

SKRIPSI

**POTENSI PENGGUNAAN CAMPURAN *FLY ASH* DAN
BENTONIT SEBAGAI MATERIAL PENYERAP TIMBAL
PADA LINDI**

Disusun dan diajukan oleh:

**EMANUELA PRIMA ENJELIN TAMBILA
D131 19 1061**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

POTENSI PENGGUNAAN CAMPURAN *FLY ASH* DAN BENTONIT SEBAGAI MATERIAL PENYERAP TIMBAL PADA LINDI

Disusun dan diajukan oleh

Emanuela Prima Enjelin Tambila
D131191061

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 26 September 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Kartika Sari, S.T.,M.T.
NIP 19732012000122001

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Ir. Asiyanthi T. Lando, S.T., M.T.
NIP 198001202002122002

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Emanuela Prima Enjelin Tambila

NIM : D131191061

Program Studi : Teknik Lingkungan

Jenjang : SI

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Potensi Penggunaan Campuran *Fly Ash* dan Bentonit Sebagai Material Penyerap
Timbal Pada Lindi

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, 26 September 2023

Yang Menyatakan



Emanuela Prima Enjelin Tambila



ABSTRAK

EMANUELA PRIMA ENJELIN TAMBILA. *Potensi Penggunaan Campuran Fly Ash dan Bentonit Sebagai Material Penyerap Timbal Pada Lindi* (dibimbing oleh Dr. Eng. Kartika Sari, ST., MT., dan Dr. Eng. Asiyanthi T. Lando, S.T., M.T.)

Sampah yang ditumpuk di TPA menimbulkan lindi. Lindi mengandung logam berat seperti timbal yang kemudian dapat menyebar dan mencemari lingkungan. Sistem untuk mencegah penyebaran lindi melalui lapisan dasar/*liner* TPA. Pembuatan *liner* TPA dari *geosynthetic liner*, beton, semen memiliki kekurangan baik itu pada tahap pembangunan dan pengoperasian. Sehingga dibutuhkan alternatif, bahan yang kerap digunakan adalah bentonit tetapi untuk menyerap timbal terbatas dan memiliki kondisi kembang susut tinggi yang berdampak pada kemampuannya sebagai *liner* sehingga memerlukan bahan tambahan seperti *fly ash* untuk mengatasi kondisi tersebut.

Pemanfaatan *fly ash* untuk air lindi menggunakan metode *batch* dan pengadukan yang mana akan berbeda jika diterapkan sebagai *liner* TPA sehingga diperlukan metode lain. Metode penelitian secara eksperimental untuk mendapatkan sifat fisik dan mekanis, permeabilitas, dan efektivitas penyerapan timbal pada lindi menggunakan komposisi campuran *Fly Ash* dan Bentonit agar diketahui potensinya sebagai bahan alternatif lapisan TPA.

Hasil pengujian sifat fisik menunjukkan *fly ash* memiliki *specific gravity* 3,115, kadar air 2,7%, dan tidak tergolong dalam klasifikasi tanah. Sedangkan bentonit memiliki *specific gravity* 2,628, kadar air 16,5%, dan tergolong dalam klasifikasi tanah lempung. Nilai kadar air optimum komposisi campuran berkisar antara 34,3%-27,4% dan berat isi kering maksimum antara 1,319 gr/cm³-1,333 gr/cm³. Permeabilitas komposisi campuran berkisar antara 8x10⁻⁶ cm/det-6,11x10⁻⁹ cm/det. Penambahan *fly ash* pada bentonit meningkatkan permeabilitas. Komposisi campuran yang paling efektif dalam menyerap timbal pada lindi adalah 85% *Fly Ash*+15% Bentonit sebesar 91,7%. Campuran *fly ash* dan bentonit dapat digunakan sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA.

Kata Kunci: Lindi, Timbal, Lapisan, *Fly Ash*, Bentonit



ABSTRACT

EMANUELA PRIMA ENJELIN TAMBILA. *Potential Use of Fly Ash and Bentonite Mixture as Lead Absorbing Material in Leachate* (supervised by Dr. Eng. Kartika Sari, ST., MT., and Dr. Eng. Asiyanthi T. Lando, S.T., M.T.)

Garbage piled up in landfills creates leachate. Leachate contains heavy metals such as lead which can then spread and pollute the environment. A system to prevent the spread of leachate through the landfill base layer/liner. Making landfill liners from geosynthetic liner, concrete, cement has shortcomings both at the construction and operation stages. So an alternative is needed, the material that is often used is bentonite but it is limited in absorbing lead and has a high swelling and shrinkage condition which impacts its ability as a liner so it requires additional materials such as fly ash to overcome this condition.

The use of fly ash for leachate uses batch and mixing methods which will be different if applied as a landfill liner so another method is needed. Experimental research methods to obtain the physical and mechanical properties, permeability and effectiveness of lead absorption in leachate use a mixture of Fly Ash and Bentonite to determine its potential as an alternative material for landfill lining.

The results of the physical properties test show that fly ash has a specific gravity of 3.115, a water content of 2.7%, and is not classified as soil. Meanwhile, bentonite has a specific gravity of 2.628, a water content of 16.5%, and is classified as clay. The optimum water content value for the mixture composition ranges from 34.3%-27.4% and the maximum dry weight is between 1.319 gr/cm^3 - 1.333 gr/cm^3 . The permeability of the mixed composition ranges from $8 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ - $6.11 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$. The addition of fly ash to bentonite increases permeability. The most effective mixture composition in absorbing lead in leachate is 85% Fly Ash+15% Bentonite at 91.7%. A mixture of fly ash and bentonite can be used as an alternative base layer for landfills.

Keywords: Leachate, Lead, Liner, Fly Ash, Bentonite



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Tempat Pembuangan Akhir (TPA)	7
2.2 Air Lindi (<i>Leachate</i>)	7
2.2.1 Pengertian Air Lindi (<i>Leachate</i>)	7
2.2.2 Pembentukan dan Penyebaran Air Lindi.....	8
2.2.3 Karakteristik Air Lindi	9
2.3 Lapisan Dasar TPA	10
2.4 Timbal (Pb)	10
2.5 <i>Fly Ash</i>	11
2.5.1 Karakteristik <i>Fly Ash</i>	12
2.5.2 Pemanfaatan <i>Fly Ash</i>	14
2.6 Bentonit.....	15
2.6.1 Karakteristik Bentonit	16
2.6.2 Pemanfaatan Bentonit	17
2.7 Sifat Fisik Tanah	17
2.7.1 <i>Specific Gravity</i>	18
2.7.2 Kadar Air.....	18
2.7.3 Analisa Saringan dan Hidrometer	18
2.7.4 Batas-Batas Atterberg	19
2.8 Sifat Mekanis Tanah	21
2.9 Permeabilitas	22
2.10 Adsorpsi	23
2.10.1 Klasifikasi Adsorpsi.....	23
2.10.2 Faktor yang Memengaruhi Adsorpsi.....	24
2.11 Penelitian Terdahulu	24
METODOLOGI PENELITIAN.....	29
ram Alir Penelitian	29
tu dan Lokasi Penelitian	30
dan Bahan.....	31



3.4 Variasi Komposisi Penelitian.....	38
3.5 Standar Pengujian	38
3.6 Prosedur Pengujian	39
3.7 Teknik Pengumpulan Data.....	41
3.8 Analisis Data	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Kandungan Kimia Bahan Penelitian	46
4.1.1 Kandungan <i>Fly Ash</i>	46
4.1.2 Kandungan Bentonit	46
4.2 Hasil Pengujian Sifat Fisik.....	47
4.2.1 Sifat Fisik <i>Fly Ash</i>	47
4.2.2. Sifat Fisik Bentonit	48
4.3 Hasil Pengujian Sifat Mekanis	51
4.4. Hasil Pengujian Permeabilitas.....	57
4.5 Efektivitas Campuran <i>Fly Ash</i> dan Bentonit Dalam Menyerap Timbal	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran.....	64
DAFTAR PUSTAKA	65
Lampiran	68



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Mekanisme kontaminasi tanah dan air tanah dari berbagai sumber.....	8
Gambar 2 Lapisan dasar TPA	10
Gambar 3 Penanganan debu PLTU	12
Gambar 4 SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>) <i>fly ash</i>	13
Gambar 5 Pemanfaatan <i>fly ash</i> di Indonesia	14
Gambar 6 SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>) bentonit	15
Gambar 7 Batas-batas atterberg	19
Gambar 8 Alat uji proctor standar.....	22
Gambar 9 Diagram alir penelitian.....	29
Gambar 10 Lokasi penelitian	30
Gambar 11 PLTU Barru.....	30
Gambar 12 Titik pengambilan sampel lindi TPA Tamangapa.....	31
Gambar 13 <i>Fly Ash</i>	32
Gambar 14 Bentonit	32
Gambar 15 Lindi	33
Gambar 16 Aquades	33
Gambar 17 Alat pemeriksaan <i>specific gravity</i>	34
Gambar 18 Alat pemeriksaan kadar air.....	34
Gambar 19 Alat pemeriksaan analisa saringan	35
Gambar 20 Alat pemeriksaan hidrometer	35
Gambar 21 Alat pemeriksaan batas atterberg	36
Gambar 22 Alat pengujian kompaksi.....	36
Gambar 23 Desain Reaktor	37
Gambar 24 Reaktor	37
Gambar 25 Grafik analisa saringan <i>fly ash</i>	47
Gambar 26 Grafik analisa saringan dan hidrometer bentonit	49
Gambar 27 Grafik batas cair bentonit	49
Gambar 28 Grafik pemadatan 100% Bentonit.....	51
Gambar 29 Grafik pemadatan 15%FA+85%BE	52
Gambar 30 Grafik pemadatan 30%FA+70%BE	52
Gambar 31 Grafik pemadatan 45%FA+55%BE	53
Gambar 32 Grafik pemadatan 55%FA+45%BE	53
Gambar 33 Grafik pemadatan 70%FA+30%BE	54
Gambar 34 Grafik pemadatan 85%FA+15%BE	54
Gambar 35 Grafik hubungan OMC dan komposisi campuran <i>fly ash</i> dan bentonit.....	55
Gambar 36 Grafik hubungan MDD dan komposisi campuran <i>fly ash</i> dan bentonit.....	56
Gambar 37 Grafik hubungan permeabilitas dan komposisi campuran <i>fly ash</i> dan bentonit.....	57
Gambar 38 Diagram efektivitas penyerapan timbal komposisi campuran	60
Gambar 39 Diagram perbandingan efektivitas penyerapan timbal.....	62
Gambar 40 Grafik hubungan kadar timbal dan komposisi campuran <i>fly ash</i> dan bentonit.....	63



