

**PEMANFAATAN ABU LAYANG BATUBARA (*FLY ASH*) TERAKTIVASI
SEBAGAI ADSORBEN ION LOGAM Pb^{2+}**

SKRIPSI



FARRADINA CHORIA SUCI

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS AIRLANGGA
SURABAYA
2012**

**PEMANFAATAN ABU LAYANG BATUBARA (*FLY ASH*) TERAKTIVASI
SEBAGAI ADSORBEN ION LOGAM Pb^{2+}**

SKRIPSI

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Sains Bidang Kimia pada
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga**

Oleh :

FARRADINA CHORIA SUCI
NIM. 080810034

Tanggal lulus : 17 Juli 2012

Disetujui oleh:

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Drs. Handoko Darmokoesoemo, DEA
NIP. 19621102 198810 1 001

Dra. Aning Purwaningsih, M.Si
NIP. 19660310 199102 2 001

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

Judul : Pemanfaatan Abu Layang Batubara (*Fly Ash*) Teraktivasi sebagai Adsorben Ion Logam Pb²⁺
Penyusun : Farradina Choria Suci
NIM : 080810034
Pembimbing I : Drs. Handoko Darmokoesoemo, DEA.
Pembimbing II : Dra. Aning Purwaningsih, M.Si.
Tanggal Ujian : 17 Juli 2012

Disetujui oleh :

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Drs. Handoko Darmokoesoemo, DEA
NIP. 19621102 198810 1 001

Dra. Aning Purwaningsih, M.Si
NIP. 19660310 199102 2 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S-1 Kimia
Departemen Kimia
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga

Dr. Alfinda Novi Kristanti, DEA
NIP. 19671115 199102 2 001

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan, namun tersedia di perpustakaan dalam lingkungan Universitas Airlangga. Diperkenankan untuk dipakai sebagai referensi kepustakaan, tetapi pengutipan seijin penulis dan harus menyebutkan sumbernya sesuai kebiasaan ilmiah.

Dokumen skripsi ini merupakan hak milik Universitas Airlangga



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufiq, dan hidayah-Nya, sehingga penyusun dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul **“Pemanfaatan Abu Layang Batubara (*Fly Ash*) Teraktivasi sebagai Adsorben Ion Logam Pb^{2+} ”** dengan baik dan tepat pada waktu yang ditentukan. Skripsi ini dibuat untuk memenuhi persyaratan akademis pendidikan sarjana sains dalam bidang kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga.

Pada kesempatan ini, dengan penuh kerendahan hati, penyusun menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Drs. Handoko Darmokoesoemo, DEA., selaku dosen pembimbing I atas bimbingan, nasehat, kesabaran, pemahaman, dan semua ilmu yang bermanfaat selama penyusunan skripsi ini,
2. Ibu Dra. Aning Purwaningsih, M.Si., selaku dosen pembimbing II atas bantuan, arahan, dan kesabaran dalam memberikan bimbingan yang telah diberikan demi terselesaikannya skripsi ini,
3. Bapak Yanuardi Raharjo, S.Si., M.Sc., selaku penguji I atas saran dan bimbingannya dan Ibu Tjitjik Srie Tjahjandarie, Ph.D., selaku penguji II atas saran serta bimbingannya hingga terselesaikannya skripsi ini,
4. Ibu Dr. Afaf Baktir, selaku dosen wali yang dengan sabar memberikan arahan, motivasi, dan nasehat kepada penyusun dalam menyelesaikan studi S1 Kimia di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga,.

5. Ibu Dr. Alfinda Novi Kristanti, DEA., selaku Ketua Departemen Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga,
6. Bapak Mochamad Zakki Fahmi, S.Si, M.Si., selaku dosen yang telah mengajarkan dan mengajak penyusun dalam program hibah penelitian terkait pemanfaatan batubara, terima kasih atas ilmu yang telah diberikan,
7. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga, atas ilmu, bimbingan, keteladanan, dan nasehat yang telah diberikan,
8. Bapak dan ibu saya tercinta, Bapak Chotim, S.Pd dan Ibu Agiriani Wedaringsih, atas semua bentuk kasih sayang, dukungan, nasehat, perhatian, dan doa yang tak pernah henti-hentinya dipanjatkan untuk penyusun,
9. Adik saya tersayang, Firmansyah Choria Rizki yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan semangat hingga terselesaikannya skripsi ini,
10. Rizky Dirga Pratama, A.md., yang selalu memberi perhatian, motivasi, doa, dan bersedia meluangkan waktunya selama proses penelitian hingga terselesaikannya skripsi ini, terima kasih atas semua kebaikan dan kesabaran yang diberikan kepada penyusun,
11. Teman-teman di program studi S-1 Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga angkatan 2008, khususnya untuk Ratih dan Ryan, serta teman-teman bidang minat Kimia Fisik, terima kasih atas bantuan, dukungan, semangat dan kebersamaannya,

12. Karyawan dan karyawan Departemen Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Airlangga, beserta petugas laboratorium, khususnya laboratorium Kimia Fisik, yang telah banyak membantu penyusun, serta
13. Pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Penyusun menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun untuk kesempurnaan penulisan skripsi ini sangat diperlukan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2012

Penyusun,

Farradina Choria Suci

Suci, F.C, 2012, Pemanfaatan Abu Layang Batubara (*Fly Ash*) Teraktivasi sebagai Adsorben Ion Logam Pb^{2+} . Skripsi ini di bawah bimbingan Drs. Handoko Darmokusumo, DEA., dan Dra. Aning Purwaningsih, M.Si., Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Surabaya

ABSTRAK

Pada penelitian ini telah dilakukan pemanfaatan abu layang batubara (*fly ash*) teraktivasi sebagai adsorben ion logam Pb^{2+} . Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kemampuan NaOH dalam mengaktivasi abu layang batubara, menentukan model persamaan adsorpsi, serta menentukan kapasitas adsorpsi abu layang batubara teraktivasi dalam mengadsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} . Adapun analisa jenis adsorpsi, kinetika adsorpsi, dan termodinamika adsorpsi digunakan untuk mengkarakteristik adsorpsi ion logam Pb^{2+} pada abu layang. Dalam proses adsorpsinya, abu layang batubara diaktivasi dengan menggunakan NaOH 3M, penambahan NaOH ini mampu menurunkan derajat kristalinitas SiO_2 dan meningkatkan kemampuan adsorpsi abu layang batubara. Kemampuan adsorpsi abu layang teraktivasi terjadi peningkatan dibanding sebelum aktivasi yaitu 73,5860% menjadi 94,5931%. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa waktu kontak optimum terjadi pada menit ke-75 dan konsentrasi optimum sebesar 600 ppm. Jenis adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang batubara adalah adsorpsi isoterm Langmuir. Kinetika yang sesuai yakni orde reaksi dua, dengan harga k sebesar $2 \times 10^{-5} \text{ L.mg}^{-1}.\text{menit}^{-1}$. Proses adsorpsi antara larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi mengalami reaksi eksoterm dengan harga ΔH_{ads} sebesar $-1,6098 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Adsorpsi ini tergolong adsorpsi fisika dengan adanya harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}) yang kurang dari $20,92 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Harga energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}) bernilai semakin besar dengan meningkatnya temperatur. Sedangkan harga energi entropi adsorpsi (ΔS_{ads}) bernilai negatif dan semakin kecil dengan adanya peningkatan temperatur

Kata kunci : aktivasi abu layang, adsorpsi, kinetika adsorpsi

Suci, F.C, 2012, Utilization of Coal Fly Ash Activated Metal Ion Adsorbent for Pb²⁺. This script below is supervised Drs. Handoko Darmokusumo, DEA., and Dra. Aning Purwaningsih, M.Si., Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Airlangga University, Surabaya.

ABSTRACT

This research has been conducted on the utilization of coal fly ash activated as Pb²⁺ metal ion adsorbent. The purpose of this study was to determine the ability of NaOH activated coal fly ash, to determine the adsorption equation models, and determine the adsorption capacity of activated coal fly ash in a solution of ions Pb²⁺. The analysis of the type of adsorption, adsorption kinetics, and thermodynamics are used to characterize the adsorption of Pb²⁺ metal ions on fly ash. In the adsorption process, activated coal fly ash using 3M NaOH, is able to reduce the degree of crystallinity SiO₂ so that it increase the adsorption capacity of coal fly ash. Adsorption capacity of activated fly ash increased compared to prior activation from 73.5860% to 94.5931%. The results obtained indicate that the optimum contact time occurred is on 75th minute and the optimum concentration is 600 ppm. This type of metal ion adsorption of Pb²⁺ solution by coal fly ash is the adsorption of Langmuir isotherm. The kinetics of the reaction order corresponding to two order reaction with a value of k at 2x10⁻⁵ L.mg⁻¹.min⁻¹. Process adsorption of Pb²⁺ metal ions by activated fly ash having an exothermic reaction with the value of ΔH_{ads} of -1.6098 kJ.mol⁻¹. The adsorption is classified to physical adsorption since the enthalpy of adsorption rates (ΔH_{ads}) is less than the 20.92 kJ.mol⁻¹. Free energy of adsorption (ΔG_{ads}) is increasing with the increase of temperature. While energy entropy of adsorption (ΔS_{ads}) is negative and decreasing with an increase of temperature.

Keywords : *activation of fly ash, adsorption, adsorption kinetics*

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Permasalahan	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Batubara	8
2.2 Abu Layang Batubara (<i>Fly Ash</i>)	10
2.3 Timbal (Pb)	13
2.4 Aktivasi Abu Layang Batubara	15
2.5 Adsorpsi	16
2.5.1 Klasifikasi adsorpsi	17
2.5.1.1 Adsorpsi fisika	17
2.5.1.2 Adsorpsi kimia	18
2.5.2 Sistem adsorpsi <i>batch</i>	19
2.5.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi	21
2.6 Adsorpsi Isoterm	24
2.6.1 Adsorpsi isoterm Langmuir	24
2.6.2 Adsorpsi isoterm Freundlich	25
2.7 Kinetika Adsorpsi	27
2.8 Studi Termodinamika Adsorpsi	28
2.8.1 Entalpi adsorpsi (ΔH_{ads})	28
2.8.2 Energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads})	29
2.8.3 Entropi adsorpsi (ΔS_{ads})	29
2.9 Metode Karakterisasi Adsorben	30
2.9.1 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	30
2.9.2 <i>X-Ray fluorescence Spectrometry</i> (XRF)	31
2.9.3 <i>Atomic Absorption Spectrophotometer</i> (AAS)	32

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	35
3.2 Bahan dan Alat Penelitian	35
3.2.1 Bahan penelitian.....	35
3.2.2 Alat penelitian	35
3.3 Diagram Alir Penelitian	36
3.4 Prosedur Penelitian.....	37
3.4.1 Pembuatan larutan.....	37
3.4.1.1 Pembuatan larutan NaOH 3M	37
3.4.1.2 Pembuatan larutan HNO ₃ 1%	37
3.4.1.3 Pembuatan larutan induk Pb ²⁺ 1000 ppm	37
3.4.1.4 Pembuatan larutan kerja Pb ²⁺ 500 ppm	37
3.4.1.5 Pembuatan larutan standar Pb ²⁺	37
3.4.1.6 Pembuatan larutan adsorbat Pb ²⁺	38
3.4.2 Persiapan dan karakterisasi abu layang batubara	38
3.4.3 Proses aktivasi abu layang batubara.....	38
3.4.4 Penentuan kurva standar larutan ion logam Pb ²⁺	39
3.4.5 Adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺ oleh abu layang batubara teraktivasi.....	39
3.4.5.1 Penentuan waktu kontak optimum adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺	39
3.4.5.2 Penentuan konsentrasi optimum adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺	40
3.4.5.3 Penentuan perbandingan kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺ oleh abu layang sebelum dan sesudah aktivasi	40
3.4.5.4 Penentuan adsorpsi isotherm larutan ion logam Pb ²⁺ ..	41
3.4.5.5 Penentuan kinetika adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺ ..	42
3.4.5.6 Penentuan termodinamika adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺	42

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Persiapan dan Karakterisasi Abu Layang Batubara.....	44
4.2 Proses Aktivasi Abu Layang Batubara	48
4.3 Penentuan Kurva Standar Larutan Ion Logam Pb ²⁺	55
4.4 Adsorpsi Larutan Ion Logam Pb ²⁺ oleh Abu Layang Batubara Teraktivasi.....	56
4.4.1 Penentuan waktu kontak optimum adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺	56
4.4.2 Penentuan konsentrasi optimum adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺	58
4.4.3 Penentuan perbandingan kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺ oleh abu layang sebelum dan sesudah aktivasi ...	60
4.4.4 Penentuan adsorpsi isotherm larutan ion logam Pb ²⁺	62
4.4.5 Penentuan kinetika adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺	64
4.4.6 Penentuan termodinamika adsorpsi larutan ion logam Pb ²⁺ ..	68

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	72
5.2 Saran.....	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	



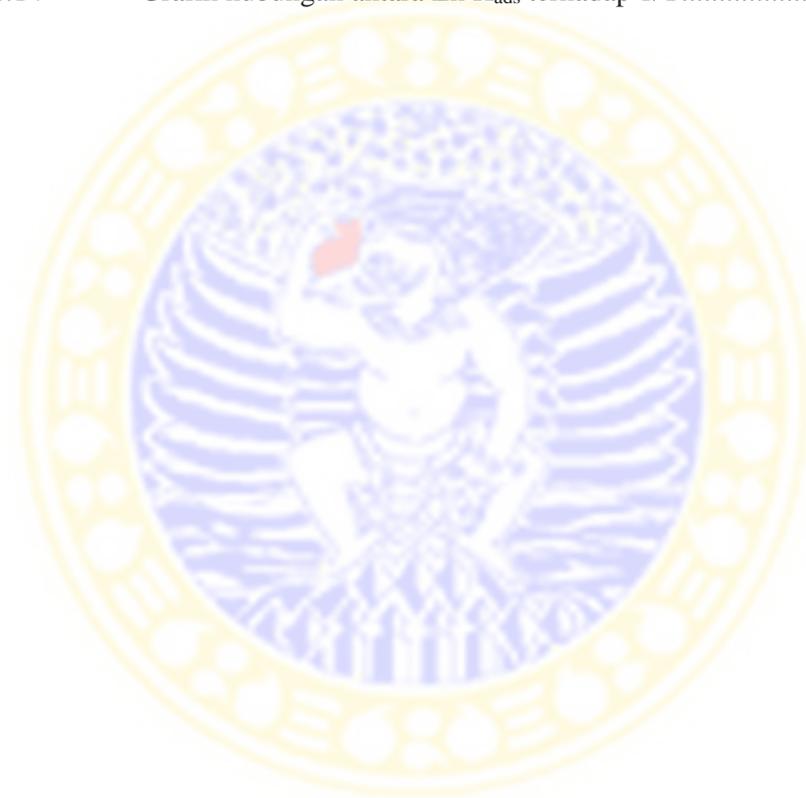
DAFTAR TABEL

Nomor	Judul Tabel	Halaman
2.1	Sifat fisik abu layang batubara	11
2.2	Komposisi kimia abu layang dari berbagai jenis batubara (dalam % berat)	13
2.3	Perbedaan antara adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia.....	19
2.4	Orde reaksi	27
4.1	Komponen kimia abu layang PT.Wilmar Nabati Indonesia sebelum aktivasi	45
4.2	Komponen kimia abu layang PT.Wilmar Nabati Indonesia sesudah aktivasi	51
4.3	Data hasil pengukuran absorbansi untuk kurva standar larutan ion logam Pb^{2+} dalam berbagai konsentrasi.....	55
4.4	Data pengaruh kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+}	59
4.5	Data perbandingan kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang sebelum dan sesudah aktivasi	61
4.6	Adsorpsi isoterm	62
4.7	Data penentuan orde reaksi	65
4.8	Data penentuan entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}).....	68
4.9	Data parameter termodinamika adsorpsi.....	70
4.10	Komponen kimia abu layang PT.Wilmar Nabati Indonesia sesudah mengadsorpsi ion logam Pb^{2+}	71

DAFTAR GAMBAR

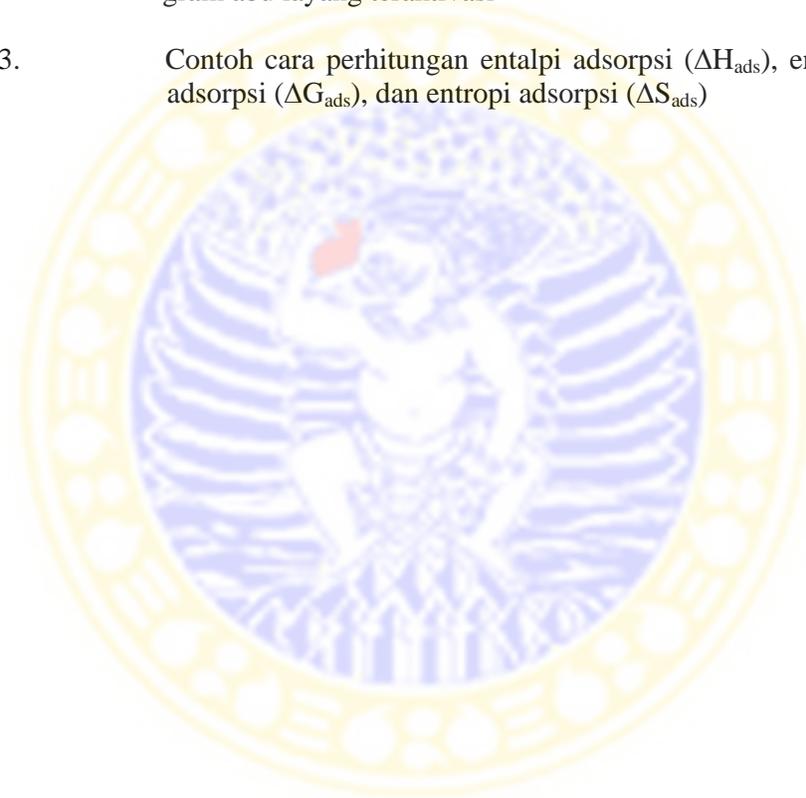
Nomor	Judul Gambar	Halaman
2.1	Reaksi aktivasi abu layang dengan alkali hidroksida dan air	16
2.2	Grafik adsorpsi isotermis Langmuir	25
2.3	Grafik adsorpsi isotermis Freundlich	26
2.4	Skema kerja <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	31
2.5	Proses atomisasi	33
2.6	Skema komponen-komponen alat Spektrofotometer Serapan Atom	34
4.1	Morfologi abu layang batubara sebelum aktivasi (perbesaran 20.000 kali).....	47
4.2	(a). Morfologi abu layang batubara sesudah aktivasi (perbesaran 20.000 kali) dan (b). Morfologi abu layang batubara sesudah aktivasi (perbesaran 2.000 kali)	52
4.3	Diagram aktivasi alkali pada abu layang	53
4.4	Kurva standar larutan ion logam Pb^{2+}	55
4.5	Grafik hubungan antara kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap waktu kontak (t)	57
4.6	Grafik hubungan antara kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+}	59
4.7	Grafik adsorpsi isoterm Langmuir	62
4.8	Grafik adsorpsi isoterm Freundlich.....	63
4.9	Grafik orde reaksi 0 pada ion logam Pb^{2+}	65
4.10	Grafik orde reaksi 1/2 pada ion logam Pb^{2+}	66

Nomor	Judul Gambar	Halaman
4.11	Grafik orde reaksi 1 pada ion logam Pb^{2+}	66
4.12	Grafik orde reaksi 3/2 pada ion logam Pb^{2+}	66
4.13	Grafik orde reaksi 2 pada ion logam Pb^{2+}	67
4.14	Grafik hubungan antara $\ln K_{ads}$ terhadap $1/T$	68



DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Judul
1.	Data hasil penentuan adsorpsi isothermis larutan ion logam Pb^{2+} pada abu layang teraktivasi
2.	Contoh cara perhitungan larutan ion logam Pb^{2+} teradsorpsi tiap gram abu layang teraktivasi
3.	Contoh cara perhitungan entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}), dan entropi adsorpsi (ΔS_{ads})



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Permasalahan

Persediaan bahan bakar minyak dunia semakin lama semakin menipis, sehingga diperlukan suatu upaya untuk mencari energi alternatif pengganti bahan bakar minyak. Batubara merupakan salah satu sumber energi alternatif yang dinilai ekonomis dan melimpah dibandingkan minyak bumi. Sehingga pada tahun 1976 Pemerintah Indonesia melakukan diversifikasi energi nasional melalui Inpres Nomor B-31/Pres/9/1976 tanggal 16 September 1976 untuk mengantisipasi krisis energi di dunia (Muchjidin, 2006). Melalui keputusan tersebut Presiden memerintahkan kepada Menteri Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik (PUTL) untuk memanfaatkan batubara sebagai bahan bakar. Sebagai dampak keputusan tersebut maka mulai bermunculan perusahaan tambang batubara di Indonesia (Sukandarrumidi, 2009). Sementara itu melalui Keputusan Presiden (Kepres) No. 21 Tahun 1993 dan dilengkapi dengan Kepres No. 75 Tahun 1996, mulailah perusahaan tambang asing diundang untuk menambang di Indonesia dan mengeksport batubara (Muchjidin, 2006).

Penggunaan batubara sebagai sumber energi dari tahun ke tahun mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kebutuhan listrik. Perkembangan produksi batubara telah menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan, dengan kenaikan produksi rata-rata 15,68% per tahun. Pada tahun 1992 tercatat sebesar 22,951 juta ton, naik menjadi 151,594 juta ton pada tahun 2005.

Jika diasumsikan proyeksi untuk tahun-tahun mendatang mengikuti kecenderungan (*trend*) tersebut, maka kondisi pada tahun 2025, produksi batubara diperkirakan akan meningkat menjadi sekitar 628 juta ton (Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara, 2006).

Disamping potensinya sebagai sumber energi alternatif yang relatif ekonomis, pemanfaatan batubara ini berpotensi menimbulkan masalah baru terhadap lingkungan sekitar. Sebagai akibat dari pembakaran batubara, antara lain pada PLTU menghasilkan residu berupa gas dan padatan. Residu berupa gas antara lain seperti CO₂, NO_x, CO, dan SO₂. Adapun penanganan residu berupa gas dapat dilakukan dengan teknik purifikasi gas buangan sebelum dilepas ke udara bebas (Muchjidin, 2006). Residu berupa padatan antara lain abu layang (*fly ash*) dan abu bawah (*bottom ash*), dimana dari limbah tersebut sekitar 80% adalah abu layang dan 20% adalah abu bawah. Residu padatan berupa abu layang akan keluar melalui cerobong asap, sedangkan abu bawah akan terkumpul di dasar tungku pembakaran (Sukandarrumidi, 2009). Meskipun persentase limbah abu layang lebih besar dari pada abu bawah, pemanfaatan abu layang hanya mencapai 20% dari total abu layang yang dihasilkan, diantaranya sebagai bahan campuran semen, komponen utama geopolimer, bahan campuran beton, bahan campuran plastik, pupuk dan sebagainya (Irani, 2009).

