

**UJI PELULUHAN TEMBAGA - *SOLID WASTE FORM* TERSOLIDIFIKASI/
TERSTABILKAN SEMEN PORTLAND DAN KALSIT DENGAN UJI
*TOXIC CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE***

SKRIPSI

Diajukan kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta untuk Memenuhi Sebagian
Persyaratan Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Bidang Kimia



Oleh :

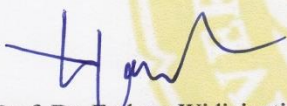
Indra Kurniawan
NIM 10307144023

**PROGRAM STUDI KIMIA
JURUSAN PENDIDIKAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA
2015**

PERSETUJUAN

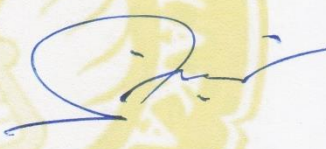
Skripsi yang berjudul “Uji Peluluhan Tembaga - *Solid Waste Form* Tersolidifikasi/Terstabilkan Semen Portland dan Kalsit dengan Uji *Toxic Characteristic Leaching Procedure*” yang disusun oleh Indra Kurniawan NIM 10307144023 telah disetujui oleh pembimbing untuk diujikan.

Mengetahui,
Koordinator Tugas Akhir Skripsi
Program Studi Kimia


Prof. Dr. Endang Widjajanti LFX
NIP. 19621203 198601 2 001

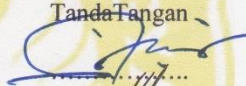



Yogyakarta, Maret 2015

Menyetujui,
Pembimbing


M. Pranjoto Utomo, M.Si
NIP. 19710408 199802 1 002

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul “Uji Peluluhan Tembaga - *Solid Waste Form* Tersolidifikasi/Terstabilkan Semen Portland dan Kalsit dengan Uji *Toxic Characteristic Leaching Procedure*” yang disusun oleh Indra Kurniawan NIM 10307144023 ini telah dipertahankan di depan Dewan Penguji pada tanggal 13 Maret 2015 dan dinyatakan lulus.

DEWAN PENGUJI			
Nama	Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
M. Pranjoto Utomo, M.Si	Ketua Penguji		10 April 2015
Sulistiyani, M.Si	Skretaris Penguji		9 April 2015
Dr. Hari Sutrisno	Penguji Utama		8 April 2015
Dr. Cahyorini K, M.Si	Penguji Pendamping		8 April 2015

Yogyakarta, 13 April 2015

Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam
Dekan,



Dr. Hartono
NIP. 19620329 198702 1 002

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Indra Kurniawan
NIM : 10307144023
Program Studi : Kimia
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Menyatakan bahwa penelitian ini adalah hasil pekerjaan saya yang tergabung dalam penelitian payung M. Pranjoto Utomo M.Si yang berjudul Uji Peluluhan Tembaga – *Solid Waste Form* Tersolidifikasi/Terstabilkan Semen Portland dan Kalsit dengan Uji *Toxic Characteristic Leaching Procedure*. Sepanjang pengetahuan saya tidak berisi materi atau data yang telah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain atau telah dipergunakan dan diterima sebagai persyaratan studi pada universitas atau institut lain, kecuali pada bagian-bagian yang telah dinyatakan dalam teks.

Tanda tangan dosen penguji yang tertera dalam pengesahan adalah asli. Jika tidak saya siap menerima sanksi ditunda yudisium pada periode berikutnya.

Yogyakarta, Maret 2015
Yang menyatakan,



Indra Kurniawan
NIM 10307144023

MOTTO

*The capacity to learn is a gift
The ability to learn is a skill
The willingness to learn is a choice.
Brian Herbert*

PERSEMBAHAN

Karya tulis skripsi ini saya persembahkan kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa
2. Kedua orang tuaku yang telah memberikan doanya selama ini
3. Teman-teman Kimia Swadana angkatan 2010
4. Almamater Universitas Negeri Yogyakarta

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, hidayah, serta inayah-Nya, berupa kesehatan, lindungan, serta bimbingan kepada penulis, sehingga skripsi yang berjudul “Uji Peluluhan Tembaga - *Solid Waste Form* Tersolidifikasi/Terstabilkan Semen Portland dan Kalsit dengan Uji *Toxic Characteristic Leaching Procedure*” dapat diselesaikan dengan baik.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu menyelesaikan penulisan skripsi ini, terutama kepada :

1. Dr. Hartono, selaku Dekan Fakultas MIPA UNY yang telah membantu dalam proses akademik dan nonakademik selama menempuh pendidikan di UNY.
2. Dr. Hari Sutrisno selaku Ketua Jurdik Pendidikan Kimia FMIPA UNY yang telah membantu dalam proses akademik dan nonakademik selama menempuh pendidikan di UNY.
3. Dr. Eli Rohaeti selaku sekretaris Jurusan Pendidikan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta.
4. Prof. Dr. Endang Widjajanti LFX selaku Koordinator TAS Prodi Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta.
5. M. Pranjoto Utomo, M.Si selaku dosen pembimbing Tugas Akhir Skripsi yang telah memberikan bimbingan, waktu, dan tenaganya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

6. Dr. Hari Sutrisno selaku penguji utama dan Dr. Cahyorini K, M.Si selaku penguji pendamping yang telah memberikan saran dan bimbingan sehingga penulis dapat menyempurnakan tugas akhir skripsi.
7. Sulistyani, M.Si selaku sekretaris penguji yang telah memberikan saran dan bimbingan sehingga penulis dapat menyempurnakan tugas akhir skripsi.
8. Semua dosen Jurusan Pendidikan Kimia FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta yang dengan sabar membimbing dan mendidik serta memberikan ilmunya kepada kami.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharap saran dan kritik yang bersifat membangun dari semua pihak untuk penyempurnaan yang lebih lanjut. Akhir kata semoga Allah SWT memberikan balasan atas budi baik dan bantuan mereka serta semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan bagi pihak yang membaca. Amin.

Yogyakarta, Maret 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Identifikasi Masalah	3
C. Pembatasan Masalah	4
D. Perumusan Masalah	5
E. Tujuan Penelitian	6
F. Manfaat Penelitian	6
G. Definisi Istilah.....	7
BAB II KAJIAN TEORI	
A. Deskripsi Teoritik	8
1. Pencemaran Tembaga	8
2. Semen Portland	9
3. Kalsit (CaCO_3)	12
4. Proses Solidifikasi/Stabilisasi	13
5. Toxic Characteristic Leaching Procedure (TCLP)	15

6. Uji Tekan.....	20
7. Spektroskopi Serapan Atom	21
B. Kajian Penelitian yang Terdahulu.....	22
C. Kerangka Berfikir	24

BAB III METODE PENELITIAN

A. Subjek dan Objek Penelitian	26
1. Subjek Penelitian	26
2. Objek Penelitian.....	26
B. Variabel Penelitian	26
1. Variabel Bebas	26
2. Variabel Terikat	26
C. Instrumen Penelitian	26
1. Alat-alat yang digunakan	26
2. Bahan-bahan yang digunakan	27
D. Prosedur Penelitian	27
1. Preparasi Simulasi Limbah Tembaga	27
2. Hidrasi Semen	28
3. Uji Tekan	28
4. Uji Peluluhan	28
a. Ekstraksi Kimia Bertahap	28
b. TCLP Standar.....	29
c. TCLP Progresif	30
d. TCLP Modifikasi	30
E. Teknik Analisis Data.....	30
1. Tingkat Peluluhan Kumulatif (TPK)	30
2. Analisis Konsentrasi Tembaga pada Peluluhan Semen	31

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian	32
1. Ekstraksi Kimia Bertahap	32

2. TCLP Standar dan TCLP Modifikasi	34
3. TCLP Progresif dan TCLP Modifikasi	34
4. Kuat Tekan Semen	36
B. Pembahasan.....	36
1. Ekstraksi Bertahap	36
2. TCLP Standar dan TCLP Modifikasi	40
3. TCLP Progresif dan TCLP Modifikasi	41
a. Konsentrasi Tembaga dalam Setiap Tahap Ekstraksi	42
b. Tingkat Peluluhan Kumulatif Tembaga dalam TCLP Progresif	45
4. Kuat Tekan	46
BAB V PENUTUP	
A. Kesimpulan	48
B. Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50
LAMPIRAN	53

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Hasil Ekstraksi Bertahap pada Matriks Semen/Cu	33
Tabel 2. Pengamatan pH dan Warna Ekstraktan.....	33
Tabel 3. Konsentrasi Logam Tembaga dalam Uji TCLP.....	34
Tabel 4. Konsentrasi Tembaga Terluluh Matriks Semen/Cu.....	35
Tabel 5. Kondisi pH Ekstraktan pada Matriks Semen/Cu	36
Tabel 6. Kuat Tekan Matriks Semen/Cu dan Kalsit	36
Tabel 7. Tingkat Peluluhan Kumulatif Tembaga Selama TCLP	45
Tabel 8. TPK pada Uji TCLP Progresif dan TCLP Modifikasi Progresif	46

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Konsentrasi Logam Cu Terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif Modifikasi pada Penambahan 0% Kalsit	42
Gambar 2. Konsentrasi Logam Cu Terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif Modifikasi pada Penambahan 5% Kalsit	43
Gambar 3. Konsentrasi Logam Cu Terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif Modifikasi pada Penambahan 10% Kalsit	43
Gambar 4. Konsentrasi Logam Cu yang terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif pada Pelarut Buffer	44

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Bagan Rancangan Penelitian	53
Lampiran 2. Hasil Analisis Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)	56
Lampiran 3. Analisis Kuat Tekan Matriks Semen	59
Lampiran 4. Tingkat Peluluhan Kumulatif Tembaga dalam TCLP Modifikasi Progresif	61
Lampiran 5. Gambar Instrumen Penelitian	64

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Limbah merupakan barang sisa dari sebuah kegiatan produksi yang sudah tidak bermanfaat. Limbah beraneka ragam yaitu limbah rumah tangga, limbah dari pabrik-pabrik besar dan ada juga limbah dari suatu kegiatan tertentu. Dalam dunia masyarakat yang semakin maju dan modern, peningkatan jumlah limbah pun semakin meningkat. Limbah yang dihasilkan dari proses produksi berupa bahan organik maupun bahan anorganik. Limbah bahan organik merupakan limbah yang mudah diurai, sedangkan limbah anorganik adalah jenis limbah yang sulit untuk diurai (Dyah, 2007: 20).

Sebagian limbah merupakan limbah dalam kategori Bahan Berbahaya dan Beracun (limbah B-3). Penanganan limbah B-3 yang tidak benar akan membahayakan lingkungan maupun kesehatan manusia, seperti terjangkitnya penyakit, keracunan dan akumulasi limbah di lingkungan (Tri, 2003: 6). Limbah tembaga merupakan contoh limbah yang termasuk dalam kategori limbah Bahan Beracun dan Berbahaya (B-3). Analisis kadar tembaga yang terkandung dalam limbah B-3 dilakukan untuk mengetahui jumlah tembaga yang terluluh ke lingkungan, sehingga dapat diupayakan usaha-usaha untuk memperkecil kadar tembaga yang menyebabkan toksikologi pada manusia (Winda, 2007: 23).

Tembaga dengan nama kimia cuprum dilambangkan dengan Cu, adalah unsur berbentuk kristal dan berwarna kemerahan. Unsur tembaga di alam dapat ditemukan dalam bentuk logam bebas, akan tetapi banyak ditemukan dalam

bentuk persenyawaan atau sebagai senyawa padat berbentuk mineral. Adanya tembaga (Cu) dalam jumlah yang besar dalam tubuh dapat menyebabkan gejala-gejala yang akut. Keracunan tembaga dapat menyebabkan gangguan pencernaan seperti sakit perut, mual, muntah, dan diare, serta gangguan sistem peredaran darah. Beberapa kasus yang parah dapat menyebabkan gagal ginjal dan kematian (Darmono, 1995: 65 - 69). Industri yang menghasilkan limbah tembaga antara lain industri kawat, elektronik dan perakitan otomotif.

Salah satu cara pengolahan limbah yang sering dilakukan adalah pengolahan limbah secara konvensional yaitu dengan cara pengendapan. Pengolahan dilakukan dengan cara mengubah logam pencemar terlarut menjadi hidroksida atau endapan sulfida yang tidak larut dan dikumpulkan sebagai lumpur (*sludge*). Selanjutnya lumpur tersebut ditimbun dalam tanah. Pada kondisi asam, logam yang terkandung dalam lumpur akan dilepaskan kembali ke alam. Bila hal ini berlangsung dalam jangka waktu yang lama, tentu saja bisa membahayakan kehidupan. Cara lain penanganan limbah adalah dengan cara elektrolisis, osmosis, penukar ion, emulsi membran cair dan absorpsi menggunakan mikroorganisme atau tumbuhan air tertentu (*bioassay*) (Tri, 2003: 2). Salah satu alternatif penanganan limbah adalah metode solidifikasi dan stabilisasi.

Stabilisasi didefinisikan sebagai proses pencampuran bahan berbahaya dengan bahan tambahan dengan tujuan untuk menurunkan laju migrasi dan toksisitas bahan berbahaya tersebut. Sedangkan solidifikasi didefinisikan sebagai proses pemadatan suatu bahan berbahaya dengan penambahan aditif. Kedua proses tersebut seringkali terkait sehingga sering dianggap mempunyai arti yang

sama (Spence and Shi, 2005). Proses stabilisasi/solidifikasi ini menggunakan matriks semen bertujuan untuk mengurangi limbah berbahaya meluluh kembali ke tanah. Prinsip kerja stabilisasi/solidifikasi adalah pengubahan watak fisik dan kimiawi bahan berbahaya (limbah B-3) dengan cara penambahan senyawa pengikat. Semen, kapur, silika terlarut merupakan bahan yang sering digunakan pada solidifikasi/stabilisasi limbah. Semen Portland digunakan sebagai matriks solidifikasi karena semen banyak digunakan dalam dunia perdagangan maupun penelitian.

