

SKRIPSI

**POTENSI PENGGUNAAN CAMPURAN *FLY ASH* DAN
BOTTOM ASH DENGAN TANAH SEBAGAI *LINER*
MATERIAL PENAHAN LOGAM BERAT**

Disusun dan diajukan oleh:

**ASRISNAWANTI
D131 18 1306**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**



LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Judul : **Potensi Penggunaan Campuran Fly Ash dan Bottom Ash dengan Tanah sebagai Liner Material Penahan Logam Berat**

Disusun Oleh :

Nama : **Asrisnawanti**

D131181306

Telah diperiksa dan disetujui
Oleh Dosen Pembimbing

Gowa, 17 Januari 2023

Pembimbing I

Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T.
NIP. 197312012000122001

Pembimbing II

Annisa Dwi Damayanti, S.T., M.T.
NIP. 199304282021016001

Menyetujui,
Ketua Departemen Teknik Lingkungan



Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T.
NIP. 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Asrisnawanti
NIM : D131 18 1306
Program Studi : Teknik Lingkungan
Jenjang : S1

M menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Potensi Penggunaan Campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dengan Tanah sebagai
Liner Material Penahan Logam Berat}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 17 Januari 2023

Yang Menyatakan



Asrisnawanti

ABSTRAK

ASRISNAWANTI. *Potensi Penggunaan Campuran Fly Ash dan Bottom Ash dengan Tanah sebagai Liner Material Penahan Logam Berat* (dibimbing oleh Kartika Sari dan Annisa Dwi Damayanti).

Potensi penggunaan campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dengan tanah sedimen, dinilai dapat dijadikan sebagai bahan pelapis TPA (*liner material*). Serangkaian pengujian telah dilakukan – pengujian dasar sifat fisik tanah, konduktivitas hidrolis dan adsorpsi kolom kontinyu, - untuk mengevaluasi hasil hipotesa berupa pengaruh efisiensi penyerapan logam berat sebelum dan setelah melewati *liner material* dan kompaktibilitas konduktivitas hidrolis serta nilai koefisien difusi dan faktor retardasi. Variasi persentase campuran yang digunakan 10%BA+5%FA+85%TS; 20%BA+10%FA+70%TS; 30%BA+20%FA+50%TS; 40%BA+25%FA+35%TS dan waktu kontak 90 dan 120 menit. Hasil percobaan menunjukkan bahwa rata-rata persentase penyerapan pada setiap variasi terhadap waktu adsorpsi berturut-turut sebesar 80,50%; 86,45% ; 85,58%; dan 86,00%; Variasi campuran terhadap nilai koefisien konduktivitas hidrolis diperoleh masing-masing sebesar $1,2 \times 10^{-5}$ cm/det; $1,4 \times 10^{-5}$ cm/det; $1,7 \times 10^{-5}$ cm/det; dan $2,3 \times 10^{-5}$ cm/det. Bila diresapi dengan larutan artifisial CdSO₄, rata-rata faktor retardasi variasi campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dan tanah sedimen terhadap waktu berturut-turut sebesar 1,063; 1,084; 1,275; dan 1,24. Sedangkan rata-rata koefisien difusi yang diperoleh masing-masing campuran sebesar $8,761 \times 10^{-6}$ cm²/s; $7,858 \times 10^{-6}$ cm²/s; $8,316 \times 10^{-6}$ cm²/s; dan $8,296 \times 10^{-6}$ cm²/s.

Kata Kunci: *Fly Ash*, *Bottom Ash*, Tanah Sedimen, Logam Cd, Konduktivitas Hidrolis, Faktor Retardasi, Koefisien Difusi.

ABSTRACT

ASRISNAWANTI. *Potential use of Fly Ash and Bottom Ash with Soil as Liner Material to Retain Heavy Metals (Supervised by Kartika Sari dan Annisa Dwi Damayanti).*

The potential use of a mixture of Fly Ash and Bottom Ash with sedimentary soil is considered to be used as a liner material for landfill. A series of tests have been carried out – testing of basic physical properties soil, hydraulic conductivity, and continuous column adsorption, - to evaluate the results of the hypothesis in the form of the effect of the efficiency of heavy metal absorption before and after passing through the material liner and the compatibility of the hydraulic conductivity as well as the value of the diffusion coefficient and retardation factor. The percentage variation of the mixture used is 10%BA+5%FA+85%TS; 20%BA+10%FA+70%TS; 30%BA+20%FA+50%TS; 40%BA+25%FA+35%TS and contact time of 90 and 120 minutes. The experimental results show that the average percentage of absorption in each variation of the adsorption time is 86.00%, respectively; 80,50%; 86,45% ; 85,58%; and 86,00%. Variations of the mixture to the coefficient of hydraulic conductivity obtained respectively $1,2 \times 10^{-5}$ cm/det; $1,4 \times 10^{-5}$ cm/det; $1,7 \times 10^{-5}$ cm/det; and $2,3 \times 10^{-5}$ cm/det. When impregnated with an artificial solution of $CdSO_4$, the average retardation factor of the mixture of Fly Ash and Bottom Ash and sedimentary soil variation over time was 1,063; 1,084; 1,275; and 1,24. While the average diffusion coefficient obtained for each mixture is $8,761 \times 10^{-6}$ cm²/s; $7,858 \times 10^{-6}$ cm²/s; $8,316 \times 10^{-6}$ cm²/s; and $8,296 \times 10^{-6}$ cm²/s.

Keywords: *Fly Ash, Bottom Ash, Sedimentary Soil, Metal Cd, Hydraulic Conductivity, Retardation Factor, Diffusion Coefficient .*

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena Rahmat dan Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dan tak lupa pula penulis hantarkan salawat serta salam kepada baginda Nabi besar Muhammad SAW yang telah membawa hambanya dari masa jahiliyah ke masa kejayaan seperti saat ini. Olehnya itu penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Potensi Penggunaan Campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dengan Tanah sebagai *Liner Material* Penahan Logam Berat”.

Penulis sadar skripsi ini tidak lepas dari bantuan, petunjuk, arahan, dan masukan yang berharga dari berbagai pihak, untuk itu pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih yang setulus tulusnya dan penghargaan yang setinggi-tinggi kepada Ibu Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing I dan Ibu Annisa Dwi Damayanti, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II penulis. Semoga Allah SWT membalas kebaikan Ibu dengan berlipat kebaikan, *Allahumma Aamiin*.

Tak lupa penulis menghaturkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin, beserta jajarannya.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, S.T.,M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan, dan Ibu Dr. Eng. Asiyanthi T. Lando, S.T.,M.T., selaku Sekretaris Departemen. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Lingkungan yang telah Mendidik penulis selama menempuh kuliah di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Ibu Sumi dan Kak Olan selaku staf Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik yang selalu siap membantu mahasiswa dalam berbagai hal.
5. Ibu Aini selaku Dosen Sipil Fakultas Teknik yang telah banyak membantu penulis dan izin menggunakan bahan material.

6. Bapak Syarif, S.T., selaku Laboran Laboratorium Kualitas Air dan teman-teman asisten laboratorium (Linda, Rahma, Suarni, dkk) yang telah membimbing dan mendampingi penulis selama proses pengujian.
7. Kak Enal selaku Laboran dan teman-teman asisten Laboratorium Mekanika Tanah (Azmod, Novi, Ifah, Mega, Ana) yang telah membantu dan mengajari penulis di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Hasanuddin.
8. Bapak H. Aribé dan Alm. Hj. Rosmiati beserta sepupu yang telah menjadi orangtua bagi penulis, banyak memberikan bantuan yang tak terhingga.
9. Kakak penulis Muh. Aswan dan Muh. Aslam yang telah menjadi teman diskusi dan pengulasan setiap buku. Adik penulis Nur Aulia Fitri yang telah menjadi partner dalam segala hal.
10. Teman dan selaku keluarga penulis, Nur Khalifa yang telah banyak membantu, memberikan lelucon atas segala tindakan dan guyonan candaannya sekaligus teman yang selalu menjadi tempat membicarakan perihal buku yang sedang di baca oleh penulis.
11. Teman-teman seangkatan Teknik Lingkungan Angkatan 2018 dan Transisi 2019 yang tidak bisa disebut satu persatu, terima kasih atas segala kebersamaannya selama masa perkuliahan.
12. Keluarga besar HMTL yang menjadi wadah bagi penulis selama masa perkuliahan.
13. Keluarga besar Mentor *Family* 2019 yang menjadi teman seperjuangan semasa perkuliahan.
14. Keluarga besar GKLM Al-Muhandis, yang selama perkuliahan menjadi wadah tambahan belajar agama bagi penulis.
15. Keluarga besar RION Squad yang telah kebersamai penulis selama masa SMA sampai saat ini.
16. Keluarga besar Receh Squad (Masindar Pratiwi, Linda Karlita, Alpi Yunita, Diah Putri AP) yang telah kebersamai penulis di group dan kampus.

17. Keluarga besar Rumah Berbagi Asa yang menjadi wadah bagi penulis dalam kegiatan sosial dan Keluarga besar KKG Angkatan 23 seperjuangan penulis dalam pengabdian di desa.
18. Keluarga besar PT. Consolidated Electric Power Asia selama 2 bulan menjadi tempat bagi penulis belajar banyak hal.
19. Keluarga besar Clean Up Indonesia selama 3 bulan terakhir yang menjadi tempat magang penulis dan Teman sekaligus kakak Intership CUI 2022 yang telah banyak membantu selama berproses di program Intership CUI.
20. Keluarga besar Greentastik yang menjadi wadah penulis dalam berkarya tentang lingkungan.
21. Keluarga besar Yayasan Peduli Negeri yang menjadi tempat belajar penulis.
22. Semua pihak yang telah membantu dalam penulisan ini yang tidak dapat Penulis sebutkan satu persatu, penulis ucapkan terima kasih.

Rasa terima kasih teristimewa tercurahkan kepada Kedua orang tua penulis Bapak dan Etta tercinta (Ahmad dan Faridah) atas doa yang mengiringi perjalanan penulis, mengajarkan arti kehidupan dan musti menjadi orang yang bermanfaat, cinta dan kasih yang tak terhingga serta dukungan yang tiada hentinya. Terima kasih telah membersamai penulis dan menjadi bagian dari proses perjalanan dibalik hasil simbolis ini. Semoga Allah SWT memberi yang terbaik untuk kita semua. *Aamiin, Allahumma Aamiin.*

Penulis menyadari tak ada gading yang tak retak, tentu masih ada kekurangan dalam penyusunan skripsi ini, oleh karena itu penulis dengan besar harap menerima kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan penulisan skripsi ini dan menjadi referensi yang baik.

Makassar, Oktober 2022

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Maksud dan Tujuan Penelitian	3
D. Batasan Masalah	4
E. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Umum	6
B. Proses Penghasil Fly Ash dan Bottom Ash	7
C. Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)	8
D. Persyaratan Pemanfaatan FABA	13

E.	Pemanfaatan Fly Ash di beberapa Negara dan di Indonesia	15
F.	Sistem Pelapis TPA (Liner)	17
G.	Tanah	20
H.	Transport Kontaminan dalam Tanah	27
I.	Adveksi	29
J.	Pencemaran Tanah dan Penurunan Kualitas Air Tanah	32
K.	Logam Berat	34
L.	Konduktivitas Hidrolik	37
M.	Adsorpsi	38
N.	Sistem Kontinyu	43
O.	Spektroskopi Serapan Atom (SSA)	45
P.	Penelitian Terdahulu	47
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		50
A.	Rancangan Penelitian	50
B.	Diagram Alir Penelitian	51
C.	Waktu dan Lokasi Penelitian	52
D.	Alat dan Bahan	53
E.	Sampel dan Variabel Penelitian	56
F.	Teknik Pengumpulan Data	57
G.	Teknik Analisa	69
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		76
A.	Hasil Pengujian Karakteristik Fisik	76
B.	Hasil Analisis Permeabilitas (Konduktivitas Hidrolik)	80

C.	Hasil Analisis Konsentrasi Logam Kadmium (Cd)	88
D.	Hasil Pengujian Proses Kontinyu	91
E.	Perhitungan Nilai Koefisien Difusi dan Faktor Retardasi	101
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		104
A.	Kesimpulan	104
B.	Saran	105
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2. 1 Kriteria Kelas Abu Terbang	10
Tabel 2. 2 Tabel persyaratan kandungan kimia fly-ash	10
Tabel 2. 3 Komposisi Fly Ash PLTU Barru	11
Tabel 2. 4 Ukuran butiran dari pertikel bottom-ash (persentase lolos saringan)	12
Tabel 2. 5 Sifat Fisik Bottom Ash	12
Tabel 2. 6 Komposisi kimia dari bottom-ash (prosentase berat)	13
Tabel 2. 7 Persyaratan Teknis Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash	14
Tabel 2. 8 Pemanfaatan FABA di Indonesia	16
Tabel 2. 9 Panduan dalam Desain Liner	19
Tabel 2. 10 Definisi dan Hubungan Antarfase	20
Tabel 2. 11 Pengelompokkan Tanah dengan Ukuran Butiran	22
Tabel 2. 12 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO	22
Tabel 2. 13 Tipe Lanau – Lempung pada Klasifikasi Tanah	23
Tabel 2. 14 Klasifikasi Tanah USCS	23
Tabel 2. 15 Butir Tanah Menurut ASTM	24
Tabel 2. 16 Klasifikasi Tanah berdasarkan Berat Jenis	26
Tabel 2. 17 Kisaran harga K untuk beberapa jenis tanah	37
Tabel 3. 1 Alat dan Bahan	53
Tabel 3. 2 Variasi Komposisi Campuran Benda Uji	57
Tabel 3. 3 Variasi Waktu Pengujian Adsorpsi Kolom Kontinyu	57
Tabel 3. 4 Standar Pengujian Penelitian	62

Tabel 3. 5 Campuran Pengujian Adsorpsi Kolom Kontinyu	68
Tabel 4. 1 Hasil Analisa Saringan Tanah Sedimen	78
Tabel 4. 2 Rekapitulasi Hasil Uji Dasar Fisis Sampel Tanah Sedimen	78
Tabel 4. 3 Klasifikasi Tanah menurut Standar USCS dan AASTHO	79
Tabel 4. 4 Berat Jenis (<i>Specific Gravity</i> , Gs)	80
Tabel 4. 5 Berat Isi Kering dan Kadar Air Variasi Campuran Sampel	83
Tabel 4. 6 Rekap Perhitungan dari Data Kompaksi	86
Tabel 4. 7 Penambahan Material untuk Sampel Uji	86
Tabel 4. 8 Rekapitulasi Hasil Konduktivitas Hidrolik	86
Tabel 4. 9 Berat Isi Campuran Pengujian setelah Pengujian	87
Tabel 4. 10 Parameter Spektrofotometri Serapan Atom Logam Cd	88
Tabel 4. 11 Data Hasil Pengukuran Konsentrasi Kadmium (Cd)	88
Tabel 4. 12 Rekapitulasi Nilai Perubahan pH Akhir	90
Tabel 4. 13 Pengaruh efisiensi penyisihan konsentrasi Cd terhadap persentase campuran adsorben	93
Tabel 4. 14 Kapasitas adsorpsi Cd (mg/g)	97
Tabel 4. 15 Pola Isoterm Adsorpsi Campuran FABA dan Tanah Sedimen	99
Tabel 4. 16 Koefisien Difusi dan Faktor Retardasi	102

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Proses PLTU Menghasilkan FABA	7
Gambar 2. 2 Ukuran Fly Ash	9
Gambar 2. 3 (a). Fly Ash Kelas F; (b). Bottom Ash Kelas C	10
Gambar 2. 4 Bottom Ash	13
Gambar 2. 5 Tampilan penampang TPA	18
Gambar 2. 6 Lapisan Dasar (liner) TPA	19
Gambar 2. 7 Struktur Compacted Soil Liner	19
Gambar 2. 8 Ketiga fase tanah secara skematik, dengan mengambil volume butiran sebagai kesatuan	21
Gambar 2. 9 Grafik Pembagian Ukuran Butiran (Gradasi)	25
Gambar 2. 10 Tahapan Tanah Padat, Plastis, dan Cair dan batas-batasnya	25
Gambar 2. 11 Diagram Plastisitas	26
Gambar 2. 12 Skematis transport kontaminan dalam tanah	29
Gambar 2. 13 Skematis Jalur Pencemaran Lingkungan	34
Gambar 2. 14 Nilai toksisitas cadmium	36
Gambar 2. 15 Rancangan Reaktor Permeabilitas	38
Gambar 2. 16 Proses Adsorpsi	39
Gambar 2. 17 Mekanisme adsorpsi pada permukaan adsorben	41
Gambar 2. 18 Kurva <i>Breakthrough</i>	44
Gambar 2. 19 Skema umum komponen-komponen pada instrument AAS	45
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	51