Limbah abu batubara tersebut bila ditimbun akan menghasilkan gas metana (CH₄) yang dapat terbakar atau meledak dengan sendirinya (*self burning* dan *self exploding*). Selain itu, abu tersebut berbahaya untuk kesehatan khususnya pada sistem pernafasan dan kulit. Oleh sebab itu menurut peraturan PP85/1999,

limbah abu layang dan abu bawah dikategorikan sebagai limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya). Itu sebabnya, perlu dilakukan berbagai upaya untuk menangani dan memanfaatkan limbah abu tersebut.

Salah satu kendala pemanfaatan secara luas dari limbah abu layang dan abu bawah batubara ini dikarenakan kandungan dan sifat-sifat kimia dari limbah tersebut. Besarnya kandungan oksida logam dalam abu layang, seperti SiO_2 , Al_2O_3 , dan oksida lainnya, menjadikan limbah ini relatif kurang reaktif terhadap beberapa reagen kimia, sehingga usaha-usaha pemanfaatan limbah ini hanya terbatas pada bidang-bidang tertentu. Lapisan permukaan partikel abu layang yang tidak teraktivasi berbentuk *glassy*, sangat rapat dan stabil. Rantai *glassy* tersebut memiliki kandungan Si dan Al yang tinggi. Oleh karena itu lapisan permukaan abu layang batubara yang berbentuk *glassy* ini harus dihancurkan agar gugus aktif didalamnya yang berpori dan amorf serta memiliki aktifitas tinggi keluar ke permukaan abu layang batubara. (Irani, 2009).

Di sisi lain sejalan dengan pertumbuhan dan perkembangan penduduk, kebutuhan air untuk berbagai keperluan semakin meningkat. Pemenuhan kebutuhan air bersih saat ini sudah menjadi masalah yang cukup serius. Hal ini diperburuk dengan meningkatnya limbah industri yang dibuang ke lingkungan, yang seringkali tidak memperhatikan kualitas limbah cair yang dibuang sehingga mengakibatkan permasalahan yang kompleks bagi lingkungan. Limbah yang berbahaya dan memiliki daya racun tinggi umumnya berasal dari buangan industri, termasuk industri kimia dan industri pelapisan logam. Salah satu diantaranya adalah limbah logam berat, seperti merkuri (Hg), kadmium (Cd),

timbal (Pb), arsen (As), krom (Cr) dan beberapa lainnya yang merupakan logam yang beracun dan berbahaya bagi kesehatan manusia. Logam berat di dalam perairan biasanya ditemukan dalam bentuk partikel-partikel koloid, ion logam bebas atau senyawa kompleks (Darmono, 2008). Pencemaran logam-logam berat tersebut dapat mempengaruhi dan menyebabkan penyakit pada konsumen, karena di dalam tubuh unsur atau senyawa logam berat yang berlebihan berpotensi menyebabkann toksisitas kronis yang dapat membahayakan manusia. Salah satu diantara unsur logam berat non-esensial yang tersebar luas dan memiliki tingkat racun sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan tembaga (Cu) dan merkuri (Hg) adalah timbal (Pb) atau timah hitam.

Timbal berada di perairan umumnya mempunyai bilangan oksidasi +2 (Palar, 2008). Unsur ini muncul dari sejumlah sumber industri dan pertambangan. Daya racun timbal yang akut pada manusia menyebabkan kerusakan hebat pada ginjal, jantung, sistem reproduksi, hati, otak, dan sistem saraf pusat. Logam timbal yang masuk dalam tubuh manusia dapat melalui saluran pernafasan, saluran pencernaan dan kulit. Adapun seseorang dapat dikatakan keracunan timbal apabila jumlah timbal yang diserap dalam tubuh mencapai batas ambang yakni lebih dari 80 μg Pb/100 mL darah (Palar, 2008). Pengaruh toksisitas kronis akibat kontaminasi oleh timbal ini sering dijumpai pada pekerja di pertambangan, pabrik mobil, pelapisan logam, dan pengecatan sistem semprot (Darmono, 2008).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 20 Th.1990 tentang pengendalian pencemaran air disebutkan bahwa kadar timbal maksimum dalam air yang dapat digunakan sebagai air minum secara langsung tanpa pengolahan sebesar

0,05 ppm, untuk air yang dapat digunakan sebagai air baku air minum sebesar 0,1 ppm, untuk keperluan perikanan dan peternakan sebesar 0,03 ppm. Sedangkan batas maksimum timbal dalam air yang dapat digunakan untuk keperluan pertanian, usaha pertokoan, industri, dan pembangkit listrik tenaga air sebesar 1 ppm.

Berbagai upaya dalam mengatasi limbah logam berat telah dilakukan, antara lain dengan metode presipitasi menggunakan bahan kimia, sistem membran, ekstraksi menggunakan pelarut tertentu, dan adsorpsi. Metode adsorpsi yang telah dilakukan oleh Polowczyk dkk. (2010), telah mencoba memanfaatkan limbah abu layang sebagai adsorben ion logam arsen melalui aktivasi oksida-oksida logam dalam abu layang, yang dilakukan melalui hidrasi oksida logam tersebut dalam air selama 168 jam. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa ion logam arsen mampu teradsorpsi dalam abu layang sebesar $5,4 \text{ mg.g}^{-1}$ adsorben, dimana konsentrasi adsorbat sebesar $0,1 \text{ g.mL}^{-1}$ yang diencerkan dari larutan standar As(III) 1000 ppm. Selain itu Fahmi dkk. (2009) telah menunjukkan peningkatan gugus ikatan -OH dan -ONa pada geopolimer berbahan dasar abu layang dengan penambahan NaOH. Dimana pemberian alkali hidroksida pada abu layang menjadikan terbentuknya spesi -OH pada oksida-oksida logam, bahkan pada konsentrasi tinggi atom hidrogen dari spesi-spesi -OH tersebut ter-*exchange* dengan atom alkali. Hal ini memungkinkan spesi-spesi aktif tersebut untuk mengikat ion-ion logam yang lebih besar seperti ion logam timbal.

Berdasarkan hal tersebut diatas, maka dapat dilakukan upaya untuk memanfaatkan limbah abu layang batubara yang diaktivasi dengan larutan NaOH

sebagai adsorben ion logam timbal (Pb). Penggunaan abu layang sebagai adsorben logam berat diharapkan selain dapat mengatasi masalah pencemaran lingkungan akibat penimbunan limbah abu layang, juga dapat menangani masalah pencemaran akibat adanya logam berat. Adapun limbah baru abu layang yang telah mengandung logam berat tersebut, dapat digunakan sebagai geopolimer. Dimana logam-logam berat yang berpotensi mencemari lingkungan akan *diamobilisasi* (dipertahankan) oleh matriks geopolimer agar tidak terdapat dalam bentuk oksidanya. Kondisi ini terlihat lebih baik apabila logam-logam tersebut memiliki *leaching rate* (laju pelepasan) ke alam yang rendah. Pada kondisi ini, geopolimer tidak lagi termasuk dalam kategori limbah B3 (Chen,dkk., 2008)

Pada penelitian ini, metode Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) digunakan untuk menentukan kandungan Pb^{2+} yang teradsorpsi oleh abu layang batubara. Adapun alasan digunakan SSA yaitu tidak membutuhkan pelarut dan pereaksi dalam jumlah besar untuk menganalisa suatu senyawa logam dalam cuplikan, dapat digunakan untuk analisa logam dalam jumlah renik dengan cepat dan teliti, serta metode SSA tergolong relatif sederhana dan sensitif dalam menganalisa kadar total unsur logam dalam sampel. Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka metode SSA dapat diusulkan sebagai metode untuk menganalisa kandungan ion Pb^{2+} yang teradsorpsi oleh abu layang batubara teraktivasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan di atas, maka didapatkan rumusan masalah sebagai berikut.

1. Seberapa jauh kemampuan NaOH dalam mengaktivasi abu layang batubara (*fly ash*) ?
2. Bagaimanakah model persamaan adsorpsi limbah abu layang batubara (*fly ash*) teraktivasi dalam mengadsorpsi ion-ion logam Pb^{2+} ?
3. Seberapa besar kapasitas adsorpsi limbah abu layang batubara (*fly ash*) teraktivasi dalam mengadsorpsi ion-ion logam Pb^{2+} ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui kemampuan NaOH dalam mengaktivasi abu layang batubara (*fly ash*).
2. Menentukan model persamaan adsorpsi limbah abu layang batubara (*fly ash*) teraktivasi dalam mengadsorpsi ion-ion logam Pb^{2+} .
3. Menentukan kapasitas adsorpsi limbah abu layang batubara (*fly ash*) teraktivasi dalam mengadsorpsi ion-ion logam Pb^{2+} .

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi tentang pemanfaatan abu layang batubara (*fly ash*) teraktivasi sebagai adsorben yang dapat digunakan untuk meminimalisasikan konsentrasi ion logam Pb^{2+} melalui mekanisme adsorpsi, sehingga bisa mengurangi pencemaran logam berat dalam sistem perairan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Batubara adalah batuan sedimen yang berasal dari fosil. Menurut *Chemistry Of Coal Utilization* yang dikutip oleh Muchjidin (2006), batubara merupakan batuan sedimen yang secara kimia dan fisika adalah heterogen yang mengandung unsur-unsur karbon, hidrogen, dan oksigen sebagai unsur utama dan belerang serta nitrogen sebagai unsur tambahan. Zat-zat lain seperti senyawa anorganik pembentuk-ash tersebar sebagai partikel zat mineral terpisah-pisah di seluruh senyawa batubara.

Pembentukan batubara atau disebut *coalification* adalah proses perubahan sisa-sisa tanaman menjadi gambut dan kemudian menjadi batubara. Menurut *Indonesian Coal Mining Development and Company Profile 1997*, yang dikutip oleh Muchjidin (2006), terdapat lima tahapan atau proses pembentukan endapan batubara, antara lain :

1. Tahap Pembentukan Gambut

Tahap ini merupakan tahap awal dari rangkaian pembentukan batubara (*coalification*) yang ditandai oleh reaksi biokimia yang luas. Selama proses pengolahan tersebut, protein, kanji, dan selulosa mengalami penguraian lebih cepat bila dibandingkan dengan penguraian material berkayu (lignin) dan bagian tumbuhan yang berlilin (kulit ari daun, dinding, spora, dan tepung sari). Bagian-bagian tumbuhan itu terurai di bawah kondisi aerob menjadi

karbondioksida, air, dan amoniak, serta dipengaruhi oleh iklim. Proses ini disebut proses pembentukan humus dan sebagai hasilnya adalah terbentuk gambut.

2. Tahap Pembentukan Lignit

Pada tahap kedua atau tahap *metamorfik*, terjadi penutupan rawa gambut yang memberikan kesempatan pada bakteri untuk aktif dan penguraian dalam kondisi basa menyebabkan dibebaskannya CO_2 , deoksigenasi dari ulmin, sehingga kandungan hidrogen dan karbon bertambah. Pada tahap ini akan menghasilkan batubara *rank* rendah yang mempunyai rumus $\text{C}_{79}\text{H}_{5,5}\text{O}_{14,1}$.

3. Tahap Pembentukan Batubara Subbitumen (*Sub-bituminous coal*)

Tahap ini merupakan tahap dimana batubara bitumen *rank* rendah diubah menjadi batubara bitumen *rank* pertengahan dan *rank* tinggi. Selama tahap ketiga ini, kandungan hidrogen akan tetap konstan dan oksigen turun.

4. Tahap Pembentukan Batubara Bitumen (*Bituminous coal*)

Dalam tahap ini kandungan hidrogen turun dengan menurunnya jumlah oksigen secara perlahan-lahan. Produk sampingan dari tahap ketiga dan keempat ialah CH_4 , CO_2 , dan H_2O .

5. Tahap Pembentukan Antrasit

Tahap kelima yakni antrasitisasi, dimana oksigen hampir konstan, sedangkan hidrogen turun lebih cepat dibandingkan tahap-tahap sebelumnya.

Batubara adalah bahan bakar fosil, di mana di Indonesia tersedia cadangannya dalam jumlah yang cukup melimpah dan diperkirakan mencapai 38,9 miliar ton. Menurut *Directorate of Coal 1997*, yang dikutip oleh Muchjidin

(2006), penyebaran batubara di Indonesia yakni sekitar 45,02 % tersebar di Sumatera, 54,57% di Kalimantan dan sisanya tersebar di Pulau Jawa, Sulawesi dan Irian Jaya. Dengan kualitas batubara yang baik, jumlah yang besar, serta tingkat produksi batubara saat ini, maka batubara dapat menjadi sumber energi bagi Indonesia selama ratusan tahun. Bahan bakar fosil (batubara) tetap saja merupakan sumber pemasok utama, meskipun pilihan terhadap sumber daya energi telah meluas kepada sumber-sumber yang dapat diperbaharui, seperti tenaga surya, air, ombak dan panas bumi, namun begitupun pertumbuhan pemakaian energi nuklir tidak dapat diharapkan karena tekanan masyarakat.

Produksi batubara pada tahun 2010 diperkirakan sekitar 153 juta ton, sedangkan pemakaian dalam negeri pada tahun tersebut adalah 108 juta ton, sedangkan sisanya 45 juta ton merupakan jumlah yang dapat diekspor. Dari pembakaran batubara dihasilkan abu bawah (*bottom ash*) sekitar 20% yang terkumpul di dasar tungku, dan abu layang (*fly ash*) sekitar 80% yang akan keluar melalui cerobong asap (Sukandarrumidi, 2009).

2.2 Abu Layang Batubara (*Fly Ash*)

Abu layang batubara merupakan komponen terbesar dari sisa pembakaran batubara. Saat proses pembakaran batubara, abu layang bersama-sama aliran gas memasuki suatu cerobong asap. Selama proses tersebut abu layang akan terkumpul pada alat pengontrol emisi atau keluar melalui cerobong asap dan akan beterbangan menyebar di udara (Sukandarrumidi, 2009). Sifat-sifat fisika, kimia dan mineralogi abu layang tergantung pada komposisi batubara awal, kondisi

pembakaran, kinerja dan efisiensi alat pengontrol emisi, penanganan dan penyimpanan serta iklim (Sukandarrumidi, 2009).

Beberapa sifat fisik dan sifat kimia dari abu layang, antara lain:

1. Sifat fisik

Sifat fisik abu layang batubara atau *fly ash* berdasarkan bentuk, warna, ukuran, tampilan, kerapatan, dan luas area spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat fisik abu layang batubara

Bentuk	Berbentuk bola padat atau berongga
Warna	Berwarna keabu-abuan
Ukuran	1-100 μm
Tampilan	Sangat halus
Kerapatan	2100 sampai 3000 kg/m^3
Luas area spesifikasi	170 sampai 1000 m^2/kg

Sifat fisik abu layang menurut ACI (1992) adalah ukuran partikelnya dari 1 μm -1 mm, *specific gravity* dari 2,2-2,8 persentasi kehalusan tertahan ayakan 0,074 mm; 0,045 mm; dan sampai ke dasar berturut-turut adalah 3,5%; 19,3% dan 77,2%.

2. Sifat kimia

Menurut Sukandarrumidi (2009), komposisi unsur-unsur kimia utama dari abu layang dibedakan menjadi tiga kelompok sebagai berikut.

1. Oksida logam asam antara lain : SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2
2. Oksida logam basa antara lain : Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , dan Na_2O
3. Unsur-unsur lain seperti P_2O_5 , SO_3 , sisa karbon, dan beberapa unsur lain

Adapun secara kimia unsur utama penyusun abu layang adalah Si, Al, Fe, serta Ca, K, Na, dan Ti dalam prosentase yang cukup berarti. Oleh karena itu, abu layang disebut sebagai bahan amorf ferroaluminio silikat. Selain komponen utama

tersebut, abu layang juga mengandung unsur-unsur lain yaitu Sb, Be, Cu, U, Ge, dan sebagainya (Muchjidin, 2006).

Sifat kimia dari abu layang dipengaruhi oleh teknik pembakaran batubara, penanganan serta penyimpanannya. Menurut Sukandarrumidi (2009), berdasarkan adanya perbedaan komposisi kimia yakni kandungan kalsium oksidanya (CaO), maka abu layang dibedakan menjadi 2 tipe, antara lain :

1. Tipe C

Menurut ASTM C 618 abu layang ini mengandung CaO lebih dari 10% dari beratnya. Senyawa lain yang terkandung didalamnya adalah SiO₂ sebanyak 30-50%. Al₂O₃ sebanyak 17-20%, Fe₂O₃, MgO, Na₂O dan sedikit K₂O. Mempunyai *specific gravity* 2,31-2,86. Abu layang tipe C biasanya didapat dari pembakaran *lignite* atau *sub-bitumenous* batubara.

2. Tipe F

Menurut ASTM C 618 abu layang ini mengandung CaO kurang dari 10% dari beratnya. Senyawa yang terkandung didalamnya adalah SiO₂ sebanyak 45-60%, Al₂O₃ sebanyak 20-28%, Fe₂O₃, MgO, K₂O dan sedikit Na₂O. Mempunyai *specific gravity* antara 2,15-2,45. Abu layang tipe F didapat dari pembakaran *anthracite* atau *bitumenous* batubara.

Di samping itu abu layang tipe C mempunyai kandungan alkali dan sulfat yang lebih tinggi dibandingkan abu layang tipe F. Tabel 2.2 menunjukkan komposisi kimia abu layang dari berbagai jenis batubara.

Tabel 2.2 Komposisi kimia abu layang dari berbagai jenis batubara (dalam % berat)

Komponen	Bituminus	Sub-bituminus	Lignit
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-10
K ₂ O	0-3	0-4	0-4

Sumber : ASTM C 618-92a (1994) dalam Sukandarrumidi (2009)

Abu layang (*fly ash*) memiliki keistimewaan dalam hal komposisinya, dengan kandungan utama *fly ash* berupa senyawa silika, alumina, serta beberapa senyawa oksida lainnya. Adapaun senyawa-senyawa tersebut memiliki kemampuan sebagai adsorben, diantaranya untuk menyerap kandungan ion logam berat di dalam air (Wardhana, 2006).

2.3 Timbal (Pb)

Timbal adalah logam yang berwarna abu-abu kebiruan, dengan kerapatan tinggi yaitu 11,48 g.mL⁻¹ pada suhu kamar, mempunyai nomor atom 82 dengan berat atomnya 207,19 g.mol⁻¹ (Vogel, 1990). Titik lebur timbal 600,65 K dan titik didihnya 2023 K (Sunardi, 2007).

Timbal dalam kesehariannya lebih dikenal dengan nama timah hitam, dalam bahasa ilmiahnya dinamakan dengan *plumbum*, dan disimbolkan dengan *Pb*. Logam ini termasuk dalam kelompok logam-logam golongan IV-A, periode 6 pada tabel periodik unsur kimia (Palar, 2008).

Timbal merupakan unsur yang jarang didapat, mudah diperoleh dari batuanya, banyak ditemukan sebagai mineral *galena* (PbS). Timbal juga

ditemukan dalam mineral *anglesit* (PbSO_4) dan dalam bentuk mineral (Pb_3O_4). Boleh dikatakan bahwa timbal tidak pernah ditemukan dalam bentuk logam murninya (Palar, 2008).

Bijih-bijih logam timbal yang diperoleh dari hasil penambangan hanya mengandung sekitar 3% sampai 10% timbal. Hasil ini dipisahkan lagi sampai 40%, sehingga didapatkan logam timbal murni. Logam timbal atau Pb mempunyai sifat-sifat yang khusus yaitu merupakan logam lunak, mudah dibentuk, merupakan logam yang tahan terhadap peristiwa korosi atau karat, sehingga logam timbal sering digunakan sebagai bahan *coating*, mempunyai kerapatan yang lebih besar dibandingkan dengan logam-logam biasa, kecuali emas dan merkuri, dan merupakan penghantar listrik yang tidak baik (Palar, 2008).

Senyawa timbal dapat masuk ke badan perairan melalui pengkristalan Pb di udara dengan bantuan air hujan. Di samping itu juga berasal dari pengikisan batuan mineral yang banyak disekitar perairan. Adapun logam Pb yang masuk ke dalam badan perairan, dapat berasal dari aktivitas manusia berupa buangan atau limbah dari industri yang berkaitan dengan Pb, air buangan dari pertambangan bijih timah hitam dan buangan sisa industri baterai. Buangan-buangan tersebut jatuh pada jalur-jalur perairan seperti anak-anak sungai untuk kemudian terus menuju lautan. Umumnya jalur buangan dari sisa perindustrian yang menggunakan Pb akan merusak tata lingkungan perairan yang dimasukinya. Logam Pb di perairan dapat ditemukan dalam bentuk *ion-ion divalen* atau *ion-ion tetravalen* (Ion Pb^{2+} dan Ion Pb^{4+}) (Palar, 2008).

Pencemaran logam berat Pb dapat mengakibatkan keracunan langsung maupun tak langsung terhadap makhluk hidup. Pencemaran secara langsung melalui udara atau air minum, sedangkan pencemaran tak langsung dapat melalui makanan (sayur, ikan, daging). Kadar Pb yang dapat diserap oleh tubuh hanya sekitar 5-10% dari jumlah Pb yang masuk melalui makanan dan sebesar 30% dari jumlah Pb yang terhirup yang akan diserap oleh tubuh (Palar, 2008). Dari jumlah yang terserap tersebut, hanya sekitar 15% akan mengendap pada jaringan tubuh, dan sisanya akan terbuang bersama bahan sisa metabolisme, seperti urin dan feses. Jumlah Pb yang dapat menyebabkan keracunan pada manusia adalah sebesar 0,08 g / 70 kg berat badan orang dewasa (Palar, 2008).

2.4 Aktivasi Abu Layang Batubara

Aktivasi abu layang batubara dapat dilakukan dengan menambahkan senyawa-senyawa yang mampu menghasilkan suatu ikatan polimer yang kuat. Berbagai upaya untuk mengaktifkan abu layang telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Davidovits (1994) yang dikutip dalam Irani (2009), mengusulkan bahwa larutan alkali dapat digunakan untuk bereaksi dengan Si dan Al dalam sumber material geologi alam atau produk samping seperti abu layang untuk menghasilkan *binder*. Larutan alkali yang digunakan adalah larutan natrium dan kalium.