Tujuan dari solidifikasi/stabilisasi adalah membuat produk yang tidak akan meluluhkan kontaminan ke lingkungan. Produk dari proses S/S merupakan produk yang aman dan dapat diarahkan untuk pembuatan produk yang bermanfaat, misalnya *paving block*, batako, dan tiang listrik berbahan dasar limbah. Efektivitas semen Portland dan kalsit pada proses solidifikasi/stabilisasi limbah tembaga dapat dilihat dari kemampuan peluluhan logam tersebut dalam air sumur, air laut dan larutan buffer.

B. Identifikasi Masalah

1. Jenis limbah logam berbahaya yang ditambahkan matriks semen.
2. Jenis semen yang digunakan untuk solidifikasi limbah.
3. Konsentrasi larutan simulasi limbah yang ditambahkan pada matriks semen.
4. Variasi kalsit yang ditambahkan pada matriks semen/Cu

5. Waktu pencuringan semen yang sudah dicampur dengan kalsit dan larutan simulasi limbah.
6. Metode yang digunakan untuk mengukur kuat tekan semen.
7. Metode yang digunakan untuk menghitung konsentrasi tembaga yang terlarut pada matriks semen dan kalsit.
8. Metode yang digunakan untuk mengukur pH filtrat hasil reaksi.
9. Uji peluluhan tembaga tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit.

C. Pembatasan Masalah

1. Jenis limbah logam berbahaya yang ditambahkan matriks semen adalah simulasi limbah logam tembaga yang dibuat dengan melarutkan padatan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.
2. Jenis semen yang digunakan untuk solidifikasi limbah adalah semen Portland Holcim.
3. Konsentrasi larutan simulasi limbah yang ditambahkan pada matriks semen dan kalsit adalah ± 160 ppm dengan perbandingan 1:2 dari berat semen/Cu.
4. Variasi kalsit yang ditambahkan pada matriks semen adalah 0%, 5%, dan 10% dari 20% berat campuran.
5. Waktu pencuringan semen yang sudah dicampur dengan kalsit dan larutan simulasi limbah adalah 28 hari.

6. Metode yang digunakan untuk mengukur kuat tekan semen adalah dengan alat kuat tekan *Shimadzu Universal Testing Machine* yang dioperasikan secara manual.
7. Metode yang digunakan untuk menghitung konsentrasi tembaga yang terlarut pada matriks semen dan kalsit adalah dengan prosedur ekstraksi bertahap dan *Toxic Characteristic Leaching Procedure* (TCLP).
8. Metode yang digunakan untuk mengukur pH filtrat hasil reaksi menggunakan pH meter yang distandarisasi dengan larutan buffer pH 4 dan 7.
9. Uji peluruhan tembaga tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit adalah pengaruh efisiensi penyerapan dalam setiap pelarut buffer, air tanah, dan air laut.

D. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah pengaruh penambahan kalsit pada uji peluruhan tembaga yang tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit?
2. Bagaimanakah pengaruh efisiensi penyerapan tembaga dalam larutan buffer, air tanah, dan air laut terhadap uji peluruhan tembaga yang tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit?
3. Berapakah daya kuat tekan semen dan kalsit yang digunakan pada solidifikasi/stabilisasi tembaga?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mempelajari pengaruh penambahan kalsit pada uji peluluhan tembaga yang tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit.
2. Mempelajari pengaruh efisiensi penjerapan tembaga dalam larutan buffer, air tanah, dan air laut terhadap uji peluluhan tembaga yang tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit.
3. Mempelajari daya kuat tekan semen dan kalsit yang digunakan pada solidifikasi/stabilisasi tembaga.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah :

1. Memberikan informasi tentang pengaruh penambahan kalsit pada uji peluluhan tembaga yang tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit.
2. Memberikan informasi tentang pengaruh efisiensi penjerapan tembaga dalam larutan buffer, air tanah, dan air laut terhadap uji peluluhan tembaga yang tersolidifikasi/terstabilkan semen Portland dan kalsit.
3. Memberikan informasi tentang daya kuat tekan semen dan kalsit yang digunakan pada solidifikasi/stabilisasi tembaga.
4. Memberikan alternatif penanganan dan pemanfaatan limbah yang mengandung limbah B-3 sebagai upaya meningkatkan nilai guna limbah.

G. Definisi Istilah

1. Peluluhan (*leaching*) adalah ekstraksi komponen larut dari campuran padatan melalui perkolasi pelarut.
2. TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) standar adalah prosedur standar berdasarkan USEPA untuk mengetahui jumlah zat/logam dalam larutan peluluh standar buffer natrium asetat pH 5.
3. TCLP progresif adalah prosedur standar berdasarkan USEPA (U.S *Environmental Protection Agency*) untuk mempelajari laju peluluhan logam dalam semen.
4. TCLP modifikasi adalah modifikasi prosedur standar TCLP dengan mengganti larutan peluluh buffer natrium asetat dengan air laut, dan air tanah.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Deskripsi Teoritik

1. Pencemaran Tembaga

Berdasarkan kelimpahan di alam, mineral dibagi menjadi dua kelompok, yaitu mineral makro dan mineral mikro. Mineral makro adalah mineral yang terdapat dalam jumlah relatif besar, meliputi Ca, P, K, Na, Cl, S, dan Mg. Mineral mikro ialah mineral yang diperlukan dalam jumlah sangat sedikit dan umumnya terdapat dalam jaringan dengan konsentrasi sangat kecil, yaitu Fe, Mo, Cu, Zn, Mn, Co, I, dan Se (Zaenal, 2008: 100). Tembaga (Cu) merupakan mineral mikro karena keberadaannya dalam tubuh sangat sedikit namun diperlukan dalam proses fisiologis. Di alam, Cu umumnya ditemukan dalam bentuk senyawa sulfida (CuS). Walaupun dibutuhkan tubuh dalam jumlah sedikit, namun bila terjadi kekurangan Cu dalam darah dapat menyebabkan anemia yang merupakan gejala umum, pertumbuhan terhambat, kerusakan tulang, depigmentasi rambut dan bulu, pertumbuhan bulu abnormal, dan gangguan gastrointestinal. Kelebihan dapat mengganggu kesehatan atau mengakibatkan keracunan (Zaenal, 2008: 100).

Tembaga adalah logam kemerah-merahan yang dapat ditemukan di alam dalam bentuk logam bebas maupun persenyawaan dalam bentuk mineral. Selain kedua bentuk tersebut, tembaga juga dapat ditemukan dalam bentuk teroksidasi seperti bijih. Pemakaian tembaga yang terus meningkat menjadikan tembaga sebagai salah satu pencemar yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Tembaga bersifat toksik yang dalam jumlah relatif kecil bisa menyebabkan gangguan

kesehatan manusia. Senyawa tembaga-organik relatif lebih mudah diserap tubuh melalui selaput lendir atau lapisan kulit dibandingkan senyawa tembaga-anorganik (Heryando, 1994: 61).

Toksisitas tembaga terjadi apabila jumlah tembaga yang masuk ke dalam tubuh organisme melebihi toleransi tubuh organisme terhadap tembaga tersebut. Meskipun tembaga logam berat yang beracun tetapi unsur logam ini sangat dibutuhkan dalam tubuh meskipun dalam jumlah yang sedikit. Menurut Heryando (2004: 70 - 71), jumlah tembaga yang dibutuhkan manusia dewasa yaitu sekitar 30 μ g perkilogram berat tubuh, pada anak-anak membutuhkan sekitar 40 μ g perkilogram berat tubuh, sedangkan pada bayi membutuhkan sekitar 80 μ g perkilogram berat tubuh.

Keracunan tembaga secara kronis pada manusia dapat menyebabkan penyakit Wilson dan Kinsky. Gejala penyakit Wilson adalah terjadinya *hepatic cirrhosis*, kerusakan otak dan terjadinya penurunan kerja ginjal serta terjadinya endapan tembaga di kornea mata. Penyakit Kinsky ditandai dengan bentuk rambut yang kaku dan berwarna kemerahan (Heryando, 2004: 84).

2. Semen Portland

Semen portland adalah suatu bahan konstruksi yang paling banyak dipakai yang didefinisikan sebagai semen hidrolik yang dihasilkan dengan klinker yang terdiri dari kalsium silikat hidrolik yang umumnya mengandung satu atau lebih kalsium sulfat sebagai bahan tambahan, yang digiling bersama dengan bahan utamanya. Semen yang dicampur dengan air akan membentuk pasta semen. Pasta

yang dicampur dengan pasir akan membentuk mortar semen, sedangkan jika ditambah dengan kerikil akan membentuk beton. Untuk mendapatkan kekuatan yang baik, sifat dan karakteristik dari masing-masing bahan penyusun tersebut harus dipelajari (Tri, 2003: 36).

Ketika semen bercampur dengan air maka proses hidrasi berlangsung dari luar ke inti. Air akan mencapai inti melalui proses difusi dan kemudian akan terjadi hidrasi lagi. Selanjutnya rongga-rongga yang dilewati air tadi akan membuat senyawa yang didalamnya melekat lalu menjadi kaku dan mengeras. Persenyawaan semen dan air akan mengeluarkan panas yang akan membantu proses pengerasan semen. Semen portland dipergunakan dalam semua jenis beton struktural seperti tembok, lantai, jembatan, terowongan dan sebagainya, yang diperkuat dengan tulangan atau tanpa tulangan. Selanjutnya semen portland itu digunakan dalam segala macam adukan seperti fondasi, telapak, dam, tembok penahan, pengerasan jalan dan sebagainya.

Menurut Austin (1996: 176) semen Portland diklasifikasikan dalam lima tipe yaitu

1. Tipe I – semen portland jenis umum (*Normal Portland Cement*)

Semen portland tipe 1 yaitu produk yang umum digunakan untuk bangunan biasa, semen tipe ini terdiri dari semen putih, semen sumur minyak, dan semen cepat keras.

2. Tipe II – semen jenis umum dengan perubahan-perubahan (*Modified Portland Cement*)

Semen portland tipe II merupakan semen portland dengan kalor pengerasan sedang atau semen portland tahan sulfat. Semen tipe ini biasanya digunakan untuk bangunan beton biasa yang mempunyai kemungkinan terkena aksi sulfat sedang.

3. Tipe III – semen portland dengan kekuatan awal *tinggi* (*High Early Strength Portland Cement*)

Semen portland tipe III adalah semen dengan kekuatan awal tinggi. Ciri dari semen ini adalah kandungan senyawa trikalsium silikat (C_3S) yang lebih banyak dibandingkan semen portland biasa.

4. Tipe IV – semen portland dengan panas hidrasi yang rendah (*Low Heat Of Hydration Portland Cement*)

Semen portland tipe IV atau disebut juga semen portland kalor rendah yang merupakan semen yang mempunyai presentase kandungan C_3S dan trikalsium aluminat lebih rendah, sehingga pengeluaran kalornya pun lebih rendah.

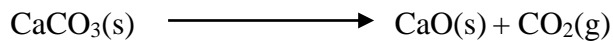
5. Tipe V – semen portland tahan sulfat (*Sulphate Resistance Portland Cement*)

Semen portland tipe V atau semen portland tahan sulfat merupakan semen yang digunakan untuk bangunan yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

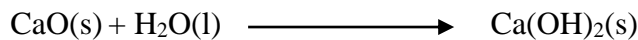
3. Kalsit (CaCO_3)

Kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan bahan penyusun utama dalam pembuatan semen Portland yaitu 65% hingga 75% dari bahan penyusun lainnya seperti silika, alumina, magnesia, dan oksida besi (Kardiyono, 2007: 7).

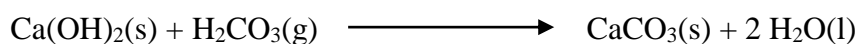
West (2009: 27-29) menyebutkan bahwa kalsium karbonat (CaCO_3) dari batu gamping mempunyai banyak kegunaan, misal digunakan dalam produksi baja. Namun, batu gamping juga diubah menjadi kapur tohor (CaO) melalui suatu reaksi yang sederhana. Ketika dipanaskan batu gamping terurai menjadi kapur tohor dan gas karbondioksida (CO_2):



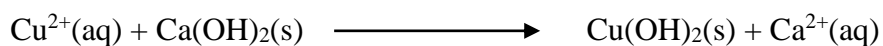
Kapur tohor (*quick lime*) adalah zat yang reaktif dan bahan dalam plaster, mortal, dan semen. Apabila air (H_2O) ditambahkan ke kapur tohor, maka terjadi reaksi yang dikenal sebagai reaksi pembentukan kapur mati (*slaking*). Reaksi tersebut menghasilkan kapur mati (*slake lime*) atau kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$):



Reaksi kapur mati (*slake lime*) dengan air (H_2O) dan karbondioksida (CO_2) akan menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) dan air (H_2O). Reaksinya sebagai berikut:



Reaksi kimia yang terjadi dalam air limbah yang mengandung Cu^{2+} dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ akan menghasilkan endapan $\text{Cu}(\text{OH})_2$.



Kalsit yang ditambahkan ke dalam semen akan mensubstitusi sebagian komponen gypsum yang terdapat dalam semen, menyebabkan proses reduksi dalam jumlah energi untuk klinker penggiling, dan menyebabkan terjadinya proses pengerasan beton (Lee, 2004: 232).

4. Proses Solidifikasi/Stabilisasi

Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) adalah teknologi penstabilan yang bergantung pada proses fisika dan kimia untuk menstabilkan logam berat yang ada dalam objek yang terkontaminasi. Penggunaan semen pada proses Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) bertujuan untuk menjerat kontaminan supaya tidak meluluh kembali ke tanah, bahkan apabila semen tersebut dihancurkan (Dyah, 2007: 25).

Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) limbah menggunakan semen merupakan salah satu alternatif pengolahan limbah dengan tujuan untuk mengurangi pencemaran logam berat ke dalam lingkungan. Semen portland digunakan sebagai media penyerapan terhadap kontaminan karena semen banyak digunakan sebagai bahan bangunan. Penambahan kapur ke dalam matriks semen bertujuan untuk menambah kekuatan matriks semen dan sebagai pengikat kontaminan. Komposisi yang tepat pada penambahan bahan dalam matriks akan membuat logam lebih stabil. Teknik ini menghasilkan limbah yang tersolidifikasi sehingga menghindarkan penyebaran konstituen pada air tanah. Karbonasi dengan menggunakan kapur efektif dalam solidifikasi limbah organik dan anorganik (Swarnalatha *et al.*, 2006: 305). Stabilisasi dengan semen cocok untuk tanah yang tidak kohesif, yaitu tanah berpasir atau kerikil yang mengandung sedikit tanah

yang berbutir halus, sedangkan kapur dan *pozzolan* cocok untuk tanah kohesif (Djarmiko dan Edy, 1997: 34). Tujuan dari solidifikasi/stabilisasi adalah membuat produk yang tidak akan meluluhkan kontaminan ke lingkungan. Produk dari proses S/S merupakan produk yang aman dan dapat diarahkan untuk pembuatan produk yang bermanfaat, misalnya *paving block*, batako, dan tiang listrik berbahan dasar limbah.

Untuk mengetahui keberhasilan tujuan dari proses S/S dilakukan dengan cara melakukan uji standard dan uji termodifikasi. Tiga hal yang umumnya dilakukan dalam pengujian proses S/S adalah:

1. Fisik, mencakup kelembaban, kerapatan, kepadatan, kekuatan dan daya tahan.
2. Kimiawi, mencakup pH, reaksi redoks, kapasitas penetralan asam, kebasaan, dan kandungan senyawa organik.
3. Peluluhan, mencakup TCLP, prosedur ekstraksi bertingkat, peluluhan dinamis prosedur peluluhan pengendapan asam sintetis (SPLP, *Synthetic Acid Precipitation Leaching Procedure*) dan ekstraksi berurutan.

Proses Solidifikasi/Stabilisasi dikatakan berhasil jika kontaminan tidak meluluh ke lingkungan yang dapat berubah setiap waktu dan mempunyai ketahanan yang lama dalam jangka waktu yang pendek maupun panjang. Bentuk matriks dari proses S/S yang tidak kuat dan padat akan mudah pecah dan beresiko meluluhkan kontaminan di dalamnya. Sehingga dalam proses ini dibutuhkan pencampuran yang sesuai antara limbah, semen maupun penambahan senyawa

pengikatnya yang kemungkinannya dapat digunakan sebagai bahan bangunan (Dyah, 2007: 24-25).

Bishop (1991: 302) telah mengidentifikasi beberapa faktor yang mempengaruhi peluluhan limbah logam berat yang telah distabilisasi dengan semen. Faktor tersebut meliputi wujud dan jumlah limbah logam berat, sistem *binder* , pH, perbandingan permukaan volum, porositas, ketahanan, komposisi sistem peluluh, dan perbandingan volum peluluh-limbah logam berat.

Proses Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) adalah suatu proses penanganan limbah B-3 dilakukan dengan metode sementasi serta penambahan bahan pengikat tertentu sehingga menghasilkan massa yang padat dan kuat yang bertujuan untuk memperkecil atau membatasi larutnya kontaminan ke dalam lingkungan. Metode sementasi memungkinkan matriks semen aman untuk digunakan sebagai bahan bangunan atau material konstruksi karena pengikatan logam berat yang cukup kuat.

5. *Toxic Characteristic Leaching Procedure (TCLP)*

Faktor yang penting dalam menentukan efektivitas proses solidifikasi/stabilisasi logam berat dengan semen adalah dengan uji peluluhan. Kajian proses peluluhan logam berat dilakukan untuk memperoleh informasi tentang spesiasi kimia dari logam berat dalam matriks semen-limbah logam berat dan potensinya terhadap lingkungan. *Toxic Characteristic Leaching Procedure (TCLP)*, merupakan salah satu uji karakteristik toksisitas terhadap suatu limbah atau bahan pencemar. Menurut SK BAPEDAL No. Kep-03/BAPEDAL/09/1995,

tentang Baku Mutu Uji *Toxic Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) pada pengolahan limbah secara stabilisasi/solidifikasi, dalam hal ini menggunakan sementasi yang selanjutnya limbah dilakukan penimbunan (*landfill*). Penimbunan dilakukan dengan syarat tanpa adanya reaksi/kontak air tanah/air permukaan ataupun air di luar *landfill*. Jika terjadi kontak langsung, maka air yang terkumpul di *landfill* dan berkontak langsung dengan limbah B-3 harus dipindahkan ke tempat penampungan pengumpulan luluhan. Pengaliran/pembuangan luluhan dari tempat pengumpulan ke perairan bebas dapat dilakukan setelah diuji kualitasnya dan memenuhi baku mutu limbah cair maka timbunan luluhan harus diolah terlebih dahulu, hingga memenuhi mutu limbah cair.

Spesifikasi dari logam kontaminan dan unsur-unsur utama matriks semen dapat dipelajari dengan prosedur ekstraksi bertahap, prosedur karakteristik peluluhan tingkat keracunan TCLP standar dan TCLP progresif. Metode ekstraksi bertahap digunakan untuk mempelajari spesifikasi dan kemungkinan hubungan antara tembaga dengan komponen pasta semen. Pembagian logam secara operasional didefinisikan berdasarkan reagen yang digunakan dan matriks sampel. Untuk matriks semen, uji TCLP sangat berguna untuk menghitung distribusi logam dalam fasa yang berbeda, mekanisme ikatan dan perilaku peluluhan (Elmi, 2007: 23). Dalam kaitannya dengan baku mutu yang akan diterapkan, maka uji TCLP ini merupakan pendekatan dalam upaya pengendalian terhadap pembuangan limbah berbahaya. Adapun sasaran uji TCLP ini adalah membatasi adanya material lindi (*leached material*) berbahaya yang dihasilkan dari penimbunan (*landfilling*) setelah limbah disolidifikasi/stabilisasi.

Uji TCLP diperkenalkan oleh Tessler, Campbell and Bisson (1979: 844-851) dan digunakan untuk mengetahui tingkat peluluhan tembaga dalam matriks semen. Dengan uji TCLP dapat ditentukan apakah stabilisasi tembaga efektif dan aman bagi lingkungan atau tidak.

Metode ekstraksi bertahap telah digunakan untuk mempelajari ketersediaan relatif logam-logam yang terserap tanah dengan menyatakan secara operasional yang didefinisikan sebagai spesifikasi dari suatu logam dalam fasa padat. Metode ekstraksi bertahap digunakan untuk mempelajari spesifikasi dan kemungkinan hubungan antara logam dengan pasta semen. Metode ekstraksi bertahap terdiri dari 5 fraksi meliputi zat yang mudah tertukar, pengikatan karbonat/absorben spesifik, pengikatan besi, pengikatan zat organik/sulfat, dan fraksi residu.

Fraksi zat yang mudah tertukar: fraksi ini melibatkan adsorpsi logam pada permukaan padatan yang relatif lemah (interaksi elektrostatik) sehingga logam dengan mudah dapat dilepaskan oleh proses pertukaran ion. Remobilisasi logam pada fraksi ini dihasilkan dari reaksi adsorpsi-desorpsi dan rendahnya pH (Ahnstrom and Parker, 1999: 1650 - 1658). Logam yang dapat ditukar merupakan suatu ukuran mudah/tidaknya logam tersebut dilepaskan ke lingkungan untuk logam-logam dengan kandungan rendah. Reagen yang digunakan pada fraksi ini adalah $MgCl_2$, natrium asetat (pH 5,4 dengan cara penambahan asam asetat). Reagen yang digunakan untuk menukar adalah elektrolit seperti garam dari asam dan basa kuat atau garam dari asam dan basa lemah pada pH 7. Reagen lain yang menunjukkan kemiripan sifat dengan reagen-reagen tersebut misalnya garam

nitrat, tetapi reagen ini jarang digunakan. Garam nitrat digunakan untuk menghindari terjadinya kompleksasi yang terlalu kuat atau terbentuknya garam kalsium (ion Ca^{2+} lebih efektif daripada ion Mg^{2+} pada proses pertukaran ion (Gleyzes *et al.*, 2002: 451 – 467).

Fraksi pengikatan karbonat/adsorben spesifik: karbonat cenderung menjadi adsorben dominan untuk kebanyakan logam dimana terjadi reduksi oksida Fe-Mn dan juga senyawa-senyawa organik dalam suatu sistem akuatik. Reagen yang paling sering digunakan untuk ekstraksi logam-logam renik dari fasa karbonat dalam tanah dan endapan adalah natrium asetat 1 M yang pH-nya dibuat 5 dengan cara menambahkan asam asetat (Tessler, Campbell and Bisson, 1979: 844 - 851). Waktu yang dibutuhkan untuk melarutkan karbonat secara sempurna tergantung dari beberapa faktor, misalnya jenis dan jumlah karbonat dalam sampel dan ukuran partikel padatan (Beck *et al.*, 2001). Ekstraksi logam dari fasa karbonat akan meningkatkan jumlah logam terlarut baik logam-logam yang terikat pada senyawa atau substrat organik dari anorganik (Tessler, Campbell and Bisson, 1979: 844 – 851). Secara umum, fraksi pengikatan karbonat sangat dipengaruhi oleh perubahan pH dan pelepasan logam melalui proses pelarutan yang terjadi pada pH sekitar 5 (Gleyzes *et al.*, 2002: 451 - 467).

Fraksi pengikatan besi: fraksi ini ditujukan untuk menghilangkan logam-logam berat melalui proses kombinasi pengendapan, adsorpsi, pembentukan kompleks permukaan, dan pertukaran ion (Hall and Pelchat, 1999: 141 - 153). Ekstraksi logam pada fraksi pengikatan besi dilakukan dengan hidroksilamin 0,1 M/ 0,5 M. Jika ekstraksi dilakukan dengan hidroksilamin 0,1 M, maka logam-

logam yang dilepas terutama dari fasa oksida mangan amorf yang lebih lemah terikat pada fraksi oksida besi (Shuman, 1983: 656 - 660). Ekstraksi menggunakan hidroksilamin 0,5 M akan mengikat logam dari fasa oksida besi dan tetap melepaskan logam dari fasa oksida mangan. Reagen lain yang juga digunakan pada fraksi ini adalah natrium tianat yang dikombinasikan dengan natrium sitrat dan natrium bikarbonat pada berbagai variasi konsentrasi (Beckett, 1989: 143 - 146). Ekstraksi dengan reagen asam askorbat/ammonium oksalat lebih menguntungkan karena derajat kemurniannya tinggi dan tidak mengikat silikat. Reagen yang paling baik untuk menentukan jumlah total ion logam yang terikat pada mineral-mineral yang mengandung besi dan mangan adalah reagen yang mengandung senyawa reduktor dan ligan yang mampu membentuk kompleks terlarut. Efisiensi reagen ditentukan berdasarkan potensial reduksi dan kemampuan reagen untuk merusak bentuk kristalin yang berbeda dari besi dan mangan oksihidroksida. Reagen tersebut adalah hidroksilamin, asam oksalat, dan ion ditionit ($S_2O_4^{2-}$) (Gleyzes *et al.*, 2002: 451 - 467).

Fraksi pengikatan zat organik/sulfat proses bioakumulasi dan kompleksasi merupakan sumber utama logam renik yang terikat pada material organik misalnya pada organisme. Pada sistem akuatik, senyawa-senyawa organik cenderung memiliki selektivitas yang tinggi terhadap ion individu dibandingkan ion monovalen. Selektivitas senyawa organik terhadap logam berturut-turut adalah $Hg > Cu > Pb > Zn > Ni > Co$ (Filgueiras *et al.*, 2002: 823 - 857). Reagen yang umum digunakan pada fraksi pengikatan zat organik adalah hidrogen peroksida dan amonium asetat dimana terjadi proses readsorpsi dan pengendapan

dari logam-logam yang dilepas. Reagen lain seperti hidrogen peroksida yang dikombinasi dengan asam askorbat atau asam nitrat dan asam klorida telah digunakan untuk melarutkan sulfida, dan terbukti meningkatkan selektivitas reagen tersebut. Tetapi di sisi lain, reagen tersebut terlalu merusak silikat (Klock *et al.*, 1986: 157 - 163).

Fraksi residu adalah alat ukur yang baik untuk pengujian potensial bahaya logam berat atau logam beracun yang memasuki lingkungan pada jangka panjang. Asam kuat misalnya asam nitrat, asam klorida, atau campuran aqua regia sering digunakan pada fraksi residu karena tidak melarutkan matriks silikat. Fraksi residu memberikan estimasi jumlah maksimal suatu unsur yang secara potensial dapat dimobilisasi seiring dengan kondisi berubahnya lingkungan. Mineral primer dan sekunder yang mengandung logam pada kisi kristalin merupakan bagian yang dominan pada fraksi ini. Mineral tersebut bisa dilarutkan dengan penambahan asam kuat (HF, HClO₄, HCl, HNO₃) (Okoro *et al.*, 2012: 7).

6. Uji Tekan

Salah satu metode untuk mengetahui sifat-sifat mekanik semen adalah dengan menguji kuat tekan hasil pemadatan semen selama 3 – 28 hari setelah proses hidrasi. Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap kuat tekan semen padat meliputi kualitas semen, perbandingan air-semen, komposisi campuran, kepadatan, pencuringan, umur hidrasi dan temperatur lingkungan.

7. Spektroskopi Serapan Atom

Spektroskopi merupakan suatu metode analisis kuantitatif yang pengukurannya berdasarkan banyaknya radiasi yang dihasilkan atau yang diserap oleh spesi atom atau molekul analit. Salah satu bagian dari spektrometri ialah Spektroskopi Serapan Atom (SSA), merupakan metode analisis unsur secara kuantitatif yang pengukurannya berdasarkan penyerapan cahaya dengan panjang gelombang tertentu oleh atom logam dalam keadaan bebas (Skoog *et al.*, 2000: 559).