Gambar 3. 2 PT. PLN (Persero) PLTU Barru: 4.200S, 119.6300E	52
Gambar 3. 3 Pengambilan Tanah Bili-Bili: 5.280S, 119.570E	52
Gambar 3. 4 Universitas Hasanuddin: 5.230S, 119.500E	53
Gambar 3. 5 Skema Adsorpsi Kolom Kontinyu	60
Gambar 3. 6 Pengujian Analisa Saringan	62
Gambar 3. 7 Pengujian Kadar Air	63
Gambar 3. 8 Pengujian Berat Jenis	64
Gambar 3. 9 Pengujian Atterberg	65
Gambar 3. 10 Pengujian Kompaksi	66
Gambar 3. 11 Pengujian Permeabilitas	67
Gambar 3. 12 Proses Pengujian Kolom Adsorpsi	68
Gambar 4. 1 Grafik Pengujian Batas Cair	77
Gambar 4. 2 Grafik Analisa saringan dan hidrometer Tanah	78
Gambar 4. 3 Grafik Kompaksi Variasi 100%TS	81
Gambar 4. 4 Grafik Kompaksi Variasi 10%BA+5%FA+85%TS	81
Gambar 4. 5 Grafik Kompaksi Variasi 20%BA + 10%FA + 70%TS	82
Gambar 4. 6 Variasi 30%BA + 20%FA + 50%TS	82
Gambar 4. 7 Variasi 40%BA + 25%FA + 35%TS	83
Gambar 4. 8 Grafik Kadar Air Sampel	84
Gambar 4. 9 Grafik Berat Isi Sampel	84
Gambar 4. 10 Grafik Koefisien Konduktivitas Hidrolik	87
Gambar 4. 11 Konsentrasi Cd pada Perbedaan Waktu Kontak dan % Campuran	89
Gambar 4. 12 Grafik Perubahan Nilai pH dengan Komposisi Campuran	91

Gambar 4. 13 Pengaruh % Campuran terhadap Efisiensi Penyisihan Kadar Cd	94
Gambar 4. 14 Kurva breakthrough setiap prosentase media adsorben	96
Gambar 4. 15 Grafik Langmuir Model pada setiap % Campuran	100
Gambar 4. 16 Grafik R_f dan D terhadap K_d	103

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Data Analisis Saringan Hidrometer Sampel Tanah Sedimen
- Lampiran 2 Data Analisis Batas Atterberg Sampel Tanah Sedimen
- Lampiran 3 Berat Jenis Tanah Sedimen, Fly Ash dan Bottom Ash
- Lampiran 4 Analisis Pengujian Kompaksi Tanah Sedimen
- Lampiran 5 Analisis Pengujian Campuran 40%BA + 25%FA + 35%TS
- Lampiran 6 Analisis Pengujian Campuran 30%BA + 20%FA + 50%TS
- Lampiran 7 Analisis Pengujian Campuran 20%BA + 10%FA + 70%TS
- Lampiran 8 Analisis Pengujian Campuran 10%BA + 5%FA + 85%TS
- Lampiran 9 Gambar Grafik Pengujian Kompaksi (Hubungan Kadar Air dengan Berat Isi Kering Tanah)
- Lampiran 10 Perhitungan Campuran Uji Permeabilitas Falling Head
- Lampiran 11 Analisis Perhitungan Konduktivitas Hidrolik Tanah Sedimen
- Lampiran 12 Analisis Perhitungan Konduktivitas Hidrolik (40%BA+25%FA+35%TS)
- Lampiran 13 Analisis Perhitungan Konduktivitas Hidrolik (30%BA + 20%FA + 50%TS)
- Lampiran 14 Analisis Perhitungan Konduktivitas Hidrolik (20%BA + 10%FA + 70%TS)
- Lampiran 15 Analisis Perhitungan Konduktivitas Hidrolik (10%BA + 5%FA + 85%TS)
- Lampiran 16 Analisis Perhitungan Angka Pori
- Lampiran 17 Analisis Pengukuran Kandungan Cd terhadap Pengaruh Waktu Kontak dan Perubahan pH dengan Komposisi Campuran Adsorpsi Kolom Kontinyu
- Lampiran 18 Analisis Perhitungan Efisiensi Penyisihan (%)

Lampiran 19 Analisis Perhitungan Variasi Campuran terhadap Kapasitas Adsorpsi pada Waktu

Lampiran 20 Analisis Pola Adsorpsi Langmuir pada Campuran Material

Lampiran 21 Analisis Perhitungan Nilai Koefisien Difusi dan Faktor Retardasi

Lampiran 22 Dokumentasi Penelitian

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pemanfaatan batubara sebagai sumber energi, telah mengubah dan mengarahkan pola hidup manusia, mendatangkan keuntungan, serta mampu menimbulkan kegiatan industri-industri baru yang bermanfaat untuk masyarakat. Dibalik itu semua ternyata juga mampu menimbulkan masalah terhadap lingkungan. Sebagai akibat pembakaran batubara, antara lain Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) akan menghasilkan abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Sukandarumidi (2009) menuliskan dalam bukunya, abu terbang yang dihasilkan PLTU di seluruh dunia pada tahun 2005 tercatat lebih dari 150 juta ton tiap tahun. Bakri *at al*, 2019 PLTU di Indonesia akan mencapai 200 juta ton per tahun pada tahun 2019 dengan limbah padat *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan sekitar 10 juta ton dan 2 juta ton per tahun. Menurut (Samosir, 2021), *fly ash* dan *bottom ash* daerah Sumatera sebanyak 150-200 ton/hari. Setengah dari jumlah tersebut belum dimanfaatkan dan setiap hari akan menumpuk serta menimbulkan polusi terhadap lingkungan.

Berdasarkan data Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan KESDM pada tahun 2018, proyeksi kebutuhan batubara hingga 2027 sebesar 163 juta ton. Di Indonesia, PLTU di Sulawesi Selatan, jumlah pemakaian batubara pada PT. PLN (Persero) Unit PLTU Barru pada tahun 2004 sebesar 33 ton/jam dengan GCV batubara 4.005 kkal/kg (Arsyil Arham dkk, 2015). Komposisi limbah padat *fly ash* Barru, dikategorikan FA kelas C, kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 65,05%, dan kandungan CaO sebesar 20,2% (Bakri *at al*, 2019).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 85 tahun 1999 lampiran 2 dan Nomor 101 tahun 2014 yang keduanya membahas tentang klasifikasi dan pengelolaan, yang menyebutkan *fly ash bottom ash* termasuk Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Sedangkan USEPA di Amerika Serikat tidak menggolongkan abu

batubara sebagai limbah B3 (Gray dkk, 1997; Sari Yunita, 2004). Namun, untuk saat ini berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, limbah *fly ash bottom ash* tidak lagi menjadi limbah kategori B3.

Sebagian dari abu terbang tersebut telah dimanfaatkan dalam industri konstruksi, produksi semen dan pembuatan keramik. Selain itu abu terbang telah dimanfaatkan untuk reklamasi dan stabilisasi daerah berlumpur. Banyaknya limbah batubara yang dihasilkan tidak seiring dengan cara penanganannya dan volume pemanfaatan yang rendah, data Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan KESDM (2018) pemanfaatannya hanya berkisar 45% sebagai substitusi bahan baku.

Melihat potensi dari penggunaan dari limbah *fly ash bottom ash* dan mereduksi pencemaran yang dihasilkan serta masih kurangnya material sebagai lapisan dasar, penulis berkenan dalam penelitian ini melakukan uji coba penggunaan *fly ash bottom ash* dicampur dengan tanah sebagai *liner material* penahan logam berat yang dapat diterapkan pada Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA).

Pada dasarnya pengelolaan persampahan tidak luput dari proses pengolahan akhir yang dilakukan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Pada proses ini menghasilkan air lindi (*leachate*) yang merupakan hasil buangan yang perlu penanganan yang serius. Terbentuknya air lindi merupakan hasil dari proses infiltrasi air hujan, air tanah, air limpasan atau air banjir yang menuju dan melalui lokasi pembuangan sampah. Air lindi (*leachate*) menghasilkan pencemaran baik terhadap tanah maupun air lingkungan sekitar TPA (Indra ddk, 2016).

Peraturan Lingkungan Hidup No. 59 tahun 2016 terdapat dua parameter kimia salah satunya adalah logam Kadmium (Cd). Pencemaran logam Kadmium (Cd) dalam lingkungan saat ini menjadi perhatian karena diketahui sangat toksik terhadap manusia maupun hewan. Sifat kadmium yang merupakan logam sangat beracun bagi manusia, selain diduga karsinogenik juga dapat menyebabkan gangguan pada pencernaan, ginjal, dan kerusakan tulang (Notodarmojo, 2005). Batas maksimum kadar kadmium untuk usaha dan/atau kegiatan tempat pemrosesan akhir sampah sebesar 0,1 mg/L. Mengingat dampak yang dapat ditimbulkan oleh kadmium sangat besar maka diperlukan sistem pengolahan yang

baik agar efluen yang dibuang ke badan air tidak melebihi batas maksimum kadar kadmium yang telah ditetapkan. Berbagai metode pengolahan untuk mengurangi kadar kadmium dan kadar logam lainnya telah banyak dilakukan.

Pada penelitian ini, untuk mendapatkan sebuah *liner* yang efektif akan mencegah migrasi cemaran ke lingkungan, khususnya ke dalam air tanah dengan komponen utama sistem *liner* adalah lapisan kedap yang berfungsi sebagai penahan resapan lindi ke lapisan tanah dibawahnya (Sari dkk, 2016). Campuran tanah dan *fly ash bottom ash* untuk menahan logam berat diperlukan *liner material* sebagai alternatif dalam menangani permasalahan TPA dan limbah batubara.

Dalam penelitian ini penulis mengambil Tugas Akhir dengan judul **“Potensi Penggunaan Campuran *Fly Ash And Bottom Ash* dengan Tanah Sebagai *Liner Material* Penahan Logam Berat”**

B. Rumusan Masalah

Secara garis besar masalah pokok pada penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana komposisi efektif campuran limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dengan tanah sebagai *liner material* di TPA dalam kemampuannya menyerap logam cadmium (Cd)?
2. Bagaimana nilai koefisien konduktivitas hidrolik, faktor retardasi, dan koefisien difusi terhadap variasi campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dengan tanah?

C. Maksud dan Tujuan Penelitian

Adapun maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi penggunaan campuran *fly ash* dan *bottom ash* dengan tanah (kemampuan penahan logam berat) sebagai *liner material*.

Adapun tujuan dari rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Mengetahui komposisi efektif campuran limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dengan tanah sebagai *liner material* di TPA dalam menyerap kandungan logam cadmium (Cd).

2. Mengetahui nilai koefisien konduktivitas hidrolis, faktor retardasi, dan koefisien difusi terhadap variasi campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dengan tanah.

D. Batasan Masalah

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Limbah abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) dengan singkatan FABA yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah dari PT. PLN (Persero) PLTU Barru, dengan persentase campuran 40%BA+25%FA; 30%BA+20%FA; 20%BA+10%FA; dan 10%BA+5%FA.
2. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah sedimen hasil pengerukan Waduk Bili-bili, Gowa, Sulawesi-Selatan.
3. Air lindi *artificial* dengan menggunakan bubuk kadmium Sulfat ($CdSO_4$).
4. Penelitian ini dilakukan dengan
 - a. Uji permeabilitas (konduktivitas hidrolis) dengan metode *falling head*.
 - b. Uji adsorpsi dengan kolom kontinyu dengan metode konstan dengan variasi waktu kontak 90 dan 120 menit serta variasi campuran FABA dan tanah sedimen.
5. Material campuran yang digunakan pada penelitian ini adalah Tanah sedimen Bili-bili yang dicampur dengan limbah *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) yang akan diuji di Laboratorium Mekanika Tanah, Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin dan Laboratorium Kualitas Air Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin.

E. Sistematika Penulisan

Secara umum tulisan ini terbagi dalam lima bab, yaitu : Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan, dan diakhiri dengan Penutup. Berikut ini merupakan secara umum mengenai kandungan dari kelima bab tersebut di atas.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan hal-hal mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, maksud dan tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan yang berisi tentang penggambaran secara garis besar mengenai hal-hal yang dibahas dalam bab-bab berikutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan tentang kajian literatur yang berisi penjelasan mengenai teori, temuan, dan penelitian terdahulu yang menjadi acuan untuk melaksanakan penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menguraikan tentang metodologi penelitian yang memuat pembahasan rancangan penelitian, waktu dan lokasi, alat dan bahan, kerangka penelitian, teknik pengumpulan data dan teknik analisa penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini menjelaskan tentang proses pengujian serta analisis perhitungan dan menguraikan pembahasan dari hasil penelitian serta analisis yang dilakukan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari penelitian serta dengan saran-saran yang diusulkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bagian ini berisi tentang referensi sumber yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Umum

Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara di Indonesia mendorong pengembangan ekonomi nasional. Pertumbuhan Produk Domestik Bruto (PDB) sangat tergantung pada peningkatan rasio elektrifikasi dan konsumsi listrik per kapita. Berdasarkan data Dirjen Pengelolaan Sampah, LB3 tahun 2019 menuliskan bahwa dalam mengupayakan pasokan listrik yang merata ke seluruh Indonesia terutama wilayah terpencil membangun PLTU 35.000 MW.

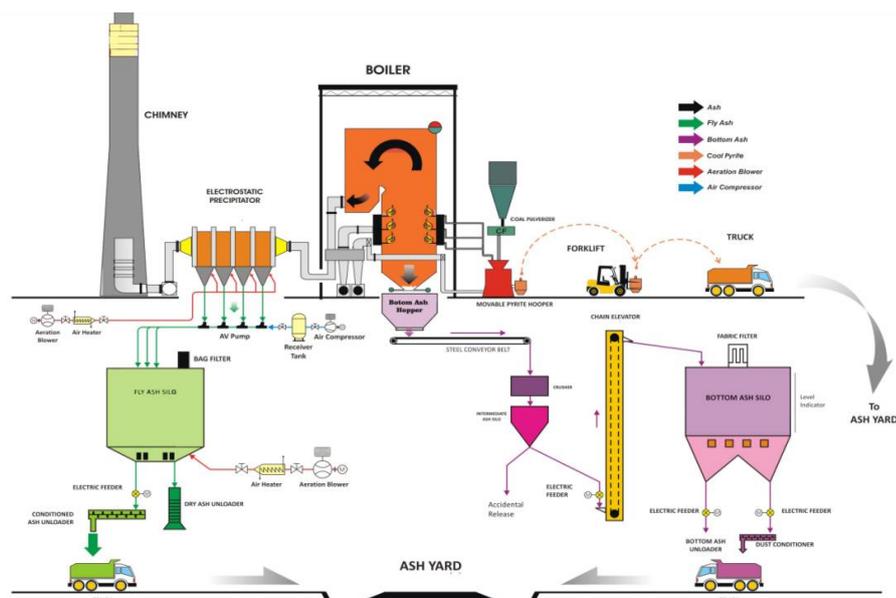
Penggunaan batubara akan meningkat secara signifikan seiring dengan program pemerintah tersebut. Di mana 55% PLTU tersebut menggunakan bahan bakar batubara. Tahun 2019 akan terjadi peningkatan kebutuhan sekitar 100 juta ton, sehingga diperkirakan total kebutuhan batubara untuk PLTU di Indonesia akan mencapai 200 ton per tahun. Peningkatan PLTU berbahan bakar batubara, maka semakin meningkat pula volume abu batubara (*Fly Ash* dan *Bottom Ash* yang selanjutnya disingkat FABA) yang diperkirakan sekitar 10 juta per tahun limbah padat *fly ash* dan *bottom ash* sekitar 2 juta per tahun (Bakri, E. P., *et al*, 2019).

