



**KOMPETISI ADSORPSI ION LOGAM Pb^{2+} DAN Cu^{2+} OLEH
SILIKA GEL BERBASIS ABU TERBANG BATUBARA
PLTU PAITON-PROBOLINGGO**

SKRIPSI

Oleh
Inayatul Mukarromah
NIM. 131810301052

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2018**



**KOMPETISI ADSORPSI ION LOGAM Pb²⁺ DAN Cu²⁺ OLEH
SILIKA GEL BERBASIS ABU TERBANG BATUBARA
PLTU PAITON-PROBOLINGGO**

Skripsi

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Kimia (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh
Inayatul Mukarromah
NIM. 131810301052

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Ayahanda Halal Kuspriyanto dan Ibunda Umi Badriyah atas doa, cinta dan kasih sayang yang telah diberikan selama ini
2. Segenap keluarga besar dan saudara-saudara, Kakek Misdjo Bambang Santosa (Alm) dan Abdul Hadi, Nenek Surasmina dan Sriatun, Tante Shofiatul Bariroh dan Nur Kumala Sari, Om Fadlur Rahman dan Ahmad Sayidi, serta adikku Asyifa Syahlanavika Ahmad dan Sultan Anashirul Asyrafi atas doa, dukungan, dan motivasi yang tiada henti.
3. Bapak/Ibu guru TK Eka Prastiwi, SDN Sukodadi 01, SMP Bhakti Pertiwi, SMAN 1 Probolinggo, bapak/ibu dosen kimia, teknisi jurusan Kimia, dan segenap karyawan FMIPA Universitas Jember yang telah membimbing dan memberikan ilmu, serta pengalamannya;
4. kawan seperjuangan Kimia 2013 (TITANIUM), keluarga besar Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, almama Universitas Jember, teman-teman kosan Cinderella , serta teman-teman KKN 56 terima kasih atas semangat, bantuan, saran, perhatian, dan kenangan yang telah diberikan;
5. sahabat seperjuangan Ardi Budianto, Arum Meta M.S., Diah Ayu N.S., Dyah Vira P., Lilis I.R., Alifah Mustafidah, Pricilia Citra, Deys Sya'fatul M., Maya Esti A., dan Fitri Sulistiyowati, terima kasih atas doa, dukungan, semangat dan perhatian yang diberikan selama ini;
6. semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

MOTO

“Maka nikmat Tuhanmu yang manakah yang kamu dustakan?” (terjemahan Surat Ar-Rahman). *)

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan) yang lain. Dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknya kamu berharap” (terjemahan Surat *Al-Insyirah* ayat 6-8).**)

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar” (terjemahan Surat *Ar-Rum:60*).**)

HALAMAN MOTTO

*) Departemen Agama Republik Indonesia. 2010. *Al-Quran dan Terjemahannya*. Bandung: CV. Pustaka Agung Harapan

***) Departemen Agama Republik Indonesia. 2008. *Al-Quran dan Terjemahannya*. Bandung: CV. Diponegoro.

PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Inayatul Mukarromah

NIM : 131810301052

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Kompetisi Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh Silika Gel berbasis Abu Terbang Batubara PLTU Paiton-Probolinggo” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

HALAMAN PERNYAAT

Jember, 2018

Yang menyatakan,

Inayatul Mukarromah

NIM 131810301052

SKRIPSI

**KOMPETISI ADSORPSI ION LOGAM Pb²⁺ DAN Cu²⁺ OLEH SILIKA
GEL BEBRBASIS ABU TERBANG BATUBARA
PLTU PAITON PROBOLINGGO**

Oleh

Inayatul Mukarromah
NIM 131810301052

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Yudi Aris Sulistiyo, S.Si., M.Si.

Dosen Pembimbing Anggota : Tanti Haryati, S.Si..M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Kompetisi Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh Silika Gel berbasis Abu Terbang Batubara PLTU Paiton-Probolinggo” karya Inayatul Mukarromah telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Tim Penguji;

Ketua,

Anggota I,

Yudi Aris Sulistiyo, S.Si., M.Si.
NIP.198809242014041001

Tanti Haryati, S.Si., M.Si.
NIP. 198010292005012002

Anggota II,

Anggota III,

Novita Andarini, S.Si., M.Si.
NIP.197211122000032001

Dwi Indarti, S.Si., M.Si.
NIP. 197409012000032004

Mengesahkan
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan,

Drs. Sujito, Ph.D.
NIP. 196102041987111001

RINGKASAN

Kompetisi Adsorpsi Ion Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh Silika Gel berbasis Abu Terbang Batubara PLTU Paiton-Probolinggo; Inayatul Mukarromah, 131810301052; 2018: 39 halaman; Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Timbal dan tembaga merupakan polutan yang banyak dihasilkan dan berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Berbagai metode digunakan untuk mengurangi kandungan timbal dan tembaga, termasuk metode adsorpsi. Sejumlah adsorben telah banyak dikembangkan untuk mengeliminasi polutan logam berat dari limbah cair, salah satunya adalah abu terbang. Abu terbang dapat digunakan sebagai adsorben dikarenakan mengandung silika sebanyak 30,25%-36,83% (PJB Paiton, 2002). Kapasitas adsorpsi abu terbang masih tergolong kecil, sehingga untuk meningkatkan kapasitas adsorpsinya abu terbang diubah menjadi silika gel dengan metode *sol-gel*. Silika gel memiliki kapasitas adsorpsi yang besar dan mudah dimodifikasi pada permukaannya. Hal ini dikarenakan silika gel berbentuk amorf serta memiliki sisi aktif berupa gugus silanol (Si-OH) dan siloksan (Si-O-Si) pada permukaannya. Permasalahan dari proses adsorpsi adalah adanya lebih dari satu polutan dalam satu sistem, sehingga akan mempengaruhi perilaku adsorpsi pada adsorben. Penelitian ini mempelajari perilaku adsorpsi campuran Pb dan Cu untuk mengetahui pH dan waktu optimum serta kinetika adsorpsinya.

Uji kemampuan adsorpsi dilakukan dengan menggunakan adsorben silika gel hasil sintesis sebanyak 0,1 gram. Silika gel ditambahkan ke dalam 200 ppm larutan Cu, Pb, dan campuran keduanya masing-masing 25 mL yang sudah dikondisikan pHnya. Variasi pH yang digunakan adalah pH 2, 3, 4, 6, 8, dan 10. Pengkondisian pH dilakukan dengan menambahkan larutan HCl dan NaOH tetes demi tetes sampai mencapai pH yang diinginkan. Selama proses adsorpsi, larutan di *shaker* selama 1 jam, kemudian larutan disaring dengan kertas saring *Whatman* No. 41 dan diencerkan hingga 50 kalinya. Larutan kemudian dianalisis menggunakan AAS untuk selanjutnya ditentukan konsentrasi sisa larutan yang tidak terserap. Nilai kemampuan adsorpsi silika gel dihitung dari konsentrasi mula-mula dikurangi konsentrasi sisa larutan. pH optimum yang didapat

kemudian digunakan sebagai pH untuk variasi waktu untuk menentukan kinetika adsorpsinya. Variasi waktu yang digunakan adalah 5, 10, 30, 45, 60, 90, dan 120 menit.

Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa pH optimum berada pada pH 6 baik pada sistem tunggal maupun campurannya. Kemampuan adsorpsi silika gel terhadap Cu pada sistem campuran menurun dibandingkan sistem tunggalnya, yakni 79,630 mg/L menjadi 44,444 mg/L, sedangkan Pb dari 64,814 mg/L menjadi 33,333 mg/L. Adanya ion kompetitor akan menghalangi interaksi adsorbat dengan permukaan silika gel. Silika gel memiliki afinitas yang lebih besar terhadap Cu sehingga kemampuan adsorpsinya lebih besar dibandingkan Pb. Selain pH, parameter yang mempengaruhi adsorpsi adalah waktu. Variasi waktu yang dilakukan dalam penelitian ini adalah 5, 10, 30, 45, 60, 90, dan 120 menit. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa waktu optimum terjadi pada menit ke-60, ketika melewati menit ke-60 tidak ada kenaikan adsorpsi yang signifikan. Kinetika adsorpsi silika gel terhadap Cu dan Pb dalam larutan tunggal ataupun biner mengikuti kinetika pseudo orde 2. Laju adsorpsi Pb pada sistem tunggal dan campurannya adalah 0,032 g/mg.min dan 0,05 g/mg.min, sedangkan laju Cu sebesar 0,016 dan 0,006 g/mg.min. Cu memiliki laju yang lebih cepat dibandingkan Pb karena Cu memiliki afinitas yang lebih besar.

Berdasarkan penelitian dapat ditarik kesimpulan bahwa pH tidak hanya mempengaruhi disosiasi gugus fungsi pada permukaan adsorben, namun juga mempengaruhi spesi adsorbat dalam larutan. pH optimum adsorpsi Pb pada sistem tunggal dan campuran terjadi pada pH 6 dengan nilai 64,814 mg/L dan 33,333 mg/L atau menurun sebanyak 48,57% dibandingkan sistem tunggalnya. Waktu optimum Pb berada pada menit ke-60 dengan serapan 60,317 mg/L dan 27,777 mg/L pada sistem tunggal dan campurannya. Kinetika adsorpsi Pb sistem campuran memiliki laju 6,4 kali lebih lambat dibandingkan sistem tunggalnya.

PRAKATA

Puji syukur atas segala rahmat dan karunia yang dilimpahkan Allah SWT, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Kompetisi Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} dan Cu^{2+} oleh Silika Gel berbasis Abu Terbang Batu Bara PLTU Paiton-Probolinggo”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) di Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karenanya, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Drs. Sujito, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
2. Dr. Bambang Piluharto, S.Si., M.Si., selaku ketua Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
3. Yudi Aris Sulistiyo, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Tanti Haryati, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
4. Novita Andarini, S.Si., M.Si. selaku Dosen Penguji I, dan Dwi Indarti, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktunya guna menguji, serta memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan skripsi ini;
5. Yeni Maulidah Muflihah, S.Si., M.Si., dan Drs. Siswoyo, M.Sc., Ph. D. selaku Dosen Pembimbing Akademik;
6. segenap dosen pengajar Fakultas MIPA, terutama dosen-dosen Jurusan Kimia Universitas Jember yang telah memberikan banyak ilmu dan pengetahuan;

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Abu Terbang	4
2.2 Silika Gel	5
2.3 Adsorpsi	7
2.4 Timbal	10
2.5 Tembaga	12
2.6 Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)	14
2.7 FTIR	15
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	18
3.2 Alat dan Bahan	18
3.2.1 Alat	18
3.2.2 Bahan	18
3.3 Diagram Alir Penelitian	19
3.4 Prosedur Penelitian	19
3.4.1 Pembuatan Larutan Pereaksi	19
a. Pembuatan Larutan NaOH 3 M	19
b. Pembuatan Larutan HCl 1 M	20
c. Pembuatan Larutan H ₂ SO ₄ 2 M	20
d. Pembuatan Larutan Induk Pb(NO ₃) ₂ 1000 ppm ...	20
e. Pembuatan Larutan Induk Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	
1000 ppm	20
f. Pembuatan Larutan Sampel Pb(NO ₃) ₂ 200 ppm ...	20
g. Pembuatan Larutan Sampel Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	

200 ppm	20
3.4.2 Preparasi Sampel	21
3.4.3 Pembuatan Silika Gel.....	21
3.4.4 Karakterisasi Silika Gel dengan FTIR.....	22
3.4.5 Uji Adsorpsi Silika Gel	22
a. Pembuatan Kurva kalibrasi.....	22
b. Uji Adsorpsi Silika Terhadap Larutan Pb, Cu, dan campuran Pb/Cu pada variasi pH.....	23
c. Uji Adsorpsi Silika Terhadap Larutan Pb, Cu, dan campuran Pb/Cu pada variasi Waktu.....	24
3.5 Analisis Data.....	24
3.5.1 Kapasitas Adsorpsi	24
3.5.2 Model Kinetika Adsorpsi pada proses Adsorpsi Pb dengan adanya kompetitor Cu.....	25
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAAN	26
4.1 Pengaruh pH Sistem terhadap Kompetisi Adsorpsi Pb dan Cu pada Silika Gel	26
4.2 Pengaruh pH Sistem terhadap Kompetisi Adsorpsi Pb dan Cu pada Silika Gel	30
BAB 5. PENUTUP	34
5.1 Kesimpulan	34
5.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN	40

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Komposisi kimia abu terbang PLTU Paiton	4
2.2 Kapasitas adsorpsi <i>fly ash</i> untuk sampah padat industri	5
2.3 Kapasitas adsorpsi silika gel terhadap berbagai adsorbat	6
2.4 Sifat fisik dan kimia timbal	11
2.5 Sifat fisik dan kimia tembaga	13
3.1 Variasi pH sistem	23
3.2 Variasi waktu kontak sistem	24
4.1 Perbandingan hasil analisis FTIR silika gel Merck No.60 dan silika gel hasil sintesis Sifat fisik dan kimia timbal	27
4.2 Parameter Pseudo Orde 1 dan 2 pada Pb dan Cu	32

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Susunan tetrahedral SiO_4 pada silika gel	6
2.2 Distribusi muatan silika gel dalam fungsi pH	7
2.3 Sistem adsorpsi yang terdiri dari 2 komponen gas	8
2.4 Distribusi spesi timbal sebagai fungsi pH	11
2.5 Distribusi spesi tembaga sebagai fungsi pH.....	13
2.6 a. Spektra infra merah silika gel hasil sintesis.....	17
b. Spektra infra merah kiesel gel 60G.....	17
3.1 Diagram Alir Penelitian	19
4.1 Silika hasil ekstraksi	27
4.2 Spektra infra merah silika gel dari <i>fly ash</i> batu bara	27
4.3 Kurva adsorpsi variasi pH pada sistem tunggal dan campuran.....	29
4.4 Kurva adsorpsi variasi waktu pada sistem tunggal dan campuran	31

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 4.1 Perhitungan preparasi bahan	40
Lampiran 4.1.1 Pembuatan larutan	40
Lampiran 4.2 Kurva kalibrasi larutan standar Pb dan Cu	44
Lampiran 4.2.1 Kurva kalibrasi larutan standar Pb.....	44
Lampiran 4.2.2 Kurva kalibrasi larutan standar Cu	45
Lampiran 4.3 Penentuan adsorpsi larutan Cu oleh silika gel dengan variasi pH pada sistem tunggal	47
Lampiran 4.4 Penentuan adsorpsi larutan Cu oleh silika gel dengan variasi waktu pada sistem tunggal	49
Lampiran 4.5 Penentuan adsorpsi larutan Cu oleh silika gel dengan variasi pH pada sistem campuran	51
Lampiran 4.6 Penentuan adsorpsi larutan Cu oleh silika gel dengan variasi waktu pada sistem campuran	53
Lampiran 4.7 Penentuan adsorpsi larutan Pb oleh silika gel dengan variasi pH pada sistem tunggal	55
Lampiran 4.8 Penentuan adsorpsi larutan Cu oleh silika gel dengan variasi waktu pada sistem tunggal	57
Lampiran 4.9 Penentuan adsorpsi larutan Cu oleh silika gel dengan variasi pH pada sistem campuran	60
Lampiran 4.10 Penentuan adsorpsi larutan Cu oleh silika gel dengan variasi waktu pada sistem campuran	62
Lampiran 4.11 Kinetika adsorpsi Pseudo Orde 1 dan 2	64

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Timbal dan tembaga merupakan polutan yang berbahaya bagi manusia dan lingkungan (Melichova dan Ladislav, 2012). Timbal dan tembaga dalam kadar berlebih dapat menyebabkan gangguan kardiovaskular, gangguan ginjal, gangguan kesuburan (WHO, 2011), dan meracuni perairan (Salmani, 2012). Berbagai metode digunakan untuk mengurangi kandungan timbal dan tembaga di lingkungan, misal adsorpsi, pertukaran ion, penyaringan menggunakan membran, elektrokimia, pengendapan kimia, koagulasi-flokulasi (Martin-Lara *et al.*, 2014), membran reaktif permeabel (Liu *et al.*, 2013), serta teknologi membran nanofiltrasi (Wang *et al.*, 2013). Namun, metode tersebut membutuhkan biaya operasional yang tinggi dan berpotensi menghasilkan polutan sekunder (Xiao, 2013). Oleh karena itu diperlukan suatu metode yang efektif dan efisien dalam penyelesaian masalah polutan Pb^{2+} dan Cu^{2+} .

Adsorpsi diyakini merupakan metode yang paling efisien dan menjanjikan. Adsorpsi tepat digunakan karena metode pengerjaannya sederhana, efisien, efektif dan ramah lingkungan (Arami *et al.*, 2005). Sejumlah adsorben telah banyak dikembangkan untuk mengeliminasi polutan logam berat dari limbah cair. Adsorben yang sering digunakan antara lain fosfat teraktifasi ($0,75 \text{ mmol g}^{-1}$) (Mouflih, 2005), karbon teraktifasi ($0,21 \text{ mmol g}^{-1}$) (Acharya, 2009), kaolinit termodifikasi natrium tetraborat ($0,17 \text{ mmol g}^{-1}$) (Unuabonah, 2008), bentonit teraktifasi ($0,09 \text{ mmol g}^{-1}$) (Kul, 2010), dan sabut ($0,09 \text{ mmol g}^{-1}$) (Conrad, 2007). Adsorben-adsorben tersebut memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih kecil jika dibandingkan silika gel, yakni $0,80 \text{ mmol g}^{-1}$ (Chiron, 2003).