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Karakteristik air lindi (<i>leachate</i>)	9
Tabel 2 Kandungan kimia <i>fly ash</i> kelas F dan C	14
Tabel 3 Kandungan kimia bentonit	16
Tabel 4 Klasifikasi tanah berdasarkan <i>specific gravity</i>	18
Tabel 5 Nilai indeks plastisitas tanah dan macam tanah	19
Tabel 6 Klasifikasi tanah berdasarkan sistem AASHTO	20
Tabel 7 Permeabilitas beberapa jenis tanah	22
Tabel 8 Penelitian terdahulu	25
Tabel 9 Variasi komposisi penelitian	38
Tabel 10 Standar pengujian	38
Tabel 11 Karakteristik <i>fly ash</i> PLTU Barru	46
Tabel 12 Karakteristik Bentonit CV Anugrah Mineral Industri Bandung, Jawa Barat	46
Tabel 13 Hasil pengujian sifat fisik <i>fly ash</i>	48
Tabel 14 Hasil pengujian sifat fisik bentonit	50
Tabel 15 Klasifikasi bentonit berdasarkan sistem AASHTO	50
Tabel 16 Permeabilitas bentonit dan komposisi campuran	57
Tabel 17 Perbandingan permeabilitas komposisi campuran dengan material lain	58
Tabel 18 Perbandingan permeabilitas dengan SNI 03-3241-1994	59
Tabel 19 Perbandingan permeabilitas dengan Pedoman Pengoperasian dan Pemeliharaan TPA PUPR 2006	59
Tabel 20 Hasil pengujian kadar timbal dan efektivitas penyerapan	60
Tabel 21 Perbandingan efektivitas penyerapan komposisi campuran dengan material lain	62
Tabel 22 Perbandingan Kadar Timbal dengan Baku Mutu	62



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
FA	<i>Fly Ash</i>
BE	Bentonit
COD	<i>Chemical Oxygen Demand</i>
BOD	<i>Biological Oxygen Demand</i>
TPA	Tempat Pembuangan Akhir
Pb	Plumbum atau Timbal
Fe	Ferrum atau Besi
OMC	<i>Optimum Moisture Content</i>
MDD	<i>Maximum Dry Density</i>
CaO	Calcium Oksida
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Desain Reaktor	68
Lampiran 2 Perhitungan Reaktor	69
Lampiran 3 Data Pengujian Specific Gravity	70
Lampiran 4 Data Pengujian Kadar Air.....	71
Lampiran 5 Data Pengujian Analisa Saringan Fly Ash	72
Lampiran 6 Data Pengujian Analisa Saringan dan Hidrometer Bentonit	73
Lampiran 7 Data Pengujian Batas-batas Atterberg Bentonit	74
Lampiran 8 Kompaksi 100% Bentonit.....	75
Lampiran 9 Kompaksi 85% FA+15% BE	76
Lampiran 10 Kompaksi 70%FA+30% BE.....	77
Lampiran 11 Kompaksi 55%FA+45% BE.....	78
Lampiran 12 Kompaksi 45%FA+55% BE	79
Lampiran 13 Kompaksi 30%FA+70% BE	80
Lampiran 14 Kompaksi 15%FA+85% BE	81
Lampiran 15 Pengujian Permeabilitas Bentonit.....	82
Lampiran 16 Pengujian Permeabilitas Komposisi Campuran <i>Fly Ash</i> dan Bentonit	83
Lampiran 17 Pengujian Kadar Timbal.....	84
Lampiran 18 Surat Pengeluaran <i>Fly Ash</i>	85
Lampiran 19 Dokumentasi Penelitian.....	86



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Potensi Penggunaan Campuran *Fly Ash* dan Bentonit Sebagai Material Penyerap Timbal Pada Lindi”. Penyelesaian Tugas Akhir ini untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) pada Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tugas akhir ini dapat terselesaikan tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Untuk itu, dengan hormat penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Drs. Mezak Marthen Ikul dan Ibu Junita, selaku kedua orangtua penulis yang kasih sayangnya tercurah melalui doa, didikan, dan pengorbanan yang begitu besar sehingga penulis dapat berkuliah di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Ibu Dr.Eng. Kartika Sari, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu Dr.Eng. Asiyanthi T. Lando, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu di tengah kesibukannya untuk mengarahkan dan memberi masukan kepada penulis dalam menyusun hingga menyelesaikan tugas akhir.
3. Saudaraku Eoudia Surita Palinggi dan Golden Pointer Tambila, yang memberikan doa, semangat, motivasi, membantu dan menghibur penulis.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN.Eng., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM., selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan motivasi yang telah diberikan selama masa perkuliahan.
8. Ibu Sumiati, Kak Olan, dan Kak Tami selaku staf Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang sudah membantu segala urusan administrasi selama penulis melaksanakan perkuliahan.
9. Tante Lena, Tante Etin, dan Seluruh Keluarga Nek Surita yang memberikan dorongan dan bantuan.
10. Partner penelitian Syirah, Nisaf, dan Buya teman seperjuangan yang selalu membantu penulis baik itu dalam pengambilan dan pengolahan data, penyusunan tugas akhir, bertukar pikiran dan cerita, dan memberi motivasi untuk gercep.



11. Teman-teman penelitian Dhea, Bintang, Ainun, Rifqi yang membantu pengambilan sampel dan penelitian penelitian.

12. Teman-teman penelitian Enal selaku laboran dan teman-teman konsentrasi Mekanika Tanah yaitu Kiki, Ammar, Yayat, Yusril, Rita, Sara, Jaemshon dan Joy yang telah

memberi bantuan dan menjawab pertanyaan-pertanyaan penulis selama penelitian di Laboratorium Mekanika Tanah.

13. Teman-teman Kelas A, kelas terkeren yang membuat masa-masa perkuliahan penulis berkesan, dan juga memberikan motivasi serta bantuan selama perkuliahan.
14. Teknik Lingkungan 2019, terima kasih atas bantuan dan kebersamaannya selama perkuliahan.
15. Veny, Audy, Rian, Dian, Cornella, Greivan. Teman berbagi cerita dan pengalaman perkuliahan.
16. Pihak-pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, terima kasih atas dukungan dan bantuannya.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan guna tugas akhir ini yang lebih baik. Akhir kata semoga tugas akhir ini memberikan manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan dan lingkungan sekitar.

Gowa, 29 Agustus 2023
Penulis

Emanuela Prima Enjelin Tambila
D131 19 1061



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemenuhan kebutuhan manusia akan berhubungan dengan proses-proses seperti produksi, distribusi, dan konsumsi. Kegiatan tersebut tidak terlepas dari timbulnya sampah. Sampah merupakan bahan berbentuk padatan yang dianggap tidak berguna sehingga dibuang. Sampah tersebut sebagian besar tidak melalui proses pengolahan dan langsung ke TPA (Juhaidah, 2019). Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan tempat berlangsungnya pembuangan akhir sampah (SNI 03-3241-1994). TPA merupakan metode yang biasa digunakan untuk menangani seluruh sampah perkotaan (Yenti, 2016). TPA di Indonesia masih sederhana yakni sampah yang diangkut ke TPA diletakkan, dihamparkan, dan ditumpuk secara terbuka atau disebut *open dumping* (Gunawan et al., 2015).

Sistem *open dumping* tidak dilengkapi penanganan permasalahan yang muncul terhadap lingkungan (Gunawan et al., 2015) yaitu sampah yang ditumpuk menimbulkan cairan berbau tidak sedap atau lindi. Salah satu kota besar di Indonesia yaitu Makassar dan pusat pembuangan akhir sampah untuk semua wilayah di Kota Makassar yaitu TPA Tamangapa yang terletak di Kecamatan Manggala. TPA ini menggunakan sistem *open dumping* (Suwardi, 2011). Setiap tahun jumlah penduduk di Kota Makassar mengalami peningkatan, pada tahun 2014 mencapai 1.428.564 jiwa dan timbulan sampah sebanyak 247.182,73 ton, tahun 2015 jumlah penduduk mencapai 1.449.401 jiwa dan menghasilkan timbulan sampah mencapai 681.715,61 ton (Juhaidah, 2019). Pertambahan penduduk berbanding lurus dengan peningkatan volume sampah yang kemudian berdampak pada produksi lindi. Data unit Tata Ruang dan unit Kelola Lingkungan Makassar 2006 sejak dibukanya TPA volume lindi yang telah dihasilkan sebanyak 1.800.000 m².