Oleh karena itu, banyak riset yang telah dilakukan lembaga penelitian atau universitas diberbagai negara untuk mengkaji serta mempelajari manfaat dan efektivitas dari *Fly ash* dan *Bottom ash* tersebut. Didukung oleh PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. PP tersebut merupakan turunan dari UU Cipta Kerja pada Pasal 458 (3) Huruf C PP 22/2021, dijelaskan bahwa *Fly Ash* batubara (FABA) dari kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan kegiatan lainnya tidak termasuk sebagai limbah B3 namun dikategorikan sebagai limbah Non-B3. Olehnya itu, *Fly Ash* dan *Bottom Ash* dari kegiatan PLTU dapat menjadi bahan baku bagi kegiatan pemanfaatan limbah B3 tersebut. Kegiatan pemanfaatan dapat membuka peluang usaha bagi masyarakat

dan diharapkan memberikan keuntungan bagi semua pihak, baik dari sisi pelaku usaha/kegiatan maupun bagi masyarakat maupun lingkungan. Serta didukung oleh berbagai data dan riset yang mampu memberikan dukungan dalam pemanfaatan limbah B3.

B. Proses Penghasil *Fly Ash* dan *Bottom Ash*

Proses pembakaran batubara di *Boiler Furnace* menghasilkan material inorganik atau oksida logam dan material sisa karbon yang tidak terbakar. Material inorganik yang tidak terbakar dan berukuran sangat kecil serta sangat ringan terbawa bersama gas buang (*flue gas*) keluar dari boiler. Material ini ditangkap oleh alat penangkap debu. Material ini disebut abu terbang (*Pulverized Fuel Ash* atau *PFA* atau *Fly Ash*). Material lain yang lebih berat dan tidak terbakar jatuh ke *Submersible Scraper Chain Conveyor* (SSCC) yang terletak dibagian bawah boiler. Material ini dikenal sebagai abu bawah (*Furnace Bottom Ash* atau *FBA* atau *Bottom Ash*). Dari total kandungan abu batubara yang dibakar didalam boiler, 85% menjadi abu terbang (*Fly Ash*) dan 15% menjadi abu bawah (*Bottom Ash*) (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019). Diagram proses menghasilkan FABA selengkapnya seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. 1 Proses PLTU Menghasilkan FABA
(sumber : Ditjen PS, LB3, 2019)

C. Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)

Limbah adalah suatu sisa dari suatu usaha/kegiatan yang berasal dari hasil samping dari suatu kegiatan dan limbah industri adalah buangan yang berasal dari kegiatan perindustrian (Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021). Salah satu kegiatan industri yang menimbulkan masalah penting adalah industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap/PLTU. Sukandarrumidi (2009) menuliskan dalam bukunya, abu terbang yang dihasilkan PLTU di seluruh dunia pada tahun 2005 tercatat lebih dari 150 juta ton tiap tahun. Kemudian mengalami peningkatan mencapai 200 juta ton per tahun, dengan perkiraan limbah padat *fly ash* 10 juta ton per tahun dan *bottom ash* sekitar 2 juta ton per tahun (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019). Setengah dari jumlah tersebut, belum dimanfaatkan dan menimbulkan polusi terhadap lingkungan. Sisa pembakaran yang merupakan hasil kegiatan PLTGU berupa limbah padat berupa :

1. Limbah *Fly Ash*

Komposisi pembakaran batubara menghasilkan 80-90% *Fly Ash* dan *Bottom Ash* 10-20%. Pemanfaatan FA sangat luas misalnya dalam bidang konstruksi, tambang, sub-base jalan, pertanian, cat, komposit pengganti kayu dan sebagai adsorben berbiaya rendah untuk menghilangkan senyawa organik.

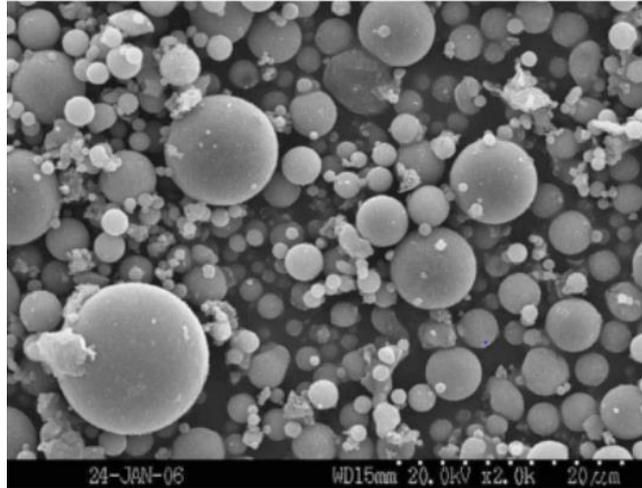
a) Pengertian

Menurut SNI 03-6414-2002, *Fly Ash* merupakan limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar dan bersifat pozolanik. Sedangkan ASTM C-618 dalam Suraneni P. dkk. (2021), *Fly Ash* didefinisikan sebagai butiran halus residu pembakaran batubara atau bubuk batu bara.

b) Ukuran

Ukuran partikel *Fly Ash* bervariasi mulai yang lebih kecil dari 1 μm (micrometer) sampai yang lebih besar dari 100 μm , sebagian besar partikel berukuran $< 20 \mu\text{m}$. Umumnya hanya sekitar 10 % sampai 30 % ukuran partikel *fly ash* lebih besar dari 50 μm . Luas permukaan *Fly Ash* umumnya berkisar 300

m²/kg – 500 m²/ kg fly ash, dengan batas bawah 200 m²/kg dan batas atas 700 m²/kg (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019).



Gambar 2. 2 Ukuran *Fly Ash*
Sumber: Ditjen PSLB3, 2019

c) Specific Gravity dan Massa Jenis

Specific Gravity (Gs) *Fly Ash* bervariasi antara 1,6 – 3,1. Pada umumnya *specific gravity* material *fly ash* antara 1,9 – 2,55. Massa jenis *Fly Ash* dalam kondisi kering berkisar 540 – 860 kg/m³, dan dalam kondisi dengan penggetaran dalam kemasan 1.120 – 1.500 kg/m³ (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019).

d) Klasifikasi Fly Ash

Menurut ASTM C-618 *Fly Ash* dibagi menjadi dua kelas yaitu *Fly Ash* kelas F dan *Fly Ash* kelas C.

(1) Kelas F

Fly ash kelas F biasanya dihasilkan dari pembakaran batubara *anthracite* atau *bituminous coal*. Sifat *fly ash* jenis ini tidak *self-hardening* akan tetapi umumnya bersifat pozzolan. Jadi dengan adanya air *fly ash* ini bereaksi dengan kapur untuk membentuk hasil-hasil yang bersifat cementitious. Reaksi pozzolan ini berlangsung secara lambat.

(2) Kelas C

Fly ash kelas ini biasanya merupakan hasil pembakaran batubara yang sub-bituminous dan lignite yang selain mempunyai sifat pozzolan juga mempunyai

sifat *self-hardening* sehingga pada waktu dicampur dengan air *fly ash* jenis ini akan mengeras akibat hidrasi seperti halnya pada semen portland.



Gambar 2. 3 (a). Fly Ash Kelas F; (b). Bottom Ash Kelas C
(Sumber: Ditjen PSLB3, 2019)

Kriteria penggolongan abu terbang berdasar hasil Analisa senyawa-senyawa oksida adalah :

Tabel 2. 1 Kriteria Kelas Abu Terbang

No	Senyawa Oksida	Kelas F	Kelas C
1	SiO ₂ (%)	55	40
2	Al ₂ O ₃ (%)	26	17
3	Fe ₂ O ₃ (%)	7	6
4	CaO (lime) (%)	9	24
5	MgO (%)	2	5
6	SO ₃ (%)	1	3

Sumber : KLHK; Ditjen PSLB3, 2019

e) Komponen Kimia

Fly ash batubara mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), fero oksida (Fe₂O₃) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO₂), alkalin (Na₂O dan K₂O), sulfur trioksida (SO₃), pospor oksida (P₂O₅) dan karbon (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019).

Berdasarkan ASTM C 618-68 yang menjadi referensi SNI 2460:2014, persyaratan kimia dan fisika abu terbang dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2. 2 persyaratan kandungan kimia fly-ash

Sifat	Persyaratan	Kelas F	Kelas C
Sifat Kimia	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min%	70,0	70,0

Sifat	Persyaratan	Kelas F	Kelas C
	SO ₃ , maks%	5,0	5,0
	Kadar air, maks%	3,0	3,0
	Hilang pijar (LOI), maks%	6,0	6,0
	CaO, %	<10*	<10* *
	C, %	5-10	2
Sifat Fisika	Kehalusan/ <i>Fineness</i> , maks%	34	34
	Dengan portland cement, 7 hari, min%	75	75
	Dengan portland cement, 28 hari, min%		
	Kebutuhan air, maks% control	105	105
	<i>Soundness, autoclave expansion</i> atau kontraksi, maks%	0,8	0,8
Persyaratan Keseragaman	Berat jenis, maks% variasi dari rata-rata	5,00	5,00
	Persentase tertahan pada saringan 45 µm (No. 325), maks % variasi dari rata-rata	5	5

Sumber: ASTM C 618, 2005

* dihasilkan dari pembakaran anthracite atau bitumen batubara (bituminous).

** dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub-bitumen batubara (batubara muda/subbituminous)

Tabel 2. 3 Komposisi Fly Ash PLTU Barru

Origin Fly Ash	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ %	CaO %	Setting Time	28 hari MPa	Class	Application
Barru	65,05	20,2	01:10		C	AVERAGE

Sumber: (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019).

2. Limbah *Bottom Ash*

a) Pengertian

Abu dasar atau yang lebih dikenal sebagai *Bottom Ash* adalah sisa proses batubara yang mempunyai ukuran partikel lebih besar dan lebih berat disbanding *Fly Ash*, sehingga akan jatuh pada dasar tungku (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019).

b) Ukuran

Ukuran *bottom ash* lebih mendekati ukuran pasir, biasanya 50 % - 90 % lolos pada saringan 4.75 mm (No. 4), 10 % - 60 % lolos pada saringan 0.6 mm

(No. 40), 0 % - 10 % lolos pada saringan 0.075 mm (No. 200), dan ukuran paling besar berkisar antara 19 mm (3/4 in) sampai 38.1 mm (1- 1/2 in).

Tabel 2. 4 Ukuran butiran dari pertikel bottom-ash (persentase lolos saringan)

Ukuran Saringan	Bottom-Ash		
	Glasgow	New Haven	Moundsville
3\$ mm (1-1/2 in)	100	99	100
19 mm (3/4 in)	100	95	100
9.5 mm (3/\$ in)	100	87	73
4.75 mm (NO. 4)	90	77	52
2.36 mm (No. \$)	80	57	32
1.1\$ mm (No. 16)	72	42	17
0.60 mm (No. 30)	65	29	10
0.30 (No. 50)	56	19	5
0.15 (No. 100)	35	15	2
0.075 mm (No. 200)	9	41	1

Sumber: Kurniasari, 2017

c) Karakteristik

(1) Karakteristik Fisik

Dalam tulisan (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019), sifat fisik dari *Bottom Ash* adalah:

Tabel 2. 5 Sifat Fisik *Bottom Ash*

No	Sifat Fisik	Basah	Kering
1	Bentuk	Angular/bersiku	Berbutir kecil/granular
2	Warna	Hitam	Abu-abu gelap
3	Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus, berpori
4	Ukuran	No. 4 (90-100%)	1,5 – ¾ in (100%)
5	% Lolos ayakan	No. 10 (40-60%)	No. 4 (50-90%)
		No. 40 (≤10%)	No. 10 (10-60%)
		No. 200 (≤5%)	No. 40 (0-10%)
6	Berat jenis spesifik	2,3 – 2,9	2,1 – 2,7
7	Berat unit kering	960 – 1440 kg/m ³	720 – 1600 kg/m ³
8	Penyerapan	0,3 – 1,1 %	0,8 – 2 %

Sumber : (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk., 2019)

(2) Karakteristik Kimia

Komposisi kimia dari *Bottom Ash* sebagian besar tersusun dari unsur unsur Si, Al, Fe, Ca serta Mg, S, Na dan lainnya. Berdasarkan data (Bakri, E. P.,

Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk, 2019), diperoleh bahwa kandungan garam dan pH yang rendah pada abu dasar batubara dapat menimbulkan korosi pada struktur baja yang bersentuhan dengan campuran yang mengandung abu dasar batubara. Sedangkan rendahnya nilai pH ditunjukkan oleh tingginya kandungan sulfat yang terlarut menunjukkan adanya kandungan pirit (FeS) yang besar.

Komposisi kimia dari *bottom ash* yaitu silika, alumina dan besi dengan sedikit kalsium, magnesium, sulfat, dan komponen yang lain.

Tabel 2. 6 Komposisi kimia dari *bottom-ash* (prosentase berat)

Tipe Batubara	Tipe Bottom Ash				
	Bitumen		Sub-bitumen		Lignit
Lokasi	West Virginia	Ohio	Texas		
SiO ₂	53.6	45.9	47.1	45.4	70.0
Al ₂ O ₃	28.3	25.1	28.3	19.3	15.9
Fe ₂ O ₃	5.8	14.3	10.7	9.7	2.0
CaO	0.4	1.4	0.4	15.3	6.0
MgO	4.2	5.2	5.2	3.1	1.9
Na ₂ O	1.0	0.7	0.8	1.0	0.6
K ₂ O	0.3	0.2	0.2	-	0.1

Sumber: Kurniasari, 2017



Gambar 2. 4 Bottom Ash

Sumber : (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A., dkk., 2019)

D. Persyaratan Pemanfaatan FABA

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. PP tersebut merupakan turunan dari UU Cipta Kerja pada Pasal 458 (3) Huruf C PP 22/2021

tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup pada lampiran XIV, limbah *fly ash* dan *bottom*

Fly ash dan *bottom ash* (FABA) masuk dalam kategori daftar limbah non B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara pada fasilitas PLTU atau kegiatan lain yang menggunakan teknologi selain *stoker Boiler*. Dalam sosialisasi Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2021) menyatakan bahwa material FABA digolongkan sebagai limbah non-B3 karena pembakaran batubara di kegiatan PLTU dilakukan pada temperature tinggi, sehingga kandungan karbon yang tidak terbakar dalam FABA menjadi minimum dan lebih stabil saat disimpan.