Silika gel merupakan salah satu adsorben yang menjanjikan. Silika gel memiliki kapasitas adsorpsi yang besar dan sifat fisik yang menarik (stabilitas termal baik, luas permukaan besar, dan mudah dimodifikasi pada permukaannya) (Niu, 2013). Di sisi lain, silika gel dapat disintesis dari limbah pembakaran batu bara, yaitu abu terbang (*fly ash*). *Fly ash* dapat di gunakan sebagai material dasar

dalam pembuatan silika gel dikarenakan komponen utamanya berupa SiO_2 sebanyak 30,25% - 36,83%. Menurut Rofiah (2016) bahwa kapasitas adsorpsi silika gel dari *fly ash* terhadap zat warna *Indigo Carmine* adalah sebesar 25,907 mg/g. Silika gel dari *fly ash* juga dapat menghasilkan penurunan kadar COD dan BOD sebesar 23,71% dan 57,44% dengan menggunakan silika gel dari *fly ash* (Suprihatin, 2015).

Parameter penting yang mempengaruhi proses adsorpsi adalah pH. pH tidak hanya mempengaruhi disosiasi gugus fungsi pada permukaan adsorben namun juga dapat mempengaruhi spesi adsorbat dalam larutan (Niu, 2013). Menurut Yuslee *et al.* (2015) bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring bertambahnya pH dengan nilai maksimal 24,88 mg/g untuk Cu^{2+} dan 23,87 mg/g (Pb^{2+}) oleh kitosan pada pH 6. Parameter lain yang mempengaruhi adsorpsi adalah waktu adsorpsi. Variasi waktu kontak memungkinkan kita untuk menghitung kinetika adsorpsinya. Kinetika penting dalam pengolahan limbah karena dapat memberikan informasi tentang mekanisme adsorpsi, sehingga berguna dalam peningkatan efisiensi (Niu, 2013). Menurut Tighadouini (2015) bahwa waktu kontak optimum Cu pada SiNTh terjadi pada menit ke-25 dan mengikuti model kinetika pseudo orde 2 dengan nilai laju dan kapasitas adsorpsi sebesar $13,52 \times 10^{-3}$ g/mg.min dan 52,63 mg/g.

Permasalahan dari proses adsorpsi adalah adanya lebih dari satu polutan dalam suatu sistem. Menurut Fan (2017), kapasitas adsorpsi Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada kitosan yang dimodifikasi menurun pada sistem campurannya dari 55,427 mg/g menjadi 38,842 mg/g untuk Cu^{2+} dan 69,758 mg/g menjadi 50,966 mg/g untuk Pb^{2+} . Kompetitor yang dipilih adalah Cu^{2+} dikarenakan memiliki afinitas yang lebih besar dibandingkan Pb^{2+} (Fan, 2017), sehingga akan lebih tertarik pada gugus aktif silika gel. Selain itu ukuran molekulnya lebih kecil ($\text{Cu(II)/Pb(II)} = 1,28 \text{ \AA}/1,75 \text{ \AA}$) sehingga mobilisasinya lebih baik dari Pb^{2+} (Tampubolon, 2016). Selain itu, masih sedikit penelitian yang melaporkan tentang kompetisi adsorpsi ion logam menggunakan silika gel dari *fly ash*, sehingga akan dipelajari perilaku adsorpsi silika gel terhadap ion Pb^{2+} jika dipengaruhi oleh adanya ion kompetitor

Cu^{2+} . Dalam penelitian ini dilakukan variasi pH dan waktu kontak adsorpsi untuk mengetahui adsorpsi optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan Masalah yang dikemukakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pH adsorpsi Pb dengan adanya kompetitor Cu?
2. Bagaimana pengaruh waktu adsorpsi Pb dengan adanya kompetitor Cu dan kinetika adsorpsinya?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh pH adsorpsi Pb dengan adanya kompetitor Cu
2. Mengetahui pengaruh waktu adsorpsi Pb dengan adanya kompetitor Cu dan kinetika adsorpsinya

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Fly Ash* yang digunakan berasal dari PT. IPMOMI PLTU Paiton-Probolinggo
2. Ukuran silika gel yang digunakan lebih kecil dari 200 mesh.
3. Konsentrasi Adsorbat yang digunakan 100 ppm
4. Jumlah Adsorben yang digunakan 100 mg

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk:

1. Memberikan informasi tentang pengaruh kompetisi adsorpsi terhadap penyerapan logam pada silika gel dan *fly ash*,
2. Memberikan solusi terhadap permasalahan lingkungan

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Abu Terbang (*Fly Ash*)

Abu terbang dihasilkan dari proses pembakaran pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya. Abu sisa pembakaran yang terbawa keluar dan ditangkap menggunakan presipitator elektrostatis disebut abu terbang sedangkan abu dasar akan tertinggal dan dikeluarkan dari bawah tungku. Jumlah abu terbang yang dihasilkan lebih besar dari pada abu dasar dengan persentasi berturut-turut sebesar 80-90% dan 10-20% (PJB Paiton, 2002).

Partikel abu terbang berbentuk butiran halus, strukturnya bola padat dan berongga serta berwarna keabu-abuan dan hitam. Abu terbang memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 0,075 mm dan bersifat hidrofobik (Page *et al.*, 1979). Kerapatan abu terbang berkisar antara 2100 hingga 3000 kg/m³ dengan luas area spesifik 170 sampai 1000 m²/kg (Nugraha dan Antoni, 2007).

Komponen utama yang terkandung dalam abu terbang adalah silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), fero oksida (Fe₂O₃), kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO₂), alkalin (Na₂O dan K₂O), sulfur trioksida (SO₃), fosfor oksida (P₂O₅), dan karbon. Kandungan abu terbang secara umum dapat dilihat dari Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi kimia abu terbang PLTU Paiton

Komposisi Kimia	Kandungan (% W)
SiO ₂	30,25-36,83
Al ₂ O ₃	14,52-23,78
Fe ₂ O ₃	13,46-19,94
CaO	11,40-16,57
MgO	5,360-3,110
Mn ₃ O ₄	0,140-0,480
Na ₂ O	0,250-0,740
K ₂ O	0,630-1,320
TiO ₂	0,830-1,050
P ₂ O ₅	0,630-3,750
SO ₃	3,010-7,280

(Sumber : PJB Paiton, 2002)

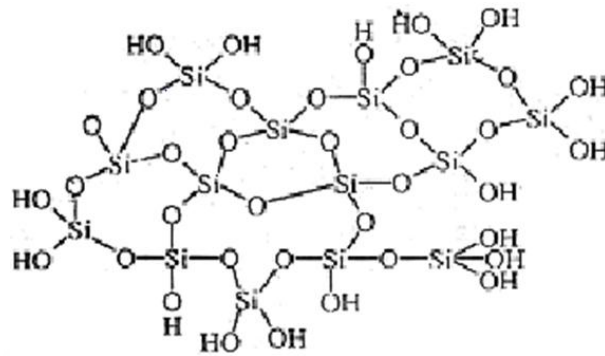
Penelitian termutakhir tentang penggunaan adsorben dengan harga terjangkau untuk menghilangkan logam berat menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi yang besar dalam pengolahan air limbah. Namun, potensi ini dibatasi oleh bervariasinya komposisi dari abu terbang dan dibutuhkan jumlah yang banyak untuk mencapai efektivitas (Blissetts, 2012). Beberapa penelitian yang menggunakan *fly ash* sebagai adsorben dirangkum oleh Rafatullah (2010) dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kapasitas adsorpsi *fly ash* untuk sampah padat industri

Adsorben	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
<i>Coal fly ash (0.01 NaCl)</i>	16,6
<i>Coal fly ash</i>	12,7
<i>HNO₃ Fly ash</i>	7,99
<i>Fly ash (bagasse)</i>	6,46
<i>Fly ash (CFA)</i>	6,04
<i>Fly ash</i>	5,57
<i>Fly ash</i>	4,60
<i>Fly ash</i>	4,47
<i>Fly ash</i>	3,07
<i>Fly ash</i>	2,85
<i>Fly ash (SFA)</i>	1,47
<i>Fly ash</i>	1,10

2.2 Silika Gel

Gel (bahasa latin, *gelu*= membeku, dingin) merupakan suatu sistem koloid antara 2 fase zat, yakni padatan dan cairan. Silika gel merupakan silika yang diperoleh dari penggumpalan sol natrium silika (NaSiO_2). Struktur silika gel berbentuk *amorf* yang tersusun atas globula-globula SiO_4 tetrahedral secara tidak teratur dan beragregasi membentuk kerangka agregasi yang lebih besar. Silika gel memiliki rumus $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Kation Si^{4+} pada silika gel terkoordinasi secara tetrahedral dengan anion O^{2-} . Susunan tidak beraturan SiO_4 pada silika gel diilustrasikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Susunan Tetrahedral SiO_4 pada *Silika Gel* (Sumber: Oscik, 1982)

Silika gel merupakan adsorben yang paling banyak digunakan dalam proses adsorpsi. Hal ini dikarenakan silika gel mudah diproduksi, sifat permukaan (struktur geometri pori dan sifat kimia permukaan) yang baik, serta mudah dimodifikasi. Selain itu silika gel juga bersifat inert, hidrofilik, kestabilan termal dan mekanik yang baik (Fahmiati, 2006). Selain kelebihan yang disebutkan diatas, silika gel memiliki beberapa kelemahan diantaranya situs aktifnya hanya berupa gugus silanol ($-\text{SiOH}$) dan siloksan (Si-O-Si) yang memiliki sifat keasaman rendah. Namun dengan adanya gugus aktif ini memungkinkan untuk dilakukan modifikasi. Modifikasi ini dapat mengubah jenis gugus fungsi pada situs aktif maupun tidak. Gugus fungsi pada situs aktif dapat diubah dengan menambahkan pereaksi dan dilakukan perlakuan tertentu (Oscik, 1982).

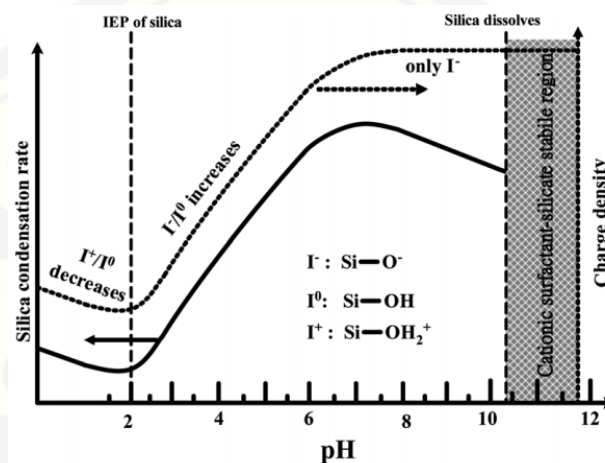
Berbagai penelitian telah dikembangkan dengan menggunakan silika gel sebagai adsorben. Beberapa penelitian tersebut dirangkum dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kapasitas adsorpsi silika gel terhadap berbagai adsorbat

Adsorben	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Sumber
Silika gel (Pb)	0,31	(Fathonah <i>et al.</i> , 2013)
Silika gel/kitosan (Pb)	202	(Gandhi dan Meenakshi, 2012)
Silika gel/kitosan (Cu)	700	(Gandhi dan Meenakshi, 2012)
Silika gel (Indigo carmine)	25,907	(Rofi'ah, 2016)
Silika gel (Metilen biru)	22,472	(Andriana, 2016)

Faktor yang mempengaruhi muatan silika adalah pH larutan. pH larutan dibawah titik isoelektrik ($\text{IEP}=2,0$) menyebabkan silika bermuatan positif. Jumlah muatan positif akan meningkat seiring dengan menurunnya pH. Muatan silika

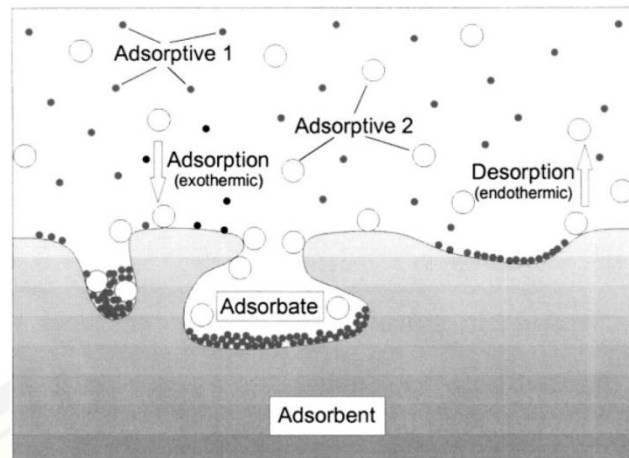
akan menjadi negatif (silikat) ketika berada diatas titik isoelektrik, serta jumlah muatan bertambah seiring meningkatnya pH. Pada pH yang sama (pH 2~7), silikat akan cenderung berinteraksi elektrostatis dan berikatan hidrogen dengan adsorbat bermuatan positif. Silikat pada kondisi basa (pH>7) dengan muatan negatif yang tinggi hanya dapat berinteraksi secara kuat melalui interaksi elektrostatis. Distribusi muatan silika gel pada berbagai pH dirangkum dalam Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Distribusi muatan silika gel dalam fungsi pH (Wu *et al.*, 2010).

2.3 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses berkumpulnya zat (adsorbat) pada permukaan adsorben akibat adanya gaya intermolekul maupun medan gaya. Gaya ini menarik molekul fluida di sekitarnya baik gas, uap, maupun cairan sehingga terakumulasi pada permukaan adsorben (Oscik, 1982). Menurut Bansal (2005) bahwa pada proses adsorpsi, konsentrasi fluida pada permukaan adsorben lebih tinggi dibandingkan fasa fluidanya. Menurut Keller (2005) bahwa adsorpsi adalah transfer molekul dari gas atau cairan pada permukaan fasa padatan, biasanya berupa proses eksotermis. Desorpsi merupakan transfer molekul yang melekat pada permukaan padatan kembali pada fase gas atau cairannya, biasanya berupa proses endotermis. Keseimbangan dinamis antara jumlah molekul yang diadsorpsi dan didesorpsi pada interval waktu tertentu disebut keseimbangan adsorpsi. Jika aliran molekul dari dan menuju permukaan adsorben tidak seimbang, maka akan terjadi adsorpsi maupun desorpsi.



Gambar 2.3 Sistem adsorpsi yang terdiri dari 2 komponen gas (Keller, 2005)

Berdasarkan energi interaksi atau kekuatan ikatan adsorbat pada permukaan adsorben, adsorpsi dapat dibedakan menjadi fisisorpsi, adsorpsi fisikokimia, dan kemisorpsi. Fisisorpsi merupakan sistem adsorpsi yang ikatannya lemah. Gaya-gaya yang bekerja adalah *Van der Waals* atau gaya dispersi *dipole-induced dipole*. Proses ini bersifat *reversible* dengan cara menurunkan tekanan dan menaikkan temperatur, sehingga adsorbat akan terdesorpsi membentuk kesetimbangan baru (Keller, 2005). Peristiwa adsorpsi merupakan peristiwa eksoterm, pada fisisorpsi mengeluarkan panas sekitar 5-10 kkal/mol dan terjadi pada suhu yang rendah (dibawah titik didih adsorbat). Adsorpsi fisik tidak membutuhkan energi aktivasi sehingga akan membentuk lapisan *multilayer* pada permukaan adsorben. Interaksi yang lemah menyebabkan ikatan mudah diputus dengan suhu pemanasan 150 hingga 200°C selama 2-3 jam (Sukardjo, 1985).

Adsorpsi jenis kedua adalah adsorpsi fisikokimia ditandai dengan interaksi yang lemah dari adsorbat dan atom molekul adsorben. Berdasarkan sifat katalitik dari permukaan adsorben, dapat terjadi disosiasi maupun asosiasi antara adsorbat yang satu dengan yang lainnya. Adsorpsi jenis ketiga yaitu kemisorpsi, dimana adsorbat terikat kuat pada permukaan adsorben dan ditujukan agar terjadi reaksi kimia sehingga terbentuk senyawa baru. Namun, pada sistem ini tidak dapat terjadi desorpsi secara *reversible* akibat ikatan antara adsorbat dan molekul adsorben yang sangat kuat. Desorpsi hanya dapat terjadi secara *irreversible* ketika

material adsorben diganti (Keller, 2005). Berbeda dengan fisisorpsi, pada kemisorpsi hanya terdapat 1 *layer*. Energi adsorpsi sistem ini ± 100 kJ/mol (Alberty, 1997).