Spektroskopi Serapan Atom (SSA) merupakan teknik analisis kuantitatif dari unsur-unsur yang pemakaiannya sangat luas, di berbagai bidang karena prosedurnya selektif, spesifik, biaya analisa relatif murah, sensitifitasnya tinggi (ppm sampai ppb), dapat dengan mudah membuat matriks yang sesuai dengan standar, waktu analisis sangat cepat dan mudah dilakukan. Analisis SSA pada umumnya digunakan untuk analisis unsur, teknik ini menjadi alat yang canggih dalam analisis, ini disebabkan karena sebelum pengukuran tidak selalu memerlukan pemisahan unsur yang ditentukan karena kemungkinan penentuan satu logam unsur dengan kehadiran unsur lain dapat dilakukan, asalkan katoda berongga yang diperlukan tersedia. SSA dapat digunakan untuk mengukur logam sebanyak 61 logam.

Sumber cahaya pada SSA adalah sumber cahaya dari lampu katoda yang berasal dari elemen yang sedang diukur kemudian dilewatkan ke dalam nyala api yang berisi sampel yang telah terakomisasi, kemudian radiasi tersebut diteruskan ke detektor melalui monokromator. *Chopper* digunakan untuk membedakan

radiasi yang berasal dari nyala api. Detektor akan menolak arus searah (DC) dari emisi nyala dan hanya mengukur arus bolak-balik dari sumber radiasi atau sampel. Atom dari suatu unsur pada keadaan dasar akan dikenai radiasi maka atom tersebut akan menyerap energi dan mengakibatkan elektron pada kulit terluar naik ke tingkat energi yang lebih tinggi atau tereksitasi. Atom-atom dari sampel akan menyerap sebagian sinar yang dipancarkan oleh sumber cahaya. Penyerapan energi cahaya terjadi pada panjang gelombang tertentu sesuai dengan energi yang dibutuhkan oleh atom tersebut (Basset, 1994: 56).

B. Kajian Penelitian yang Terdahulu

Prabang dan Ari (2008) mengemukakan bahwa prosentase campuran limbah batu baterai yang di bawah standar yaitu mulai konsentrasi 40% sehingga komposisi campuran tersebut tidak direkomendasikan sebagai campuran untuk diaplikasikan dalam konstruksi bangunan sebagai pelapis tembok. Pada konsentrasi 20% dalam batas toleransi standar konstruksi pelapis tembok, namun secara teknis pada konsentrasi 20% merupakan standar campuran limbah batu baterai dan semen yang terbaik. Setelah proses pencarian komposisi campuran limbah batu baterai dan semen yang baik sesuai standar konstruksi maka perlu diketahui aspek toksisitas dari agregat limbah. Berdasarkan hasil uji TCLP dapat diketahui bahwa sisa batu baterai kering yang berbentuk serbuk masih di bawah ambang batas dalam hal konsentrasi dalam ekstraksi limbahnya. Dari hasil uji TCLP maka logam berat yang terdeteksi adalah unsur Pb, Hg dan Zn meskipun masih di bawah standar. Berdasarkan data toksisitas terhadap lumut di atas

diketahui bahwa LC 50 tercapai pada konsentrasi 20%. Data ini didukung dengan data kelayakan standar teknis komposisi campuran 20% limbah batu baterai : 80% semen relatif sama dengan komposisi perbandingan 1:5 untuk semen dengan pasir.

Aisyah (2011) mengemukakan bahwa *sludge cake* yang berasal dari proses *belt filter press* yang mengandung logam boron (B), kadmium (Cd), tembaga (Cu), timbal (Pb), merkuri (Hg), selenium (Se), perak (Ag), serta seng (Zn) dengan konsentrasi-konsentrasi tersebut berada dalam kadar yang sangat rendah bahkan di bawah *detection limit* dari alat tersebut. Sedangkan untuk kadar arsen (As) dan barium (Ba) terdeteksi sangat jauh di bawah baku mutu. Lalu dibuat *paving block* dari *sludge cake* tersebut dengan perbandingan antara semen : *sludge cake* : dan pasir adalah 2 : 1 : 1 lalu dilakukan uji TCLP terhadap *paving block* tersebut. Didapatkan hasil bahwa solidifikasi *sludge cake* menggunakan pasir dan semen mampu mengikat kandungan logam berat (Yulinah, 2000). Sebagai contoh yaitu kadar arsen pada *sludge cake* adalah 0,01 mg/L, setelah dilakukan solidifikasi maka hasilnya menurun menjadi 0,0034 mg/L. Kemudian kandungan barium pada *sludge cake* adalah 0,34 mg/L, setelah dilakukan solidifikasi maka hasilnya menurun menjadi 0,1433 mg/L. Penurunan konsentrasi arsen dan barium pada *paving block* adalah sebesar 66% dan 58%. Sehingga solidifikasi *sludge cake* dengan pasir dan semen cukup baik dilakukan untuk mereduksi kandungan logam berat.

C. Kerangka Berfikir

Semen oleh masyarakat awam dikenal sebagai bahan dasar konstruksi bangunan. Seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan struktur semen banyak dimodifikasi untuk aplikasi yang lebih luas lagi, tidak hanya sekedar untuk bahan konstruksi bangunan saja. Dalam penelitian ini diharapkan dapat terungkap adanya aplikasi semen sebagai bahan penstabil logam berat, khususnya tembaga.

Kandungan utama dalam semen yaitu senyawa trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A), dan tetrakalsium aluminaferit (C_4AF). Dengan proses hidrasi diharapkan semen dapat menstabilkan logam tembaga dalam bentuk kompleks logam-logam setelah semen mengeras. Sampel tembaga yang diujikan dalam penelitian ini adalah senyawa $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$.

Semen dicampur $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ dan $CaCO_3$ dengan perbandingan tertentu dan dihidrasi dengan aquades. Senyawa-senyawa dalam matriks semen akan berinteraksi dengan lingkungan seperti air, garam, larutan elektrolit dan asam, sehingga perlu diketahui tingkat kestabilan logam tembaga pada matriks semen dalam berbagai media. Penggunaan kalsit bertujuan untuk memperkecil tingkat peluluhan tembaga dan menambah kuat tekan matriks semen. Matriks semen diuji kuat tekan setelah proses pencuringan selama 28 hari, kemudian untuk mengetahui konsentrasi tembaga yang terstabilisasi, matriks semen ditumbuk sampai mencapai ukuran 150 mikromiumeter dan diuji berdasarkan metode ekstraksi bertahap, prosedur standar TCLP, progresif TCLP, dan TCLP modifikasi.

Dengan mengukur konsentrasi tembaga terlarut dengan spektrofotometri serapan atom (SSA), maka tembaga yang terstabilisasi dalam struktur semen dapat diketahui.

BAB III METODE PENELITIAN

A. Subyek dan Objek Penelitian

1. Subjek penelitian : Tembaga *Solid Waste Form*
2. Obyek penelitian : Daya tekan semen, uji peluluhan tembaga

B. Variabel Penelitian

1. Variabel bebas : Variasi rasio perbandingan tembaga, semen, dan kalsit, lama perendaman semen dalam air, pH awal uji TCLP, lama ekstraksi, dan kecepatan sentrifus.
2. Variabel terikat : Kadar logam berat setelah dilakukan uji TCLP dan ekstraksi bertahap serta kuat tekan matriks logam/semen dan matriks semen, dan rasio air dan semen.

C. Instrumen Penelitian

1. Alat-alat yang digunakan:

- a. Spektrofotometer Serapan Atom Perkin Elmer 5100PC
- b. Alat uji kuat tekan *Shimadzu Universal Testing Machine*
- c. Cetakan beton uji
- d. Muffle
- e. Peralatan gelas

2. Bahan-bahan yang digunakan:

- a. Semen Portland Holcim
- b. CaCO_3 p.a (p. a. Merck)
- c. Larutan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (p. a. Merck)
- d. Air sumur dan air laut
- e. Larutan CH_3COOH 99,7% (p. a. Merck)
- f. HNO_3 pekat (p. a. Merck)
- g. NaOH 0.1 N (p. a. Merck)
- h. MgCl_2 0,1 N (p. a. Merck)
- i. MgCl_2 0,5 M (p. a. Merck)
- j. HClO_4 pekat (p. a. Merck)
- k. H_2O_2 30% (p. a. Merck)
- l. $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 3,0 M (p. a. Merck)
- m. CH_3COONa 1 M (p. a. Merck)
- n. $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 0,04 M (p. a. Merck)
- o. Larutan buffer standar
- p. Aquadest

D. Prosedur Penelitian

1. Preparasi Simulasi Limbah Tembaga

Sejumlah 0,076 gram padatan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dilarutkan dalam 100 ml akuades.

2. Hidrasi Semen

Limbah tembaga dalam $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dicampur dengan semen dan air dengan perbandingan air : padatan = 1 : 2 kemudian campuran diaduk manual dengan spatula hingga rata. Ke dalam 20% berat campuran ditambahkan kalsit dengan jumlah penambahan masing-masing 0, 5 dan 10 (% berat) dicetak dalam cetakan uji beton dengan ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm. Gelembung udara dapat dihindari dengan cara mengetuk-ketukkan cetakan baja selama satu menit. Cetakan ditutup selama 24 jam, kemudian sampel direndam dalam aquadest selama 28 hari. Setelah itu dilakukan uji kuat tekan dan uji peluluhan.

3. Uji Tekan

Sampel diangkat dari rendaman yang telah disimpan selama 28 hari, kemudian dianginkan atau dilap dengan kertas gosok hingga tekstur terlihat bagus. Setelah itu diuji dengan alat kuat tekan *Shimadzu Universal Testing Machine*.

4. Uji peluluhan

a. Ekstraksi Kimia Bertahap

1) Fraksi 1 – zat yang mudah tertukar

Sampel (matriks semen/Cu) diekstraksi dengan 0,5 M MgCl_2 pada pH 7 dengan perbandingan 1:8 dan dilakukan pengadukan kontinyu selama 5 jam pada temperatur kamar.

2) Fraksi 2 – Pengikatan karbonat/absorben spesifik

Residu dari fraksi 1 diekstraksi dengan natrium asetat 1 M (pH larutan dibuat 5 dengan menambah asam asetat) dengan perbandingan 1:8 dan dilakukan pengadukan kontinyu selama 5 jam pada temperatur kamar.

3) Fraksi 3 – pengikatan besi

Residu dari fraksi 2 diekstraksi dengan $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 0,04 M dalam 25% (v/v) asam asetat dengan perbandingan 1:26 (pH larutan 2) dengan dilakukan pengadukan sesekali selama 6 jam pada 96 °C.

4) Fraksi 4 – pengikatan zat organik/sulfat

Residu dari fraksi 3 diekstraksi dengan 30% H_2O_2 dengan perbandingan 1:20 (pH larutan 2) dengan dilakukan pengadukan sesekali selama 6 jam pada temperatur 85 °C, kemudian dilanjutkan ekstraksi dengan amonium asetat 3,2 M dalam 20% HNO_3 (v/v) dengan pengadukan kontinyu selama 30 menit.

5) Fraksi 5 – fraksi residu

Residu dari fraksi 4 dilarutkan dengan asam HNO_3 pekat dan HClO_4 pada temperatur 90 – 190 °C selama 18 jam.

b. TCLP Standar

Uji standar TCLP dalam penelitian ini menggunakan prosedur standar dari USEPA. Sekitar 10 gram butiran partikel sampel ukuran ~150 mikromiumeter dimasukkan ke dalam erlenmeyer. Sejumlah 200 ml larutan natrium asetat 1 M (pH larutan dibuat 2 dengan menambah asam asetat) ditambahkan ke dalam

sampel. Sampel dipusingkan dengan kecepatan 29 *rpm* pada temperatur kamar selama 18 jam. Setelah ekstraksi selesai, filtrat disaring kemudian filtrat diukur pH-nya dan sebelum dianalisis dengan spektroskopi serapan atom (SSA) filtrat ditambah asam nitrat pekat sampai $\text{pH} < 2$.

c. TCLP Progresif

Uji TCLP progresif dilakukan dalam 5 tahap. Prosedur setiap tahapnya sama dengan prosedur pada uji TCLP standar. Setelah ekstraksi dan disaring, residu yang diperoleh kemudian dimasukkan kembali ke dalam erlenmeyer ekstraksi untuk pengulangan proses ekstraksi menggunakan pelarut yang baru.

d. TCLP Modifikasi

Prosedur tahapan uji TCLP modifikasi sama dengan uji TCLP progresif dengan mengganti larutan peluluh buffer dengan air alami yaitu air tanah dan air laut.

E. Teknik Analisis Data

1. Tingkat Peluluhan Kumulatif (TPK)

Tingkat peluluhan kumulatif (TPK) yaitu perbandingan kumulatif konsentrasi logam yang meluluh dengan konsentrasi total logam dalam matriks semen. Semakin kecil TPK menunjukkan semakin tinggi stabilitas spesies Cu dalam matriks semen. TPK ditentukan menurut persamaan:

$$TPK = \sum \frac{A}{B} \times 100\%$$

Keterangan :

- TPK : tingkat peluluhan kumulatif
- A : jumlah kumulatif tembaga yang terluluh
- B : jumlah tembaga mula-mula dalam matriks semen

2. Analisis Konsentrasi Tembaga pada Peluluhan Semen

Pengukuran konsentrasi logam tembaga dilakukan menggunakan spektroskopi serapan atom (SSA).

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan semen portland dan kalsit dalam menstabilkan tembaga, mengetahui seberapa besar daya kuat tekan semen, mengetahui uji peluluhan tembaga yang terstabilkan oleh semen portland dan kalsit, dan untuk mengetahui pengaruh pelarut air tanah serta air laut terhadap tembaga yang terstabilkan dalam matriks semen/Cu. Uji peluluhan logam dilakukan dengan menggunakan prosedur ekstraksi kimia bertahap dan peluluhan uji toksisitas akan diketahui kelayakan semen portland tersebut.