Persyaratan limbah B3 sebagai bahan baku memiliki persyaratan seperti disajikan pada tabel berikut :

Tabel 2. 7 Persyaratan Teknis Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash

No	Jenis Pemanfaatan	Persyaratan
1	Pemanfaatan sebagai bahan baku : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Penggilingan dan pengepakan semen; ▪ Beton siap pakai dan precast; ▪ Paving blok, batako, canblok 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hasil uji total oksida logam untuk $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ untuk setiap jenis limbah B3 yang akan dimanfaatkan; ▪ Hasil uji kandungan <i>fixed carbon</i>/LoI (<i>Loss Of Ignation</i>) untuk setiap jenis limbah B3 yang akan dimanfaatkan $\leq 10\%$; ▪ Memiliki fasilitas tempat penyimpanan LB3; ▪ Komposisi penggunaan penyimpanan LB3; ▪ Standar produk yang diacu; ▪ Hasil uji kualitas produk; ▪ Uji TCLP produk yang dihasilkan.
2	Pemanfaatan sebagai campuran bahan baku pembuatan batu bata/batu merah	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hasil uji total oksida logam untuk $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ untuk setiap jenis limbah B3 yang akan dimanfaatkan; ▪ Hasil uji kandungan <i>fixed carbon</i>/LoI (<i>Loss Of Ignation</i>) untuk setiap jenis limbah B3 yang akan dimanfaatkan $\leq 10\%$; ▪ Memiliki fasilitas tempat penyimpanan LB3; ▪ Komposisi penggunaan penyimpanan LB3; ▪ Standar produk yang diacu; ▪ Hasil uji kualitas produk; ▪ Uji TCLP produk yang dihasilkan.
3	Pemanfaatan untuk bahan baku semen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hasil uji total oksida logam untuk $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$ untuk setiap jenis limbah B3 yang akan dimanfaatkan;

No	Jenis Pemanfaatan	Persyaratan
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tidak tergolong <i>negative list</i> limbah elektronik tidak tersortir, limbah baterai, limbah infeksius asam mineral yang korosif, limbah eksplosif dan limbah radioaktif; ▪ Fasilitas pengukuran emisi sesuai peraturan yang berlaku; ▪ Sistem pengendali pencemaran udara yang sesuai peraturan perundang-undangan; ▪ Fasilitas tempat penyimpanan limbah B3 yang akan dimanfaatkan; ▪ Komposisi penggunaan untuk setiap jenis limbah B3 yang dimanfaatkan standar produk yang diacu SNI, dll).
4	Pemanfaatan sebagai <i>road base/base coarse</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hasil uji total logam untuk setiap jenis limbah B3 yang akan dimanfaatkan; ▪ Hasil uji CBR (<i>California Bearing Ratio</i>); ▪ Standar produk yang diacu dan hasil uji kualitas produk; ▪ Desain teknis konstruksi yang akan dilakukan

Sumber : (Bakri, E. P., Rolliyah., Zen, I., Artono, A, RT., Karim, A.,dkk., 2019)

Untuk persyaratan Administrasi mengacu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 95 Tahun 2008 tentang Perizinan Pengelolaan Limbah B3 Terintegrasi dengan Izin Lingkungan Melalui Pelayanan Perizinan Berusaha Terintegrasi Secara Elektronik.

E. Pemanfaatan *Fly Ash* di beberapa Negara dan di Indonesia

Pengeluaran *fly ash* dari daftar limbah berbahaya kerap kali menimbulkan berbagai persoalan, namun memicu tingkat pemanfaatan limbah ini berbagai negara dan di Indonesia sendiri telah menerapkan hal tersebut (meskipun di Indonesia sendiri masih di bawah dari negara lain) dari segi tingkat pemanfaatannya.

Contohnya, China merupakan produsen *Fly Ash* dan *Bottom Ash* terbesar di dunia meskipun (hanya mengelola FA dan BA sebagian dibuang ke pembuangan akhir), namun pemanfaatan FA sudah sebanding dengan produksinya yaitu semen (44%), *wall materials* (28%) dan beton (16%) (Bakri, E. P., et al., 2019). Kemudian negara penghasil FABA terbesar kedua di dunia adalah USA, *American Coal Ash*

Association dalam (Bakri, E. P., *et al.*, 2019) telah melakukan survei produksi dan pemanfaatan produk pembakaran batubara di Amerika Serikat setiap tahun sejak tahun 1996 dan menunjukkan dari tahun 1991-2017 mengalami fluktuasi dengan produksi tertinggi tahun 2008 serta terus mengalami peningkatan pemanfaatan terbesar pada tahun 2017.

Pemanfaatan limbah ini kemudian disusul berdasarkan data (Ekaputri *et al.*, 2020), tingkat daur ulang di beberapa negara juga tinggi seperti Belanda 100%, Denmark 90%, Jerman 79%, Belgia 73%, Perancis 70%. Di Asia, Jepang sudah sejak lama memanfaatkan *fly ash* hingga 92% (Ekaputri *et al.*, 2020), dominan pemanfaatan adalah sebagai pengganti semen, industri semen menyumbang 8,39 juta ton atau 67,9%, pekerja sipil, konstruksi, pertanian/perikanan (Bakri, E. P., *et al.*, 2019). Disusul, India yang merupakan kedua terbesar setelah China dan nomor tiga di dunia setelah USA produsen FABA terbesar dengan produk pemanfaatan FA dari tahun 2016-2017 masih didominasi sebagai campuran semen, urungan dipertambangan, beton, *hydro power* (Bakri, E. P., *et al.*, 2019).

Sedangkan di Indonesia sebagai negara terbesar di Asia Tenggara telah merubah status berdasarkan turunan dari UU Cipta Kerja pada Pasal 458 (3) Huruf C PP 22/2021, *Fly Ash* batubara (FABA) dari kegiatan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan kegiatan lainnya tak termasuk sebagai limbah B3 melainkan limbah Non-B3. Berikut ini pemanfaatan FABA di Indonesia, sebagai berikut :

Tabel 2. 8 Pemanfaatan FABA di Indonesia

No	Jenis Pemanfaatan	<i>Fly Ash</i>	<i>Bottom Ash</i>
1	Substitusi bahan baku untuk material infrastruktur	<ol style="list-style-type: none"> 1. Substitusi agregat dalam pembuatan batako, paving/cone block dan genteng; 2. Campuran dalam pembuatan beton siap pakai (ready mix); 3. Pemanfaatan sebagai Subbased Jalan; 4. Filler Asphalt 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Substitusi agregat dalam pembuatan batako, paving/cone block dan genteng; 2. Pemanfaatan sebagai Subbased Jalan.

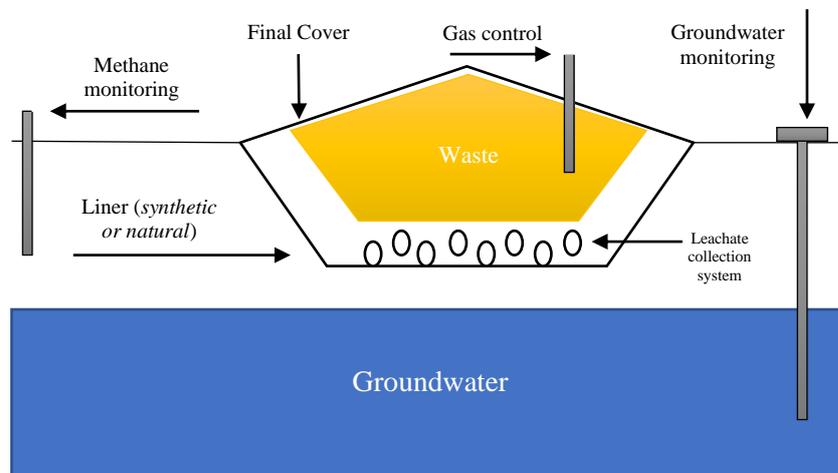
No	Jenis Pemanfaatan	<i>Fly Ash</i>	<i>Bottom Ash</i>
2	Substitusi bahan baku untuk daerah Tambang	Lapisan Tudung untuk menetralsir air asam tambang	--
3	Substitusi bahan baku untuk daerah Tambang	<ol style="list-style-type: none"> 1. Substitusi material dalam produksi semen dan cement clinkers; 2. Kegiatan batching plant untuk menghasilkan produk beton siap pakai. 	Bottom ash sebagai substitusi material dalam pabrik semen memerlukan tambahan perlakuan yaitu harus dilakukan penghalusan (grinding) terlebih dahulu

Sumber : Data KLHK, 2021

F. Sistem Pelapis TPA (*Liner*)

Tempat pembuangan sampah adalah penahan limbah yang direncanakan untuk meminimalkan dampak limbah terhadap lingkungan dan Kesehatan manusia. Di tempat pembuangan sampah, sampah ditampung dengan sistem *liner* di bagian bawah dan sistem penutup di bagian atas. Lapisan penghalang merupakan komponen terpenting dari *liner material* untuk dapat mencegah penyebaran lindi atau gas yang dihasilkan oleh TPA. Fungsi lainnya mengurangi mobilitas lindi dan mencegah logam berat yang ditemukan di air lindi TPA yang bermigrasi ke dalam air tanah.

Gambar 2.5 menunjukkan tampilan penampang khas dari TPA yang telah direkayasa. Karena lapisan tanah liat tidak kedap air secara sempurna, pengangkutan kontaminan melalui lapisan tanah liat bergantung pada konduktivitas hidrolis dan fenomena adveksi-difusi (Ajitha A.R *dkk*, 2020). Selain itu, kompatibilitas *liner* tanah dengan kontaminan tertentu tergantung pada dua faktor, kemampuan tanah *liner* yang untuk menahan variasi konduktivitas hidrolis yang disebabkan oleh kontaminan dan kapasitasnya untuk menghambat migrasi kontaminan melalui penyerapan (Li dan Li, 2001 dalam Ajitha A.R *dkk*, 2020).



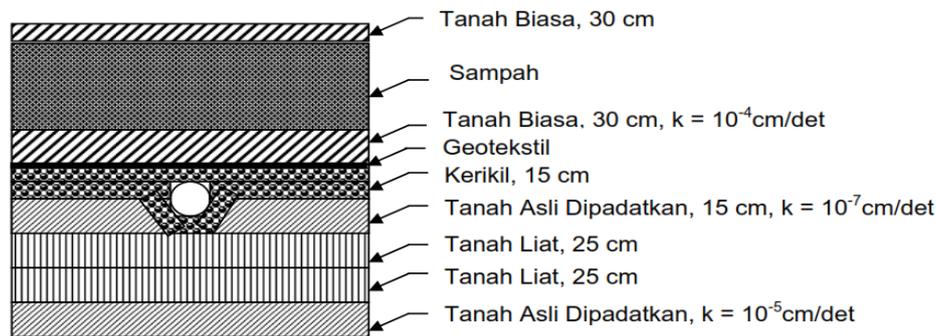
Gambar 2. 5 Tampilan penampang TPA

(Sumber: Wesley, 2012)

Sebuah *liner* yang efektif akan mencegah migrasi cemaran ke lingkungan, khususnya kedalam air tanah. Salah satu komponen utama sistem *liner* adalah lapisan kedap yang berfungsi sebagai penahan resapan lindi ke lapisan tanah di bawahnya (Damanhuri, 2008). Sehingga dasar sebuah LU akan terdiri dari 3 komponen utama yaitu :

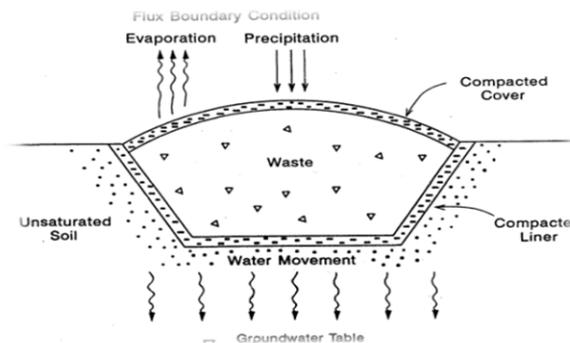
- 1) Lapisan kedap, lapisan terbawa yang berfungsi sebagai penahan resapan lindi ke air tanah, bisa dari bahan alami atau geosintetis;
- 2) Lapisan media drainase, bisa pasir/kerikil, atau geosintetis yang berfungsi sebagai media mengalirkan lindi menuju ke saluran pengumpul (pipa);
- 3) Lapisan media pelindung, berfungsi sebagai pelindung lapisan kedap air pelintasan kendaraan dan gangguan-gangguan lainnya.

Pemasangan pelapis dasar (*liner*) TPA memiliki fungsi untuk melindungi air tanah dari kontaminasi lindi. Pelapis dasar dibuat sebelum TPA digunakan sebagai tempat pembuangan sampah, umumnya digunakan bahan yang memiliki permeabilitas rendah sebagai pelapis dasar TPA. Pelapisan ini dilakukan dengan cara melapisi dasar TPA dengan geomembran setebal 1,5 mm. pada dasar TPA dilengkapi dengan saluran pipa pengumpul lindi (*leachate*) dan kemiringan minimal 2% kearah saluran pengumpul maupun penampung lindi (Sari dkk, 2016).



Gambar 2. 6 Lapisan Dasar (liner) TPA
 (Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2006))

Struktur *liner material* terdapat *compacted soil liner* yang digunakan untuk tempat pembuangan limbah sebagai penutup unit pembuangan limbah (*landfill*). Menurut (Gunawan dkk, 2015), secara sederhana struktur *compacted soil liner* dapat digambarkan dari pelapis dasar (*liner*) dan penutup (*cover*) seperti pada gambar berikut.



Gambar 2. 7 Struktur Compacted Soil Liner
 (Sumber: Gunawan dkk, 2015)

Secara umum, *Environmental Protection Agency* (EPA, 1993) dalam (Gunawan dkk, 2015), menetapkan batas minimum ketebalan pelapis dasar (*liner*) yang diizinkan, yaitu ketebalan pelapis dasar (*liner*) harus lebih besar dari 2 ft (0,6 m). dan menurut Damanhuri (2008), kelulusan minimal dari campuran tanah mempunyai nilai maksimum 1×10^{-7} cm/detik.

Tabel 2. 9 Panduan dalam Desain Liner

Properti	Nilai
Konduktivitas hidrolik	$<1 \times 10^{-7}$ cm/dtk
PI	$\geq 12 - 30\%$
Jumlah kerikil	$\leq 30\%$

Properti	Nilai
Ukuran partikel maksimum	25 – 50 mm

Sumber: EPA, 2013 dalam Ajitha A.R dkk, 2020

G. Tanah

Tidak seperti bahan baja atau beton, tanah merupakan bahan yang memiliki sifat yang tidak seragam. Umumnya tanah terdiri atas dua macam bahan atau tidak jarang ditemukan ada tiga macam bahan. Bahan-bahan komponen tanah ini disebut “fase”, dan tanah disebut bahan dua fase atau tiga fase. Ketiga fase ini adalah butiran tanah (padat), air, dan udara. Ada kecenderungan pada butiran tanah untuk saling terkait dan membentuk apa yang dinamakan kerangka tanah, seperti pada Gambar 2.8

Sebagian besar tanah yang ditemukan ahli geoteknik hanya mengandung air pada rongga pori. Tanah seperti ini disebut tanah jenuh. Tanah yang juga mengandung udara disebut tanah tak jenuh atau tanah jenuh sebagian. Terdapat satu pengecualian, yaitu tanah yang dipadatkan, yang mengandung sedikit udara, sekitar 5% sampai dengan 10% dari volume total (Wesley, 2012).

Secara geologi tanah merupakan lapukan dari batuan yang terbawa oleh aliran air atau angin dan diendapkan hingga mengeras, maka tanah merupakan material yang susunannya terdiri dari butiran tanah, air dan udara. selain susunan tanah secara alami, juga dapat dilakukan perbaikan susunan butiran dengan cara menambahkan pengisi (*filler*) ataupun bahan kimia seperti semen agar tanah berubah sifatnya dan menjadi lebih baik kekuatannya, karena proses sementasi maka butiran tanah akan terikat kuat dan lebih rapat air (Ukiman dkk, 2017).

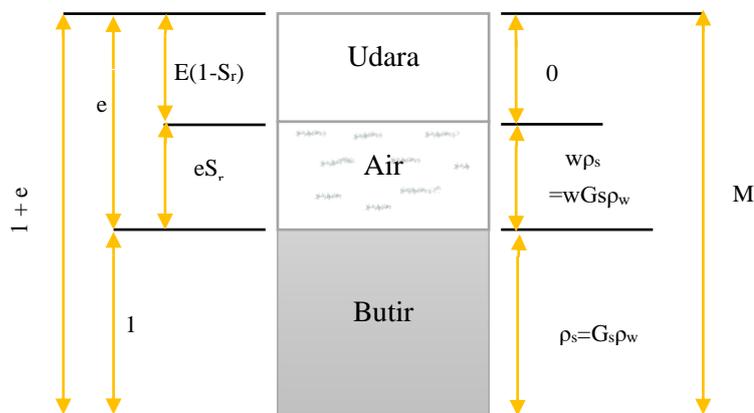
Dalam buku Wesley, L.D. (2012), ada berbagai definisi dan istilah yang digunakan untuk menjelaskan sifat dan perbandingan ketiga fase pembentuk tanah.