Menurut Bahl (1997) bahwa daya adsorpsi dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini:

- a. Jenis Adsorbat
- b. Suhu Adsorbat
- c. Tekanan adsorbat
- d. Interaksi potensial (E)

Kinetika adsorpsi dapat dianalisis dengan beberapa model untuk untuk sistem *solid-liquid*, diantaranya adalah model kinetika orde 1, orde 2, pseudo orde 1 (model Lagergren) dan model kinetika pseudo orde 2 (model Ho dan McKay). Model kinetika orde 1 menunjukkan reaksi hanya bergantung pada konsentrasi salah satu reaktan, berikut persamaan kinetika orde 1:

$$\frac{-d[C]}{dt} = k[C] \quad (2.1)$$

di mana C adalah konsentrasi, sedangkan bentuk persamaan linearnya:

$$\ln C_e = -k_1 t + \ln C_o \quad (2.2)$$

C_e merupakan konsentrasi saat kesetimbangan, k_1 adalah kinetika orde 1 dan C_o adalah konsentrasi awal. Plot $\ln \frac{C_o}{C_e}$ terhadap t merupakan bentuk dari kurva linier orde 1 (Kurniawati *et al.*, 2013).

Model kinetika orde 2 menunjukkan reaksi bergantung pada kuadrat konsentrasi salah satu reaktan atau konsentrasi dua reaktan yang terlibat, berikut persamaan linear kinetika orde 2:

$$\frac{d[C]}{dt} = k[C]^2 \quad (2.3)$$

bentuk persamaan linearnya:

$$\frac{1}{C_e} = k_2 t + \frac{1}{C_o} \quad (2.4)$$

di mana k_2 adalah kinetika orde 2, plot $\frac{1}{C_e}$ terhadap t merupakan bentuk kurva linear kinetika orde 2 (Kurniawati, *et al.*, 2013).

Metode pseudo orde 1 (model Lagergren) adalah model kinetika mekanistik pertama untuk sistem *liquid-solid* yang berbasis pada kapasitas padatan (*solid*). Model kinetika tersebut merupakan salah satu persamaan kinetika yang telah diaplikasikan secara luas untuk mendeskripsikan adsorpsi zat terlarut dari larutan. Bentuk umum persamaan kinetika pseudo orde 1 adalah:

$$\frac{dq_t}{dt} = k(q_e - q_t) \quad (2.5)$$

dalam bentuk linier:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - kt \quad (2.6)$$

Plot $\log(q_e - q_t)$ terhadap t atau plot $\ln(q_e - q_t)$ terhadap t merupakan kurva linier dengan slope = k dan intersep = $\ln q_e$ (Munawar, 2012).

Model pseudo orde 2 (Model Ho dan McKay) adalah model kinetika yang dikembangkan berdasarkan reaksi kompleksasi permukaan antara adsorben dengan adsorbat. Persamaan laju reaksi pseudo orde 2 adalah:

$$\frac{dq_t}{dt} = k(q_e - q_t)^2 \quad (2.7)$$

di mana k adalah konstanta kinetika adsorpsi (g/mg.menit). Integrasi persamaan tersebut untuk kondisi batas $t = 0$ hingga $t = t$ dan $q_t = q_t$ memberikan hasil:

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + kt \quad (2.8)$$

atau

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2.9)$$

Plot $\frac{t}{q_t}$ terhadap t merupakan kurva linier dengan slope = $\frac{1}{q_e}$ dan intersep $\frac{1}{kq_e^2}$ (Munawar, 2012).

2.4 Timbal (Pb)

Timbal (Pb) merupakan unsur golongan 14 pada tabel periodik dan memiliki sifat kelogaman yang paling besar dalam golongan ini. Unsur ini memiliki nomor atom 82, massa atom 207, bentuk oksidasinya +2 dan +4 serta memiliki 4 isotop alami (^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb). Isotop ^{208}Pb merupakan yang paling melimpah, yakni 52% dari massa total. Timbal merupakan logam yang

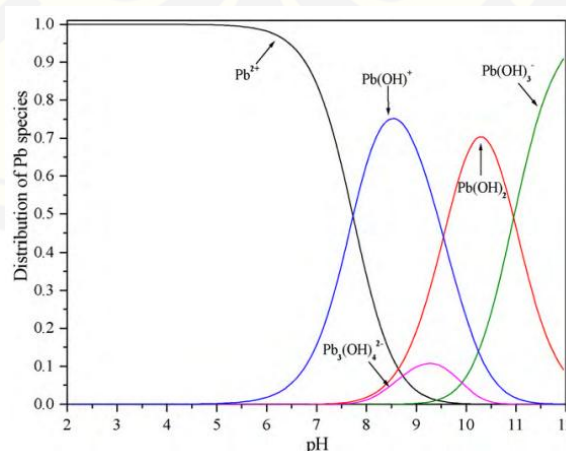
unik dikarenakan kemudahannya untuk diekstrak sebagai logam (Greenwood dan Earnshaw, 1984). Tabel 2.4 menunjukkan beberapa sifat yang dimiliki timbal.

Tabel 2.4 Sifat Fisik dan Kimia Timbal

Sifat Fisik	Keterangan
Wujud	Padatan
Nomor Atom	82
Densitas (g/cm^3)	11,34
Konfigurasi elektron	$[\text{Ar}] 4s^2 3d^9$
Titik lebur ($^{\circ}\text{C}$)	327,46
Titik didih ($^{\circ}\text{C}$)	1.749
Kalor peleburan (kJ/mol)	4,77
Kalor penguapan (kJ/mol)	179,5
Kapasitas pada 25°C ($\text{J}/\text{mol.K}$)	26,65
Bilangan oksidasi	+2 dan +4
Elektronegatifitas (Skala Pauling)	2,33
Energi ionisasi 1 (kJ/mol)	715,6
Energi ionisasi 2 (kJ/mol)	1450,5
Energi Ionisasi 3 (kJ/mol)	3081,5
Jari-jari atom (pm)	175
Jari-jari kovalen (pm)	146
Jari-jari van der waals (pm)	202

(Sumber: Greenwood dan Earnshaw, 1984).

Timbal merupakan salah satu logam yang bersifat toksik meskipun dalam jumlah sedikit dan biasanya ditemukan dalam limbah cair (Johns, 1998). Gambar 2.4 menunjukkan diagram spesi Pb^{2+} di larutan dalam fungsi pH. Berdasarkan Gambar 2.3, spesi Pb^{2+} dominan terbentuk pada pH di bawah 6 kemudian diikuti oleh pembentukan $\text{Pb}(\text{OH})_2$ dan PbOH^+ (spesi terlarut).



Gambar 2.4 Spesi timbal sebagai fungsi pH (Yang *et al.*, 2010).

Timbal selain berada dalam lingkungan perairan sebagai Pb^{2+} di bawah pH 6, namun juga dapat membentuk kompleks dengan anion organik seperti klorida dan hidroksida. Timbal sangat sedikit larut atau tidak larut sama sekali terhadap pelarut sulfida, sulfat, hidroksi karbonat, dan anion fosfat. Konsentrasi timbal meningkat signifikan seiring dengan rendahnya alkalinitas dan pH air. Konsentrasi rata-rata timbal pada sungai adalah 150 mg kg^{-1} dan 35% dari jumlah tersebut berada dalam fraksi pasir yang berasosiasi dengan kaolinit dan mika (Song *et al.*, 1999).

Fan (2017) melakukan penelitian tentang kompetisi adsorpsi antara Pb^{2+} dan Cu^{2+} menggunakan kitosan/ $CoFe_2O_4$ yang termodifikasi TEPA. Berdasarkan penelitian diketahui bahwa kapasitas adsorpsi Pb^{2+} ($103,210 \text{ mg/g}$) dan Cu^{2+} ($94,800 \text{ mg/g}$) pada sistem campuran dan lebih kecil dibandingkan dengan sistem tunggalnya ($Pb^{2+} = 148,800 \text{ mg/g}$ dan $Cu^{2+} = 130,642 \text{ mg/g}$). Hal ini dikarenakan adanya kompetisi antara Pb^{2+} dan Cu^{2+} pada gugus aktif adsorben. Kapasitas adsorpsi Cu^{2+} lebih tinggi dibandingkan Pb^{2+} dikarenakan Cu^{2+} memiliki afinitas yang lebih besar untuk berikatan dengan sisi ikat adsorben. Cu^{2+} lebih kompetitif dibandingkan Pb^{2+} dalam sistem campuran. Pada pH 4-5, adsorpsi Cu^{2+} baik sistem tunggal maupun sistem campurannya lebih rendah dari pada Pb^{2+} , sedangkan pada pH 6 lebih tinggi dari Pb^{2+} . Peningkatan kapasitas adsorpsi pada pH yang lebih tinggi dikarenakan reaksi protonasi yang lemah serta lebih banyak situs ikat yang tersedia untuk adsorpsi Pb^{2+} dan Cu^{2+} .

2.5 Tembaga (Cu)

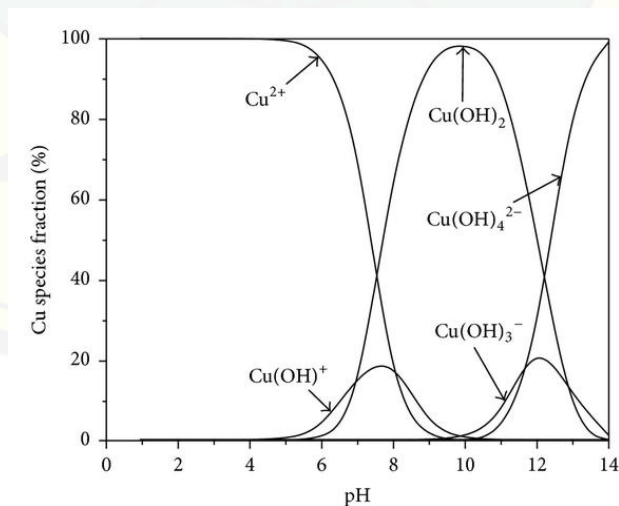
Tembaga memiliki nomor atom 29, nomor massa 63, bentuk oksidasi utamanya adalah +1 dan +2, 2 isotop alami ^{63}Cu dan ^{65}Cu dengan kelimpahan 69,17% dan 30,83%. Disamping kesamaan dalam struktur elektronik, terdapat beberapa kemiripan antara ketiga unsur dalam golongan ke-11 ini meskipun beberapa kompleks Cu^{2+} dan Ag^{2+} bersifat isomorf (Cotton and Wilkinson, 1972). Sifat fisik dan kimia tembaga ditunjukkan oleh Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Sifat Fisik dan Kimia Tembaga

Sifat Fisik	Keterangan
Wujud	Padat
Nomor Atom	29
Densitas (g/cm ³)	8,94
Konfigurasi elektron	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹
Titik lebur (°C)	1084,62
Titik didih (°C)	2562
Kalor peleburan (kJ/mol)	13,26
Kalor penguapan (kJ/mol)	300,4
Kapasitas kalor (J.mol ⁻¹ K ⁻¹)	24.440
Bilangan oksidasi	+1, +2, +3, +4
Elektronegativitas (Skala Pauling)	1,90
Energi ionisasi 1 (kJ/mol)	754,5
Energi ionisasi 2 (kJ/mol)	1957,9
Energi Ionisasi 3 (kJ/mol)	3555
Jari-jari atom (pm)	128
Jari-jari kovalen (pm)	132±4
Jari-jari van der waals (pm)	140

(Sumber: Greenwood dan Earnshaw, 1984).

Yang (2015) melakukan penelitian tentang adsorpsi Cu dengan pirit dan mempelajari efeknya pada flotasi. Adsorpsi Cu pada pirit bergantung pada pH. Adsorpsi pada pH basa lebih tinggi dibandingkan saat pH asam. Hal ini dipengaruhi oleh interaksi yang kuat antara O pada Cu(OH)₂ dan atom Fe pada permukaan. Diagram distribusi dari logam Cu yang diperoleh dirangkum dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram distribusi spesi tembaga sebagai fungsi pH (Yang *et al.*, 2015).

Tembaga dalam bentuk teroksidasi berada dalam kondisi asam, terutama pada *range* pH 5,0-6,0. Bentuk teroksidasi Cu^{2+} merupakan bentuk yang paling banyak ditemui. Tembaga, timah, dan timbal sering berikatan membentuk fraksi sedimen kasar, namun tembaga lebih mudah larut sehingga terbawa ke hilir oleh aliran air. Kopresipitasi Cu dan Zn terjadi dengan adanya oksida Fe hidrat (Lottermoser *et al.*, 1999).

Gandhi dan Meenakshi (2012) melakukan penelitian tentang penghilangan Cu^{2+} dan Pb^{2+} menggunakan silika gel/kitosan (SiCS) dan diperoleh data kapasitas adsorpsi SiCS terhadap Cu^{2+} dan Pb^{2+} berturut-turut 700 mg/g dan 202 mg/g. Kapasitas adsorpsi Cu^{2+} dan Pb^{2+} padahal pada sistem tunggalnya sebesar 870 mg/g dan 316 mg/g. Selektivitas Cu^{2+} lebih besar daripada Pb^{2+} dikarenakan Cu^{2+} memiliki jari-jari *Van der Waals* (0,128) yang lebih kecil dibandingkan Pb^{2+} (0,152).

Ion tembaga terikat sangat kuat baik pada *site exchange* organik maupun anorganik. Semua mineral tanah dapat mengadsorp ion tembaga dari larutan, dan sifat tersebut bergantung pada muatan permukaan dari adsorben. Muatan permukaan sangat dipengaruhi oleh pH sehingga penyerapan ion tembaga merupakan fungsi pH (Kabata-Pendias, 2001).

2.6 Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)

Spektroskopi Serapan Atom (SSA) merupakan teknik pengukuran kuantitas elemen kimia dalam suatu sistem sampel dengan mengukur radiasi yang diabsorpsi oleh elemen yang diukur. Analisis dilakukan dengan membaca spektra yang dihasilkan ketika sampel tereksitasi. Atom mengabsorpsi sinar UV atau sinar tampak dan bertransisi menuju level energi yang lebih tinggi. Metode AAS mengukur jumlah energi dalam bentuk foton yang terabsorpsi oleh sampel (Garcia, 2012).

Detektor mengukur panjang gelombang dari cahaya yang ditransmisikan oleh sampel dan membandingkannya dengan panjang gelombang yang melewati sampel. Sinyal prosesor kemudian mengintegrasikan perubahan panjang gelombang dan muncul dalam pembacaan sebagai puncak energi adsorpsi pada

panjang gelombang tertentu. Energi yang dibutuhkan elektron untuk meninggalkan atom disebut energi ionisasi dan spesifik untuk masing-masing unsur. Ketika elektron berpindah dari suatu level energi menuju level energi lainnya, foton akan diemisikan dengan energi E. Atom suatu elemen mengemisikan garis spektra yang spesifik. Setiap atom memiliki pola panjang gelombang tertentu dimana atom tersebut akan mengadsorp energi dan didasarkan pada konfigurasi elektron pada kulit terluarnya (Garcia, 2012). Konsentrasi dihitung berdasarkan hukum Lambert-Beer:

$$\text{Log } \frac{I_t}{I_0} = a \cdot b \cdot c \quad (2.10)$$

di mana:

A = absorbansi

I_0 = intensitas sinar mula-mula

I_t = intensitas sinar yang diteruskan

a = absortivitas

b = panjang jalan sinar

c = konsentrasi atom yang mengabsorpsi sinar

(Day dan Underwood, 1989).

Absorbansi sebanding dengan konsentrasi analit yang diabsorb pada suatu kondisi tertentu. Konsentrasi ditentukan dengan membuat kurva kalibrasi menggunakan larutan standar yang telah diketahui konsentrasinya (Garcia, 2012).

1.7 Spektrofotometri *Fourier Transform-Infra Red* (FT-IR)

Spektrofotometri *Fourier Transform-Infra Red* (FT-IR) merupakan pengembangan sistem optik dari Spektroskopi IR. Spektroskopi IR sendiri merupakan metode untuk mengamati interaksi molekul menggunakan radiasi elektromagnetik. Dasar pemikiran FT-IR adalah deret persamaan gelombang yang dirumuskan oleh **Jean Baptiste Fourier** (1768-1830). Deret persamaan gelombang yang dirumuskan adalah sebagai berikut:

$$a_0 + a_1 \text{Cos } \omega t + b_1 \text{Sin } \omega t + a_2 \text{Cos } 2 \omega t + b_2 \text{Sin } \omega t \quad (2.11)$$

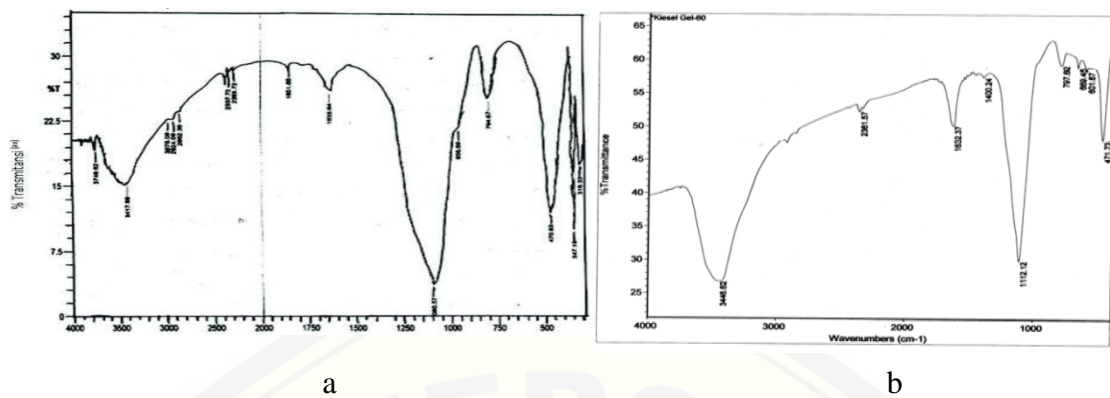
di mana a dan b adalah suatu bilangan, t adalah waktu, ω adalah frekuensi sudut (radian/detik). Berdasarkan deret tersebut dapat diketahui bahwa instensitas

gelombang dapat digambarkan ranah waktu (*time domain*) atau ranah frekuensi (*frequency domain*). Perubahan gambaran intensitas gelombang radiasi elektromagnetik dari ranah waktu ke ranah frekuensi atau sebaliknya disebut *Fourier Transform* (Mulja dan Suharman, 1995).