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Kimia Analisis Jurusan Pendidikan Kimia FMIPA UNY, sedangkan karakterisasi SSA dilakukan di Laboratorium Kimia Analisis FMIPA UGM, Laboratorium Kimia Terpadu UII, sedangkan uji kuat tekan matriks semen dilakukan di Laboratorium Teknologi Bangunan dan FTSP UII. Pada penelitian ini dilakukan ekstraksi kimia bertahap, uji TCLP standar, TCLP progresif, dan TCLP modifikasi terhadap matriks semen/Cu dengan penambahan kalsit 0%, 5% dan 10%, analisis kadar tembaga dengan SSA, serta uji kuat tekan semen dan kalsit yang digunakan pada Stabilisasi/Solidifikasi tembaga.

1. Ekstraksi Kimia Bertahap

Konsentrasi tembaga hasil ekstraksi kimia bertahap baik pada matriks semen/Cu disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Ekstraksi Kimia Bertahap pada Matriks Semen/Cu

Berat Kalsit	Tahap	Matriks Semen	
		Kadar Cu (ppm)	%Cu
0%	Mampu tukar	<LoD	0
	Adsorpsi spesifik	<LoD	0
	Terikat pada oksida besi	9,210	91,179
	Terikat pada sulfida	0,891	8,821
	Fraksi Residu	<LoD	0
Jumlah		10,101	-
5%	Mampu tukar	<LoD	0
	Adsorpsi spesifik	<LoD	0
	Terikat pada oksida besi	8,221	87,831
	Terikat pada sulfida	1,139	12,169
	Fraksi Residu	<LoD	0
Jumlah		9,360	-
10%	Mampu tukar	<LoD	0
	Adsorpsi spesifik	<LoD	0
	Terikat pada oksida besi	3,881	71,003
	Terikat pada sulfida	1,585	28,997
	Fraksi Residu	<LoD	0
Jumlah		5,466	-

Keterangan : <LoD = di bawah limit deteksi standar alat (0,0044ppm).

Pengamatan pH dan warna ekstraktan pada matriks semen/Cu tersaji pada

Tabel 2.

Tabel 2. Pengamatan pH dan Warna Ekstraktan

Tahap Ekstraksi	pH awal	Matriks Semen 0% Ca		Matriks Semen 5% Ca		Matriks Semen 10% Ca	
		pH	Warna	pH	Warna	pH	Warna
1	7	6,3	Tidak berwarna	6,7	Tidak berwarna	6,3	Tidak berwarna
2	5	7,1	Tidak berwarna	7,1	Tidak berwarna	6,6	Tidak berwarna
3	2	3,8	Kuning kecoklatan	4	Kuning kecoklatan	3,9	Kuning kecoklatan
4	2	0,3	Tidak berwarna	0,3	Tidak berwarna	0,3	Tidak berwarna
5	-	-	Tidak berwarna	-	Tidak berwarna	-	Tidak berwarna

2. TCLP Standar dan TCLP Modifikasi

Hasil penelitian pada TCLP standar dan TCLP modifikasi dari matriks semen/Cu disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Konsentrasi Tembaga dalam Uji TCLP Matriks Semen/Cu

Berat Kalsit	Larutan	Konsentrasi Cu (ppm)
0%	Buffer asam (pH 4)	3,437
	Air tanah (pH 7,5)	<LoD
	Air laut (pH 8)	<LoD
5%	Buffer asam (pH 4)	2,927
	Air tanah (pH 7,5)	<LoD
	Air laut (pH 8)	<LoD
10%	Buffer asam (pH 4)	2,790
	Air tanah (pH 7,5)	<LoD
	Air laut (pH 8)	<LoD

Keterangan : <LoD = di bawah limit deteksi standar alat (<0,0044ppm).

3. TCLP Progresif dan TCLP Modifikasi

Hasil penelitian pada TCLP progresif dan TCLP modifikasi dari matriks semen/Cu dapat disajikan pada Tabel 4 dan kondisi pH ekstraktan pada matriks semen/Cu disajikan pada Tabel 5.

Tabel 4. Konsentrasi Tembaga Terluluh pada Matriks Semen/Cu.

Berat Kalsit	Tahap	Konsentrasi Tembaga Terluluh (ppm) dalam rendaman		
		Buffer (pH 4)	Air Tanah	Air Laut
0%	1	3,437	<LoD	<LoD
	2	1,219	<LoD	<LoD
	3	0,682	<LoD	<LoD
	4	0,624	<LoD	<LoD
	5	0,584	<LoD	<LoD
	Jumlah	6,546	-	-
5%	1	2,927	<LoD	<LoD
	2	1,116	<LoD	<LoD
	3	0,660	<LoD	<LoD
	4	0,614	<LoD	<LoD
	5	0,568	<LoD	<LoD
	Jumlah	5,885	-	-
10%	1	2,790	<LoD	<LoD
	2	1,026	<LoD	<LoD
	3	0,622	<LoD	<LoD
	4	0,570	<LoD	<LoD
	5	0,538	<LoD	<LoD
	Jumlah	5,546	-	-

Keterangan : <LoD = di bawah limit deteksi standar alat (<0,0044ppm).

Tabel 5. Kondisi pH Ekstraktan pada Matriks Semen/Cu

Berat Kalsit	Tahap	TCLP Progresif	TCLP Modifikasi Progresif	
		Buffer (pH 4)	Air Tanah	Air Laut
0%	1	4	11,1	7,6
	2	4	10,4	6,5
	3	4,3	7,5	7,2
	4	4	6,9	7,6
	5	4,2	7,3	7,6
5%	1	4	11,1	11,3
	2	4	10,5	8,7
	3	4,2	7,5	8
	4	3,9	7	7,7
	5	4,2	7,3	8,1
10%	1	3,9	11,2	11,5
	2	4	10,5	8,7
	3	4,2	7,5	8,2
	4	3,9	7	7,9
	5	4,1	7,7	8,3

4. Kuat Tekan Semen

Hasil penelitian pada uji kuat tekan dari matriks semen/Cu disajikan pada

Tabel 6.

Tabel 6. Kuat Tekan Matriks Semen/Cu dan Kalsit

No	Kalsit yang ditambahkan	Kuat Tekan (kg/cm ²)
1	0% Kalsit	51,386
2	5% Kalsit	49,050
3	10% Kalsit	47,548

B. Pembahasan

1. Ekstraksi Bertahap

Metode ekstraksi bertahap ini bertujuan untuk memisahkan suatu substansi yang terdapat dalam hubungan antara semen portland dan kalsit dalam menstabilkan tembaga. Dalam proses ekstraksi bertahap ini dipakai pelarut yang

berbeda untuk memberikan informasi tentang stabilitas tembaga dalam semen tersebut. Stabilitas tembaga dalam semen akan ditunjukkan pada seberapa besar peluluhan tembaga dalam ekstraktan. Proses yang dihasilkan dalam tahap ini yaitu berupa data konsentrasi tembaga (Cu) dalam ppm. Konsentrasi tembaga hasil ekstraksi kimia bertahap baik pada matriks semen/Cu tanpa penambahan kalsit maupun dengan matriks semen/Cu yang ditambah 5% dan 10% kalsit disajikan pada Tabel 1.

Berdasarkan data yang diperoleh menggunakan uji SSA, diketahui bahwa matriks semen/Cu mula-mula 159,740 ppm tanpa penambahan kalsit menunjukkan tembaga yang terluluh sebesar 10,101 ppm atau hanya sebesar 6,3%, sedangkan pada penambahan kalsit 5% dan 10%, masing-masing sebesar 9,360 dan 5,466 ppm atau sebesar 5,9% dan 3,4%. Logam tembaga yang tidak terekstraksi menunjukkan bahwa logam tersebut berada dalam bentuk senyawa kompleks Cu-semen yang stabil/inert.

Konsentrasi tembaga yang terluluh pada matriks semen/Cu yang ditambahkan 5% dan 10% kalsit lebih sedikit karena matriks semen/Cu berikatan dengan kalsit sehingga membentuk senyawa yang lebih stabil dibanding matriks semen/Cu tanpa penambahan kalsit. Logam tembaga dalam matriks semen/Cu dengan penambahan 0%, 5%, dan 10% kalsit terdistribusi ke dalam fraksi 3 yang mengindikasikan bahwa Cu terikat pada oksida besi, dan fraksi 4 yaitu terikat pada senyawa sulfida. Pada fraksi 2 (terikat dalam senyawa karbonat/adsorpsi spesifik), pH ekstraktan meningkat sampai pH 7. Pada pH ini spesies tembaga akan sulit larut terutama apabila terdapat dalam bentuk hidroksida atau karbonat.

Hal ini dibuktikan dengan adanya kristal putih dalam residu fraksi 2 yang cukup banyak. Berdasarkan penelitian Lie *et al* (2001: 222) pada kondisi pH rendah, logam tembaga akan terlarut, tetapi dengan meningkatnya pH, spesies tembaga dapat membentuk endapan hidroksida dan kemudian menjadi CuO yang tidak terlarutkan. Menurut Murat dan Sorrentino (1996: 378) terdapat mekanisme stabilisasi limbah logam berat dengan bahan penstabil dan semen ke dalam bentuk senyawa anhidrat atau ke dalam bentuk senyawa terhidrat. Pada hipotesis-hipotesis ini dapat diasumsikan bahwa pada saat semen memadat limbah logam berat dijerap ke dalam struktur terhidrat yang bersifat inert. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Cahya dan Herry (2005: 36 - 40) tentang stabilisasi lumpur kering dari limbah cair pengolahan kulit dengan abu layang menunjukkan dari hasil uji pelindian semakin besar beban limbah, maka logam total yang terlindi semakin banyak. Hal ini disebabkan daya ikat kristal-kristal kalsium silikat hidrat (KSH), kalsium alumina hidrat (KAH), kalsium alumina-ferrit hidrat (KAFH) untuk menjepit senyawa logam dalam limbah padat semakin kecil karena terganggu oleh molekul-molekul yang ada dalam limbah padat. Karena proses stabilisasi terganggu, maka dimungkinkan akan menambah jumlah pori yang terbentuk di dalam bodi komposit-komposit beton-limbah. Dengan demikian akuades di luar bodi komposit-komposit beton limbah akan masuk ke dalam bodi komposit dan mengisi pori-pori, kemudian logam dalam bodi komposit terdifusi keluar bodi komposit dan masuk ke media lindi bersama-sama dengan logam yang terlindi. Penambahan kalsit bertujuan untuk dapat mengisi pori-pori beton agar logam yang terlindi semakin sedikit. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa logam

tembaga dalam matriks semen berada dalam bentuk logam terhidrat, logam hidroksida, terikat pada oksida besi, dalam bentuk senyawa sulfat dan dalam bentuk senyawa kompleks Cu-semen.

Penelitian ini menggunakan prosedur ekstraksi kimia dengan 5 tahapan, masing-masing dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Ekstraksi kimia tahap ke-1 dilakukan untuk mempelajari adanya tembaga mudah tukar dalam matriks semen/Cu tanpa penambahan kalsit dan matriks/Cu dengan penambahan kalsit. Ekstraksi tahap ke-1 ini menghasilkan kadar logam di bawah limit deteksi standar alat yaitu sebesar $<0,0044$.
2. Ekstraksi kimia tahap ke-2 dilakukan untuk mengetahui adanya tembaga yang terstabilisasi oleh suatu karbonat. Ekstraksi kimia tahap ke-2 juga tidak bisa terbaca karena kadar logam yang terdeteksi di bawah limit deteksi.
3. Ekstraksi kimia tahap ke-3 dilakukan untuk mempelajari adanya ikatan antara tembaga dengan spesies besi dalam matriks semen/Cu. Pada tahap ke-3 ini menunjukkan konsentrasi tembaga yang cenderung tinggi, sebagian besar tembaga yang terikat di permukaan sampai inti matriks semen/Cu meluluh. Ekstraksi pada tahap ke-3 ini merupakan ekstraksi utama dalam ekstraksi bertahap ini karena sebagian besar logam yang terikat di pori-pori semen terlarut.
4. Ekstraksi kimia tahap ke-4 dilakukan untuk mempelajari adanya ikatan antara tembaga dengan senyawa organik atau sulfat dalam matriks

semen/Cu. Ekstraksi kimia tahap ke-4 ini menunjukkan penurunan peluluhan tembaga dalam matriks semen/Cu.

5. Ekstraksi kimia tahap ke-5 dilakukan untuk mengetahui jumlah tembaga terstrabilkan dalam matriks semen/Cu yang tidak terekstraksi pada berbagai tahapan. Dalam tahap ini tembaga yang terdeteksi masih di bawah limit deteksi alat.

Konsentrasi tembaga pada matriks semen yang telah ditambahkan kalsit lebih kecil angka peluluhannya dibandingkan dengan matriks semen yang tidak ditambahkan kalsit di dalamnya. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kalsit dapat menstabilkan tembaga yang ada di dalam pori-pori semen. Semakin banyak kalsit yang ditambahkan semakin sedikit peluluhan yang terjadi.

Secara luas dinyatakan bahwa stabilitas kondisi limbah tersolidifikasi tergantung pada kontrol pH untuk penahanan logam. Kontrol pH juga terlihat pengaruhnya terhadap peluluhan beberapa spesies organik dan anorganik (Lee, 2004: 231 - 232). Pada proses ekstraksi kimia bertahap harus dalam suasana asam agar logam yang ada di dalam matriks semen dapat larut. Pada setiap tahapan ekstraksi kimia bertahap ini pH yang dihasilkan tidak menentu, sebagian lebih tinggi dari pH awal, dan sebagian lagi lebih rendah dari pH awalnya. Pada proses ekstraksi tahap ke-5 pH awal maupun pH akhir tidak diukur karena menggunakan reagen campuran HNO_3 pekat dengan HClO_4 pekat.