Tabel 2. 10 Definisi dan Hubungan Antarfase

Istilah	Simbol	Definisi	Satuan	Batas Ukuran
Kepadatan total	ρ	Massa total/volume total	kg/m ³	1500 - 2100
			gr/cm ³	1,5 - 2,1
			ton/m ³	1,5 - 2,1
Berat satuan	γ	Berat total/volume total ($Mg/V=W/V$)	kN/m ³	15 - 21

Istilah	Simbol	Definisi	Satuan	Batas Ukuran
Kadar air	w	Berat air/ berat butiran (M_w/M_s)	%	15-80 (boleh >100)
Kepadatan kering	ρ_d	Massa butiran/volume total (M_s/V)	kg/m ³ gr/cm ³ ton/m ³	1200 - 1800 1,2 - 1,8
Berat satuan kering	γ_d	Berat butiran/volume total ($M_s g/V = W_s/V$)	kN/m ³	12 - 18
Kepadatan butiran	ρ_s	Massa butiran/volume butiran (M_s/V_s)	kg/m ³ gr/cm ³	2600 - 2750 2,6 - 2,75
Berat jenis	G_s	Berat satuan/berat satuan air (ρ_s/ρ_d)	-	2,6 - 2,75
Angka pori	e	Volume pori/volume butiran (V_v/V_s)	-	2,6 - 2,75
Porositas	n	Volume pori/volume total (V_v/V)	-	0,3 - 2,0 (dapat >8)
Derat kejenuhan	S_r	Volume air/volume pori (V_w/V_v)	%	0 - 100
Kadar udara	a_v	Volume udara/volume total (V_a/V)	%	0 - 20

Sumber : Wesley 2012



Gambar 2. 8 Ketiga fase tanah secara skematik, dengan mengambil volume butiran sebagai kesatuan

(Sumber: Wesley, 2012)

1. Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah terdiri atas dua sistem yang sering digunakan. Pertama, sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) yang menggunakan sifat indeks tanah berupa batas atterberg, analisis saringan, dan analisis hidrometer. Sistem klasifikasi *unified* mendefinisikan tanah sebagai tanah berbutir kasar apabila lebih dari 50% tertahan

pada saringan No. 200 atau berukuran 0,074 mm dan tanah berbutir halus apabila lebih dari 50% lolos saringan No. 200 (Sutarman, 2013, hlm:28-29). (**Tabel 2.11**)

Kedua, Sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) atau sistem klasifikasi kesatuan dikembangkan oleh Casagrande ketika Perang Dunia II, terutama untuk digunakan dalam penilaian tanah untuk pembangunan lapangan terbang (Wesley, 2012, hlm: 45). (**Tabel 2.12**)

Tabel 2. 11 Pengelompokkan Tanah dengan Ukuran Butiran

Kerikil	Tanah Berbutir Kasar atau tanah tidak berkohesi			Tanah Berbutir Halus atau tanah berkohesi	
	Pasir			Lanau	Lempung
	Kasar	Sedang	Halus		
60	2	0,6	0,2	0,06	0,002
Ukuran Butir (mm)					

Sumber: Laurence D. Wesley 2012

Tabel 2. 12 Klasifikasi Tanah Sistem AASHTO

Klasifikasi Tanah	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)						
	A – 1		A - 3	A – 2			
Kelompok	A-1-a	A-1-b			A-2-4	A-2-5	A-2-6
Analisa ayakan (% lolos) :							
No. 10	Max.50						
No. 40	Max.30	Max.50	Min.51				
No. 100	Max.15	Max.25	Max.10	Max.35	Max.35	Max.35	Max.35
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 :							
Batas cair (LL)			NP	Max.40	Min.41	Max.40	Min.41
Ind. Plastis (IP)	Max.6			Max.10	Max.10	Min.11	Min.11
Tipe material yang paling dominan	Batu pecah, kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir berlanau atau berlempung			
Penilaian sebagai bahan tanah dasar			Baik sekali sampai baik				

Sumber: Laurence D. Wesley 2012

Tabel 2. 13 Tipe Lanau – Lempung pada Klasifikasi Tanah

Klasifikasi Tanah	Tipe Lanau – Lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 300)			
Klasifikasi				A – 7
Kelompok	A – 4	A – 5	A – 6	A – (7-5)* A – (7-5)'
Analisa ayakan (% lolos) :				
No. 10				
No. 40				
No. 100	Max. 6	Min. 36	Min. 36	Min. 36
Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40:				
Batas cair (LL)	Max. 40	Max. 41	Max. 40	Min. 41
Ind.Plastis (IP)	Max. 10	Max. 10	Mix. 11	Min. 11
Tipe material yang paling dominan	Tanah Berlanau		Tanah Berlempung	
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa Sampai Jelek			

Sumber: Mekanika Tanah Jilid I, hal. 67, Erlangga, Surabaya

Tabel 2. 14 Klasifikasi Tanah USCS

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Nama Umum
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
		GW
		Kerikil bersih (hanya kerikil)
		GP
	Kerikil butiran halus	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau
		GM
		Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung
		GC
Kerikil 50% atau lebih dari fraksi	Pasir bersih (hanya pasir)	Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
		SW
	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	
SP		
SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	

Divisi Utama	Simbol Kelompok	Nama Umum
Tanah Berbutir Halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung
	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung
	CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung “kurus” (<i>lean clays</i>)
	OL	Lana-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah
	MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatome, atau lanau diatome, lanau yang elastis
	CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung “gemuk” (<i>fat clays</i>)
	OH	Lempung anorganik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi
Tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	PT	<i>Peat</i> (gambut), <i>muck</i> dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi.

Sumber: *Mekanika Tanah Jilid I*, hal. 67, Erlangga, Surabaya

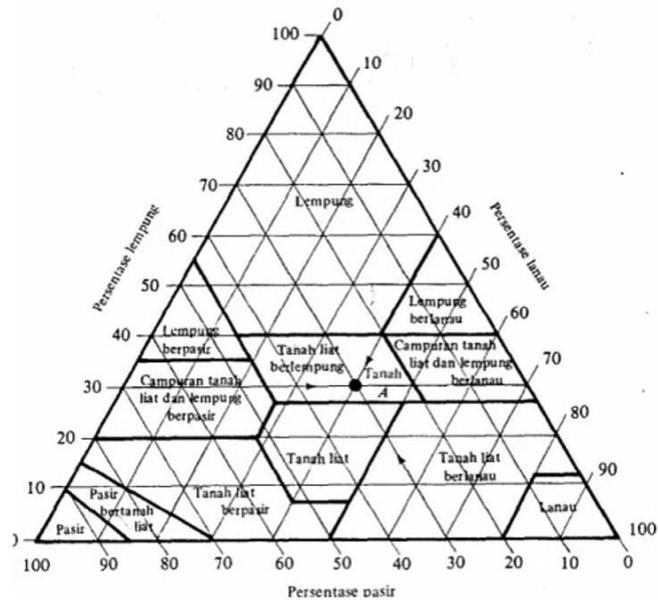
2. Besaran Butir dan Pengaruhnya terhadap Sifat Tanah

Sedikit banyak, sifat-sifat tanah selalu bergantung pada ukuran butirannya, sehingga dipergunakan sebagai dasar klasifikasi tanah. Untuk menggambarkan ukuran butiran pada tanah, digunakan grafik pembagian ukuran butiran, seperti pada Gambar 2.9. Grafik tersebut menunjukkan kadar (dalam persentase) yang lebih halus dari ukuran tertentu (Wesley, 2012, hal: 34). Ukuran butiran tanah menurut ASTM, ditunjukkan oleh Tabel 2.15

Tabel 2. 15 Butir Tanah Menurut ASTM

Butir	Diameter Butir (mm)
Koloidal	< 0,0006
Lempung	0,0006 – 0,0020
Lanau halus	0,0020 – 0,0060
Lanau sedang	0,0060 – 0,0200
Lanau kasar	0,0200 – 0,0600
Pasir halus	0,0600 – 0,2000
Pasir sedang	0,2000 – 0,6000
Pasir kasar	0,6000 – 2,0000

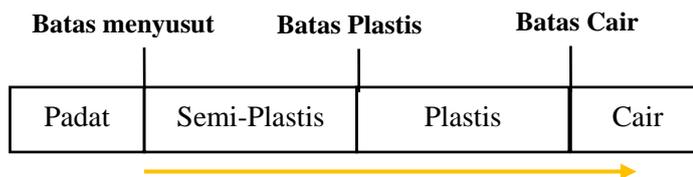
Sumber : *Sutarman, 2013*



Gambar 2. 9 Grafik Pembagian Ukuran Butiran (Gradasi)
(Sumber: Wesley, 2012)

3. Plastisitas dan Batas Atterberg

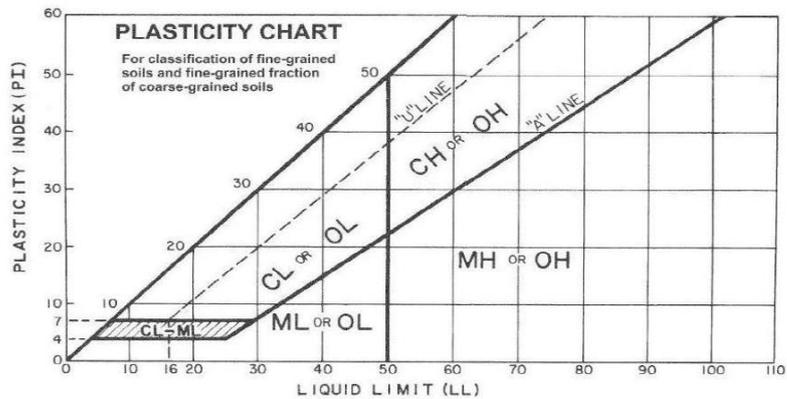
Nilai batas Atterberg adalah kadar air pada batas keadaan plastis tanah, seperti pada Gambar 2.10 yang menunjukkan tahapan yang dilalui lempung apabila kadar air berubah, termasuk tahap pastis (Wesley, 2012 Hlm: 36).



Gambar 2. 10 Tahapan Tanah Padat, Plastis, dan Cair dan batas-batasnya
(Sumber: Wesley, 2012)

Batas atterberg (*Atterberg limit*), yaitu ukuran untuk menentukan batas cair. Batas cair (LL) ditentukan dengan menggunakan peralatan yang terdiri atas cawan yang dangkal yang bisa diangkat dan dijatuhkan dengan memutar pegangannya.

Batas plastis ditetapkan sebagai kadar air dimana tanah dapat digulung hingga berdiameter 3 mm tanpa retak (Wesley, 2012, hal : 38).



Gambar 2. 11 Diagram Plastisitas
(Sumber: Wesley, 2012)

4. Berat Jenis (*Specific Gravity*)

Berat jenis adalah perbandingan antara berat tanah dengan volume tertentu dengan berat air destilasi yang bersuhu 4⁰C dengan volume yang sama dengan volume tanah pada kondisi ruangan yang sama. Berat jenis tanah biasanya digunakan dalam menghubungkan antara berat tanah dengan volumenya. Maka itu, dengan mengetahui *void ratio*, derajat kejenuhan (*degree of Saturation*), dan berat jenis, kita dapat menghitung unit *weight* dari tanah basah. Unit *weight* hampir dibutuhkan di semua permasalahan tekanan, *settlement*, dan stabilitas dalam mekanika tanah. Berat jenis juga banyak digunakan dalam percobaan tanah di laboratorium (Hidayat, 2014).

Tabel 2. 16 Klasifikasi Tanah berdasarkan Berat Jenis

Macam Tanah	Berat Jenis (Gs)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau Tak Organik	2,62 – 2,68
Lanau Organik	2,58 – 2,65
Lempung Tak Organik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

Sumber : Hardiyatmo, 1992

5. Kadar Air

Dapat diketahui, jika kadar air tanah rendah maka tanah akan keras atau kaku sehingga sulit untuk dipadatkan. Pada kadar air tanah tinggi kepadatan tanah akan rendah karena pori-pori tanah menjadi terisi air (Wesley, 2012).

6. Pemadatan (*Proctor Standard*)

Tujuan dari tes pemadatan laboratorium adalah untuk, menentukan jumlah yang tepat mencampur air untuk digunakan ketika pemadatan tanah di lapangan dan mencari nilai kerapatan kering maksimum (γ_{dry}) yang dapat didapatkan dari pemadatan pada kadar air optimum (W_{opt}). Untuk mencapai tujuan ini, tes laboratorium yang diperlukan akan memberikan tingkat pemadatan sebanding dengan yang diperoleh di lapangan (Hidayat, 2014).

Perlu diperhatikan dalam kadar air yang tinggi, berat volume kering dapat berkurang sedangkan pada nilai kadar air rendah tanah cenderung kaku dan sukar untuk dipadatkan. Bila dalam proses pemadatan, semua udara dalam tanah dapat dipastikan keluar, tanah akan berada dalam kedudukan jenuh dan nilai berat volume kering akan menjadi maksimum.

Derajat kepadatan tanah diukur dari berat volume keringnya. Hubungan berat volume kering (γ_{dry}) dengan berat volume basah (γ_b) kadar air (w), dapat dinyatakan pada persamaan berikut :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1 + w}$$

Dimana :

γ_b = berat volume kering (gr/cm^3)

γ_b = berat volume basah (gr/cm^3)

w = kadar air (%)

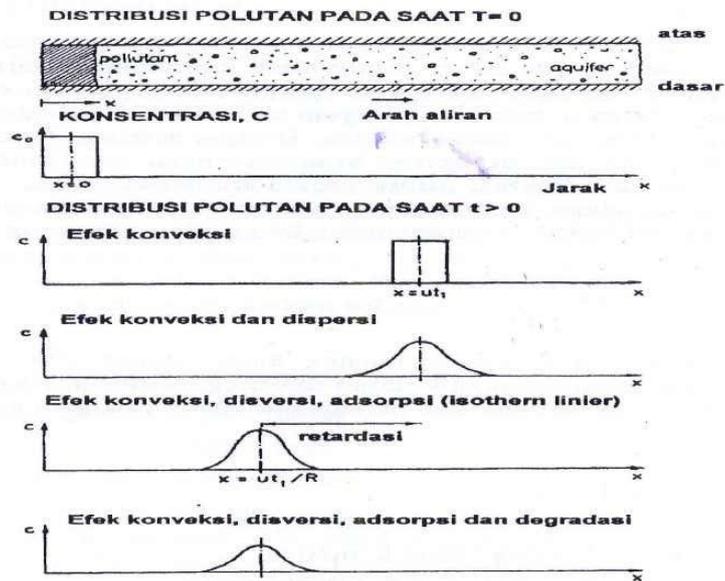
H. Transport Kontaminan dalam Tanah

Kontaminan yang berada dalam tanah selalu dalam kondisi dinamis, yaitu berinteraksi dengan partikel tanah atau mengalami transformasi sampai terjadi keseimbangan. Selain itu, larutan tanah atau air tanah dapat bergerak sesuai dengan energi yang dimilikinya, ke arah di mana energinya lebih rendah. Dengan adanya

pergerakan massa air tersebut, maka kontaminan yang ada dalam air akan ikut bergerak. Dalam upaya memahami proses transportasi kontaminan dalam tanah, hal yang perlu diperhatikan yaitu: adveksi, dispersi hidrodinamik, dan retardasi (Notodarmojo, 2005).

Menurut Notodarmojo (2005), transportasi karena adveksi merupakan proses fisik di mana air sebagai medium bergerak membawa kontaminan yang berada di dalamnya. Transportasi karena proses dispersi hidrodinamik merupakan perpindahan massa akibat difusi kontaminan, gradien konsentrasi mengakibatkan gerak Brown serta mekanisme dispersi. Hal ini terjadi karena ketidakaturan alur atau lintasan air melalui pori. Retardasi merupakan fenomena yang menunjukkan perubahan jumlah dari kontaminan selama terjadi proses transportasi akibat reaksi antara kontaminan dengan media tanah, yang memberikan efek seolah-olah gerakan kontaminan menjadi terhambat (*retarded*).

Perubahan jumlah *solute* dalam fasa cair dapat diakibatkan oleh fenomena *sorpsi-desorpsi* dan fenomena *transformasi*. Fenomena sorpsi adalah fenomena yang menunjukkan perubahan jumlah kontaminan, karena pengaruh atau interaksi dengan partikel tanah, sedangkan transformasi menunjukkan perubahan jumlah kontaminan karena proses reaksi (Notodarmojo, 2005).



