

**PENJERAPAN TEMBAGA (II) DALAM AIR LIMBAH
DENGAN BEBERAPA JENIS TANAH
(Tanah Berlempung, Tanah Lempung Berpasir
Dan Tanah Pasir)**



Tesis

Disusun oleh

**Haryanto
L4K002009**

**PROGRAM MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

Judul Tesis : Penjerapan Tembaga (II) Dalam Limbah Dengan Beberapa Jenis Tanah (Tanah Berlempung , Tanah Lempung Berpasir Dan Tanah Pasir)

Nama Mahasiswa : H A R Y A N T O

Nomor Mahasiswa : L4K002009

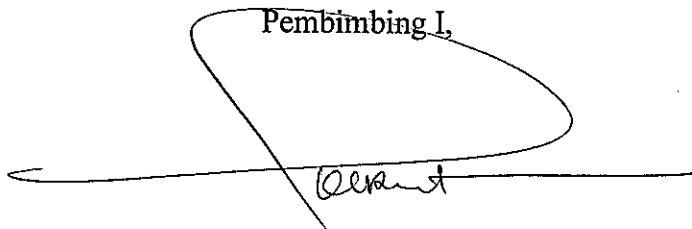
Program studi : Magister Ilmu Lingkungan

Konsentrasi : Rekayasa Lingkungan

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal 16 Juni 2004
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk diterima

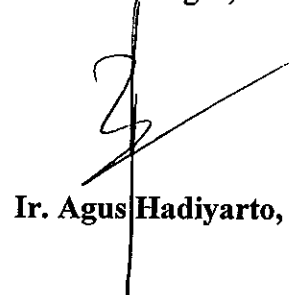
Menyetujui :

Pembimbing I,



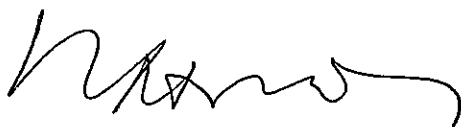
Dr. Ir. Purwanto, DEA

Pembimbing II,



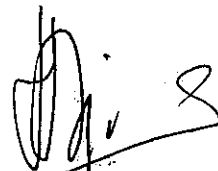
Ir. Agus Hadiyanto, MT

Penguji,



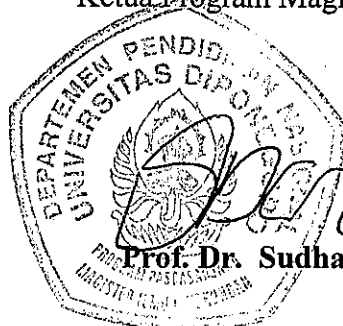
Ir. Nasrullah, MS

Penguji,



Ir. Dwi Handayani, MT

Ketua Program Magister Ilmu Lingkungan,



Prof. Dr. Sudharto P. Hadi, MES

UPT-PUSTAK-UNDIP

No. Daft: 3219/17/mil.1e
Tgl. : 30/12 04

ABSTRACT

Heavy metal, which have poisonous character and dangerous as one industrial wastewater component that difficult its handling. In processing of Industrial wastewater heavy metal is precipitated with easy component that easy precipitate, then is piled at a certain place and have potency cause pollution. Other fact housing development requires construction material in the form of brick with soil raw materials that constitute society livelihood. In this research is proposed soil use as raw material in making of brick to adsorb heavy metal, which there are in industrial wastewater. Copper (II) is selected as research substance, because have more low selectivity if compared to other heavy metal.

Research use three types of soil that were black clayey soil from Sumberlawang, brown sandy clay soil from Ngemplak and red sand soil from Nogosari. Batch experiment and Langmuir and Freundlich models used to know adsorption capacity of soil. Continuous adsorption model explored with many rates of solution flow on soil column, Thomas model and Atomic Absorption Spectrophotometer to analyzed sample copper (II).

Results indicate that soil have absorbent ability of copper (II) in wastewater and at absorption as batch follow Freundlich model with accuracy value, biggest at sand soil (84.83 %), followed sandy clay soil (66.68 %) and clayey soil (13.83 %) than copper (II) in solution. The biggest adsorption capacity is clayey soil (98 %), followed sandy clay soil (76 %) and sand soil (72 %). Continue absorption model follow Thomas equation, with k_a value of clayey soil ($1.387 \text{ L day}^{-1} \text{ mg}^{-1}$), sandy clay soil ($1.372 \text{ L day}^{-1} \text{ mg}^{-1}$) and sandy ground ($1.195 \text{ L day}^{-1} \text{ mg}$). Three soil types use as absorber materials can be considered in treatment of industrial wastewater that contains heavy metal. Considering implementation making of brick by society in scale, which is small relative, so absorption model as batch is suggested utilized in absorption of copper (II) in industrial wastewater.

Keywords: Copper (II), wastewater, soil, absorption

ABSTRAK

Logam berat yang bersifat beracun dan berbahaya sebagai salah satu komponen air limbah industri yang sulit penanganannya. Dalam pengolahan air limbah industri logam berat diendapkan bersama dengan komponen air limbah yang mudah mengendap, kemudian ditimbun pada suatu tempat dan berpotensi menyebabkan pencemaran. Pada kenyataan yang lain pembangunan perumahan membutuhkan bahan bangunan berupa batu bata dengan bahan baku tanah yang diusahakan oleh masyarakat. Pada penelitian ini diusulkan pemanfaatan tanah sebagai bahan baku dalam pembuatan batu bata untuk menjerap logam berat yang terdapat dalam air limbah industri. Dalam penelitian ini dipilih tembaga (II), karena mempunyai selektivitas yang relatif lebih kecil daripada logam berat yang lainnya

Penelitian menggunakan tiga jenis tanah yaitu tanah berlempung warna hitam dari Sumberlawang, tanah lempung berpasir warna coklat dari Ngemplak dan tanah pasir warna merah dari Nogosari. Untuk mengetahui kemampuan penjerapan tanah dilakukan percobaan secara batch dan digunakan model penjerapan Langmuir dan Freundlich untuk mengolah data percobaan secara *batch*. Penjerapan kontinyu dilakukan dengan percobaan pada unggun tanah pada berbagai macam laju alir dan pendekatan menggunakan persamaan Thomas.

Hasil menunjukkan bahwa tanah mempunyai kemampuan menjerap tembaga dalam air limbah dan pada penjerapan secara *batch* mengikuti model Freundlich dengan kesuaian terbesar pada tanah berlempung (84,83 %), kemudian tanah lempung berpasir (66,68) dan tanah pasir (13,83 %). Kemampuan penjerapan terbesar dimiliki tanah berlempung (98 %), kemudian tanah lempung berpasir (76 %) dan tanah pasir (72 %) Model penjerapan kontinyu mengikuti persamaan Thomas, dengan harga k_a tanah berlempung ($1,387 \text{ L hari}^{-1}\text{mg}^{-1}$), tanah lempung berpasir ($1.372 \text{ L hari}^{-1}\text{mg}^{-1}$) dan tanah pasir ($1,195 \text{ L hari}^{-1}\text{mg}^{-1}$). Ketiga jenis tanah dapat digunakan sebagai penjerap tembaga dan logam berat yang lain dalam pengolahan air limbah industri. Pada aplikasinya disarankan menggunakan proses batch, karena batu bata dibuat oleh masyarakat dengan skala yang relatif kecil.

Kata kunci : *tembaga (II), air limbah, tanah, penjerapan*

KATA PENGANTAR

Tesis ini disusun untuk memenuhi tugas akhir pada Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang. Tesis ini merupakan rangkaian akhir dari persyaratan dalam mencapai gelas kesarjanaaan Program Pascasarjana (S2) yang telah diseminarkan dan mendapat tanggapan, koreksi dan penyempurnaan.

Tesis yang berjudul “Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Beberapa Jenis Tanah (Tanah berlempung, Tanah Lempung Berpasir dan Tanah Pasir)” dibiayai oleh Direktorat Jenderal Perguruan Tinggi melalui Program Beasiswa BPPS bagi para tenaga pengajar Perguruan Tinggi. Penelitian ini mendapat bimbingan dan arahan untuk penyempurnaan isi dan sistematika penulisan sekaligus persetujuan para dosen pembimbing.

Pada kesempatan ini saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada yang saya hormati :

1. Prof. Dr. Sudharto P. Hadi, MES sebagai Ketua Program Magister Ilmu Lingkungan
2. Dr. Ir. Purwanto, DEA sebagai Pembimbing I
3. Ir. Agus Hadiyanto, MT sebagai Pembimbing II

4. Prof. Doechak Latief sebagai Rektor Universitas Muhammadiyah Surakarta sebagai pimpinan institusi penyusun bekerja sebagai dosen dipekerjakan.
5. Koordinator Kopertis Wilayah VI Jawa Tengah sebagai atasan langsung penyusun.
6. Para Dosen dan karyawan Program Magister Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro Semarang.
7. Orang tua, Hj. Unik Murniyati, A.Md dan Yusuf Sholehan yang mendukung penyusun lahir batin.
8. Rekan-rekan mahasiswa Magister Ilmu Lingkungan Undip, terutama angkatan kelas reguler 2002 dan mahasiswa Teknik Kimia UMS.

Semoga kebaikan Bapak/ Ibu/ Saudara membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini mendapat imbalan yang lebih baik dari Tuhan Yang Maha Esa, Aamiin.

Semarang, Juni 2004

Penyusun,

H a r y a n t o

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan didalamnya tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan Lembaga Pendidikan lainnya.

Semua informasi dan pengetahuan yang diperoleh dari hasil penerbitan maupun yang belum atau tidak diterbitkan, dengan ataupun dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak, telah diberikan penghargaan dimana sumbernya dijelaskan didalam tulisan dan daftar pustaka dan isi tesis ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penyusun.

Semarang, Juni 2004

Penyusun,

HARYANTO

NIM. L4K002009

BIO DATA PENYUSUN



Haryanto, dilahirkan pada 5 Juli 1963 di Simo Boyolali Jawa Tengah. Menyelesaikan pendidikan kesarjanaan Sarjana Strata Satu (S1) pada 19 Januari 1989 di Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro Semarang. Pada 4 Nopember 1989 diterima sebagai Pegawai Negeri Kopertis Wilayah VI Jawa Tengah dan dipekerjakan pada Akademi Teknik Kimia Surakarta sampai dengan 31 Maret 1996. Sejak 1 April 1996 sampai dengan sekarang bekerja sebagai dosen dipekerjakan pada Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta dengan jabatan akademik Lektor. Pendidikan singkat yang pernah diikuti antara lain Pengembangan Wawasan Teknik Kimia yang diselenggarakan oleh Dirgutiswa, Teknologi Fermentasi oleh Pusat Antar Universitas UGM Yogyakarta dan Model Matematika Teknik Kimia oleh Universitas Negeri Surakarta. Pada tahun akademik 2002/2003 mendapat beasiswa BPPS untuk melanjutkan studi di Magister Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang dengan judul tesis "Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Beberapa Jenis Tanah (Tanah Berlempung, Tanah Lempung Berpasir Dan Tanah Pasir)". Sebagian tesis ini dipublikasikan pada Seminar Rekayasa dan Proses di Teknik Kimia Fakultas Teknik UNDIP tahun 2004.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
PERNYATAAN	vii
BIO DATA PENYUSUN	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR NOTASI	xv
Bab I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang Masalah	1
1.2. Permasalahan	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Manfaat Penelitian	4
Bab II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Limbah Industri	5
2.2. Sumber Kegiatan Yang Membuang Logam Berat ke Dalam Tanah	9
2.3. Karakteristik Tembaga	10
2.4. Karakteristik Tanah	13
2.4.1. Karakteristik Warna Tanah	15
2.4.2. Karakteristik Tekstur Tanah	15
2.5. Transfer dan Transformasi Logam Berat Dalam Tanah	17
2.5.1. Pembentukan Senyawa Komplek Yang Larut Dalam Air ...	19

2.5.2.	Presipitasi (Pengendapan) dan Kopresipitasi (Pemampatan)	19
2.5.3.	Inkorporasi ke Dalam Senyawa Mineral	20
2.5.4.	Akumulasi atau Fiksasi ke Dalam makhluk Hidup	20
2.5.5.	Pembentukan Senyawa Komplek Dengan Agen Pengkelat ..	20
2.5.6.	Penjerapan Dalam Mineral Liat atau Koloid Organik	21
2.6.	Penjerapan Logam Dengan Tanah	22
2.7.	Originalitas Penelitian	34
2.8.	Hipotesisi	34
Bab III	METODE PENELITIAN	35
3.1.	Rancangan Penelitian	35
3.2.	Ruang Lingkup Penelitian	36
3.3.	Tata Kerja Penelitian	36
3.3.1.	Alat dan Bahan Yang Dipergunakan	36
3.3.2.	Cara Kerja	38
3.4.	Teknik Analisis Data.....	41
Bab IV	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	42
4.1.	Analisis Air Limbah dan Bahan Penjerap	42
4.1.1.	Kandungan Logam Berat Air Limbah	42
4.1.2.	Analisis Sifat Tanah	43
4.2.	Penjerapan Tembaga (II) Secara <i>Batch</i>	44
4.2.1.	Pengaruh Jenis Tanah	44
4.2.2.	Pengaruh Konsentrasi Awal	52
4.3.	Model Penejrapan Tembaga (II) Secara Batch	58
4.4.	Model Penjerapan Tembaga (II) secara Kontinyu	60
4.4.1.	Pengaruh Laju Alir Larutan.....	60

4.4.2. Model Thomas Pada Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah	62
4.4.3. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah	65
Bab V KESIMPULAN DAN SARAN	68
5.1. Kesimpulan	68
5.2. Saran	69
Daftar Pustaka	70
Lampiran	72

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Karakteristik dan Sumber Air Limbah	6
Tabel 2.2. Bahan Kontaminan Yang Harus Diolah Dalam Pengolahan Air Limbah.....	8
Tabel 2.3. Industri Yang Menghasilkan Limbah Logam Berat	9
Tabel 2.4. Batas Ukuran Fraksi Tanah Pada Klasifikasi Tanah	16
Tabel 2.5. Kelarutan Beberapa Logam Berat Sebagai Senyawa Hidroksida dan Sulfur	19
Tabel 2.6. Mineral Dalam Tanah Yang Mengikat Logam Berat	20
Tabel 2.7. Konstanta Stabilitas Senyawa Kompleks Dalam Air	21
Tabel 2.8. Mineral-Mineral Tanah Yang Penting Dan Sifat-Sifatnya	22
Tabel 2.9. Jenis Tanah Dan Kapasitas Tukar Kationnya	23
Tabel 2.10. Reaksi Komplek Tembaga (II) di Permukaan Tanah	26
Tabel 4.1. Kandungan Logam Air Limbah	42
Tabel 4.2. Sifat Tanah Berlempung, Tanah Lempung Berpasir Dan Tanah Pasir	43
Tabel 4.3. Kemampuan Penjerapan Tanah Berlempung, Tanah Lempung Berpasir dan Tanah Pasir	44
Tabel 4.4. Harga Konstanta k dan n Pada Penjerapan Secara Dinamis	51
Tabel 4.5. Harga Konstanta Langmuir Pada Penjerapan Tembaga (II)	58
Tabel 4.6. Harga Konstanta n dan K Model Freundlich	59
Tabel 4.7. Penerapan Model Langmuir Dan Freundlich Untuk Air Limbah	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Pembatasan Fraksi Tekstur Tanah	17
Gambar 2.2. Keberadaan Logam Berat Dalam Tanah.....	18
Gambar 2.3. Hubungan Waktu dan Zat Terlarut Terjerap Dalam Tanah Secara Batch	28
Gambar 2.4. Penjerapan Dengan Aliran Kontinyu	30
Gambar 2.5. Kurva Penjerapan Secara Kontinyu	31
Gambar 2.6. Elemen Volume Unggun Tetap	32
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 3.2. Rangkaian Alat Penjerap Dengan Unggun Tanah Secara Kontinyu	37
Gambar 3.2. Diagram Alir Percobaan Penjerapan Secara <i>Batch</i>	39
Gambar 3.3. Diagram Alir Percobaan Dengan Unggun Tanah Secara Kontinyu	41
Gambar 4.1. Hubungan Diameter Partikel Tanah rata-rata Dengan Kemampuan Penjerapan	45
Gambar 4.2. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah pada Konsentrasi Awal 1,5148 ppm	46
Gambar 4.3. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah pada Konsentrasi Awal 3,4541 ppm	47
Gambar 4.4. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah pada Konsentrasi Awal 7,2534 ppm	48
Gambar 4.5. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah pada Konsentrasi Awal 9,3175 ppm	49
Gambar 4.6. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah pada Konsentrasi Awal 12,4486 ppm	50

Gambar 4.7. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Jumlah Tembaga (II) terjerap Tanah Berlempung	53
Gambar 4.8. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah Lempung Berpasir	54
Gambar 4.9. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah Pasir	55
Gambar 4.10. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Persentase Tembaga (II) terjerap Tanah Berlempung	56
Gambar 4.11. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Persentase Tembaga (II) Terjerap Tanah Lempung Berpasir	57
Gambar 4.12. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Persentase Tembaga (II) Terjerap Tanah Pasir	58
Gambar 4.13. Pengaruh Laju Alir Terhadap Jumlah Tembaga (II) Yang Terjerap Pada Unggun Tanah Berlempung	60
Gambar 4.14. Pengaruh Laju Alir Terhadap Jumlah Tembaga (II) Yang Terjerap Pada Unggun Tanah Lempung Berpasir	61
Gambar 4.15. Pengaruh Laju Alir Terhadap Jumlah Tembaga (II) Yang Terjerap Pada Unggun Tanah Pasir	62
Gambar 4.16. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah Berlempung	63
Gambar 4.17. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah Lempung Berpasir	64
Gambar 4.18. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah Pasir	64
Gambar 4.19. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Tanah Berlempung	65
Gambar 4.20. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Tanah Lempung Berpasir	65
Gambar 4.21. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Tanah Pasir	66

DAFTAR NOTASI

A	: Luas penampang melintang unggun, (cm^2)
A'	: luas penjerapan, (cm^2)
C	: konsentrasi zat terlarut dalam larutan pada keadaan kesetimbangan, (mgL^{-1})
C	: konsentrasi zat terlarut dalam kesetimbangan / aliran larutan keluar unggun (mg L^{-1})
C_b	: konsentrasi zat terlarut dalam larutan pada <i>breakthrough point</i> , (mgL^{-1})
C_e	: konsentrasi zat terlarut dalam larutan pada <i>exhaustion</i> , (mgL^{-1})
C_o	: konsentrasi zat terlarut dalam aliran larutan masuk unggun (mg L^{-1})
C_s	: konsentrasi zat larut maksimal (kesetimbangan) yang terjerap dalam fase padat (mg g^{-1})
D	: kedalaman unggun penjerap, cm)
F	: Fluks laju alir massa ($\text{g jam}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
k	: perbandingan zat terjerap dengan bahan penjerap (konstanta)
K	: konstanta pada persamaan Freundlich
k'	: hambatan perpindahan massa, ($\text{cm}^2 \text{j jam}^{-1}$)
K'	: k'/x
k_1	: konstanta penjerapan
k_2	: konstanta pelepasan
k_a	: konstanta laju penjerapan keseluruhan, ($\text{L hari}^{-1} \text{mg}^{-1}$)
m	: massa bahan penjerap (g)
n	: konstanta
n'	: konstanta
N	: fluks massa, (mg/detik)
Q	: laju alir larutan (L hari ⁻¹)
Q_p	: laju alir bahan penjerap (g hari^{-1})
r	: laju penjerapan bahan terjerap ($\text{mg L}^{-1} \text{hari}^{-1}$)
t	: waktu, (hari)
v	: kecepatan alir larutan dalam unggun, (cm jam^{-1})
V	: jumlah volume larutan yang mengalir melalui unggun (L)
V_b	: volume larutan melewati unggun pada <i>breakthrough point</i> (L)
x	: jumlah zat terjerap dalam penjerap, (mg g^{-1})
x_o	: jumlah zat terjerap dalam penjerap mula-mula, (mg g^{-1})
ε	: porositas unggun penjerap (%)
α	: $A'/V (\text{cm}^2 \text{L}^{-1})$
ρ_s	: rapat massa bahan penjerap, (g mL^{-1})
ρ	: rapat massa larutan, (g mL^{-1})

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Perkembangan industri yang mengolah bahan baku logam cukup pesat seiring dengan pemenuhan kebutuhan manusia yang diikuti dengan timbulnya limbah selama proses produksi dan setelah pemakaian produk baik limbah padat maupun limbah cair yang mengandung bahan-bahan berbahaya dan beracun, termasuk logam berat sebagai komponen utama yang terdapat dalam limbah industri pengolah logam.

Penyebaran logam berat mendapat perhatian para pemerhati lingkungan, karena sifat logam berat yang berbahaya bagi manusia, tanaman, hewan dan makhluk hidup yang lain. Logam berat terdiri dari logam yang mempunyai rapat massa lebih besar dari 5 gram cm^{-3} dan unsur-unsur metaloid yang mempunyai sifat berbahaya seperti logam berat, sehingga jumlah seluruhnya mencapai lebih kurang 40 jenis yang bersifat beracun dan berbahaya antara lain As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni dan Zn.

Kesulitan dalam pengelolaan limbah yang mengandung logam berat disebabkan oleh bentuk dan kandungan logam berat dalam limbah yang sangat bervariasi. Bentuk limbah yang berupa campuran dari padat, cair dan gas, dengan konsentrasi dari yang rendah sampai dengan yang tinggi serta jumlah komponen penyusun yang sangat banyak. Limbah cair dan padat yang mengandung logam berat berpotensi menimbulkan pencemaran tanah dan air karena proses transfer dan transformasi logam berat yang disebabkan terutama oleh pergerakan media air baik berupa air hujan, air permukaan maupun air tanah.

Tembaga (Cu) termasuk logam berat yang harus diwaspai keberadaannya, namun dalam jumlah yang sangat kecil diperlukan tubuh untuk membentuk sel-sel darah

merah karena dalam air mudah membentuk suspensi dan tidak dapat didegradasi, dalam jumlah lebih besar dan waktu pemaparan yang lama akan dapat menyebabkan rasa yang tidak enak di lidah, iritasi hidung, mulut dan mata serta diare, disamping menyebabkan kerusakan pada hati (Achmadi, 2001). Untuk mencegah terjadinya gangguan tembaga pada kesehatan manusia disarankan pembatasan konsumsi sebesar 2-3 mg per hari dan kandungan tembaga dalam air minum maksimal 1 ppm. Pengendalian penyebaran tembaga dalam tanah dan air dapat dilakukan dengan mengurangi jumlah sumber dan menghambat penyebarannya. Pengelolaan limbah cair yang mengandung tembaga dapat dilakukan secara fisika dan atau kimia, sehingga tembaga tidak menyebabkan pencemaran tanah dan air sebagai tempat bercocok tanam dan sumber air minum masyarakat. Pengolahan secara fisika antara lain dengan proses membran dan penjerapan yang relatif murah, sedangkan untuk proses kimia misalnya dengan pengendapan bertingkat yang memerlukan biaya yang relatif besar

Penjerapan tembaga (II) dalam air limbah dapat dilakukan dengan bahan penjerap karbon aktif, zeolit dan tanah. Karbon aktif dan zeolit mempunyai kemampuan menjerap yang tinggi dan dapat diregenerasi, tetapi mempunyai kekurangan harga mahal dan air limbah hasil regenerasi juga merupakan limbah yang sangat potensial menyebabkan pencemaran lingkungan. Tanah yang mengandung bahan organik, kation natrium, aluminium, besi dan silikat dapat menjerap logam berat (tembaga) yang terdapat dalam limbah cair (Tan, 1998 dan Tchobanoglous, 1993). Tanah sebagai bahan penjerap mempunyai daya jerap tembaga (II) antara 5 – 100 mg/100 g tanah mempunyai kelebihan dapat disementasi, sehingga tanah yang telah menjerap tembaga (II) dapat dilakukan sementasi dan tidak menyebabkan pencemaran tanah dan air. Karakteristik tanah yang sangat bervariasi baik komposisi maupun

strukturnya yang sangat kompleks menyebabkan dalam penerapan yang berbeda-beda, sehingga sangat diperlukan penelitian untuk mendapatkan model penjerapan tembaga (II) dalam larutan (air limbah) dengan masing-masing jenis tanah.

Industri kerajinan tembaga merupakan salah satu industri yang berkembang di Daerah Cepogo Boyolali Jawa Tengah sebagai salah satu sentra industri kerajinan tembaga yang memproduksi berbagai macam perabot rumah tangga. Selain menghasilkan produk yang bermanfaat, kegiatan industri tersebut menghasilkan air limbah yang mengandung senyawa tembaga. Sementara di daerah sekitarnya banyak pengrajin batu bata yang menggunakan bahan baku tanah. Oleh karena itu untuk mengurangi pencemaran tembaga dimungkinkan memadukan kedua jenis industri tersebut yaitu dengan memanfaatkan tanah yang untuk menjerap tembaga dalam air limbah, kemudian tanah yang telah menjerap tembaga dapat dipergunakan sebagai bahan baku pembuatan batu bata.