Ekstraksi dari tahap 1 sampai tahap 4 pada semua matriks semen/Cu tidak menunjukkan perbedaan pH yang signifikan, perbedaan yang terjadi hanya pada tahap 2 yaitu pada matriks semen/Cu dengan penambahan 10% kalsit

menunjukkan pH 6,6 sedangkan matriks semen/Cu dengan penambahan 0% dan 5% kalsit memiliki pH sebesar 7,1. Pada tahap 3 dan 4 menunjukkan pH yang relatif sama antara ketiga matriks semen/Cu tersebut.

Warna ekstraktan pada umumnya adalah tidak berwarna, kecuali pada ekstraksi tahap 3 yang berwarna kuning kecoklatan. Hal tersebut disebabkan karena pada tahap ini terbentuk larutan dengan salah satu oksida logam, yaitu Fe_2O_3 (Benarchid *et al.*, 2001: 449).

2. TCLP Standar dan TCLP Modifikasi

TCLP standar adalah ekstraksi tanpa pengulangan yang merupakan ekstraksi tahap 1 dari TCLP progresif. Konsentrasi logam tembaga yang meluluh pada TCLP menggunakan buffer asetat/Na pH 4 ini menunjukkan kurang dari 5 ppm sesuai batas maksimum yang diijinkan USEPA (1986) sedangkan pada TCLP modifikasi menggunakan air tanah dan air laut menunjukkan hasil di bawah limit deteksi standar alat ($<0,0044$). Perbandingan padatan dan larutan yang digunakan yaitu 1 : 20 (padatan : larutan) dan partikel lolos pada angka 150 mesh.

Besarnya konsentrasi tembaga terluluh dalam pelarut buffer natrium asetat dikarenakan kondisi lingkungan pH. Tembaga dalam matriks semen bersifat *amphoteric*, artinya pada lingkungan pH netral kelarutan tembaga mencapai minimum, sedangkan pada lingkungan pH asam dan basa kelarutan tembaga mencapai maksimum. Kelarutan tembaga dalam lingkungan basa jauh lebih kecil dibandingkan lingkungan asam karena matriks semen secara alami bersifat alkali.

Peluluhan logam tembaga dalam matriks semen sangat dipengaruhi oleh melarutnya garam-garam hidroksida terutama kalsium hidroksida.

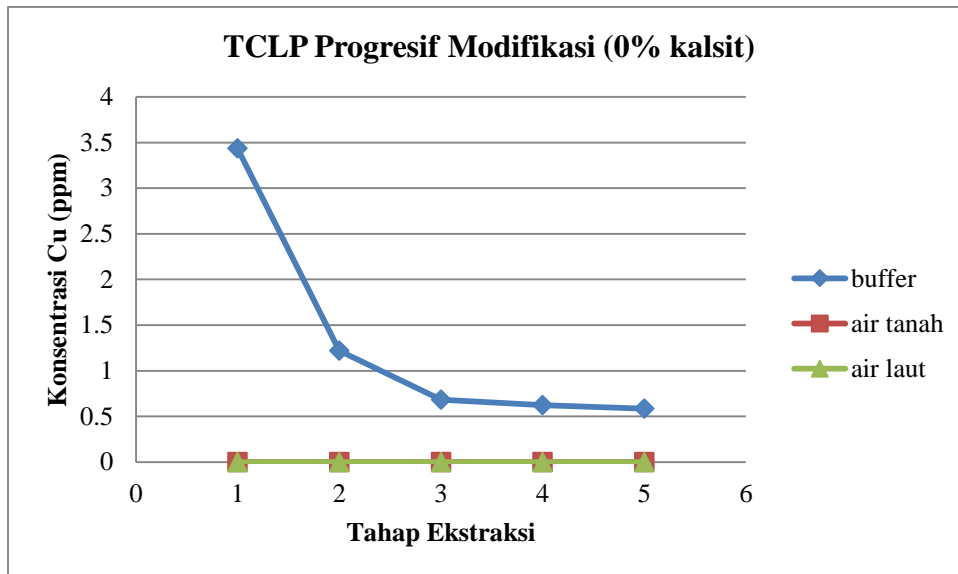
3. TCLP progresif dan TCLP modifikasi

TCLP progresif adalah prosedur standar berdasarkan USEPA untuk mempelajari laju peluluhan logam dalam matriks, sedangkan TCLP modifikasi adalah modifikasi prosedur standar TCLP dengan mengganti larutan peluluh buffer natrium asetat dengan air tanah dan air laut. Analisis menggunakan prosedur TCLP dapat mengetahui tingkat peluluhan tembaga dalam matriks semen sehingga dapat ditentukan apakah stabilisasi tembaga efektif dan aman bagi lingkungan.

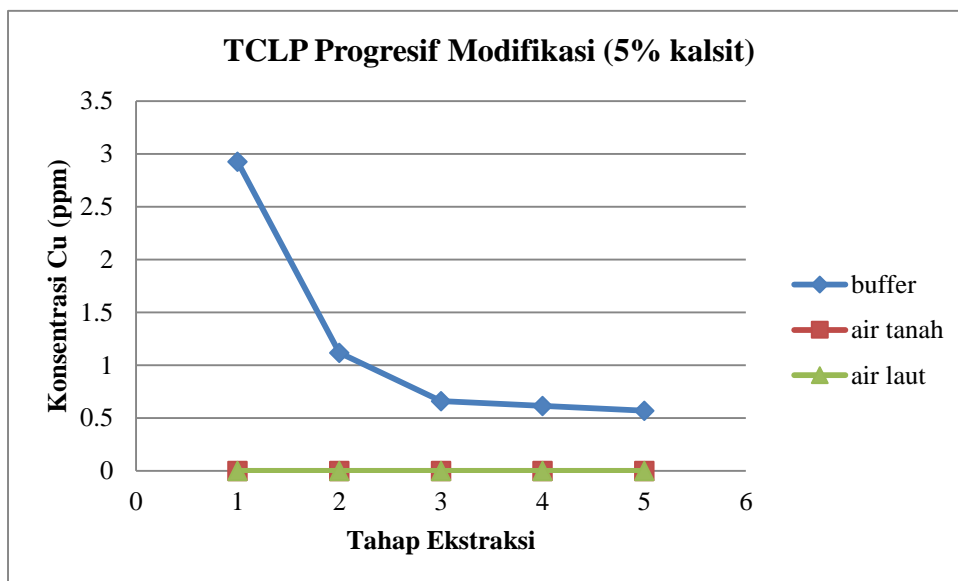
Berdasarkan data pada Tabel 4 dapat disimpulkan bahwa konsentrasi logam tembaga yang terluluh dari uji TCLP progresif dalam pelarut buffer natrium asetat menunjukkan kecenderungan menurun untuk setiap tahap pengulangan ekstraksi. Tetapi berbeda pada TCLP progresif termodifikasi bahwa hasil peluluhan masih di bawah deteksi standar alat yaitu $<0,0044$ ppm.

a. Konsentrasi Tembaga dalam Setiap Tahap Ekstraksi

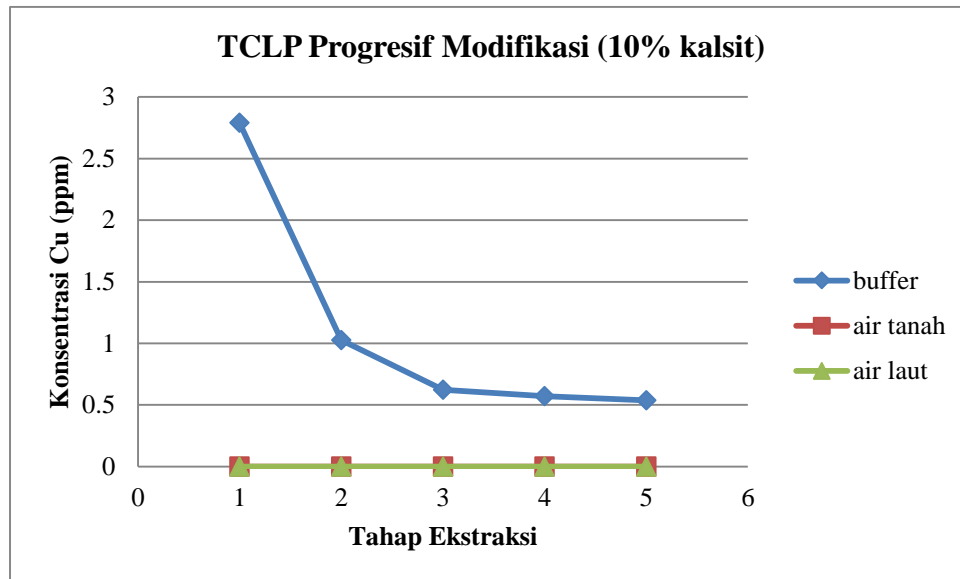
Penelitian menggunakan TCLP ini menggunakan 3 variasi pelarut, yaitu buffer natrium asetat (pH 4), air tanah (pH 7,5) dan air laut (pH 8). Proses ini dilakukan dalam 5 tahapan. Kurva yang menunjukkan hubungan antara tahapan ekstraksi dengan konsentrasi Cu yang terluluh (ppm) untuk penambahan 0%, 5%, dan 10% masing-masing disajikan pada Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3.



Gambar 1. Konsentrasi Logam Cu Terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif Modifikasi pada Penambahan 0% Kalsit.

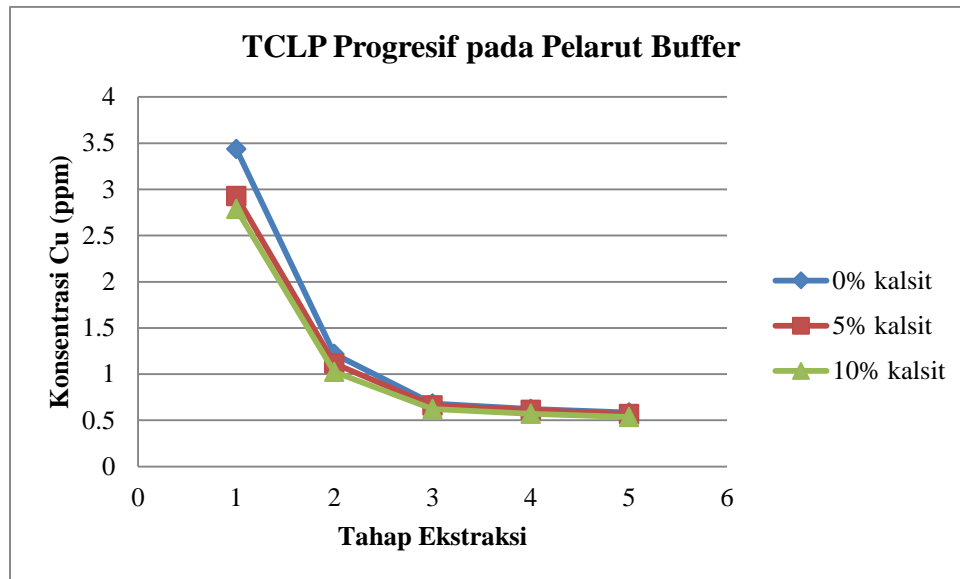


Gambar 2. Konsentrasi Logam Cu Terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif Modifikasi pada Penambahan 5% Kalsit.



Gambar 3. Konsentrasi Logam Cu Terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif Modifikasi pada Penambahan 10% Kalsit.

Berdasarkan data yang diperoleh dapat dilihat bahwa konsentrasi peluluhan tembaga dari uji TCLP progresif ini menunjukkan penurunan pada setiap tahap pengulangan ekstraksi, tetapi pada TCLP modifikasi menunjukkan bahwa hasil yang didapat masih di bawah limit deteksi standar alat yang ada. Pada pelarut buffer natrium asetat (pH 4) ekstraksi tahap 2 menunjukkan penurunan konsentrasi tembaga yang relatif cukup banyak. Pada tahap 3 penurunan konsentrasi tembaga mulai terlihat berkurang dan selanjutnya diikuti oleh tahap berikutnya yaitu tahap 4 dan 5 dengan penurunan konsentrasi tembaga yang tidak begitu banyak. Kurva yang menunjukkan hubungan antara tahapan ekstraksi dengan konsentrasi Cu yang terluluh (ppm) pada pelarut buffer disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Konsentrasi Logam Cu yang terluluh dalam Setiap Tahap TCLP Progresif pada Pelarut Buffer.

Besarnya pH dari setiap tahap ekstraksi pada pelarut buffer untuk semua matriks semen relatif sama yaitu menunjukkan antara pH 3,9-4,2. Pada pelarut air tanah untuk semua matriks semen pada tahap 1 dan 2 menunjukkan kenaikan pH, hal tersebut dikarenakan sejumlah kecil tembaga larut. Pada pelarut air laut untuk matrik tanpa penambahan kalsit menunjukkan pH yang relatif stabil dibandingkan dengan matrik yang ditambah 5% dan 10% kalsit dimana pada tahap 1 dan 2 menunjukkan kenaikan pH.

b. Tingkat Peluluhan Kumulatif Tembaga dalam TCLP Progresif

Besarnya konsentrasi tembaga kumulatif dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Tingkat Peluluhan Kumulatif Tembaga Selama TCLP

Berat Kalsit	Tahap	Konsentrasi Tembaga (ppm) dalam pelarut		
		Buffer (pH 4)	Air Tanah	Air Laut
0%	1	3,437	<LoD	<LoD
	2	4,656	<LoD	<LoD
	3	5,338	<LoD	<LoD
	4	5,962	<LoD	<LoD
	5	6,546	<LoD	<LoD
5%	1	2,927	<LoD	<LoD
	2	4,043	<LoD	<LoD
	3	4,703	<LoD	<LoD
	4	5,317	<LoD	<LoD
	5	5,885	<LoD	<LoD
10%	1	2,790	<LoD	<LoD
	2	3,816	<LoD	<LoD
	3	4,438	<LoD	<LoD
	4	5,008	<LoD	<LoD
	5	5,546	<LoD	<LoD

Keterangan : <LoD = di bawah limit deteksi standar alat (0,0044ppm).