Davidovits (2004) merumuskan reaksi aktivasi abu layang (Gambar 2.1) yang sebagian besar tersusun atas oksida silika dan alumina dengan menggunakan NaOH atau KOH. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa

tersebut mengakibatkan zat padat yang digunakan sebagai adsorben cenderung menarik zat-zat lain yang bersentuhan dengan permukaannya (Alberty, 1990).

Adsorpsi isothermal adalah proses adsorpsi yang terjadi pada suhu konstan. Sifat khas adsorben mempengaruhi jumlah atau banyaknya zat yang teradsorpsi. Banyaknya molekul yang teradsorpsi merupakan fungsi tekanan jika adsorbatnya berupa gas, dan merupakan fungsi konsentrasi dan temperatur jika adsorbatnya berupa larutan (Alberty, 1990).

2.5.1 Klasifikasi adsorpsi

Secara umum tipe adsorpsi berdasarkan gaya interaksi antara permukaan adsorben dengan adsorbat, diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu adsorpsi fisika (*physisorption*) dan adsorpsi kimia (*chemisorption*). Adapun klasifikasi adsorpsi tersebut akan dibahas di bawah ini.

2.5.1.1 Adsorpsi fisika

Adsorpsi fisika merupakan adsorpsi yang terjadi bila gaya intermolekular lebih besar dari gaya tarik antar molekul atau gaya tarik menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Ketika permukaan adsorben sudah tertutupi adsorbat, adsorbat tidak hanya terserap pada lapisan atas atau tunggal pada permukaan adsorben. Hal ini dikarenakan ikatan fisika yang relatif lemah, sehingga jika terjadi peningkatan temperatur dan konsentrasi, adsorpsi adsorbat pada adsorben juga akan meningkat dengan membentuk lapisan pertama, kedua, dan seterusnya menghasilkan lapisan multilayer (Alberty, 1990).

Menurut Eckenfelder (1981), interaksi secara fisik antara molekul-molekul adsorbat dengan permukaan adsorben yang terjadi antara lain :

1. Gaya Van der Waals, yang dihasilkan akibat adanya interaksi dipol-dipol pada jarak pendek.
2. Gaya elektrostatis, terjadi akibat adanya tarik-menarik elektrostatis antara ion-ion yang disebabkan oleh muatan elektrik permukaan.
3. Reaksi koordinasi, terjadi bila suatu ligan menyumbangkan pasangan elektron pada logam lain. Akibatnya terjadi ikatan koordinasi dan terbentuknya senyawa kompleks.
4. Ikatan hidrogen, terjadi akibat adanya interaksi dipol-dipol antara atom hidrogen dengan atom yang memiliki keelektronegatifan kuat seperti N, O, dan F.

2.5.1.2 Adsorpsi kimia

Adsorpsi kimia merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya reaksi antara molekul-molekul adsorbat dengan permukaan adsorben dan terbentuknya ikatan kimia. Gaya ikat adsorpsi kimia bervariasi dan bergantung pada zat yang bereaksi. Ikatan kimia tersebut yakni ikatan hidrogen, kovalen dan ionik. Akibat adanya ikatan kimia yang cukup kuat, maka ketika permukaan adsorben sudah tertutupi oleh adsorbat, adsorbat hanya teradsorpsi pada lapisan pertama atau satu lapisan meskipun dilakukan peningkatan temperatur dan konsentrasi (Alberty, 1990).

Secara garis besar adsorpsi kimia dan adsorpsi fisika dibedakan berdasarkan beberapa parameter. Perbedaan antara kedua jenis adsorpsi tersebut terdapat dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perbedaan antara adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia

No	Parameter	Adsorpsi fisika	Adsorpsi kimia
1	Adsorben	Semua jenis	Terbatas
2	Adsorbat	Semua gas	Kecuali gas mulia
3	Jenis Ikatan	Fisika (Van der Waals)	Kimia (Ikatan kovalen, hidrogen, ionik)
4	Entalpi adsorpsi	Entalpi adsorpsi kecil ($\Delta H_{ad} < 20,92 \text{ kJ mol}^{-1}$)	Entalpi adsorpsi cukup besar ($\Delta H_{ad} > 20,92 \text{ kJ mol}^{-1}$)
5	Temperatur operasi	Terjadi hanya pada temperatur di bawah titik didih adsorbat	Dapat terjadi pada temperatur tinggi
6	Energi aktivasi	Kurang dari 1 kkal/g mol	10-60 kkal/g mol
7	Reversibilitas	Reaksi <i>reversible</i>	Reaksi <i>irreversible</i>
8	Tebal lapisan	Multilayer	Monolayer
9	Kecepatan adsorpsi	Besar	Kecil
10	Jumlah zat teradsorpsi	Sebanding dengan kenaikan tekanan	Sebanding dengan banyaknya inti aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan adsorbat

Sumber : Wahyuni (2010)

Banyak kasus adsorpsi tidak mengikuti salah satu tipe dari adsorpsi diatas, melainkan kombinasi antara dua tipe tersebut. Sedangkan adsorpsi fisika sering ditemukan pada seluruh zat, meskipun ada kemungkinan tertutupi oleh tipe adsorpsi kimia (Levine, 2002).

2.5.2 Sistem adsorpsi *batch*

Sistem ini digunakan untuk menggambarkan kemampuan dari adsorben dalam mengadsorpsi suatu adsorbat, dengan cara mencampurkan adsorben dengan larutan adsorbat dalam jumlah yang tetap dan mengamati perubahannya pada selang waktu tertentu. Setelah digunakan untuk proses adsorpsi, adsorben ini dipisahkan dari adsorbat melalui proses pengendapan, penyaringan atau *sentrifuge*, dan kemudian diregenerasi atau dibuang. Studi adsorpsi menggunakan sistem *batch* ini dilakukan dalam sejumlah gelas beker atau erlenmeyer, dimana

dalam tiap-tiap wadah tersebut berisi adsorben dengan berat bervariasi dan adsorbat yang akan diadsorpsi pada konsentrasi dan volume tertentu. Kemudian adsorbat dan adsorben dalam tabung tersebut dikocok (*dishaker*) dalam waktu tertentu (waktu tercapainya kesetimbangan), selanjutnya konsentrasi larutan adsorbat setelah perlakuan tersebut dianalisa. Adapun selisih konsentrasi adsorbat sebelum dan setelah adsorpsi dianggap sebagai konsentrasi adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben.

Banyaknya adsorbat logam, dimana dalam hal ini logam Pb^{2+} yang mampu diadsorpsi oleh adsorben yakni abu layang teraktivasi, dapat dinyatakan sebagai kapasitas adsorpsi Pb^{2+} tiap unit berat dari abu layang batubara teraktivasi ($mg.g^{-1}$), dengan persamaan berikut :

$$q = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (2.1)$$

dengan :

C_o = konsentrasi awal Pb^{2+} ($mg.L^{-1}$)

C_e = konsentrasi Pb^{2+} ($mg.L^{-1}$) saat tercapai kondisi kesetimbangan

V = jumlah volume larutan adsorbat yaitu Pb^{2+} (L)

m = massa adsorben yaitu abu layang batubara teraktivasi (g)

Persamaan diatas, dapat digunakan untuk mengetahui kapasitas adsorpsi dari semua variasi adsorpsi, baik variasi waktu, konsentrasi awal Pb^{2+} , dan suhu.

Presentase logam Pb^{2+} yang hilang dari larutan adsorbat setelah adsorpsi dapat dinyatakan sebagai efisiensi penghilangan adsorbat logam $Pb(II)$ oleh adsorben dengan persamaan di bawah ini :

$$\text{Efisiensi Penghilangan (\%)} = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100\% \quad (2.2)$$

(Widiastuti, 2009)

2.5.3 Faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi

Adsorpsi dengan menggunakan sistem *batch* dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya sebagai berikut (Wahyuni, 2010).

1. Karakteristik zat yang teradsorpsi (adsorbat)

a. Ukuran molekul adsorbat

Molekul adsorbat yang dapat teradsorpsi adalah molekul adsorbat berdiameter sama atau lebih kecil dari diameter pori adsorben. Adsorpsi akan sulit terjadi jika ukuran molekul adsorbat lebih besar dari ukuran pori pada adsorben dan sebaliknya jika ukuran pori adsorben lebih besar dari ukuran molekul adsorbat, proses adsorpsi akan mudah terjadi.

b. Polaritas molekul adsorbat

Apabila molekul adsorbat memiliki ukuran diameter yang sama dengan pori adsorben, maka molekul-molekul yang bersifat polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar.

c. Kelarutan adsorbat

Pada umumnya adsorbat yang bersifat hidrofilik akan sulit untuk diadsorpsi dibandingkan larutan hidrofobik.

2. Karakteristik zat pengadsorpsi (adsorben)

a. Kemurnian adsorben

Untuk menghasilkan daya adsorpsi yang lebih baik, sebaiknya digunakan adsorben yang murni.

b. Luas permukaan adsorben

Proses adsorpsi terjadi pada permukaan partikel, sehingga luas permukaan adsorben akan sebanding dengan banyaknya molekul yang teradsorpsi. Ukuran adsorben akan mempengaruhi kecepatan adsorpsi, dimana kecepatan adsorpsi akan meningkat dengan ukuran partikel yang semakin kecil. Oleh karena itu, kecepatan adsorpsi adsorben berbentuk *powder* lebih besar dari pada berbentuk granular. Sedangkan kapasitas adsorpsi total bergantung pada luas permukaan total.

c. Ukuran pori adsorben

Adsorben akan mudah mengadsorpsi molekul adsorbat dengan diameter yang lebih kecil dari ukuran pori partikel adsorben.

3. pH

Pada pH asam menyebabkan konsentrasi ion H^+ meningkat, sehingga akan terjadi kompetisi antara ion H^+ dan ion logam untuk bertukar tempat dengan kation lain pada adsorben. Adanya kompetisi antara ion H^+ dengan ion logam tersebut dapat menyebabkan rusaknya struktur karena adanya kompetisi pertukaran ion sehingga menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi terhadap ion logam. Sedangkan pada pH basa dapat menyebabkan semakin banyak logam hidroksida yang mengendap dan mengurangi ion logam dari larutan adsorbat. Selain itu, pada kondisi pH basa menyebabkan kompetisi ion H^+ sebagai kompetitor ion logam akan menurun karena larutan bersifat basa. Dengan menurunnya ion H^+ ini maka ion logam dapat teradsorpsi secara maksimal.

4. Pengadukan

Kecepatan adsorpsi dipengaruhi oleh difusi film dan difusi pori tergantung dari kecepatan pengadukan dalam sistem. Bila kecepatan pengadukan yang dilakukan relatif kecil, maka proses adsorpsi hanya akan terjadi hingga tahap difusi film, sedangkan bila kecepatan pengadukan yang dilakukan relatif besar, maka proses adsorpsi terjadi hingga tahap difusi pori.

5. Tekanan

Untuk adsorpsi fisika, kenaikan tekanan adsorbat mengakibatkan kenaikan jumlah zat yang diadsorpsi. Sebaliknya bila adsorpsi kimia, jumlah yang diadsorpsi berkurang dengan adanya kenaikan tekanan.

6. Temperatur

Pada adsorpsi fisika umumnya terjadi pada temperatur di bawah titik didih adsorbat, sehingga semakin tinggi temperatur menyebabkan kapasitas adsorpsi semakin menurun, karena semakin tinggi temperatur proses desorpsi semakin mudah terjadi. Sebaliknya pada adsorpsi kimia, jumlah adsorbat yang diadsorpsi bertambah dengan naiknya temperatur adsorbat.

7. Waktu kontak

Waktu kontak antara adsorbat dengan adsorben sangat mempengaruhi suatu proses adsorpsi. Semakin lama waktu kontak yang terjadi pada suatu proses adsorpsi maka semakin besar adsorbat yang teradsorpsi.

8. Kompetisi dalam larutan campuran

Kandungan limbah logam dalam air limbah tentu bervariasi, baik macam atau jumlahnya. Logam dalam air limbah tersebut akan diadsorpsi dengan

kecepatan dan sisi yang berbeda-beda dari adsorben. Hal tersebut akan menimbulkan kompetisi dalam larutan dan berpengaruh terhadap analisa.

2.6 Adsorpsi Isoterm

Adsorpsi pada umumnya terjadi pada temperatur yang konstan, karenanya disebut adsorpsi isoterm. Adsorpsi isotermal ini terbagi dalam dua jenis adsorpsi yakni adsorpsi isoterm Langmuir dan adsorpsi isoterm Freundlich, dimana kedua jenis adsorpsi tersebut bersifat monolayer. Masing-masing model adsorpsi isoterm tersebut akan dibahas dibawah ini.

2.6.1 Adsorpsi isoterm Langmuir

Teori Langmuir mengenai adsorpsi adalah teori tempat adsorpsi tertentu (*localized site theory*), yaitu bahwa molekul-molekul zat teradsorpsi hanya dapat diadsorpsi pada tempat-tempat tertentu, sehingga lapisan teradsorpsi hanya dapat setebal satu molekul. Oleh karena itu, model Langmuir valid untuk adsorpsi monolayer pada permukaan dengan jumlah terbatas pada tempat yang sama.

Adsorpsi isoterm Langmuir pada umumnya digunakan untuk mempelajari fenomena adsorpsi suatu larutan atau gas. Untuk adsorpsi dalam sistem larutan, persamaan adsorpsi isoterm Langmuir, adalah sebagai berikut :

$$\frac{x}{m} = \frac{a \cdot b \cdot C_{eq}}{1 + a \cdot C_{eq}} \quad (2.3)$$

atau, bila disusun kembali menjadi :

$$\frac{C_{eq}}{(x/m)} = \frac{1}{a \cdot b} + \frac{1}{b} \cdot C_{eq} \quad (2.4)$$

dengan :

C_{eq} = konsentrasi molekul zat yang berada dalam larutan ($mg.L^{-1}$)

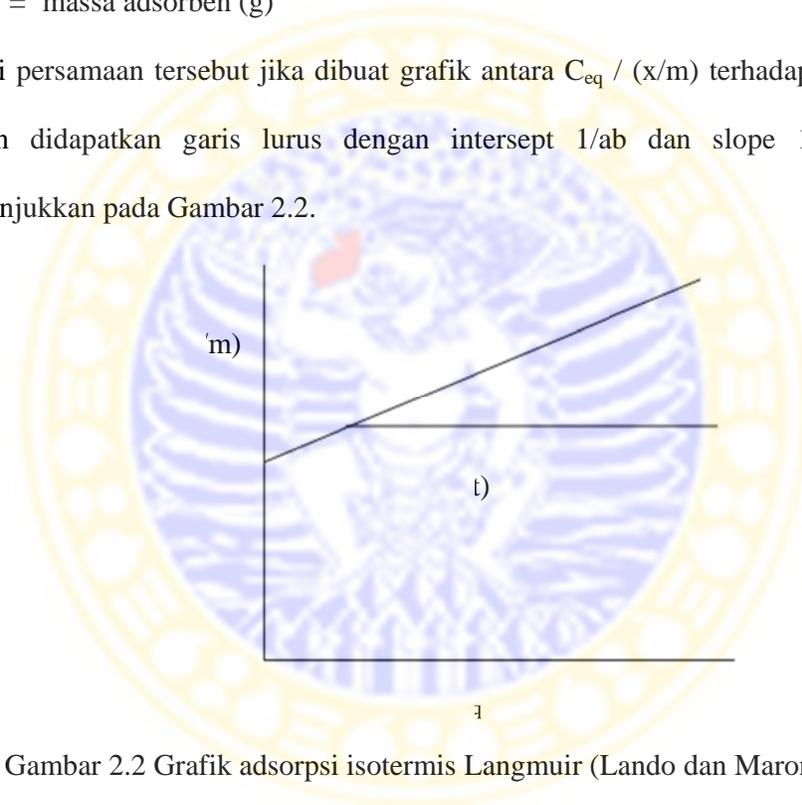
x = massa zat teradsorpsi (mg)

a = konstanta adsorpsi Langmuir

b = konstanta empiris

m = massa adsorben (g)

Dari persamaan tersebut jika dibuat grafik antara $C_{eq} / (x/m)$ terhadap C_{eq} , maka akan didapatkan garis lurus dengan intersept $1/ab$ dan slope $1/b$, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik adsorpsi isothermis Langmuir (Lando dan Maron,1974)

2.6.2 Adsorpsi isotherm Freundlich

Adsorpsi isotherm Freundlich merupakan adsorpsi yang terjadi karena adanya ikatan fisika antara adsorbat (zat yang diserap) dengan permukaan adsorben (zat yang menyerap). Adsorpsi isotherm Freundlich ini hanya terbentuk

lapisan tunggal (monolayer) pada permukaan adsorben pada saat tercapai penjumlahan. Persamaan Freundlich ditentukan dengan rumus :

$$\frac{x}{m} = k \cdot C_{eq}^{1/n} \quad (2.5)$$

atau dalam bentuk persamaan logaritmik, sebagai berikut :

$$\log \frac{x}{m} = \log k + \frac{1}{n} \log C_{eq} \quad (2.6)$$

dengan :

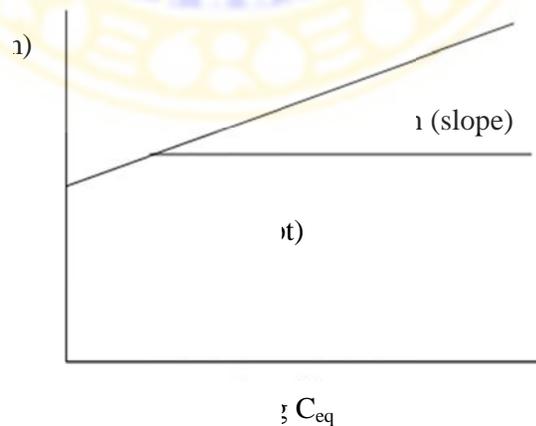
C_{eq} = konsentrasi adsorbat dalam keadaan kesetimbangan (mg.L^{-1}) atau konsentrasi adsorbat sisa

x = massa adsorbat yang teradsorpsi (mg)

m = massa adsorben (g)

n dan k = tetapan adsorpsi

Dengan membuat grafik antara $\log \frac{x}{m}$ terhadap $\log C_{eq}$, maka akan diperoleh garis lurus dengan $1/n$ sebagai slope dan $\log k$ sebagai intersept yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Grafik adsorpsi isoteremis Freundlich (Lando dan Maron,1974)

2.7 Kinetika Adsorpsi

Hukum laju reaksi adalah salah satu parameter penting dalam suatu reaksi kimia. Analisis kinetika dapat dilakukan dengan menggunakan pengukuran terhadap sifat fisika dari proses reaksi. Adapun perhitungan kinetika pengurangan konsentrasi ion Pb^{2+} dalam proses adsorpsi dengan adsorben abu layang batubara ditunjukkan pada Tabel 2.4 (Wilkinson,1980).

Tabel 2.4 Orde Reaksi

Orde Reaksi	Persamaan differensial	Persamaan Integral
0	$-\frac{1}{a} + \frac{d[A]}{dt} = k$	$[A] = -a.k.t + [A]_0$
$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{a} + \frac{d[A]}{dt} = k[A]^{1/2}$	$\sqrt{[A]} = a.k.t + \sqrt{[A]_0}$
1	$-\frac{1}{a} + \frac{d[A]}{dt} = k[A]$	$\ln [A] = -a.k.t + \ln [A]_0$
$\frac{3}{2}$	$-\frac{1}{a} + \frac{d[A]}{dt} = k[A]^{3/2}$	$\frac{1}{\sqrt{[A]}} = a.k.t + \frac{1}{\sqrt{[A]_0}}$
2	$-\frac{1}{a} + \frac{d[A]}{dt} = k[A]^2$	$\frac{1}{[A]} = a.k.t + \frac{1}{[A]_0}$
$n \neq 1$	$-\frac{1}{a} + \frac{d[A]}{dt} = k[A]^n$	$\frac{1}{[A]^{n-1}} = (n-1) a.k.t + \frac{1}{[A]_0^{n-1}}$

Keterangan :

a = koefisien stokiometri reaktan

k = tetapan laju reaksi

$[A]_0$ = konsentrasi mula-mula (mol.L^{-1} atau mg.L^{-1})

$[A]$ = konsentrasi akhir (mol.L^{-1} atau mg.L^{-1})

t = waktu (detik, menit, jam, dsb)

n = orde reaksi

2.8 Studi Termodinamika Adsorpsi

Dalam menentukan parameter termodinamika adsorpsi limbah abu layang batubara teraktivasi terhadap limbah cair ion logam Pb^{2+} , dapat ditentukan dengan menghitung harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), entropi adsorpsi (ΔS_{ads}), dan energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}). Adapun masing-masing parameter dapat dijelaskan sebagai berikut (Levine, 2002).

2.8.1 Entalpi adsorpsi (ΔH_{ads})

Harga entalpi adsorpsi dapat ditentukan dengan cara melakukan adsorpsi pada berbagai variasi temperatur. Adapun harga entalpi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Van't Hoff sebagai berikut :

$$\left[\frac{\partial \ln K_{ads}}{\partial T} \right] = \frac{\Delta H_{ads}}{RT^2} \quad (2.7)$$

Dengan memperhatikan bahwa

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{1}{T} \right) = -\frac{1}{T^2} \quad (2.8)$$

Maka bentuk lain dari persamaan 2.7 dapat dituliskan menjadi :

$$\left[\frac{\partial \ln K_{ads}}{\partial \left(\frac{1}{T} \right)} \right] = -\frac{\Delta H_{ads}}{R} \quad (2.9)$$

dimana :

ΔH_{ads} = entalpi adsorpsi ($J.mol^{-1}$)

K_{ads} = tetapan kesetimbangan termodinamika adsorpsi

T = suhu pada beberapa variasi (K)

R = tetapan gas ($8,314 J.mol^{-1}.K^{-1}$)

Adapun harga tetapan kesetimbangan adsorpsi, dinyatakan dengan :

$$K_{ads} = \frac{(x/m)}{C_{eq}} \quad (2.10)$$

dimana :

C_{eq} = konsentrasi kesetimbangan dari adsorbat dalam larutan (mg.L^{-1})

x = berat adsorbat yang teradsorpsi (mg)

m = berat adsorben (g)

Dengan membuat grafik yang menyatakan hubungan antara $\ln (x/m)/C_{eq}$ terhadap (x/m) dan diekstrapolasi pada harga $x/m = 0$, didapatkan harga tetapan kesetimbangan $\ln K_{ads}$ sebagai interseptnya. Sedangkan bila dibuat plot antara harga $\ln K_{ads}$ terhadap $1/T$ maka akan didapatkan harga $-\Delta H_{ads}/R$ sebagai slope dari grafik tersebut.