Prinsip dasar pada alat ini sama dengan Spektrofotometer IR, yaitu interaksi antara vibrasi atom-atom yang berikatan atau gugus fungsi dalam molekul yang dapat mengadsorpsi radiasi gelombang elektromagnetik inframerah. Inframerah memiliki daerah radiasi pada bilangan gelombang 12800-10 cm^{-1} . Daerah radiasi inframerah terbagi dalam daerah inframerah dekat (12800-4000 cm^{-1}), daerah inframerah tengah (4000-200 cm^{-1}), daerah inframerah jauh (200-10 cm^{-1}). Daerah yang paling banyak digunakan untuk berbagai keperluan adalah 4000-690 cm^{-1} , daerah ini biasa disebut sebagai daerah inframerah tengah (Khopkar, 2008).

Menurut Mar'atus dan Saputro (2014) bahwa silika dari abu sekam padi menunjukkan adanya gugus fungsi yang sama dengan silika Kiesel Gel 60. Puncak utama gugus silika adalah 3417,86 cm^{-1} yang merupakan puncak khas vibrasi ulur gugus -OH (gugus hidroksil) dari silanol. Vibrasi ulur Si-O dari Si-OH berada pada pita serapan 1635,64 cm^{-1} . Gugus alkil CH_3 menunjukkan pita serapan pada 2978,09 cm^{-1} sedangkan gugus alkil CH_2 menunjukkan pita serapan 2924,09 cm^{-1} . Puncak kedua dengan pita serapan kuat dan lebar pada 1095,57 cm^{-1} diyakini menunjukkan gugus fungsi silika menunjukkan vibrasi rentangan asimetrik Si-O dari siloksan (Si-O-Si). Vibrasi rentangan Si-O dari Silanol (Si-OH) ditunjukkan oleh pita serapan 956,69 cm^{-1} . Terdapat puncak 794,67 cm^{-1} yang muncul akibat deformasi ikatan Si-O pada SiO_4 . Gugus fungsi Si-O-Si diperkuat dengan adanya puncak yang menunjukkan ikatan Si-O pada bilangan gelombang 470,63 cm^{-1} .

Silika Kiesel Gel 60 (KG60) muncul pada bilangan gelombang 3448,5 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya vibrasi -OH dari Si-OH. Serapan lebar dan tajam pada 1101,3 cm^{-1} mengindikasikan adanya vibrasi ulur simetri Si-O dari Si-O-Si dan pada 1637,5 cm^{-1} mengindikasikan vibrasi ulur Si-O dari Si-OH. Vibrasi ulur simetri Si-O dari Si-O-Si ditunjukkan pada pita serapan 800,4 cm^{-1} . Hasil karakterisasi silika gel dengan FTIR ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. (a) Spektra inframerah silika gel hasil sintesis (Mar'atus dan Saputro, 2012);
(b) Spektra inframerah Kiesel Gel 60G (Nur'aini, 2012)

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Maret hingga Agustus 2017 di Laboratorium Kimia Anorganik, Laboratorium Kimia Dasar, Laboratorium Kimia Organik, Laboratorium Instrumen, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, serta Laboratorium Tanah Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember. Karakterisasi FTIR dilakukan di Laboratorium FMIPA ITS.

3.2 Alat dan Bahan

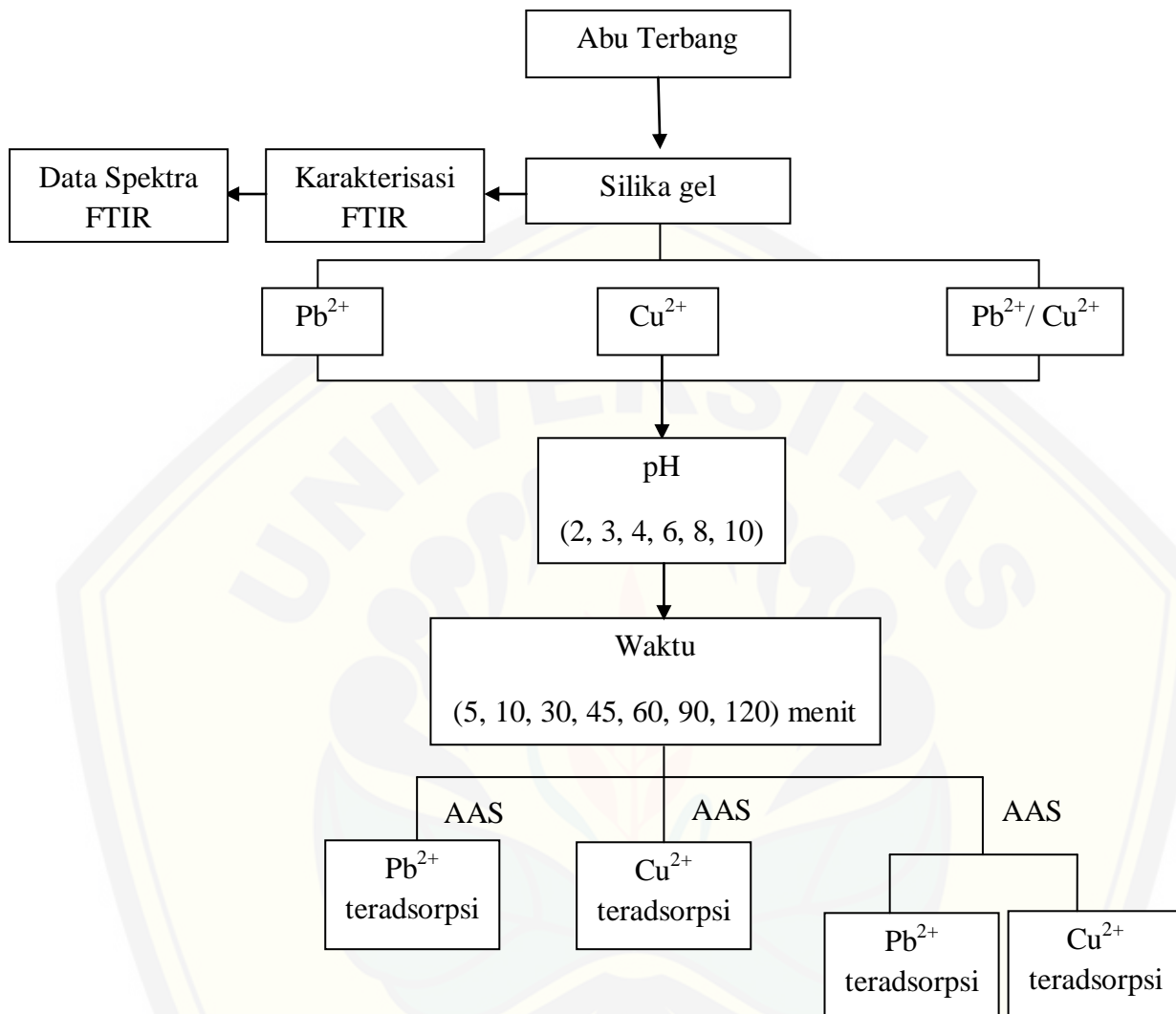
3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas kimia, gelas ukur, labu ukur, pipet mohr, pipet volume, Erlenmeyer, kondensor, labu alas bulat, termometer, stirer magnetik dan pemanas listrik (Lab. Companion HP-3000), oven (Mettler), neraca analitik (*Ohaus Analytical Plus*), *furnace*, pH meter (Jenway 3505), gelas arloji, mortar, cawan porselin, *ball* pipet, ayakan ukuran 200 mesh, set alat AAS (*Atomic Absorption Spectrometry*), alat penggocang (*shaker*).

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi abu terbang (*fly ash*) dari PLTU Paiton-Probolinggo, akuades, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, NaOH (Merck, 99%), HCl (Merck, 37%), H_2SO_4 (Merck, 98%), indikator pH universal, kertas saring biasa, kertas saring *whatman* no. 41.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Pembuatan Larutan Pereaksi

a. Pembuatan Larutan NaOH 3 M

Larutan NaOH 3 M dibuat dengan cara menimbang NaOH sebanyak 60 gram, kemudian dimasukkan ke dalam gelas kimia 250 mL yang berisi sedikit akuades. NaOH yang telah dilarutkan kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL dan ditambah akuades hingga tanda batas. Labu ukur dikocok perlahan agar larutan menjadi homogen.

b. Pembuatan Larutan HCl 1 M

Larutan HCl 1 M dibuat dengan mengambil 41,5 mL HCl 37% (12 M), kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL yang telah berisi sedikit akuades. Kemudian ditambah akuades hingga tanda batas dan dikocok agar larutan homogen.

c. Pembuatan Larutan H₂SO₄ 2 M

Larutan H₂SO₄ 2 M dibuat dengan mengambil 54,3 mL H₂SO₄ 98% (18 M), kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL yang telah berisi akuades. Larutan kemudian ditambah akuades hingga tanda batas. Labu ukur dikocok perlahan agar larutan homogen.

d. Pembuatan Larutan Induk Pb(NO₃)₂ 1000 ppm

Larutan induk Pb(NO₃)₂ 1000 ppm disiapkan dengan cara melarutkan 0,8 gram Pb(NO₃)₂ dengan sedikit akuades pada gelas kimia 250 mL. Larutan kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda batas.

e. Pembuatan Larutan Induk Cu(NO₃)₂.3H₂O 1000 ppm

Larutan induk Cu(NO₃)₂.3H₂O 1000 ppm disiapkan dengan cara melarutkan 1,85 gram Cu(NO₃)₂.3H₂O dengan sedikit akuades pada gelas kimia 250 mL. Larutan kemudian dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda batas.

f. Pembuatan Larutan Sampel Pb(NO₃)₂ 200 ppm

Larutan standar Pb(NO₃)₂ 200 ppm disiapkan dengan cara mengambil 100 mL Pb(NO₃)₂ 1000 ppm dan dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL. Larutan kemudian ditambahkan akuades hingga tanda batas.

g. Pembuatan Larutan Sampel Cu(NO₃)₂.3H₂O 200 ppm

Larutan induk Cu(NO₃)₂.3H₂O 200 ppm disiapkan dengan cara mengambil 100 mL Cu(NO₃)₂.3H₂O 1000 ppm dan dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL. Larutan kemudian ditambahkan akuades hingga tanda batas.

3.4.2 Preparasi Sampel

Sampel abu terbang (*fly ash*) ditimbang sebanyak 70 gram dan direndam dalam air panas 400 mL selama 2 jam sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Campuran *fly ash* dan air didekantasi, diambil filtratnya, dioven pada suhu 60°C selama 24 jam, kemudian dihaluskan dengan alu dan mortar. *Fly ash* diambil sebanyak 40 gram kemudian diasamkan dengan H₂SO₄ 2 M sebanyak 200 mL untuk menghilangkan pengotor dan oksida-oksida logam yang tidak larut dalam air. Larutan sampel kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam kemudian disaring dengan corong *Buchner* menggunakan kertas saring *whatman* No. 41. Sebelum digunakan, kertas saring dioven selama 15 menit, ditimbang, dan dicatat massanya. Residu dinetralkan dengan cara dibilas menggunakan akuades berulang kali sampai diperoleh filtrat netral (pH diukur menggunakan indikator pH universal). Residu dikeringkan di dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam. Endapan kemudian ditimbang massanya (Andriana, 2016).

3.4.3 Pembuatan Silika Gel

Sampel (*fly ash*) yang telah dipreparasi ditimbang sebanyak 10 gram dan dicampur dengan 120 mL NaOH 3M. Campuran direfluks selama 1 jam pada suhu 90°C sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Campuran kemudian disaring dengan corong dan kertas saring serta filtrat (Na₂SiO₃) yang diperoleh ditampung dalam gelas beker. Silika diendapkan dengan cara ditambahkan larutan HCl 1 M ke dalam filtrat tetes demi tetes sambil diaduk dengan *stirrer magnetic* hingga pembentukan endapan silika berhenti (rentang pH 6,5-7) (pH diukur menggunakan indikator pH universal). Larutan didiamkan selama 18 jam dalam suhu ruang. Endapan disaring dan dibilas menggunakan akuades untuk menghilangkan kelebihan asam. Silika yang diperoleh selanjutnya dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 8 jam. Silika gel ditimbang massanya kemudian digerus menggunakan alu dan mortar, lalu diayak menggunakan ayakan 200 mesh. Silika kemudian dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 4 jam dalam *furnace* dan disimpan dalam desikator (Andriana, 2016).

3.4.4 Karakterisasi Silika Gel dengan FTIR

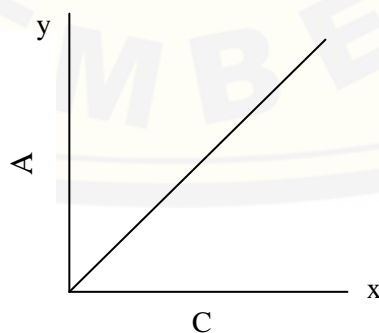
Silika gel yang sudah halus ditimbang sebanyak 0,001 gram. Sampel ditambahkan KBr dengan perbandingan 1:9 gram kedalam *mortar* dan diaduk hingga rata. Disiapkan cetakan *pellet* dan dicuci bagian sampel, *base*, dan *table frame* menggunakan kloroform. Sampel KBr yang telah dicampur dimasukkan kedalam set cetakan *pellet*, diletakkan cetakan pada pompa hidrolik dan diberi tekanan sebesar 8 *gauge*. *Pellet* KBr yang telah terbentuk dilepaskan dan ditempatkan pada *table holder*. Sampel dianalisis dengan FTIR untuk mengetahui gugus fungsinya pada bilangan gelombang 400 cm^{-1} - 4000 cm^{-1} (Andriana, 2016).