Jumlah tembaga yang terekstraksi selama TCLP menggunakan pelarut buffer terdeteksi dari setiap tahapnya, sedangkan pada air tanah dan air laut menunjukkan hasil di bawah limit deteksi alat. Jumlah tembaga yang terekstraksi dengan penambahan kalsit 10% lebih sedikit dibanding matriks semen/Cu dengan penambahan 5% maupun matriks semen tanpa penambahan kalsit.

Berdasar data pada Tabel 7 dapat dihitung tingkat peluluhan kumulatif tembaga dari semua matriks semen/Cu, untuk mengetahui tingkat peluluhan kumulatif dengan rumus:

$$TPK = \sum \frac{A}{B} \times 100\%$$

Keterangan :

TPK : tingkat peluluhan kumulatif

A : jumlah kumulatif tembaga yang terluluh

B : jumlah tembaga mula-mula dalam matriks semen

Konsentrasi kumulatif tembaga terluluh pada matriks semen/Cu selama uji TCLP progresif dan TCLP modifikasi, bersama dengan tingkat peluluhan kumulatif (TPK) dan efisiensi penjerapan tembaga ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. TPK pada uji TCLP Progresif dan TCLP Modifikasi Progresif

Berat Kalsit	Pelarut	Konsentrasi Kumulatif (ppm)	TPK (%)	Efisiensi (%)
0%	Buffer	6,546	4,10	95,90
	Air Tanah	<LoD	0	100
	Air Laut	<LoD	0	100
5%	Buffer	5,885	3,68	96,32
	Air Tanah	<LoD	0	100
	Air Laut	<LoD	0	100
10%	Buffer	5,546	3,47	96,53
	Air Tanah	<LoD	0	100
	Air Laut	<LoD	0	100

Keterangan : <LoD = di bawah limit deteksi standar alat (0,0044ppm).

Konsentrasi tembaga sebelum terluluh = 159,740 ppm.

4. Kuat Tekan

Matriks dengan umur 28 hari diuji kuat tekan dengan *Shimadzu Universal Testing Machine*, matriks semen/Cu dengan penambahan kalsit 0%, 5% dan 10% mempunyai kuat tekan yang semakin menurun yaitu sebesar 51,386 kg/cm², 49,050 kg/cm², dan 47,548 kg/cm². Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan kalsit berlebih pada matriks semen/Cu mengurangi kuat tekan pada matriks semen/Cu tersebut. Hal itu mengindikasikan bahwa hidrasi tembaga tidak

menghasilkan hidrat dengan struktur yang saling berikatan kuat. Dipersyaratkan oleh Bapedal (1995) untuk stabilisasi limbah B3 yaitu kuat tekan minimum adalah 10 ton/m² atau setara 1 kg/cm². Berdasarkan SNI-03-0348-1989 tentang kualitas dari bata beton pejal, kuat tekan dari matriks semen/Cu dengan penambahan 0%, 5%, dan 10% kalsit tergolong dalam kualitas 3 dengan nilai uji kekuatan minimum di atas 40 kg/cm².

BAB V PENUTUP

A. KESIMPULAN

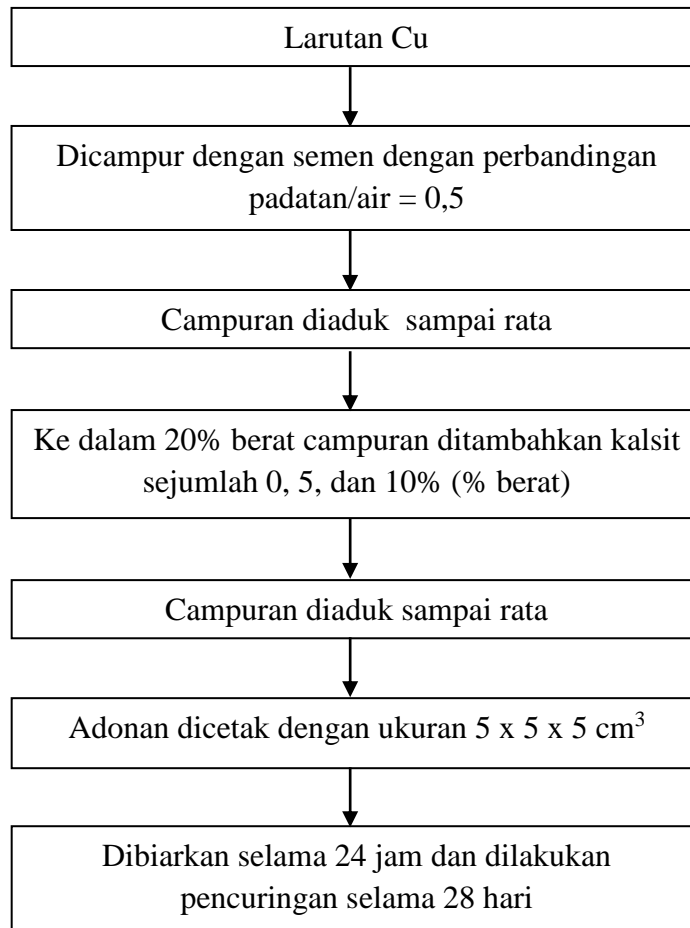
1. Pengaruh uji peluluhan tembaga yang tersolidifikasi/terstabilkan matriks semen/Cu dalam penambahan 0%, 5%, dan 10% kalsit sebesar 6,3%, 5,9%, dan 3,4% dari preparasi simulasi limbah tembaga mula-mula.
2. Kemampuan semen Portland Holcim dalam menstabilkan tembaga dapat dilihat dari pengaruh efisiensi penyerapan tembaga pada setiap pelarut, yaitu pelarut buffer masing-masing sebesar 95,90%, 96,32% dan 96,53%, sedangkan pada air tanah, dan air laut masing-masing masih di bawah limit deteksi alat.
3. Kuat tekan semen pada matriks semen/Cu 0%, 5%, dan 10% kalsit tergolong dalam kualitas 3 dengan nilai uji kuat tekan di atas 40 kg/cm².

B. SARAN

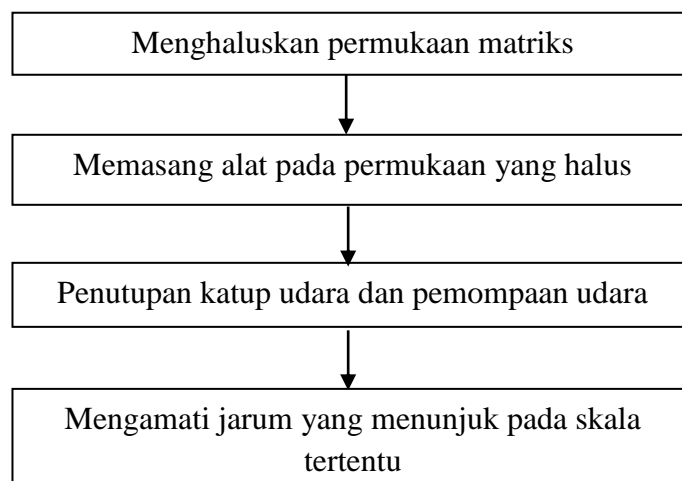
1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan melakukan variasi penambahan padatan tembaga maupun kalsit pada semen untuk mengetahui besarnya konsentrasi tembaga yang terluluh.
2. Penelitian dapat dilakukan dengan mengubah sampel senyawa murni dengan limbah yang mengandung logam berbahaya sehingga dapat mengurangi tingkat toksisitas logam berbahaya yang dihasilkan oleh beberapa industri.
3. Penelitian ini menggunakan semen Portland Holcim sebagai bahan penstabil logam tembaga. Masing-masing semen memiliki komposisi yang berbeda, sehingga dapat dilakukan penelitian menggunakan semen lainnya untuk mendapatkan hasil yang berbeda.
4. Penelitian ini diarahkan untuk mengatasi permasalahan limbah industri yang mengandung logam berbahaya. Sehingga sangat diperlukan pengembangan penelitian lanjutan dan akhirnya dapat direkomendasikan kepada berbagai pihak terkait sebagai salah satu alternatif penanganan limbah industri.

Lampiran 1

1. Pembuatan matriks semen/Cu

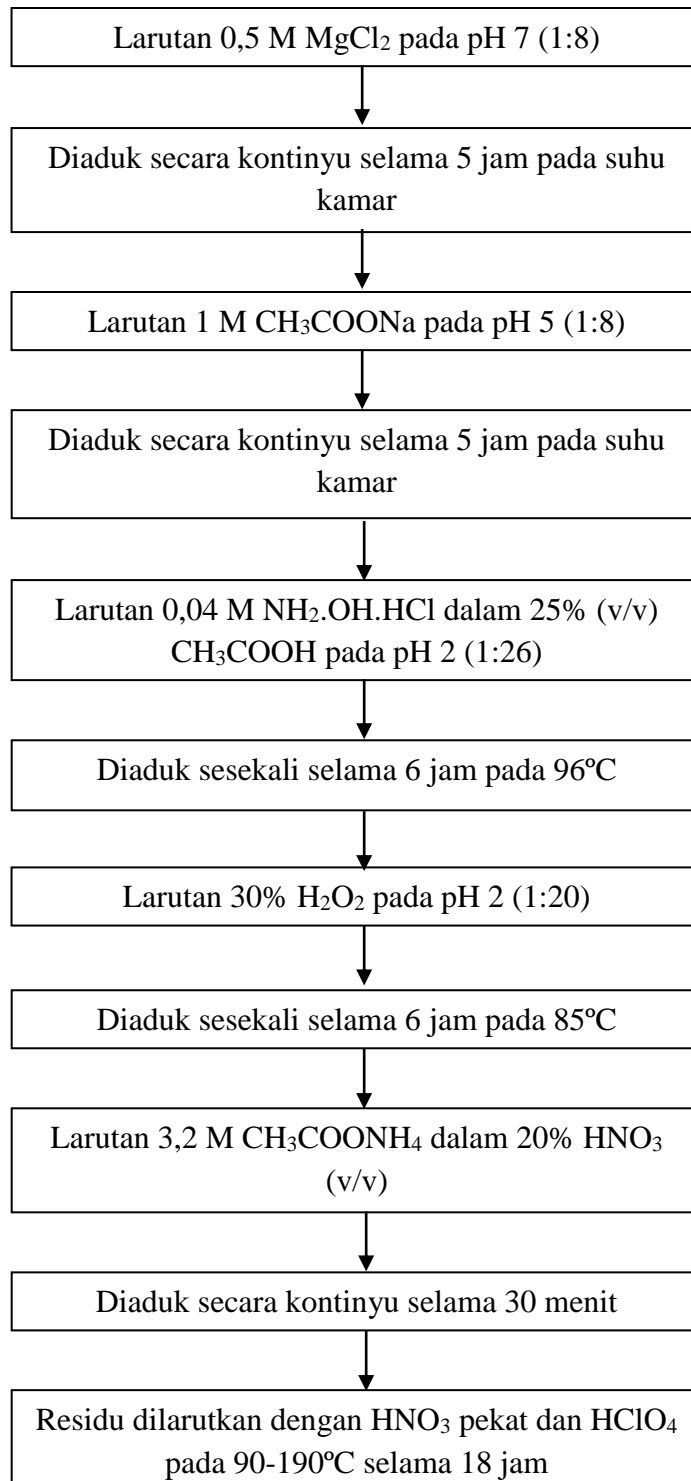


2. Uji kuat tekan

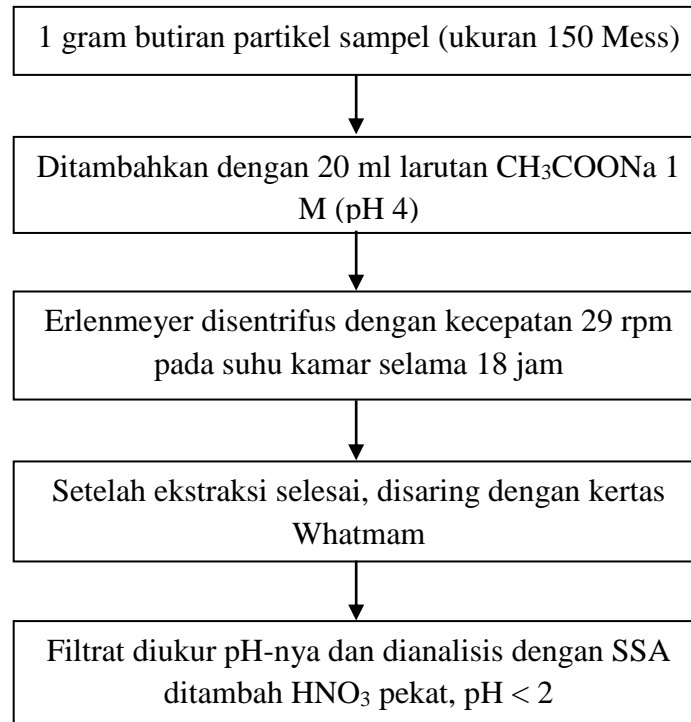


3. Uji peluluhan

a. Ekstraksi kimia bertahap



b. TCLP standar



c. TCLP progresif, merupakan pengulangan TCLP standar 5 kali. Setelah diekstraksi, residu yang diperoleh dimasukkan kembali ke dalam erlenmeyer ekstraksi untuk pengulangan proses ekstraksi dengan menggunakan pelarut yang baru.

d. TCLP modifikasi, prosedur tahapan TCLP modifikasi sama dengan TCLP progresif dengan mengganti peluluh buffer menggunakan air tanah dan air laut.