Penelitian ini ditujukan untuk mempelajari kemampuan penjerapan tanah disekitar industri kerajinan tembaga yaitu tanah berlempung (Sucen Sumberlawang Sragen), tanah lempung berpasir (desa Sindon Ngemplak Boyolali) dan tanah pasir (Glonggong Nogosari Boyolali), dimana ketiga daerah termasuk wilayah propinsi Jawa Tengah.

1.2. Permasalahan :

1. Belum diketahui kemampuan penjerapan tembaga (II) oleh berbagai jenis tanah.
2. Belum ada model penjerapan tembaga (II) dengan ketiga jenis tanah tersebut yang sesuai untuk limbah yang mengandung tembaga
3. Masih terbatasnya penggunaan tanah sebagai penjerap tembaga dalam air limbah yang mengandung tembaga.

1.3. Tujuan penelitian

1. Mengetahui kemampuan penjerapan tembaga (II) dengan tanah berlempung, tanah berpasir dan tanah pasir.
2. Menyusun model penjerapan tembaga (II) dengan tanah berlempung, tanah berpasir dan tanah pasir.
3. Mendapatkan salah satu alternatif pengolahan air limbah yang mengandung tembaga.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil-hasil penelitian berupa kemampuan penjerapan, model penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah berlempung, tanah berpasir dan tanah pasir baik secara *batch* maupun kontinyu dan tingkat kesesuaian model yang diperoleh dapat dipergunakan sebagai informasi dalam perancangan alat penjerap tembaga (II) dalam air limbah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Limbah Industri.

Kegiatan industri dalam bidang pertanian, pertambangan, konstruksi, proses produksi (pabrikasi), transportasi dan komunikasi, perdagangan dan pelayanan telah menimbulkan limbah yang berbahaya, terutama empat kategori yaitu produk yang tidak sesuai dengan spesifikasinya dan kelebihan bahan baku, *spent catalyst* dan residu pada proses pemurnian, lumpur dan residu lain dari pengoperasian unit pengolah limbah pada beberapa unit produksi dan kontaminan pada pelarut serta residu pelarut. Sebagian besar limbah berbahaya dihasilkan industri berupa produk yang tidak sesuai spesifikasi dan kelebihan bahan baku. Berdasarkan kategori bahan kandungannya oleh *Environmental Protection Agency (EPA)*, limbah dikelompokkan menjadi 3 (tiga) macam yaitu :

1. Limbah anorganik (asam, basa, bahan anorganik lainnya)
2. Limbah organik (cairan pekat, larutan encer, bahan organik padat, uap organik)
3. Limbah khusus (oksidator sangat kuat, mudah meledak, limbah biologi).

Pengelolaan limbah yang tidak baik menyebabkan pencemaran lingkungan baik tanah, udara maupun air yang ditimbulkan oleh limbah yang berupa lumpur, air limbah (*effluent*) maupun limbah gas (emisi).

Pencemaran tanah dapat menyebabkan merusakkan tanah dan mengganggu kehidupan jasad hidup dalam tanah maupun di permukaan tanah. Penggunaan pupuk dan pestisida yang berlebihan, penimbunan lumpur yang mengandung bahan beracun dan berbahaya dapat merusak kesuburan tanah. Pencemaran udara dapat terjadi terutama

akibat aktivitas transportasi dan pabrik yang menggunakan bahan bakar fosil, sehingga gas sisa pembakaran mengandung karbon dioksida, karbon monoksida, nitrogen dioksida, nitrogen monoksida, sulfur dioksida dan partikel. Pencemaran air sebagian besar disebabkan oleh air limbah baik air limbah industri maupun air limbah domestik.

Karakteristik air limbah menurut komposisi fisika, sifat kimia dan biologi dicantumkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Karakteristik dan Sumber Air Limbah

No	Karakteristik	Sumber
1	Sifat Fisik	
	• Warna	Limbah domestik dan industri, karena pembusukan alamiah bahan organik
	• Bau	Dekomposisi limbah industri
	• Padatan	Penyediaan air minum, limbah industri dan domestik, erosi tanah, infiltrasi
	• Temperatur	Limbah industri dan domestik
2	Kandungan Bahan Kimia	
	• Bahan organik (karbohidrat, lemak / minyak, pestisida, fenol, protein, VOC dan deterjen)	Limbah domestik, industri, pertanian, pembusukan alamiah bahan organik
	• Bahan anorganik (alkali, klorida, logam berat, nitrogen, fosfor dan sulfur)	Limbah domestik, penyediaan air minum, infiltrasi air tanah, limbah industri,
3	Gas (hidrogen sulfida, metan dan oksigen)	Dekomposisi limbah domestik, penyediaan air minum dan infiltrasi air permukaan
4	Bahan biologis (hewan, tanaman, virus dan bakteri)	Limbah domestik, infiltrasi air permukaan, pengolahan tanaman

Sumber : Metcalf & Eddy, 1991

Diantara parameter saling terkait, misalnya temperatur yang masuk dalam sifat fisika akan berpengaruh pada aktivitas biologi dan jumlah gas yang terlarut dalam limbah.

Kontaminan dalam air limbah yang penting dan mendapat perhatian serius dicantumkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2. Bahan Kontaminan yang Harus Diolah Dalam Pengolahan Air Limbah

No	Kontaminan	Alasan
1	Padatan tersuspensi	Penyebab utama timbulnya lumpur dan kondisi anaerobik jika air limbah tidak diolah dibuang ke lingkungan akuatik.
2	Bahan organik dapat didegradasi	Protein, karbohidrat dan lemak bahan utama yang terdegradasi dan diukur sebagai BOD (<i>Biolchemical Oxygen Demand</i>) dan COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>). Jika dibuang ke lingkungan terjadi penurunan sumber oksigen di alam dan menyebabkan kondisi pembusukan
3	Mikroorganisme patogen	Penyakit dapat menular melalui mikroorganisme patogen dalam air limbah
4	Polutan utama	Senyawa organik dan anorganik yang dipilih berdasarkan sifat yang telah diketahui misalnya karsinogen, mutagen dan toksisitasnya tinggi.
5	Bahan organik dari proses pabrikasi	Bahan ini tidak dapat diproses dengan pengolahan air limbah konvensional misalnya detergen, fenol, dan pestisida.
6	Logam berat	Pada umumnya logam berat masuk dalam air limbah dari kegiatan komersial dan industri. Kontaminan ini harus diambil apabila akan dilakukan pemakaian ulang air limbah
7	Bahan anorganik terlarut	Bahan anorganik terlarut seperti kalsium, sodium dan sulfat ditambahkan dalam penyediaan air minum

Sumber : Metcalf & Eddy, 1991

Standar pengolahan sekunder air limbah bertujuan mengambil bahan organik yang dapat didegradasi, padatan tersuspensi, mikroorganisme patogen, kadang-kadang mengambil nutrisi dan polutan yang penting lainnya. Pada pengolahan air limbah yang akan digunakan lagi dilakukan pengambilan bahan organik hasil pabrikasi, logam berat dan padatan anorganik.

2.2. Sumber Kegiatan Yang Membuang Logam Berat ke Dalam Tanah.

Logam berat arsen (As), merkuri (Hg), kadmium (Cd) dan timah (Pb) termasuk dalam kelompok logam yang sangat beracun dan berbahaya bagi kehidupan manusia.

Tabel 2.3. Industri Penghasil Limbah Yang Mengandung Logam Berat

No	Industri dan proses	Kandungan limbah
1.	Penyamakan kulit sapi dengan krom	Cr, Pb, Zn
2.	Pelarut cat	Endapan cat, pelarut limbah dan logam berat 4,5 %
3.	Tungku metalurgi kokas	Cr, Cu, Mn, Ni, Pb dan Zn
4.	Tanur / baja	Cr, Cu, Mn, Pb, Zn
5.	Peleburan aluminium	Cr, Cu, Pb, Zn, Mn, Ni
6.	Peleburan tembaga	Debu / endapan (Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Zn)
7.	Peleburan dan pemurnian Timbal	Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn
8.	Peleburan dan pemurnian Timah	Sn, Pb, Sb, As, Zn
9.	Peleburan dan pemurnian antimoni primer	Pb, Cu, Zn, Sb
10.	Merkuri primer dan pemurnian	Residu kalsin (As, Pb, Cu, Zn, Ni, Hg, Mn, Sb, Cd, Cr)
11.	Pelapisan logam*	Cu, Ni, Pb, Zn, Al, Ag, Cr

Sumber : Djajadiningrat dan Amir, 1998 * hasil analisis.

Limbah industri yang dihasilkan semua jenis kegiatan industri merupakan sumber pencemaran logam berat yang paling potensial seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.3. Beberapa logam lain yang berbahaya yaitu aluminium (Al), kromium (Cr) dan beberapa logam lain termasuk kelompok logam esensial misalnya seng (Zn) dan tembaga (Cu). Persebaran logam berat pada umumnya terjadi dalam tanah akibat proses transfer dan transformasi tergantung pada struktur tanah, kontur tanah, komposisi tanah, jenis logam berat, konsentrasi, jumlah, tanaman yang hidup diatas tanah dan media pembawa (air) .

Salah satu faktor yang dapat mempercepat persebaran logam berat dominan adalah jumlah sumber kegiatan dan konsentrasinya. Logam berat tembaga termasuk salah satu logam berat yang terdapat pada hampir semua limbah dari kegiatan industri.

2.3. Karakteristik Tembaga

Tembaga merupakan logam berwarna kemerahan yang terdapat secara alami di batuan, tanah dan air serta dalam tanaman maupun hewan. Tembaga mudah dibentuk dan bercampur dengan logam lain (*alloy*) seperti kuningan. Beberapa reaksi yang dapat terjadi pada tembaga antara lain oksidasi, reduksi, netralisasi pada kondisi asam berlebih yang diikuti dengan pengendapan, dekomposisi panas dan pelarutan oksida tembaga dalam asam kuat.

Tembaga dapat masuk lingkungan dari beberapa kegiatan antara lain dari penambangan tembaga dan logam-logam lain dan dari industri yang membuat atau menggunakan logam tembaga atau senyawa tembaga, air limbah domestik, pembakaran bahan bakar fosil, produksi kayu dan pemupukan. Dalam lingkungan tanah tembaga sangat merusak bahan organik dan mineral, cepat larut dalam air membentuk partikel tersuspensi, tidak terdapat dalam air tanah serta tidak dapat

terdekomposisi. Dalam air tembaga dapat mengalami siklus biogeokimia yang meliputi empat kompartemen yaitu :

1. Kompartemen logam yang terlarut berupa ion logam bebas, kompleks, dan koloidal ikatan senyawanya
2. Kompartemen partikel abiotik yang terdiri bahan kimia organik dan anorganik.
3. komponen partikel biotik yang berupa fitoplankton dan bakteri di daerah laut dangkal dan laut dalam, daerah pantai dan muara yang menempel tanaman.
4. kompartemen sedimen di dasar air yang merupakan kompartemen logam berat yang terbesar dalam ekosistem air.

(Johnson, 2000)

Tembaga sangat diperlukan bagi kesehatan, tetapi dalam jumlah besar sangat berbahaya. Dalam pemaparan yang lama debu tembaga menyebabkan iritasi hidung, mulut dan mata, penurunan genetika dan menyebabkan sakit kepala serta diare. Keseimbangan tembaga dalam tubuh diatur oleh makan dan ekskresi. Sebanyak 50 % tembaga dijerap ke dalam aliran darah dalam bentuk tembaga yang larut dalam air dan sebagian besar tembaga ditrasfer ke hati serta sebagian kecil ke jaringan. Tembaga mempunyai toksisitas terhadap ikan sebesar 2,5 – 3,2 (96 jam $LC_{50}, mg L^{-1}$) dan untuk krustasea 0,007 – 1,2 (96 jam $LC_{50}, mg L^{-1}$). Toksisitas tembaga terhadap makhluk hidup dalam air dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu sebagai berikut :

1. bentuk ikatan kimia logam yang terlarut
2. pengaruh interaksi antara logam dan jenis toksikan lainnya.
3. pengaruh kondisi lingkungan (temperatur, kadar garam, pH, dan kadar oksigen terlarut dalam air.

4. Kondisi hewan, fase siklus hidup (telur, larva, dewasa) besarnya ukuran organisme, jenis kelamin, dan kecukupan kebutuhan nutrisi.
5. kemampuan organisme untuk menghindar dari pengaruh polusi
6. kemampuan organisme untuk beraklimatisasi terhadap bahan toksik logam tembaga.

(Anonim, 1997)

Usaha yang telah dilakukan untuk mengurangi penyebaran tembaga ke lingkungan melalui keputusan Menteri Lingkungan Hidup nomor : Kep-51/MENLH/10/1995 yang menetapkan baku mutu limbah cair industri pelapisan tembaga sebesar 3,0 mg/L untuk beban pencemaran maksimum 0,3 g/m² dan debit limbah maksimum 100 L/m² produk pelapisan logam atau 0,6 mg/L untuk beban pencemaran maksimum 0,012 g/m² dan debit limbah maksimum 20 L/m² produk pelapisan logam. Untuk memenuhi baku mutu ini pada umumnya industri melakukan proses pengendapan tembaga bersama dengan komponen limbah yang mudah mengendap, kemudian endapan yang berupa lumpur ditimbun pada suatu lokasi. Penimbunan lumpur yang mengandung logam berat termasuk tembaga berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan.

Tingkat selektivitas logam ditentukan jari-jari ionnya dan kelarutannya dalam larutan, semakin kecil jari-jari ionnya dan semakin kecil kelarutannya, semakin mudah masuk ke pori-pori tanah, maka semakin tinggi selektivitasnya (Yavus, 2003). Logam-logam dengan selektivitas lebih besar daripada tembaga (II) akan mengurangi jumlah tembaga (II) yang terjerap dalam tanah, sebaliknya logam yang mempunyai selektivitas lebih kecil tidak mempengaruhi daya jerap tanah terhadap tembaga (II) (Wentz, 1995). Lebih dari 50 % logam berat dapat dijerap dengan tanah dan untuk

logam divalen mengikuti model penjerapan isothermal Langmuir dan Freundlich (Matagi, 1998).

2.4. Karakteristik Tanah

Sistem tanah tersusun oleh tiga fase yaitu padat, cair dan gas. Fase padat merupakan campuran mineral dan bahan organik serta membentuk jaringan kerangka tanah. Jaringan kerangka tanah terbungkus sistem ruang pori yang diisi bersama oleh fase cairan dan gas. Komposisi dan sifat kimia fase cairan dan gas ditentukan interaksinya dengan fase padat. Fase gas atau udara dalam tanah merupakan campuran berbagai gas dengan komposisinya ditentukan hubungan air tanah dengan tanaman. Kebanyakan reaksi biologi dalam tanah menggunakan oksigen dan menghasilkan karbondioksida, sehingga untuk menjaga kandungan oksigen diperlukan aerasi. Fase cairan atau larutan tanah terdiri atas air dan zat-zat terlarut yang dapat berupa garam bebas dan atau ion-ion yang terikat pada lempung, bahan koloidal dan atau zat organik terlarut. Air dapat bebas bergerak tergantung gaya-gaya yang ada, tetapi zat-zat terlarut dapat lebih atau kurang terbatas gerakannya, atau dapat pula menyebabkan hambatan pada gerakan air (Tan, 1998). Kadar air tanah pada kondisi ruang diperlukan untuk menghitung basis perhitungan kering, sehingga diharapkan dapat berlaku lebih umum. Kadar air tanah berlempung (25,83 %), tanah lempung berpasir (23,16 %) dan tanah pasir (18,06 %) menunjukkan bahwa komponen lempung dan lanau mempunyai kemampuan menahan air yang lebih besar dibandingkan dengan komponen pasir (pasir halus – kerikil).

Rapat massa tanah (ρ) yang merupakan massa tiap unit volume partikel tanah (gram/cm^3). Kebanyakan tanah mempunyai rapat massa rata-rata sekitar $2,6 \text{ gram/cm}^3$, dan hanya sangat dipengaruhi oleh kerapatan partikel dan kurang

dipengaruhi oleh komposisi tanah, kecuali pada kasus tertentu. Rapat massa tanah liat $1,0 - 1,3 \text{ gram/cm}^3$, tanah organik mempunyai rapat massa $0,1 - 0,6 \text{ gram/cm}^3$ dan tanah permukaan yang banyak mengandung pasir mempunyai rapat massa $> 2,0 \text{ gram/cm}^3$ (Forth,1995). Rapat massa tanah sekitar $2,079 - 2,208 \text{ gram/cm}^3$ sebanding dengan kandungan mayoritas tanah yang berupa lempung, lanau (debu) dan pasir sangat halus dengan komposisi sesuai dengan besarnya rapat massa. Rapat massa yang relatif kecil menunjukkan tidak terdapat mineral (logam berat) yang cukup banyak dalam tanah.

Tingkat kemasaman tanah (pH) dikelompokkan atas 3 macam yaitu :

1. pH : < 5 , kemasaman ekstrim untuk tanah gambut masam
2. pH : $5 - 7$, kemasaman yang umum untuk tanah mineral di daerah iklim basah
3. pH : $7 - 9$, kemasaman yang umum untuk tanah mineral di daerah iklim kering
4. pH : > 9 , kemasaman ekstrim pada tanah mineral alkali. (Tan, 1998)

pH sampel tanah = 7 menunjukkan bahwa ketiga sampel tanah tersebut mewakili tanah di daerah iklim moderat (sedang) antara iklim basah dan iklim kering dengan kandungan mineral mengandung Al, Fe dan Mn terlarut dalam jumlah sedang. Tanah dengan pH 7 menyebabkan jumlah H^+ yang berhasil masuk ke dalam partikel lempung relatif sedikit, sehingga jumlah atom Al yang terlepas dari lempung juga sedikit (Tan, 1998). Ketersediaan kalium, tembaga dan seng relatif sedikit dan untuk tembaga (II) dibuktikan dengan hasil analisis sebesar $0,6 - 1,0 \text{ ppm}$, tetapi untuk unsur-unsur hara tersedia dalam keadaan baik. Tanah mempunyai kapasitas penyerapan logam meningkat sebanding dengan kenaikan pH, dan maksimal pada pH = $7 - 10$ yang disebabkan oleh gugus hidroksil yang terdapat pada permukaan tanah (Forth, 1995; LI, 2002; Sung, 2002).

2.4.1. Karakteristik Warna Tanah

Warna tanah merupakan ciri tanah yang nyata dan paling mudah ditentukan. Warna tanah merupakan pernyataan dari beberapa kondisi sebagai berikut :

1. Jenis dan kadar bahan organik,
2. Keadaan drainase dan aerasi tanah dalam hubungan dengan hidratisasi, oksidasi dan proses pelindian.
3. Tingkat perkembangan tanah
4. Kadar air tanah termasuk dalamnya permukaan air tanah
5. Terdapatnya bahan-bahan tertentu.

Pada umumnya bahan organik menyebabkan warna kelam, sedangkan stabilitas bahan organik (humus) menyebabkan warna semakin tua (hitam). Secara kualitatif warna tanah dibedakan atas :

1. Hitam : mengandung bahan organik yang stabil (humus).
2. Kelabu : mengandung berbagai bahan (kuarsa, kaolin dan mineral lempung).
3. kuning : mengandung oksida besi dengan drainase dan aerasi kurang baik.
4. Coklat : mengandung oksida besi dengan drainase dan aerasi yang baik.
5. merah : menunjukkan tanah telah mengalami perkembangan yang intensif karena temperatur yang relatif tinggi.

(Darmawijaya, 1997).

2.4.2. Karakteristik Tekstur Tanah.

Tekstur tanah merupakan satu-satunya sifat fisik tanah yang tetap dan tidak mudah dirubah oleh tangan manusia, kecuali ada penambahan dari tempat lain. Tekstur tanah merupakan perbandingan relatif tiga golongan partikel tanah (lempung, debu dan pasir) dalam suatu massa tanah. Klasifikasi fraksi partikel tanah

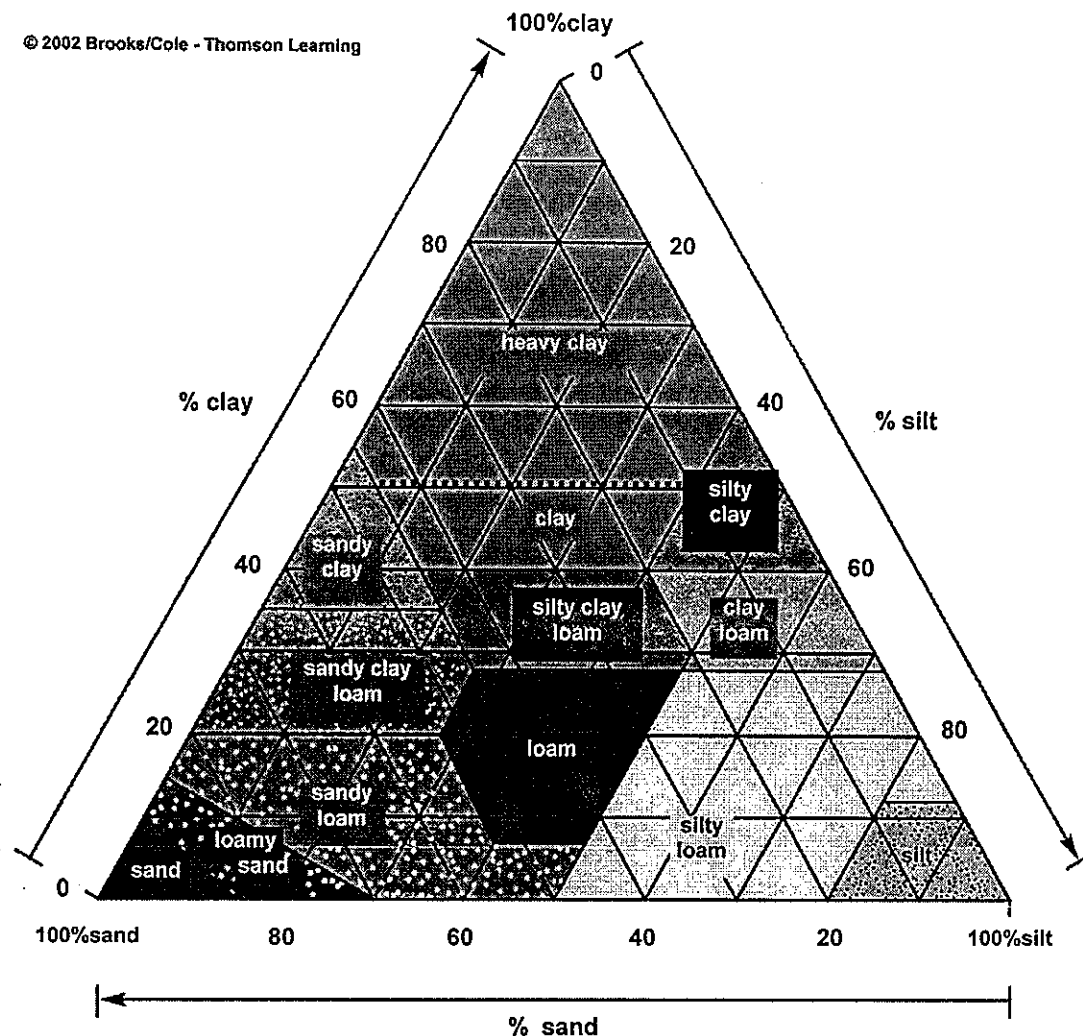
yang ada menurut sistem USDA (*United States Department of Agriculture*) dan sistem Internasional (*Atterberg*) yang ditunjukkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.4. Batas Ukuran Fraksi Tanah pada Klasifikasi Tanah

Sistem Atterberg		Sistem USDA	
Fraksi	Diameter, mm	Fraksi	Diameter, mm
Pasir kasar	2,0 – 0,63	Pasir sangat kasar	2,0 – 1,0
Pasir medium	0,63 – 0,20	Pasir kasar	1,0 – 0,5
Pasir halus	0,20 – 0,063	Pasir biasa	0,5 – 0,25
Debu kasar	0,063 – 0,020	Pasir halus	0,25 – 0,10
Debu medium	0,020 – 0,0063	Pasir sangat halus	0,10 – 0,05
Debu halus	0,0063 – 0,0020	Debu	0,05 – 0,002
Lempung/Liat kasar	0,0020 – 0,00063	Lempung/Liat (Cay)	< 0,002
Lempung/Liat medium	0,00063 – 0,0002		
Lempung/Liat halus	< 0,0002		

Sumber : Darmawijaya, 1997

Nama klas tekstur tanah diambil dari fraksi yang sebagian besar dikandung massa tanah sampel, jika campuran partikel lain dapat diabaikan karena sedikitnya, sehingga dikenal klas-klas tekstur tanah : tanah pasir kasar (*coarse sand*), tanah pasir (*sand*), tanah pasir sangat halus (*very fine sand*), tanah debu (*silt*), tanah lempung (*clay*) dan tanah lempung berat (*heavy clay*) disajikan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Pembatasan Fraksi Tekstur Tanah (Darmawijaya, 1997)

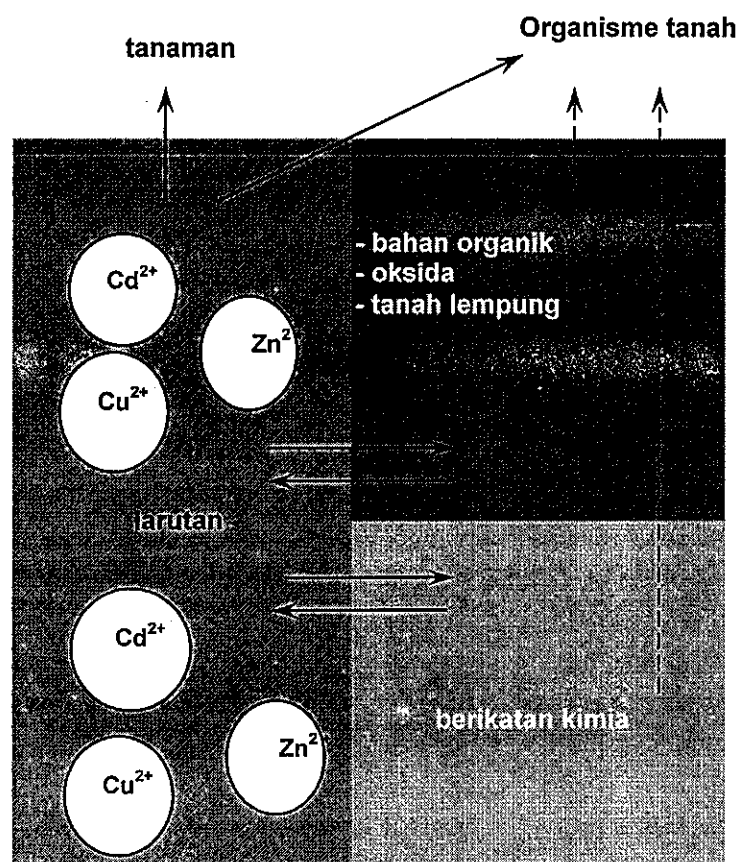
Jenis dan ukuran fraksi tekstur tanah suatu sampel tanah sangat mempengaruhi kemampuan menyerap kation (logam berat) (Tan, 1998).

