktif dengan menghasilkan protein pengkelat logam yaitu fitokhelatin (PC) yang berfungsi sebagai respon yang memberitahukan bahwa adanya gangguan pertumbuhan. Turunan tripeptida (glutathione) mensintesis fitokhelatin yang tersusun dari glutamat, glisin dan cystin. Glutathione akan membentuk fitokhelatin-Cu di dalam vakuola (Gambar 5) (Haryoto dan Wibowo, 2004).

Fitokhelatin merupakan protein yang digunakan untuk mengikat ion logam berat seperti Cd, Hg, Ag, Cu, Ni, Au, Pb, AS dan Zn, sebagai bentuk adaptasi pada paparan logam berat (Gambar 6) (Perales-Vela dkk., 2006). Enzim Gamma-glutamylcysteinyl dipeptidyl transpeptidase (PC synthase), merupakan enzim yang mengikat logam berat sehingga ikatan ini yang akan memicu adanya konversi glutathione menjadi fitokhelatin (Gambar 7) (Handayanto dkk, 2017). Secara umum logam berat seperti Cd, Hg, Ag, Cu, Ni, Au, Pb, AS dan Zn dapat menginduksi jalur biosintesis fitokhelatin secara sama (Noctor dkk, 2002).



Gambar 5. Jalur Biosintesis fitokelatin (Sumber: Cobbett, 2000 dengan modifikasi)

Keterangan gambar:

GCS : γ -glutamylcysteine sythetase

GS : glutathione synthetase

GSH : glutathione

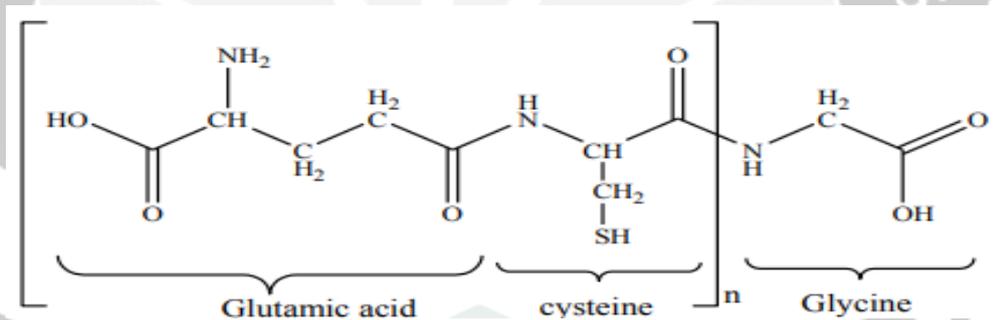
PC : phytochelatin

PCS : phytochelatin synthase

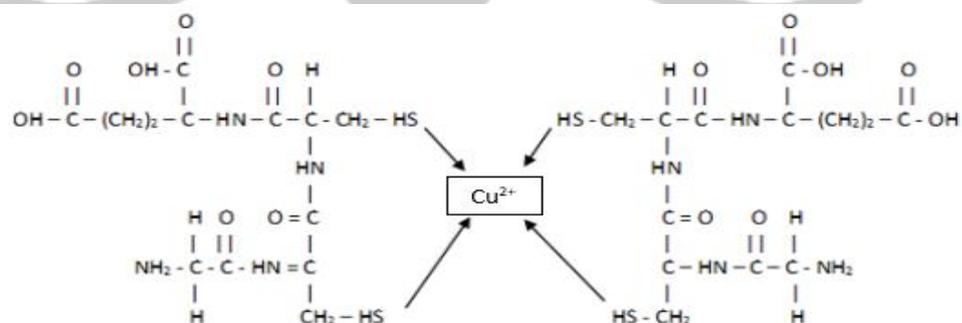
HMT1 : transporter membran vakuolar PC-Cu kompleks

Glu : glutamat

Cys : cystein



Gambar 6. Struktur Fitokelatin (Sumber: Paramata, 2013 dalam Akbar,2017).



Gambar 7. fitokelatin mengikat logam Cu^{2+} (Sumber : Paramitasari, 2014 dengan modifikasi).

E. Hipotesis

1. Perlakuan penambahan kepadatan *C. calcitrans* 900.000-1.000.000 sel/ml paling tinggi menurunkan kadar logam berat Cu.
2. Penurunan fikoremediasi kadar Cu oleh *C. calcitrans* mencapai lebih dari 20%.