Lindi (*leachate*) berasal dari tembusnya air pada tumpukan sampah yang



1) membilas dan membaurkan hasil dekomposisi, bahan, dan senyawa
uri, 1996 dalam Gunawan et al., 2015). Lindi tersebut kemudian dapat
t) dan mencemari lingkungan. Penyebaran lindi berbahaya karena lindi

mengandung logam berat seperti arsen, besi, kadmium, kromium, merkuri, nikel, seng, tembaga, dan timbal (Maramis et al, 2006 dalam Puspitarini et al., 2019). Logam berat yang umum diketahui, bersifat toksik, dan sulit diurai oleh alam adalah timbal (Trihadiningrum, 1995 dalam Yenti, 2016). Timbal menjadi racun bagi makhluk hidup, menyebabkan kerusakan organ dalam, gangguan perilaku, gangguan jiwa, kanker, kerusakan saraf, hingga menyebabkan kematian (Yusuf et al., 2021). Timbal juga menyebabkan pengurangan oksigen dalam darah dan gagal ginjal (Suwardi, 2011).

Penelitian terkait penyebaran timbal di sekitar TPA Tamangapa Kota Makassar menunjukkan terdapat timbal sebesar 0,128 ppm terdapat pada air sumur warga (Suwardi, 2011) dan sapi peranakan ongole yang digembalakan di TPA mengandung 1,32 ppm–9,91 ppm (Arifah, 2021). Sehingga diperlukan pencegahan dan pengurangan dampak lindi. Sistem yang dapat diterapkan melalui lapisan dasar TPA (*liner*). Fungsi dari lapisan ini untuk mencegah resapan lindi ke tanah agar tidak mencemari tanah dan air tanah serta mencegah perpindahan logam berat (Ramadani et al., 2018). Lapisan dasar TPA dapat menggunakan bahan sintesis dan alami. Salah satu contoh penggunaan bahan sintesis pada lapisan dasar TPA adalah *geosynthetic liner* yang dapat terbuat dari geomembran, geotekstil, atau kombinasi keduanya (Sari et al., 2016). Namun *geosynthetic liner* membutuhkan pelindung untuk mencegah kerusakan pada saat pelaksanaan konstruksi, dapat bocor dengan benda tajam, komponen pada geosintetik dapat terdegradasi dalam jangka panjang karena beberapa jamur dan bakteri dapat mengkatalisis hidrolisis polimer dalam *geosynthetic liner* (Sari et al., 2016; Giroud, 1996 dalam Rosita, 2020).

Bahan lain yang dapat digunakan seperti beton namun sulit, mahal, dan juga lama dalam konstruksi pembangunannya (Sudjianto, 2009), dan menunjukkan tingkat kegagalan yang tinggi (Davidovits, 1994 dalam Rosita, 2020). Penggunaan semen sebagai *liner* TPA juga memiliki kekurangan karena memiliki efek seperti beton dan juga menjadi sumber utama penghasil gas rumah ijeyawardana, 2023). Sehingga dibutuhkan bahan alternatif, bahan lapisan dasar TPA diharapkan dapat sederhana, murah, dan, mudah



ditemui (Yenti, 2016) dan direkomendasikan untuk menggunakan bahan alami yang direkayasa (EPA, 2016 dalam Rosita, 2020).

Bahan alami yang dapat digunakan sebagai lapisan dasar TPA yaitu tanah semi kedap seperti tanah lempung atau tanah liat (Ludwig et al., 2002 dalam Budihardjo, 2017). Jenis tanah lempung yang kerap digunakan adalah bentonit. Menurut Robets dan Shimaoka (2008) dalam Budihardjo (2017) bentonit memiliki permeabilitas sangat rendah sehingga dapat dimanfaatkan sebagai penahan lindi. Hal ini sejalan dengan Ramadani et al. (2018) yang mengungkapkan bentonit banyak digunakan sebagai lapisan TPA karena permeabilitasnya yang sangat rendah tetapi untuk menyerap logam berat seperti timbal bentonit terbatas. Selain itu, bentonit memiliki kondisi kembang susut tinggi yang berdampak pada kemampuannya menahan lindi (Budihardjo, 2017) sehingga memerlukan bahan tambahan untuk mengatasi kondisi tersebut dan memiliki kemampuan menyerap logam berat.

Material yang dapat dicampurkan untuk mengatasi kekurangan bentonit adalah *fly ash* (Gunawan et al., 2015). *Fly ash* merupakan limbah hasil dari produksi listrik berbahan bakar batubara. Persentase *fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batubara sebesar 80%-90% (Bakri et al., 2019). Menurut Bakri et al. (2019) 55% PLTU menggunakan batubara dan menghasilkan *fly ash* sebanyak 10 juta ton per tahun dan pemerintah mengupayakan pasokan listrik yang merata ke seluruh Indonesia terutama wilayah terpencil. Berdasarkan data Kementerian ESDM (2022) PLTU menjadi yang terbesar sebagai pengguna batu bara dalam negeri dengan masing-masing kebutuhan di tahun 2022 sebesar 119 juta ton, 2023 sebesar 126 juta ton, 2024 sebesar 140 juta ton, dan 2025 mencapai 128 juta ton. Dengan peningkatan produksi listrik menggunakan PLTU berbahan bakar batubara, maka semakin meningkat juga volume *fly ash*. Jika tidak dikelola *fly ash* juga akan menjadi limbah yang dapat mencemari lingkungan padahal menurut Wardani (2008) dalam Ambia (2021) *fly ash* dapat dimanfaatkan menjadi adsorben polutan yang murah. Selain itu, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 memasukkan *fly ash* sebagai limbah kategori B3 sehingga *fly ash* sangat berpotensi untuk dimanfaatkan. Penggunaan *fly ash* tidak hanya



ramah lingkungan tetapi juga dapat mengurangi timbulan limbah *fly ash* di lingkungan.

Fly ash sering digunakan untuk stabilisasi tanah (Karim et al., 2020), metode-metode yang digunakan untuk melihat dampak penggunaan *fly ash* terhadap sifat material seperti pada penelitian Gunawan et al. (2015) yang menyatakan bahwa penambahan *fly ash* menurunkan kembang susut bentonit namun tidak lebih lanjut meneliti terkait penyerapan terhadap logam berat. Dalam penyerapan logam berat, *fly ash* dicuci dan diaktivasi menggunakan zat kimia kemudian dengan dikontakkan dengan metode *batch* dapat menurunkan kadmium hingga 0,0075 ppm, dan juga dapat digunakan sebagai adsorben untuk penyisihan logam berat lain terutama timbal (Pb) (Zulkifli H., 2009 dalam Puspitarini et al., 2019). Penelitian Hsu dan Yeh (2008) dalam Ambia (2021) menunjukkan *fly ash* dapat menurunkan kadar tembaga (Cu). Peningkatan massa *fly ash* dapat menurunkan kadar besi (Fe) sebesar 97,2%, mangan (Mn) sebesar 98,9%, dan Seng (Zn) sebesar 97,41% dengan metode pengadukan. Selain itu, *fly ash* dapat menurunkan COD (*Chemical Oxygen Demand*) dan warna 12 kali lebih efektif dengan penurunan sebesar 66,96% (Prayudi, 2009 dalam Ambia, 2021).

Fly ash dan bentonit murah dan mudah ditemukan serta pemanfaatannya beragam dan efektif (Ambia, 2021; Bukit et al., 2021) selain itu metode yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya berbeda jika diterapkan sebagai *liner* TPA sehingga diperlukan metode lain untuk memperoleh data terkait sifat fisik, sifat mekanis, permeabilitas, dan penyerapan timbal pada campuran bentonit dan *fly ash* yang digunakan karena akan berkaitan dengan pengaplikasiannya sebagai lapisan dasar TPA. Berdasarkan hal tersebut penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai lapisan dasar Tempat Pembuangan Akhir (TPA) menggunakan *fly ash* dengan campuran bentonit sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA. Maka judul penelitian tugas akhir penulis mengenai “**Potensi Penggunaan Campuran *Fly Ash* Dan Bentonit Sebagai Material Penyerap Timbal Pada Lindi**”.



Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana sifat fisik dan mekanis *Fly Ash* dan Bentonit sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA?
2. Bagaimana permeabilitas komposisi campuran *Fly Ash* dan Bentonit sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA?
3. Berapa komposisi efektif campuran *Fly Ash* dan Bentonit untuk menurunkan kadar logam berat timbal (Pb) pada lindi?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini untuk mengetahui potensi campuran *fly ash* dan bentonit sebagai lapisan dasar TPA (Tempat Pembuangan Akhir) dan kemampuannya menyerap logam berat khususnya timbal. Sehingga, tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui sifat fisik dan mekanis *Fly Ash* dan Bentonit sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA.
2. Mengetahui permeabilitas komposisi campuran *Fly Ash* dan Bentonit sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA.
3. Mengetahui komposisi efektif campuran *Fly Ash* dan Bentonit untuk menurunkan kadar logam berat timbal (Pb) pada lindi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat pada penelitian ini yaitu:

1. Memberikan informasi mengenai sifat fisik dan mekanis *fly ash* dan bentonit sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA.
2. Memberikan informasi mengenai pemanfaatan bentonit dan limbah *fly ash* sebagai bahan alternatif lapisan dasar TPA.
3. Bagi penulis, menambah pengalaman dan wawasan dalam menerapkan pengetahuan dan *skill* yang telah diperoleh selama masa belajar di Program Studi Teknik Lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup



ngkup pada penelitian ini untuk membatasi hal yang dicakup pada ini yaitu:

1. Limbah *Fly Ash* atau disingkat FA yang digunakan pada penelitian ini berasal dari PT. PLN (Persero) PLTU Barru.
2. Bentonit atau disingkat BE yang digunakan berasal dari CV Anugrah Mineral Industri Bandung dan berjenis Natrium Bentonit.
3. Komposisi campuran yang digunakan yaitu 15%FA+85%BE, 30%FA+70%BE, 45%FA+55%BE, 55% FA+45%BE, 70%FA+30%BE, dan 85%FA+15%BE.
4. Lindi yang dikontakkan dengan campuran *fly ash* dan bentonit berasal dari TPA Tamangapa Kota Makassar.
5. Reaktor yang digunakan berfokus untuk melihat kadar timbal pada lindi sebelum dan setelah melawati campuran *fly ash* dan bentonit.
6. Campuran *fly ash* dan bentonit yang digunakan pada reaktor mengandung air atau tidak dalam keadaan kering.
7. Penelitian yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah untuk mendapatkan sifat fisik dan mekanis *fly ash* dan bentonit.
8. Pengujian sifat fisik tidak dilakukan terhadap komposisi campuran.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tempat Pembuangan Akhir (TPA)

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) menjadi tempat berkumpulnya sampah yang telah diangkut dari sumber sampah dan berlokasi tersendiri dari agar tidak mengganggu lingkungan sekitarnya. Tempat Pembuangan Akhir (TPA) adalah tahap terakhir pengelolaan sampah sejak dari sumber, pengumpulan, pengangkutan, pengolahan, dan pembuangan (Fajarini, 2014). Metode pada TPA yang populer ialah (Rosita, 2020):

1. *Open Dumping*, metode ini paling mudah untuk operasional TPA sebab sampah hanya ditumpuk tanpa ada perlakuan atau pengolahan lanjutan seperti proses pemadatan, penutup limbah, atau penghalang tambahan di bawahnya.
2. *Controlled Landfill*, metode ini peralihan *open dumping* ke *sanitary landfill*. Cara yang digunakan pada metode ini dengan menumpuk dan meratakan sampah. Sistem ini membutuhkan setidaknya drainase untuk melepaskan lindi, unit gas metana, instalasi pengolahan lindi dan penutup tanah untuk setiap minggu.
3. *Sanitary Landfill*, metode ini sampah ditumpuk dan diratakan hingga ketebalan tertentu lalu dipadatkan kemudian dilapisi tanah setiap hari atau dua hari sekali. Sistem ini biasanya terdiri dari *liner*, geomembran, sistem pengumpulan lindi dan lapisan penutup.

2.2 Air Lindi (*Leachate*)

2.2.1 Pengertian Air Lindi (*Leachate*)

Limbah cair yang disebut lindi atau *leachate* mengandung bahan tersuspensi dan terlarut (Ambia, 2021). Lindi adalah cairan yang dikeluarkan dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) dan merupakan sumber kontaminasi potensial dari tempat pembuangan sampah (Damanhuri dan Padmi, 2010 dalam (Ambia, 2021).

alah limbah cair yang muncul ketika air dari luar merembes ke dalam sampah, menyebabkan bahan-bahan terlarut ikut terbilas, termasuk bahan

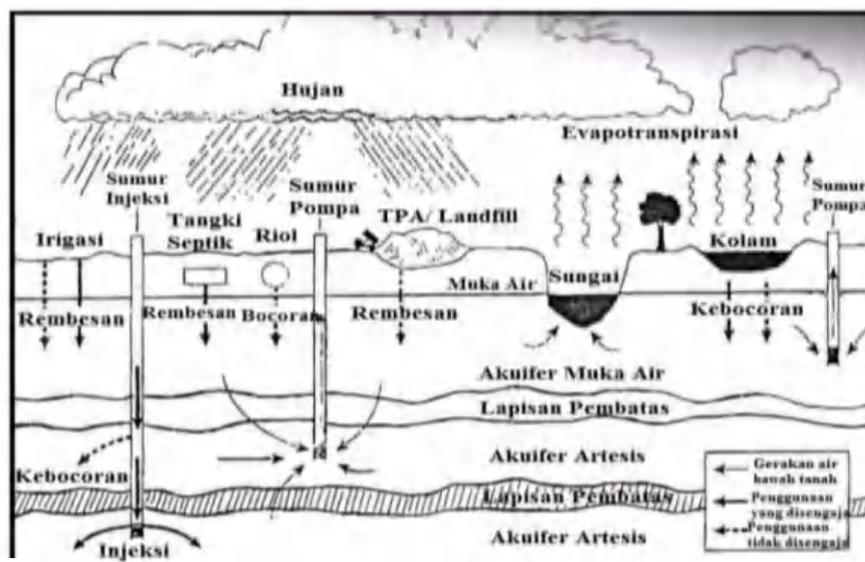


organik olahan yang telah mengalami dekomposisi biologis (Damanhuri, 1996 dalam Gunawan et al., 2015).

2.2.2 Pembentukan dan Penyebaran Air Lindi

Lindi terbentuk dari infiltrasi air hujan, air tanah, air limbah yang melalui lokasi pembuangan sampah (Rahadianti, 2016). Komposisi lindi yang terbentuk dipengaruhi oleh karakteristik sampah (organik dan anorganik), kemudahan terurai (larut/tidak larut), kondisi tumpukan sampah (suhu, pH, kelembaban, dan umur), karakteristik sumber air (kuantitas dan kualitas air yang dipengaruhi iklim dan hidrogeologi), komposisi tanah penutup, ketersediaan nutrisi, dan mikroba serta adanya inhibitor (Aziz dkk, 2010 dalam Rahadianti, 2016). Produksi lindi akan meningkat seiring dengan peningkatan timbunan sampah, meskipun bergantung juga pada jumlah curah hujan (Rahadianti, 2016).

Lindi yang terkumpul pada dasar TPA kemudian menembus lapisan tanah bawah atau disebut perpindahan vertikal. Menurut Ambia (2021) perpindahan lateral dapat terjadi tergantung pada karakteristik material di sekitar TPA. Hujan menjadi fase transportasi kontaminan lindi dari tumpukan sampah (Rahadianti, 2016). Air tanah di sekitarnya akan tercemar akibat lindi yang merembes. Mekanisme kontaminasi tanah dan air tanah sebagai berikut:



ambar 1 Mekanisme kontaminasi tanah dan air tanah dari berbagai sumber
Sumber: Notodarmojo, 2004 dalam Gunawan et al., 2015



2.2.3 Karakteristik Air Lindi

Faktor yang memengaruhi karakteristik pada lindi antara lain komposisi dan umur sampah, lokasi, dan pengoperasian dan kondisi Tempat Pembuangan Akhir (TPA), iklim, kondisi hidrogeologi, kelembaban, temperatur, pH, dan (Tchobanoglous, 1997 dalam Rahadiani, 2016). Jika TPA memiliki banyak sampah organik maka lindi yang dihasilkan banyak mengandung bahan organik dan baunya menyengat (Larasati dkk, 2016 dalam Ambia, 2021). Karakteristik lindi menjadi parameter untuk mengetahui tingkat stabilisasi tumpukan sampah (Fathiras dan Nasya, 2011 dalam Rahadiani, 2016). Konsentrasi kontaminan lindi secara umum yaitu COD, amonia. Nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$), *Suspended Solid* (SS), *Dissolved Solids* (DS), logam berat, dan garam (Kirkeby et al., 2007 dalam Rahadiani, 2016).

Tabel 1 Karakteristik air lindi (*leachate*)

No.	Parameter	Satuan	Jangkauan
1.	COD	mg/liter	150-100000
2.	BOD	mg/liter	100-90000
3.	pH	-	5,3-8,5
4.	Alkanitas	(mgCaCO ₃ /liter)	300-11500
5.	Hardness	(mgCaCO ₃ /liter)	500-8900
6.	NH ₄	mg/liter	1-1500
7.	N-Organik	mg/liter	1-2000
8.	Nitrogen Total	mg/liter	50-5000
9.	Nitrit (NO ₃)	mg/liter	0,1-50
10.	Nitrat (NO ₂)	mg/liter	0-25
11.	Phosphor Total	mg/liter	0,1-30
12.	Fosfat (PO ₄)	mg/liter	0,3-25
13.	Kalsium (Ca)	mg/liter	10-2500
14.	Magnesium (Mg)	mg/liter	50-1150
15.	Natrium (Na)	mg/liter	50-4000
16.	Kalium (K)	mg/liter	10-2500
17.	SO ₄	mg/liter	10-1200
18.	Klorin (Cl)	mg/liter	30-4000
19.	Besi (Fe)	mg/liter	0,4-2200
20.	Seng (Zn)	mg/liter	0,05-170
21.	Mangan (Mn)	mg/liter	0,4-50
22.	Kopernisium (Cn)	mg/liter	0,04-90
23.	Phenol	mg/liter	0,04-44
24.	Arsen (As)	µg/liter	5-1600
25.	Kadmium (Cd)	µg/liter	0,5-140
	Kobalt (Co)	µg/liter	4-950
	Nikel (Ni)	µg/liter	20-2050
	Timbal (Pb)	µg/liter	8-1020
	Kromium (Cr)	µg/liter	300-1600
	Tembaga (Cu)	µg/liter	4-1400