2.8.2 Energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads})

Harga energi bebas adsorpsi dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$\Delta G_{ads} = -nRT \ln K_{ads} \quad (2.11)$$

dengan :

ΔG_{ads} = energi bebas adsorpsi (J.mol^{-1})

K_{ads} = tetapan kesetimbangan termodinamika adsorpsi

R = tetapan gas ($8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

T = suhu pada beberapa variasi (K)

n = jumlah mol adsorbat (mol)

2.8.3 Entropi adsorpsi (ΔS_{ads})

Berdasarkan hukum termodinamika kedua, dapat dihitung harga ΔS_{ads} , sebagai berikut :

$$\Delta S_{ads} = \frac{\Delta H_{ads} - \Delta G_{ads}}{T} \quad (2.12)$$

dengan :

ΔH_{ads} = entalpi adsorpsi ($J \cdot mol^{-1}$)

ΔG_{ads} = energi bebas adsorpsi ($J \cdot mol^{-1}$)

ΔS_{ads} = entropi adsorpsi ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$)

T = suhu pada beberapa variasi (K)

2.9 Metode Karakterisasi Adsorben

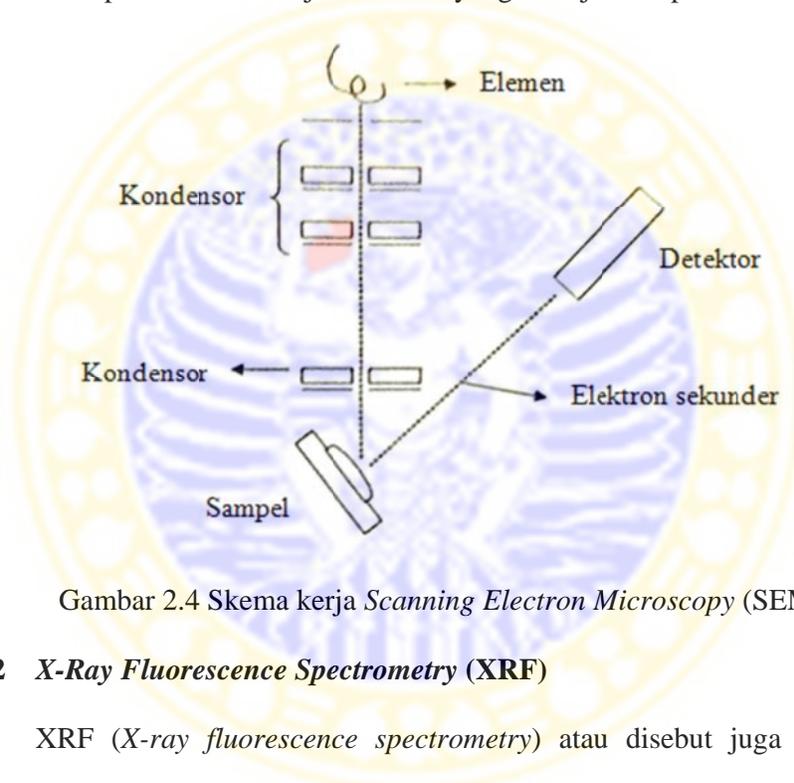
2.9.1 *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk mengetahui perubahan struktur morfologi abu layang batubara sebelum dan setelah teraktivasi. SEM merupakan sejenis mikroskop elektron sebagai pengganti cahaya untuk melihat benda dengan resolusi tinggi, sehingga diharapkan struktur permukaan dan penampang melintang dalam suatu padatan dapat teramati.

Analisa menggunakan SEM ini bermanfaat untuk mengetahui mikrostruktur (termasuk kerapatan ikatan dan bentuk retakan) dari benda padat. Mikroskop elektron terdiri dari dua jenis yaitu *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) (Mulder, 1996).

TEM hanya dapat digunakan pada sampel tipis dan transparan. Pengamatan menggunakan transmisi elektron memberikan resolusi yang tinggi. Untuk sampel yang tidak transparan, pengamatan dilakukan dengan menggunakan SEM berdasarkan refleksi elektron sekunder (Mulder, 1996).

Prinsip kerja SEM dimulai dengan berkas elektron primer dengan energi kinetik 1-25 kV mengenai sampel abu layang batubara. Setelah mengenai abu layang batubara, elektron tersebut direfleksikan. Elektron yang direfleksikan ini disebut dengan elektron sekunder, yang mana akan muncul dan menentukan *image* yang teramati pada layar *micrograph* pada alat SEM (Mulder, 1996). Berikut merupakan skema kerja alat SEM yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema kerja *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

2.9.2 *X-Ray Fluorescence Spectrometry* (XRF)

XRF (*X-ray fluorescence spectrometry*) atau disebut juga Fluoresensi Sinar-X, merupakan teknik analisa non-destruktif yang digunakan untuk identifikasi serta penentuan konsentrasi elemen yang ada pada padatan, bubuk ataupun sampel cair. Sampel yang biasa digunakan berupa serbuk hasil penggilingan atau pengepresan menjadi bentuk film. Prinsip kerja XRF yaitu berdasarkan terjadinya tumbukan atom-atom pada permukaan sampel oleh sinar-X dari sumber sinar-X (Kriswarini, dkk, 2010).

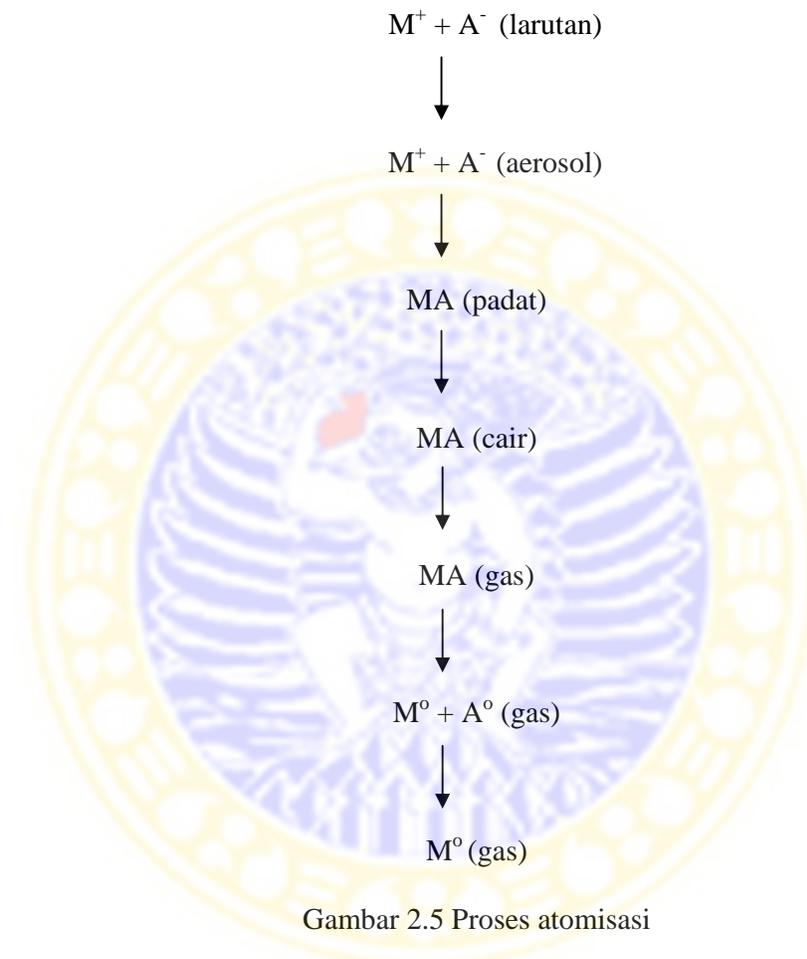
Kelebihan dari metode XRF adalah akurasi tinggi, dapat menentukan unsur dalam material tanpa adanya standar serta dapat menentukan kandungan mineral dalam bahan biologi maupun dalam tubuh secara langsung. Namun metode XRF juga memiliki kelemahan yaitu tidak dapat mengetahui senyawa apa yang dibentuk oleh unsur-unsur yang terkandung dalam material yang akan diteliti dan tidak dapat menentukan struktur dari atom yang membentuk material itu.

2.9.3 Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) atau disebut juga Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) merupakan suatu metode analisa untuk penentuan unsur-unsur logam yang didasarkan pada penyerapan energi sinar oleh atom-atom netral dalam keadaan gas. Sinar yang diserap biasanya sinar tampak atau sinar ultra lembayung. Alat ini memiliki sensitivitas yang sangat tinggi, sehingga sering dijadikan sebagai pilihan utama dalam menganalisis unsur logam yang konsentrasinya sangat kecil.

Spektrofotometer Serapan Atom berprinsip pada absorpsi cahaya oleh atom. Atom-atom menyerap cahaya pada panjang gelombang yang sesuai, elektron terluar dari atom tersebut akan mengalami eksitasi dari keadaan dasar (*ground state*) ke keadaan tereksitasi (*excited state*) (Day & Underwood, 1998). Pembentukan atom-atom dalam keadaan dasar atau proses atomisasi pada umumnya dilakukan dalam nyala. Cuplikan sampel yang mengandung logam M sebagai ion M^+ dalam bentuk larutan garam M^+ dan A^- akan melalui serangkaian proses dalam nyala, sebelum akhirnya menjadi atom logam dalam keadaan dasar M^0 seperti terlihat pada Gambar 2.5.

Atom-atom dalam keadaan dasar (M^0) akan menyerap sumber energi berupa lampu katode berongga, yang mana jumlah energi yang diserap adalah sebanding dengan populasi atau konsentrasi atom-atom dalam sampel.



Pada Spektroskopi Serapan Atom berlaku hukum Lambert-Berr yaitu :

1. Hukum Lambert yang berbunyi, jika suatu sumber sinar monokromatis melewati medium transparan, maka intensitas sinar yang diteruskan berkurang dengan bertambahnya ketebalan medium yang mengabsorpsi.
2. Hukum Beer yang berbunyi, intensitas sinar yang diteruskan berkurang secara eksponensial dengan bertambahnya konsentrasi spesi yang menyerap sinar.

Dari kedua hukum diatas, diperoleh suatu persamaan sebagai berikut :

$$\log \frac{I_t}{I_0} = -\epsilon b C \quad \text{atau} \quad \log \frac{I_t}{I_0} = -a b C \quad (2.13)$$

$$A = a b C \quad (2.14)$$

(Skoog, 1998)

dengan :

I_t = Intensitas cahaya yang diteruskan

I_0 = Intensitas cahaya yang datang

a = absorpsivitas molar (L/mol.cm)

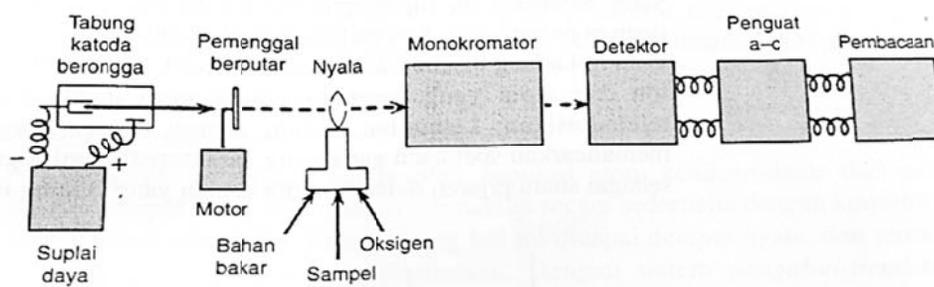
b = panjang medium (cm)

C = konsentrasi larutan (mol/L)

A = absorbansi

Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa absorbansi cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi atom (Day & Underwood, 1998).

Pada umumnya ada lima bagian utama dalam setiap instrumen AAS, yaitu sumber sinar, sistem pengatoman, monokromator, detektor, dan sistem pembacaan. Berikut merupakan diagram blok dari instrumen Spektrofotometer Serapan Atom :



Gambar 2.6 Skema komponen-komponen alat Spektrofotometer Serapan Atom
(Sumber : Day & Underwood, 1998)

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari sampai dengan bulan Juni 2012, di Laboratorium Kimia Fisik, Kimia Organik dan Biokimia, serta Kimia Analitik Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Surabaya.

3.2. Bahan dan Alat Penelitian

3.2.1 Bahan penelitian

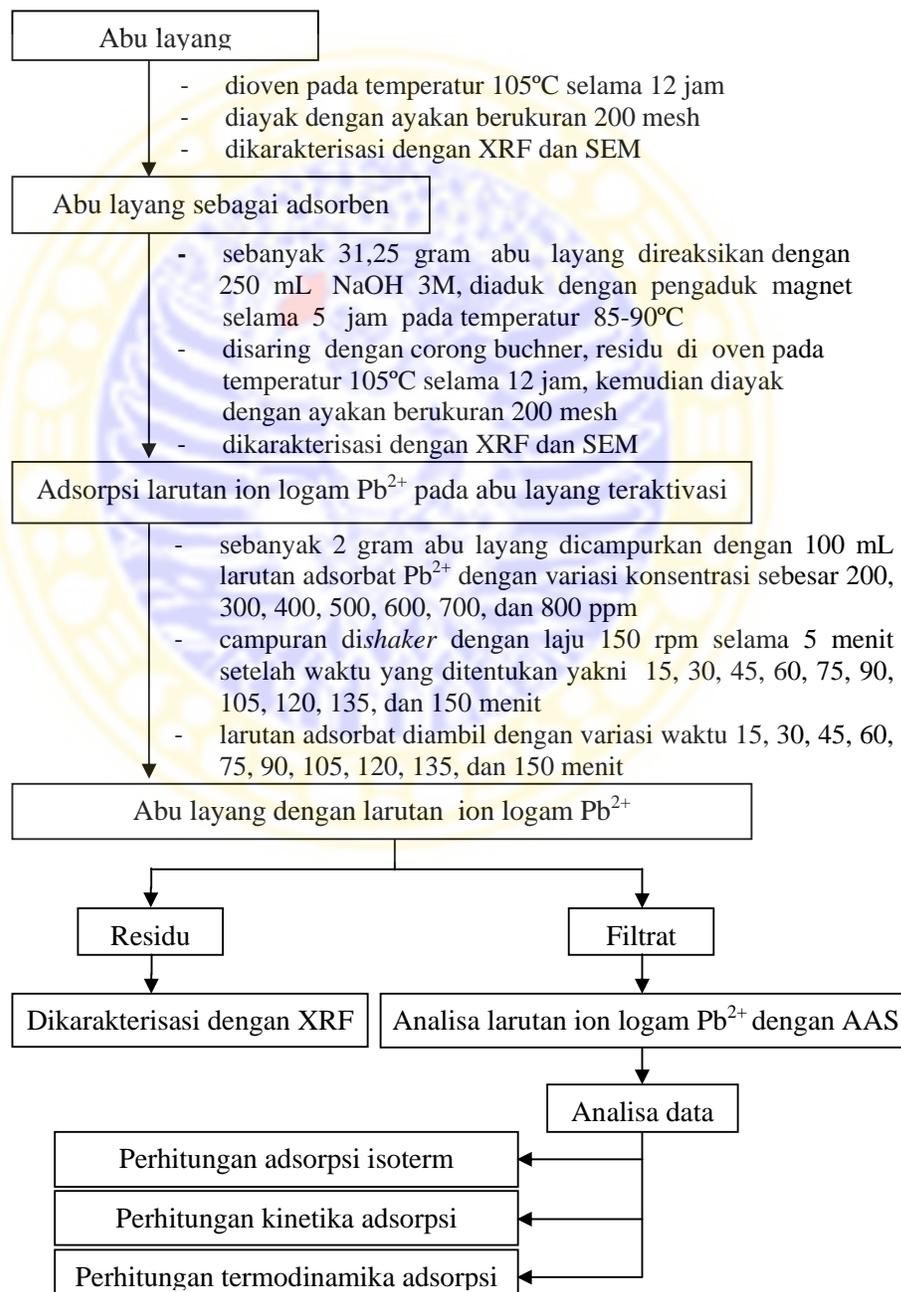
Bahan kimia yang digunakan dalam penelitian ini adalah aqua demineralisasi, aqua destilasi, NaOH pro analysis, HNO₃ 1%, Pb(NO₃)₂, dan abu layang batubara (*fly ash*) yang diperoleh dari power plant PT. Wilmar Nabati Indonesia yang terletak di Kecamatan Kebomas, Kabupaten Gresik.

3.2.2 Alat penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas beker, erlenmeyer, labu ukur, gelas ukur, pipet volum, pipet skala, pipet tetes, ball pipet, pengaduk, tabung reaksi, cawan porselen, ayakan ukuran 200 mesh, kertas saring whatman ukuran 42, pengaduk magnetik, corong buchner, neraca analitik, *hotplate*, oven, *shaker*, *sentrifuge*, dan termometer.

Instrumen yang digunakan untuk penelitian ini adalah Fluoresensi Sinar-X (XRF) PANalytical type Minipal 4, Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) Shimadzu AA-7000 dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) FEI Inspect S50.

3.3 Diagram Alir Penelitian



3.4. Prosedur Penelitian

3.4.1 Pembuatan larutan

3.4.1.1 Pembuatan larutan NaOH 3M

Ditimbang sebanyak 120 gram NaOH, kemudian dilarutkan dengan akuadem dalam gelas beaker 1000 mL dan diencerkan sampai tanda batas.

3.4.1.2 Pembuatan larutan HNO₃ 1%

Diambil sebanyak 15,4 mL larutan HNO₃ 65% dan dimasukkan ke dalam gelas beker. Kemudian diencerkan dengan akuadem hingga volume 1000 mL.

3.4.1.3 Pembuatan larutan induk Pb²⁺ 1000 ppm

Ditimbang dengan tepat 0,7992 gram Pb(NO₃)₂ kemudian dilarutkan dengan HNO₃ 1% dalam gelas beker 100 mL. Selanjutnya, larutan dipindahkan secara kuantitatif ke dalam labu ukur 500 mL dan diencerkan dengan HNO₃ 1% sampai tanda batas.

3.4.1.4 Pembuatan larutan kerja Pb²⁺ 500 ppm

Diambil sebanyak 250 mL larutan induk Pb²⁺ 1000 ppm dan dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL dan diencerkan dengan HNO₃ 1% sampai tanda batas.

3.4.1.5 Pembuatan larutan standar Pb²⁺

Larutan kerja Pb(NO₃)₂ 500 ppm dipipet sebanyak 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; dan 1,6 mL ke dalam labu ukur 100 mL dan diencerkan dengan HNO₃ 1% hingga tanda batas, sehingga diperoleh larutan standar Pb²⁺ dengan konsentrasi 1 ppm, 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, dan 8 ppm.

3.4.1.6 Pembuatan larutan adsorbat Pb^{2+}

Larutan induk Pb^{2+} 1000 ppm diambil secara kuantitatif sebanyak 100, 150, 200, 250, 300, 350, dan 400 mL menggunakan buret, kemudian dipindahkan ke dalam labu ukur 500 mL dan ditambahkan akuadem sampai tanda batas, sehingga diperoleh larutan adsorbat Pb^{2+} dengan konsentrasi 200, 300, 400, 500, 600, 700, dan 800 ppm.

3.4.2 Persiapan dan karkterisasi abu layang batubara

Abu layang batubara yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari power plant PT. Wilmar Nabati Indonesia yang terletak di Kecamatan Kebomas, Kabupaten Gresik.

Abu layang yang akan digunakan sebagai adsorben dikeringkan untuk menghilangkan kandungan air di dalamnya, dengan cara dipanaskan pada temperatur $105^{\circ}C$ dalam oven selama 12 jam. Selanjutnya abu layang diayak dengan ayakan berukuran 200 mesh. Kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan XRF untuk mengetahui komposisi kimianya dan SEM untuk mengetahui morfologi abu layang batubara.

3.4.3 Proses aktivasi abu layang batubara

Sebanyak 31,25 gram abu layang dicampurkan dengan 250 mL larutan NaOH 3M. Campuran tersebut kemudian dipanaskan dan diaduk dengan pengaduk magnet pada temperatur $85-90^{\circ}C$ selama 5 jam. Hasil perlakuan tersebut disaring dengan kertas whatman ukuran 42 menggunakan corong buchner. Residu yang dihasilkan dikeringkan dalam oven pada temperatur $105^{\circ}C$ selama 12 jam (Irani, 2009). Setelah kering, abu layang yang telah diaktivasi

dihaluskan dan diayak dengan ayakan berukuran 200 mesh untuk menghomogenkan ukuran partikel. Abu layang yang telah teraktivasi dengan NaOH tersebut, diamati perubahan fasanya dengan XRF dan perubahan morfologinya dengan SEM. Hasil analisa kemudian dibandingkan dengan abu layang sebelum diaktivasi oleh NaOH.

3.4.4 Penentuan kurva standar larutan ion logam Pb^{2+}

Larutan standar ion logam Pb^{2+} yang telah dibuat, diukur absorbansinya dengan menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 217,03 nm, dengan akuadem sebagai larutan blanko. Absorbansi yang diperoleh dari masing-masing larutan standar dibuat kurva kalibrasi dengan sumbu x sebagai konsentrasi larutan standar (ppm) dan sumbu y sebagai absorbansi (abs) yang dihasilkan oleh larutan standar. Dari kurva didapatkan persamaan regresi linier $y = bx + a$.

3.4.5 Adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang batubara teraktivasi

3.4.5.1 Penentuan waktu kontak optimum adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

Sebanyak 2 gram abu layang yang telah teraktivasi NaOH dicampurkan dengan 100 mL larutan adsorbat Pb^{2+} 200 ppm. Campuran tersebut diaduk menggunakan *shaker* selama 5 menit dengan laju 150 rpm. Kemudian larutan didiamkan dan dilakukan pengambilan larutan adsorbat Pb^{2+} pada variasi waktu kontak 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, dan 150 menit. Selanjutnya, larutan dipindahkan dalam tabung sentrifuge dan dipusingkan sehingga diperoleh larutan yang jernih. Larutan yang diperoleh selanjutnya diukur menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 217,03 nm, dengan akuadem sebagai larutan blanko. Perlakuan yang sama dilakukan juga untuk larutan adsorbat Pb^{2+} dengan variasi konsentrasi 300, 400, 500, 600, 700, dan 800 ppm. Data yang diperoleh, ditentukan grafik hubungan antara x/m (ion logam Pb^{2+} teradsorpsi tiap gram abu

layang batubara) untuk masing-masing variasi konsentrasi terhadap waktu adsorpsi. Adapun waktu kontak optimum ditentukan dengan mengetahui waktu kontak larutan adsorbat Pb^{2+} yang menghasilkan penyerapan ion logam Pb^{2+} terbanyak oleh adsorben (abu layang teraktivasi).