2.5. Transfer Dan Transformasi Logam Berat Dalam Tanah

Proses dasar transfer logam berat dalam tanah dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu proses konveksi dan dispersi.

Proses konveksi adalah proses pencemaran logam berat yang terlarut didalam air tanah mempunyai kecepatan dan arah pergerakan yang sama dengan aliran air tanah. Konveksi ini tergantung pada kecepatan aliran air tanah yang dipengaruhi aliran piezometris, permeabilitas (konduktivitas hidrolis) dan porositas dalam air tanah.

Proses konveksi terdiri dari proses difusi dan proses adveksi. Proses difusi adalah proses pencampuran antara pencemar dengan air tanah secara molekuler dan tersebar dalam air berpindah dari daerah berkonsentrasi tinggi (aktifitas kimia) ke daerah dengan konsentrasi rendah. Proses adveksi adalah proses air tanah yang mengalir dan mengangkut zat terlarut (pencemar) yang memenuhi hukum Darcy (Waats, 1998). Pada proses dispersi zat pencemar (logam berat) mengalami perpindahan dengan proses penyebaran yang diakibatkan adanya kecepatan aliran dalam pori-pori tanah. Dispersi ini dapat terjadi dalam arah longitudinal dan arah transversal.

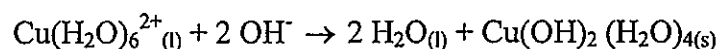
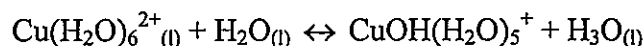


Gambar 2.2. Keberadaan Logam Berat Dalam Tanah (Johnson, 2000)

Berbagai macam transformasi logam berat dapat terjadi dalam tanah, baik secara fisika maupun kimia yaitu dengan membentuk senyawa yang larut dalam air, membentuk kompleks dengan berbagai macam molekul, presipitasi (pengendapan) dan kopresipitasi (pemampatan), inkorporasi ke dalam struktur mineral, akumulasi atau fiksasi ke dalam biologi, membentuk senyawa kompleks dengan agen pengkelat, dan adsorpsi dalam mineral liat atau koloid organik seperti ditunjukkan pada gambar 2.2.

2.5.1. Pembentukan senyawa kompleks yang larut dalam air.

Pembentukan senyawa kompleks logam berat dalam tanah dipengaruhi oleh pH tanah.



pada $\text{pH} < 8$ logam berat mudah membentuk senyawa kompleks, kecuali Mo dan Se terdapat dalam bentuk bebas (larut dalam air tanah) (Tan, 1998).

2.5.2. Presipitasi (pengendapan) dan kopresipitasi (pemampatan).

Pengendapan logam berat dalam tanah dipengaruhi oleh pH tanah, pada $\text{pH} > 8$ membentuk senyawa yang mudah mengendap dalam air sebagai endapan hidroksida dan endapan sulfur seperti pada tabel 2.5.

Tabel 2.5. Kelarutan Beberapa Logam Berat Dalam Senyawa Hidroksida dan Sulfur.

No	Senyawa	$K_{sp} (25)$
1	$\text{Cd}(\text{OH})_2$	$1,0 \times 10^{-14}$
2	$\text{Pb}(\text{OH})_2$	1×10^{-14}
3	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	2×10^{-19}
4	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	2×10^{-16}
5	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	3×10^{-17}
6	CdS	$3,6 \times 10^{-29}$
7	CuS	$8,5 \times 10^{-45}$
8	NiS	$1,4 \times 10^{-24}$
9	ZnS	$1,2 \times 10^{-22}$

Sumber : Jorgensen, 1994

Akumulasi logam berat sebagai endapan dalam tanah sering digunakan sebagai indikator terjadinya polusi, sebagai contoh konsentrasi Cu yang lebih besar daripada konsentrasi Zn dalam hewan maupun tanaman (Jorgensen, 1994).

2.5.3. Inkorporasi ke dalam struktur mineral

Logam berat dapat terikat dalam mineral-mineral tanah secara fisika yang berupa gabungan unsur utama dan unsur minor seperti disajikan pada tabel 2.6.

Tabel 2.6. Mineral Dalam Tanah Yang Mengikat Logam Berat

No	Nama Mineral	Unsur Utama	Unsur Minor
1	Olivin	Mg, Fe, Si	Ni, Co, Mn, Li, Zn, Cu, Mo
2	Andesin	Ca, Na, Al, Si	Sr, Cu, Ga, Mn
3	Garnet	Ca, Mg, Al, Si	Mn, Cr, Ga
4	Augit	Ca, Mg, Al, Si	Ni, Co, Mn, Sc, Li, V, Zn, Pb, Cu, Ga
5	Magnetit	Fe	Zn, Co, Ni, Cr, V

Sumber : Droste, 1997; Nugroho, 2001

Mineral olivin, andesin, garnet, augit an magnetit tersebar di lapisan bumi

2.5.4. Akumulasi atau fiksasi ke dalam makhluk hidup.

Logam berat juga dapat diakumulasi ke dalam jaringan makhluk hidup misalnya pada biota. Urutan selektivitas plankton terhadap logam transisi bervalensi dua adalah



sedangkan pada ganggang mempunyai urutan afinitas

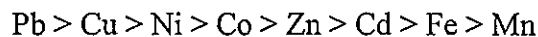


(Nugroho, 2001).

2.5.5. Pembentukan Senyawa Kompleks dengan agen pengkelat

Logam berat dengan senyawa organik dapat membentuk senyawa kompleks (kelat) dengan asam fulfat dan humat, sehingga membebaskan Al dan Fe dari mika, felspar

dan kaolinit dan membebaskan H^+ yang menyebabkan kenaikan keasaman tanah (Tan,1998). Stabilitas kelat organik dengan beragam kation bervalensi dua (Reynolds, 1982) mengikuti urutan :



Pada tabel 2.7 terlihat bahwa stabilitas kelat organik ini sangat mempengaruhi kelarutan logam berat dalam air tanah (Jorgensen, 1994).

Tabel 2.7. Konstanta Stabilitas Senyawa Kompleks dalam Air

No	Kation	Bahan Organik Pengkelat			
		<i>Glycine</i>	<i>ATP</i>	<i>Glutathione</i>	<i>Asam Asetat</i>
1	Ca^{2+}	1,31	3,60		0,39
2	Mg^{2+}	3,44	4,00		0,28
3	Zn^{2+}	5,52	4,85	8,30	1,57
4	Cd^{2+}	4,80		10,50	1,70
5	Cu^{2+}	8,62	6,13		2,24

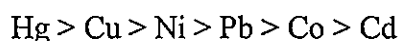
Sumber : Jorgensen, 1994

Salah satu proses penawar sifat racun logam berat dapat dilakukan dengan pembentukan kompleks logam organik misalnya dengan proses metilasi. Proses metilasi dilakukan oleh mikroorganisme dengan proses pengkelatan logam berat oleh metil, sehingga disebut proses produksi senyawa logam organik mikroba. Terdapat tiga macam proses metilasi yaitu transfer metil dari *S-adenosymethionine* dengan unsur As, Se, Te dan Sb, transfer metil dari *methylcobaltamine* dengan unsur Hg, Ga, Sn dan Pb, dan transfer metil dari *N-5-methyltetrahydrofolate* untuk semua jenis logam yang bermuatan positif (Nugroho, 2001 dan Manahan, 1984).

2.5.6. Penjerapan dalam mineral liat atau koloid organik.

Tanah mempunyai kemampuan mengikat secara fisik terhadap logam berat. Kemampuan tanah mengikat logam berat tergantung pada ukuran partikel tanah

(semakin kecil atau liat semakin kuat mengikat logam berat) dan jenis mineral tanah (tanah liat lebih kuat daripada pasir). Logam berat dapat pula diadsorpsi dan diakumulasikan dalam jaringan makhluk hidup (asam amino). Kemampuan beberapa logam berikatan dengan asam amino mengikuti urutan sebagai berikut :



Cadmium menunjukkan afinitas terhadap porfirin, purine, sistein dan histidin (Nugroho, 2001).

2.6. Penjerapan Logam Dengan Tanah

Penjerapan logam sangat dipengaruhi oleh afinitas kation yang tergantung pada komposisi larutan, sifat kimia logam, sifat permukaan mineral dan keberadaan bahan organik tercantum dalam tabel 2.8 dan tabel 2.9.

Tabel 2.8 Mineral-Mineral Tanah Yang Penting Dan Sifat-Sifatnya

No	Jenis Ikatan	Nama Mineral	Luas Permukaan Mineral	KTK*	Jenis Muatan**
1	Silikat	<i>Kaolinite</i>	10 - 20	10 - 150	PD
2		<i>Montmorillonite</i>	600 - 800	900 - 1200	PERM,PD
3		<i>Vermiculite</i>	600 - 800	1200 - 1500	PERM,PD
4		<i>Chlorites</i>	70 - 150	100 - 400	PERM,PD
5	Oksida atau Hidroksida	<i>Aluminium</i>	20	variasi	PD
6		<i>Iron</i>	2 - 200	variasi	PD
7		<i>Manganese</i>	30 - 500	variasi	PD
8	Silikat Tak Beraturan	<i>Allophane</i>	145	200 - 700	PD
9		<i>Imogolite</i>	1000	200 - 700	PD
10	Bahan Organik			1000 - 4000	PD

* KTK = kapasitas tukar kation (mmol(+) kg-1) struktur

**PERM = muatan tetap

** PD = muatan tergantung pH.

Sumber : Papini *et.al*, 2001

Mineral-mineral tanah peranan yang penting karena mempunyai luas permukaan yang besar (koloid) dan mudah terionkan dalam larutan pada saat dilarutkan atau mudah melakukan reaksi pertukaran ion. Oleh karena itu diperlukan pengetahuan tentang mineral-mineral tanah yang penting dan sifat-sifatnya (luas permukaan, kapasitas Penjerapan kation (KTK) dan jenis muatan senyawa yang dihasilkan.

Tabel 2.9. Jenis Tanah dan Kapasitas Tukar Kationnya

No	Jenis Tanah	Kapasitas Tukar Kation (KTK), mek/100 g tanah kering
1.	Pasir	1 – 5
2.	Tanah liat berpasir halus	5 – 10
3.	Tanah liat dan lumpur tanah liat	5 – 15
4.	Tanah liat berlempung	15 – 30
5.	Tanah lempung	> 30

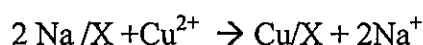
Sumber : Tchobanoglous *et. al*,1993

Kapasitas penjerapan kation (KTK) tanah terhadap logam berat dalam larutan (limbah cair) dipengaruhi oleh perbedaan konsentrasi logam berat dalam air dan tanah, karakteristik lindi (laju alir, rapat massa, pH), percepatan gravitasi, permeabilitas, porositas dan tinggi unggun tanah, diameter dan kekasaran pipa serta jenis kation logam berat.

Pada umumnya logam berat diambil tanah dari larutan dengan reaksi penjerapan kation sehingga bahan-bahan organik yang pertama-tama diadsorpsi. Kemampuan tanah mengikat logam berat dalam lindi merupakan fungsi kapasitas penjerapan kation (KTK) yaitu miliequivalen (meq) kation dalam 100 gram tanah. KTK tanah sangat tergantung pada jumlah mineral dan bahan koloid organik dalam tanah. Keasaman tanah mempengaruhi harga KTK tanah, pada pH = 7 berkisar 0 – 200 meq/100 g koloid organik, 40 – 80 meq/100 g tanah liat (*montmorillonite*) dan 5 – 20 meq/100 g tanah liat (mineral kaolinit). Penurunan pH akibat adanya

karbon monoksida dalam tanah (pH = 4) dapat menurunkan harga KTK sebesar 10 % (LI Xue-Yuan *et.al*, 2002). Si^{+4} and Al^{+3} pada tanah liat dapat ditukar dengan Fe^{+2} , dengan meninggalkan ion bertanda negatif dan terserap pada lapisan penjerap merupakan ion positif (CEC, meq/100 gram tanah liat kering) (Tchobanoglous *et.al*, 1993).

Menurut Wentz (1995) tanah lempung secara keseluruhan bermuatan negatif yang mengandung alumina dan silika. Sebagian besar tanah lempung menjerap kation, kemudian ditempatkan pada posisi lapisan dalam antara alumina-silika, seperti pada *montmorillonite* atau pada partikel di permukaan seperti dalam *kaolinite*. Pada saat partikel tanah lempung ditempatkan dalam lingkungan berair, suatu fraksi dari lapisan dalam atau kation-kation di permukaan sangat cepat digantikan oleh kation larutan tanpa mempengaruhi struktur bahan tanah lempung. Penjerapan logam tembaga (II) dalam larutan dengan ion-ion Na dalam *Na montmorillonite* dengan reaksi pertukaran ion sebagai berikut :



dimana : X : suatu satuan sell *montmorillonite*

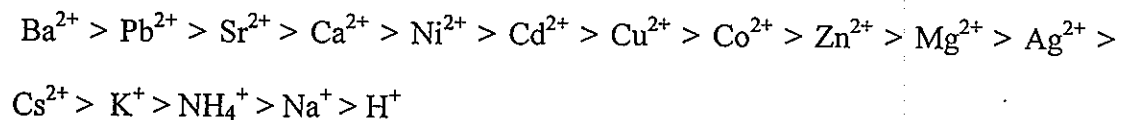
$$K_{\text{Na}^{+}}^{\text{Cu}^{2+}} = \frac{[\text{CuX}][\text{Na}^{+}]^2}{[\text{NaX}][\text{Cu}^{2+}]}$$

$$= \left[\frac{\text{Cu}}{\text{Na}} \right]_{\text{montmorillonite}} \times \left[\frac{\text{Na}}{\text{Cu}} \right]_{\text{larutan}}$$

makin besar harga K, makin banyak ion Cu yang terambil dalam *montmorillonite* (Bohn, 1979).

Selektivitas merupakan kemudahan terjerapnya suatu logam dibandingkan dengan logam lain dapat dijelaskan sebagai reaksi kompleksasi masing-masing logam dengan

suatu gugus fungsional di permukaan penjerap. Kompleksasi di dalam bola (partikel) tergantung pada konfigurasi elektron kation yang ada dan zat terlarut, sedangkan kompleksasi di luar bola tergantung banyaknya valensi dan muatan permukaan atau mobilitas zat terlarut. Difusi tergantung pada valensi logam terlarut dan muatan permukaan penjerap. Urutan selektivitas kation pada sistem penjerapan dengan tanah sebagai berikut :



(Wentz, 1995).

Penjerapan kation pada umumnya berjalan dengan cepat dalam orde menit sampai jam, namun diperlukan pengamatan yang sangat lama untuk mendapatkan kondisi kesetimbangan. Penjerapan kation dibagi menjadi dua yaitu pertukaran ion di luar lapisan bola (partikel) dan difusi disertai reaksi kompleksasi yang sangat cepat, sehingga kinetika penjerapan dikontrol oleh laju difusi dan penjerapan ion khusus yang membentuk senyawa dalam bola (partikel) yang membutuhkan waktu yang sangat lama untuk mencapai kesetimbangan.

Reaksi kompleks yang terjadi pada penjerapan tembaga pada permukaan tanah lempung sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.10.

Tabel 2.10. Reaksi Komplek Tembaga (II) di Permukaan Tanah

Reaksi	Log K
$\text{SiOH}^{2+} \Leftrightarrow \text{SiOH} + \text{H}^+$	- 1,75
$\text{SiOH} \Leftrightarrow \text{SiO}^- + \text{H}^+$	- 6,25
$\text{SiOH} + \text{Na}^+ \Leftrightarrow (\text{SiO}^- \text{-Na}^+)^0 + \text{H}^+$	- 3,50
$\text{AlOH}^{2+} \Leftrightarrow \text{AlOH} + \text{H}^+$	- 5,70
$\text{AlOH} \Leftrightarrow \text{AlO}^- + \text{H}^+$	- 11,4
$\text{AlOH} + \text{Na}^+ \Leftrightarrow (\text{AlO}^- \text{-Na}^+)^0 + \text{H}^+$	- 9,15
$\text{AlOH} + \text{ClO}_4^- + \text{H}^+ \Leftrightarrow (\text{AlOH}^{2+} \text{-ClO}_4^-)$	- 7,90
$\text{SiOH} + \text{Cu}^{2+} \Leftrightarrow (\text{SiOH} \text{-Cu}^{2+})^0$	0,92
$\text{SiOH} + \text{Cu}^{2+} \Leftrightarrow (\text{SiO} \text{-Cu}^{2+})^+ + \text{H}^+$	- 5,52
$\text{SiOH} + \text{Cu}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow (\text{SiO} \text{-CuOH}^+)^0 + 2\text{H}^+$	- 11,71
$2(\text{SiOH}) + \text{Cu}^{2+} \Leftrightarrow ((\text{SiO}^-)_2\text{Cu}^{2+})^0 + 2\text{H}^+$	- 11,19
$\text{AlOH} + \text{Cu}^{2+} \Leftrightarrow (\text{AlOH} \text{-Cu}^{2+})^0$	4,34
$\text{AlOH} + \text{Cu}^{2+} \Leftrightarrow (\text{AlO} \text{-Cu}^{2+})^+ + \text{H}^+$	- 2,1
$\text{AlOH} + \text{Cu}^{2+} + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow (\text{AlO} \text{-CuOH}^+)^0 + 2\text{H}^+$	- 8,29
$2(\text{AlOH}) + \text{Cu}^{2+} \Leftrightarrow ((\text{AlO}^-)_2\text{Cu}^{2+})^0 + 2\text{H}^+$	- 7,0

Sumber : Yim., 2003.

Mekanisme penyerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah melalui empat tahap berturut-turut yaitu :

1. difusi atom tembaga (II) dalam larutan ke permukaan bagian luar partikel tanah.
2. difusi atom tembaga (II) melalui pori tanah yang berukuran kecil yang disebut makropori
3. difusi atom tembaga (II) ke dalam pori tanah yang berukuran sangat kecil disebut mikropori (molekular) dan
4. penjerapan atom tembaga (II) ke dalam suatu posisi yang aktif

(Ybarra, 2003)

Penjerapan isothermal tembaga (II) dengan tanah (kurva S) terjadi karena afinitas zat terlarut pada permukaan tanah lebih kecil daripada zat terlarut dalam air, tembaga (II), sehingga terjadi interaksi kooperatif dipermukaan yang karena peningkatan jumlah tembaga (II) yang teradsorpsi meningkatkan stabilitas bahan organik di permukaan.

Penjerapan isothermal secara *batch* telah dikemukakan dalam dua model yaitu model Langmuir dan Freundlich.

a. Model Penjerapan Isothermal Langmuir :

Penjerapan kation isothermal dengan tanah secara *batch* seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. dapat didekati dengan persamaan :

$$V(C_o - C) = m(x - x_o) \quad (1)$$

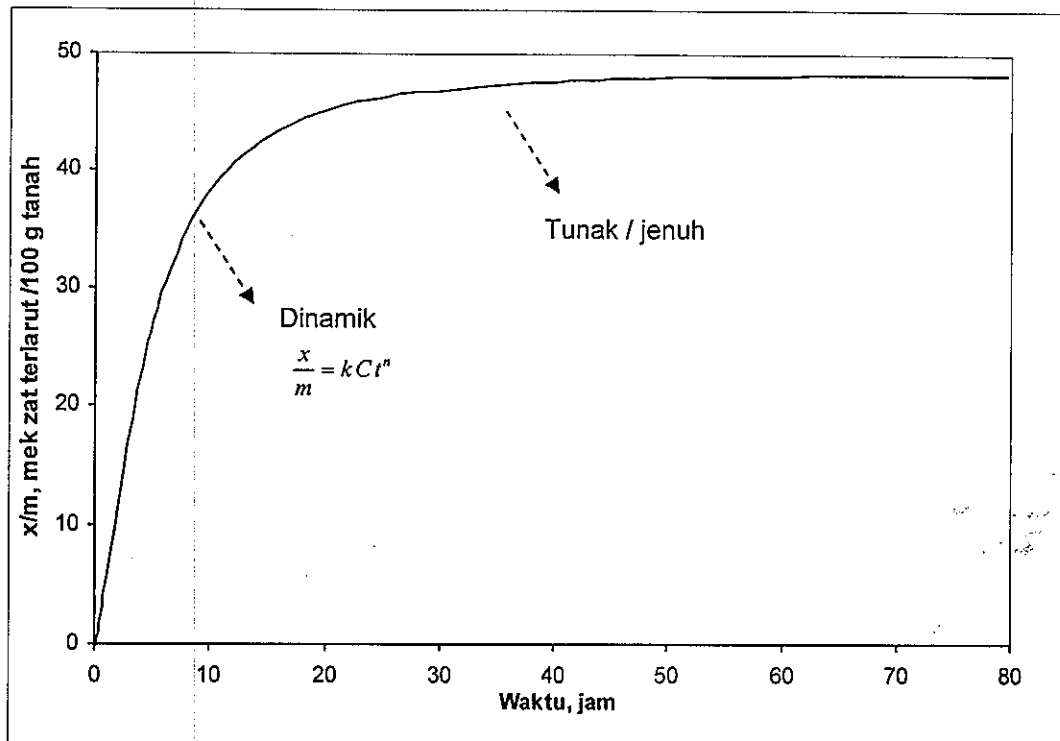
pada keadaan awal $x_o = 0$, maka :

$$x = \frac{(C_o - C)V}{m} \quad (2)$$

$(1 - \frac{x}{m})$: fraksi permukaan yang masih kosong pada kesetimbangan

$$k_1 C (1 - \frac{x}{m}) = k_2 (\frac{x}{m}) \quad (3)$$

$$\frac{x}{m} = \frac{k_1 C}{1 + k_2 C} \quad (4)$$



Gambar 2.3. Hubungan Waktu Dengan Zat Terlarut Terjerap Tanah Secara Batch (Reynolds, 1982)

Model isothermal Langmuir menganggapa bahwa penjerapan maksimal sebanding dengan kejenuhan lapisan tunggal molekul terlarut (tembaga) di partikel bahan penjerap, energi penjerapan konstan dan tidak terjadi perpindahan zat terjerap antar bidang di permukaan (Figueiredo, 2000).