LABORATORIUM KIMIA ANALITIK

JURUSAN KIMIA FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL ANALISIS

No. : 5184/HA-KA/06/14
Pengirim : ALDINA KHOERUNISA
Alamat : UNY
Jenis Sampel : Cair (Larutan)
Jumlah : 2 sampel
Penentuan : Kadar Cu dan Cr
Tgl. Analisis : 28 Juni 2014

NO	KODE SAMPEL	PARA METER	HASIL PENGUKURAN (ppm)			METODE
			I	II	III	
1.	Larutan Cu	Cu	158,123	160,064	161,034	Atomic Absorption Spect.
2.	Larutan Cr	Cr	209,807	197,613	195,966	-



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA LABORATORIUM TERPADU

LAB. INSTRUMENTASI, FISIKA DASAR DAN KIMIA DASAR

Jl Kaliurang Km 14,5 Yogyakarta 55584 Telp. (0274)895920 ext. 3045, 3016, Fax (0274) 896439 ext. 3020

Website: <http://lab.uui.ac.id>, e-mail : lab.terpadu@uui.ac.id

No. Dok : Form-06/Hasil Uji Rev. 2

Tgl. Terbit : 14 Maret 2013

Hasil Analisis Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)

Sampel : Cair
Kode Sampel : 498/C/AAS
Asal Sampel : Indra Kurniawan
Tanggal diterima : 9 Oktober 2014
Tanggal dianalisis : 13 Oktober 2014
Parameter : Cu

No	Sample ID	Seq No.	EI	Standar (mg/L)	Mean Sig (Absorbance)	Limit Detection from standard	Mean Samp Conc	Std Dev	Samp Units
1	Calib Blank	71	Cu	0	0.0002			0.00118	mg/L
2	std 1	72	Cu	0.5	0.0188	0.0044		0.00047	mg/L
3	std 2	73	Cu	0.9	0.0310	0.0044		0.00128	mg/L
4	std 3	74	Cu	2	0.0625	0.0044		0.00166	mg/L
5	std 4	75	Cu	4	0.1212	0.0044		0.00170	mg/L
6	std 5	76	Cu	6	0.3106	0.0044		0.00395	mg/L
7									
8	Standar1 0	77	Cu		0.1465		3.4371	0.00270	mg/L
9	Standar1 2,7	78	Cu		0.1211		2.9267	0.00087	mg/L
10	Standar1 5,4	79	Cu		0.1143		2.7901	0.00252	mg/L
11	Pro1 0	80	Cu		0.0361		1.2188	0.00077	mg/L
12	Pro1 2,7	81	Cu		0.0310		1.1164	0.00058	mg/L
13	Pro1 5,4	82	Cu		0.0265		1.0260	0.00076	mg/L
14	Pro2 0	83	Cu		0.0094		0.6824	0.00109	mg/L
15	Pro2 2,7	84	Cu		0.0083		0.6603	0.00247	mg/L
16	Pro2 5,4	85	Cu		0.0064		0.6221	0.00267	mg/L
17	Pro3 0	86	Cu		0.0065		0.6241	0.00120	mg/L
18	Pro3 2,7	87	Cu		0.0060		0.6140	0.00190	mg/L
19	Pro3 5,4	88	Cu		0.0038		0.5698	0.00084	mg/L
20	Pro4 0	89	Cu		0.0045		0.5839	0.00112	mg/L
21	Pro4 2,7	90	Cu		0.0037		0.5678	0.00077	mg/L
22	Pro4 5,4	91	Cu		0.0022		0.5377	0.00146	mg/L
23	Airtanah1 0	92	Cu		0.0000		0.4935	0.00110	mg/L
24	Airtanah1 2,7	93	Cu		0.0000		0.4935	0.00135	mg/L
25	Airtanah1 5,4	94	Cu		0.0000		0.4935	0.00154	mg/L
26	Airtanah2 0	95	Cu		0.0000		0.4935	0.00242	mg/L
27	Airtanah2 2,7	96	Cu		0.0000		0.4935	0.00057	mg/L

28	Airtanah2 5,4	97	Cu	0.0000	0.4935	0.00069	mg/L
29	Airtanah3 0	98	Cu	0.0000	0.4935	0.00106	mg/L
30	Airtanah3 2,7	99	Cu	0.0000	0.4935	0.00194	mg/L
31	Airtanah3 5,4	100	Cu	0.0000	0.4935	0.00113	mg/L
32	Airtanah4 0	101	Cu	0.0000	0.4935	0.00110	mg/L
33	Airtanah4 2,7	102	Cu	0.0000	0.4935	0.00052	mg/L
34	Airtanah4 5,4	103	Cu	0.0000	0.4935	0.00142	mg/L
35	Airtanah5 0	104	Cu	0.0000	0.4935	0.00164	mg/L
36	Airtanah5 2,7	105	Cu	0.0000	0.4935	0.00104	mg/L
37	Airtanah5 5,4	106	Cu	0.0000	0.4935	0.00070	mg/L
38	Airlaut1 0	107	Cu	0.0000	0.4935	0.00090	mg/L
39	Airlaut1 2,7	108	Cu	0.0000	0.4935	0.00128	mg/L
40	Airlaut1 5,4	109	Cu	0.0000	0.4935	0.00161	mg/L
41	Airlaut2 0	110	Cu	0.0000	0.4935	0.00078	mg/L
42	Airlaut2 2,7	111	Cu	0.0000	0.4935	0.00068	mg/L
43	Airlaut2 5,4	112	Cu	0.0000	0.4935	0.00097	mg/L
44	Airlaut3 0	113	Cu	0.0000	0.4935	0.00146	mg/L
45	Airlaut3 2,7	114	Cu	0.0000	0.4935	0.00138	mg/L
46	Airlaut3 5,4	115	Cu	0.0000	-0.0039	0.00288	mg/L
47	Airlaut4 0	116	Cu	0.0000	-0.0039	0.00028	mg/L
48	Airlaut4 2,7	117	Cu	0.0000	0.4935	0.00114	mg/L
49	Airlaut4 5,4	118	Cu	0.0000	0.4935	0.00049	mg/L
50	Airlaut5 0	119	Cu	0.0000	0.4935	0.00093	mg/L
51	Airlaut5 2,7	120	Cu	0.0000	0.4935	0.00090	mg/L
52	Airlaut5 5,4	121	Cu	0.0000	0.4935	0.00113	mg/L
53	Filtrat1 0	122	Cu	0.0000	0.4935	0.00140	mg/L
54	Filtrat1 2,7	123	Cu	0.0000	0.4935	0.00139	mg/L
55	Filtrat1 5,4	124	Cu	0.0000	0.4935	0.00066	mg/L
56	Filtrat2 0	125	Cu	0.0000	0.4935	0.00183	mg/L
57	Filtrat2 2,7	126	Cu	0.0000	0.4935	0.00170	mg/L
58	Filtrat2 5,4	127	Cu	0.0000	0.4935	0.00121	mg/L
59	Filtrat3 0	143	Cu	0.4338	9.2098	0.00745	mg/L
60	Filtrat3 2,7	129	Cu	0.3846	8.2212	0.00598	mg/L
61	Filtrat3 5,4	130	Cu	0.1686	3.8812	0.00334	mg/L
62	Filtrat4 0	131	Cu	0.0198	0.8913	0.00081	mg/L
63	Filtrat4 2,7	132	Cu	0.0321	1.1385	0.00229	mg/L
64	Filtrat4 5,4	133	Cu	0.0543	1.5845	0.00138	mg/L
65	Filtrat5 0	134	Cu	0.0000	0.4935	0.00090	mg/L
66	Filtrat5 2,7	135	Cu	0.0000	0.4935	0.00206	mg/L
67	Filtrat5 5,4	136	Cu	0.0000	0.4935	0.00149	mg/L

Jogjakarta. 13 Oktober 2014
Manajer Teknis

Lampiran 3

Analisis kuat tekan matriks semen

Perhitungan kuat tekan semen dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Kuat\ tekan = \frac{A/9,8 \times 1000}{L} kg/cm^2$$

Keterangan :A = pembacaan alat kuat tekan (kN)

L = luas matriks semen (cm²)

Data hasil uji kuat tekan dalam kgf

Penambahan Kalsit (% Berat Campuran)	Kuat Tekan Matriks Semen/Cu (kgf)
0	7700
5	7350
10	7125

Konversi dari kgf ke kN

1 kgf = 0,009806 kN

Penambahan Kalsit (% Berat Campuran)	Kuat Tekan Matriks Semen/Cr (kN)
0	51,386
5	49,050
10	47,548

Luas matriks semen (cm²)

Matriks semen berbentuk kubus dengan panjang sisi 5 cm.

$$\begin{aligned} L &= 6 \times s^2 \\ &= 6 \times 5^2 \\ &= 150 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Analisis kuat tekan matriks semen menurut perhitungan sebagai berikut:

- 0% Penambahan Kalsit

$$\text{Kuat tekan} = \frac{75,537 / 9,8 \times 1000}{150} \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Kuat tekan} = 51,386 \text{ kg/cm}^2$$

- 5% Penambahan Kalsit

$$\text{Kuat tekan} = \frac{72,104 / 9,8 \times 1000}{150} \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Kuat tekan} = 49,050 \text{ kg/cm}^2$$

- 10% Penambahan Kalsit

$$\text{Kuat tekan} = \frac{69,896 / 9,8 \times 1000}{150} \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Kuat tekan} = 47,548 \text{ kg/cm}^2$$

Lampiran 4

Tingkat peluluhan kumulatif tembaga dalam TCLP modifikasi progresif

$$\text{TPK} = \sum A/B \times 100\%$$

Keterangan:

TPK : tingkat peluluhan kumulatif

A : jumlah kumulatif tembaga yang terluluh

B : jumlah tembaga mula-mula dalam matriks semen

Tabel Konsentrasi Kumulatif Tembaga yang Terluluh

Berat Kalsit	Pelarut	Konsentrasi Kumulatif (ppm)	TPK (%)	Efisiensi (%)
0%	Buffer	6,546	4,10	95,90
	Air Tanah	<LoD	0	100
	Air Laut	<LoD	0	100
5%	Buffer	5,885	3,68	96,32
	Air Tanah	<LoD	0	100
	Air Laut	<LoD	0	100
10%	Buffer	5,546	3,47	96,53
	Air Tanah	<LoD	0	100
	Air Laut	<LoD	0	100

Keterangan : <LoD = di bawah limit deteksi standar alat (0,0044ppm).

Konsentrasi tembaga sebelum terluluh = 159,740 ppm

Pelarut Buffer

- 0% Kalsit

$$\text{TPK} = 6,546/159,740 \times 100\%$$

$$= 4,10\%$$

$$\text{Efisiensi Penjerapan} = (100 - 4,10)\%$$

$$= 95,90\%$$

- 5% Kalsit

$$\text{TPK} = 5,885/159,740 \times 100\%$$

$$= 3,68\%$$

$$\text{Efisiensi Penjerapan} = (100 - 3,68)\%$$

$$= 96,32\%$$

- 10% Kalsit

$$\text{TPK} = 5,546/159,740 \times 100\%$$

$$= 3,47\%$$

$$\text{Efisiensi Penjerapan} = (100 - 3,47)\%$$

$$= 96,53\%$$

Air Tanah

- 0% Kalsit

$$\text{TPK} = 0/159,740 \times 100\%$$

$$= 0\%$$

$$\text{Efisiensi Penjerapan} = (100 - 0)\%$$

$$= 100\%$$
- 5% Kalsit

$$\text{TPK} = 0/159,740 \times 100\%$$

$$= 0\%$$

$$\text{Efisiensi Penjerapan} = (100 - 0)\%$$

$$= 100\%$$
- 10% Kalsit

$$\text{TPK} = 0/159,740 \times 100\%$$

$$= 0\%$$

$$\text{Efisiensi Penjerapan} = (100 - 0)\%$$

$$= 100\%$$

Air Laut

- 0% Kalsit

$$\text{TPK} = 0/159,740 \times 100\%$$

$$= 0\%$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi Penjerapan} &= (100 - 0)\% \\ &= 100\%\end{aligned}$$

- 5% Kalsit

$$\begin{aligned}\text{TPK} &= 0/159,740 \times 100\% \\ &= 0\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Efisiensi Penjerapan} &= (100 - 0)\% \\ &= 100\%\end{aligned}$$

- 10% Kalsit

$$\begin{aligned}\text{TPK} &= 0/159,740 \times 100\% \\ &= 0\%\end{aligned}$$

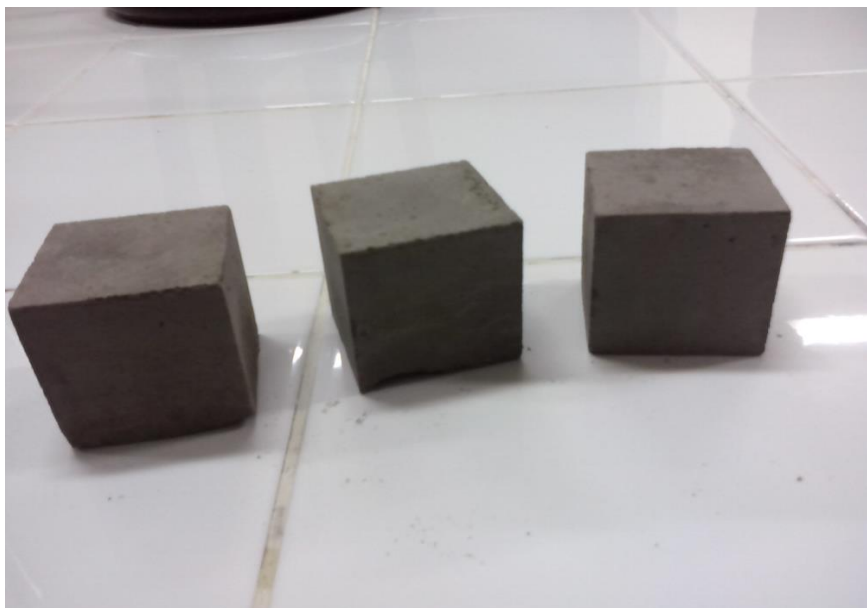
$$\begin{aligned}\text{Efisiensi Penjerapan} &= (100 - 0)\% \\ &= 100\%\end{aligned}$$

Lampiran 5

Gambar Instrumen Penelitian



Semen yang sudah dicetak



Cetakan semen setelah direndam dalam air 28 hari



Proses ekstraksi bertahap



Multi *Shaker* MMS



pH meter untuk analisis pH ekstraktan



Spektroskopi Serapan Atom