3.4.5.2 Penentuan konsentrasi optimum adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

Sebanyak 2 gram abu layang yang telah teraktivasi NaOH dicampurkan dengan 100 mL larutan adsorbat Pb^{2+} 200 ppm. Campuran tersebut diaduk menggunakan *shaker* selama 5 menit dengan laju 150 rpm. Kemudian larutan didiamkan dan pada waktu kontak optimum dilakukan pengambilan larutan adsorbat Pb^{2+} . Selanjutnya, larutan dipindahkan dalam tabung sentrifuge dan dipusingkan sehingga diperoleh larutan yang jernih. Larutan yang diperoleh selanjutnya diukur menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 217,03 nm, dengan akuadem sebagai larutan blanko. Prosedur ini dilakukan juga untuk adsorbat dengan variasi konsentrasi 300, 400, 500, 600, 700, dan 800 ppm. Data yang diperoleh, ditentukan grafik hubungan antara x/m (ion logam Pb^{2+} teradsorpsi tiap gram abu layang teraktivasi) terhadap konsentrasi. Adapun konsentrasi optimum ditentukan dengan mengetahui konsentrasi larutan adsorbat Pb^{2+} yang menghasilkan penyerapan ion logam Pb^{2+} terbanyak oleh adsorben.

3.4.5.3 Penentuan perbandingan kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang sebelum dan sesudah aktivasi

Sebanyak 2 gram abu layang yang telah teraktivasi NaOH dicampurkan dengan 100 mL larutan adsorbat Pb^{2+} 300 ppm. Campuran tersebut diaduk menggunakan *shaker* selama 5 menit dengan laju 150 rpm. Kemudian larutan didiamkan dan dilakukan pengambilan larutan adsorbat Pb^{2+} pada variasi waktu

kontak 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, dan 150 menit. Selanjutnya, larutan dipindahkan dalam tabung sentrifuge dan dipusingkan sehingga diperoleh larutan yang jernih. Larutan yang diperoleh selanjutnya diukur menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 217,03 nm, dengan akuadem sebagai larutan blanko. Data yang diperoleh, dibandingkan kapasitas adsorpsinya untuk mengetahui seberapa besar perbedaan konsentrasi akhir antara abu layang sebelum dan sesudah dilakukan aktivasi dengan NaOH.

3.4.5.4 Penentuan adsorpsi isoterm larutan ion logam Pb^{2+}

Sebanyak 2 gram abu layang yang telah teraktivasi NaOH dicampurkan dengan 100 mL larutan adsorbat Pb^{2+} dengan tujuh variasi konsentrasi, antara lain 200, 300, 400, 500, 600, 700, dan 800 ppm. Campuran tersebut diaduk menggunakan *shaker* selama 5 menit dengan laju 150 rpm. Kemudian larutan didiamkan dan pada waktu kontak optimum, dilakukan pengambilan larutan adsorbat Pb^{2+} . Selanjutnya, larutan dipindahkan dalam tabung sentrifuge dan dipusingkan sehingga diperoleh larutan yang jernih. Larutan yang diperoleh selanjutnya diukur menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 217,03 nm, dengan akuadem sebagai larutan blanko.

Untuk mengetahui jenis adsorpsi, maka dapat dibuat grafik hubungan antara $C_{eq} / (x/m)$ terhadap C_{eq} untuk adsorpsi isoterm Langmuir dan grafik hubungan antara $\log (x/m)$ terhadap $\log C_{eq}$ untuk adsorpsi isoterm Freundlich. Jenis adsorpsi dapat diketahui dengan mendapatkan harga koefisien determinasi (R^2) pada dua grafik tersebut, harga R^2 yang mendekati 1 merupakan jenis adsorpsi yang sesuai.

3.4.5.5 Penentuan kinetika adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

Sebanyak 2 gram abu layang yang telah teraktivasi NaOH dicampurkan dengan 100 mL larutan adsorbat Pb^{2+} dengan konsentrasi optimum yang telah didapatkan pada prosedur sebelumnya. Campuran tersebut diaduk menggunakan *shaker* selama 5 menit dengan laju 150 rpm. Kemudian larutan didiamkan dan dilakukan pengambilan larutan adsorbat Pb^{2+} pada variasi waktu kontak 15, 30, 45, 60, dan 75 menit. Selanjutnya, larutan dipindahkan dalam tabung sentrifuge dan dipusingkan sehingga diperoleh larutan yang jernih. Larutan yang diperoleh selanjutnya diukur menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 217,03 nm, dengan akuadem sebagai larutan blanko.

Data yang didapat adalah konsentrasi larutan adsorbat Pb^{2+} sisa setelah berinteraksi dengan abu layang batubara teraktivasi NaOH. Data konsentrasi awal dan akhir larutan adsorbat Pb^{2+} ini digunakan dalam penentuan kinetika adsorpsi.

Perhitungan kinetika pengurangan konsentrasi ion Pb^{2+} dalam proses adsorpsi dengan adsorben abu layang batubara dapat ditentukan dengan persamaan pada Tabel 2.4, dimana harga koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 merupakan orde reaksi kinetika yang sesuai.

3.4.5.6 Penentuan termodinamika adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

Dari waktu kontak optimum dan konsentrasi optimum, selanjutnya dilakukan adsorpsi dengan memperhatikan faktor temperatur. Dimana sebanyak 2 gram abu layang yang telah teraktivasi NaOH dicampurkan dengan 100 mL larutan adsorbat Pb^{2+} pada konsentrasi optimum. Campuran tersebut diaduk menggunakan *shaker* selama 5 menit dengan laju 150 rpm. Kemudian larutan didiamkan dan pada waktu optimum dilakukan pengambilan larutan adsorbat Pb^{2+} . Selanjutnya, larutan

dipindahkan dalam tabung sentrifuge dan dipusingkan sehingga diperoleh larutan yang jernih. Larutan yang diperoleh selanjutnya diukur menggunakan instrumen AAS pada panjang gelombang 217,03 nm, dengan akuadem sebagai larutan blanko. Untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap absorbansi, prosedur ini dilakukan juga pada variasi temperatur, sebesar 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, dan 70°C.

Dari hasil absorbansi yang diperoleh, selanjutnya dapat dihitung nilai K_{ads} dengan membagi antara $(x/m) / C_{eq}$. Kemudian dibuat grafik hubungan antara $\ln K_{ads}$ (K_{ads} adalah konstanta kesetimbangan termodinamika adsorpsi) terhadap $1/T$, sehingga dapat diketahui harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}), dan entropi adsorpsi (ΔS_{ads}).

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1. Persiapan dan Karakterisasi Abu Layang Batubara

Abu layang batubara merupakan hasil proses pembakaran batubara yang sebagian besar berupa butiran halus dan terbang mengikuti aliran gas, keluar dari ketel uap melalui cerobong. Kemudian abu layang ini dipisahkan dari gas buang dengan menggunakan alat pengendap listrik statis (*electrostatic precipitator*) (Muchjidin, 2006).

Abu layang batubara yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari power plant PT. Wilmar Nabati Indonesia yang terletak di Kecamatan Kebomas, Kabupaten Gresik. Abu layang batubara yang didapatkan berupa butiran-butiran halus, berukuran 200 μm dengan warna abu-abu kebiruan. Warna abu layang batubara ini dipengaruhi oleh waktu pembakaran pada tungku pembakaran yang menggunakan bahan bakar batubara. Apabila warna abu layang semakin muda, maka hasil pembakaran semakin sempurna dan mutunya makin baik, atau dapat dikatakan semakin cerah warna yang dihasilkan, maka semakin rendah kandungan karbonnya. Umumnya warna abu layang batubara, adalah abu-abu, kecoklatan dan bervariasi sampai hitam (Sukandarrumidi, 2009).

Pada tahap persiapan, abu layang yang telah diperoleh di oven terlebih dahulu pada temperatur 105°C selama 12 jam. Hal tersebut bertujuan untuk menghilangkan kandungan air dalam abu layang (Irani, 2009). Selanjutnya abu layang diayak dengan menggunakan ayakan berukuran 200 mesh untuk

mendapatkan ukuran partikel yang lebih kecil dan homogen. Ukuran partikel abu layang yang lebih kecil dapat memperbesar luas permukaan abu layang, sehingga semakin banyak abu yang dapat bereaksi dengan aktivator (NaOH).

Abu layang mempunyai mutu yang beragam tergantung pada mutu dan jenis batubara, efisiensi pembakaran, kehalusan serbuk batubara, dimensi tungku untuk membakar batubara, dan cara penangkapan abu layang dari pembakaran batubara (Neville, 1996). Sehingga komposisi kimia abu layang bergantung pada jenis batubara yang dihasilkan. Adapun abu layang yang dihasilkan dari sumber yang sama, memiliki komposisi kimia yang tidak selalu sama. Oleh karena itu, abu layang perlu dianalisis komposisi kimianya dengan Fluoresensi Sinar-X (XRF). Hasil analisis XRF berupa senyawa oksida seperti SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , dan beberapa senyawa lain. Komposisi kimia abu layang PT. Wilmar Nabati Indonesia sebelum aktivasi ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Komposisi kimia abu layang PT. Wilmar Nabati Indonesia sebelum aktivasi

Komponen	Kadar (% b/b)	Komponen	Kadar (% b/b)
Al	4,3	Ni	0,20
Si	10,6	Cu	0,089
S	2,6	Zn	0,09
K	1,7	Sr	0,95
Ca	29,7	Mo	4,5
Ti	1,0	In	1,0
V	0,06	Ba	0,63
Cr	0,11	Eu	0,3
Mn	0,47	Re	0,3
Fe	41,1	Hg	0,2

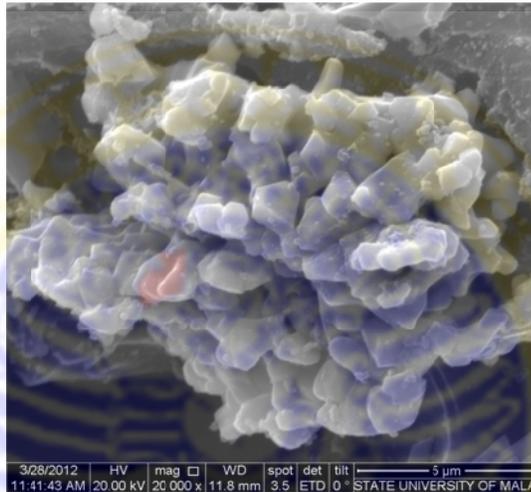
Berdasarkan *American Nasional Standards* yang diterbitkan oleh *the American Society for Testing and Materials* (ASTM) C 618, abu layang dapat digolongkan menjadi dua kelas berdasarkan adanya perbedaan komposisi kimia

yaitu abu layang tipe C dan abu layang tipe F. Dengan memperhatikan Tabel 4.1 diatas, maka abu layang PT. Wilmar Nabati Indonesia tergolong dalam tipe C dengan kandungan CaO sebesar 29,7%, SiO₂ 10,6%, Al₂O₃ 4,3%, dan Fe₂O₃ 41,1%. Hal ini sesuai dengan Sukandarrumidi (2009), yang menjelaskan bahwa abu layang tipe C mengandung CaO lebih dari 10% dengan total senyawa SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ kurang dari 70%. Sedangkan abu layang tipe F mengandung kalsium oksida (CaO) kurang dari 10% serta mengandung kurang dari 70 % SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃. Abu layang tipe C dihasilkan dari pembakaran batubara jenis *lignite* dan *subbituminous*, sedangkan abu layang tipe F dihasilkan dari pembakaran batubara jenis *anthracite* dan *bituminous*.

Pada hasil XRF diketahui bahwa kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ dalam abu layang cukup besar yang memungkinkan abu layang digunakan sebagai adsorben. Dengan besarnya kadar kedua komponen tersebut dalam abu layang berarti banyak pusat-pusat aktif dari permukaan padatan yang dapat berinteraksi dengan adsorbat, misalnya ion-ion logam (Jumaeri, 1995). Proses adsorpsi dapat berlangsung secara efektif apabila ada kesesuaian sifat antara adsorben dengan adsorbat. Bila sisi aktif bersifat basa atau berupa anion maka adsorpsi maksimal terjadi pada spesies adsorbat yang bersifat asam atau kation, demikian juga sebaliknya.

Abu layang batubara dari PT. Wilmar Nabati Indonesia ini tidak mengandung oksida Pb sehingga tidak menghambat penentuan nilai kapasitas adsorpsi ion logam Pb²⁺ dan juga tidak memerlukan perlakuan khusus untuk menghilangkan kandungan logam tersebut.

Selain data komposisi kimia abu layang batubara, dapat diketahui pula morfologi abu layang pada skala mikro, yang diamati dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Sampel yang diuji merupakan abu layang murni sebelum dilakukan aktivasi. Morfologi abu layang batubara ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Morfologi abu layang batubara sebelum aktivasi (perbesaran 20.000 kali)

Berdasarkan Gambar 4.1, dapat diketahui bahwa abu layang batubara memiliki permukaan yang terlihat halus dan berbentuk bulatan. Partikel yang berbentuk bulatan menunjukkan adanya kandungan aluminosilikat (Si-Al) dalam abu layang. Partikel abu layang ini dihasilkan dari pendinginan produk lelehan dari pembakaran batubara sehingga memiliki ukuran partikel yang sangat variatif (White dan Case, 1990). Partikel ini nantinya akan diaktivasi untuk menghasilkan partikel yang kasar dan memiliki pori yang lebih banyak, agar lebih efektif dalam kegunaannya sebagai adsorben.

4.2 Proses Aktivasi Abu Layang Batubara

Komposisi kimia abu layang menunjukkan bahwa sebagian besar tersusun atas oksida logam, terutama SiO_2 dan Al_2O_3 yang mempunyai gugus aktif sehingga dimungkinkan abu dapat digunakan sebagai adsorben logam berat. Namun, pembakaran batubara yang memerlukan suhu tinggi sering menghasilkan abu layang dengan kandungan SiO_2 dalam fase kristalin, dan kandungan karbon yang tidak terbakar cukup tinggi, dimana hal ini akan menurunkan kapasitas adsorpsi ion logam berat oleh abu layang. Penurunan kapasitas adsorpsi ini dapat dicegah dengan mengaktivasi adsorben. Aktivasi dapat dilakukan dengan dua cara, yakni aktivasi secara kimia dan aktivasi secara fisika.

Aktivasi secara kimia dilakukan dengan menambahkan bahan kimia atau bahan pengaktif seperti seng klorida (ZnCl_2), natrium karbonat (NaCO_3), magnesium karbonat (MgCO_3), natrium hidroksida (NaOH), kalsium klorida (CaCl_2), natrium klorida (NaCl), kalium hidroksida (KOH) dan lain sebagainya. Adanya reaksi kimia yang terjadi membuat luas permukaan partikel akan lebih luas bila dibandingkan dengan ukuran partikel sebelum aktivasi, sehingga kemampuan adsorben yang telah diaktivasi menjadi besar. Sedangkan aktivasi secara fisika dilakukan dengan cara destilasi kering yaitu tanpa adanya oksigen pada temperatur tinggi. Adapun aktivasi secara fisika umumnya dilakukan dengan bantuan panas, uap dan gas CO_2 .

Pada penelitian ini, aktivasi abu layang batubara dilakukan dengan aktivasi secara kimia, dimana digunakan larutan basa kuat seperti NaOH . Menurut Davidovits dalam penelitian Irani (2009), larutan alkali dapat digunakan untuk

bereaksi dengan Si dan Al dalam abu layang batubara, sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.

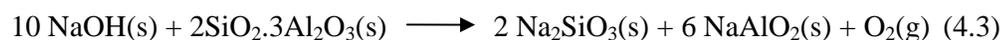
Proses aktivasi dilakukan dengan mencampurkan abu layang batubara dalam NaOH 3M, dimana perbandingan abu layang dengan NaOH sebesar 1:8 (Irani, 2009). Aktivasi dilakukan selama 5 jam pada temperatur 85-90°C. Hasil perlakuan tersebut disaring dan residu yang dihasilkan dikeringkan dalam oven pada temperatur 105°C selama 12 jam untuk menghilangkan kandungan airnya. Setelah kering, abu layang yang telah diaktivasi dihaluskan dan diayak dengan menggunakan ayakan berukuran 200 mesh untuk menghomogenkan ukuran partikel. Ukuran partikel yang lebih kecil akan menyebabkan luas permukaan abu layang teraktivasi semakin besar sehingga semakin banyak adsorben yang dapat kontak dengan adsorbat dalam hal ini larutan ion logam Pb^{2+} .

Proses aktivasi bertujuan untuk menghancurkan lapisan permukaan partikel abu layang yang berbentuk *glassy* sangat rapat dan stabil. Rantai *glassy* tersebut memiliki kandungan Si dan Al yang tinggi. Oleh karena itu lapisan permukaan abu layang batubara yang berbentuk *glassy* ini harus dihancurkan agar gugus aktif didalamnya yang berpori dan amorf serta memiliki aktifitas tinggi keluar ke permukaan abu layang batubara.

Penambahan larutan NaOH yang bersifat basa kuat ini, dapat mengubah komposisi abu layang dengan cara merusak lapisan luar abu layang batubara. Dengan rusaknya lapisan luar abu layang, maka gugus-gugus aktif yang ada didalamnya, seperti silika dan alumina, keluar ke permukaan abu layang. Bila proses aktivasi abu layang dilakukan pada konsentrasi OH^- yang sangat tinggi,

maka rantai *glassy* silika-alumina yang rapat akan cepat rusak dan menyebabkan gugus aktif yang ada di dalam abu layang akan cepat terlarut pula (Yan dkk., 2003 dan Goni dkk., 2003). Silika dan alumina ini bereaksi dengan larutan NaOH yang akan membentuk produk garam silikat dan aluminat. Garam yang terbentuk ini mempunyai sifat mudah larut. Dengan melarutnya garam-garam tersebut dalam air, maka akan menyebabkan jumlah kelarutan Si dan Al semakin tinggi, sehingga dapat menurunkan derajat kristalinitas silika oksida (SiO_2) yang ada dalam abu layang. Berkurangnya derajat kristalinitas SiO_2 ternyata mampu menurunkan kadar Pb dalam sampel limbah lebih banyak (Indrawati, 2008). Hal ini dikarenakan silika telah bereaksi dan larut dalam NaOH, yang membentuk fasa amorf. Dalam hal ini, abu layang dengan fase amorf (tingkat derajat kristalinitas rendah), lebih efektif digunakan sebagai adsorben. Sementara itu menurut Mahatmanti (2010), perlakuan dengan NaOH dapat menurunkan derajat kristalinitas dan meningkatkan kapasitas adsorpsi hingga hampir 100%.

Menurut Ojha, dkk (2004), reaksi yang terjadi selama proses peleburan antara komponen abu layang SiO_2 dan Al_2O_3 dengan NaOH adalah sebagai berikut :



Abu layang yang telah teraktivasi NaOH kemudian dikarakterisasi dengan Fluoresensi Sinar-X (XRF) untuk mengetahui komposisi abu layang batubara. Komposisi kimia dari abu layang sesudah aktivasi ditunjukkan pada Tabel 4.2.

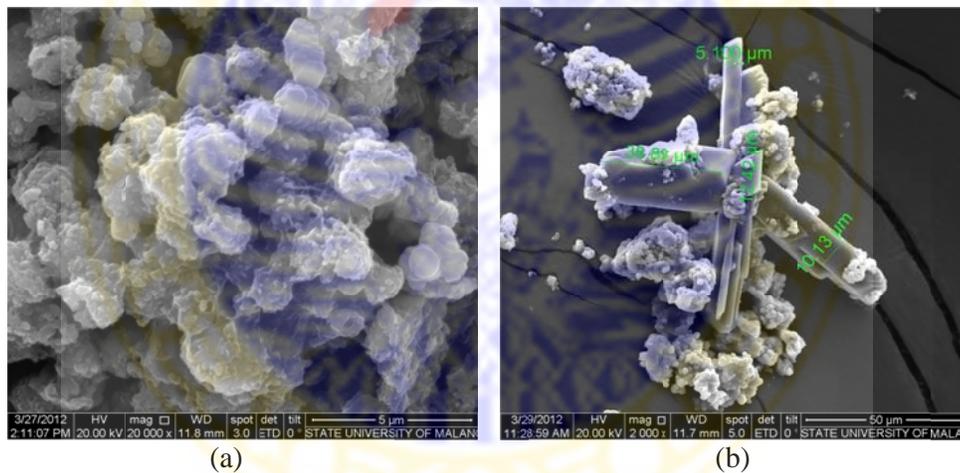
Tabel 4.2 Komposisi kimia abu layang PT. Wilmar Nabati Indonesia sesudah aktivasi

Komponen	Kadar (% b/b)	Komponen	Kadar (% b/b)
Al	4,4	Fe	47,3
Si	9,72	Ni	0,30
P	0,2	Cu	0,14
K	1,1	Zn	0,05
Ca	27,6	Sr	1,2
Ti	1,0	Mo	4,5
V	0,06	Ba	0,75
Cr	0,15	Eu	0,4
Mn	0,52	Re	0,61

Berdasarkan Tabel 4.1 dan 4.2 menunjukkan bahwa komposisi kimia abu layang mengalami perubahan sesudah dilakukan aktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa abu layang dengan NaOH sebagai zat pengaktif mampu mengubah komposisi kandungan abu layang dan menyebabkan adanya perubahan prosentase jumlah unsur atau senyawa dalam abu layang. Unsur Si pada abu layang sebelum diaktivasi sebesar 10,6 %, sedangkan sesudah aktivasi berkurang menjadi 9,72%. Namun pada unsur Al, tidak terjadi perubahan yang signifikan dimana kadar Al yang semula 4,3% menjadi 4,4%. Penurunan kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ sebelum dan sesudah aktivasi disebabkan oleh sebagian Si terlarut hilang ketika proses aktivasi berlangsung. Adapun SiO₂ dan Al₂O₃ dari abu layang tidak semua dapat larut sempurna dalam larutan alkali, hanya Si dan Al berfasa *amorf* yang lebih mudah larut dalam larutan alkali (Xu dan Van Deventer, 2002). Adapun unsur logam Indium (In) dan Merkuri (Hg) pada abu layang sebelum aktivasi tidak ditemukan kembali dalam hasil XRF abu layang sesudah aktivasi, hal ini disebabkan logam tersebut terlepas pada proses pencucian dengan NaOH.

Selain penurunan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 , yang menjadi perhatian adalah kandungan Fe_2O_3 yang semakin meningkat. Hal ini dikarenakan, Fe bereaksi dengan OH^- dalam larutan basa alkali membentuk Fe^{3+} , dimana Fe^{3+} akan membentuk endapan $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Adapun pemakaian OH^- pada larutan akan memperlambat proses pelarutan partikel-partikel abu layang seperti Si dan Al (Van Deventer, dkk., 2006).