3.4.5 Uji Adsorpsi Silika Gel

a. Pembuatan Kurva Kalibrasi

Larutan induk $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1000 ppm terlebih dahulu diencerkan menjadi 10 ppm dengan cara diambil sebanyak 1 mL dan diencerkan dengan akuades pada labu 100 mL. Konsentrasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ppm dibuat dengan cara mengambil larutan 10 ppm sebanyak 1 mL, 2 mL, 3 mL, 4 mL, 5 mL, 6 mL, 7 mL, 8 mL, 9 mL, dan 10 mL dan ditambahkan akuades hingga tanda batas. Masing-masing konsentrasi diukur absorbansinya dengan AAS, dicatat dan dibuat kurva kalibrasi konsentrasi vs absorbansi untuk mendapatkan persamaan regresi liniernya:

$$y = mx + c \quad (3.1)$$



di mana:

y = absorbansi

m = slope atau kemiringan dari kurva kalibrasi

x = konsentrasi

c = intersep atau perpotongan terhadap sumbu y

b. Uji Adsorpsi Silika Terhadap Larutan Pb, Cu, dan Campuran Pb/Cu pada Variasi pH Sistem

Uji adsorpsi silika terhadap Pb dan Cu dilakukan dengan mencampurkan 200 ppm larutan Pb dan 200 ppm larutan Cu masing-masing sebanyak 25 mL (1:1) kedalam erlenmeyer (Fan *et al.*, 2017). pH sistem campuran awal diukur menggunakan pH meter. Larutan campuran kemudian kondisikan pH dengan variasi pH 2, 3, 4, 6, 8 dan 10. pH asam diperoleh dengan menambahkan tetes demi tetes HCl sedangkan untuk mendapatkan pH basa maka ditambahkan tetes demi tetes NaOH sampai pH dari larutan sesuai dengan yang diinginkan. Tujuan dilakukan variasi pH sistem adalah untuk membentuk muatan negatif dan muatan positif pada permukaan silika gel sehingga dapat meningkatkan nilai kapasitas adsorpsi. Silika gel sebanyak 100 mg ditambahkan kedalam campuran kemudian *dishaker* dengan kecepatan 120 rpm selama 60 menit. Larutan kemudian difiltrasi dengan kertas saring *Whatman* No. 41 dan filtrat diencerkan hingga 50 kalinya (Rofi'ah, 2016). Konsentrasi Pb dan Cu ditentukan dengan menggunakan AAS. Masing-masing pH sistem dilakukan tiga kali pengulangan (triplo). Data hasil pengukuran dengan AAS disusun dalam bentuk Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi pH Sistem

pH	Pengulangan	Absorbansi	[C] sisa	[C] terserap
2				
3				
4				
6				
8				
10				

Keterangan: $[C]_{\text{terserap}} = [C]_{\text{mula-mula}} - [C]_{\text{sisa}}$

c. Uji Adsorpsi Silika Terhadap Larutan Pb, Cu, dan Campuran Pb dan Cu pada Variasi Waktu

Uji adsorpsi silika terhadap Pb dan Cu dilakukan dengan mencampurkan 200 ppm larutan Pb dan 200 ppm larutan Cu masing-masing sebanyak 25 mL (1:1) kedalam erlenmeyer (Fan *et al.*, 2017). pH sistem campuran awal diukur menggunakan pH meter. pH sistem dikondisikan pada pH optimal berdasarkan percobaan sebelumnya, yakni pH 4 dan 6. Silika gel sebanyak 100 mg ditambahkan kedalam campuran kemudian *dishaker* dengan kecepatan 120 rpm dan dengan variasi waktu kontak 5, 10, 30, 45, 60, 90, dan 120 menit. Setelah proses adsorpsi selesai, larutan di filtrasi dengan kertas saring *Whatman* No. 41 dan filtrat diencerkan hingga 50 kalinya. Filtrat diukur absorbansinya menggunakan AAS. Masing-masing variasi waktu kontak adsorpsi dilakukan tiga kali pengulangan (triplo). Data hasil pengukuran dengan AAS disusun dalam bentuk Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variasi Waktu Kontak Sistem

Waktu Kontak	Pengulangan	Absorbansi	Kemampuan adsorpsi/waktu
5			
10			
30			
45			
60			
90			
120			

3.5 Analisis Data

3.5.1 Kemampuan Adsorpsi

Kemampuan adsorpsi ion logam oleh silika gel dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$q = \frac{(C_0 - C_f)V}{m} \quad (3.2)$$

di mana:

q = kemampuan adsorpsi (mg/g)

C_0 = konsentrasi awal larutan logam (mg/L)

C_f = konsentrasi akhir larutan logam setelah adsorpsi (mg/g)

V = volume larutan logam (L)

m = massa silika gel (g)

(Fan *et al.*, 2017).

3.5.2 Model Kinetika Adsorpsi pada Proses Adsorpsi Pb dengan adanya kompetitor Cu

Kinetika adsorpsi sistem dapat dianalisis dengan menggunakan 2 jenis orde, yaitu pseudo orde 1 dan pseudo orde 2.

Persamaan pseudo orde 1 adalah sebagai berikut:

$$\text{Log } (q_e - q_t) = \text{log} q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad (3.3)$$

Persamaan pseudo orde 2 adalah sebagai berikut:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3.4)$$

di mana:

q_e = kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan (mg g^{-1})

q_t = kapasitas adsorpsi pada waktu tertentu (mg g^{-1})

k_1 = konstanta laju pseudo orde 1 (menit^{-1})

k_2 = konstanta laju pseudo orde 2 ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)

t = waktu kontak (menit)

(Munawar, 2012).

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. pH optimum adsorpsi Pb pada sistem tunggal dan campuran terjadi pada pH 6 dengan nilai 64,814 mg/L dan 33,333 mg/L atau menurun sebanyak 48,57% dibandingkan sistem tunggalnya.
2. Waktu optimum Pb berada pada menit ke-60 dengan serapan 60,317 mg/L dan 27,777 mg/L pada sistem tunggal dan campurannya. Kinetika adsorpsi Pb sistem campuran memiliki laju 6,4 kali lebih lambat dibandingkan sistem tunggalnya.

5.2 Saran

Perlu dilakukan variasi muatan dan konsentrasi adsorbat untuk mengetahui perilaku dan kapasitas adsorpsi maksimum silika gel terhadap adsorbat yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, J., J.N. Sahu, C.R.Mohanty, dan B.C. Meikap. 2009. Removal of Lead(II) from Wastewater by Activated Carbon Developed from Tamarind Wood by Zinc Chloride Activation, *Chem. Eng. J.* 149(1): 249–262.
- Alberty, R. A. 1997. *Physical Chemistry*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Andriana, N. 2016. Pemanfaatan Silika Gel berbasis Abu Terbang (*Fly Ash*) Batubara PLTU Paiton Probolinggo sebagai Adsorben Zat Warna Metilen Biru. *Skripsi*. Jember: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.
- Astuti, W. dan F.W. Mahatmanti. Aktivasi Abu Layang Batubara dan Aplikasinya sebagai Adsorben Timbal dalam Pengolahan Limbah Elektroplating. *Skripsi*. Semarang: Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
- Arami, M., N. Y. Limaee, N. M. Mahmoodi, dan N. S. Tabrizi. 2005. Removal of Dyes From Colored Textile Wastewater by Orange Peel Adsorbent: Equilibrium and Kinetic Studies. *Journal of Colloid and Interface Science*. 288(2): 371-376.
- Bansal, C.R. dan M.Goyal. 2005. *Activated Carbon Adsorption*. USA: CRC Press.
- Blissetts, R.S. dan R.A. Rowson. 2012. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*. 97(1):1–23.
- Bregna, H. 1994. *The Colloid Chemistry of Silica*. Washington DC: American Chemical Society.
- Chiron, N., R. Guilet, dan E. Deydier. Adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto A Grafted Silica: Isotherms and Kinetics Models. *Water Res.* 37: 3079–3086.
- Conrad, K. dan H.C.B. Hansen. 2007. Sorption of Zinc and Lead on Coir, *Bioresour. Technol.* 98:89–97.
- Cotton, F. A. dan G. Wilkinson. 1989. *Kimia Anorganik Dasar*. Jakarta : UI Press.
- Day, R.A. dan A.L. Underwood. 2001. *Analisis Kimia Kuantitatif*. Jakarta: Erlangga.

- Fahmiati, Nuryono, dan Narsito. 2006. Adsorption Thermodynamics of Cd(II), Ni(II), and Mg(II) on 3-Mercapto-1,2,4-Triazole Immobilized Silica Gel. *Indo. J. Chem.* 6 (1): 52 – 55.
- Fathonah, R., L. Mahardiani, dan J.S. Sukardjo. 2012. Preparasi dan Aplikasi Silika Gel yang Bersumber dari Biomassa untuk Adsorpsi Logam Berat. *Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia IV*. 31 Maret 2012. Universitas Sebelas Maret: 82-88.
- Fan, C., K. Lia, J. Lia, D. Yinga, Y. Wanga, dan J. Jiaa. 2017. Comparative and Competitive Adsorption of Pb(II) and Cu(II) Using Tetraethylenepentamine Modified Chitosan/CoFe₂O₄ Particles. *J. Hazard. Mater.* 326: 211–220.
- Gandhi, M.R. dan S. Meenakshi. 2012. Preparation and Characterization of Silica Gel/Chitosan Composite for The Removal of Cu(II) and Pb(II). *Int. J. of Bio. Macromolecules*.20:650-657.
- Garcia, R., dan A.P. Baez. 2012. *Atomic Absorption Spectrometry (AAS)*. Mexico: UNAM Press.
- Greenwood, V. N. N., dan A. Earnshaw. 1984. *Chemistry of the Elements*. Oxford: Pergamon Press.
- Hadi, I., M. Arsa, dan I.W. Sudiarsa. 2013. Sintesis Silika Gel Dari Abu Sekam Padi dan Abu Limbah Pembakaran Batu-Bata Dengan Metode Presipitasi. *J. Chem.* 7 (1): 31 -38.
- Iler, R. K. 1978. *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid, and Surface Properties, and Biochemistry*. New York: John Wiley And Sons Inc.
- Kabata-Pendias, G. 2001. *Trace Elements in Soils and Plants Third Edition*. USA: CRC Press.
- Keller, J.U. dan S. Reiner. 2005. *Gas Adsorption Equilibria; Experimental Methods and Adsorptive Isotherms*. Boston:Springer Science & Business Media, Inc.
- Khopkar. 2008. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- Kul, A.R. dan H. Koyuncu. 2010. Adsorption of Pb(II) Ions from Aqueous Solution by Native and Activated Bentonite: Kinetic, Equilibrium, and Thermodynamic Study. *J. Hazard. Mater.* 179:332–339.

- Kurniawati, P., B. Wiyantoko, A. Kurniawan, dan T.E. Purbaningtyas. 2013. Kinetic Study of Cr(VI) Adsorption on Hydrotalcite Mg/Al with Molar Ratio 2:1. *Jurnal Eksakta*. 13(1-2):11-12.
- Liu, T., X. Yang, Z.L. Wang, dan X. Yan. 2013. Enhanced Chitosan Beads-supported Fe⁰-nanoparticles for Removal of Heavy Metals From Electroplating Wastewater in Permeable Reactive Barriers. *Water Res.* 47(17):6691-6700.
- Lottermoser, B.G., P.M. Ashley, dan D.C. Lawie. 1999. Environmental Geochemistry of the Gulf Creek Copper Mine Area, North-Eastern New South Wales, Australia. *Environmental Geology*. 39(1):61-74.
- Mar'atus, I.S. dan A.N.C. Saputro. 2012. Preparasi Silika Gel Dari Abu Sekam Padi Sebagai Adsorben Logam Nikel (Ni) dalam Limbah Elektroplating. *Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia IV*. 31 Maret 2012. *Program Studi Pendidikan Kimia Jurusan PMIPA FKIP UNS*: 163-171.
- Martín-Lara, M.A., B.L. Azquez, M.C. Trujillo, A. Perez, dan M. Calero. 2014. New Treatment of Real Electroplating Wastewater Containing Heavy Metal Ions by Adsorption onto Olive Stone. *Journal of Cleaner Production* 81. 120-129.
- Melichová, Z. dan L. Hromada. 2012. Adsorption of Pb²⁺ and Cu²⁺ Ions from Aqueous Solutions on Natural Bentonite. *Pol. J. Environ. Stud.* 22(2): 457-464.
- Mouflih, M., A. Aklil, dan S. Sebti. 2005. Removal of Lead From Aqueous Solutions by Activated Phosphate. *J. Hazard. Mater.* 119: 183–188.
- Mulja, M. dan Suharman. 1995. *Analisis Instrumental*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Munawar, 2012. Kinetika Sorpsi Ion Zink(II) pada Partikel Gambut. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan PKM: Sains, Teknologi, dan Kesehatan. Politeknik Negeri Lhokseumawe Press*. 3(1):233-240.
- Niu, Y., Y. Qu, C. Sun, C. Wang, H. Chen, C. Ji, Y. Zhang, X. Shao, dan F. Bu. 2013. Adsorption of Pb(II) from Aqueous Solution by Silica-Gel Supported. *J. Hazard. Mater.* 276– 286.
- Nugraha, P dan Antoni. 2007. *Teknologi Beton dari Material, Pembuatan Beton Kinerja Tinggi*. Yogyakarta: C.V Andi Offset.

- Nur'aini, A. 2012. Sintesis Silika Gel Dari Abu Dasar Batubara dan Uji Adsorpsi terhadap Rhodamin B. *Skripsi*. Yogyakarta: Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
- Oscik, J. 1982. *Adsorption*. New York: Horwood Chichester.
- Page, A.L., A.A. Elseewi, dan I.R. Straughan. 1979. *Physical and Chemical Properties of Fly Ash from Coal Fired Power Plants with References to Environmental Impacts*. New York: Springer-Verlag, Inc.
- Paiton, PJB. 2002. *Material Safety Data Sheet*. Probolinggo : PT. Pembangunan Jawa Bali Unit Pembangunan Paiton.
- Rofiah, F. 2016. Adsorpsi Zat Warna Indigo Carmine Menggunakan Silika Gel Berbasis Fly Ash Batu Bara Terimpregnasi Aluminium. *Skripsi*. Jember: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.
- Salmani, M.H., M.H. Ehrampoush, S. Sheikhalishahi, M. Dehvari. 2012. Removing Copper from Contaminated Water Using Activated Carbon Sorbent by Continuous Flow. *Journal of Health Researches*. 1(1): 11-18.
- Scott, R.P.W. 1993. *Silica Gel and Bonded Phases*. Inggris: Willey & Sons Ltd.
- Song, Y., M.J. Wilson, H.S. Moon, J.R. Bacon, D.C. Bain. 1999. Chemical and Mineralogical Forms of Lead, Zinc, and Cadmium in Particle Size Fractions of Some Wastes, Sediments and Soils in Korea. *Appl. Geochem.* 14:621–633.
- Sriyanti, Taslimah, Nuryono, dan Narsito. 2005. Pengaruh Keasaman Medium dan Imobilisasi Gugus Organik pada Karakter Silika Gel dari Abu Sekam Padi. *JSKA*. 8(3).
- Sukardjo. 1985. *Kimia Fisika*. Yogyakarta: Bina Aksara.
- Suprihatin, E., T.A. Zaharah, dan N. Wahyuni. 2015. Pembuatan Membran Silika dari Fly Ash dan Aplikasinya untuk Menurunkan Kadar COD dan BOD Limbah Cair Kelapa Sawit. *JKK*. 4(3):48-53.
- Tampubolon, F.F., E.S. Purwanti, dan H. Fansuri, H. 2016. Pengaruh Amobilisasi Kation Cu^{2+} dan Pb^{2+} terhadap Kuat Tekan dan Ketahanan Asam pada Geopolimer Abu Layang. *Jurnal Sains dan Seni*. 4(2):2337-3520.
- Tighadouini, S., S. Radi, M. E. Massaoudi, M. Bacquet, dan M. Zagheroui. 2015. Adsorption of Cu(II) onto Novel Silica Gel-Immobilized Bithiophene Tripodal Receptor. *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (5):1457-146.

- Unuabonah, E.I., K.O. Adebowale, B.I. Olu-Owolabi, L.Z. Yang, dan L.X. Kong. 2008. Adsorption of Pb(II) and Cd(II) from Aqueous Solutions onto Sodium Tetraborate-Modified Kaolinite Clay: Equilibrium and Thermodynamic Studies. *Hydrometallurgy*. 93:1–9.
- Wang, L., X. Xiong, Z. Fan, G. Zhang, dan Z. Wang. 2013. Advanced Treatment of Electroplating Wastewater by Nanofiltration Membrane Technology. *Appl. Mech. Mater.* 378:318-321.
- WHO. 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality-4th ed.* Geneva: WHO Press.
- Wu, X., L. Luo, Z. Chen, dan K. Liang. 2015. Syntheses, Characterization and Adsorption Properties for Pb²⁺ of Silica-Gel Functionalized by Dendrimer-Like Polyamidoamine and 5-Sulfosalicylic Acid. *Appl. Surf. Sci.* 364:86–95.
- Wu, S., C. Mou, dan H. Lin. Synthesis of Mesoporous Silica Nanoparticles. *Chem. Soc. Rev.* 42(9): 3649–4258.
- Xiao, Y., H. Liang, W. Chen, dan Z. Wang. 2013. Synthesis and Adsorption Behavior of Chitosan-coated MnFe₂O₄ Nanoparticles for Trace Heavy Metal Ions Removal. *Appl. Surf. Sci.* 285: 498-504.
- Yang, B., X. Tong, Z. Deng, X. Lv. 2015. The Adsorption of Cu Species onto Pyrite Surface and Its Effect on Pyrite Flotation. *J. of Chem.* 2016:1-7.
- Yang, S., D. Zhao, H. Zhang, dan X. Yu. 2010. Impact of Environmental Condition on The Sorption Behavior of Pb(II) in Na-bentonit Suspensions. *J. Hazard. Mater.* 183(1):632-640.
- Yuslee, E.M.F.D., Rahman, M.L., Arshad, S.E., 2015. Cu²⁺ dan Pb²⁺ Removal by Chemically Modified Silica Gel With Amidoxime. *ESTEEM Academic Journal*. 11:17-25.