Pada konsentrasi zat terlarut dalam larutan yang tinggi, harga $k_2 C$ mencapai suatu nilai yang mengakibatkan faktor 1 dapat diabaikan, sehingga persamaan diatas menjadi :

$$\frac{x}{m} = \frac{k_1}{k_2} = k \quad (5)$$

Persamaan 3 menjelaskan bahwa pada konsentrasi zat terlarut yang tinggi, permukaan penjerapn menjadi jenuh dan jerapan mencapai maksimal.

a. Model Penjerapan Isotermal Freundlich :

$$\frac{x}{m} = KC^{1/n} \quad (6)$$

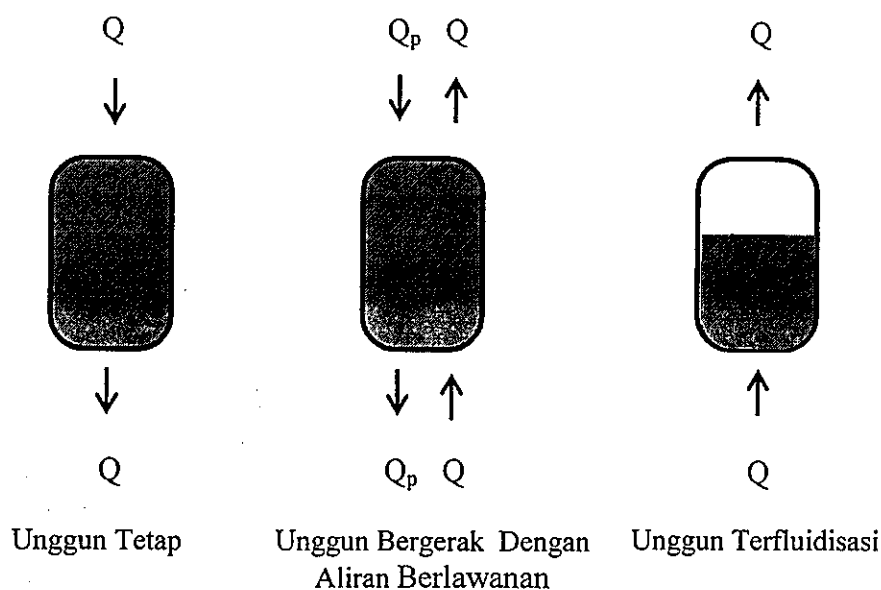
Persamaan Freundlich berlaku pada proses penjerapan yang berlangsung dalam larutan encer, isotermal dan biasanya untuk menjelaskan penjerapan di permukaan dengan panas penjerapan yang heterogen.. Nilai $1/n$ biasanya berkisar antara 0,2 sampai dengan 0,7 dengan kurva berbentuk parabolik. Untuk memudahkan penerapan dipergunakan uji *goodness of fit* (R^2) atau kurva berupa garis lurus, sehingga persamaan (6) menjadi :

$$\ln\left(\frac{x}{m}\right) = \frac{1}{n}\ln C + \ln k \quad (7)$$

Keterbatasan model penjerapan isotermal antara lain :

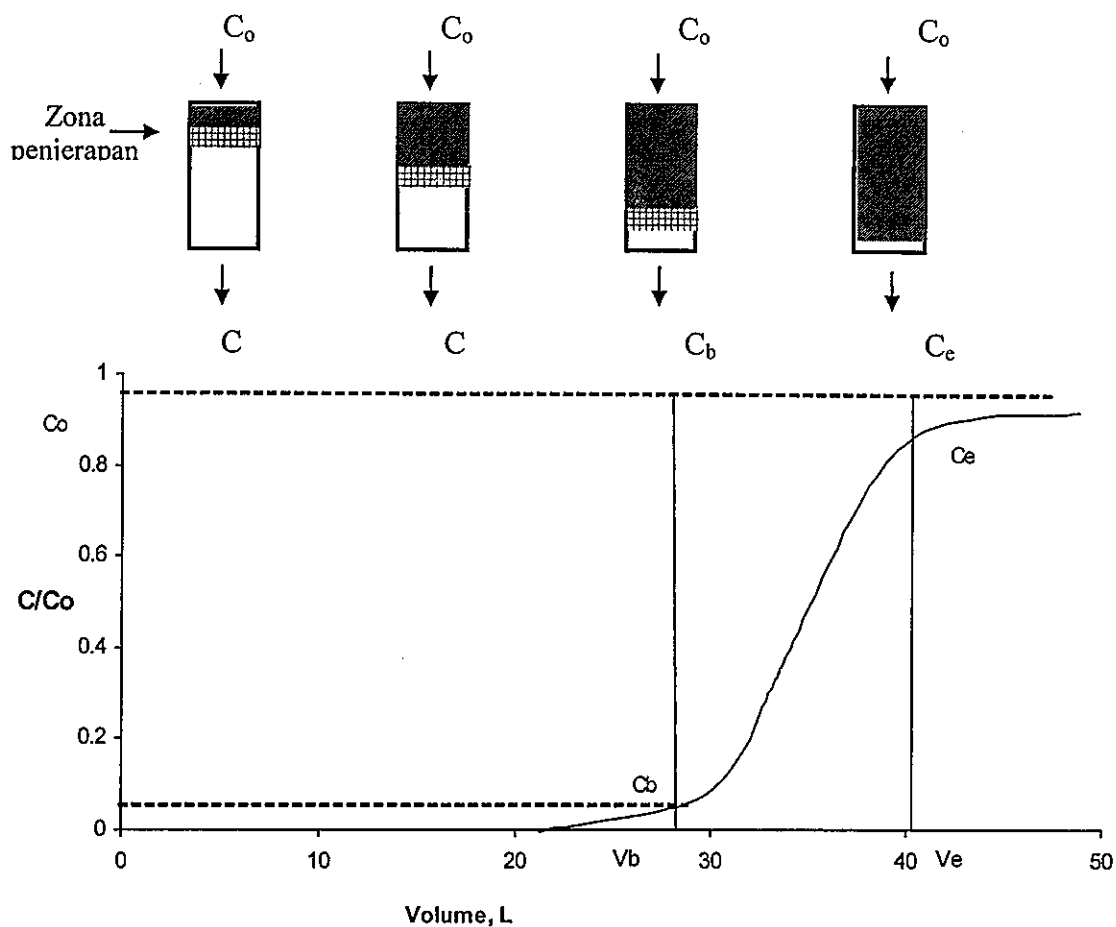
1. parameter k hanya berlaku untuk tempat tertentu, sehingga untuk tempat yang lain harus dilakukan penelitian ulang.
2. pengukuran skala laboratorium yang homogen sering tidak sesuai dengan pengukuran skala di lapangan yang sangat heterogen.
3. kurang sesuai untuk penjerapan geokimia, karena adanya pengendapan beberapa logam transisi.
4. terdapat beberapa masalah yang sulit dalam diinterpretasikan pada penjerapan isotermal antara lain : keberadaan ligan kompleks yang mempengaruhi penjerapan, sering terjadi kompetisi diantara logam (selektivitas), sulit mengidentifikasi fase penjerapan yang dominan, perubahan struktur dalam fase padat yang mendadak dapat mempengaruhi penjerapan

Dalam aplikasinya penjerapan dapat dilakukan secara kontinyu dengan sistem unggun tetap, unggun bergerak dengan aliran berlawanan dan unggun terfluidisasi. seperti yang ditunjukkan gambar 2.4.



Gambar 2.4. Penjerap Dengan Aliran Kontinyu (Droste, 1997)

Sistem unggun tetap lebih banyak dipergunaka, karena lebih praktis dan lebih mudah dalam pengoperasiannya. Larutan yang mengandung bahan terjerap masuk pada puncak penjerap unggun tetap dan di puncak ini akan mulai terjadi penjerapan bahan terjerap sampai tingkat kejenuhan sebanding dengan konsentrasi aliran larutan masuk unggun. Pada lapisan penjerap yang lebih rendah, terjadi akumulasi bahan terjerap lebih rendah, karena konsentrasi bahan terjerap dalam larutan turun bahkan pada suatu lapisan mendekati nol, sehingga tidak terjadi akumulasi bahan terjerap pada penjerap. Pada zona yang mempunyai konsentrasi bahan terjerap dalam larutan turun dari harga aliran larutan masuk unggun menjadi sangat kecil disebut zona adsorpsi dan zona ini bergerak ke arah bawah melalui unggun penjerap ditunjukkan dengan gambar 2.5..

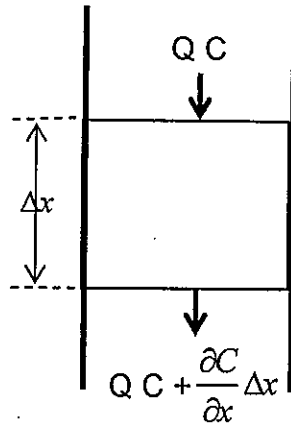


Gambar 2.5. Kurva Penjerapan Secara Kontinyu (*Breakthrough Curve*) (Droste,1997).

Keadaan ini yang merupakan hubungan konsentrasi larutan keluar sebagai fungsi volume larutan yang melewati unggun penjerap.

Konsentrasi bahan terjerap pada kurva bentuk S pada zona adsorpsi dengan bagian akhir berupa asymptot mendekati nol dan larutan yang meninggalkan unggun penjerap mempunyai konsentrasi sama dengan C_0 . Kurva ini ini yang dikenal sebagai kurva titik tembus (*breakthrough curve*). Konsentrasi zat terjerap dalam larutan pada titik tembus (C_b) dan volume larutan yang diolah pada titik tembus (V_b) dipilih sebagai dasar kriteria larutan keluar unggun penjerap yang aman. Konsentrasi pada saat pembuangan (C_e) biasanya $0,90 - 0,99 C_0$, tergantung pada bentuk kurva S, apabila perubahannya tidak mendadak (*asymptotic*) diambil $0,90 C_0$, tetapi kalau tidak demikian diambil $0,99 C_0$.

Ditinjau suatu elemen volume unggun pada gambar 2.6, pergerakan zona adsorpsi ke arah bawah merupakan arah yang positif dan dapat disusun suatu neraca massa pada sekitar zona tersebut :



Gambar 2.6. Elemen Volume Unggun Penjerap

$$N = \frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = -k' \frac{C - C_s}{x} = K'(C_s - C) \quad (8)$$

semua hambatan (k') berasal dari aliran dan difusi, persamaan diatas dengan V (volume), menjadi :

$$r = \frac{k\alpha'}{V} (C_s - C) = K'\alpha(C_s - C) \quad (9)$$

$$QC - Q\left(C + \frac{\partial C}{\partial x} \Delta x\right) + r \Delta V = \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} \Delta V \quad (10)$$

Substitusi $A \Delta x$ pada ΔV dan proses berlangsung secara tunak maka persamaan 10 menjadi :

$$\frac{Q}{A} \frac{dC}{dx} = v \frac{\partial C}{\partial t} = k\alpha(C_s - C) \quad (11)$$

$$F = \frac{\rho Q}{A} ; m = \rho_p V = \rho_p A D \text{ dan } dm = \rho_p A dD$$

$$F = \frac{dC}{dx} = k\rho \frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial t} = k_d \alpha (C_s - C) \quad (12)$$

$$\rho_p F \frac{dC}{dm} = \frac{k}{V} \alpha (C - C_s) \quad (13)$$

Persamaan (13) dapat diselesaikan dengan kondisi batas (*Boundary condition*) :

$C = 0 \rightarrow m = 0$ dan $C = C_s, \rightarrow m = m$ dengan hasil :

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{1 + e^{\frac{k_a}{Q}(C_s m - C_o V)}}$$

$$\frac{C}{C_o} - 1 = e^{\frac{k_a}{Q}(C_s m - C_o V)}$$

$$\ln \left(\frac{C_o}{C} - 1 \right) = \frac{k_a C_s m}{Q} - \frac{k_a C_o V}{Q} \quad (14)$$

Persamaan (12) dikenal sebagai persamaan Thomas (dalam bentuk linier).

(Wentz, 1995; Droste, 1997)

Penjerapan logam berat dengan tanah tidaklah sulit karena lebih dari 50 % logam berat dalam larutan mudah dijerap tanah (Matagi, *et.al.*, 1998). Penelitian penjerapan boron (B) dalam larutan dengan 20 macam tanah di Punjab India telah dilakukan oleh Arora dan Chahal (2002) yang menyatakan bahwa kesetimbangan dicapai setelah 24 jam dan merupakan fungsi Power serta memenuhi model Freundlich dengan harga $K = 1,086 - 5,445 \mu g g^{-1}$. Pada pH 4 -8 terjadi penjerapan Pb (II) dengan kalsium karbonat dalam reaktor batch dan kontinu yang maksimal, yang disebabkan oleh adanya gugus hidroksida pada permukaan partikel (Sung *et.al.*, 2002) dan kapasitas tukar kation beberapa mineral lempung sangat dipengaruhi oleh jenis mineral penjerap. Ukuran diameter ion logam mempengaruhi tingkat selektivitas penjerapan, semakin kecil diameter ion mempunyai tingkat selektivitas yang semakin besar (Yavus *et.al.*, 2003).

2.7. Originalitas Penelitian

Penelitian-penelitian terdahulu telah mengetahui pengaruh pH, temperatur, konsentrasi, laju alir, selektivitas dan jenis kation, jenis media penjerapan logam dari daerah tertentu, namun belum terdapat penelitian yang menyebutkan tentang komposisi tanah berlempung warna hitam, tanah lempung berpasir warna coklat dan tanah pasir warna merah sebagai bahan penjerap tembaga dalam air limbah.

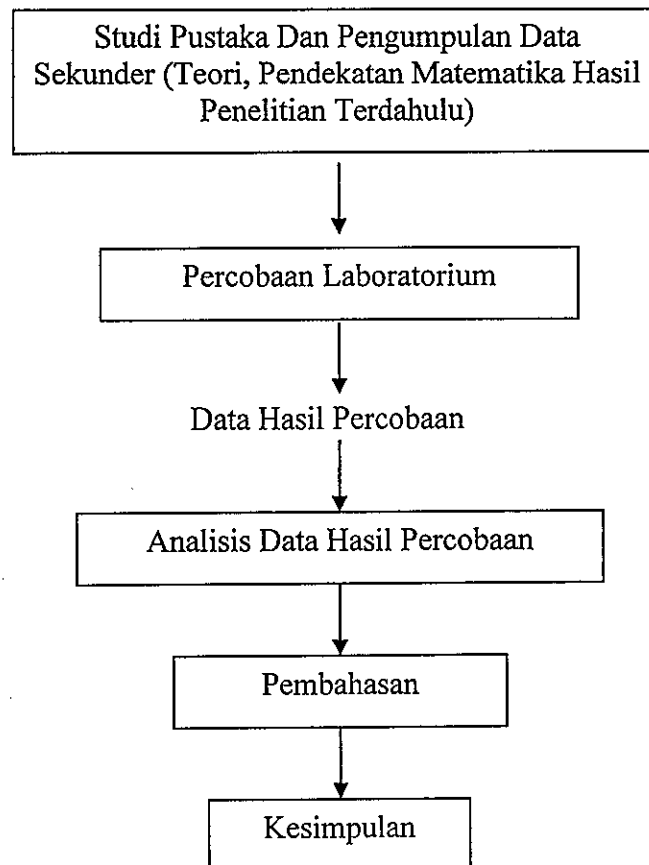
2.8. Hipotesis

1. Kemampuan penjerapan tiga jenis tanah terhadap tembaga (II) berbeda
2. Model penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah dapat diterapkan untuk air limbah.
3. Tanah dapat dipergunakan sebagai bahan pengolah air limbah yang mengandung tembaga.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Rancangan Penelitian

Penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah dalam gelas beker (*batch*) dan unggun tanah dalam suatu kolom (kontinyu) skala laboratorium dengan tahapan : studi pustaka dan pengumpulan data sekunder permasalahan yang akan diteliti meliputi teori, pendekatan matematika dan hasil-hasil yang telah ditemukan pada penelitian sebelumnya, percobaan laboratorium untuk mengamati variabel yang diteliti, pengolahan data hasil percobaan analisis dan pembahasan hasil pengolahan data. Dalam bentuk diagram alir ditunjukkan gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini untuk mengetahui kemampuan tanah sebagai penjerap tembaga (II) dalam larutan (sintetis) dengan tiga jenis tanah secara *batch* dan konstanta laju penjerapan keseluruhan dengan tiga jenis tanah pada model unggun tetap. Hasil yang diperoleh pada penelitian penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah berlempung warna hitam, tanah lempung berpasir warna coklat dan tanah pasir warna merah diharapkan dapat diterapkan untuk air limbah yang mengandung tembaga.

3.3. Tata Kerja Penelitian

Penjerapan secara *batch* dengan variable bebas meliputi jenis tanah, berat tanah, konsentrasi dan waktu, sedangkan variable tidak bebas jumlah tembaga (II) yang terjerap dalam tanah dan variabel kendali berupa temperatur, pengadukkan dan homogenitas tanah. Penjerapan secara kontinyu dengan variable bebas berupa jenis dan berat tanah, diameter unggun, laju alir, dan konsentrasi, sedangkan variabel tidak bebas adalah konsentrasi tembaga (II) yang keluar dari unggun serta variabel kendali porositas tanah, ukuran partikel, permeabilitas dan pengadukan.

3.3.1. Alat dan Bahan Yang Dipergunakan.

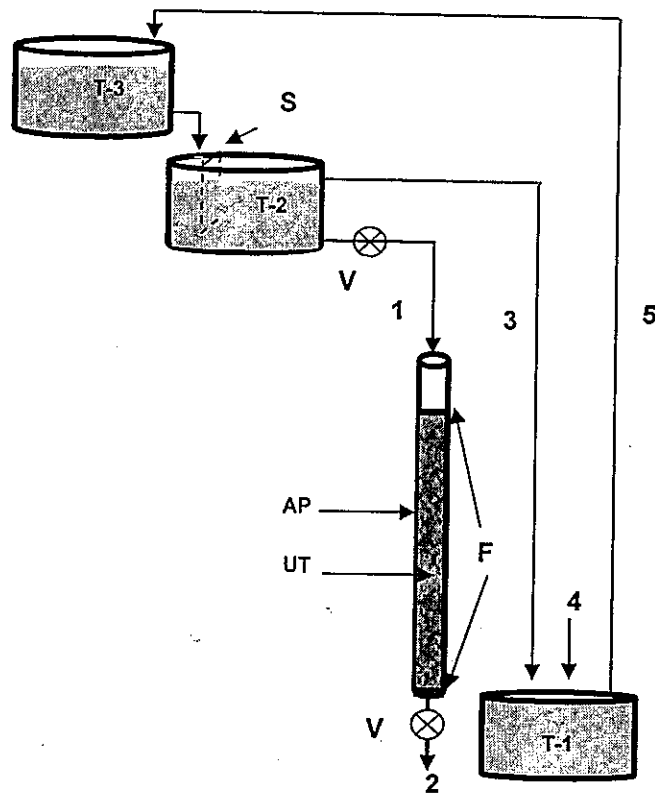
Bahan Yang Dipergunakan :

1. Tanah berlempung warna hitam (dari Sumberlawang Sragen), tanah lempung berpasir warna coklat (dari Ngemplak Boyolali) dan tanah pasir warna merah (dari Nogosari Boyolali) diambil pada kedalaman 0 – 100 cm.
2. Tembaga nitrat, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (*Emerck*, kemurnian 99,98 %)
3. Air limbah yang mengandung tembaga (Kerajinan tembaga di Cepogo Boyolali).
4. Air suling (daya hantar listrik $0,1 \mu \text{S/cm}$ dan kadar $\text{Cu}^{2+} = 0,0277 \text{ ppm}$)

Alat Yang Dipergunakan:

1. Alat pengambil sampel tanah (*Soil Auger*)
2. Pipa plastik transparan ($D_n = 0,5$ inchi dan $L = 75$ cm).
3. Wadah dari bahan plastik untuk larutan tembaga (volum = 20 liter)
4. Erlenmeyer
5. Gelas ukur
6. Labu takar
7. Pipet volum
8. Pipet ukur
9. Gelas beker
10. Botol sampel
11. Filter

Adapun susunan rangkaian alat utama ditunjukkan pada gambar 3.2.



Keterangan :

1. Umpan larutan tembaga nitrat (air limbah) ke unggun tanah
2. Sampel larutan keluar unggun
3. Limpasan larutan tembaga nitrat (air limbah)
4. Larutan tembaga nitrat (air limbah) segar untuk *make up*.
5. Larutan tembaga nitrat (air limbah) dikembalikan ke tanki T-3

AP : Alat Penjerap	S : sekat	F : filter
UT : unggun tanah	V : pengatur laju alir	T : tanki

Gambar 3.2. Rangkaian Alat Penjerapan Dengan Unggun Tanah Secara Kontinyu

3.3.2. Cara Kerja

Analisis Karakteristik Bahan Penelitian

a. Tanah

Analisis tanah meliputi jenis tanah, tekstur, komponen penyusun, berat jenis, kadar air pada kering temperatur kamar.

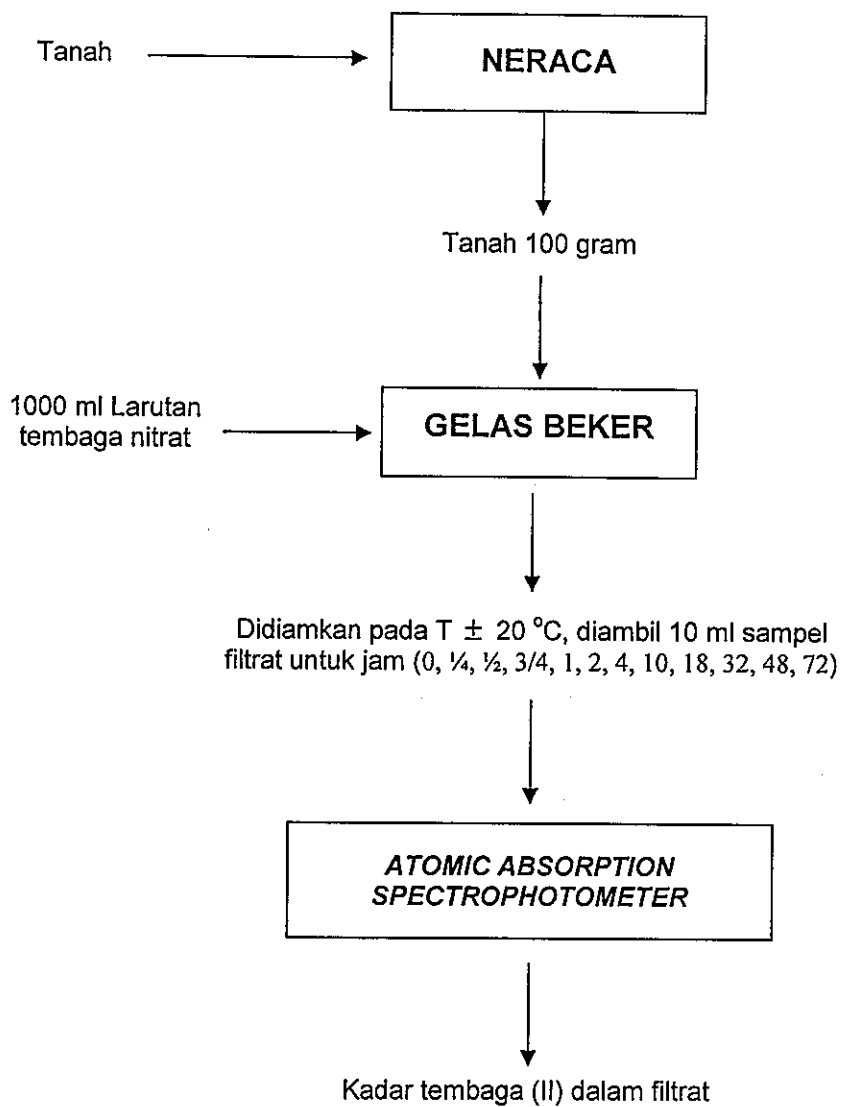
b. Air Limbah

Analisis kualitatif dan kuantitatif logam berat

Penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah secara *batch*.

- a. Ditimbang 100 gram tanah, dimasukkan ke dalam gelas beaker.
- b. Ditambahkan 1000 ml larutan tembaga nitrat 2 ppm
- c. Gelas beaker didiamkan dalam air yang dipertahankan temperaturnya (± 20 °C) selama 72 jam
- d. Sampel filtrat sebanyak 10 ml diambil pada jam ke (0, ¼, ½, ¾, 1, 2, 4, 10, 18, 32, 48, 72) kemudian dipisahkan dengan dekantasi dan *centrifuge* didapat filtrat $\pm 5-7$ ml
- e. Dilakukan analisis kadar tembaga dalam masing-masing sampel filtrat (mg/L) dengan *Atomic Absorption Spectrophotometer*.
- f. Langkah percobaan a s/d e diulang untuk larutan tembaga dengan konsentrasi yang lain (4, 7, 10, 13) ppm dengan pertimbangan konsentrasi air limbah 8,01 ppm dan baku mutu air limbah pelapisan / kerajinan tembaga 3 ppm.

Adapun diagram percobaan penjerapan secara *batch* ditunjukkan pada gambar 3.3.