Morfologi abu layang pada skala mikro diamati dengan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Morfologi abu layang batubara sesudah aktivasi ditunjukkan pada Gambar 4.2.

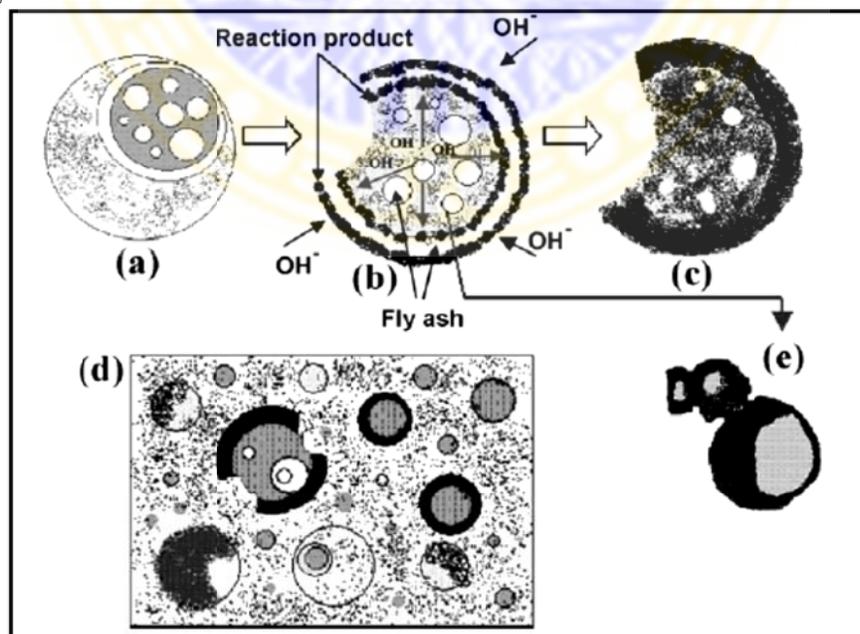


Gambar 4.2 (a) Morfologi abu layang batubara sesudah aktivasi (perbesaran-20.000 kali) dan (b) Morfologi abu layang batubara sesudah aktivasi (perbesaran 2.000 kali)

Berdasarkan Gambar 4.2 (a), dapat diketahui bahwa abu layang batubara sesudah aktivasi memiliki permukaan yang berbeda dengan abu layang sebelum aktivasi. Pada abu layang yang telah teraktivasi dengan NaOH ini tampak lebih kasar dan pecah-pecah. Selama dalam proses aktivasi, larutan NaOH secara terus-menerus berinteraksi dengan partikel-partikel abu layang yang menyebabkan permukaan abu layang menjadi kasar dan pori yang terbentuk menjadi lebih lebar.

Sedangkan pada Gambar 4.2 (b), teramati keretakan yang terjadi pada abu layang. Selain itu tampak bahwa abu layang diselubungi oleh kristal-kristal dengan ukuran panjang sekitar 9-12 μm . Selain itu tampak bahwa abu layang dikelilingi oleh banyak kristal-kristal, baik kristal yang berbentuk jarum maupun kristal yang berbentuk batangan, walaupun tidak dilakukan analisis khusus untuk kristal pada penelitian ini, namun kemungkinan besar kristal-kristal ini adalah zeolite (Irani, 2009). Kristal-kristal tersebut juga mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi, sebab mengandung silika dan alumina (Wahyuni, 2010). Pertumbuhan inti kristal yang terjadi dengan cepat dalam permukaan abu layang dijelaskan oleh Jansen (1991) yakni bahwa adanya pengotor dalam reaktan akan menyebabkan percepatan terbentuknya kristal dan terbentuknya sifat-sifat kimia zeolit.

Menurut Fernandez-Jimenez, dkk., (2005) dalam penelitian yang dilakukan Irani (2009), diagram aktivasi abu layang batubara oleh larutan alkali dapat digambarkan melalui Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Diagram aktivasi alkali pada abu layang

Gambar 4.3 (a), menunjukkan tahap penyerangan awal pada permukaan abu layang. Penyerangan alkali terhadap abu layang ini terjadi dengan merusak rantai silika dan alumina pada permukaan abu layang. Peningkatan konsentrasi larutan alkali yang menyerang abu layang ini menyebabkan kerusakan rantai silika dan alumina semakin meningkat sehingga perluasan lubang pada permukaan abu layang semakin besar. Gambar 4.3 (b), menunjukkan bahwa partikel-partikel yang terdapat didalam abu layang keluar akibat aktivasi oleh NaOH. Sedangkan larutan NaOH akan masuk kedalam abu layang kemudian gugus-gugus aktif yang terdapat didalam silika dan alumina akan bereaksi dengan larutan NaOH membentuk produk-produk silikat dan aluminat. Produk reaksi yang dihasilkan akan memenuhi lapisan abu layang baik di dalam maupun diluar permukaannya, sehingga hampir semua partikel abu layang itu bereaksi dengan NaOH seperti yang terlihat pada Gambar 4.3 (c). Tahapan selanjutnya adalah tahap pelarutan, dimana larutan alkali akan menembus dan kontak dengan partikel-partikel yang terdapat didalam lapisan abu layang, seperti yang terlihat pada Gambar 4.3 (d). Sehingga berakibat pada produk reaksi yang terbentuk berupa endapan pejal yang akan menutupi permukaan abu layang. Endapan seperti kerak ini menyebabkan permukaan abu layang menjadi kasar seperti terlihat pada Gambar 4.3 (e). Pada gambar tersebut, menunjukkan proses yang terjadi tidak sepenuhnya sama melainkan bervariasi, tergantung dari distribusi ukuran partikel dan kondisi reaksi kimia seperti pH. Perbedaan morfologi dari abu layang hasil aktivasi meliputi morfologi partikel abu layang yang tidak bereaksi, partikel abu layang yang terserang larutan alkali, produk reaksi dan lain-lain.

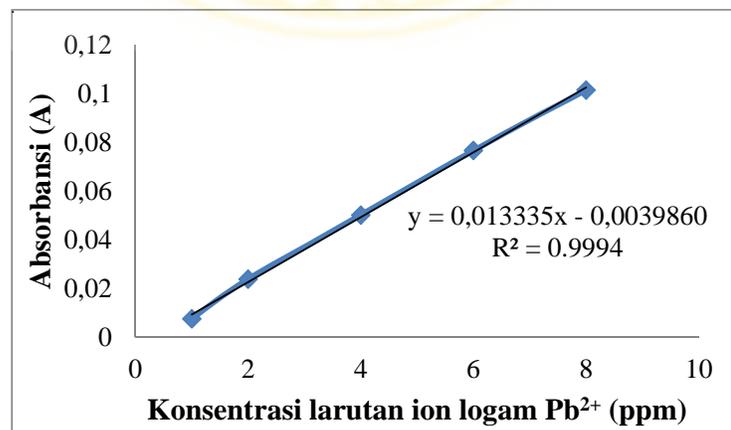
4.3 Penentuan Kurva Standar Larutan Ion Logam Pb²⁺

Penentuan kurva standar ion logam Pb²⁺ dilakukan dengan cara mengukur absorbansi larutan standar ion logam Pb²⁺ dengan konsentrasi 1, 2, 4, 6, dan 8 ppm, dengan menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) pada panjang gelombang maksimum logam timbal yaitu 217,03 nm. Data hasil pengukuran absorbansi untuk kurva standar larutan ion logam Pb²⁺ dalam berbagai konsentrasi dapat dilihat pada Tabel 4.3, sebagai berikut :

Tabel 4.3 Data hasil pengukuran absorbansi untuk kurva standar larutan ion logam Pb²⁺ dalam berbagai konsentrasi

Konsentrasi larutan ion logam Pb ²⁺ (ppm)	Absorbansi pada λ 217,03 nm (Abs)
1	0,0076
2	0,0239
4	0,0502
6	0,0768
8	0,1016

Dari data yang diperoleh dibuat kurva standar larutan ion logam Pb²⁺ antara absorbansi terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb²⁺. Adapun kurva absorbansi terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb²⁺ ditunjukkan pada Gambar 4.4.

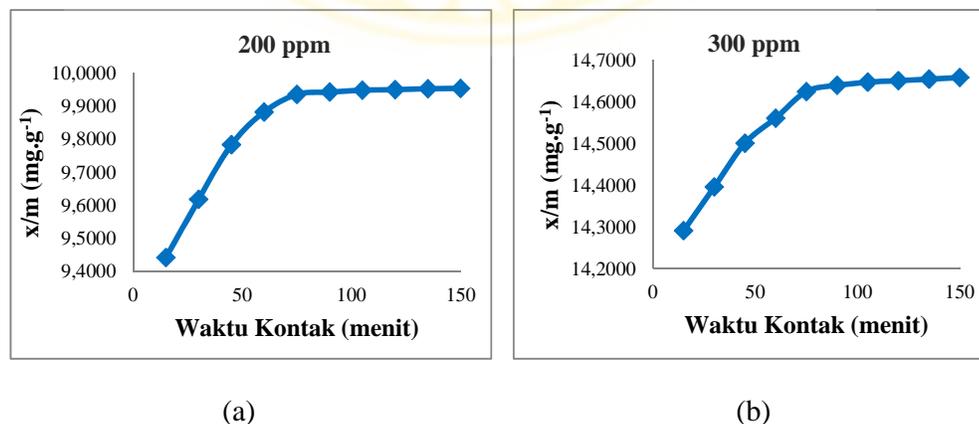


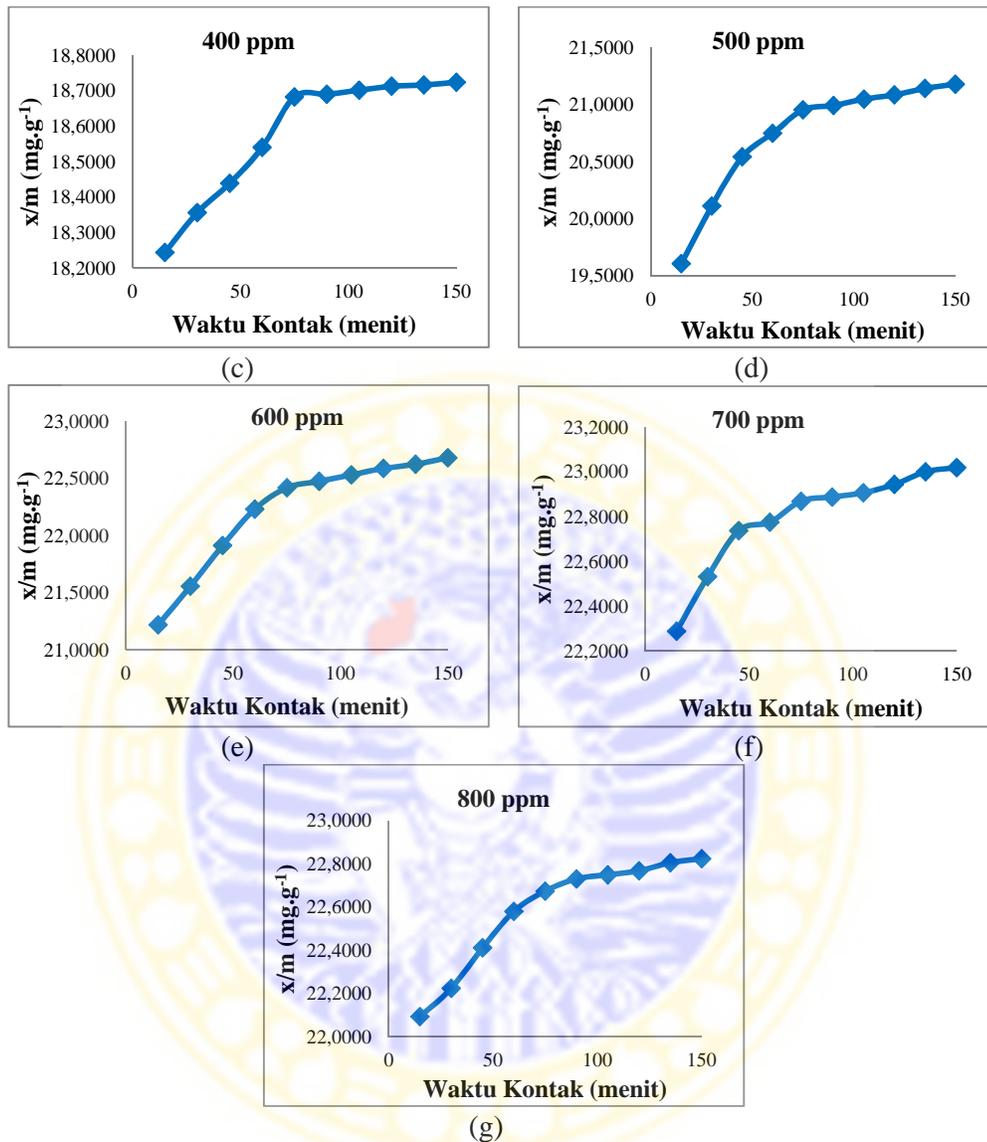
Gambar 4.4 Kurva standar larutan ion logam Pb²⁺

4.4. Adsorpsi Larutan Ion Logam Pb^{2+} oleh Abu Layang Batubara Teraktivasi

4.4.1 Penentuan waktu kontak optimum adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

Penentuan waktu kontak optimum adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} dilakukan dengan mereaksikan larutan ion logam Pb^{2+} dengan tujuh variasi konsentrasi yakni 200, 300, 400, 500, 600, 700, dan 800 ppm terhadap abu layang teraktivasi, dan dilakukan pengambilan larutan adsorbat Pb^{2+} dengan berbagai variasi waktu kontak. Adapun larutan adsorbat sisa diukur absorbansinya dengan menggunakan AAS pada panjang gelombang 217,03 nm. Pengaruh waktu kontak larutan dapat diketahui dengan memasukkan data absorbansi larutan ion logam Pb^{2+} sisa ke dalam persamaan regresi kurva standar larutan ion logam Pb^{2+} , sehingga diperoleh konsentrasi akhir larutan ion logam Pb^{2+} . Data pengaruh lama waktu kontak terhadap jumlah larutan ion logam Pb^{2+} yang teradsorpsi tiap gram abu layang teraktivasi dalam berbagai variasi konsentrasi terdapat pada Lampiran 1. Adapun grafik hubungan antara kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap waktu kontak (t) pada berbagai konsentrasi, ditunjukkan pada Gambar 4.5 sebagai berikut.





Gambar 4.5 Grafik hubungan antara kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap waktu kontak (t); dimana (a) konsentrasi 200 ppm; (b) konsentrasi 300 ppm; (c) konsentrasi 400 ppm; (d) konsentrasi 500 ppm; (e) konsentrasi 600 ppm; (f) konsentrasi 700 ppm; dan (g) konsentrasi 800 ppm

Waktu kontak optimum ditentukan dengan mengetahui waktu kontak yang menghasilkan penyerapan ion logam Pb^{2+} terbanyak oleh adsorben (abu layang teraktivasi). Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui bahwa pada waktu kontak

15 sampai 75 menit terjadi kenaikan adsorpsi yang cukup besar. Hal ini dikarenakan semakin lama waktu kontak yang terjadi pada proses adsorpsi, maka semakin banyak partikel-partikel abu layang batubara yang bertumbukan dan berinteraksi dengan larutan ion logam Pb^{2+} sehingga kemampuan adsorpsinya semakin meningkat. Waktu kontak optimum larutan ion logam Pb^{2+} terjadi pada waktu 75 menit, dimana pada waktu tersebut terjadi penyerapan larutan ion logam Pb^{2+} paling banyak. Sedangkan pada waktu diatas 75 menit mulai terjadi penjumlahan, dimana kemampuan adsorben mulai menurun. Hal ini dikarenakan gugus aktif pada permukaan adsorben telah jenuh oleh larutan ion logam Pb^{2+} , sehingga kurang mampu mengadsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} dengan baik. Semakin jenuh abu layang untuk menyerap adsorbat Pb^{2+} , maka proses desorpsi sangat dimungkinkan untuk terjadi, akibatnya adsorbat Pb^{2+} yang sudah teradsorpsi oleh adsorben mampu untuk terlepas kembali (Zuhriyah, 2005). Contoh perhitungan penentuan kapasitas adsorpsi terdapat pada Lampiran 2.

4.4.2 Penentuan konsentrasi optimum adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

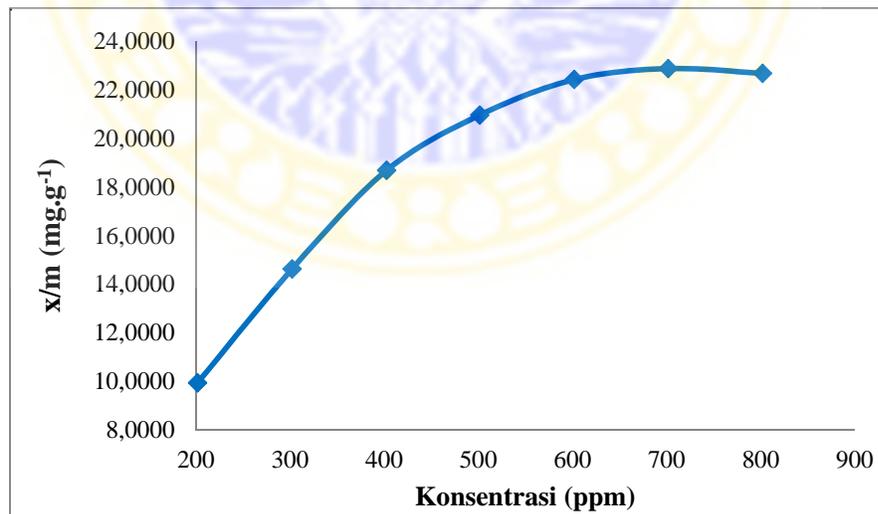
Penentuan konsentrasi optimum larutan ion logam Pb^{2+} dilakukan dengan cara mereaksikan abu layang teraktivasi dengan larutan ion logam Pb^{2+} pada beberapa variasi konsentrasi. Variasi konsentrasi yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain 200, 300, 400, 500, 600, 700, dan 800 ppm. Larutan adsorbat sisa diambil pada waktu kontak optimum yaitu 75 menit, dan ditentukan absorbansinya dengan AAS pada panjang gelombang 217,03 nm. Hasil absorbansi larutan ion logam Pb^{2+} dimasukkan ke dalam persamaan regresi kurva standar larutan ion logam Pb^{2+} , sehingga diperoleh konsentrasi akhir dari larutan ion

logam Pb^{2+} setelah berinteraksi dengan abu layang teraktivasi. Data pengaruh kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+} , dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data pengaruh kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+}

Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Terhitung atau C_{eq} (ppm)	Ion Pb^{2+} Teradsorpsi atau x/m ($mg.g^{-1}$)
200	201,6723	9,9361
300	302,1597	14,6248
400	402,5947	18,6829
500	501,5823	20,9573
600	602,0697	22,4196
700	701,8073	22,8695
800	802,1372	22,6742

Grafik hubungan antara kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+} , ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik hubungan antara kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi (x/m) terhadap konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+}

Berdasarkan grafik optimasi konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+} diketahui bahwa pada konsentrasi 200 ppm hingga 600 ppm terjadi kenaikan adsorpsi. Hal ini dikarenakan semakin besar konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+} , maka semakin banyak partikel-partikel abu layang yang bertumbukan dan berinteraksi dengan larutan ion logam Pb^{2+} , sehingga kemampuan adsorpsi semakin meningkat. Konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+} optimum terjadi pada konsentrasi 600 ppm dengan kapasitas adsorpsi sebesar $22,4196 \text{ mg.g}^{-1}$. Sedangkan pada konsentrasi di atas 600 ppm, praktis kapasitas adsorpsinya tetap. Hal ini dikarenakan gugus aktif pada permukaan adsorben telah jenuh oleh larutan ion logam Pb^{2+} , sehingga terdapat larutan ion logam Pb^{2+} yang tidak bisa terserap oleh abu layang batubara.

4.4.3 Penentuan perbandingan kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang sebelum dan sesudah aktivasi

Abu layang sebelum dan sesudah aktivasi telah menunjukkan morfologi dan komposisi kimia yang berbeda, hal ini sangat berpengaruh pada kapasitas adsorpsi yang dihasilkan. Dimana dilakukan perbandingan antara abu layang sebelum dan sesudah aktivasi menggunakan NaOH, dengan mereaksikan abu tersebut ke dalam larutan ion logam Pb^{2+} 300 ppm. Selanjutnya pada tiap variasi waktu kontak, yakni 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, dan 150 menit larutan adsorbat diambil dan dianalisa kadar konsentrasi sisa larutan ion logam Pb^{2+} tersebut. Perbandingan kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data perbandingan kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang sebelum dan sesudah aktivasi

Jenis Abu	Waktu Kontak (menit)	Kons. Awal (ppm)	A	f.p	C_{eq} (ppm)	x/m ($mg.g^{-1}$)	Efisiensi Penghilangan (%)
Abu Layang Sebelum Aktivasi	15	300	0,0173	50	79,8125	11,1174	73,5860
	30		0,0981	10	76,5549	11,2802	74,6641
	45		0,0937	10	73,2553	11,4452	75,7561
	60		0,0898	10	70,3307	11,5915	76,7240
	75		0,0853	10	66,9561	11,7602	77,8408
	90		0,0805	10	63,3565	11,9402	79,0321
	105		0,0778	10	61,3318	12,0414	79,7022
	120		0,0749	10	59,1571	12,1501	80,4219
	135		0,0725	10	57,3573	12,2401	81,0176
	150		0,0693	10	54,9576	12,3601	81,8117
Abu Layang Setelah Aktivasi	15	300	0,0178	10	16,3374	14,2911	94,5931
	30		0,0150	10	14,2377	14,3961	95,2880
	45		0,0122	10	12,1380	14,5011	95,9829
	60		0,0106	10	10,9381	14,5611	96,3800
	75		0,0089	10	9,6633	14,6248	96,8019
	90		0,0085	10	9,3633	14,6398	96,9012
	105		0,0083	10	9,2133	14,6473	96,9509
	120		0,0082	10	9,1384	14,6511	96,9756
	135		0,0081	10	9,0634	14,6548	97,0005
	150		0,0080	10	8,9884	14,6586	97,0253

Dimana kapasitas adsorpsi pada waktu kontak optimum yakni 75 menit untuk abu layang sebelum aktivasi adalah $11,7602 \text{ mg.g}^{-1}$ dengan prosentase efisiensi penghilang larutan ion logam Pb^{2+} sebesar 77,8408%. Sedangkan pada abu layang sesudah aktivasi, memiliki kapasitas adsorpsi sebesar $14,6248 \text{ mg.g}^{-1}$ dengan prosentase efisiensi penghilangan larutan ion logam Pb^{2+} sebanyak 96,8019%. Dari hasil tersebut, jelas tampak bahwa abu layang sesudah aktivasi memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih besar dibandingkan abu layang murni tanpa aktivasi.