LAMPIRAN

Lampiran 4.1. Perhitungan Preparasi Bahan

4.1.1 Pembuatan Larutan

a. Pembuatan Larutan NaOH 3 M

$$M = \frac{n \text{ (mol)}}{v \text{ (L)}}$$

$$M = \frac{(m/M_r)}{V}$$

$$M = \frac{\left(\frac{60 \text{ gram}}{40 \text{ gram/mol}}\right)}{0,5 \text{ L}}$$

$$M = \frac{1,5 \text{ mol}}{0,5 \text{ L}}$$

$$M = 3 \text{ M}$$

b. Pembuatan Larutan HCl 1 M

$$M = \frac{n(\text{mol})}{V(\text{L})}$$

$$M = \frac{\text{Massa}}{M_r} \times \frac{1}{V}$$

$$M = \frac{\text{Massa}}{M_r} \times \frac{1}{\frac{m}{\rho}}$$

$$M = \frac{\text{Massa}}{M_r} \times \frac{\rho}{m}$$

$$M = \frac{37 \text{ g}}{36,50 \text{ g/mol}} \times \frac{1,19 \text{ g/mL}}{100 \text{ g}}$$

$$M = \frac{44,03 \text{ mol}}{3650 \text{ mL}}$$

$$M = 12,06 \text{ mol/L}$$

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$41,5 \text{ mL} = \frac{M_2 \times 500 \text{ mL}}{12,06 \text{ M}}$$

$$\frac{41,5 \text{ mL} \times 12,06 \text{ M}}{500 \text{ mL}} = M_2$$

$$1 \text{ M} = M_2$$

c. Pembuatan Larutan H_2SO_4 2M

$$M = \frac{n(\text{mol})}{V(\text{L})}$$

$$M = \frac{\text{Massa}}{\text{Mr}} \times \frac{1}{V}$$

$$M = \frac{\text{Massa}}{\text{Mr}} \times \frac{1}{\frac{m}{\rho}}$$

$$M = \frac{\text{Massa}}{\text{Mr}} \times \frac{\rho}{m}$$

$$M = \frac{98 \text{ g}}{98 \text{ g/mol}} \times \frac{1,84 \text{ g/mL}}{100 \text{ g}}$$

$$M = \frac{180,32 \text{ mol}}{9800 \text{ mL}}$$

$$M = 18,4 \text{ mol/L}$$

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$54,4 \text{ mL} = \frac{M_2 \times 500 \text{ mL}}{18,4 \text{ M}}$$

$$\frac{54,4 \text{ mL} \times 18,4 \text{ M}}{500 \text{ mL}} = M_2$$

$$2 \text{ M} = M_2$$

d. Pembuatan Larutan Induk $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 1000 ppm

$$1000 \text{ ppm} = 1000 \text{ mg/L}$$

$$1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{\text{massa}}{V(\text{L})}$$

$$1 \frac{\text{g}}{\text{L}} = \frac{\text{massa}}{V(\text{L})}$$

$$\text{Massa Pb(II)} = 1 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Pb(II)} = \frac{m}{\text{Ar Pb}} = \frac{1 \text{ gram}}{207,19 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}} = 4,8 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa Pb(NO}_3)_2 &= \text{mol Pb(NO}_3)_2 \times \text{Mr Pb(NO}_3)_2 \\ &= 4,8 \times 10^{-3} \times 331,21 \text{ gram/mol} \\ &= 1,6 \text{ gram} \end{aligned}$$

e. Pembuatan Larutan Sampel Pb 200 ppm

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 1000 \text{ ppm} \times V_1 &= 200 \text{ ppm} \times 500 \text{ mL} \\ V_1 &= \frac{200 \text{ ppm} \times 500 \text{ mL}}{1000 \text{ ppm}} \\ V_1 &= 100 \text{ mL} \end{aligned}$$

f. Pembuatan Larutan Induk $\text{Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1000 ppm

$$1000 \text{ ppm} = 1000 \text{ mg/L}$$

$$1000 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{\text{massa}}{V \text{ (L)}}$$

$$1 \frac{\text{g}}{\text{L}} = \frac{\text{massa}}{V \text{ (L)}}$$

$$\text{Massa Cu(II)} = 1 \text{ gram}$$

$$\text{Mol Cu(II)} = \frac{m}{\text{Ar Cu}} = \frac{1 \text{ gram}}{63,5 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}} = 1,57 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} &= \text{mol Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} \times \text{Mr Cu(NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} \\ &= 1,57 \times 10^{-2} \times 241,5 \text{ gram/mol} \\ &= 3,79 \text{ gram} \end{aligned}$$

g. Pembuatan Larutan Sampel Cu 200 ppm

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 1000 \text{ ppm} \times V_1 &= 200 \text{ ppm} \times 500 \text{ mL} \\ V_1 &= \frac{200 \text{ ppm} \times 500 \text{ mL}}{1000 \text{ ppm}} \\ V_1 &= 100 \text{ mL} \end{aligned}$$

h. Pembuatan Larutan Standar untuk Kurva Kalibrasi

(a) Konsentrasi 1 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{1 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 0,25 \text{ mL}$$

(b) Konsentrasi 2 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{2 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 0,5 \text{ mL}$$

(c) Konsentrasi 3 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{3 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 0,75 \text{ mL}$$

(d) Konsentrasi 4 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{4 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 1,0 \text{ mL}$$

(e) Konsentrasi 5 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{5 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 1,25 \text{ mL}$$

(f) Konsentrasi 6 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{6 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 1,5 \text{ mL}$$

(7) Konsentrasi 7 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{7 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 1,75 \text{ mL}$$

(8) Konsentrasi 8 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{8 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 2,0 \text{ mL}$$

(9) Konsentrasi 9 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

(10) Konsentrasi 10 ppm

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

$$V_1 = \frac{9 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 2,25 \text{ mL}$$

$$V_1 = \frac{M_2 \times V_2}{M_1}$$

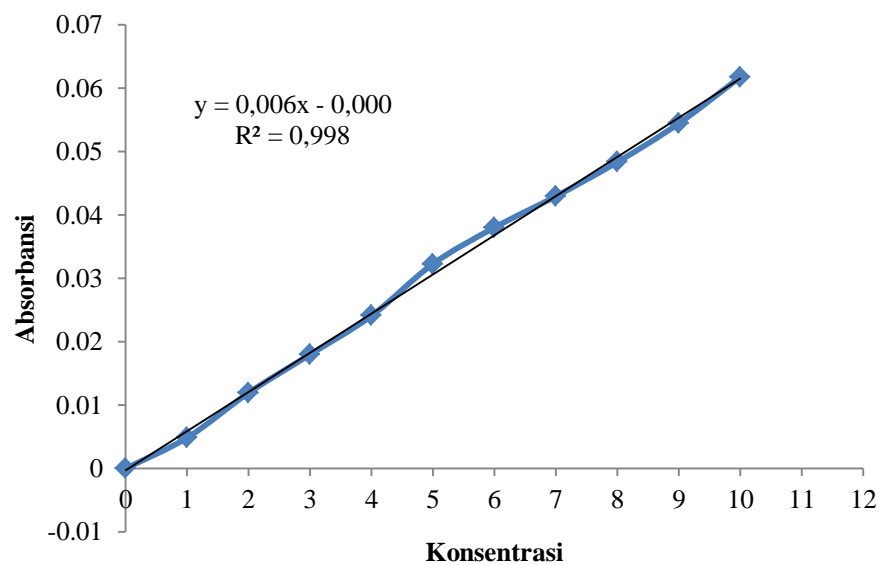
$$V_1 = \frac{10 \text{ ppm} \times 25 \text{ mL}}{100 \text{ M}}$$

$$V_1 = 2,5 \text{ mL}$$

Lampiran 4.2. Kurva Kalibrasi Larutan Standar Pb dan Cu

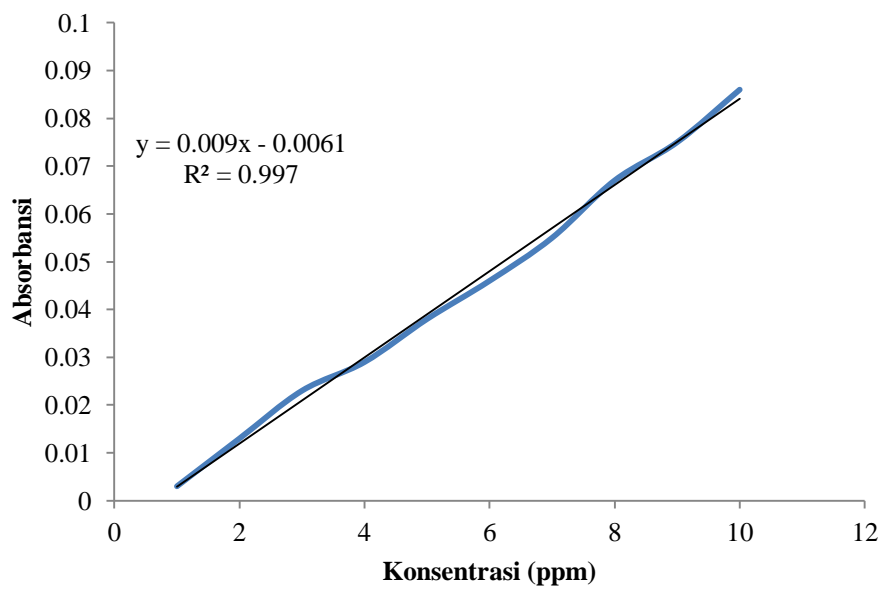
4.2.1 Kurva Kalibrasi Larutan Standar Pb

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi
0	0,000
1	0,005
2	0,012
3	0,018
4	0,024
5	0,032
6	0,038
7	0,043
8	0,048
9	0,054
10	0,062



4.2.2 Kurva Kalibrasi Larutan Standar Cu

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi
1	0,003
2	0,013
3	0,023
4	0,029
5	0,038
6	0,046
7	0,055
8	0,067
9	0,075
10	0,086



Lampiran 4.3. Penentuan Adsorpsi Larutan Cu oleh Silika Gel dengan Variasi pH pada Sistem Tunggal

- Penentuan Cu Awal

Konsentrasi	Abs	[Cu] awal	Pengenceran	[Cu] asli
100 ppm	0,013	2,111	50	105,556

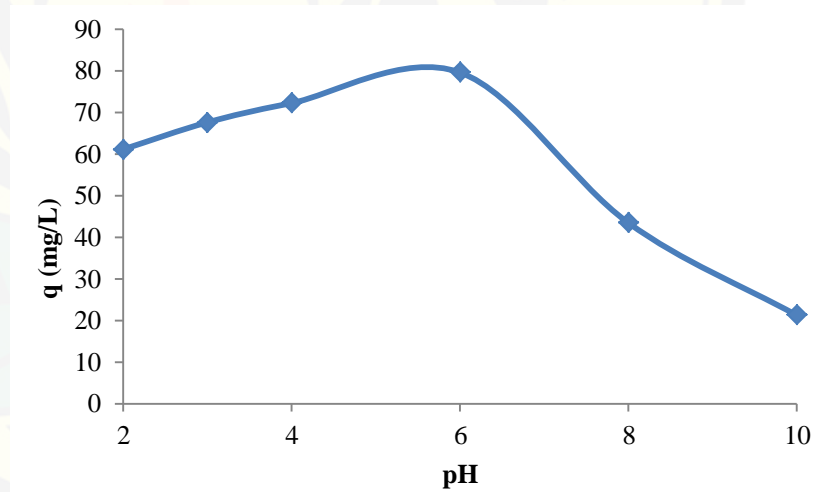
- Data Adsorpsi pH

pH	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q (mg/g)	Rerata
pH 2	50	0,010	1,778	44,444		105,556	61,112		15,278	
	50	0,010	1,778	44,444	44,444	105,556	61,112	61,112	15,278	15,278
	50	0,010	1,778	44,444		105,556	61,112		15,278	
pH 3	50	0,008	1,556	38,889		105,556	66,667		16,667	
	50	0,008	1,556	38,889	37,963	105,556	66,667	67,593	16,667	16,898
	50	0,007	1,444	36,111		105,556	69,445		17,361	
pH 4	50	0,006	1,333	33,333		105,556	72,223		18,056	
	50	0,006	1,333	33,333	33,333	105,556	72,223	72,223	18,056	18,056
	50	0,006	1,333	33,333		105,556	72,223		18,056	
pH 6	50	0,004	1,111	27,778		105,556	77,778		19,445	
	50	0,003	1,000	25,000	25,926	105,556	80,556	79,630	20,139	19,908
	50	0,003	1,000	25,000		105,556	80,556		20,139	
pH 8	50	0,016	2,444	61,111		105,556	44,445		11,111	
	50	0,016	2,444	61,111	62,037	105,556	44,445	43,519	11,111	10,880
	50	0,017	2,556	63,889		105,556	41,667		10,417	
pH 10	50	0,024	3,333	83,333		105,556	22,223		5,556	
	50	0,025	3,444	86,111	84,259	105,556	19,445	21,297	4,861	5,324
	50	0,024	3,333	83,333		105,556	22,223		5,556	

di mana:

- C_{sisa} (mg/L) = $\frac{(\text{Absorbansi}+0,006)}{0,009}$
- C_f (mg/L) = $C_{sisa} \times \left(\frac{50 \text{ (fp)}}{2}\right)$
- C_{ads} (mg/L) = $C_0 - C_f$
- q (mg/g) = $\frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

pH	q (mg/L)
2	61,112
3	67,593
4	72,223
6	79,630
8	43,519
10	21,297



Lampiran 4.4. Penentuan Adsorpsi Larutan Cu oleh Silika Gel dengan Variasi Waktu pada Sistem Tunggal

- Penentuan Konsentrasi Cu Awal

Konsentrasi	abs	[Cu] awal	pengenceran	[Cu] asli
100	0,013	2,111	50	105,556

- Data Adsorpsi waktu

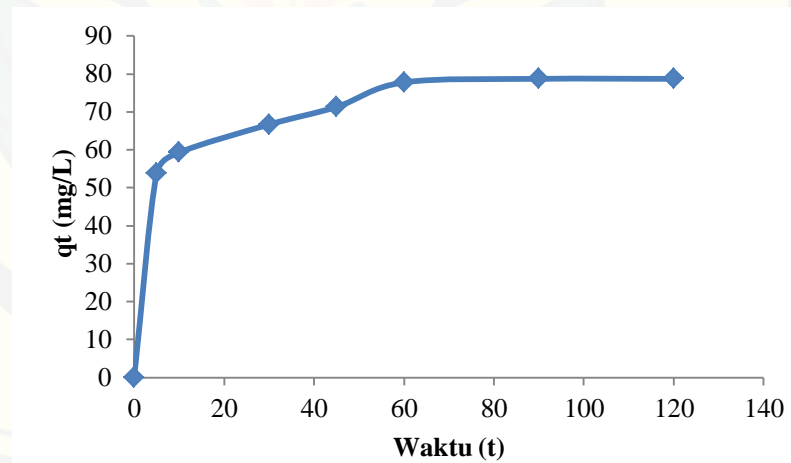
Waktu (menit)	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q_t (mg/g)	Rerata
5	50	0,013	2,111	52,778		105,556	52,778		13,195	
5	50	0,013	2,111	52,778	51,852	105,556	52,778	53,704	13,195	13,426
5	50	0,012	2,000	50,000		105,556	55,556		13,889	
10	50	0,01	1,778	44,444		105,556	61,112		15,278	
10	50	0,011	1,889	47,222	46,296	105,556	58,334	59,260	14,583	14,815
10	50	0,011	1,889	47,222		105,556	58,334		14,583	
30	50	0,008	1,556	38,889		105,556	66,667		16,667	
30	50	0,008	1,556	38,889	38,889	105,556	66,667	66,667	16,667	16,667
30	50	0,008	1,556	38,889		105,556	66,667		16,667	
45	50	0,007	1,444	36,111		105,556	69,445		17,361	
45	50	0,006	1,333	33,333	34,259	105,556	72,223	71,297	18,056	17,824
45	50	0,006	1,333	33,333		105,556	72,223		18,056	
60	50	0,004	1,111	27,778		105,556	77,778		19,445	
60	50	0,004	1,111	27,778	27,778	105,556	77,778	77,778	19,445	19,445
60	50	0,004	1,111	27,778		105,556	77,778		19,445	
90	50	0,004	1,111	27,778	26,852	105,556	77,778	78,704	19,445	19,676

90	50	0,003	1,000	25,000		105,556	80,556	20,139	
90	50	0,004	1,111	27,778		105,556	77,778	19,445	
120	50	0,003	1,000	25,000		105,556	80,556	20,139	
120	50	0,004	1,111	27,778	26,852	105,556	77,778	78,704	19,676
120	50	0,004	1,111	27,778		105,556	77,778	19,445	

di mana:

- C_{sisa} (mg/L) = $\frac{(Absorbansi+0,006)}{0,009}$
- C_f (mg/L) = $C_{sisa} \times \left(\frac{50 (fp)}{2}\right)$
- C_{ads} (mg/L) = $C_0 - C_f$
- q_t (mg/g) = $\frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

Waktu	q_t (mg/L)
0	0
5	53,704
10	59,260
30	66,667
45	71,297
60	77,778
90	78,704
120	78,704



Lampiran 4.5. Penentuan Adsorpsi Larutan Cu oleh Silika Gel dengan Variasi pH pada Sistem Campuran