Gambar 2. 12 Skematis transport kontaminan dalam tanah
 (Sumber : Saunty 1980 : Notodarmodjo (2005))

I. Adveksi

Proses transport, kontaminan terlarut (*miscible*) yang diakibatkan oleh perpindahan medium di massa *solute* atau kontaminan berada, disebut transport akibat adveksi. Kecepatan perpindahan massa *solute* akibat adveksi sama dengan kecepatan aliran tanah (Notodarmodjo, 2005). Menurut Bedient et al., 1999: Zalenzi (2018), Adveksi dan dispersi merupakan dua proses transport yang paling utama dalam penyebaran kontaminan. Adveksi merupakan proses transport massa yang disebabkan adanya aliran air yang membawa serta kontaminan terlarut.

1. Dispersi Hidrodinamis

Disperse hidrodinamis merupakan gabungan antara proses difusi dan disperse mekanis. Difusi terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi dalam larutan. Ion atau molekul yang larut dalam air mempunyai kecenderungan untuk menyamakan konsentrasi dalam sistem, sehingga akan bergerak dari daerah yang berkonsentrasi tinggi menuju daerah dengan konsentrasi rendah. Disperse mekanis terjadi karena

adanya perbedaan distribusi kecepatan aliran akibat geometri pori dan perbedaan lintasan yang dilalui oleh ion atau molekul (Notodarmojo, 2005; hal: 329).

a) Difusi Molekuler

Konsentrasi yang terlarut merupakan kecenderungan untuk menyamakan konsentrasi dalam sistem, yaitu bergerak dari konsentrasi yang tinggi menuju daerah dengan konsentrasi yang lebih rendah. Proses perpindahan ion atau molekul itu disebut sebagai difusi molekuler atau difusi. Massa dari kontaminan atau *solute* yang berdifusi akan sebanding dengan gradien konsentrasi. Proses difusi akan mengikuti kaidah Fick Pertama, (Notodarmojo, 2005; hal: 329).

$$F = -D_a \left(\frac{dC}{dx} \right)$$

Dimana :

F = fluks massa dari *solute* atau kontaminan (g/m²/detik)

D_a = koefisien difusi (m²/detik)

C = konsentrasi *solute* (g/m³)

dC/dx = gradien konsentrasi g/m³/m)

Metode difusi merupakan metode yang efektif untuk penguatan seluruh permukaan komponen dan umumnya digunakan untuk menguatkan permukaan komponen dalam jumlah yang besar (Davis, 2002 dalam Setiawan, 2015). Kemudian (Setiawan, 2015), proses difusi atomik pada material merupakan perpindahan atom dari konsentrasi yang tinggi menuju konsentrasi yang rendah di dalam material.

Proses difusi terutama diklasifikasikan menjadi difusi *non-steady state* dan difusi *steady state*. Dalam hal difusi *non-steady state*, parameter difusi dikenal dengan sebutan koefisien difusi D_a (m²/s). Teori dasar difusi ini banyak dibahas dalam pustaka (H. Sato *et al*, 1992 dalam Sriwahyuni dkk, 2010), dengan persamaan dasar difusi satu dimensi diberikan oleh Hukum Fick II, seperti berikut

$$\frac{\partial C(t, x)}{\partial t} = D_0 \frac{\partial^2 C(t, x)}{\partial x^2}$$

Dimana C(t,x) ialah konsentrasi unsur terdifusi dalam *specimen bentonite* untuk waktu t (s) dan x (m).

Persamaan *non-steady state* satu dimensi diselesaikan dengan penentuan asumsi kondisi batas, yaitu sebelum proses difusi, terdapat atom-atom pendonor yang terlarut di dalam material dan terdistribusi secara merata sebesar C_0 . Nilai x pada permukaan adalah nol dan meningkat seiring dengan jarak ke dalam material. Nilai awal waktu diberi nilai nol sesaat sebelum proses difusi dimulai. Solusi *semi-infinite* untuk hukum Fick II adalah: Abramowitz *et al*, 1970 dalam Setiawan, 2015

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

dengan C_s adalah konsentrasi atom donor pada kedalaman x dan waktu t (kg/m^3), C_0 adalah konsentrasi atom donor di dalam material (kg/m^3), C_s adalah konsentrasi atom donor di permukaan material (kg/m^3), D adalah koefisien difusi (m^2/s), x adalah kedalaman difusi (m), dan t adalah waktu proses difusi (s).

2. Retardasi

Zat terlarut dalam tanah dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu (Notodarmojo, 2005):

- 1) Zat yang konservatif, yaitu zat yang tidak bereaksi dengan air tanah atau tanah dan tidak mengalami proses transformasi.
- 2) Zat yang reaktif, yaitu zat yang mengalami perubahan kimia, biologis atau radioaktif yang cenderung mereduksi konsentrasi kontaminan.

Retardasi merupakan fenomena yang menunjukkan perubahan jumlah dari kontaminan selama terjadi proses transport akibat reaksi antara kontamina dengan media tanah, yang memberikan efek seolah-olah gerakan kontaminan menjadi terhambat (*retarded*) (Notodarmojo, 2005).

Dalam konteks transformasi kontaminan, reaksi-reaksi tersebut akan berpengaruh pada mobilitas kontaminan atau *solute*, dan memberikan efek yang bersifat “menghambat” (*retarding*). Semua proses yang terjadi pada zat yang reaktif mengakibatkan efek retardasi, yaitu menyebabkan kecepatan transport kontaminan relatif pekat bila dibandingkan dengan transport *non-reacting solute*. Untuk limbah-limbah yang berbahaya, proses atau reaksi antara kontaminan dengan partikel tanah seperti sorpsi dan desorpsi, dan pertukaran kation antara zat terlarut dan tanah yang

menjadi sangat penting, karena akan menghambat pergerakan dan penyebaran kontaminan tersebut (Notodarmojo, 2005).

Pada kisaran konsentrasi yang rendah, hubungan linier antara jumlah atau massa *solute* yang tersorpsi oleh tanah dengan konsentrasi keseimbangan mungkin akan linier dengan persamaan (Notodarmojo, 2005).

$$K_d = \frac{qt}{C_e}$$

Faktor retardasi merupakan suatu penggambaran efek penurunan “kecepatan” pergerakan atau transportasi *solute*, akibat reaksi dengan tanah.

$$R_f = 1 + \left(\frac{\rho b}{\theta}\right)K_d$$

dimana :

- K_d = koefisien distribusi
- C_e = konsentrasi akhir (mg/L)
- qt = kapasitas adsorpsi (mg/g)
- R_f = faktor retardasi
- ρb = kerapatan tanah (*bulk density*) (g/cm^3)
- θ = kadar air (%)

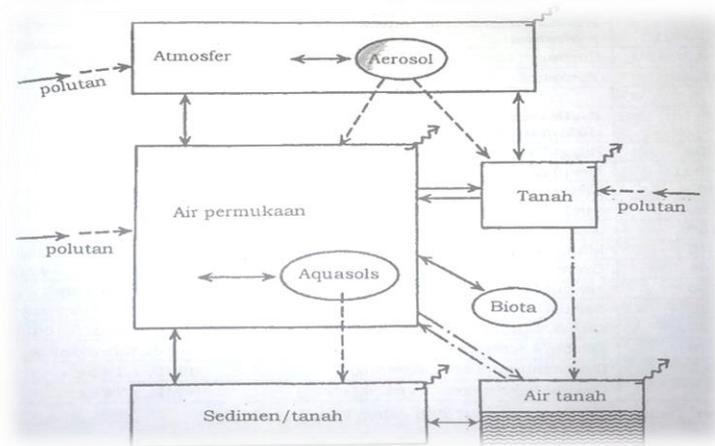
J. Pencemaran Tanah dan Penurunan Kualitas Air Tanah

Air tanah merupakan sumber air minum yang sangat vital bagi penduduk di Indonesia terutama di daerah pedesaan. Tetapi sampai sekarang hal yang mengenai kualitas air tanah di berbagai daerah di Indonesia belum banyak dilaporkan. Di Amerika Serikat sampai tahun 1988 ditemukan 38 jenis bahan kimia mencemari air tanah yang digunakan untuk minum. Badan Proteksi Lingkungan Amerika (US EPA) melaporkan bahwa 45% dari fasilitas air minum asal air tanah telah terkontaminasi bahan kimia organik sintesis yang cukup berbahaya terhadap kesehatan konsumen. Bahan kimia yang paling banyak ditemukan ialah trikloroetilen (TCE), karbon tetraklorid, dan kloroform. Di samping itu, air tanah terkontaminasi oleh 74 macam pestisida. Beberapa penelitian juga dilaporkan bahwa yang paling sering ditemukan dalam air sumur ialah nitrat dan jenis pestisida pertanian untuk pupuk maupun untuk membunuh parasit cacing nematoda yang merusak akar tanaman (Irianto, 2015).

Reaksi-reaksi antara zat pencemar dengan partikel tanah pada umumnya adalah reaksi antara zat dalam bentuk terlarut dalam air tanah (*soil solution*) dengan partikel tanah. Sebaliknya, tanah-tanah yang telah tercemar akan melepaskan zat pencemarnya, melalui mekanisme desorpsi ataupun pelarutan ke dalam air tanah tersebut, yang selanjutnya akan bergerak bersama-sama air tanah tersebut. Kondisi dinamis selalu terjadi antara zat atau kation yang terdapat dalam fase cair dengan yang terdapat dalam fase padat, yaitu massa tanah tersebut (*solid matrix*). Dalam hal ini jelas bahwa luas kontak antara partikel tanah dengan air, merupakan faktor yang penting dalam reaksi zat terlarut dengan tanah, selain karakter dari zat pencemar tersebut (Notodarmojo, 2005).

Beragamnya kontaminan dengan tingkat bahaya (toksisitas) yang bervariasi dan mahal biaya untuk pemulihan kualitas (remediasi), maka menjaga kualitas air tanah akan lebih baik daripada mencemari kemudian memperbaikinya. Beberapa kontaminan mempunyai sifat kumulatif dan resistan, kadang-kadang juga secara kasat mata tidak terlihat keberadaannya atau berbau, seperti misalnya organo-klorin sebagai pestisida atau pelarut, yang penggunaannya sangat sulit untuk dikontrol. Keadaan tersebut tentu meningkatkan risiko bagi manusia sebagai pengguna air tanah.

Degradasi kualitas air tanah dan tanah sebagai mediumnya dapat terjadi karena berbagai hal. Perkolasi dari efluen tangki septik, rembesan aliran air permukaan yang tercemar, tempat pembuangan akhir sampah, ataupun tumpahan (*spilling*) dari zat pencemar yang tidak disengaja, merupakan penyebab yang sering dijumpai. Jenis sumbernya pun dapat berupa sumber tersebar (*diffuse sources*), terpusat (*point sources*) ataupun dalam bentuk memanjang (*line sources*) (Notodarmojo, 2005).



Gambar 2. 13 Skematis Jalur Pencemaran Lingkungan
(Sumber: Notodarmojo, 2005)

K. Logam Berat

Keberadaan logam, terutama logam berat dalam tanah dan air tanah mempunyai potensi sebagai polutan yang berbahaya. Logam didefinisikan sebagai elemen yang memiliki karakteristik sebagai berikut (Watts,1998; Notodarmojo, 2005): menghantarkan listrik, mempunyai konduktivitas terhadap panas (termal) yang tinggi, mempunyai densitas tinggi, dan mempunyai karakteristik *malleability* dan kelenturan.

Sedimen meliputi tanah dan pasir, bersifat tersuspensi, yang masuk ke badan air akibat erosi atau banjir dan pada dasarnya tidaklah bersifat toksik (Effendi, 2000; Patang, 2018) dan meningkatnya kadar logam berat dalam lingkungan perairan hingga melebihi batas maksimum akan menyebabkan rusaknya lingkungan. Ia juga menambahkan logam berat mempunyai sifat yang mudah mengikat bahan organik dan mengendap di dasar perairan dan organik dengan sedimen sehingga kadar logam berat dalam sedimen lebih tinggi dibandingkan dalam air.

1. Manfaat Logam Kadmium (Cd)

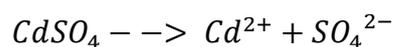
Kadmium merupakan komponen campuran logam yang memiliki titik lebur rendah sehingga dapat digunakan dalam aplikasi sepuhan listrik (*electroplating*). Logam ini pertama kali digunakan dalam perang dunia ke-1 sebagai pengganti timah dan sebagai pigmen di industri zat warna. Kadmium metalik kebanyakan

telah digunakan sebagai suatu agen anti-korosif (*cadmiation*). Saat ini, kadmium juga digunakan pada baterai isi ulang, pada produksi logam campur dan pada asap tembakau. Kurang lebih tiga per empat kadmium berfungsi sebagai komponen elektroda di baterai alkalin, selebihnya digunakan pada penyalutan, pigmen, pelapisan dan sebagai penstabil plastik (Irianti *et al*, 2017).

Kadmium (Cd) umumnya terdapat dalam kombinasi dengan klor (Cd Klorida) atau belerang (Cd Sulfit). Kadmium membentuk Cd^{2+} yang bersifat tidak stabil. Oleh karena sifat-sifatnya, Cd banyak dipakai sebagai stabilizer dalam pembuatan (polyvini & clorida). Cd didapat pada limbah berbagai jenis pertambangan logam yang tercampur Cd seperti Pb, dan Zn. Logam organik (Cd) biasanya selalu dalam bentuk campuran dengan logam lain terutama dalam pertambangan timah hitam dan seng. Bukan hanya itu Cd juga dapat ditemukan di dalam perairan baik dalam sedimen maupun di dalam penyediaan air minum (Patang, 2018).

2. Sifat-sifat Logam Kadmium (Cd)

Kadmium memiliki nomor atom 48 dan logam yang lunak dengan berat atom 112,41 g, bobot jenis 8,642 g/cm³ pada 20⁰C, titik leleh 320,9 ⁰C, titik didih 767 ⁰C, tekanan uap 0,013 Pa pada 180 ⁰C. Umumnya ditentukan dalam kondisi stabil pada valensi II, seperti misalnya Cds, logam alami di dalam kerak bumi, berwarna putih perak.



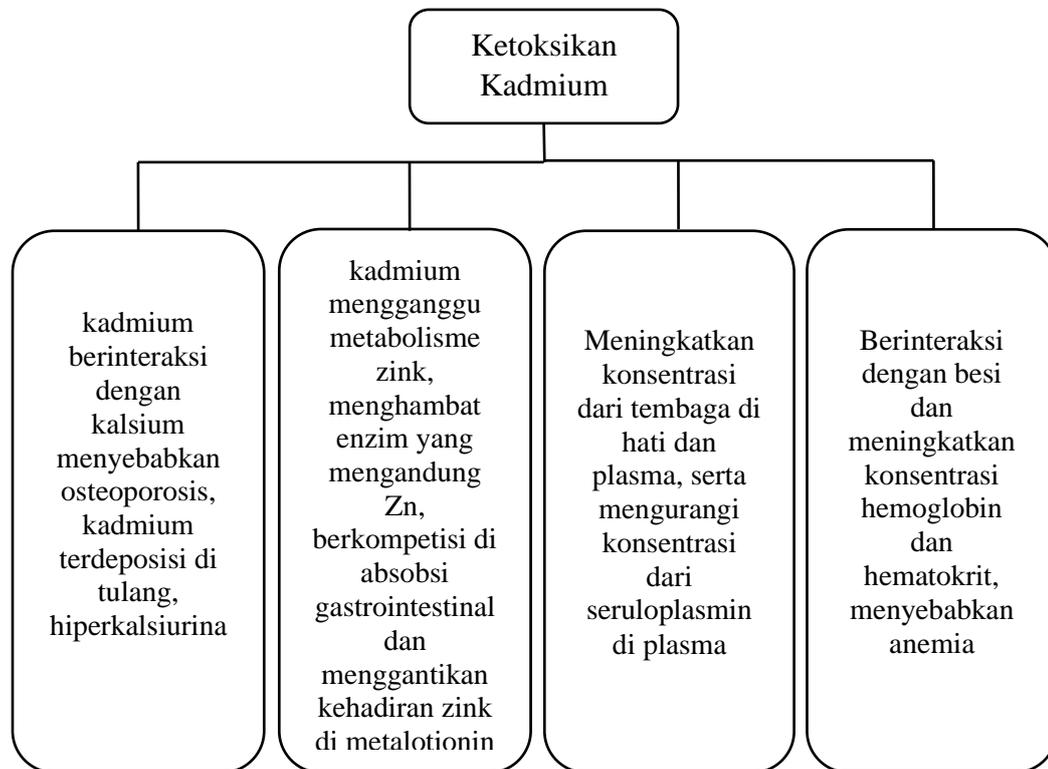
Berdasarkan pada sifat kimianya, logam organik (Cd) di dalam senyawa yang dibentuk umumnya mempunyai bilangan valensi²⁺, sangat sedikit yang mempunyai bilangan valensi¹⁺. Bila dimasukkan ke dalam larutan yang mengandung ion OH, ion-ion Cd^{2+} akan mengalami proses pengendapan. Endapan yang terbentuk dari ion- ion Cd^{2+} dalam larutan OH biasanya dalam bentuk senyawa terhidrasi yang berwarna putih (Patang, 2018).