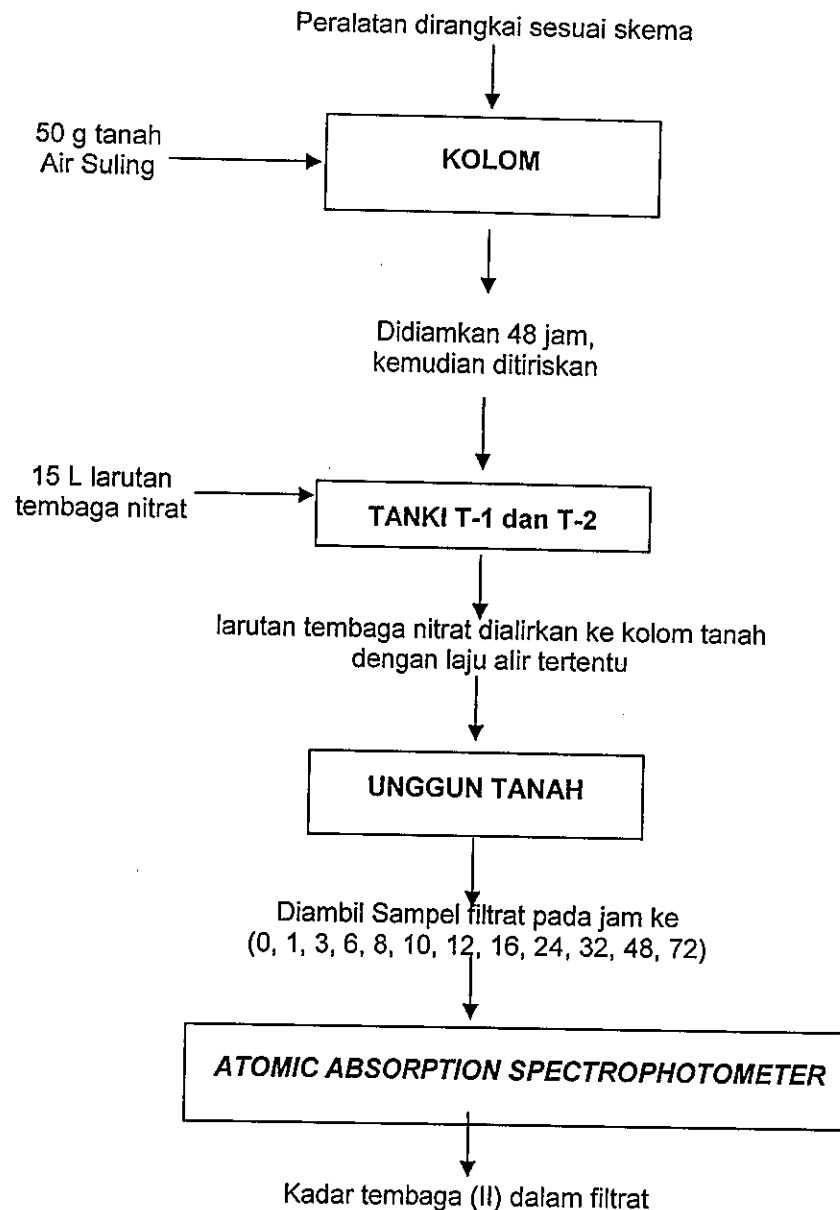


Gambar 3.3. Diagram Alir Percobaan Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah Secara *Batch*

Penjerapan Tembaga (II) Dalam Larutan Dengan Unggun Tanah Secara Kontinyu.

- a. Peralatan yang akan kontak dengan larutan tembaga direndam asam nitrat 10 %, kemudian dibilas dengan air suling dan dirangkai seperti gambar 3.2.
- b. Tanah seberat 50 gram dimasukkan ke dalam kolom penjerap dan dijenuhkan dengan air suling selama 48 jam
- c. Dimasukkan 20 liter larutan tembaga nitrat 2 ppm ke tanki T-1, kemudian dialirkan ke tanki T-2 .
- d. Larutan tembaga dialirkan pada laju alir tertentu (1000 ml per hari)
- e. Diambil sampel pada jam ke (0, 1, 3, 6, 8, 10, 12, 16, 24, 32, 48, 72)
- f. Dilakukan analisis kadar tembaga dalam sampel (C) dengan *Atomic Absorption Spectrophotometer*.
- g. Percobaan dihentikan saat kadar tembaga dalam sampel mendekati kadar tembaga dalam larutan umpan.
- h. Langkah percobaan a s/d g diulang untuk larutan tembaga dengan konsentrasi yang lain (4, 7, 10, 13) ppm dan pada laju alir (2000, 3000) ml per hari

Adapun diagram percobaan penjerapan secara kontinyu disajikan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram Alir Percobaan Penjerapan Dengan Unggun Tanah Secara Kontinyu

3.4. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan menggunakan model penjerapan isothermal Langmuir dan Freundlich untuk penjerapan secara *batch* dan persamaan Thomas untuk penjerapan secara kontinyu (*Breakthrough curve*). Pengolahan data menggunakan *Microsoft Excel Program*.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Air Limbah dan Tanah

4.1.1. Kandungan Logam Berat Air Limbah

Air Limbah kerajinan tembaga di Cepogo Boyolali Jawa Tengah dianalisis dengan *Atomic Absorption Spectrophotometer* untuk mengetahui kandungan logamnya dengan hasil disajikan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Kandungan Logam Air Limbah

No	Logam Berat	Kadar, ppm
1.	Tembaga (Cu^{2+})	8,01
2.	Timah hitam (Pb^{2+})	3,82
3.	Kromium (Cr^{3+})	1,05
4.	Kadmium (Cd^{2+})	2,01
5.	Nikel (Ni^{2+})	1,73
6.	Kobalt (Co^{2+})	1,11
7.	Seng (Zn^{2+})	3,30

Sumber : Data primer, 2004

Air Limbah mengandung 7 (tujuh) macam logam berat yang termasuk dalam kelompok yang berbahaya yaitu timah hitam (II), nikel (II), kromium (III) dan kadmium (II) dan mempunyai selektivitas yang lebih besar daripada tembaga (II) dan berpengaruh besar yaitu menurunkan kemampuan penyerapan tanah terhadap penyerapan tembaga (II) dengan tanah . Logam kobalt (II), seng (II) mempunyai

selektivitas lebih kecil daripada tembaga (II) dan kurang berpengaruh terhadap penyerapan tembaga (II) dengan tanah..

4.1.2. Analisis Sifat Tanah

Tanah berlempung warna hitam dari Sumberlawang, tanah lempung berpasir warna coklat dari Ngemplak dan tanah pasir warna merah dari Nogosari mempunyai sifat seperti disajikan pada table 4.2.

Tabel 4.2. Sifat Tanah Berlempung, Tanah Lempung Berpasir Dan Tanah Pasir

Tanah	Komponen, % Berat						Kadar Air, %	ρ , g/ml	pH	Cu ²⁺ , ppm
	Kerikil	Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Halus	Lanau	Lempung				
Berlempung (hitam)	1.00	1.00	2.20	2.80	49.00	44.00	25.83	2.079	7,0	0,6094
Lempung Berpasir (coklat)	1.50	0.90	3.60	22.00	56.70	15.30	23.16	2.169	7,0	0,9972
Pasir (merah)	1.60	0.90	3.50	24.00	66.00	4.00	18.06	2.208	7,0	0,6094

Sumber : Data primer, 2004.

Tanah terdiri dari fraksi kerikil/pasir sangat kasar (2,0 – 1,0 mm), pasir kasar (1,0 – 0,5), pasir sedang/biasa (0,5 – 0,25), pasir halus (0,25 – 0,10), lanau (0,1 - 0,002) dan lempung (< 0,002). Kerikil, pasir kasar, pasir sedang dan pasir halus berisi pasir kuarsa (SiO₂) yang bersifat resisten terhadap pelapukan. Pelapukan dapat terjadi pada partikel lanau menjadi lempung. Lempung merupakan gabungan dari ion-ion yang dapat mengembang dan mengkerut dengan adanya pembasahan dan pengeringan atau kemampuan menahan sejumlah air yang besar. Sebagian partikel lempung mempunyai muatan negatif dan mengikat kation-kation yang merupakan unsur yang esensial. Kation-kation ini bergerak pada permukaan lempung dan dapat terjadi pertukaran kation dengan kation-kation dalam larutan tanah. Lanau dan

lempung disusun oleh mineral-mineral kaolinit, hidrous mika (illit), vermikulit, montmorillit dan klorit yang mempunyai kapasitas tukar kation pada pH 7,0 antara 15 – 150 meq/100 gram (Forth, 1995). Ukuran partikel suatu bahan penjerap mempengaruhi kecepatan penjerapan, semakin kecil ukuran partikel semakin besar kecepatan penjerapannya,, hal ini disebabkan oleh kecilnya jarak yang ditempuh kation pada proses difusi. Tanah berlempung dan tanah lempung berpasir mengandung komponen lanau dan lempung yang lebih besar daripada tanah berpasir, maka mempunyai kemampuan penjerapan yang relatif lebih besar dan lebih cepat daripada tanah berpasir.

4.2. Penjerapan Tembaga (II) Secara Batch.

Penjerapan tembaga (II) secara *batch* dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan penjerapan tiga jenis tanah pada berbagai macam konsentrasi awal.

4.2.1. Pengaruh Jenis Tanah

Kemampuan penjerapan tiga jenis tanah pada kondisi kesetimbangan dengan 5 (lima) macam konsentrasi yang berbeda ditunjukkan pada tabel 4.3.

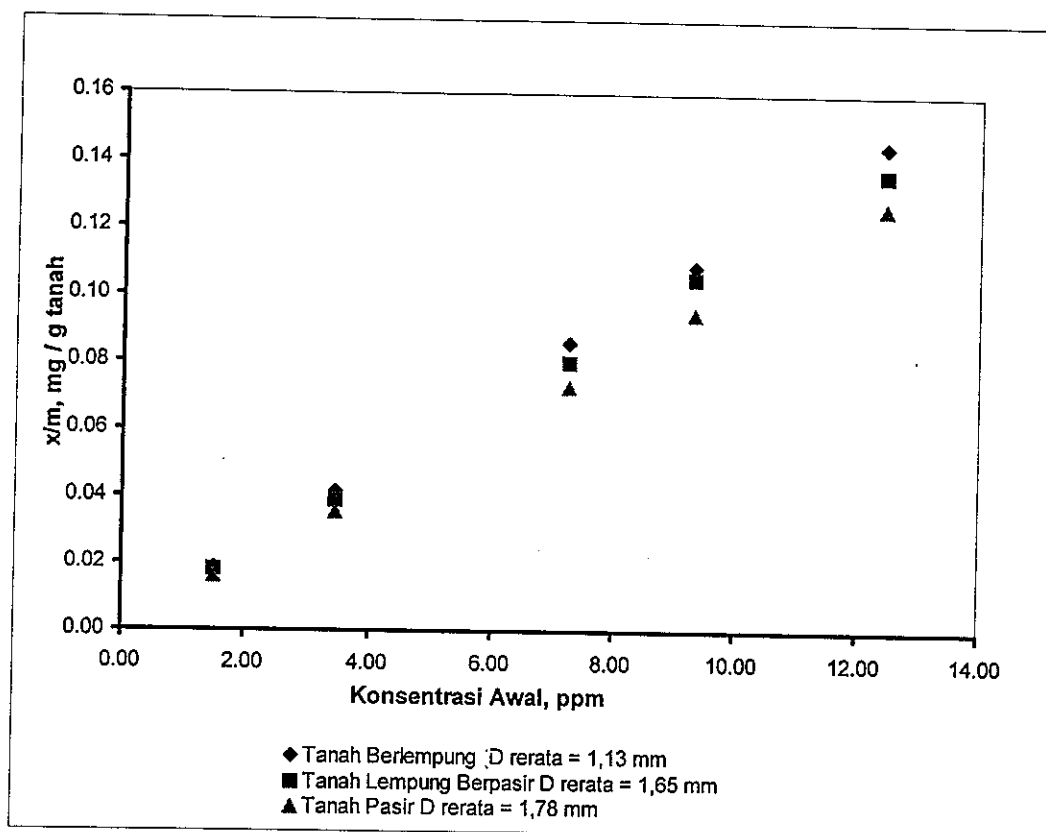
Tabel 4.3. Kemampuan Penjerapan Tanah Berlempung, Tanah Lempung Berpasir dan Tanah Pasir

No	Jenis Larutan	Konsentrasi Awal, ppm	x/m, mg/g tanah		
			Tanah Berlempung	Tanah Lempung Berpasir	Tanah Pasir
1	Cu(NO ₃) ₂	1.51	0.0184	0.0180	0.0159
2		3.45	0.0412	0.0387	0.0353
3		7.25	0.0856	0.0800	0.0728
4		9.32	0.1085	0.1050	0.0945
5		12.45	0.1446	0.1362	0.1261
6	Air Limbah	8.01	0.0752	0.0732	0.0601

Sumber : Data primer, 2004

Pada keadaan kesetimbangan tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir mempunyai kemampuan penjerapan tembaga (II) yang sebanding dengan konsentrasi awal. Pada konsentrasi awal yang sama, tanah berlempung mempunyai kemampuan penjerapan yang lebih besar daripada tanah lempung berpasir dan tanah pasir. Kondisi ini disebabkan oleh kandungan komponen lempung dan lanau yang mempunyai kation Aluminium (III) dan Silika (II) yang mudah digantikan oleh tembaga (II).

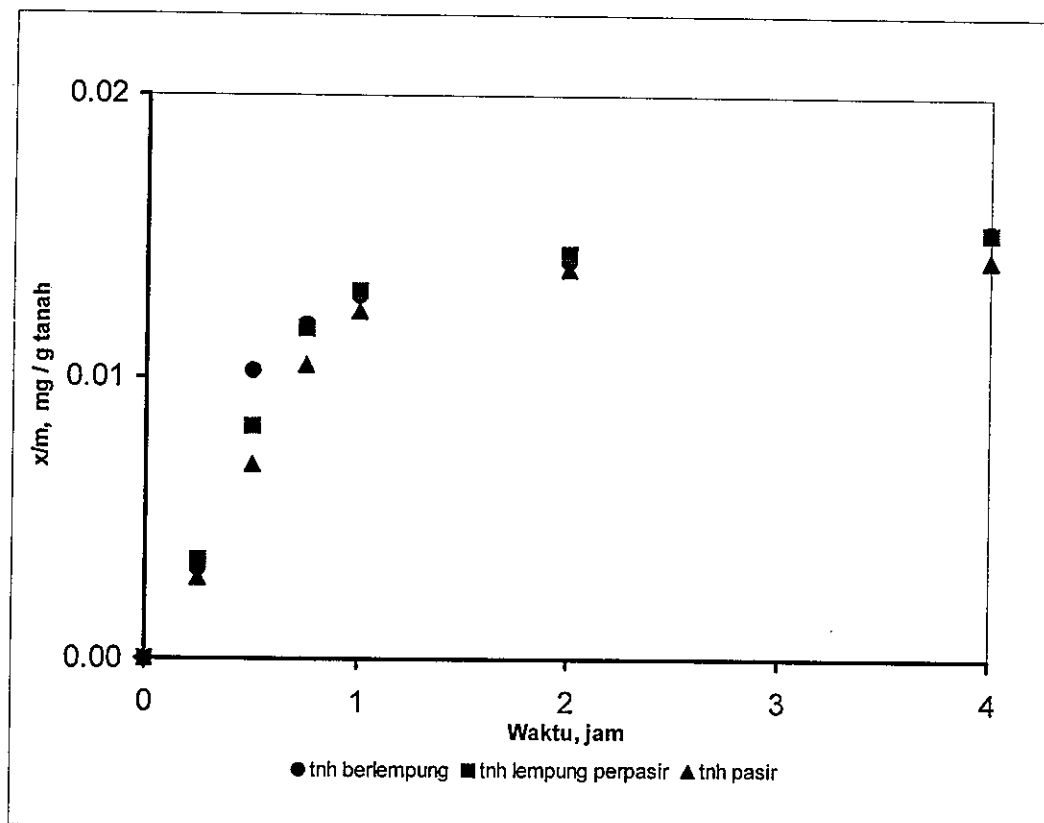
Adapun hubungan kemampuan penjerapan terhadap tembaga (II) dengan ukuran partikel ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1. Hubungan Diameter Partikel Tanah rata-rata Dengan Kemampuan Penjerapan.

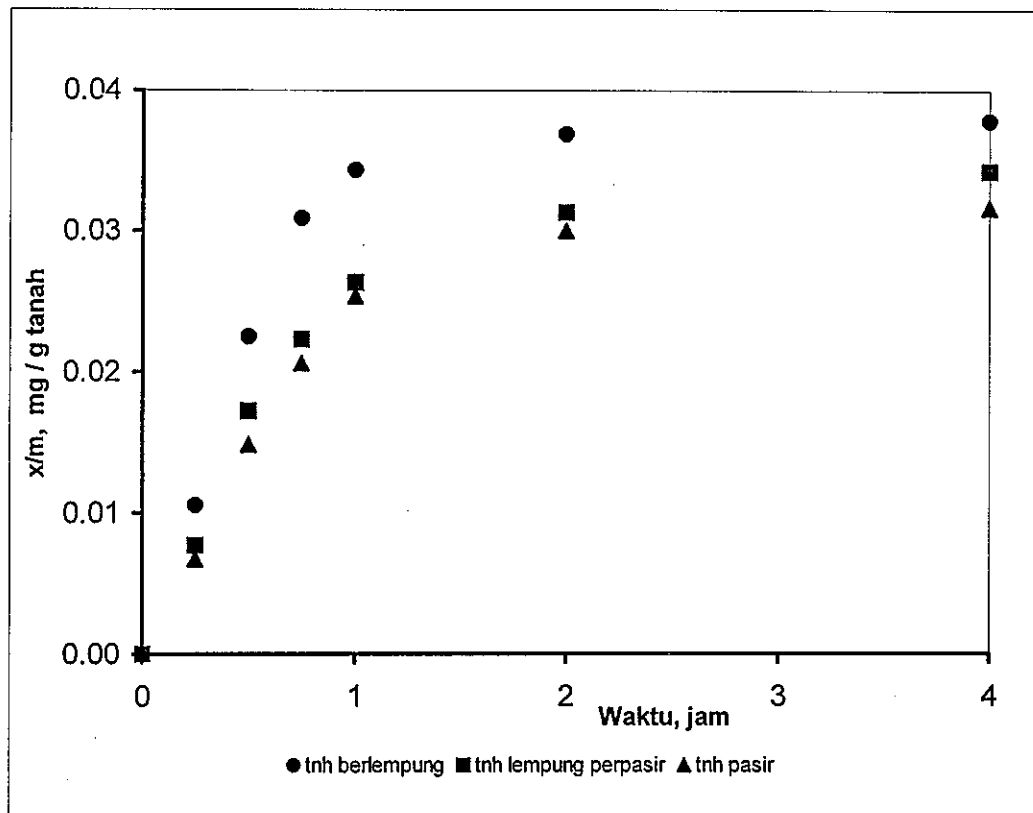
Pada keadaan kesetimbangan kemampuan penyerapan tanah sangat dipengaruhi ukuran partikel komponen penyusun tanah. Semakin kecil ukuran partikel, semakin besar kemampuan tanah menyerap tembaga (II). Kondisi dapat terjadi karena partikel yang berukuran kecil terdiri dari komponen lempung dan lanau (tanah berlempung) dengan diameter rerata 1,13 mm yang banyak mengandung kation Aluminium (III) dan Silika (II) yang mudah digantikan oleh tembaga (II).

Pengaruh jenis tanah terhadap kemampuan penyerapan tembaga (II) pada berbagai konsentrasi awal dan waktu penyerapan ditunjukkan dengan gambar 4.2 sampai dengan gambar 4.6.



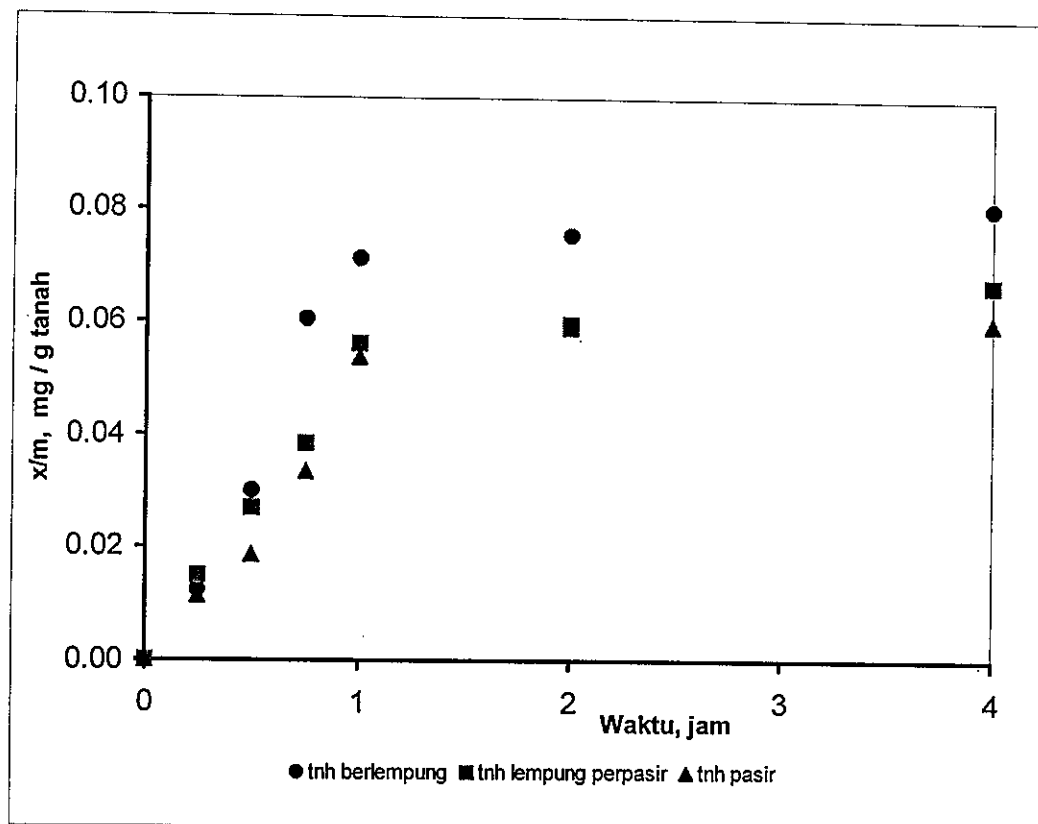
Gambar. 4.2. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Kemampuan Penyerapan Pada Konsentrasi Awal 1,51 ppm

Pada konsentrasi awal 1,51 ppm menunjukkan untuk ke tiga jenis tanah hampir tidak mempunyai perbedaan kecenderungan, kecuali pada waktu antara 30 – 45 menit, tanah berlempung menunjukkan kemampuan penyerapan sedikit lebih banyak daripada dua jenis tanah yang lain (tanah lempung berpasir dan tanah pasir) ditunjukkan pada gambar 4.2.



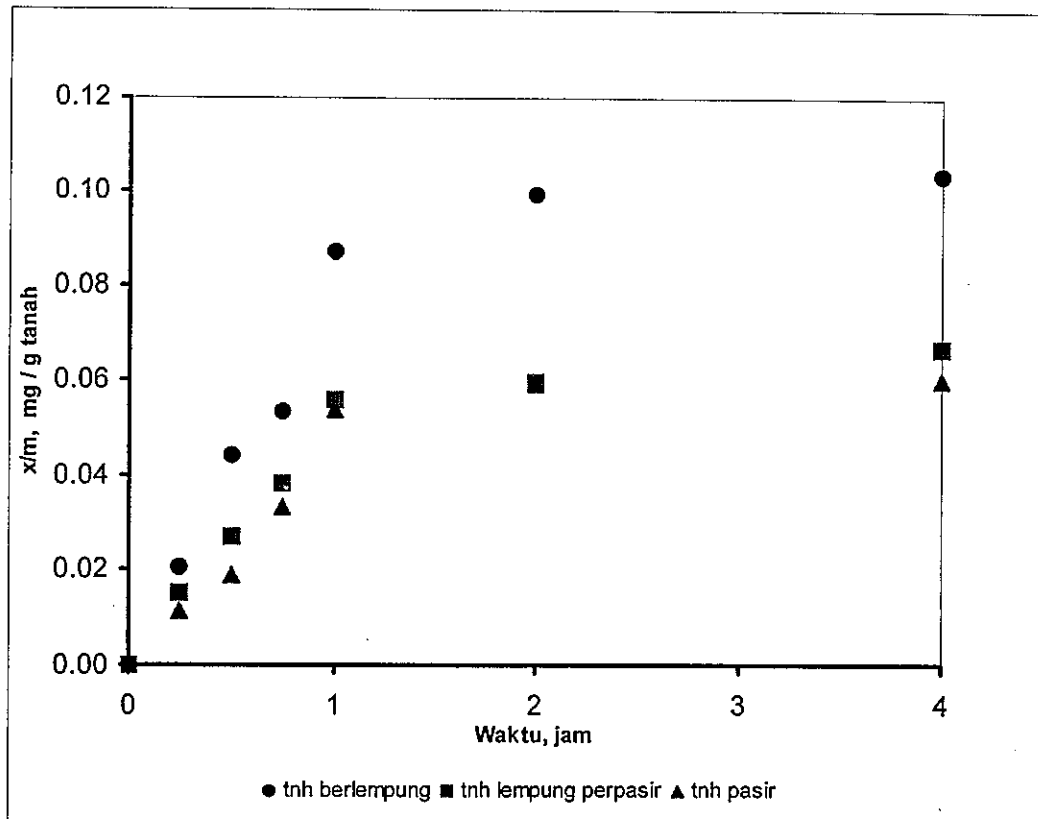
Gambar 4.3. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Kemampuan Penjerapan Pada Konsentrasi Awal 3,45 ppm

Pada konsentrasi awal 3,45 ppm menunjukkan tanah berlempung di daerah dinamis mempunyai kemampuan penyerapan yang lebih besar daripada dua jenis tanah yang lain (tanah lempung berpasir dan tanah pasir), sedangkan setelah waktu penyerapan satu jam kecenderungan hampir sama dengan tanah lempung lebih besar daripada dua jenis tanah yang lain ditunjukkan pada gambar 4.3.