- Penentuan Cu Awal

Konsentrasi	Abs	[Cu] awal	Pengenceran	[Pb] asli
100	0,013	2,111	50	105,556

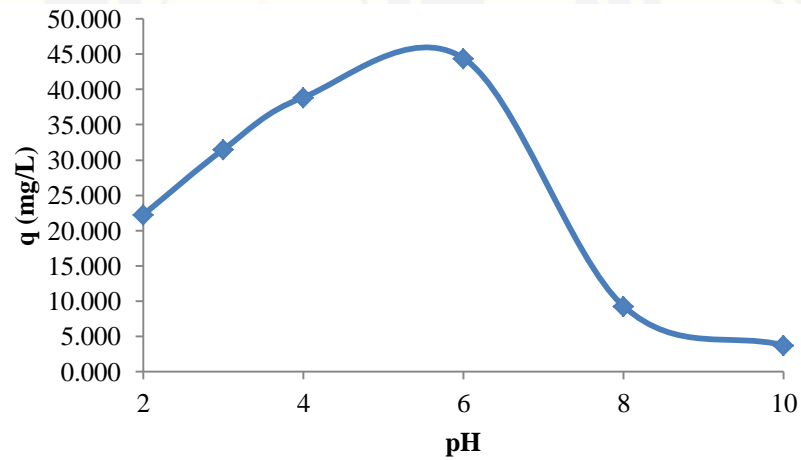
- Data Adsorpsi pH

pH	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q (mg/g)	Rerata
pH 2	50	0,010	1,778	88,889		111,111	22,222		5,556	
	50	0,010	1,778	88,889	88,889	111,111	22,222	22,222	5,556	5,556
	50	0,010	1,778	88,889		111,111	22,222		5,556	
pH 3	50	0,008	1,556	77,778		111,111	33,333		8,333	
	50	0,008	1,556	77,778	79,630	111,111	33,333	31,481	8,333	7,870
	50	0,009	1,667	83,333		111,111	27,778		6,944	
pH 4	50	0,007	1,444	72,222		111,111	38,889		9,722	
	50	0,007	1,444	72,222	72,222	111,111	38,889	38,889	9,722	9,722
	50	0,007	1,444	72,222		111,111	38,889		9,722	
pH 6	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	
	50	0,006	1,333	66,667	66,667	111,111	44,444	44,444	11,111	11,111
	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	
pH 8	50	0,012	2,000	100,000		111,111	11,111		2,778	
	50	0,012	2,000	100,000	101,852	111,111	11,111	9,259	2,778	2,315
	50	0,013	2,111	105,556		111,111	5,555		1,389	
pH 10	50	0,013	2,111	105,556		111,111	5,555		1,389	
	50	0,014	2,222	111,111	107,407	111,111	0,000	3,704	0,000	0,926
	50	0,013	2,111	105,556		111,111	5,555		1,389	

di mana:

- C_{sisa} (mg/L) = $\frac{(Absorbansi+0,006)}{0,009}$
- C_f (mg/L) = $C_{sisa} \times 50$ (fp)
- C_{ads} (mg/L) = $C_0 - C_f$
- q (mg/g) = $\frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

pH	q (mg/L)
2	22,222
3	31,481
4	38,889
6	44,444
8	9,259
10	3,704



Lampiran 4.6. Penentuan Adsorpsi Larutan Cu oleh Silika Gel dengan Variasi Waktu pada Sistem Campuran

- Penentuan Cu Awal

Konsentrasi	Abs	[Pb] awal	Pengenceran	[Pb] asli
100 ppm	0,014	2,222	50	111,111

- Data adsorpsi waktu

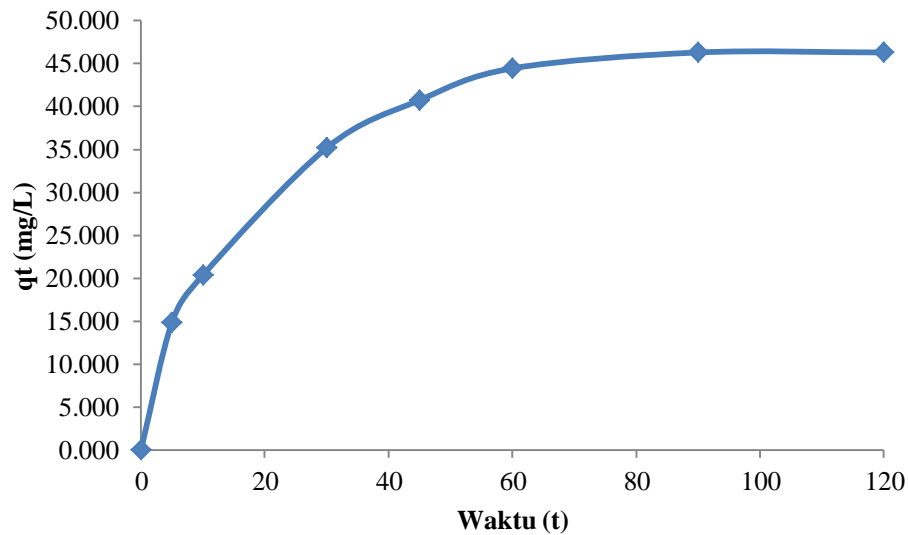
Waktu (menit)	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q_t (mg/g)	Rerata
5	50	0,011	1,889	94,444		111,111	16,667		4,167	
5	50	0,011	1,889	94,444	96,296	111,111	16,667	14,815	4,167	3,704
5	50	0,012	2,000	100,000		111,111	11,111		2,778	
10	50	0,011	1,889	94,444		111,111	16,667		4,167	
10	50	0,010	1,778	88,889	90,741	111,111	22,222	20,370	5,556	5,093
10	50	0,010	1,778	88,889		111,111	22,222		5,556	
30	50	0,008	1,556	77,778		111,111	33,333		8,333	
30	50	0,007	1,444	72,222	75,926	111,111	38,889	35,185	9,722	8,796
30	50	0,008	1,556	77,778		111,111	33,333		8,333	
45	50	0,007	1,444	72,222		111,111	38,889		9,722	
45	50	0,007	1,444	72,222	70,370	111,111	38,889	40,741	9,722	10,185
45	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	
60	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	
60	50	0,006	1,333	66,667	66,667	111,111	44,444	44,444	11,111	11,111
60	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	
90	50	0,005	1,222	61,111		111,111	50,000		12,500	
90	50	0,006	1,333	66,667	64,815	111,111	44,444	46,296	11,111	11,574

90	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	
120	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	
120	50	0,005	1,222	61,111	64,815	111,111	50,000	46,296	12,500	11,574
120	50	0,006	1,333	66,667		111,111	44,444		11,111	

di mana:

- $C_{sisa} \text{ (mg/L)} = \frac{\text{(Absorbansi+0,006)}}{0,009}$
- $C_f \text{ (mg/L)} = C_{sisa} \times 50 \text{ (fp)}$
- $C_{ads} \text{ (mg/L)} = C_0 - C_f$
- $q_t \text{ (mg/g)} = \frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

Waktu	q_t (mg/L)
0	0,000
5	14,815
10	20,370
30	35,185
45	40,741
60	44,444
90	46,296
120	46,296



Lampiran 4.7. Penentuan Adsorpsi Larutan Pb oleh Silika Gel dengan Variasi pH pada Sistem Tunggal

- Penentuan Pb Awal

Konsentrasi	Abs	[Pb] awal	pengenceran	[Pb] asli
100 ppm	0,026	4,143	25	103,571

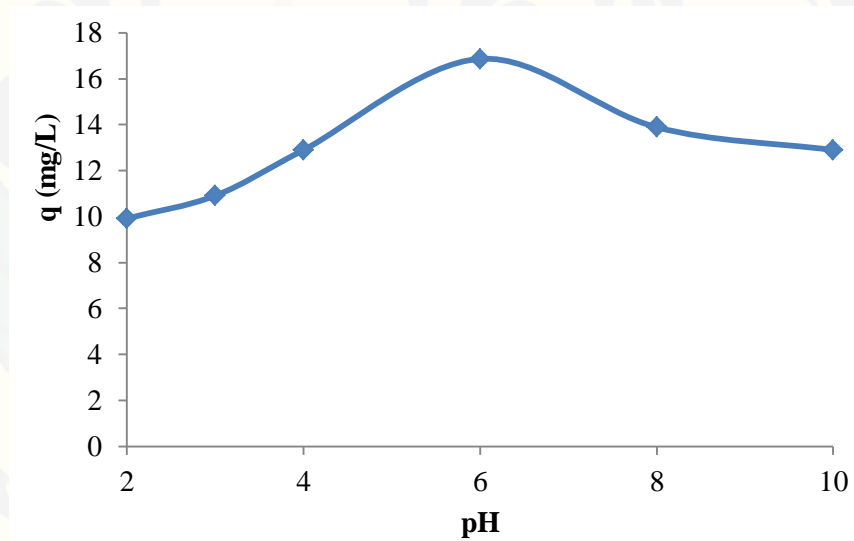
- Data adsorpsi PH

pH	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q (mg/g)	Rerata
pH 2	25	0,016	2,556	63,889	65,212	103,571	39,682	38,359	9,921	9,590
	25	0,016	2,556	63,889		103,571	39,682			
	25	0,017	2,714	67,857		103,571	35,714			
pH3	25	0,015	2,397	59,921	58,598	103,571	43,650	44,973	10,913	11,243
	25	0,014	2,238	55,952		103,571	47,619			
	25	0,015	2,397	59,921		103,571	43,650			
pH 4	25	0,013	2,079	51,984	50,661	103,571	51,587	52,910	12,897	13,227
	25	0,013	2,079	51,984		103,571	51,587			
	25	0,012	1,921	48,016		103,571	55,555			
pH 6	25	0,009	1,444	36,111	38,757	103,571	67,460	64,814	16,865	16,204
	25	0,010	1,603	40,079		103,571	63,492			
	25	0,010	1,603	40,079		103,571	63,492			
pH 8	25	0,012	1,921	48,016	48,016	103,571	55,555	55,555	13,889	13,889
	25	0,011	1,762	44,048		103,571	59,523			
	25	0,013	2,079	51,984		103,571	51,587			
pH 10	25	0,013	2,079	51,984	51,984	103,571	51,587	51,587	12,897	12,897
	25	0,013	2,079	51,984		103,571	51,587			
	25	0,013	2,079	51,984		103,571	51,587			

di mana:

- C_{sisa} (mg/L) = $\frac{(\text{Absorbansi}+0,0001)}{0,0063}$
- C_f (mg/L) = $C_{sisa} \times \left(\frac{50 \text{ (fp)}}{2}\right)$
- C_{ads} (mg/L) = $C_0 - C_f$
- q (mg/g) = $\frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

pH	q (mg/L)
2	9,921
3	10,913
4	12,897
6	16,865
8	13,889
10	12,897



Lampiran 4.8. Penentuan Adsorpsi Larutan Pb oleh Silika Gel dengan Variasi waktu pada Sistem Tunggal

- **Penentuan Pb Awal**

Konsentrasi	Abs	[Pb] awal	Pengenceran	[Pb] asli
100 ppm	0,025	3,984	25	99,603

- **Data adsorpsi waktu**

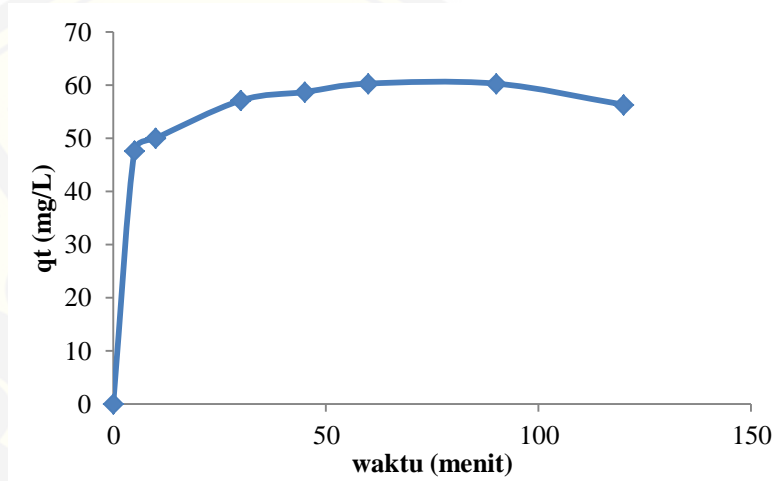
Waktu (menit)	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q_t (mg/g)	Rerata
5	25	0,013	2,079	51,984		99,603	47,619		11,905	
5	25	0,013	2,079	51,984		99,603	47,619		11,905	
5	25	0,013	2,079	51,984	51,984	99,603	47,619	47,619	11,905	11,905
5	25	0,013	2,079	51,984		99,603	47,619		11,905	
5	25	0,013	2,079	51,984		99,603	47,619		11,905	
10	25	0,012	1,921	48,016		99,603	51,587		12,897	
10	25	0,012	1,921	48,016		99,603	51,587		12,897	
10	25	0,012	1,921	48,016	49,603	99,603	51,587	50,000	12,897	12,500
10	25	0,013	2,079	51,984		99,603	47,619		11,905	
10	25	0,013	2,079	51,984		99,603	47,619		11,905	
30	25	0,011	1,762	44,048		99,603	55,555		13,889	
30	25	0,011	1,762	44,048		99,603	55,555		13,889	
30	25	0,010	1,603	40,079	42,460	99,603	59,524	57,143	14,881	14,286
30	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
30	25	0,011	1,762	44,048		99,603	55,555		13,889	
45	25	0,011	1,762	44,048		99,603	55,555		13,889	
45	25	0,010	1,603	40,079	40,873	99,603	59,524	58,730	14,881	14,682

45	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
45	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
45	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
60	25	0,009	1,444	36,111		99,603	63,492		15,873	
60	25	0,009	1,444	36,111		99,603	63,492		15,873	
60	25	0,011	1,762	44,048	39,286	99,603	55,555	60,317	13,889	15,079
60	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
60	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
90	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
90	25	0,009	1,444	36,111		99,603	63,492		15,873	
90	25	0,010	1,603	40,079	39,286	99,603	59,524	60,317	14,881	15,079
90	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
90	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	
120	25	0,012	1,921	48,016		99,603	51,587		12,897	
120	25	0,011	1,762	44,048		99,603	55,555		13,889	
120	25	0,010	1,603	40,079	43,254	99,603	59,524	56,349	14,881	14,087
120	25	0,011	1,762	44,048		99,603	55,555		13,889	
120	25	0,010	1,603	40,079		99,603	59,524		14,881	

di mana:

- $C_{sisa} \text{ (mg/L)} = \frac{(\text{Absorbansi} + 0,0001)}{0,0063}$
- $C_f \text{ (mg/L)} = C_{sisa} \times \left(\frac{50 \text{ (fp)}}{2}\right)$
- $C_{ads} \text{ (mg/L)} = C_0 - C_f$
- $q_t \text{ (mg/g)} = \frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

Waktu	q_t (mg/L)
0	0
5	47,619
10	50,000
30	57,143
45	58,730
60	60,317
90	60,317
120	56,349



Lampiran 4.9. Penentuan Adsorpsi Larutan Pb oleh Silika Gel dengan Variasi pH pada Sistem Campuran

- **Penentuan Pb mula-mula**

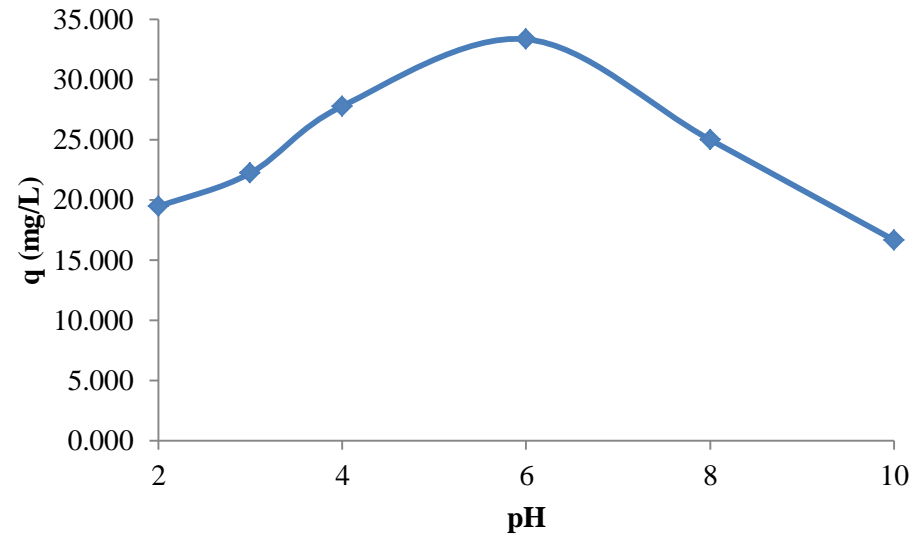
Konsentrasi	Abs	[Pb] awal	Pengenceran	[Pb] asli
100 ppm	0,013	2,167	50	108,333

- **Data adsorpsi pH**

pH	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q (mg/g)	Rerata
pH 2	50	0,011	1,833	91,667	88,889	108,333	16,666	19,444	4,167	4,861
	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
	50	0,011	1,833	91,667		108,333	16,666		4,167	
pH 3	50	0,010	1,667	83,333	86,111	108,333	25,000	22,222	6,250	5,555
	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
	50	0,011	1,833	91,667		108,333	16,666		4,167	
pH 4	50	0,010	1,667	83,333	80,556	108,333	25,000	27,777	6,250	6,944
	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
	50	0,009	1,500	75,000		108,333	33,333		8,333	
pH 6	50	0,009	1,500	75,000	75,000	108,333	33,333	33,333	8,333	8,333
	50	0,009	1,500	75,000		108,333	33,333		8,333	
	50	0,009	1,500	75,000		108,333	33,333		8,333	
pH 8	50	0,010	1,667	83,333	83,333	108,333	25,000	25,000	6,250	6,250
	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
pH 10	50	0,011	1,833	91,667	91,667	108,333	16,666	16,666	4,167	4,167
	50	0,011	1,833	91,667		108,333	16,666		4,167	
	50	0,011	1,833	91,667		108,333	16,666		4,167	