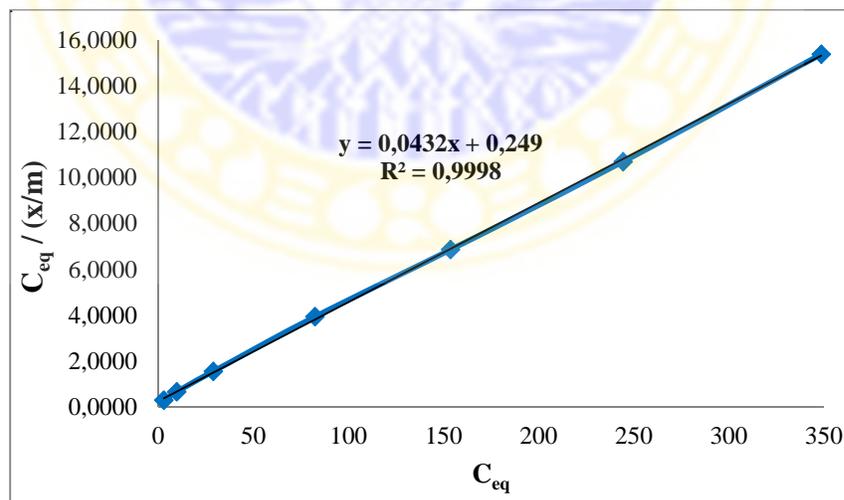
4.4.4 Penentuan adsorpsi isoterm larutan ion logam Pb^{2+}

Penentuan adsorpsi isoterm dilakukan dengan membuat grafik persamaan adsorpsi isoterm Langmuir dan adsorpsi isoterm Freundlich. Data yang digunakan untuk menentukan adsorpsi isoterm Langmuir ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Adsorpsi isoterm

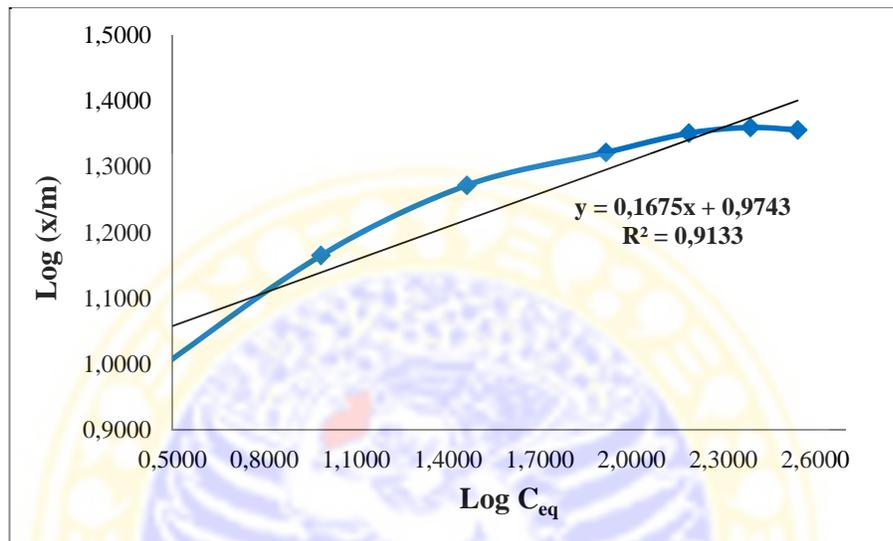
Kons. Awal (ppm)	A	f.p	C_{eq} (ppm)	x/m ($mg \cdot g^{-1}$)	$C_{eq} / (x/m)$ ($g \cdot L^{-1}$)	Log C_{eq} (ppm)	Log x/m ($mg \cdot g^{-1}$)
200	0,0351	-	2,9311	9,9361	0,2950	0,4670	0,9972
300	0,0089	10	9,6633	14,6248	0,6607	0,9851	1,1651
400	0,0346	10	28,9359	18,6829	1,5488	1,4614	1,2714
500	0,0180	50	82,4372	20,9573	3,9336	1,9161	1,3213
600	0,0370	50	153,6783	22,4196	6,8546	2,1866	1,3506
700	0,0612	50	244,4169	22,8695	10,6875	2,3881	1,3593
800	0,0890	50	348,6539	22,6742	15,3767	2,5424	1,3555

Pada persamaan adsorpsi isoterm Langmuir ditentukan dengan membuat grafik hubungan $C_{eq} / (x/m)$ terhadap C_{eq} yang ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik adsorpsi isoterm Langmuir

Sedangkan untuk adsorpsi isoterm Freundlich ditentukan dengan membuat grafik hubungan antara $\text{Log } (x/m)$ terhadap $\text{Log } C_{eq}$. Grafik dari adsorpsi isoterm Freundlich, ditampilkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik adsorpsi isoterm Freundlich

Berdasarkan gambar 4.7 dan 4.8, dapat diketahui bahwa pada adsorpsi isoterm Langmuir memiliki nilai R^2 sebesar 0,9998, sedangkan pada adsorpsi isoterm Freundlich memiliki nilai R^2 sebesar 0,9133. Dengan melihat harga koefisien determinasi (R^2) pada dua grafik tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa jenis adsorpsi yang sesuai untuk adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang batubara mendekati persamaan adsorpsi isoterm Langmuir, ditinjau dari kelinieran grafik yang mendekati 1.

Dari grafik adsorpsi isoterm Langmuir diperoleh persamaan sebagai berikut, $y = 0,0432x + 0,249$. Dengan memasukkan persamaan regresi tersebut ke dalam persamaan adsorpsi isoterm Langmuir, yakni :

$$\frac{C_{eq}}{(x/m)} = \frac{1}{a \cdot b} + \frac{1}{b} \cdot C_{eq} \quad (4.1)$$

maka dapat diketahui harga konstanta adsorpsi (a) sebesar 0,1735 dan konstanta empiris (b) sebesar 23,1481. Adsorpsi isoterm Langmuir ini menunjukkan bahwa adsorben abu layang batubara memiliki permukaan yang homogen dan hanya dapat mengadsorpsi molekul-molekul larutan ion logam Pb^{2+} pada tempat-tempat tertentu, sehingga lapisan teradsorpsi hanya dapat setebal satu molekul atau membentuk satu lapisan, sedangkan jumlah molekul yang maksimal dapat diadsorpsi tidak dapat lebih dari jumlah tempat yang tersedia. Dengan kata lain teori Langmuir ini valid untuk adsorpsi lapisan tunggal pada permukaan dengan jumlah terbatas pada tempat yang sama (Lando dan Maron, 1974).

4.4.5 Penentuan kinetika adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

Penentuan kinetika adsorpsi digunakan untuk menentukan orde reaksi dari proses adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi. Adapun penentuan orde reaksi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 4.2.

$$\frac{1}{[A]^{n-1}} = (n - 1)kt + \frac{1}{[A]_0^{n-1}} \quad (4.2)$$

dimana :

a = koefisien stokiometri reaktan

k = tetapan laju reaksi

$[A]_0$ = konsentrasi mula-mula (mol/L atau mg/L)

$[A]$ = konsentrasi akhir (mol/L atau mg/L)

t = waktu (detik, menit, jam, dsb)

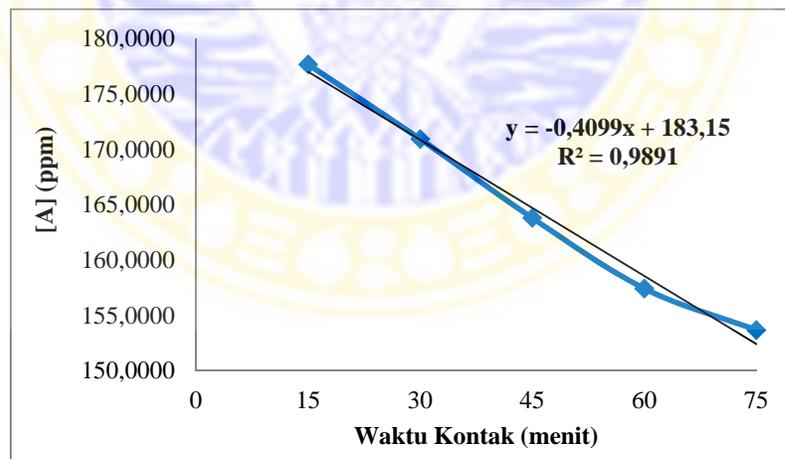
n = orde reaksi

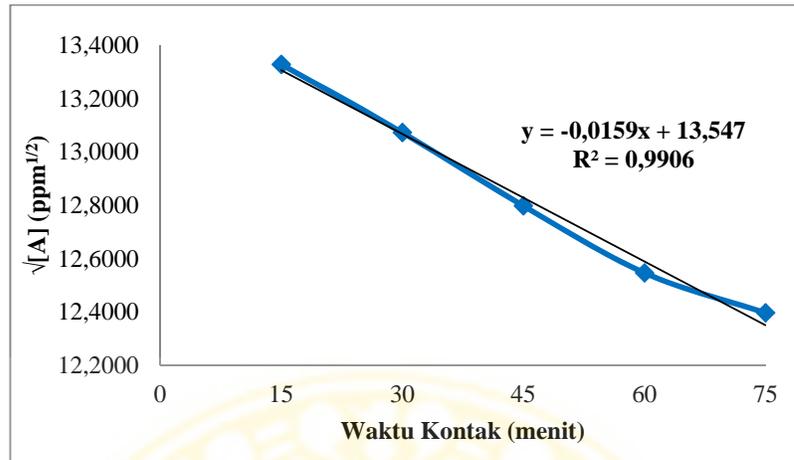
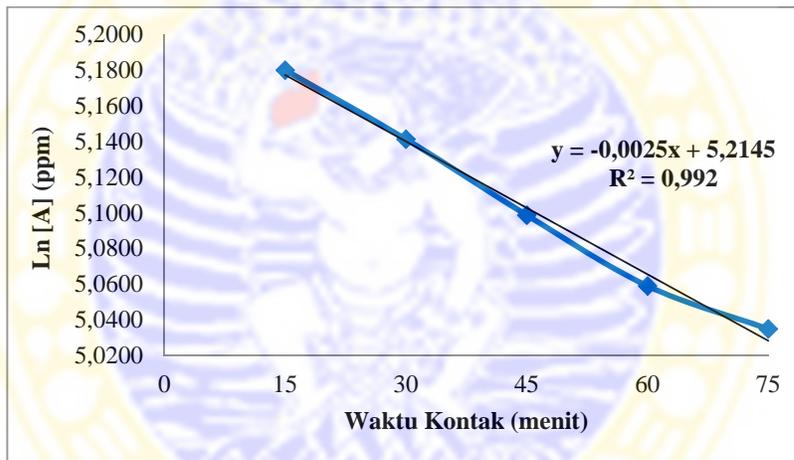
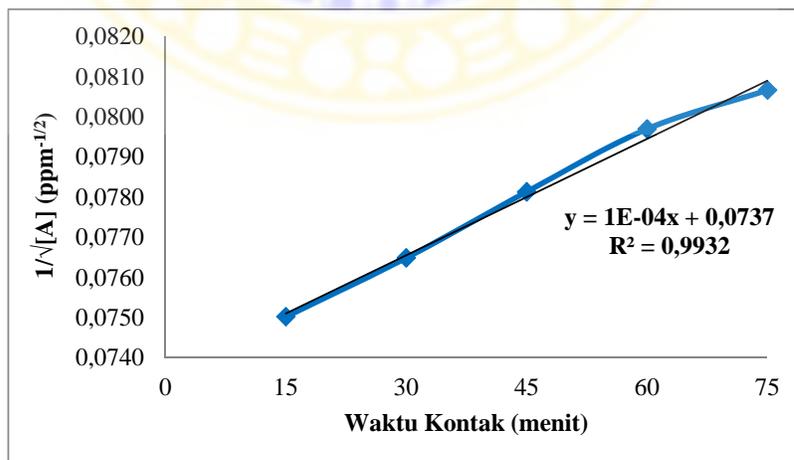
Persamaan 4.2 diatas, tidak berlaku untuk orde reaksi (n) = 1. Perhitungan orde reaksi 0, 1/2, 1, 3/2, dan 2, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan umum (4.2) atau persamaan orde reaksi yang terdapat pada Tabel 2.4. Adapun data yang digunakan untuk penentuan kinetika pengurangan konsentrasi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi, dilakukan pada konsentrasi optimum yaitu 600 ppm pada tiap variasi waktu seperti yang tertera pada Tabel 4.7.

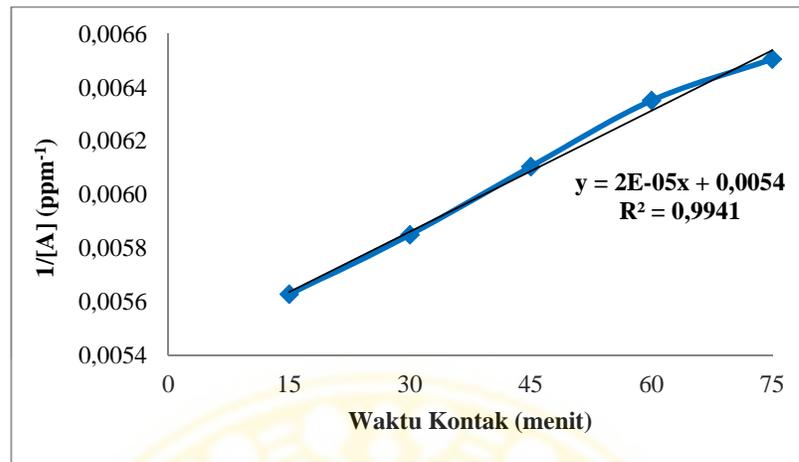
Tabel 4.7 Data penentuan orde reaksi

Kons. Awal (ppm)	Waktu (menit)	Kons. Sisa (ppm)	[A] (ppm)	$\sqrt{[A]}$ (ppm ^{1/2})	Ln [A] (ppm)	$1/\sqrt{[A]}$ (ppm ^{-1/2})	$1/[A]$ (ppm ⁻¹)
600	15	177,6753	177,6753	13,3295	5,1800	0,0750	0,0056
600	30	170,9261	170,9261	13,0739	5,1412	0,0765	0,0059
600	45	163,8020	163,8020	12,7985	5,0987	0,0781	0,0061
600	60	157,4278	157,4278	12,5470	5,0590	0,0797	0,0064
600	75	153,6783	153,6783	12,3967	5,0349	0,0807	0,0065

Berikut merupakan gambar grafik dari masing-masing orde reaksi :

Gambar 4.9 Grafik orde reaksi 0 pada ion logam Pb^{2+}

Gambar 4.10 Grafik orde reaksi 1/2 pada ion logam Pb²⁺Gambar 4.11 Grafik orde reaksi 1 pada ion logam Pb²⁺Gambar 4.12 Grafik orde reaksi 3/2 pada ion logam Pb²⁺



Gambar 4.13 Grafik orde reaksi 2 pada ion logam Pb²⁺

Berdasarkan hasil analisa grafik diatas, dapat disimpulkan bahwa orde reaksi yang sesuai untuk adsorpsi larutan ion logam Pb²⁺ pada abu layang teraktivasi, adalah orde reaksi dua. Hal ini dikarenakan harga koefisien determinasi (R^2) yang paling besar dan mendekati 1 yakni 0,9941.

Pada gambar 4.13 didapatkan persamaan regresi $y = 0,00002x + 0,0054$.

Dengan menggunakan persamaan kinetika orde dua yakni :

$$\frac{1}{[A]} = a.k.t + \frac{1}{[A]_0} \quad (4.3)$$

maka dapat diketahui tetapan laju reaksi adsorpsi ion logam Pb²⁺ oleh abu layang teraktivasi sebesar 0,00002 L.mg⁻¹.menit⁻¹.

Menurut Gupta,dkk (2011), beberapa penelitian membuktikan bahwa interaksi Cd (II), Co (II), Cr (VI), Fe (III), Ni (II), dan Pb (II) dalam larutan sesuai dengan kinetika reaksi orde dua. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa hal tersebut sesuai dengan hasil yang didapatkan pada penelitian ini.

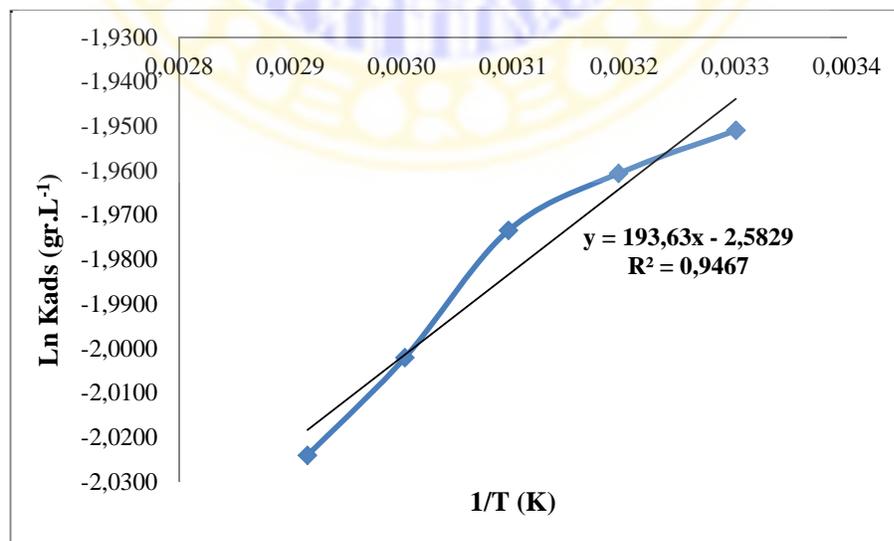
4.4.6 Penentuan termodinamika adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+}

Pada penelitian ini parameter-parameter termodinamika adsorpsi ion logam Pb^{2+} yang ditentukan antara lain entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}), dan entropi adsorpsi (ΔS_{ads}). Untuk menentukan parameter termodinamika adsorpsi tersebut, terlebih dahulu ditentukan tetapan kesetimbangan termodinamika adsorpsi (K_{ads}) untuk masing-masing variasi temperatur.

Penentuan harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), ditentukan dengan grafik hubungan antara $\ln K_{ads}$ terhadap $1/T$. Data penentuan ΔH_{ads} tertera pada Tabel 4.8 dan grafik hubungan antara $\ln K_{ads}$ dengan $1/T$ terdapat pada Gambar 4.14.

Tabel 4.8 Data penentuan entalpi adsorpsi (ΔH_{ads})

Suhu (K)	Konsentrasi awal (ppm)	Konsentrasi sisa (ppm)	x/m ($mg \cdot g^{-1}$)	K _{ads} ($gr \cdot L^{-1}$)	Ln K _{ads} ($gr \cdot L^{-1}$)	1/T (K^{-1})
303	600	156,6779	22,2696	0,1421	-1,9510	0,0033
313	600	157,8028	22,2133	0,1408	-1,9607	0,0032
323	600	159,3026	22,1384	0,1390	-1,9735	0,0031
333	600	162,6771	21,9696	0,1351	-2,0021	0,0030
343	600	165,3018	21,8384	0,1321	-2,0241	0,0029



Gambar 4. 14 Grafik hubungan antara $\ln K_{ads}$ terhadap $1/T$

Harga slope dari grafik diatas digunakan untuk menentukan entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), dimana harga slope = $-\Delta H/R$ dengan harga $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Berdasarkan perhitungan yang tertera pada Lampiran 3, dapat diketahui bahwa harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}) rata-rata pada rentang temperatur 303 K sampai dengan 343 K sebesar $-1,6098 \text{ kJ.mol}^{-1}$. Dari harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}) dapat diketahui bahwa proses adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi berjalan secara eksoterm, yakni melepaskan kalor ke lingkungan. Proses adsorpsi ini merupakan reaksi eksoterm karena reaksi tersebut tidak membutuhkan kalor. Hal ini terlihat bahwa kapasitas adsorpsi menurun dengan bertambahnya temperatur. Selain itu proses adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang teraktivasi ini, merupakan fisisorpsi atau adsorpsi fisika. Hal ini dibuktikan dengan adanya harga entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}) yang kurang dari $20,92 \text{ kJ.mol}^{-1}$ (Atkins,1996). Secara umum waktu tercapainya kesetimbangan adsorpsi melalui mekanisme fisika atau fisisorpsi lebih cepat dibandingkan dengan mekanisme kimia atau kemisorpsi (Castellan, 1983).

Molekul-molekul yang diadsorpsi secara fisika tidak terikat kuat pada permukaan, dan biasanya terjadi proses balik yang cepat, sehingga mudah untuk diganti dengan molekul yang lain. Adsorpsi fisika didasarkan pada gaya Van Der Waals, dan dapat terjadi pada permukaan yang polar dan non polar. Adsorpsi juga mungkin terjadi dengan mekanisme pertukaran ion. Permukaan padatan dapat mengadsorpsi ion-ion dari larutan dengan mekanisme pertukaran ion. Karena itu ion pada gugus permukaan adsorben dapat bertukar tempat dengan ion-ion adsorbat. Mekanisme pertukaran ini merupakan penggabungan dari mekanisme

kemisorpsi dan fisisorpsi, karena adsorpsi jenis ini akan mengikat ion-ion yang diadsorpsi dengan ikatan secara kimia, tetapi ikatan ini mudah dilepas kembali untuk dapat terjadinya pertukaran ion (Barrow, 1979). Banyak kasus adsorpsi tidak hanya mengikuti satu jenis tipe adsorpsi tetapi mengikuti kedua tipe adsorpsi tersebut, yakni fisika dan kimia (Levine, 2002).

Parameter termodinamika yang selanjutnya ditentukan adalah energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}) dan energi entropi adsorpsi (ΔS_{ads}). Data parameter termodinamika adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang batubara ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Data parameter termodinamika adsorpsi

Parameter termodinamika adsorpsi	Temperatur (K)				
	303	313	323	333	343
ΔG (kJ.mol ⁻¹)	4,9148	5,1022	5,2997	5,5430	5,7721
ΔS (kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	-2,1533x10 ⁻²	-2,1444x10 ⁻²	-2,1392x10 ⁻²	-2,1480x10 ⁻²	-2,1522x10 ⁻²

Berdasarkan Tabel 4.9 dapat diketahui bahwa, harga energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}) bernilai semakin besar dengan meningkatnya temperatur. Hal tersebut menjelaskan bahwa reaksi berjalan secara tidak spontan jika ada energi. Sedangkan harga energi entropi adsorpsi (ΔS_{ads}) bernilai negatif dan semakin kecil dengan adanya peningkatan temperatur. Hal ini dapat disimpulkan bahwa adanya penurunan derajat ketidakteraturan (ΔS_{ads}) pada sistem adsorben dengan adsorbat, menyebabkan ion-ion logam yang terjerap pada adsorben semakin teratur, dan begitu pula sebaliknya (Kubilay, dkk., 2007). Fenomena ini dalam sistem adsorpsi tidak menguntungkan karena dapat menurunkan kestabilan ikatan antara adsorben dan adsorbat.