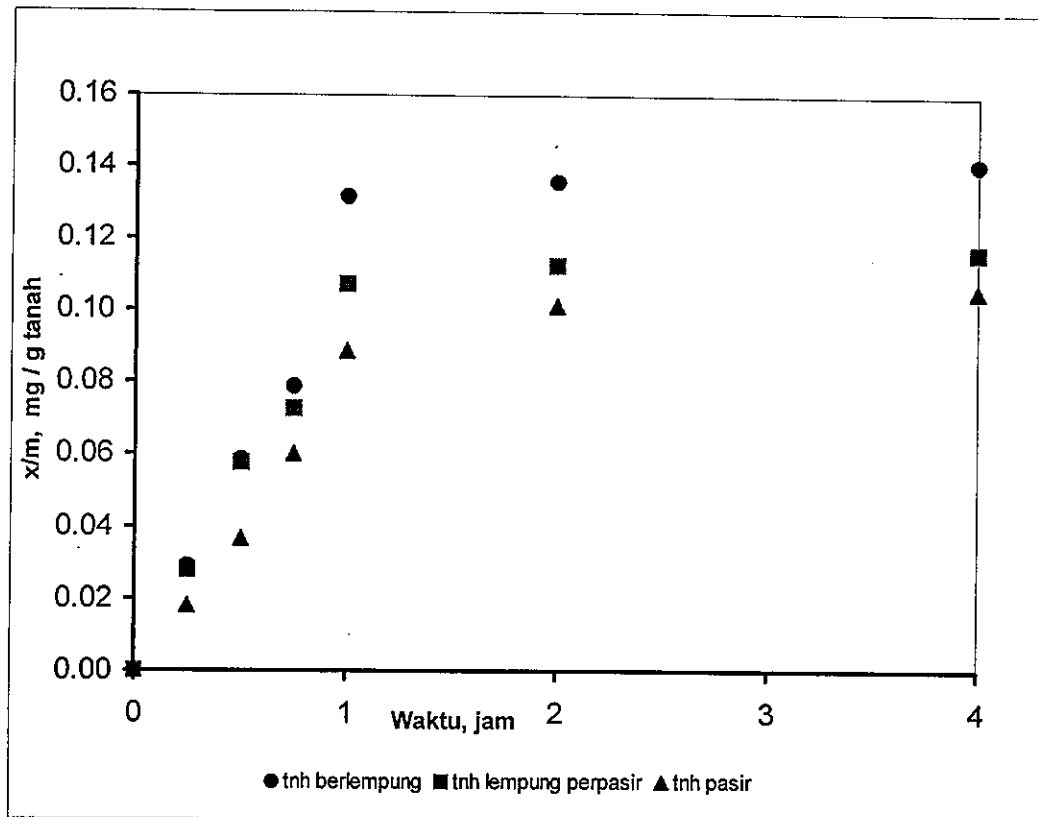
Gambar 4.4. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Terhadap Kemampuan Penjerapan Pada Konsentrasi Awal 7,25 ppm

Pada konsentrasi awal 7,25 ppm terlihat bahwa pada 15 menit pertama ke tiga tanah menunjukkan kemampuan menyerap yang hampir sama, kemudian tanah berlempung meningkat jauh lebih besar dibandingkan dua jenis tanah yang lain ditunjukkan pada gambar 4.4.



Gambar 4.5. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Terhadap Kemampuan Penjerapan Pada Konsentrasi Awal 9,32 ppm

Pada konsentrasi awal 9,32 ppm terlihat bahwa tanah berlempung menunjukkan di daerah dinamis kemampuan menyerap yang sama dengan tanah lempung berpasir dan sekitar 45 menit pertama terjadi kemampuan menyerap yang hampir sama ditunjukkan pada gambar 4.5. Setelah waktu penyerapan satu jam dan seterusnya tanah berlempung mempunyai kemampuan menyerap yang jauh lebih besar dibandingkan dengan dua jenis tanah yang lain.



Gambar 4.6. Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Terhadap Kemampuan Penjerapan Pada Konsentrasi Awal 12,4486 ppm

Pada konsentrasi awal 12,45 ppm terlihat secara umum tanah berlempung menunjukkan kemampuan penjerapan yang lebih besar daripada dua jenis tanah yang lain (tanah lempung berpasir dan tanah pasir) baik di daerah dinamis maupun jenuh ditunjukkan pada gambar 4.6.

Kondisi dinamis penjerapan terjadi pada 0 – 1 jam pertama mengikuti persamaan :

$$\frac{x}{m} = k C t^n \text{ atau } \ln \frac{x/m}{C} = \ln k + n \ln t$$

Hasil perhitungan harga konstanta k dan n pada kondisi dinamis dicantumkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.4. Harga Konstanta k dan n Pada Penjerapan Secara Dinamis

No	Jenis Larutan	Jenis Tanah	k	n
1	Cu(NO ₃) ₂	Berlempung	1,0442	0,0229
		Lempung Berpasir	1,0191	0,0102
		Pasir	1,0153	0,0096
2	Air Limbah	Berlempung	1,0042	0,0025
		Lempung Berpasir	1,0035	0,0020
		Pasir	1,0013	1,0006

Pada kondisi dinamis harga konstanta k dan n pada tanah berlempung lebih besar daripada dua jenis tanah yang lain (tanah lempung berpasir dan tanah pasir), sebanding dengan ukuran partikel dan kandungan komponen lempung dan lanau dalam tanah penjerap.

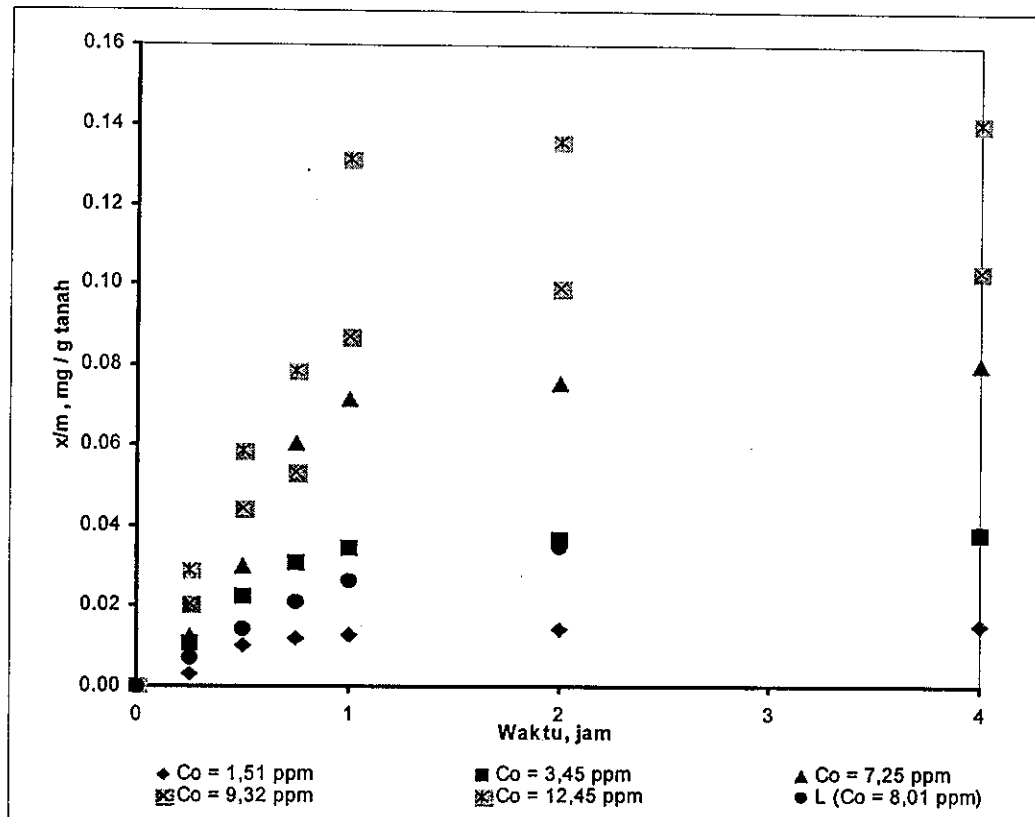
Ketiga tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir mempunyai kecenderungan yang hampir sama selama penjerapan tembaga (II) yang ditunjukkan dengan tabel 4.3 dan 4.4. dan gambar 4.2 sampai dengan gambar 4.6., dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Kemampuan tanah menjerap tembaga (II) sebanding dengan kandungan komponen lempung dan lanau. Komponen lempung mempunyai ukuran partikel yang paling kecil, sehingga untuk satuan massa yang sama mempunyai luas permukaan paling besar (permukaan yang dapat menjerap) dibandingkan dengan komponen-komponen tanah yang lain kemampuan menjerap paling besar dibandingkan dengan tanah lempung berpasir dan tanah pasir, demikian pula tanah lempung berpasir mempunyai kemampuan menjerap lebih besar daripada tanah pasir.

2. Pada awal (0 – 1 jam pertama) proses penjerapan tembaga (II) berlangsung secara cepat dan kemudian semakin lambat. Laju penjerapan awal terbesar terjadi pada tanah berlempung, kemudian tanah lempung berpasir dan terkecil pada tanah pasir. Laju penjerapan yang besar disebabkan oleh reaksi kimia pada permukaan partikel, sedangkan laju penjerapan yang lambat karena proses difusi tembaga (II) ke mikropori komponen anorganik dan organik tanah. Ukuran partikel yang kecil komponen lempung yang banyak terdapat pada tanah berlempung dan tanah lempung berpasir, menyebabkan terjadinya reaksi kimi pada permukaan yang luas dan akibatnya laju penjerapan awal menjadi cepat.
3. Penjerapan tembaga (II) dengan tanah berlempung sempurna hampir sama yaitu setelah lebih kurang 2 jam. Waktu yang diperlukan untuk mencapai kesetimbangan penjerapan tembaga (II) dipengaruhi konsentrasi awal tembaga (II), jenis dan ukuran partikel komponen tanah, dengan demikian dalam penjerapan tembaga (II) dengan tanah faktor jenis dan ukuran partikel kurang berpengaruh.

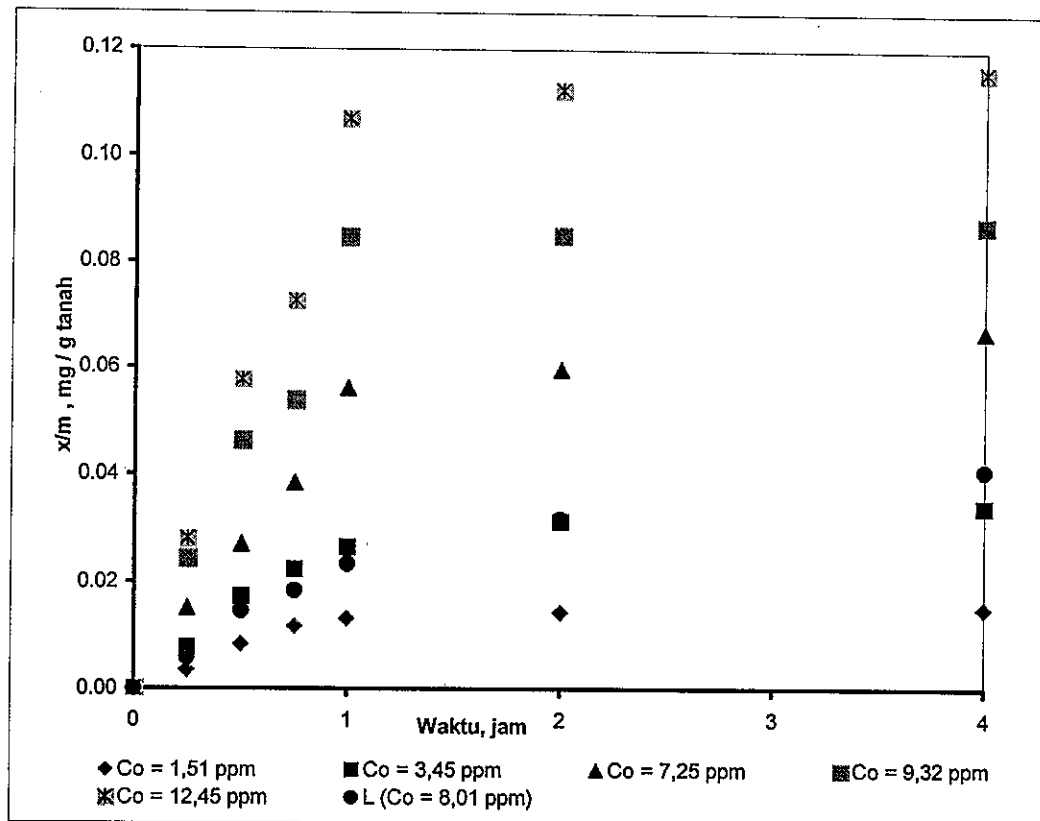
4.2.2. Pengaruh Konsentrasi Awal

Hasil penjerapan tembaga (II) dalam larutan dan air limbah dengan tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir pada beberapa macam konsentrasi awal ditunjukkan pada gambar 4.7, 4.8 dan 4.9.



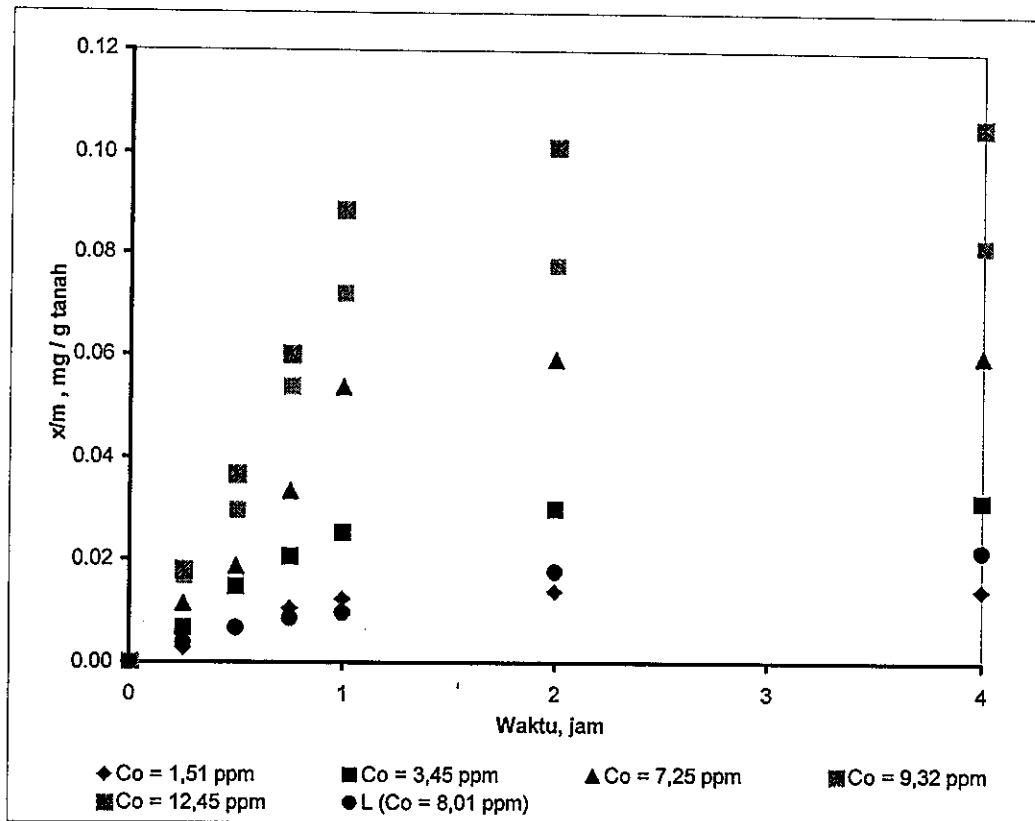
Gambar 4.7. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah Berlempung

Penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah berlempung pada 5 (lima) macam konsentrasi awal menunjukkan bahwa dengan bertambahnya konsentrasi, diikuti dengan bertambahnya jumlah tembaga (II) yang terjerap tanah berlempung baik pada kondisi dinamis (0 – 1 jam pertama) maupun kondisi tunak (jenuh) mulai 1 jam pertama. Pada air limbah (L), walaupun kadar tembaga (II)-nya lebih besar daripada $C_0 = 3,45$ ppm, ternyata terjadi penurunan jumlah tembaga (II) yang terjerap. Kondisi ini disebabkan oleh adanya kation-kation lain yang terjerap bersama-sama, terutama kation-kation yang mempunyai selektivitas penjerapan lebih besar dari pada tembaga (II), sehingga permukaan dan pori partikel tanah berlempung tidak hanya menjerap tembaga (II), tetapi juga kation-kation yang lain dan ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.8. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah Lempung Berpasir

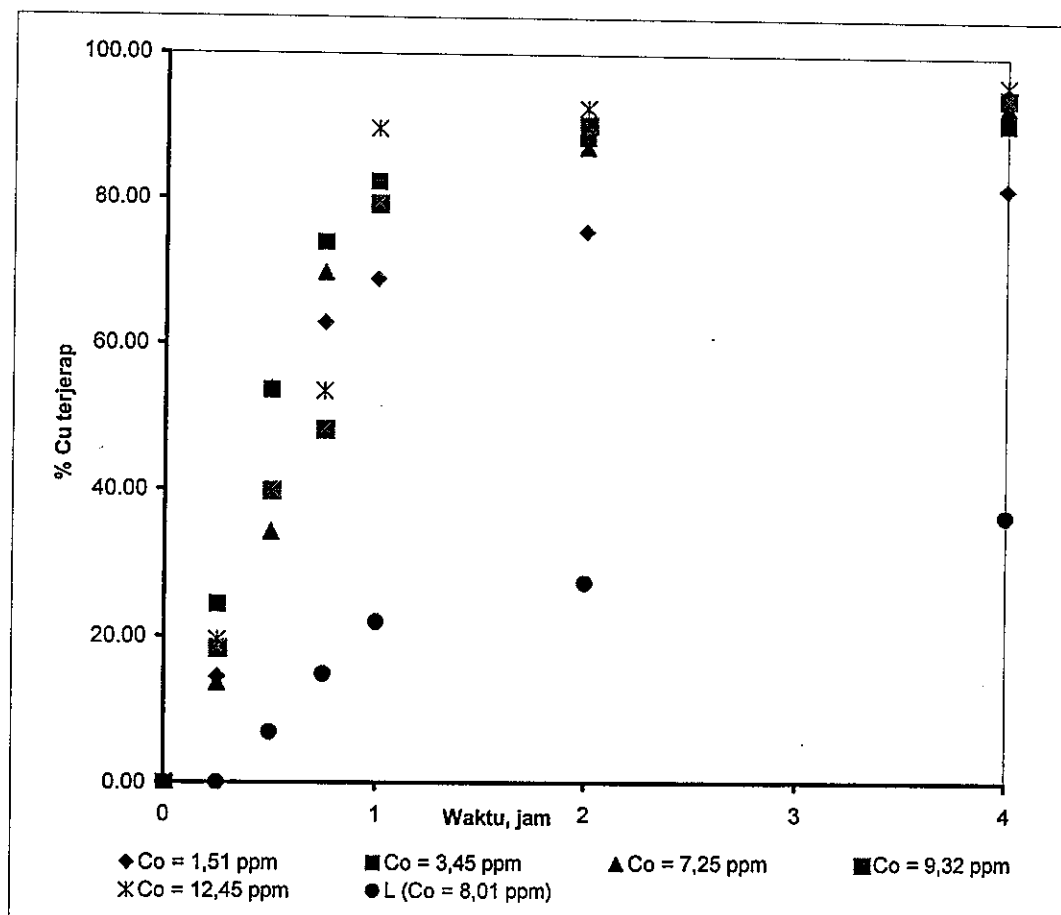
Penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah lempung berpasir pada 5 (lima) macam konsentrasi awal menunjukkan bahwa dengan bertambahnya konsentrasi, diikuti dengan bertambahnya jumlah tembaga (II) yang terjerap tanah lempung berpasir baik pada kondisi dinamis (0 – 1 jam pertama) maupun kondisi tunak (jenuh) mulai 1 jam pertama, namun jumlah yang terjerap lebih kecil dibandingkan dengan pada tanah berlempung. Pada air limbah (L) terjadi fenomena yang sama pada tanah berlempung dengan gradien yang lebih kecil dan ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.9. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Jumlah Tembaga (II) Terjerap Tanah Pasir

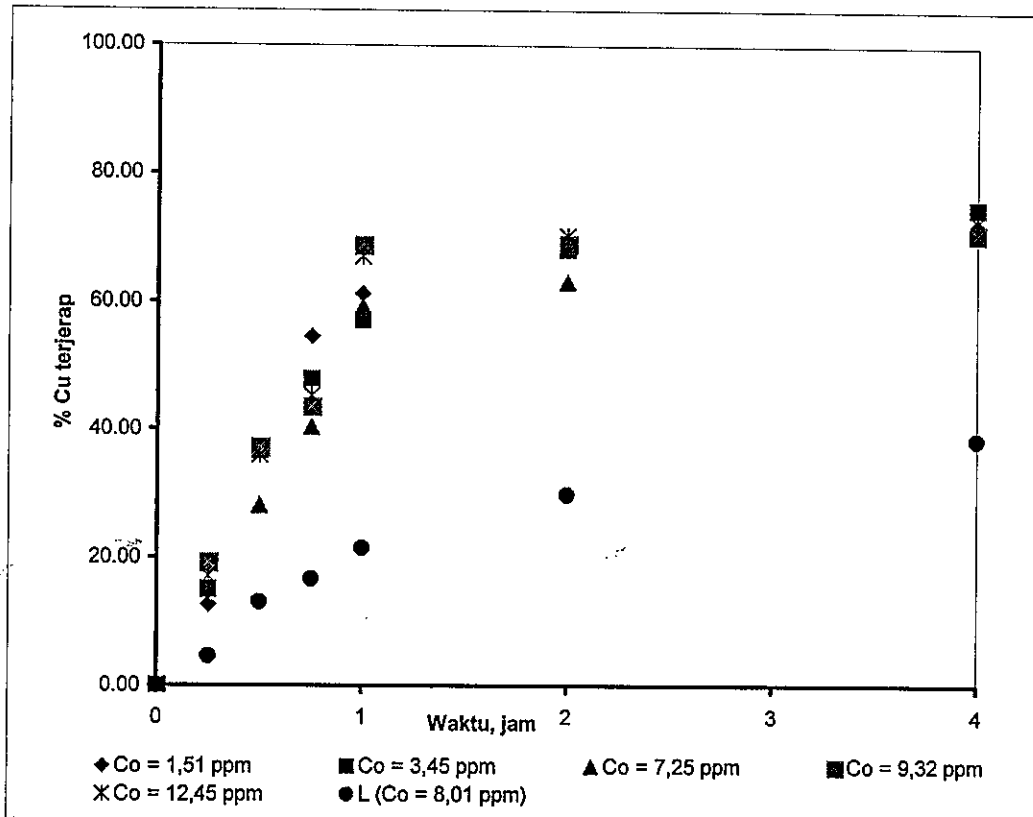
Penjerapan tembaga (II) dalam larutan dengan tanah pasir pada 5 (lima) macam konsentrasi awal menunjukkan bahwa dengan bertambahnya konsentrasi, diikuti dengan bertambahnya jumlah tembaga (II) yang terjerap tanah pasir baik pada kondisi dinamis (0 – 1 jam pertama) maupun kondisi tunak (jenuh) mulai 1 jam pertama, namun jumlah yang terjerap lebih kecil dibandingkan dengan pada tanah lempung berpasir. Pada air limbah (L) mempunyai fenomena yang sama dengan pada tanah lempung berpasir dengan gradien yang lebih kecil dan hampir sama dengan konsentrasi awal tembaga (II) dalam larutan $C_o = 1,51$ ppm ditunjukkan pada gambar 4.9. Kondisi ini menunjukkan bahwa selektivitas tembaga (II) pada tanah pasir lebih rendah dibandingkan dengan tanah berlempung dan tanah lempung berpasir.

Pengaruh konsentrasi awal terhadap persentase tembaga (II) yang terjerap ditunjukkan pada gambar 4.10., 4.11., dan 4.12.