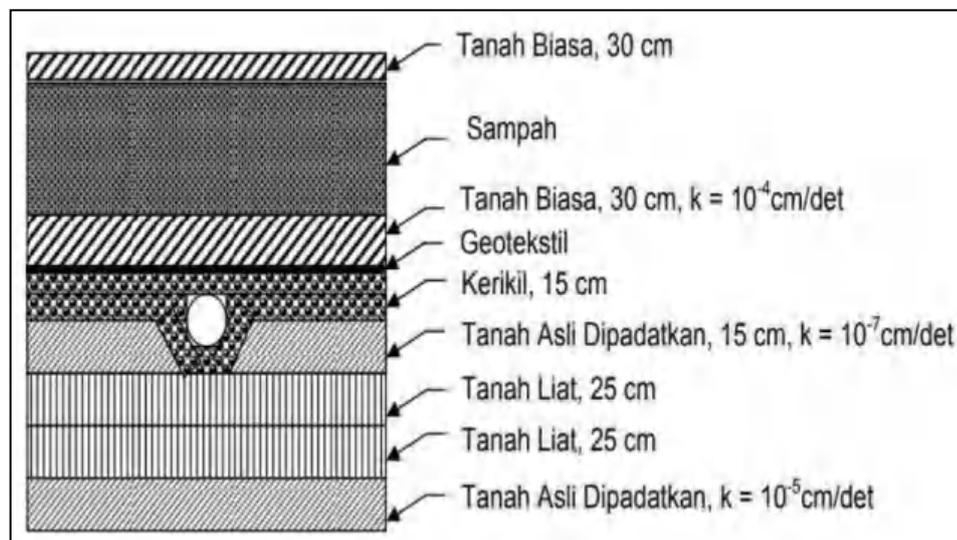
No.	Parameter	Satuan	Jangkauan
31.	Merkuri (Hg)	$\mu\text{g/liter}$	0,2-50

Sumber: Balai Laboratorium Kesehatan Surabaya (2005) dalam Ambia (2021)

2.3 Lapisan Dasar TPA

Salah satu elemen terpenting dalam pengembangan TPA kota dan industri adalah lapisan dasar sebab berfungsi melindungi tanah dan air tanah dari senyawa berbahaya yang terkandung dalam rembesan kebocoran lindi. Menurut Wasil (2020) tanah kaya mineral lempung biasanya digunakan sebagai bahan *liner* yang dipadatkan. Lapisan dasar TPA harus kedap, mampu menyegel, mudah dibentuk, dan tahan terhadap deformasi (Wasil, 2020).

Lapisan dasar TPA atau disebut *liner* berfungsi untuk mencegah kontaminasi lindi ke tanah sehingga tanah dan air tanah tetap terjaga dari pencemaran. Lapisan dasar dipasang sebelum TPA beroperasi menjadi tempat pembuangan sampah dan umumnya menggunakan bahan berpermeabilitas rendah (Diharto, 2009 dalam Sari et al., 2016). Lapisan dasar TPA harus kedap air agar peresapan lindi ke tanah terhambat dan tidak mencemari sekitarnya (Sari et al., 2016).



Gambar 2 Lapisan dasar TPA

Sumber: Pedoman Pengoperasian dan Pemeliharaan TPA PUPR, 2006



bal (Pb)

Timbal (Pb) atau dapat juga disebut timbal merupakan zat yang dapat dijumpai di alam. Timbal adalah logam berat yang beracun. Timbal dan logam ini sering dipakai dalam industri. Sumber timbal pada

lingkungan salah satunya dari emisi kendaraan beroda dua maupun beroda empat (Janardani et al, 2018 dalam Yusuf et al., 2021). Sel darah atau eritrosit memiliki daya tarik yang kuat terhadap senyawa logam timbal setelah terserap dalam sistem pencernaan kemudian senyawa logam timbal mencapai sistem peredaran darah (Yusuf et al., 2021). Menurut Adhani dan Husaini (2017) dalam Yusuf et al. (2021) logam timbal dapat merusak ginjal, menyebabkan kerusakan pada tubulus ginjal, sel tubulus *atrofi*, *sclerosis glomerulus*, *nefropati irreversible*, *fibrosis*, dan *sclerosis vaskuler*. Logam timbal dapat terkumpul dalam tubuh dalam jangka waktu lama dan terakumulasi sebagai racun.

Logam timbal (Pb) mempunyai sifat sebagai berikut (Suwardi, 2011):

1. Lunak sehingga dapat dipotong menggunakan pisau atau dapat dibentuk dengan tangan.
2. Tahan terhadap korosi atau karat sehingga sering digunakan sebagai bahan pelapis.
3. Titik leburnya rendah yaitu 327,5°C.
4. Memiliki densitas yang lebih besar atau kerapatan yang lebih besar dari logam biasa.
5. Tidak dapat menghantarkan listrik dengan baik.

Timbal (Pb) dapat masuk ke dalam tubuh melalui berbagai jalur, antara lain melalui makanan dan minuman, udara, dan penetrasi pada lapisan atau selaput kulit, yang dapat mengakibatkan keracunan dari logam tersebut. Logam timbal (Pb) akan menumpuk di jaringan dan/atau organ, pada tulang dapat menggantikan ion kalsium (Ca^{2+}) menjadi ion (Pb^{2+}) dalam jaringan tulang. Selain itu, logam timbal (Pb) pada ibu hamil dapat melalui plasenta kemudian masuk ke peredaran darah janin dan setelah bayi lahir muncul pada air susu ibu (ASI).

2.5 Fly Ash

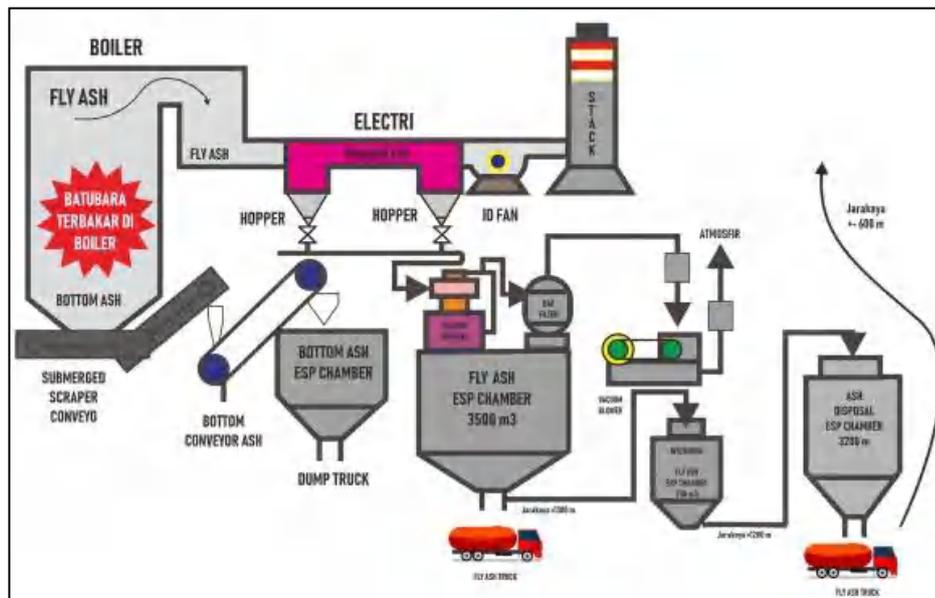
Pemanfaatan batubara semakin meningkat karena biayanya yang relatif rendah dibandingkan dengan harga bahan bakar lain (Ambia, 2021). Pembangkit Listrik



Jap (PLTU) menggunakan batu bara untuk memproduksi listrik. Produk dari pembakaran batu bara dikenal sebagai *fly ash*. *Fly ash* atau abu merupakan bahan oksida anorganik yang berwarna abu-abu kehitaman

dan mengandung silika dan alumina aktif akibat dibakar pada suhu tinggi (Gunawan et al., 2015).

Bakri et al. (2019) menyebutkan zat anorganik atau oksida logam, dan residu karbon yang tidak terbakar dihasilkan saat batubara dibakar dalam *Boiler Furnace*. Gas buang yang keluar dari boiler membawa bahan anorganik yang tidak dapat dibakar dan sangat kecil serta ringan. Penangkap debu mengumpulkan material ini yang disebut *fly ash* atau PFA (*Pulverized Fuel Ash*). Selanjutnya debu yang dihasilkan disemprotkan air untuk mencegah debu berterbangan serta memudahkan pengambilan debu di lantai, mesin, *conveyor*, *trover house/tower*. *Fly ash* ditampung di *hopper Electric Precipitator (EP)* melalui *air compressor* dipindahkan ke *fly ash silo* yang dilengkapi dengan *aeration blower* untuk selanjutnya di transfer ke truk kapsul.



Gambar 3 Penanganan debu PLTU

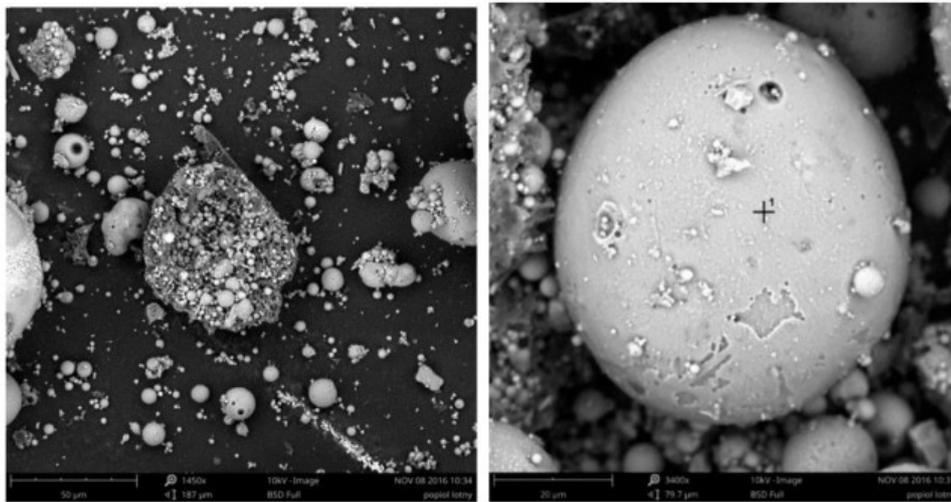
Sumber: Bakri et al., 2019

2.5.1 Karakteristik *Fly Ash*

Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat fisik, kimia dan teknis dari *fly ash* adalah jenis batubara, kemurnian batubara, tingkat penghancuran, tipe pemanasan dan metode penyimpanan dan penimbunan (Bakri et al., 2019). *Fly ash* ukuran yang berkomposisi antara lain $<1 \mu\text{m}$ sampai lebih besar dari 100 μm dengan partikel berukuran $<20 \mu\text{m}$, umumnya hanya sekitar 10%-30%



yang lebih besar dari 50 μm . *Specific gravity* (SG) *fly ash* bervariasi antara 1,6-3,1.