Dalam penelitian ini dilakukan pembuktian untuk teradsorpsinya larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang batubara, dimana dilakukan uji dengan menggunakan XRF pada abu layang yang telah kontak atau berinteraksi dengan larutan ion logam Pb^{2+} . Adapun hasil komposisi kimia abu layang sesudah mengadsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} ditunjukkan pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10 Komposisi kimia abu layang PT. Wilmar Nabati Indonesia sesudah mengadsorpsi ion logam Pb^{2+}

Komponen	Kadar (% b/b)	Komponen	Kadar (% b/b)
Al	5,0	Ni	0,06
Si	11,1	Cu	0,079
S	0,31	Sr	0,91
K	0,62	Ba	0,58
Ca	29,2	Eu	0,4
Ti	0,97	Yb	0,0
V	0,02	Re	0,44
Cr	0,11	Ir	0,03
Mn	0,40	Pb	13,3
Fe	36,4		

Berdasarkan hasil analisa dengan XRF tersebut, membuktikan bahwa abu layang telah mengikat logam Pb dengan prosentase sebesar 13,3%. Adapun bila filtrat yang telah kontak dengan adsorben tersebut dianalisa menggunakan AAS pada waktu kontak selama 75 menit, kadar larutan ion logam Pb^{2+} sisa dalam abu layang tersebut adalah 156,6779 ppm, dengan konsentrasi awal sebesar 600 ppm.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa :

1. NaOH mampu mengaktivasi abu layang batubara, hal ini ditunjukkan dengan adanya peningkatan kemampuan adsorpsi abu layang batubara dalam menyerap larutan ion logam Pb^{2+} , dimana pada abu layang batubara sebelum aktivasi sebesar 73,5860% sedangkan pada abu layang batubara sesudah aktivasi sebesar 94,5931%.
2. Adsorpsi isoterm larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang batubara teraktivasi adalah adsorpsi isoterm Langmuir.
3. Kapasitas adsorpsi larutan ion logam Pb^{2+} oleh abu layang batubara teraktivasi pada temperatur 303 K, 313 K, 323 K, 333 K, dan 343 K berturut-turut adalah 22,2696 $mg.g^{-1}$; 22,2133 $mg.g^{-1}$; 22,1384 $mg.g^{-1}$; 21,9696 $mg.g^{-1}$; dan 21,8384 $mg.g^{-1}$.

5.2 Saran

Pada penelitian selanjutnya perlu dilakukan aktivasi abu layang batubara dengan menggunakan zat pengaktif atau aktivator lain yang diharapkan mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi. Serta perlu dilakukan adanya penentuan variasi pH, hal ini agar dapat diketahui pH optimum yang menghasilkan penyerapan ion logam terbanyak oleh abu layang batubara.

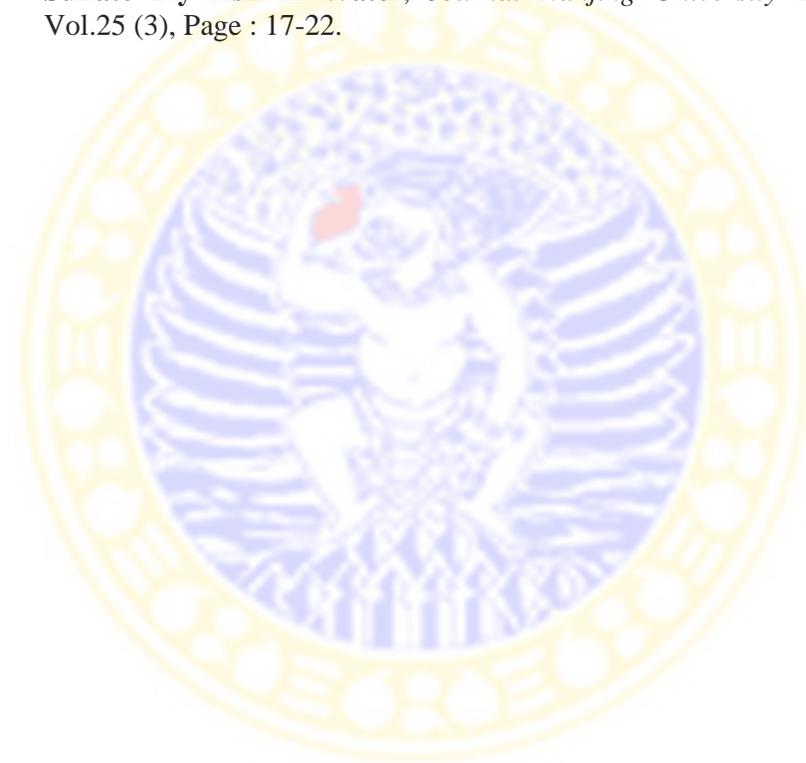
DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 363, (1992), “*State of the Art Report on High-Strength Concrete*”, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- Alberty, R.A., 1990, *Kimia Fisika*, Jilid Kesatu, Erlangga, Jakarta.
- Atkins, P.W., 1996, *Kimia Fisik*, Terjemahan Irma I. Kartohadiprodjo, Jilid 2, Edisi keempat, Erlangga, Jakarta.
- Barrow, G.M., 1979, *Physical Chemistry*, 4th ed, Mc. Graw-Hill International Book Company, Tokyo.
- Castellan, G. W., 1983, *Physical Chemistry*, 3rd ed, University of Maryland The Benjamin Cumings Publishing Company. Inc, Menlo Park. California.
- Chen, Q.Y., Tyrer, M., Hills, C.D., Yang, X. M., dan Carey, P., 2008, **Immobilisation of Heavy Metal in Cement-Based Solidification/Stabilization: A Review**, *Waste Management*, Vol 29, Page : 390-403.
- Darmono, 1995, *Logam Berat dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Day, R.A., Underwood., 1980, *Quantitative Analysis*, Edisi Keenam, Prentice Hall, Inggris.
- Eckenfelder, 1981, *Industrial Water Pollution Control*, Second Edition, Mc.Graw-Hill International, Singapore.
- Fahmi M.Z., Fansuri H. dan Atmaja L., 2009, **Pola Hubungan antara Rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ dengan Mikrostruktur Geopolimer berbahan Dasar Abu Layang**, *Tesis Magister*, Jurusan Kimia, FMIPA ITS, Surabaya.
- Goni, S., A. Guerrero, M.P. Luxan, A. Macias., 2003, **Activation of The Fly Ash Pozzolanic Reaction by Hydrothermal Conditions**, *Chemistry Concrete Research*, Vol.33 (9), Page : 1399-1405.
- Gupta, S. S., K.G. Bhattacharyya, 2011, **Kinetics of Adsorption of Metal Ions on Inorganic Material : A review**, *Colloid and Interface Science*, Vol.162, Page : 39 – 58.

- Indrawati, L., 2008, **Aktivasi Abu Layang Batubara dan Aplikasinya pada Proses Adsorpsi Ion Logam Cr dalam Limbah Elektroplating**, *Tugas Akhir II*, Jurusan Kimia, FMIPA UNNES, Semarang.
- Irani K., Fansuri H. dan Atmaja L., 2009, **Modifikasi Permukaan Abu Layang Menggunakan NaOH dan Aplikasinya untuk Geopolimer: Sifat Fisik dan Mekanik**, *Tesis Magister*, Jurusan Kimia, FMIPA ITS, Surabaya.
- Jansen, J.C., 1991, **The preparation of molecular sieves. In: Van Bekkum H, Flanigen EM and Jansen JC (eds.), Introduction to Zeolite Science and Practice.** Amsterdam.
- Jumaeri, 1995, **Studi tentang Pemanfaatan Abu Layang sebagai Adsorben Zat Warna dalam Larutan Air**, *Tesis Magister*, Jurusan Kimia, FMIPA UGM, Yogyakarta.
- Kriswarini, R., Anggraini, D., Djamaludin, A., 2010, **Validasi Metoda XRF (X-Ray Fluorescence) Secara Tunggal Dan Simultan Untuk Analisis Unsur Mg, Mn Dan Fe Dalam Paduan Aluminium**, *Seminar Nasional VI*, ISSN 1978-0176, SDM Teknologi Nuklir, Yogyakarta.
- Kubilay RS, Gurkan A, Savran T, Sahan. 2007. **Removal of Cu(II), Zn(II) and Co(II) ions from aqueous solution by adsorption onto natural bentonite.** *Adsorption*. 13:41-51.
- Lando, J.B., and Marron, S.H., 1974, *Fundamental of Physical Chemistry*, Macmilan Co. Inc., New York.
- Levine, Ira N., 2002, *Physical Chemistry*, Fifth Edition, Mc. Graw-Hill International, Singapore.
- Mahatmanti, W., Widi A., 2010, **Aktivasi Abu Layang Batubara dan Aplikasinya sebagai Adsorben Timbal dalam Pengolahan Limbah Elektroplating**, Jurusan Kimia, FMIPA, UNNES, Semarang.
- Muchjidin, 2006, *Pengendalian Mutu dalam Industri Batu bara*, Penerbit ITB Press, Bandung.
- Mulder, M., 1991, *Basic Principles of Membran Technology*, Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
- Neville A.M., 1996, *Properties of Concrete*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc. New York.

- Ojha, K., Pradhan, N.C., and Samanta, A.N., 2004, **Zeolite from Fly Ash: Synthesis and Characterization**, *Bulletin Material Science*, Vol.27, No.6, Page : 555–564.
- Palar, H., 2008, *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*, Cetakan Keempat, PT. Rineka Cipta, Jakarta.
- Peraturan Pemerintah No, 20 Tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air*, Jakarta, hal. 24-30.
- Polowczyk I., Drag E., Bastrzyk A. and Sadowski Z., 2010, **Use of fly ash agglomerates for removal of arsenic**, *Environ Geochem Health*, Vol.32, Page : 361–366.
- Skoog, Douglas A., 1998, *Principles of Analysis*, Fifth edition, Saunders College Publishing.
- Sukandarrumidi, 2009, *Batubara dan Pemanfaatannya*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Sunardi, 2007, *116 Unsur Kimia, Deskripsi dan Pemanfaatannya*, Yrama Widya, Bandung.
- Tim Kajian Batubara Nasional, Kelompok Kajian Kebijakan Mineral dan Batubara, 2006, *Batubara Indonesia*, Pusat Litbang Teknologi Mineral dan Batubara.
- Van Deventer , J.S.J., J.L. Provis, P. Duxon, G.C. Luckey, 2006, **Reaction Mechanism in Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste to Useful Products**, *Journal of Hazardous Materials*, Article in Press.
- Vogel, 1985, *Buku Teks Analisis Anorganik Kualitatif Makro dan Semimikro*, Edisi kelima, Bagian 1, Penerjemah : Ir. L. Setiono, dkk, Penerbit PT. Kalman Media Pusaka, Jakarta.
- Wahyuni, Suci, 2010, **Adsorpsi Ion Logam Zn(II) pada Zeolit A yang Disintesis dari Abu Dasar Batubara PT. IPMOMI Paiton dengan Metode Batch**, *Tugas Akhir*, Jurusan Kimia, FMIPA ITS, Surabaya.
- Wardhana, R., Alif Erga., 2006, **Kinetika Adsorpsi Ion Zn dan NH₄ oleh Fly Ash**, *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Kimia, FTI ITS Surabaya.
- White, S.C., E.D. Case, 1990, **Characterization of Fly Ash From Coal-Fired Power Plants**, *Journal Material Science*, Vol.25, Page : 5215-5219.

- Widiastuti, N., Wu, H., Ang, H.M. & Zhang, D, 2009, **Removal of Ammonium from Greywater Using Natural Zeolite**, *J. Desalination*, Vol.218, Page : 271-280
- Wilkinson, F., 1980, *Chemical Kinetics and Reaction Mechanism*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Xu, H., J.S.J. Van Deventer, (2002), **Geopolymerisation of Multiple Minerals**, *Mineral Engineering*, Vol.15, Page : 1131 – 1139.
- Yan, S., A.L. Cai, F.X. Yu, C.H. Jiang, 2003, **Dissolving Mechanism of High Sulfate Fly Ash in Water**, *Journal Nanjing University Technology*, Vol.25 (3), Page : 17-22.



Lampiran 1. Data hasil penentuan adsorpsi isoterms larutan ion logam Pb²⁺ pada abu layang batubara teraktivasi

Waktu Kontak (menit)	Berat Adsorben (gr)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Terhitung (ppm)	Absorbansi (Abs)	Pengenceran	Konsentrasi Akhir (ppm)	Ion Pb ²⁺ Teradsorpsi (mg/g)	Efisiensi Penghilangan (%)
15	2,0002	200	201,6723	0,0131	10	12,8129	9,4420	93,6467
30	2,0002		201,6723	0,0084	10	9,2883	9,6182	95,3944
45	2,0002		201,6723	0,0757	-	5,9758	9,7838	97,0369
60	2,0002		201,6723	0,0493	-	3,9960	9,8828	98,0186
75	2,0002		201,6723	0,0351	-	2,9311	9,9361	98,5466
90	2,0002		201,6723	0,0332	-	2,7887	9,9432	98,6172
105	2,0002		201,6723	0,0317	-	2,6761	9,9488	98,6730
120	2,0002		201,6723	0,0312	-	2,6386	9,9507	98,6916
135	2,0002		201,6723	0,0305	-	2,5861	9,9533	98,7177
150	2,0002		201,6723	0,0302	-	2,5636	9,9544	98,7288
15	2,0000		300	302,1597	0,0178	10	16,3374	14,2911
30	2,0000	302,1597		0,0150	10	14,2377	14,3961	95,2880
45	2,0000	302,1597		0,0122	10	12,1380	14,5011	95,9829
60	2,0000	302,1597		0,0106	10	10,9381	14,5611	96,3800
75	2,0000	302,1597		0,0089	10	9,6633	14,6248	96,8019
90	2,0000	302,1597		0,0085	10	9,3633	14,6398	96,9012
105	2,0000	302,1597		0,0083	10	9,2133	14,6473	96,9509
120	2,0000	302,1597		0,0082	10	9,1384	14,6511	96,9756
135	2,0000	302,1597		0,0081	10	9,0634	14,6548	97,0005
150	2,0000	302,1597		0,0080	10	8,9884	14,6586	97,0253

Waktu Kontak (menit)	Berat Adsorben (gr)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Terhitung (ppm)	Absorbansi (Abs)	Pengenceran	Konsentrasi Akhir (ppm)	Ion Pb ²⁺ Teradsorpsi (mg/g)	Efisiensi Penghilangan (%)
15	2,0000	400	402,5947	0,0463	10	37,7098	18,2442	90,6333
30	2,0000		402,5947	0,0433	10	35,4601	18,3567	91,1921
45	2,0000		402,5947	0,0411	10	33,8103	18,4392	91,6019
60	2,0000		402,5947	0,0384	10	31,7855	18,5405	92,1048
75	2,0000		402,5947	0,0346	10	28,9359	18,6829	92,8126
90	2,0000		402,5947	0,0344	10	28,7859	18,6904	92,8499
105	2,0000		402,5947	0,0341	10	28,5609	18,7017	92,9058
120	2,0000		402,5947	0,0338	10	28,3360	18,7129	92,9617
135	2,0000		402,5947	0,0337	10	28,2610	18,7167	92,9803
150	2,0000		402,5947	0,0335	10	28,1110	18,7242	93,0175
15	2,0000	500	501,5823	0,0252	50	109,4338	19,6074	78,1823
30	2,0000		501,5823	0,0225	50	99,3101	20,1136	80,2006
45	2,0000		501,5823	0,0202	50	90,6862	20,5448	81,9200
60	2,0000		501,5823	0,0191	50	86,5617	20,7510	82,7423
75	2,0000		501,5823	0,0180	50	82,4372	20,9573	83,5646
90	2,0000		501,5823	0,0178	50	81,6873	20,9948	83,7141
105	2,0000		501,5823	0,0175	50	80,5624	21,0510	83,9383
120	2,0000		501,5823	0,0173	50	79,8125	21,0885	84,0879
135	2,0000		501,5823	0,0170	50	78,6877	21,1447	84,3121
150	2,0000		501,5823	0,0168	50	77,9377	21,1822	84,4616

Waktu Kontak (menit)	Berat Adsorben (gr)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Terhitung (ppm)	Absorbansi (Abs)	Pengenceran	Konsentrasi Akhir (ppm)	Ion Pb ²⁺ Teradsorpsi (mg/g)	Efisiensi Penghilangan (%)
15	2,0000	600	602,0697	0,0434	50	177,6753	21,2197	70,4892
30	2,0000		602,0697	0,0416	50	170,9261	21,5572	71,6102
45	2,0000		602,0697	0,0397	50	163,8020	21,9134	72,7935
60	2,0000		602,0697	0,0380	50	157,4278	22,2321	73,8522
75	2,0000		602,0697	0,0370	50	153,6783	22,4196	74,4750
90	2,0000		602,0697	0,0367	50	152,5534	22,4758	74,6618
105	2,0000		602,0697	0,0364	50	151,4286	22,5321	74,8487
120	2,0000		602,0697	0,0361	50	150,3037	22,5883	75,0355
135	2,0000		602,0697	0,0359	50	149,5538	22,6258	75,1601
150	2,0000		602,0697	0,0356	50	148,4289	22,6820	75,3469
15	2,0000		700	701,8073	0,0643	50	256,0405	22,2883
30	2,0000	701,8073		0,0630	50	251,1661	22,5321	64,2115
45	2,0000	701,8073		0,0619	50	247,0416	22,7383	64,7992
60	2,0000	701,8073		0,0617	50	246,2917	22,7758	64,9061
75	2,0000	701,8073		0,0612	50	244,4169	22,8695	65,1732
90	2,0000	701,8073		0,0611	50	244,0420	22,8883	65,2266
105	2,0000	701,8073		0,0610	50	243,6670	22,9070	65,2801
120	2,0000	701,8073		0,0608	50	242,9171	22,9445	65,3869
135	2,0000	701,8073		0,0605	50	241,7923	23,0008	65,5472
150	2,0000	701,8073		0,0604	50	241,4173	23,0195	65,6006

Waktu Kontak (menit)	Berat Adsorben (gr)	Konsentrasi Awal (ppm)	Konsentrasi Terhitung (ppm)	Absorbansi (Abs)	Pengenceran	Konsentrasi Akhir (ppm)	Ion Pb ²⁺ Teradsorpsi (mg/g)	Efisiensi Penghilangan (%)
15	2,0000	800	802,1372	0,0921	50	360,2775	22,0930	55,0853
30	2,0000		802,1372	0,0914	50	357,6528	22,2242	55,4125
45	2,0000		802,1372	0,0904	50	353,9033	22,4117	55,8800
60	2,0000		802,1372	0,0895	50	350,5287	22,5804	56,3007
75	2,0000		802,1372	0,0890	50	348,6539	22,6742	56,5344
90	2,0000		802,1372	0,0887	50	347,5290	22,7304	56,6746
105	2,0000		802,1372	0,0886	50	347,1541	22,7492	56,7214
120	2,0000		802,1372	0,0885	50	346,7791	22,7679	56,7681
135	2,0000		802,1372	0,0883	50	346,0292	22,8054	56,8616
150	2,0000		802,1372	0,0882	50	345,6543	22,8241	56,9083

Lampiran 2. Contoh cara perhitungan larutan ion logam Pb²⁺ teradsorpsi tiap gram abu layang teraktivasi

Suhu : 30°C
 Waktu kontak : 75 menit
 Berat abu layang batubara : 2,0000 gram
 Konsentrasi Pb²⁺ awal : 300 ppm
 Konsentrasi Pb²⁺ terhitung : 302,1597 ppm
 Absorbansi : 0,0089
 Pengenceran : 10x

Konsentrasi akhir = A diplotkan pada kurva standar x pengenceran
 = 0,96633 x 10
 = 9,6633 ppm

Jumlah larutan ion logam Pb²⁺ teradsorpsi tiap gram abu layang teraktivasi (x/m)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{100}{1000} \times (\text{konsentrasi terhitung} - \text{konsentrasi akhir}) \\
 &= \frac{100}{1000} \times (302,1597 - 9,6633) \\
 &= 29,2496 \text{ mg} / 2,0000 \text{ g} \\
 &= 14,6248 \text{ mg/g abu layang teraktivasi}
 \end{aligned}$$

Lampiran 3. Contoh cara perhitungan entalpi adsorpsi (ΔH_{ads}), energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads}), dan entropi adsorpsi (ΔS_{ads})

Contoh cara perhitungan entalpi adsorpsi (ΔH_{ads})

Persamaan regresi linier :

$$y = 193,63x + 4,3249$$

$$R = 0,9467$$

$$-\frac{\Delta H_{\text{ads}}}{R} = \text{slope}$$

$$-\frac{\Delta H_{\text{ads}}}{8,314} = 193,63$$

$$\begin{aligned}\Delta H_{\text{ads}} &= -1609,83982 \text{ J.mol}^{-1} \\ &= -1,6098 \text{ kJ.mol}^{-1}\end{aligned}$$

Contoh cara perhitungan energi bebas adsorpsi (ΔG_{ads})

$$\text{Suhu} : 50^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Ln } K_{\text{ads}} : -1,9735$$

$$\begin{aligned}\Delta G_{\text{ads}} &= -n R T \text{Ln } K_{\text{ads}} \\ &= -(1 \text{ mol}) (8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}) (323 \text{ K}) (-1,9735) \\ &= 5.299,6803 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \\ &= 5,2997 \text{ kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}\end{aligned}$$

Contoh cara perhitungan entropi adsorpsi (ΔS_{ads})

$$\text{Suhu} : 50^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta H_{\text{ads}} = -1,6098 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

$$\Delta G_{\text{ads}} = 5,2997 \text{ kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{ads}} &= \frac{\Delta H_{\text{ads}} - \Delta G_{\text{ads}}}{T} \\ &= \frac{((-1,6098 \text{ kJ.mol}^{-1}) - (5,2997 \text{ kJ.mol}^{-1}))}{323 \text{ K}} \\ &= -2,1392 \times 10^{-2} \text{ kJ.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}\end{aligned}$$