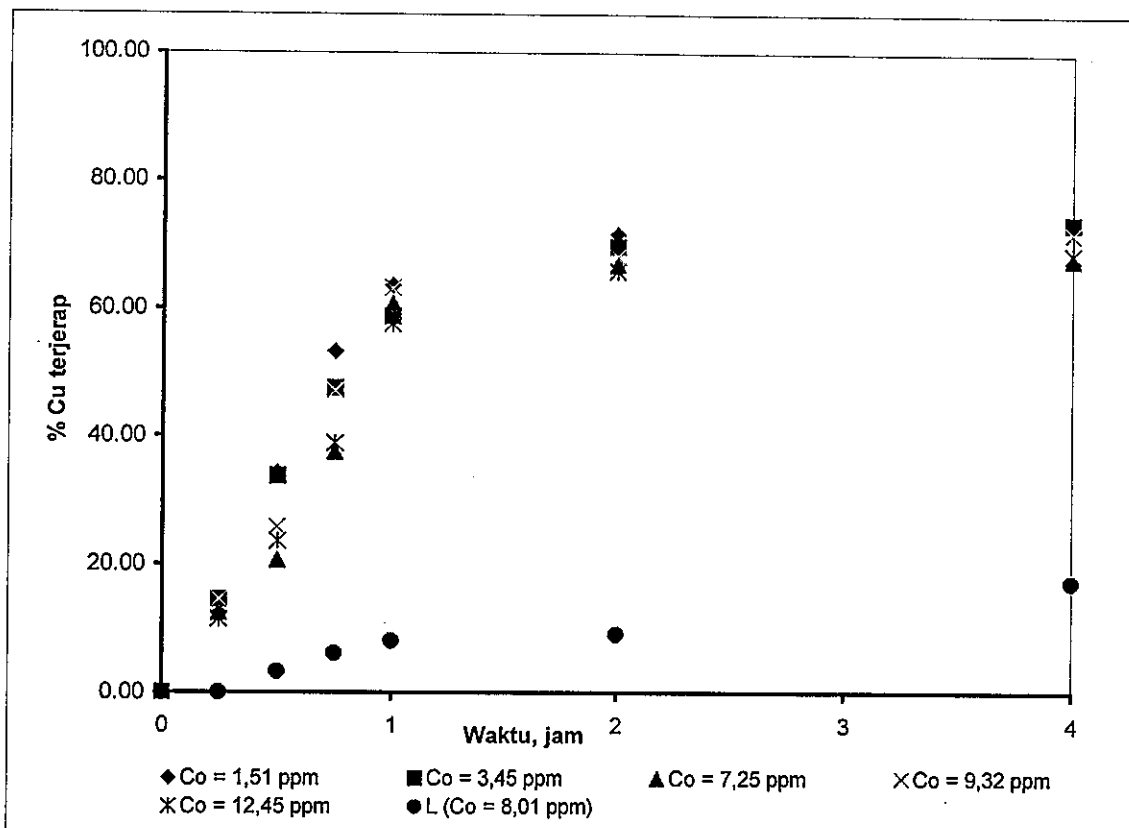
Gambar 4.10. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Persentase Tembaga (II) Terjerap Tanah Berlempung

Pada kondisi kesetimbangan, persentase tembaga (II) yang terjerap terjadi pada konsentrasi yang awal terbesar (12,45 ppm) yang mencapai 98 %, semakin pekat konsentrasi awal , semakin banyak tembaga (II) yang terjerap. Pada air limbah terjadi penurunan yang sangat drastis yang disebabkan oleh kation-kation yang mempunyai selektivitas penjerapan lebih besar daripada tembaga (II), sehingga lebih mudah terjerap tanah berlempung ditunjukkan gambar 4.10.



Gambar 4.11. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Persentase Tembaga (II) Terjerap Tanah Lempung Berpasir

Konsentrasi awal tidak berpengaruh pada persentase tembaga (II) yang terjerap tanah lempung berpasir, yang pada kesetimbangan sebesar $\pm 76\%$. Penurunan persentase tembaga (II) terjadi pada air limbah yang hanya mencapai 38% ditunjukkan oleh gambar 4.11



Gambar 4.12. Pengaruh Konsentrasi Awal Terhadap Persentase Tembaga (II) Terjerap Tanah Pasir

Konsentrasi awal sedikit berpengaruh pada persentase tembaga (II) yang terjerap tanah pasir, kenaikan konsentrasi awal diikuti sedikit penurunan persentase tembaga (II) yang terjerap. Pada konsentrasi rendah (1,51 dan 3,45 ppm) mencapai 72 %, sedangkan pada konsentrasi yang lebih tinggi hanya mencapai 68 % diunjukkan oleh gambar 4.12.

Pengaruh konsentrasi awal terhadap penyerapan tembaga (II) dengan tiga jenis tanah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7. sampai dengan gambar 4.12. Pada perubahan konsentrasi awal dari 1,51 ppm sampai dengan 12,45 ppm, konsentrasi

awal berpengaruh terhadap jumlah tembaga (II) terjerap tanah hampir sama pada ketiga jenis tanah, dapat dijelaskan sebagai berikut

1. semakin besar konsentrasi awal , jumlah tembaga (II) yang terjerap pada setiap waktu dan pada kesetimbangan (x) semakin besar. Kondisi ini membuktikan bahwa pada proses penjerapan tembaga (II) isotermal dengan tanah merupakan proses kesetimbangan (*adsorption-desorption*), sehingga pada kondisi awal proses laju penjerapan lebih besar pada konsentrasi awal yang lebih besar dibandingkan pada konsentrasi awal yang lebih kecil.
2. Penjerapan tembaga (II) dalam air limbah dengan tanah terjadi penyimpangan kecenderungan berupa penurunan laju penjerapan dan kapasitas penjerapan pada kondisi jenuh, kondisi ini disebabkan dalam air limbah terdapat logam-logam lain yang mempunyai selektivitas lebih besar daripada tembaga (II) dan kation-kation lain yang juga akan berkompetisi untuk dapat terjerap tanah.

4.3. Model Penjerapan Tembaga (II) Secara Batch

Pendekatan terhadap hasil percobaan penjerapan secara *batch* dengan model penjerapan isotermal Langmuir dengan hasil ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.5. Harga Konstanta Langmuir Pada Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah

No	Jenis Tanah	k_1	k_2 ,	R^2
1	Tanah Berlempung	1,8467	7,57	0,9659
2	Tanah Lempung Berpasir	0,0840	0,08	0,3966
3	Tanah Berpasir	0,0606	0,03	0,5285

Dari tiga jenis tanah hanya tanah berlempung yang dapat dijelaskan dengan model Langmuir yang menghasilkan harga $k_1 = 1,8467$, $k_2 = 7,67$ dan $R^2 = 0,9659$.

Penjerapan dengan tanah lempung berpasir dan tanah pasir tidak dapat dilakukan pendekatan dengan model Langmuir dibuktikan dengan harga R^2 yang terlalu kecil.

Kondisi ini dapat terjadi karena kandungan lempung (partikel berukuran kecil) pada tanah berlempung sebesar 44 % lebih besar daripada tanah lempung berpasir (15,30 %) dan tanah pasir (4,00). Ukuran partikel lempung yang kecil memungkinkan terjadinya penjerapan tembaga (II) dengan energi penjerapan yang relatif konstan dan tidak terjadi perpindahan zat terjerap antar bidang di permukaan partikel.

Pendekatan terhadap hasil percobaan penjerapan secara *batch* dengan model penjerapan isothermal Freundlich dengan hasil ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6. Harga Konstanta n Dan k Model Freundlich Pada Penjerapan Isothermal Tembaga (II) Dalam Larutan Dengan Tanah

No	Jenis Tanah	n	K, Lmg^{-1}	R^2
1	Tanah Berlempung	1,4227	0,4974	0.9989
2	Tanah Lempung Berpasir	1,0774	$7,66 \times 10^{-2}$	0.9968
3	Tanah Berpasir	1,0341	$5,82 \times 10^{-2}$	0.9993

Konstanta n dan K pada model Freundlich paling besar terjadi pada tanah berlempung, kemudian tanah lempung berpasir dan terkecil pada tanah dengan koefisien korelasi yang besar ($R^2 \approx 1$). Perbandingan tembaga (II) terjerap dengan berat tanah (x/m) pada persamaan Freundlich untuk konsentrasi zat terjerap tertentu mempunyai harga terbesar pada tanah berlempung, kemudian pada tanah lempung berpasir dan tanah pasir. Kondisi ini dapat terjadi sesuai dengan kandungan komponen lempung dan lanau yang mempunyai ukuran partikel yang paling kecil dan struktur kimia yang dapat bereaksi dengan tembaga (II) dalam larutan diantara komponen tanah yang lain. Namun yang perlu mendapat perhatian harga konstanta

$1/n$ yang lebih besar dari ketentuan model Freundlich sebesar 0,2 - 0,7 yang merupakan salah satu bentuk penyimpangan dari model.

Pengujian kesesuaian model Langmuir dan Freundlich yang diperoleh dengan penjerapan tembaga (II) dalam air limbah ditunjukkan pada tabel 4.7.

Tabel 4.7. Penerapan Model Langmuir dan Freundlich Yang Diperoleh Pada Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Tanah

No	Jenis Tanah	Kesesuaian, %	
		Model Langmuir	Model Freundlich
1	Tanah Berlempung	33,74	13,83
2	Tanah Lempung Berpasir	42,71	66,68
3	Tanah pasir	34,11	84,83

Pada penjerapan tembaga (II) dengan tanah model penjerapan Freundlich yang diperoleh sesuai untuk tanah pasir dan lempung berpasir.

Kondisi ini dapat disebabkan dalam air limbah selain tembaga (II) terdapat juga kation-kation lain (terutama yang mempunyai selektifitas lebih besar daripada tembaga (II), nikel (II), timah hitam (II) dan kadmium (II) serta bahan-bahan lain yang mengurangi jumlah tembaga (II) yang terjerap dalam tanah.

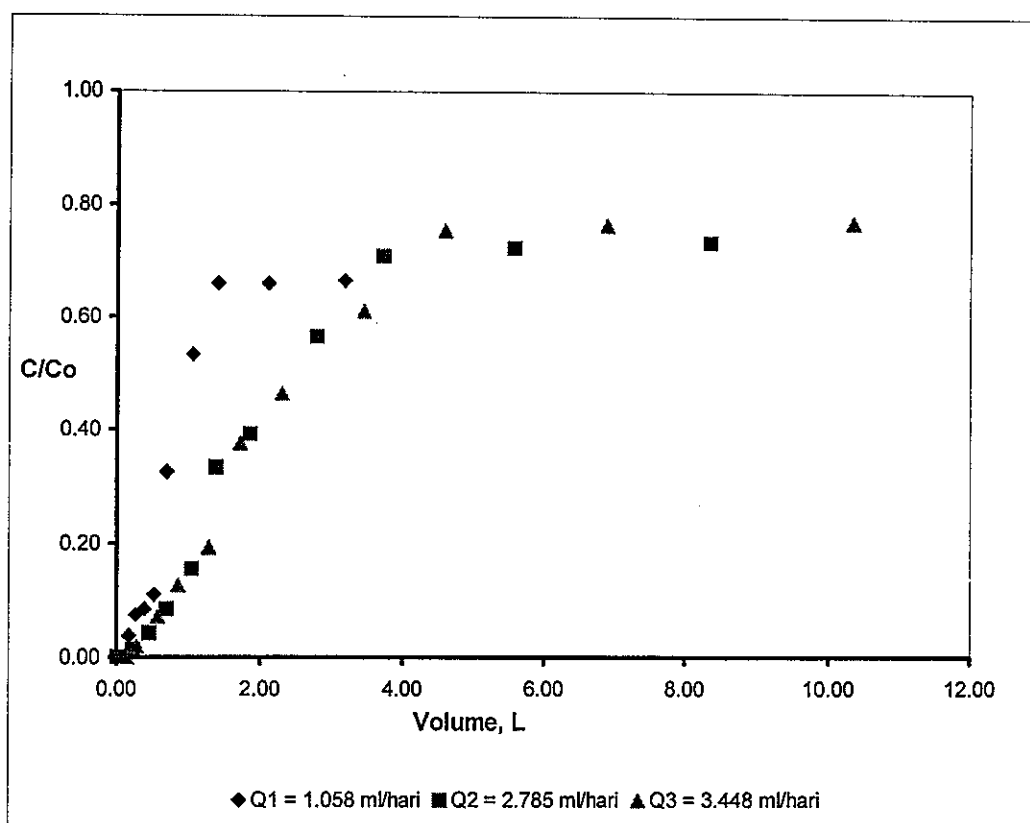
Model penjerapan isothermal Freundlich yang diperoleh untuk tanah lempung berpasir dan tanah pasir dapat dipergunakan sebagai referensi perancangan alat penjerap tembaga (II) dalam air limbah industri kerajinan tembaga di Cepogo Boyolali, sedangkan untuk tanah berlempung harus disusun model khusus limbah tersebut .

4.4. Model Penjerapan Tembaga Secara Kontinyu.

Penjerapan secara kontinyu dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh laju alir terhadap penjerapan tembaga dalam larutan dan limbah pada tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir.

4.4.1. Pengaruh Laju Alir Larutan.

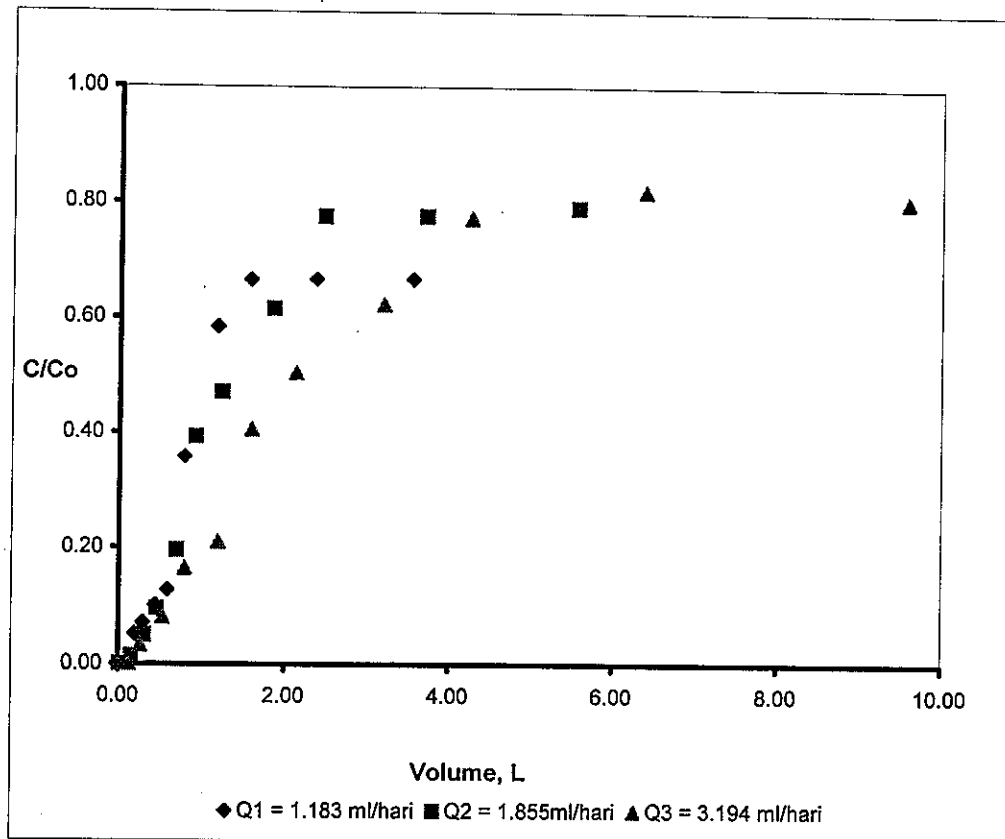
Pengaruh laju alir larutan tembaga (II) pada tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir ditunjukkan pada gambar 4.13, 4.14 dan 4.15.



Grafik 4.13. Pengaruh Laju Alir Terhadap Jumlah Tembaga (II) Yang Terjerap Pada Unggun Tanah Berlempung

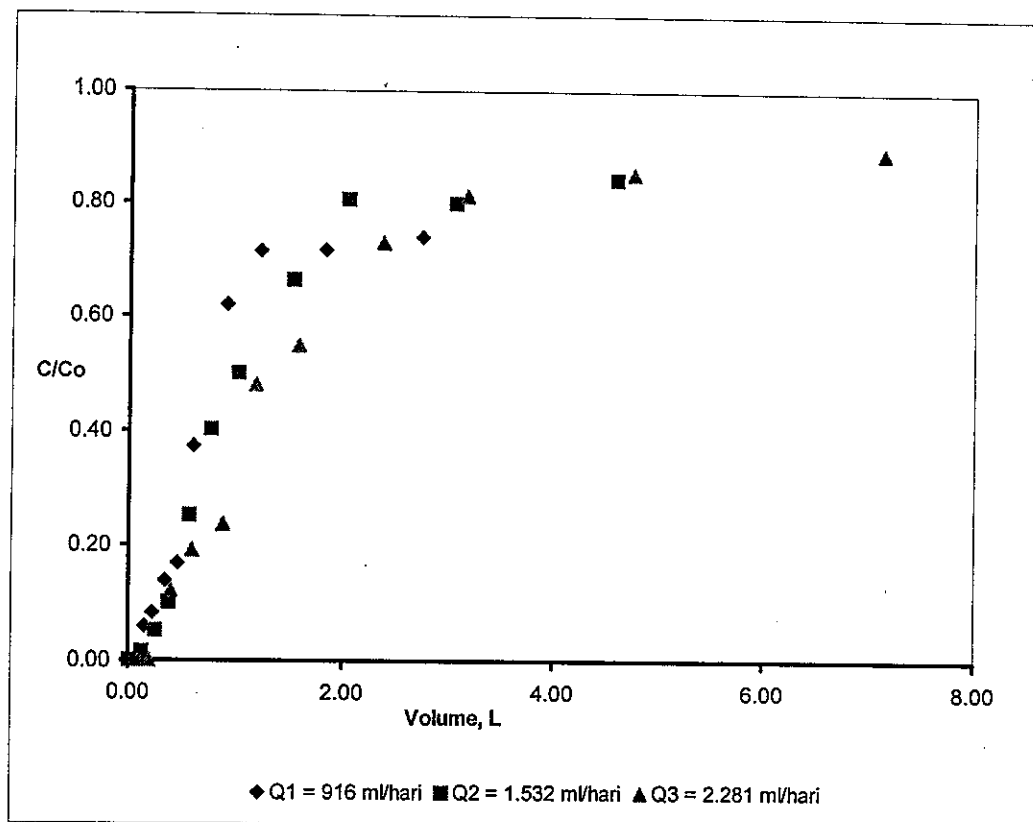
Pada tanah berlempung, penambahan laju alir larutan tembaga (II) dapat meningkatkan tingkat kejenuhan tanah dalam menyerap tembaga (II) ditunjukkan dengan gambar 4.13. Laju alir yang tinggi menyebabkan jumlah tembaga yang

terjerap menjadi lebih sedikit, karena dengan cepat terbawa larutan keluar unggun tanah (waktu tinggal lebih pendek). Harga C/C_0 pada laju alir yang rendah mencapai konstan pada volume larutan yang lebih sedikit dibandingkan pada laju alir yang lebih tinggi.



Gambar 4.14. Pengaruh Laju Alir Terhadap Jumlah Tembaga (II) Yang Terjerap Pada Unggun Tanah Lempung Berpasir

Pada tanah lempung berpasir, penambahan laju alir larutan tembaga (II) tidak meningkatkan tingkat kejenuhan tanah dalam menyerap tembaga (II) ditunjukkan dengan gambar 4.14. Laju alir yang tinggi menyebabkan jumlah tembaga yang terjerap menjadi lebih sedikit, karena dengan cepat terbawa larutan keluar unggun tanah (waktu tinggal lebih pendek). Harga C/C_0 pada laju alir yang rendah mencapai konstan pada volume larutan yang lebih sedikit dibandingkan pada laju alir yang tinggi dan lebih banyak jika dibandingkan dengan tanah berlempung .



Gambar 4.15. Pengaruh Laju Alir Terhadap Jumlah Tembaga (II) Yang Terjerap Pada Unggun Tanah Pasir

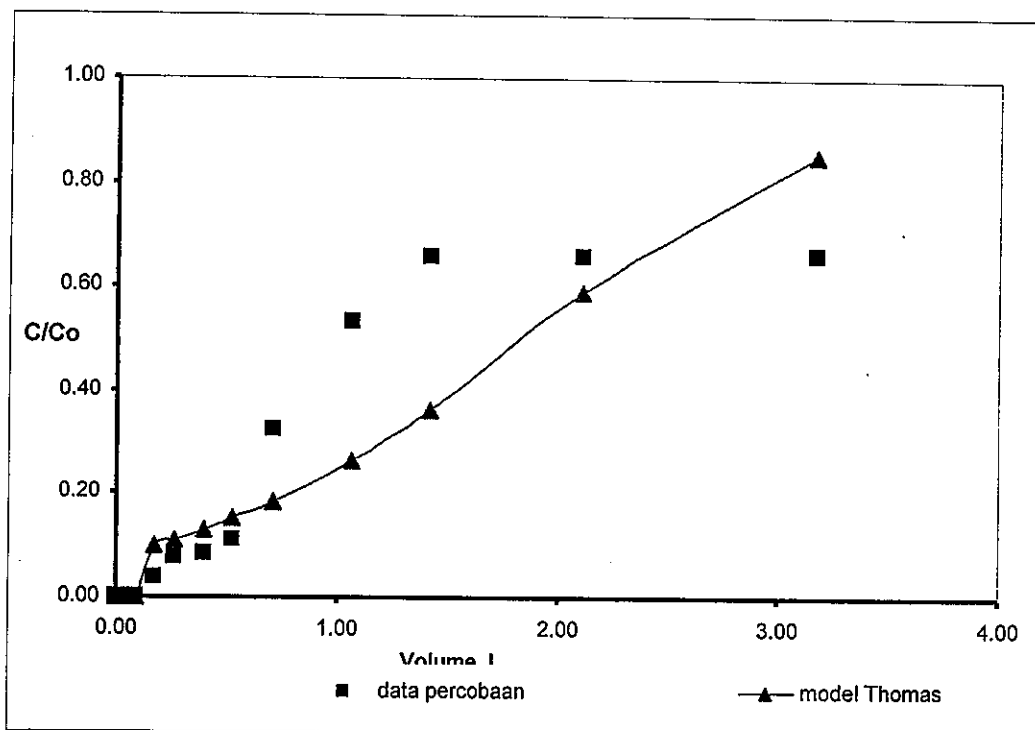
Pada tanah pasir, penambahan laju alir larutan tembaga (II) dari 916 L/hari menjadi 2.281 L/hari tidak berpengaruh secara signifikan terhadap tingkat kejenuhan tanah dalam menjerap tembaga (II) ditunjukkan dengan gambar 4.15. Laju alir yang tinggi juga menyebabkan jumlah tembaga yang terjerap menjadi lebih sedikit, karena dengan cepat terbawa larutan keluar unggun tanah (waktu tinggal lebih pendek). Harga C/C_0 pada laju alir yang rendah mencapai konstan pada volume larutan yang lebih sedikit dibandingkan pada laju alir yang tinggi dan lebih banyak jika dibandingkan dengan tanah berlempung dan tanah lempung berpasir.

Pada satu jenis tanah pertambahan laju alir larutan mempengaruhi kebutuhan volume yang diperlukan untuk mencapai C/C_0 maksimal, semakin besar laju alir maka untuk

mencapai tingkat kejenuhan tertentu diperlukan volume yang lebih banyak. Kondisi ini terjadi karena pada laju alir yang lebih tinggi, waktu tinggal larutan dalam unggun lebih singkat, sehingga lebih sedikit tembaga (II) terjerap tanah untuk setiap satuan volume larutan yang masuk unggun.