Pembesaran 1400x

Pembesaran 3400x

Gambar 4 SEM (*Scanning Electron Microscope*) *fly ash*

Sumber: (Wasil, 2020)

Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa *fly ash* biasanya berbentuk bulatan sedang, rongga berlubang (*xenosea*) dan karbon tidak beraturan, dan mengandung partikel sferis halus (*cenosphere*) dengan berbagai ukuran (Ambia, 2021).

Fly ash dibagi menjadi dua kelas, *fly ash* kelas F dan *fly ash* kelas C berdasarkan ASTM C-618. *Fly ash* kelas F disebut juga *fly ash* rendah kalsium, yang tidak mempunyai sifat *cementitious* dan hanya bersifat *pozzolanic*. *Fly ash* kelas F mengandung CaO lebih kecil dari 10% dihasilkan dari pembakaran *anthracite* atau bitumen batubara (bituminous) dengan kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$, kadar CaO $< 10\%$, dan kadar karbon (C) berkisar 5%-10% (Bakri et al., 2019).

Fly ash yang mengandung CaO di atas 10% yang dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub-bitumen batubara (batubara muda/sub-bituminous) dengan kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$, kadar CaO $> 10\%$, dan kadar karbon (C) sekitar 2%. *Fly ash* kelas C disebut juga *fly ash* tinggi kalsium karena mengandung CaO yang cukup tinggi, *fly ash* tipe C mempunyai sifat *cementitious* olan. Kadar CaO yang cukup tinggi pada *fly ash* tipe C dengan sifat



cementitious menyebabkan jika terkena air atau lembab akan berhidrasi dan mengeras dalam waktu sekitar 45 menit (Bakri et al., 2019).

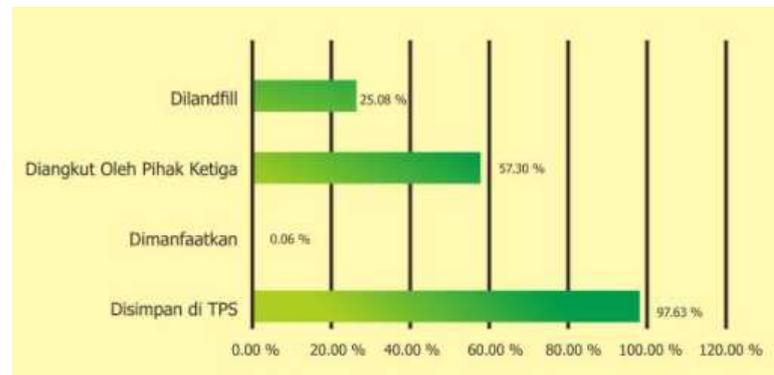
Tabel 2 Kandungan kimia *fly ash* kelas F dan C

No.	Senyawa Oksida	Kelas F (%)	Kelas C (%)
1.	Silika Dioksida (SiO_2)	55	40
2.	Aluminium Oksida (Al_2O_3)	26	17
3.	Besi (III) Oksida (Fe_2O_3)	7	6
4.	Kalsium Oksida (CaO)	9	24
5.	Magnesium Oksida (MgO)	2	5
6.	Sulfur Trioksida (SO_3)	1	3

Sumber: Pengelolaan Faba Sektor Pembangkit, KLHK (2017) dalam Bakri et al. (2019)

2.5.2 Pemanfaatan *Fly Ash*

Pemanfaatan *fly ash* di Indonesia digambarkan pada grafik berikut.



Gambar 5 Pemanfaatan *fly ash* di Indonesia

Sumber: PLN, 2019 dalam Bakri et al., 2019

Fly ash dapat digunakan sebagai tanah dalam pemanfaatan di bidang teknik dan konstruksi. *Fly ash* banyak dimanfaatkan untuk bahan dasar pada industri bangunan antara lain untuk pembuatan beton, bata, semen, dan *paving block*, pembangunan jalan, pembuatan tanggul dan trotoar, bahan urugan tanah struktural, urugan konstruksi, urugan tanah kosong, areal pertambangan, areal penyimpanan batubara, reklamasi tanah (Ambia, 2021). *Fly ash* juga dapat digunakan sebagai bahan baku keramik, aspal, pengolahan limbah baik limbah zat warna berbahaya, penyisihan logam berat, pengolahan limbah organik (Farradilla & Ismah, 2020).

nurut Darmayanti dkk (2018) dalam Ambia (2021) *fly ash* dapat digunakan sebagai adsorben yang mudah didapatkan dan murah serta efektif menghilangkan logam berat dalam jumlah yang besar. *Fly ash* dapat

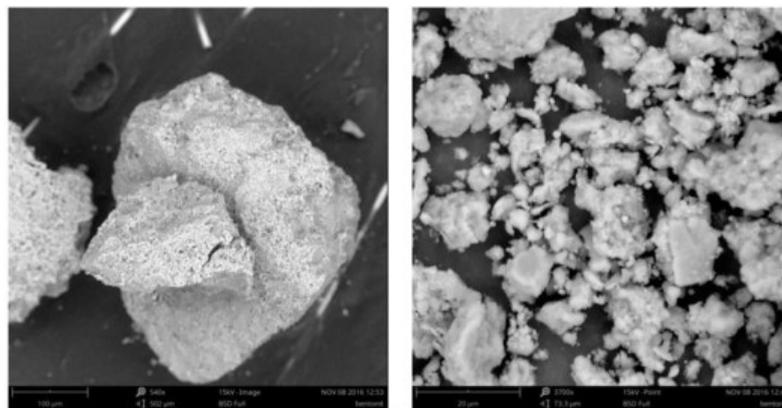


menyerap ion dari lindi dan sifat basa dari *fly ash* membantu mengendapkan ion yang ada di dalamnya (Wasil, 2020). *Fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai adsorben karena strukturnya berpori dan luas permukaan yang potensial (Bachrun, 2010; Chain Center, 2006 dalam Ismah, 2020).

2.6 Bentonit

Bentonit adalah tanah lempung yang sebagian besar terdiri dari montmorillonite dengan mineral-mineral seperti kwarsa, kalsit, dolomit dan mineral lainnya (Gunawan et al., 2015). Susunan bentonit terdiri atas mineral alumina-silika yang berstruktur kristal berlapis dan berpori (Putri, 2020). Bentonit dapat mengembang (*swellability*) karena ruang antar lapis (*interlayer*) dapat mengakomodasi ion-ion atau molekul ukuran tertentu sehingga untuk menyeimbangkan muatan pada daerah antar lapis bentonit akan mengikat kation yang mudah untuk ditukar (Sukandarrumidi, 1999 dalam Putri, 2020).

Bentonit dapat digunakan sebagai liner TPA karena mempunyai permeabilitas rendah (Roberts and Shimaoka, 2008 dalam Budihardjo, 2017).



Pembesaran 540x

Pembesaran 3700x

Gambar 6 SEM (*Scanning Electron Microscope*) bentonit
Sumber: Wasil, 2020

Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa bentonit berbentuk tidak beraturan, dan mengandung partikel halus di sekelilingnya dengan berbagai ukuran. Bentonit dapat terbentuk oleh proses vulkanik akibat pelapukan, transformasi hidrotermal, asosiasi, dan proses lainnya menurut L. D. Wesley (2012) dalam Jambise et al. (2012).



2.6.1 Karakteristik Bentonit

Menurut Bergaya et al. (2013) dalam Putri (2020) bentonit mempunyai ukuran partikel berdiameter $<2 \mu\text{m}$. Bentonit dalam keadaan kering berbentuk butiran halus seperti tekstur kaca pecah (*concoidal fracture*) berwarna dasar putih dan berubah menjadi krem jika lapuk yang lama-kelamaan menjadi warna kuning sedikit kemerahan atau kecoklatan serta hitam keabu-abuan, bergantung jenis dan banyak fragmen mineralnya (Putri, 2020). Bentonit bersifat sangat lunak, plastis, berporositas tinggi, mudah menyerap air, dan dapat melakukan pertukaran ion (Supeno, 2009 dalam Putri, 2020). Saat bersentuhan dengan air, bentuk tanah liat ini menunjukkan karakteristik koloid yang kuat dan mengembang (Kirk Ohtmer, 1964 dalam Jambise et al., 2014). Sifat lain dari bentonit menurut Jambise et al. (2014) yaitu plastis dan koloid. Sifat mengembang dan koloid terjadi saat kontak dengan air. Komponen tambahan bentonit adalah pengotor dari beberapa jenis mineral, termasuk kuarsa, kalsit, mika, dan klorit (Bukit et al., 2021).