3. Pengaruh Kadmium (Cd) terhadap Kesehatan Manusia

Kadmium (Cd) dalam tubuh terakumulasi dalam hati dan terutama terikat sebagai metalotionein mengandung unsur sistein, dimana Kadmium (Cd) terikat dalam gugus sulfhidril (-SH) dalam enzim seperti karboksil sisteinil, kadmium hidroksil, dan fosfatil dari protein purin. Kemungkinan besar pengaruh toksisitas

kadmium (Cd) disebabkan oleh interaksi antara kadmium (Cd) dan protein tersebut, sehingga menimbulkan hambatan terhadap aktivitas kerja enzim dalam tubuh (Patang, 2018). Kadmium juga menyebabkan intoksikasi akut dan kronis (Chakraborty *et al.*, 2013) dan toksik terhadap ginjal.

Irianti *et al.*, 2017 menuliskan bahwa, kadmium dan campurannya sangat larut di dalam air dibandingkan logam lain. Gambar di bawah ini menunjukkan nilai toksisitas kadmium. Cd berada pada larutan tanah dalam bentuk ion ataupun senyawa kompleks dengan zat kadmium dan sangat beracun bagi manusia. Selain diduga karsinogenik, logam ini dapat menyebabkan gangguan pada pencernaan, ginjal, dan kerusakan tulang (Notodarmodjo, 2005).



Gambar 2. 14 Nilai toksisitas cadmium

Sumber : (Irianti *et al.*, 2017)

4. Pencemaran Kadmium (Cd) terhadap Lingkungan

Distribusi kadmium di lingkungan akan bertahan di tanah dan mengendap selama beberapa dekade. Tumbuhan lambat laun melepaskan logam yang telah terakumulasi di dalamnya ke rantai makanan hingga akhirnya mencapai manusia. Sumber alami dan *anthropogenic* kadmium termasuk buangan industri,

penggunaan pupuk dan lumpur tanah pertanian dapat menyebabkan pencemaran tanah. Hal tersebut mengakibatkan peningkatan pengambilan kadmium oleh hasil panen dan sayuran untuk konsumsi manusia. Proses pengambilan kadmium tanah oleh tanaman akan meningkat pada pH rendah (Irianti, 2017).

Kadmium dan kadmium senyawa, dibandingkan dengan logam berat lainnya, yang relatif air larut. Mereka karena itu juga lebih mobile dalam misalnya tanah, umumnya lebih bioavailable dan cenderung *bioaccumulate* (Patang, 2018). Semakin tinggi kandungan logam Cd dalam perairan, umumnya semakin banyak terakumulasi pada tubuh organisme air. Dengan demikian kemungkinan terjadinya keracunan terhadap organisme air yang bersangkutan maupun kerusakan lingkungan adalah semakin besar (Laws, 1981; Patang 2018).

L. Konduktivitas Hidrolik

Permeabilitas tanah merupakan sifat penting dalam kaitannya dengan mobilitas air tanah. Permeabilitas adalah kemampuan suatu tanah untuk melewatkan air, menyatakan secara kualitatif sifat tanahnya, sedang nilai numeriknya dinyatakan sebagai konduktivitas hidrolik. Yaitu konstanta proporsionalitas atau rasio kecepatan aliran terhadap gradien hidrolik dalam hukum Darcy, dengan dimensi kecepatan (LT^{-1}) (Chandra, Edisi I Vol 2).

K adalah **koefisien proporsionalitas** yang telah dikenal sebagai **konduktivitas hidrolik**. Dapat didefinisikan bahwa K sebagai kecepatan spesifik aliran yang melalui media berbutir tersebut untuk setiap unit gradien hidrolis. Besarnya harga K dari suatu tanah tergantung antara lain oleh ukuran diameter butir dan pori. Bila diameter butirnya sangat halus walaupun porositasnya tinggi, seperti misalnya tanah liat, maka harga K akan rendah (Notodarmojo, 2005).

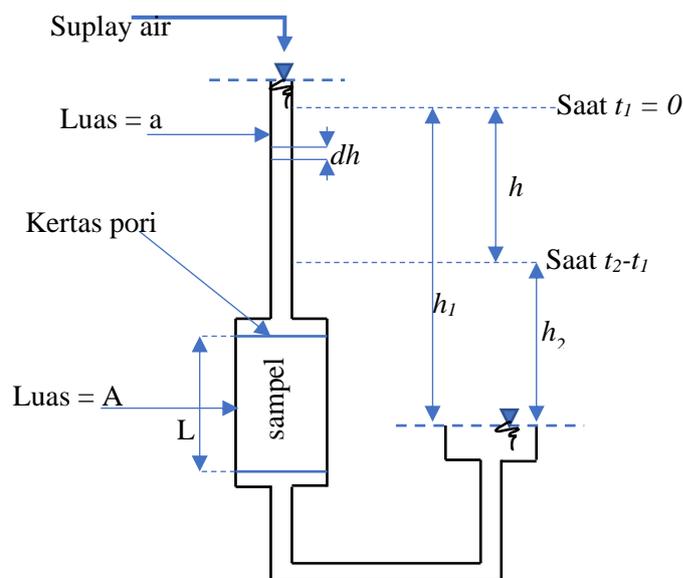
Tabel 2. 17 Kisaran harga K untuk beberapa jenis tanah

Jenis Tanah	Harga K (m/hari)
Liat (permukaan)	0.01 – 0.2
Liat bagian dalam (<i>deep clay beds</i>)	10^{-8} – 10^{-2}
Lempung permukaan (<i>surface</i>)	0.1 - 1.0
Pasir halus	1.0 – 0.5
Pasir sedang	5.0 – 20

Jenis Tanah	Harga K (m/hari)
Pasir kasar	20 – 100
Kerikil (<i>gravel</i>)	100 – 1000
Pasir berkerikil	5.0 – 100
Campuran liat, pasir dan kerikil	0.001 - 0.1

Sumber : Notodarmojo, 2005

Beberapa faktor mempengaruhi besarnya harga K untuk suatu tanah yang sama. Faktor-faktor tersebut diantaranya adalah temperature, komposisi ion dari air yang mengalir melalui ruang pori, dan kehadiran udara atau gas yang terjebak didalamnya. Efek temperatur terhadap K adalah efek yang disebabkan oleh perbedaan viskositas dari air akibat perbedaan temperatur (Notodarmojo, 2005).



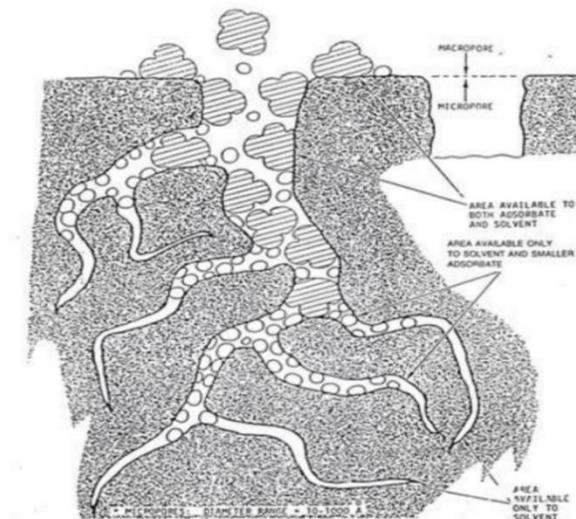
Gambar 2. 15 Rancangan Reaktor Permeabilitas
(Sumber: Buku Praktek Lab. Mekanika Tanah, 2022)

M. Adsorpsi

Menurut Yaron *et al*, 1996; Notodarmojo, 2005 adsorpsi didefinisikan sebagai terjadinya konsentrasi suatu (pencemar, polutan) yang berlebih pada permukaan partikel atau koloid tanah, dibandingkan dengan konsentrasi polutan tersebut dalam fasa cair atau gasnya. Sedangkan (Watts, 1998; Notodarmojo, 2005) menuliskan

bahwa adsorpsi adalah pemisahan suatu senyawa dari larutannya yang kemudian terdeposisi pada permukaan padatan, pada bidang kontak antara padatan dengan larutan. Yuniarto, 1999; Costa, 2019 mendefinisikan adsorpsi sebagai proses akumulasi substansi di permukaan (*interface*) antara dua fase yang terjadi secara fisika dan kimia.

Adsorben merupakan material atau bahan padatan yang memiliki kemampuan adsorpsi dan digunakan dalam proses adsorpsi, sedangkan adsorbat adalah zat atau padatan terlarut dalam fluida yang teradsorpsi. Bahan yang dapat digunakan sebagai adsorben adalah silika gel, aluminium, baxite dan karbon aktif (Costa, 2019).



Gambar 2. 16 Proses Adsorpsi

Sumber : Costa (2019)

Terjadinya proses adsorpsi dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu (Notordarmojo, 2015):

- 1) Proses adsorpsi yang disebabkan oleh larutan di mana molekul teradsorpsi berada (*solvent motivated adsorption*), dan
- 2) Proses adsorpsi yang disebabkan oleh sorbent (*sorbent motivated adsorption*).

Dalam proses adsorpsi kontaminan oleh partikel atau butir tanah, kedua proses tersebut umumnya terjadi secara bersamaan. Proses adsorpsi kontaminan ionik oleh tanah dapat dikategorikan sebagai proses adsorpsi yang didominasi oleh “*sorbent*

motivated adsorption” dan disebabkan oleh beberapa gaya Tarik yang menyebabkan senyawa dalam larutan menempel pada permukaan padatan.

1. Mekanisme Adsorpsi

Mekanisme sorpsi pada dasarnya merupakan suatu proses yang bertahap. Sebagai proses yang melibatkan transport dan transfer massa, gradien konsentrasi merupakan daya penggerak (*driving force*) dari proses sorpsi (Notodarmojo, 2005). Terdapat empat macam langkah dalam perpindahan molekul-molekul adsorbat sampai mencapai permukaan bagian dalam pori-pori adsorben Gambar 2.17 (Abdelrasool, 1992; Costa, 2019):

a) Bulk Transport

Langkah ini merupakan zat terlarut dalam fase larutan menuju ke sekeliling dari partikel adsorben, biasanya semakin cepat dengan bertambahnya kecepatan pengadukan.

b) Film Transport

Langkah ini melibatkan difusi dari zat terlarut melalui suatu lapisan film yang menyebabkan timbulnya hambatan terhadap transfer massa pada permukaan partikel adsorben.

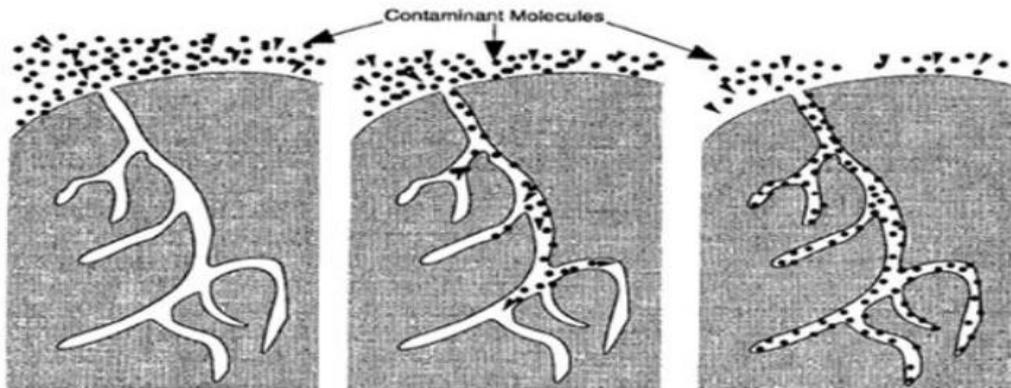
c) Intraparticle Transport

Intraparticle transport atau difusi internal melibatkan perpindahan adsorbat dari permukaan partikel adsorben menuju ke sisi bagian dalam partikel adsorben dengan cara difusi dalam cairan yang mengisi pori dan migrasi sepanjang permukaan pori (*surface diffusion*).

d) Adsorpsi Zat Terlarut pada Sisi Aktif

Langkah keempat dalam adsorpsi pada bagian dalam permukaan adsorpsi zat terlarut pada sisi-sisi aktif dan biasanya merupakan proses yang berlangsung dengan sangat cepat.

Keempat proses adsorpsi akan dikontrol oleh tahapan yang paling lambat, yaitu *film transport* (difusii eksternal) atau *intraparticle transport* (difusi internal).



Gambar 2. 17 Mekanisme adsorpsi pada permukaan adsorben

Sumber : Costa (2019)

Banyaknya adsorbat dalam hal ini CdSO_4 yang mampu diserap oleh adsorben yakni FABA dan tanah sedimen dapat dinyatakan sebagai kapasitas adsorpsi CdSO_4 tiap unit berat dari FABA dan tanah sedimen ($qt(\text{mg/g})$) yaitu :

$$qt = \frac{(C_o - C_e)}{m} \times V$$

(Sumber : Reynolyd, 1982 dalam Costa, 2019)

Persentase logam CdSO_4 yang hilang dari larutan setelah adsorpsi dinyatakan sebagai efisiensi penghilang adsorbat logam CdSO_4 oleh adsorben dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Efektivitas Penyerapan (\%)} = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100$$

(Suber : Zhao et al., 2013; Arifatunnisa dkk., 2022)

Dimana :

C_t = Konsentrasi outlet (mg/L)

C_o = Konsentrasi inlet (mg/L)

M = massa adsorben yang digunakan (gram)

V = volume larutan adsorbat CdSO_4 (Liter)

2. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kapasitas adsorpsi dan kecepatan adsorpsi yaitu (Costa, 2019):

a) Luas permukaan spesifik

Semakin luas permukaan adsorben, maka semakin banyak zat yang teradsorpsi dan luas permukaan adsorben ditentukan oleh ukuran diameter dan jumlah adsorben, karena peningkatan luas permukaan media sebanding dengan peningkatan tingkat adsorpsi yang sebanding dengan penurunan ukuran.

b) Jenis adsorbat

Peningkatan polarisibilitas adsorbat akan meningkatkan kemampuan adsorpsi molekul yang mempunyai polarisibilitas yang tinggi (polar), karena memiliki kemampuan tarik menarik terhadap molekul lain dibandingkan molekul yang tidak dapat membentuk dipol (non polar).

c) Konsentrasi adsorbat

Semakin besar konsentrasi adsorbat dalam larutan maka semakin banyak jumlah substansi yang terkumpul pada permukaan adsorben. Akibatnya adsorben akan mudah mengalami saturasi.

d) Temperatur

Pemanasan atau pengaktifan adsorben akan meningkatkan daya serap adsorben terhadap adsorbat menyebabkan pori-pori adsorben lebih terbuka. pemanasan yang terlalu tinggi menyebabkan rusaknya adsorben sehingga kemampuan penyerapannya menurun.

e) pH (Tingkat keasaman)

pH larutan mempengaruhi kelarutan ion logam. Hal ini terjadi karena adanya netralisasi dari muatan-muatan negatif pada permukaan karbon dengan meningkatnya konsentrasi ion hidrogen, sehingga menyediakan permukaan aktif pada karbon yang lebih banyak.