4.4.2. Model Thomas Pada Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah.

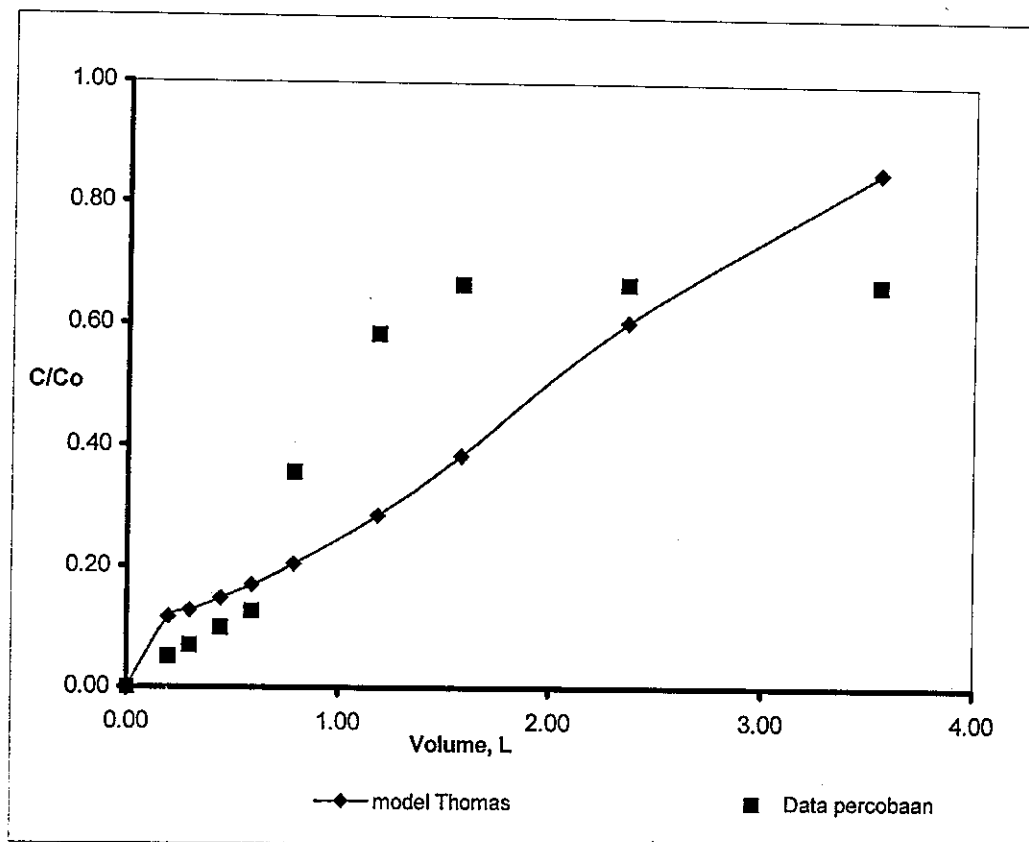
Pendekatan terhadap data yang diperoleh pada pengaruh laju alir pada penjerapan tembaga dengan tanah dengan model Thomas menghasilkan harga k_a untuk tanah berlempung sebesar $1,3865 \text{ L hari}^{-1} \text{ mg}^{-1}$, tanah lempung berpasir $1,372 \text{ L hari}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ dan tanah pasir $1,1954 \text{ L hari}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ ditunjukkan pada gambar 4.16, 4.17 dan 4.18.



Gambar 4.16. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah Berlempung

Pada tanah berlempung model Thomas mencapai harga C/C_o maksimal dengan volume larutan yang lebih besar daripada data percobaan ditunjukkan gambar 4.16. Harga C/C_o maksimal model Thomas mendekati 1 pada 3 liter dan percobaan 0,75 pada volume larutan 5 liter. Kondisi ini terjadi karena ukuran partikel tanah yang

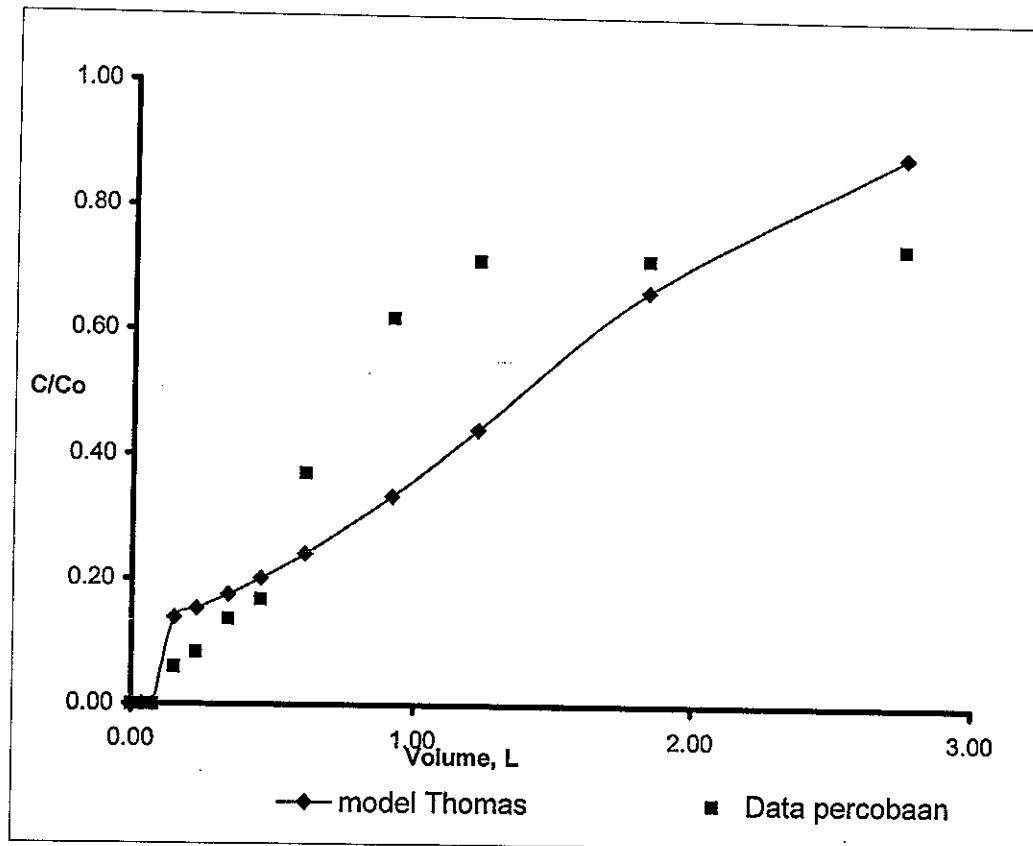
sangat heterogen, sehingga kejenuhan yang dialami suatu partikel yang berukuran kecil pada satu bidang belum dialami oleh partikel lain yang berukuran lebih besar pada bidang yang sama. Hal ini yang menyebabkan tidak jelasnya batas zona penjerapan dan tidak terlihat dengan jelas pergerakan zona dari atas ke bawah.



Gambar 4.17. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah Lempung Berpasir

Pada tanah lempung berpasir model Thomas mencapai harga C/C_0 maksimal dengan volume larutan yang lebih besar daripada data percobaan ditunjukkan gambar 4.17. Harga C/C_0 maksimal model Thomas 0,8 pada 2,75 liter dan percobaan 0,65 pada volume larutan 2 liter. Kondisi ini terjadi karena ukuran partikel tanah yang sangat heterogen, sehingga kejenuhan yang dialami suatu partikel yang berukuran kecil pada satu bidang belum dialami oleh partikel lain yang berukuran lebih besar pada bidang yang sama. Hal ini yang menyebabkan tidak jelasnya batas zona penjerapan dan tidak

terlihat dengan jelas pergerakan zona dari atas ke bawah. Pada volume sampai dengan 1 (satu) liter pertama terdapat kesesuaian diduga disebabkan homogenitas ukuran dan komposisi yang baik pada sampel tanah.



Gambar 4.18. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dengan Tanah Pasir

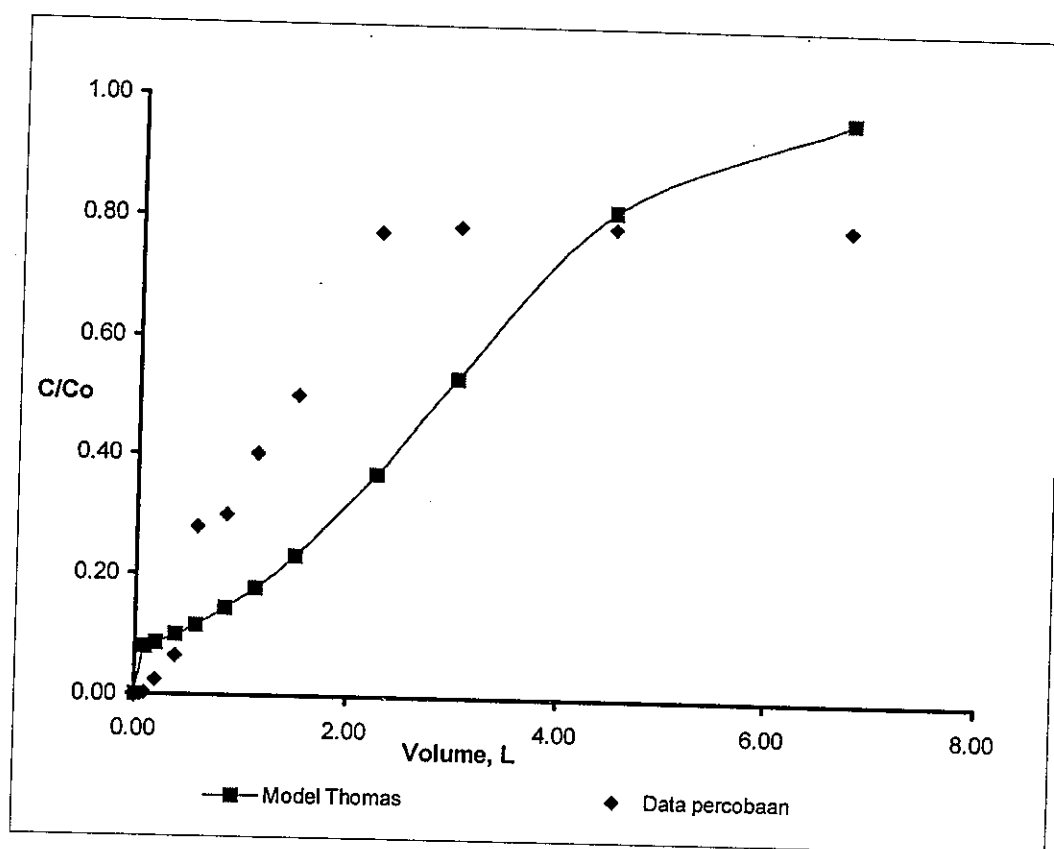
Pada tanah pasir model Thomas mencapai harga C/Co maksimal dengan volume larutan yang jauh lebih besar dibanding data percobaan ditunjukkan gambar 4.18. Harga C/Co maksimal model Thomas 1 pada volume 0,75 liter, sedangkan C/Co maksimal percobaan 0,80 pada volume larutan 2 liter, sedangkan. Kondisi ini terjadi karena ukuran partikel tanah yang lebih besar dan heterogen dibandingkan dengan tanah berlempung maupun tanah lempung berpasir.

Proses penjerapan tembaga (II) dengan tanah yang sangat kompleks (secara fisika dan kimia), komposisi dan ukuran partikel tanah yang heterogen menyebabkan harga

C/C_0 maksimal untuk model Thomas lebih besar daripada data percobaan. Harga C/C_0 maksimal model Thomas dan data percobaan dicapai pada volume terbesar pada tanah berlempung kemudian tanah lempung berpasir dan tanah pasir, menunjukkan bahwa jumlah tembaga (II) yang terjerap saat C/C_0 maksimal terbesar pada tanah berlempung diikuti tanah lempung berpasir dan tanah pasir.

4.4.3. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah

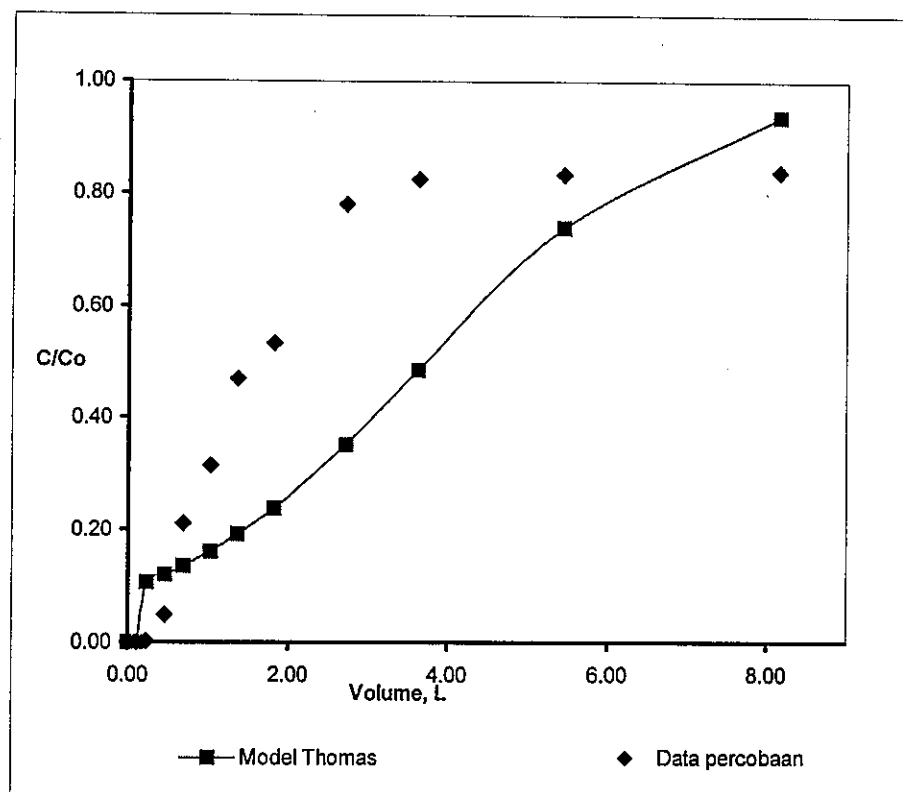
Hasil model Thomas yang diperoleh diterapkan pada penjerapan tembaga (II) dalam air limbah dengan hasil ditunjukkan pada gambar 4.19, 4.20 dan 4.21.



Gambar 4.19. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Tanah Berlempung

Pada tanah berlempung model Thomas mencapai harga C/C_0 maksimal dengan volume larutan yang lebih besar daripada data percobaan ditunjukkan gambar 4.19. Harga C/C_0 maksimal model Thomas pada 7 liter dan percobaan 0,80 pada volume

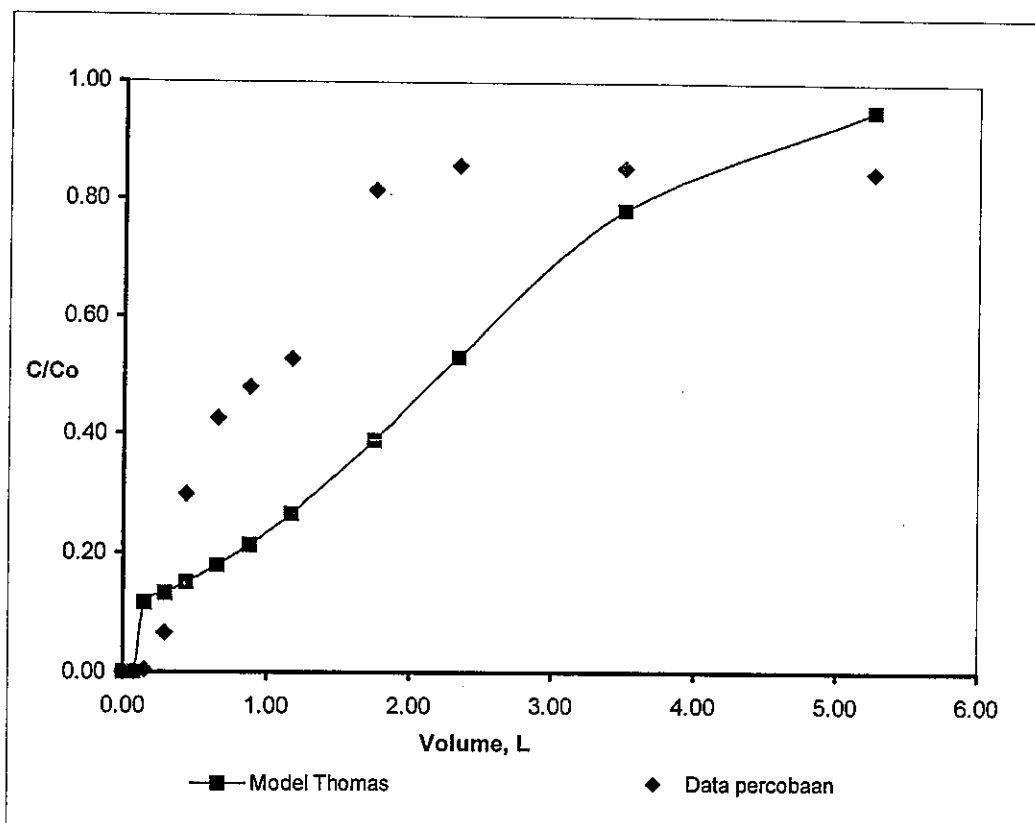
larutan 2,50 liter. Kondisi ini terjadi karena ukuran partikel tanah yang sangat heterogen, sehingga kejenuhan yang dialami suatu partikel yang berukuran kecil pada satu bidang belum dialami oleh partikel lain yang berukuran lebih besar pada bidang yang sama. Hal ini menyebabkan batas zona penjerapan dan pergerakan zona dari atas ke bawah tidak jelas. Kandungan logam lain dalam air limbah yang mempunyai selektifitas lebih besar daripada tembaga (II), yang mengganggu penjerapan tembaga (II) dalam air limbah dengan tanah berlempung.



Gambar 4.20. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Tanah Lempung Berpasir

Pada tanah lempung berpasir model Thomas mencapai harga C/C_0 maksimal dengan volume larutan yang lebih besar daripada data percobaan ditunjukkan gambar 4.20. Harga C/C_0 maksimal model Thomas pada 8,5 liter dan percobaan 0,80 pada volume larutan 2,250 liter. Kondisi ini terjadi karena ukuran partikel tanah yang

sangat heterogen, sehingga kejenuhan yang dialami suatu partikel yang berukuran kecil pada satu bidang belum dialami oleh partikel lain yang berukuran lebih besar pada bidang yang sama. Hal ini menyebabkan batas zona penjerapan dan pergerakan zona dari atas ke bawah tidak jelas. Kandungan logam lain dalam air limbah yang mempunyai selektifitas lebih besar daripada tembaga (II), yang mengganggu penjerapan tembaga (II) dalam air limbah dengan tanah lempung berpasir.



Gambar 4.21. Model Thomas Penjerapan Tembaga (II) Dalam Air Limbah Dengan Tanah Pasir

Pada tanah pasir model Thomas mencapai harga C/Co maksimal dengan volume larutan yang lebih besar daripada data percobaan ditunjukkan gambar 4.21. Harga C/Co maksimal model Thomas pada 5,5 liter dan percobaan 0,85 pada volume larutan 2,0 liter. Kondisi ini terjadi karena ukuran partikel tanah yang sangat heterogen, sehingga kejenuhan yang dialami suatu partikel yang berukuran kecil pada

satu bidang belum dialami oleh partikel lain yang berukuran lebih besar pada bidang yang sama. Hal ini menyebabkan batas zona penjerapan dan pergerakan zona dari atas ke bawah tidak jelas. Kandungan logam lain dalam air limbah yang mempunyai selektifitas lebih besar daripada tembaga (II), yang mengganggu penjerapan tembaga (II) dalam air limbah dengan tanah pasir.

Model Thomas pada penjerapan tembaga (II) dalam limbah tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir mempunyai kesesuaian yang relatif baik, dalam aplikasinya terjadi sedikit penyesuaian.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Hasil penelitian tentang penjerapan tembaga (II) dalam air limbah dengan tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir, dapat disimpulkan :

1. a. Kemampuan penjerapan tanah terhadap tembaga (II) dalam air limbah mengikuti persamaan Freundlich sebagai berikut :

No	Jenis Tanah	Ukuran Partikel	Persamaan	Kesesuaian, %
1	Berlempung	D : 0,002 – 9,52 mm (\bar{D} : 1,13 mm)	$\frac{x}{m} = 0,4974C^{1/1,4227}$	13,83
2	Lempung Berpasir	D : 0,002 – 9,52 mm (\bar{D} : 1,65 mm)	$\frac{x}{m} = 7,66.10^{-2}C^{1/1,0774}$	66,68
3	Pasir	D : 0,002 – 9,52 mm (\bar{D} : 1,78 mm)	$\frac{x}{m} = 5,82.10^{-2}C^{1/1,0341}$	84,83

Model Freundlich untuk tanah berpasir mempunyai kesesuaian yang paling baik (84,83 %) dan langsung dapat diaplikasikan untuk air limbah, sedangkan untuk tanah berlempung dan tanah lempung berpasir diperlukan koreksi.

b. Pengaruh konsentrasi awal terhadap prosentase tembaga (II) yang terjerap. Kemampuan penjerapan tanah berlempung sebanding (maksimal 98 % pada 12,45 ppm), tanah lempung berpasir tidak berpengaruh (76 %) dan tanah pasir sedikit berpengaruh terbalik (maksimal 72 % pada 1,51 ppm).

2. Penjerapan secara kontinyu mengikuti persamaan Thomas

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{1 + e^{\frac{k_a}{Q}(C_o V - C_o V)}} \quad \text{harga } k_a \text{ untuk tanah berlempung sebesar}$$

1,3865 L hari⁻¹ mg⁻¹, tanah lempung berpasir 1,372 L hari⁻¹ mg⁻¹ dan tanah pasir 1,1954 L hari⁻¹ mg⁻¹.

3. Tanah berlempung, tanah lempung berpasir dan tanah pasir dapat dimanfaatkan sebagai bahan penjerap pada pengolahan limbah industri yang mengandung tembaga (II).

5.2. Saran

1. Untuk mengurangi pencemaran dapat dimanfaatkan tanah bahan baku batu bata sebagai penjerap logam berat dalam limbah industri.
2. Dengan pertimbangan kemudahan dalam pengoperasiannya, sebaiknya aplikasi pemanfaatan tanah sebagai penjerap logam oleh para pengrajin batu bata dilakukan secara *batch*,

DAFTAR PUSTAKA

- Achmadi, U.F., 2001, *Pengaruh Parameter Menyimpang Dalam Air Minum/ Air Bersih Terhadap Kesehatan*, (Direktur Jenderal PPM & PL, Departemen Kesehatan dan Kesos, Jakarta.
- Anonim, 1997, *Public Health Goal for Copper in Drinking Water*, California, Environmental Protection Agency.
- Arora S. and Chahal D.S., 2002, *Modelling Boron Adsorption Kinetics in Benchmark Soil of Punjab, India*, 17th WCSS, Thailand.
- Darmawijaya, M.I., 1997, *Klasifikasi Tanah*, cetakan ke-3, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Djajadiningrat, S.T. dan Amir, H.S., (terjemahan), 1998, *Penilaian Secara Cepat Sumber Pencemaran Air, Tanah dan Udara*, Cetakan ke-5, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Figueiredo, S.A., R.A. Boaventura and J.M. Loureiro, 2000, *Color Removal With Natural Adsorbents : Modelling, Simulation and experimental*, Separation and Purification Technology 20, Porto, Portugal, 129-141.
- Forth, H.D., 1995, *Fundamentals of Soil Science*, John Wiley & Sons Inc, Singapore
- Johnson, B., 2000, *Soils : Our Interface with the Environment*, La Trobe University, Bendigo.
- Jorgensen, S.E., 1994, *Fundamental of Ecological Modelling*, Second edition, Elsevier, Tokyo.
- Kepmen LH, Nomor : Kep-51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri, Bapedal, 1996, Jakarta.
- LI Xue-Yuan et.al, 2002, *Interaction between charge character and Cu²⁺ Adsorption-desorption of soil with variable or permanent charge*, Huazhong Agricultural University, Wuhan, PR China.
- Manahan, S.E., 1984, *Environmental Chemistry*, fourth edition, Willard Grant Press, Boston.
- Matagi, S.V., Swai, D. and Mugabe, R., 1998, *A Review of Heavy Metal Removal Mechanisms in Wetlands*, Afr.J.Trop.Hydrobiol,Fish.8, Kampala, Uganda.
- Metcalf and Eddy, 1991, *Wastewater Engineering : Treatment, Disposal and Reuse*, McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Nugroho, B., 2001, *Ekologi Mikrobia Pada Tanah Terkontaminasi Logam Berat*, IPB, Bogor.

- Papini, M.P., et.al, 2001, *Competitive Sorption and Transport of Heavy Metals Through a Natural Porous Medium*, University "la Sapienza", P.le Aldo Moro, Rome, Italy
- Reynolds, T.D., 1982, *Unit Operations and Process In Environmental Engineering*, Wadsworth, Inc., Belmont, California.
- Sung, C.H., et.al, 2002, *Adsorption Pb (II) on Calcite-Type Calcium Carbonate by Batch and Continuous Reactors*, Departement of Chemical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon Korea, J. Ind. Eng. Chem., vol. 8, No. 4.
- Tan, K.H., (Terj. Goenadi, D.H.), 1998, *Dasar-dasar Kimia Tanah*, Cetakan ke-5, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Tchobanoglous, G. et.al, 1993, *Integrated Solid Waste Management*, McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Waats, R.J., 1998, *Hazardous Wastes : Sources, Pathways, Receptors*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Wentz, C.A., 1995, *Hazardous Waste Management*, Second edition, McGraw-Hill, Inc, Singapore.
- Yavuz, O, Yalcin,A. and Fuat G., 2003, *Removal of Copper, Nickel, Cobalt and Manganese from Aqueous Solution by Kaolinite*, Water Research 37, 948-952, Diyarbakir, Turkey.
- Ybarra, R.M., (2000), *Introduction of Process Dissection and Reintegration into Undergraduate Laboratory*, University of Missouri-Rolla.
- Yim, S., 2003, *Surface Complexation Reaction for Copper (II) Adsorption on Kaolinite*, School of Urban and Civil Engineering, Hongik University.