Berdasarkan sifat fisiknya bentonit dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok (Mukarrom, 2017 dalam Putri, 2020):

1. Natrium Bentonit (*Sweling Bentonite*)

Natrium Bentonit merupakan jenis *montmorillonite* yang memiliki partikel lapisan air tunggal (*single water layer particles*) dan mengandung kation Na^+ yang dapat melakukan pertukaran ion. Natrium bentonit memiliki kemampuan untuk mengembang dalam air dan dapat terdispersi selama beberapa waktu di dalam air. Kandungan Na_2O dalamnya umumnya lebih dari 1%.

2. Calsium Bentonit (*Non Swelling Bentonite*)

Calsium Bentonit merupakan jenis *montmorillonite* yang kurang mengembang dalam air. Bentonit jenis ini mengandung kalsium dan magnesium yang lebih banyak dibandingkan kandungan natriumnya.

Perbandingan kandungan kimia pada kedua jenis bentonit sebagai berikut,

Tabel 3 Kandungan kimia bentonit

Senyawa Oksida	Natrium Bentonit (%)	Calsium Bentonit (%)
Silikon Dioksida (SiO_2)	61,3-61,4	62,12
Alumina Oksida (Al_2O_3)	19,8	17,33
Besi (II) Oksida (Fe_2O_3)	3,9	5,30
Kalsium Oksida (CaO)	0,6	3,68
Magnesium Oksida (MgO)	1,3	3,30



Senyawa Oksida	Natrium Bentonit (%)	Calsium Bentonit (%)
Natrium Oksida (Na ₂ O)	2,2	0,50
Kalsium Oksida (K ₂ O)	0,4	0,55
Hidrogen Oksida (H ₂ O)	7,2	7,2

Sumber: Supeno (2009) dalam Putri (2020)

Kandungan Na₂O pada Natrium Bentonit lebih besar daripada Calsium Bentonit. Pada Calsium Bentonit kandungan CaO dan MgO lebih besar daripada Natrium Bentonit.

2.6.2 Pemanfaatan Bentonit

Bentonit dapat dimanfaatkan untuk pembuatan kolom kromatografi, penyaring molekular, penyimpan data optik, katalis (Putri, 2020). Menurut Supeno dan Sembiring (2007) dalam Dewi et al. (2015) prinsip kerja bentonit yaitu mengubah permukaan dan pori-pori. Senyawa aluminium silikat yang terdapat pada mineral lempung, yang dibentuk oleh AlO₄⁵⁻ dan SiO₄⁴⁻ tetrahedral dengan rongga berisi ion logam, biasanya logam alkali tanah (Natrium, Kalium, Magnesium, Calsium, dan Ferrum) dan molekul air yang bergerak bebas, karena karakteristik tersebut, bentonit dapat dimanfaatkan sebagai penukar ion dan penyaring molekular (Sunardi, Suparno, dan Yuwono, 2011 dalam Yenti, 2016).

Kemampuannya dan sifatnya yang dapat menyerap dan mengembang menyebabkan bentonit menjadi bahan yang sering digunakan sebagai tambahan di berbagai sektor untuk meningkatkan kinerja bahan utama seperti produksi minyak nabati, katalis, kosmetik, obat-obatan, *grease*, dan cat. Bentonit juga dimanfaatkan untuk pondasi, pada pengeboran untuk menutup dinding lubang bor dan mengikat serbuk bor, penyegel terhadap air karena permeabilitasnya yang rendah untuk mencegah rembesan pada tanah melalui geosintetik dan *liner* pada TPA (Sari et al., 2016; Yenti, 2016). Fungsi lain dari bentonit dapat meningkatkan sifat mekanis atau kemampuan terhadap pada tekanan pada campuran (Bukit et al., 2021).

2.7 Sifat Fisik Tanah



... tanah adalah sifat yang berhubungan dengan komponen penyusun tanah ... karakteristik yang berhubungan dengan ciri-ciri fisik dari suatu tanah ... & Mina, 2016). Sifat fisik tanah menurut (Fathurrozi & Rezqi, 2016)

yaitu *specific gravity*, kadar air, analisis saringan dan hidrometer, dan batas atterberg.

2.7.1 *Specific Gravity*

Specific gravity (Gs) atau berat jenis atau merupakan perbandingan antara berat tanah kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi tanah dalam keadaan jenuh. *Specific gravity* adalah parameter yang penting dalam perhitungan hubungan berat dan volume. Nilai Gs digunakan untuk menentukan macam tanah berdasarkan nilai *specific gravity*-nya.

Tabel 4 Klasifikasi tanah berdasarkan *specific gravity*

Macam Tanah	<i>Specific Gravity</i>
Kerikil	2,65 - 2,68
Pasir	2,65 - 2,68
Lanau Anorganik	2,62 - 2,68
Lempung Organik	2,58 - 2,65
Lempung Anorganik	2,68 - 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 - 1,80

Sumber: Hardiyatmo (1992) dalam Kusuma & Mina (2016)

2.7.2 Kadar Air

Kadar air tanah merupakan perbandingan berat air yang terkandung dalam tanah dengan berat kering tanah. Sebab, pada dasarnya tanah terdiri atas dua bagian yaitu bagian padat dan bagian rongga. Bagian padat terdiri atas partikel-partikel tanah yang padat sedangkan bagian rongga terisi oleh air dan udara. Dalam menentukan kadar air dari tanah dilakukan dengan mengeringkan tanah menggunakan pemanasan kemudian dibandingkan antara berat sebelum dan sesudah dipanaskan. Kadar air dinyatakan dalam persen (Fathurrozi & Rezqi, 2016).

2.7.3 Analisa Saringan dan Hidrometer

Analisa saringan yaitu penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan, dengan ukuran lubang pada diameter tertentu (Hardiyatmo, 1992 dalam Kusuma

, 2016). Penyaringan merupakan metode yang secara langsung akan ukuran partikel dengan didasarkan pada ukuran lubang saringan yang n. Pada analisis saringan, sejumlah saringan yang memiliki ukuran

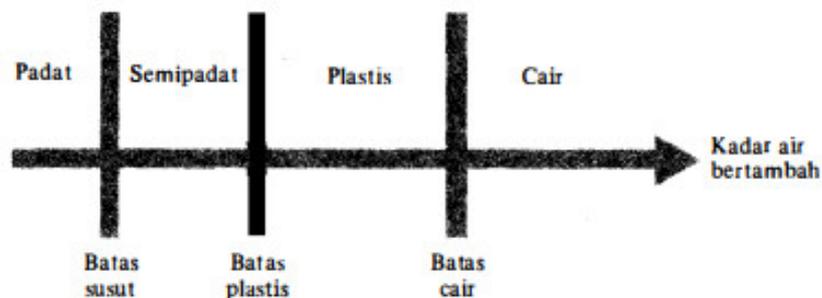


lubang berbeda-beda disusun secara berurutan dari ukuran yang terbesar ke terkecil. Sifat-sifat tanah sangat bergantung pada ukuran butirannya dan hasilnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanah (Fathurrozi & Rezqi, 2016; Kusuma & Mina, 2016).

Hidrometer dilakukan setelah melewati pemeriksaan analisa saringan dengan tanah yang telah diuji lolos lewat saringan no. 200. Pemeriksaan hidrometer untuk menentukan ukuran dan susunan butir (gradasi) tanah.

2.7.4 Batas-Batas Atterberg

Pada tahun 1900, ilmuwan dari Swedia bernama Atterberg mengembangkan suatu metode untuk menjelaskan sifat konsistensi tanah berbutir halus pada kadar air yang berkomposisi. Hasilnya dikenal sebagai batas-batas atterberg (Das, 1995).



Gambar 7 Batas-batas atterberg
Sumber: Das, 1995

1. Batas Cair

Batas cair tanah (*liquid limit/LL*) adalah kadar air suatu tanah berubah dari keadaan cair menjadi plastis.

2. Batas Plastis

Batas plastis (*plastic limit/PL*) adalah kadar air suatu tanah berada diantara keadaan plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan diameter silinder 3,18 mm mengalami keretakan ketika digulung tetapi tidak terpisah atau hancur. Batas plastis dihitung berdasarkan persentasi berat air terhadap berat tanah kering pada benda uji.

Tabel 5 Nilai indeks plastisitas tanah dan macam tanah

PL	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
	Non Plastis	Pasir	Non Kohesif
	Plastisitas Rendah	Lanau	Kohesif Sebagian
	Plastisitas Sedang	Lempung Berlanau	Kohesif
	Plastisitas Tinggi	Lempung	Kohesif

diyatmo (1992) dalam Fathurrozi & Rezqi (2016)



3. Batas Susut

Batas susut (*shrinkage limit/SL*) adalah kadar air suatu tanah berada diantara padat dan semi padat.

Berdasarkan hasil analisa saringan dan batas-batas atterberg, tanah dapat diklasifikasikan dalam sistem klasifikasi tanah salah satunya dengan sistem AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*).