Pada pH asam konsentrasi ion H^+ akan meningkat, maka akan terjadi kompetisi antara ion H^+ dan ion logam untuk bertukar tempat dengan kation lain pada adsorben, sehingga mampu menurunkan kapasitas adsorpsi terhadap ion logam. Sebaliknya pH asam akan semakin banyak logam hidroksida yang mengendap dan mengurangi ion logam dari larutan adsorbat (Naldi, 2018).

f) Waktu Kontak

Penentuan waktu kontak yang menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum terjadi pada waktu kesetimbangan. Semakin lama waktu kontak yang terjadi pada suatu proses adsorpsi akan sebanding pula dengan adsorbat yang teradsorpsi.

Faktor-faktor di atas menjadikan adsorpsi mampu menyisihkan berbagai bahan polutan dengan mengacu pada faktor-faktor yang dijelaskan di atas. Salah satunya dengan memberikan perlakuan fisik atau kimia pada adsorben untuk memperluas permukaan dengan cara memanaskan adsorben untuk memperluas permukaan dengan menghilangkan kadar air pada suhu 105°C dan zat organis pada 550°C , sedangkan perlakuan kimia dengan aktivasi adsorben dengan cara perendaman pada asam atau basa.

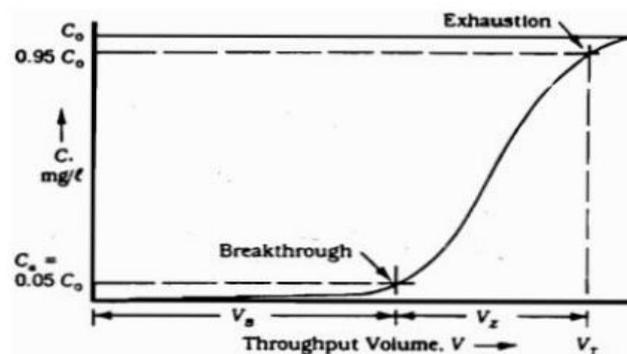
N. Sistem Kontinyu

Studi adsorpsi dengan sistem kontinyu dilakukan dalam sebuah kolom adsorpsi (*fixed bed column*) skala laboratorium yang bertujuan untuk menentukan waktu operasi adsorpsi volume air terolah sebelum tercapainya *breakthrough*, kehilangan tekanan (*head loss*) melalui kolom, dan bentuk kurva *exhaustion* (Costa, 2019).

Adsorpsi secara kontinyu secara praktis, proses ini mempunyai pendekatan yang jauh lebih baik untuk penerapan di lapangan karena sistem operasinya yang selalu mengontakkan adsorben dengan larutan segar, sehingga adsorben dapat mengadsorpsi dengan optimal sampai kondisi jenuh (Nurfitriyani dkk, 2012). Sistem kontinyu lebih menguntungkan karena memiliki kapasitas besar daripada sistem *batch*, sehingga lebih dapat diaplikasikan dalam skala besar. Pada sistem kontinyu, kapasitas *breakthrough* berhubungan dengan fungsi jenuh bahan setelah dipakai dalam proses adsorpsi dalam kolom.

Fluida yang terus bergerak dalam kolom, menyebabkan zona daerah adsorpsi akan bergerak ke bawah, pada laju yang lebih rendah daripada kecepatan liner fluida yang melewati kolom adsorpsi. Pada akhirnya, setengah dari kolom adsorben akan jenuh dan konsentrasi adsorbat pada keluaran akan perlahan meningkat secara sangat cepat ketika zona adsorpsi telah mencapai bagian bawah kolom adsorben,

dan proses adsorpsi ini menjadi tidak tunak karena terdapat adsorben yang terakumulasi di dalam adsorben, sehingga dapat diketahui bahwa terjadi perpindahan massa dari fase cair ke fase padat. Proses transfer massa yang mencapai kesetimbangan antara fase cair dan penyerapannya pada fase padat secara ideal digambarkan sebagai kurva berbentuk S yang merupakan hubungan antara konsentrasi efluen dan volume terolah.



Gambar 2. 18 Kurva *Breakthrough*

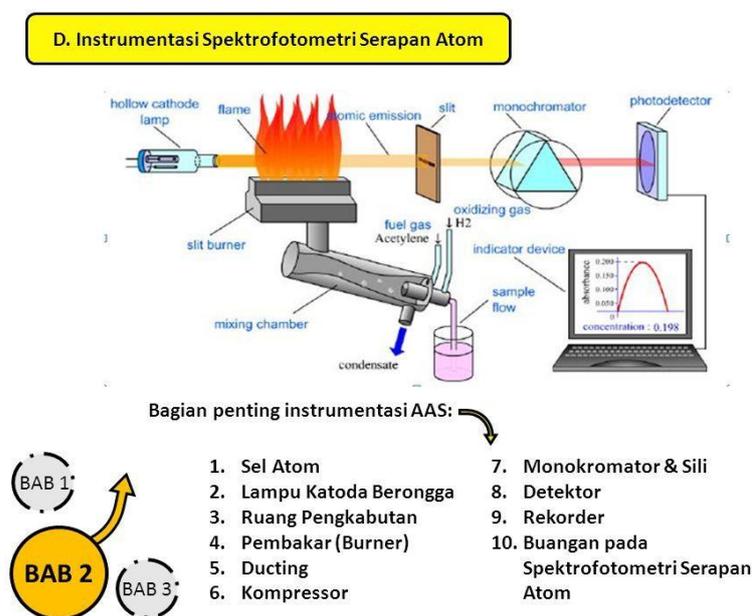
Sumber : (Costa, 2019)

Kurva *breakthrough* merupakan gambaran rasio antara konsentrasi effluent (C_e) dengan konsentrasi influent (C_o) berbanding terbalik dengan waktu atau volume air limbah. Apabila kurva *breakthrough* mengalami kenaikan yang curam, maka performa adsorpsi lebih efisien. Ketika adsorben sudah jenuh oleh polutan dalam kurun waktu tertentu, effluen kolom akan mengalami kenaikan secara tajam membentuk kurva *breakthrough* hingga mencapai *exhaust*. Ketika *breakthrough* telah tercapai, maka konsentrasi polutan dalam air limbah yang melewati kolom akan naik secara tajam hingga konsentrasi jenuh, sehingga konsentrasi effluen limbah akan sama dengan influennya (Maghfirana, 2019). Polutan teradsorpsi pada bagian permukaan pori-pori adsorben hingga mencapai titik kesetimbangan dengan konsentrasi influen limbah. Pada sistem kontinyu, kapasitas *breakthrough* berhubungan dengan fungsi jenuh bahan setelah dipakai dalam proses adsorpsi dalam kolom (Eckenfelder, 2000).

O. Spektroskopi Serapan Atom (SSA)

Spektroskopi serapan atom adalah teknik analisis untuk mengukur konsentrasi dari unsur kimia di lingkungan sampel dengan cara mengukur radiasi yang diserap oleh unsur kimia tersebut. Metode ini merupakan metode paling populer untuk analisa logam karena relatif sederhana, selektif, dan sangat sensitive. Oleh karena itu, AAS menjadi metode analisis pilihan utama untuk pengukuran sampel logam dengan kadar yang sangat kecil (Irianti *et al*, 2017).

Skema umum alat AAS adalah seperti tampak pada Gambar 2.19 di bawah ini.



Gambar 2. 19 Skema umum komponen-komponen pada instrument AAS

Sumber : <https://www.google.com/search>

Secara keseluruhan, terdapat 5 bagian dasar komponen instrument AAS, yaitu: sumber cahaya; sebuah *absorption cell* dimana atom dari sampel akan dihasilkan; sebuah monokromator untuk dispersi cahaya; sebuah detektor yang mengukur intensitas cahaya dan menguatkan sinyal; dan sebuah *display* untuk menampilkan hasil pembacaan yang telah diproses oleh instrument elektronik (Irianti *et al*, 2017).

Spektroskopi serapan atom melibatkan penyerapan energi radiasi yang dihasilkan oleh suatu sumber radiasi khusus (lampu), oleh atom dalam kondisi elektronik dasar (*ground state*). Lampu memancarkan spektrum atom dari unsur-unsur analit dengan energi yang hanya dapat diserap secara resonansi. Unsur analit

diubah menjadi atom dalam suatu *atomizer*. Ketika cahaya melewati awan atom, atom-atom menyerap sinar ultraviolet atau sinar tampak dan menyebabkan transisi ke tingkat energi elektronik yang lebih tinggi. Sebuah monokromator digunakan untuk memilih 1 panjang gelombang khas dari unsur yang ditentukan. Sementara detektor, umumnya adalah suatu pita atau tabung *photomultiplier* yang berfungsi untuk mengukur jumlah penyerapan. Jumlah sinar yang diserap mengindikasikan jumlah analit (Irianti *et al*, 2017).

Agar dapat dianalisis dengan AAS, ikatan dari unsur logam dan komponen lain dalam matriks harus diputus dengan cara destruksi atau perombakan. Destruksi bertujuan untuk mengurai bentuk organik dari logam menjadi bentuk anorganik. Terdapat 2 cara destruksi yaitu destruksi kering dan destruksi basah (namun, dalam penelitian ini hanya dilakukan destruksi basah sehingga penjabaran hanya destruksi basah). Destruksi basah dinilai lebih sederhana, cepat, dan relatif murah. Destruksi basah menggunakan asam, umumnya asam klorida, asam nitrat, asam perklorat, asam fluorida, dan hidrogen peroksida, Perbandingan antara berat sampel dan volume asam, serta ukuran mesh sampel merupakan faktor penting, terutama pada analisis matriks kompleks.

P. Penelitian Terdahulu

Penyusunan penelitian ini, beberapa penelitian yang menjadi acuan dan landasan dalam penelitian ini guna menyelaraskan maksud tujuan serta mengetahui kemampuan limbah fly ash dan bottom sebagai liner material penahan logam berat. Berikut penelitian terdahulu yang membahas terkait demikian :

Nama, Tahun, Judul, dan Lokasi Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil
<p>Syaefudin, Muhammad Ali ddk, 2021, <i>Analisis pemanfaatan fli ash dan bottom ash sebagai material alternatif NAF yang digunakan dalam upaya pencegahan pembentukan air asam tambang.</i> Sampel fly ash dan bottom ash didapat dari PLTU asam-asam sedangkan lokasi pengambilan sampel batuan PAF dan NAF diambil pada area PKP2B PT JBG.</p>	<p>Mengetahui apakah material fly ash dan bottom ash dapat digunakan sebagai alternatif dari material NAF dengan memperhatikan perubahan nilai pH, Fe, Mn dan TSS yang di hasilkan.</p>	<p>Dari hasil pengujian Free Draining Column Leach Test serta pengujian pH Fe dan Mn didapat bahwa pada kolom sampel percobaan F yang berkomposisi fly ash 35% (700g): PAF 30% (600g): fly ash 35% (700g) lebih efektif menahan penurunan nilai pH perhari, dan memiliki nilai Tss, serta logam Fe, Mn mingguan yang tidak melewati batas bakumutu.</p>
<p>Sari dkk, 2016, <i>Kemampuan GCL sebagai Pelapis Dasar TPA Terhadap Penyisihan Besi (Fe) dan Timbal (Pb) dalam Lindi.</i> Lokasi: TPA Jatibarang</p>	<p>Pengaruh <i>liner</i> yangdigunakan terhadap air lindi iyang dihasilkan pada TPA Jatibarang</p>	<p>*GCL sistem single-liner menyisihkan konsentrasi besi 2,08 mg/l dan konsentrasi timbal 0,11 mg/l. *GCL sistem double-liner menyisihkan konsentrasi besi 1,19 mg/l dan konsentrasi timbal 0,05 mg/l. *Saran: Penelitian lebih lanjut dengan pengukuran debit, sehingga waktu tinggal dapat terdeteksi.</p>
<p>Prihatin, Kukuh. 2015. <i>Pengaruh Penambahan Fly Ash pada Tanah Lempung</i></p>	<p>setelah tanah lempung lunak dicampur dengan fly ash dapat memperkecil nilai pemampatan tanah, yang bisa dilihat dari parameter konsolidasi yaitu koefisien</p>	<p>*Semakin bertambah prosentase fly ash, maka semakin kecil angka porinya. Penggunaan fly ash 20% dapat menurunkan angka pori hingga 14-28% dari angka pori tanah asli.</p>

Nama, Tahun, Judul, dan Lokasi Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil
<i>terhadap Parameter Konsolidasi.</i> Jurnal Inersia Vol. VII No.1, page 1-10	tekanan (av), koefisien perubahan volume (mv), indeks pemampatan (Cc) dan koefisien konsolidasi (Cv).	* Semakin besar prosentase fly ash, maka semakin kecil nilai Cv, kecuali pada tekanan 400 kPa terjadi kenaikan nilai Cv pada fly ash 5%.
Ekaputri dkk, 2020, <i>Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan di Beberapa Negara.</i>	Sebagai informasi kebijakan pemerintah Indonesia mengenai limbah fly ash.	
Indra dkk, 2016, <i>Studi Prameter Penghalang Lempung sebagai Penghambat Sebaran Zat Organik dan Timbal (Pb) dalam Air Lindi.</i> Lokasi: TPA Batu Layang, Pontianak	Mengetahui kemampuan penghalang lempung untuk menahan sebaran polutan dalam air lindi serta mengetahui konduktivitas hidrolis (k) penghalang lempung yang optimal sebagai lapisan yang menahan polutan dalam air lindi.	*Hasil laboratorium menunjukkan uji kualitas air lindi TPA Batulayang melebihi baku mutu yang telah ditetapkan.
Arifatunnisa dkk, 2022. <i>Studi Pemanfaatan Limbah Bottom Ash ssebagai Adsorben Zar Warna pada Industri Tekstil (Studi Kasus PT. TCI Kabupaten Bandung).</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan kapasitas adsorpsi bottom ash yang telah disintesis untuk mengadsorpsi zat warna yang terkandung dalam limbah cair industri tekstil PT. TCI. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode adsorpsi.	Pemanfaatan limbah <i>bottom ash</i> dalam penentuan waktu kontak optimum terjadi pada waktu 90 menit dengan konsentrasi awal 27,019 mg/L turun menjadi 24,539 mg/L dengan persentase adsorpsi 9,179%. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sintesis bottom ash dapat digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kadar zat warna pada limbah cair dengan pH dan waktu kontak optimum pada pembakaran 50 ⁰ C dan 100 ⁰ C masing-masing pH 5 pada menit ke 90 dan pH 6 pada menit ke 180.
Gandhimathi, 2009; Gupt <i>et al</i> , 2020.	Untuk mengetahui karakteristik adsorpsi dari empat campuran komposisi B-FA yang bersumber dari berbagai lokasi di	Secara umum, FA induk (kecuali NFA-kelas C) membutuhkan 120-230 menit untuk mencapai kapasitas adsorpsi keseimbangan. Pada konsentrasi adsorbat yang lebih tinggi, campuran B-FA

Nama, Tahun, Judul, dan Lokasi Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil
	India, dengan mempertimbangkan Pb ²⁺ sebagai kontaminan model.	menunjukkan keunggulan kapasitas adsorpsi, terutama yang dicampur dengan abu terbang Neyvelli (NFA).
Faizal, 2011. <i>Pemanfaatan Limbah Abu Terbang (Fly Ash), Abu Dasar (Bottom Ash) Batubara dan Limbah Padat (Sludge) Industri Karet sebagai Bahan Campuran pada Pembuatan Batako</i> . Tesis Magister, Unoversitas Sumatera Utara	Memanfaatkan limbah FABA sebagai Bahan Campuran pada Pembuatan Batako	Persentase penambahan fly ash adalah 10%,20%,30%,40% dan 50% dari berat awal semen. Persentase penambahan bottom ash dan sludge sebagai agregat adalah 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% dari berat awal pasir dengan waktu pengerasan selama 28 hari. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa batako dengan variasi komposisi terbaik adalah 20% fly ash dan 5% agregat bottom ash dan sludge. Pada komposisi tersebut batako yang dihasilkan memiliki densitas 1,60 gr/cm ³ , penyerapan air = 18,98%, kuat tekan = 2,46 MPa, kuat patah = 1,56 MPa dan uji hammer test 24,0 kg/cm ² .