- C_{sisa} (mg/L) = $\frac{(Absorbansi+0,0001)}{0,0063}$
- C_f (mg/L) = $C_{sisa} \times 50$ (fp)
- C_{ads} (mg/L) = $C_0 - C_f$
- q (mg/g) = $\frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

pH	q (mg/L)
2	19,444
3	22,222
4	27,777
6	33,333
8	25,000
10	16,666



Lampiran 4.10 Penentuan Adsorpsi Larutan Pb oleh Silika Gel dengan Variasi Waktu pada Sistem Campuran

- **Penentuan Pb Awal**

Konsentrasi	Abs	[Pb] awal	Pengenceran	[Pb] asli
100 ppm	0,013	2,167	50	108,333

- **Data adsorpsi waktu**

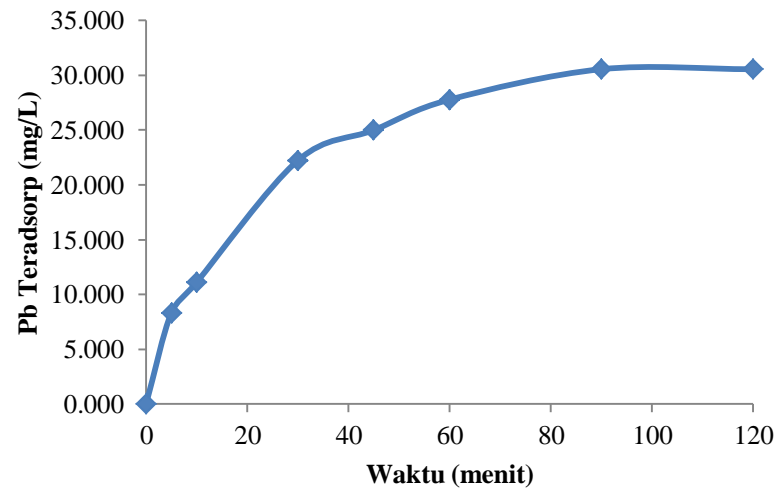
Waktu (menit)	Pengenceran	Abs	C_{sisa} (mg/L)	C_f (mg/L)	Rerata	C_o	C_{ads} (mg/L)	Rerata	q_t (mg/g)	Rerata
5	50	0,012	2,000	100,000		108,333	8,333		2,083	
5	50	0,012	2,000	100,000	100,000	108,333	8,333	8,333	2,083	2,083
5	50	0,012	2,000	100,000		108,333	8,333		2,083	
10	50	0,012	2,000	100,000		108,333	8,333		2,083	
10	50	0,012	2,000	100,000	97,222	108,333	8,333	11,111	2,083	2,778
10	50	0,011	1,833	91,667		108,333	16,666		4,167	
30	50	0,011	1,833	91,667		108,333	16,666		4,167	
30	50	0,010	1,667	83,333	86,111	108,333	25,000	22,222	6,250	5,555
30	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
45	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
45	50	0,010	1,667	83,333	83,333	108,333	25,000	25,000	6,250	6,250
45	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
60	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
60	50	0,010	1,667	83,333	80,556	108,333	25,000	27,777	6,250	6,944
60	50	0,009	1,500	75,000		108,333	33,333		8,333	
90	50	0,010	1,667	83,333		108,333	25,000		6,250	
90	50	0,009	1,500	75,000	77,778	108,333	33,333	30,555	8,333	7,639

90	50	0,009	1,500	75,000		108,333	33,333		8,333	
120	50	0,009	1,500	75,000		108,333	33,333		8,333	
120	50	0,010	1,667	83,333	77,778	108,333	25,000	30,555	6,250	7,639
120	50	0,009	1,500	75,000		108,333	33,333		8,333	

di mana:

- C_{sisa} (mg/L) = $\frac{(\text{Absorbansi}+0,0001)}{0,0063}$
- C_f (mg/L) = $C_{sisa} \times 50$ (fp)
- C_{ads} (mg/L) = $C_0 - C_f$
- q (mg/g) = $\frac{(C_0 - C_f)V}{m}$

Waktu	q_t (mg/L)
0	0,000
5	8,333
10	11,111
30	22,222
45	25,000
60	27,777
90	30,555
120	30,555



Lampiran 4.11. Kinetika Adsorpsi Pseudo Orde 1 dan Pseudo Orde 2

4.11.1 Pb Sistem Tunggal

Waktu (menit)	q _e (mg/L)	q _t		q _e /q _t	ln(q _e /q _t)	t/q _t
		mg/g	g/L			
0	0,0000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
5	60,3173	11,905	4,3667	13,813	2,626	0,420
10	60,3173	12,500	3,9683	15,200	2,721	0,800
30	60,3173	14,286	2,9722	20,294	3,010	2,100
45	60,3173	14,682	2,7838	21,667	3,076	3,065
60	60,3173	15,079	2,6053	23,152	3,142	3,979
90	60,3173	15,079	2,6053	23,152	3,142	5,968
120	60,3173	14,087	3,0704	19,645	2,978	8,518

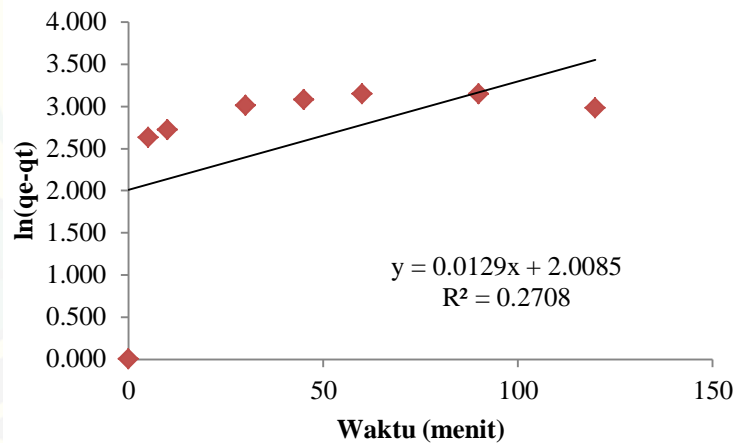
di mana:

$$q_t \text{ (g/L)} = \frac{q_e \text{ (mg/L)}}{q_t \text{ (mg/g)}}$$

$$q_e \text{ (mg/L)} = q \text{ saat } t=90 \text{ menit}$$

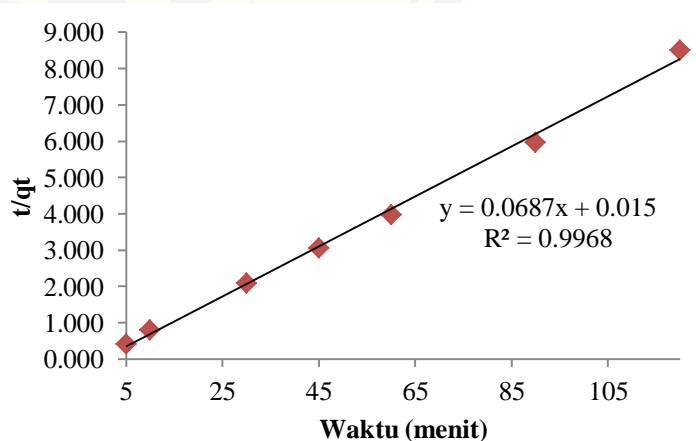
a. Pseudo Orde 1

Waktu	ln(q _e -q _t)
0	0,000
5	2,626
10	2,721
30	3,010
45	3,076
60	3,142
90	3,142
120	2,978



b. Pseudo Orde 2

Waktu	t/q _t
0	0
5	0,420
10	0,800
30	2,100
45	3,065
60	3,979
90	5,968
120	8,518



4.11.2 Pb Sistem Campuran

Waktu (menit)	q _e (mg/L)	q _t		q _e /q _t	ln(q _e /q _t)	t/q _t
		mg/g	g/L			
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	30,555	2,083	48,002	0,637	-0,452	2,400
10	30,555	2,778	35,001	0,873	-0,136	3,600
30	30,555	5,555	15,500	1,971	0,679	5,400
45	30,555	6,250	13,334	2,292	0,829	7,200
60	30,555	6,944	11,600	2,634	0,969	8,640
90	30,555	7,639	10,182	3,001	1,099	11,782
120	30,555	7,639	10,182	3,001	1,099	15,709

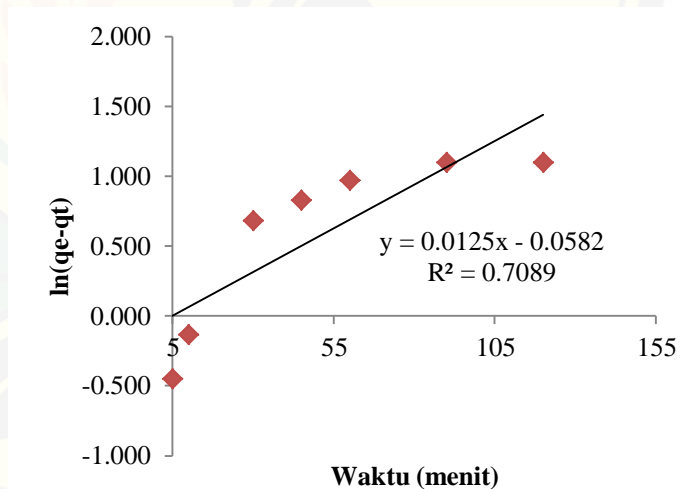
di mana:

$$q_t \text{ (g/L)} = \frac{q_e \text{ (mg/L)}}{q_t \text{ (mg/g)}}$$

$$q_e \text{ (mg/L)} = q \text{ saat } t=90 \text{ menit}$$

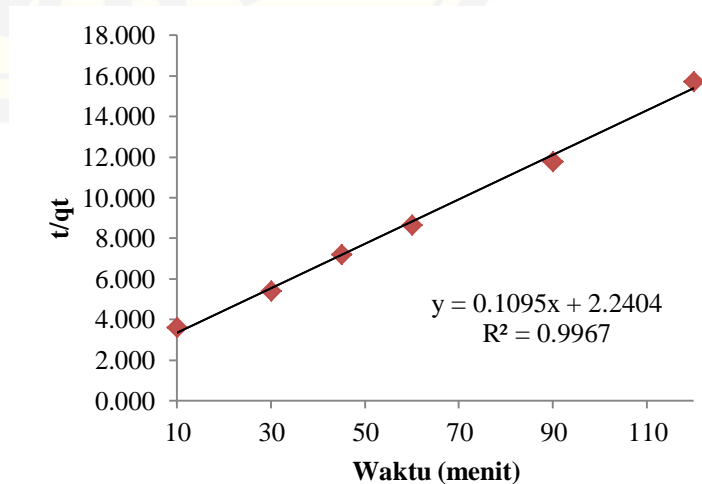
a. Pseudo Orde 1

Waktu	ln(q _e -q _t)
0	0,000
5	-0,452
10	-0,136
30	0,679
45	0,829
60	0,969
90	1,099
120	1,099



b. Pseudo Orde 2

Waktu	t/q _t
0	0
5	2,400
10	3,600
30	5,400
45	7,200
60	8,640
90	11,782
120	15,709



4.11.3 Cu Sistem Tunggal

Waktu (menit)	q _e (mg/L)	q _t		q _e /q _t	ln(q _e /q _t)	t/q _t
		mg/g	g/L			
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	78,704	13,426	3,862	20,379	3,015	0,372
10	78,704	14,815	3,125	25,186	3,226	0,675
30	78,704	16,667	2,333	33,731	3,518	1,800
45	78,704	17,824	1,922	40,948	3,712	2,525
60	78,704	19,445	1,429	55,093	4,009	3,086
90	78,704	19,676	1,365	57,671	4,055	4,574
120	78,704	19,676	1,365	57,671	4,055	6,099

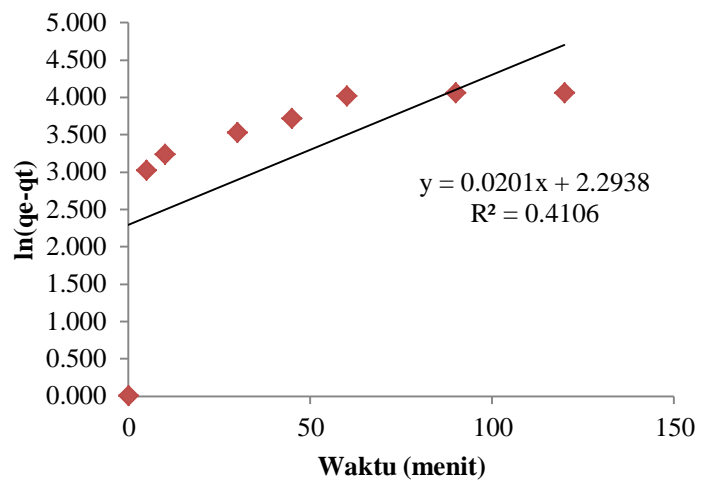
di mana:

$$q_t \text{ (g/L)} = \frac{q_e \text{ (mg/L)}}{q_t \text{ (mg/g)}}$$

$$q_e \text{ (mg/L)} = q \text{ saat } t=90 \text{ menit}$$

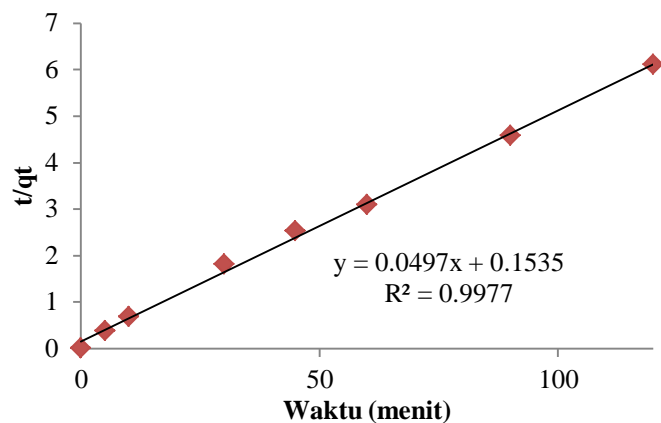
a. Pseudo Orde 1

Waktu	ln(q _e -q _t)
0	0,000
5	3,015
10	3,226
30	3,518
45	3,712
60	4,009
90	4,055
120	4,055



c. Pseudo Orde 2

Waktu	t/q _t
0	0
5	0,372
10	0,675
30	1,800
45	2,525
60	3,086
90	4,574
120	6,099



4.11.4 Cu Sistem Campuran

Waktu (menit)	q _e (mg/L)	q _t		q _e /q _t	ln(q _e /q _t)	t/q _t
		mg/g	g/L			
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	46,296	3,704	26,000	1,781	0,577	1,350
10	46,296	5,093	17,818	2,598	0,955	1,964
30	46,296	8,796	8,632	5,364	1,680	3,411
45	46,296	10,185	6,909	6,701	1,902	4,418
60	46,296	11,111	6,000	7,716	2,043	5,400
90	46,296	11,574	5,600	8,267	2,112	7,776
120	46,296	11,574	5,600	8,267	2,112	10,368

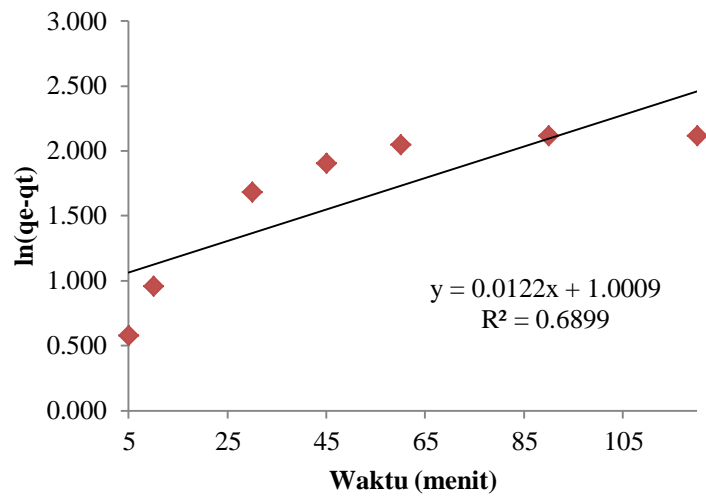
di mana:

$$q_t \text{ (g/L)} = \frac{q_e \text{ (mg/L)}}{q_t \text{ (mg/g)}}$$

$$q_e \text{ (mg/L)} = q \text{ saat } t=90 \text{ menit}$$

a. Pseudo Orde 1

Waktu	ln(q _e -q _t)
0	0,000
5	0,577
10	0,955
30	1,680
45	1,902
60	2,043
90	2,112
120	2,112



b. Pseudo Orde 2

Waktu	t/q _t
0	0
5	1,350
10	1,964
30	3,411
45	4,418
60	5,400
90	7,776
120	10,368