Tabel 6 Klasifikasi tanah berdasarkan sistem AASHTO

Klasifikasi umum	Tanah berbutir (35% atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)						
	A-1		A-3	A-2-4	A-2		
Klasifikasi Kelompok	A-1-a	A-1-b			A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisa ayakan (% lolos)	Maks						
No. 10	50						
No. 40	Maks	Maks	Min 51				
No. 200	30	50					
	Maks	Maks	Maks	Maks 35	Maks 35	Maks 35	Maks 35
	15	25	10				
Sifat fraksi yang lolos							
Ayakan No. 40			NP	Maks 40	Maks 41	Maks 40	Min 41
Batas cair (LL)				Maks 10	Maks 10	Min 11	Min 11
Indeks plastisitas (PI)	Maks 6						
Tipe material yang paling dominan	Batu kerikil pecah, dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung			
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Baik sekali sampai baik						

(a)

Klasifikasi umum	Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6^
Analisa ayakan (% lolos)				
No. 10				
No. 40				
		Min 36	Min 36	Min 36
Sifat fraksi yang lolos				
Ayakan No. 40				
Batas cair (LL)	Maks 40	Maks 41	Maks 40	Min 41
Indeks plastisitas (PI)	Maks 6	Maks 10	Min 11	Min 11



Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35% dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200)				
Klasifikasi umum				
Klasifikasi kelompok	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6^
Tipe material yang paling dominan	Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian sebagai bahan tanah dasar	Biasa sampai jelek			

(b)

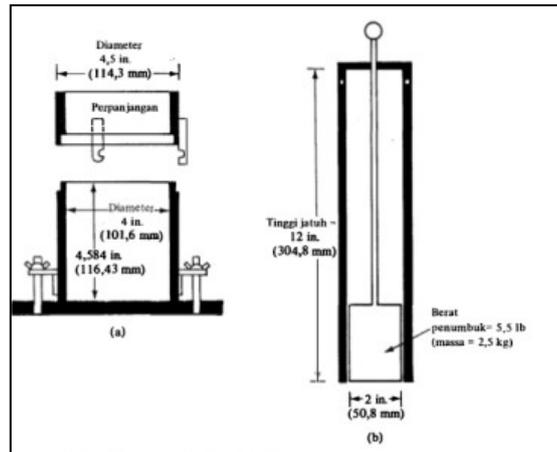
Sumber: AASHTO dalam Fathurrozi & Rezqi (2016)

2.8 Sifat Mekanis Tanah

Sifat mekanis tanah merupakan sifat yang berhubungan dengan respon atau perilaku tanah terhadap gaya atau tekanan (Kusuma & Mina, 2016). Salah satu sifat mekanis yaitu kompaksi. Kompaksi atau pemadatan tanah untuk kestabilan tanah agar tidak mengalami penurunan ataupun keretakan pada tanah. Pada dasarnya kompaksi dilakukan dengan mengurangi jumlah udara dalam pori-pori tanah yang membuat jarak antar butiran tanah menjadi kecil melalui menggunakan beban statis atau dinamis pada tanah (Jambise et al., 2014). Fungsi lain dari pemadatan tanah yaitu untuk meningkatkan berat volume tanah yang renggang, meningkatkan kekuatan tanah, dan meningkatkan daya dukung pondasi di atasnya, mengurangi besarnya penurunan tanah yang tidak diinginkan dan meningkatkan kemantapan lereng timbunan (*embankments*) (Das, 1995).

Menurut Das (1995) pengukuran pemadatan tanah dari berat volume kering tanah yang dipadatkan. Jika air ditambahkan pada tanah yang dipadatkan maka air bertindak sebagai bahan pembasah (pelumas) pada partikel tanah. Partikel-partikel tanah akan lebih mudah bermigrasi dan bergeser satu sama lain dengan adanya air, membentuk postur yang lebih rapat/padat. Percobaan di laboratorium yang umum dilakukan untuk mendapatkan densitas kering maksimum (*Maximum Dry Density*) dan kadar air optimum (*Optimum Moisture Content*) adalah *Proctor Compaction Test* (Uji Pemadatan Proctor).





(a) cetakan (b) penumbuk

Gambar 8 Alat uji proctor standar
Sumber: Das, 1995

2.9 Permeabilitas

Setiap tanah secara teoritis memiliki rongga pori baik itu lebih besar atau berpori. Tanah disebut mudah meloloskan air (*permeable*) jika tanah tersebut memiliki sifat meloloskan air seperti kerikil dan pasir. Sebaliknya, tanah disebut kedap air (*impermeable*) jika tanah tersebut mempunyai kemampuan meloloskan air yang sangat kecil (Jambise et al., 2014). Permeabilitas adalah kemampuan tanah untuk meloloskan air untuk menyatakan sifat tanahnya. Permeabilitas dari bahan yang digunakan untuk membangun *liner* TPA adalah faktor yang penting untuk dipertimbangkan. Permeabilitas didefinisikan sebagai tingkat di mana air mengalir melalui satuan luas penampang dibagi waktu (Wasil, 2020).

Permeabilitas memiliki satuan yang sama seperti kecepatan, dalam satuan SI dinyatakan cm/detik. Permeabilitas bergantung pada beberapa faktor, yaitu kekentalan cairan, distribusi ukuran-pori, distribusi ukuran-butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah, dan derajat kejenuhan tanah. Pada tanah berlempung, struktur tanah memegang peranan penting dalam menentukan permeabilitas. Faktor-faktor lain yang memengaruhi permeabilitas adalah konsentrasi ion dan ketebalan lapisan air yang menempel pada butiran lempung

(Wasil, 2020). Permeabilitas untuk tiap-tiap tanah berbeda-beda.

Tabel 7 Permeabilitas beberapa jenis tanah

Jenis Tanah	Permeabilitas	
	cm/detik	ft/menit
Kerikil Bersih	1,0 – 100	2,0 – 200



Jenis Tanah	Permeabilitas	
	cm/detik	ft/menit
Pasir Kasar	1,0 – 0,01	2,0 – 0,02
Pasir Halus	0,01 – 0,001	0,02 – 0,002
Lanau	0,001 – 0,00001	0,002 – 0,00002
Lempung	Kurang dari 0,000001	Kurang dari 0,000002

Sumber: Das (1995)

Pengujian permeabilitas di laboratorium dapat menggunakan dua cara yaitu *constant head* yaitu pengujian permeabilitas tinggi konstan dan *falling head* yaitu pengujian permeabilitas tinggi jatuh.

2.10 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses penyerapan molekul (gas atau cair) oleh permukaan (padatan) (Rahadiani, 2016). Ketidakseimbangan gaya tarik menyebabkan adsorpsi, gaya tarik yang tidak seimbang menyebabkan adsorben memiliki kecenderungan untuk menarik senyawa lain bersentuhan dengan permukaannya (Wahyuni, 2010 dalam Ismah, 2020).

Adsorben berdampak pada seberapa banyak zat yang diserap. Jika adsorbat adalah gas, yang tergantung pada konsentrasi dan temperatur, maka jumlah molekul yang teradsorpsi dipengaruhi dari tekanan (Albert, 1990 dalam Ismah, 2020). Karakteristik adsorben yang dibutuhkan untuk adsorpsi yang baik adalah (Cahyono & Tuhi, 2012 dalam Ambia, 2021):

1. Luas permukaan adsorben, proses yang terjadi pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh besar kecilnya permukaan adsorben, semakin besar permukaan maka akan semakin tinggi kapasitas adsorpsi.
2. Kemurnian adsorben, adsorben dengan kemurnian tinggi memiliki kapasitas adsorpsi yang sangat baik.

2.10.1 Klasifikasi Adsorpsi

Klasifikasi adsorpsi sebagai berikut:

1. Adsorpsi fisika terjadi bila reaksi fisik yaitu tarik menarik yang relatif lemah antara adsorbat dengan permukaan adsorben akibatnya adsorbat dapat berpindah dari satu bagian permukaan ke bagian permukaan lain pada adsorben (Wahyuni, 2010 dalam Ismah, 2020).



2. Adsorpsi kimia terjadi akibat adanya reaksi antara adsorbat dengan adsorben dan membentuk ikatan kimia. Kekuatan ikatan adsorpsi kimia tergantung pada reaktan (Wahyuni, 2010 dalam Ambia, 2021).

2.10.2 Faktor yang Memengaruhi Adsorpsi

Terdapat faktor yang memengaruhi adsorpsi yaitu (Wahyuni, 2010 dalam Ismah, 2020):

1. Konsentrasi

Semakin tinggi konsentrasi, maka semakin cepat laju adsorpsinya. Namun, pada kondisi tertentu akan menjadi stabil karena sudah mencapai titik jenuh sehingga terjadi proses kesetimbangan.

2. pH

pH basa akan semakin banyak logam hidroksida yang mengendap dan mengurangi ion logam dari adsorbat. Selain itu, kondisi pH basa juga menyebabkan kompetisi ion H^+ sebagai kompetitor ion logam akan menurun karena larutan bersifat basa. Sebaliknya, 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. Kompetisi tersebut dapat menurunkan kapasitas adsorpsi terhadap ion logam.

3. Temperatur

Semakin tinggi temperatur, adsorpsi semakin cepat pada adsorpsi fisika sedangkan pada adsorpsi kimia semakin tinggi temperatur adsorpsinya semakin menurun.

4. Waktu kontak

Semakin lama waktu kontak yang terjadi pada suatu proses adsorpsi maka semakin besar adsorbat yang dapat teradsorpsi. Kemampuan daya serap meningkat dengan lamanya waktu kontak antara adsorben dengan adsorbat hingga mencapai kesetimbangan.

2.11 Penelitian Terdahulu



in *fly ash* maupun bentonit dengan bahan-bahan lain telah banyak dilakukan sebelumnya untuk tujuan yang berbeda-beda dan belum diperuntukkan sebagai material alternatif lapisan dasar Tempat Pembuangan Akhir (TPA).

Campuran *fly ash* dan bentonit telah dilakukan penelitian untuk menjadi *liner* TPA namun tidak menjelaskan jenis bentonit yang digunakan dan tidak mengukur hasil adsorpsi logam berat pada air lindi menggunakan campuran tersebut, dengan mengetahui besaran adsorpsi logam berat nilai pemanfaatan *fly ash* dan bentonit sebagai lapisan dasar semakin meningkat, efisien dan efektif. Penelitian sebelumnya digunakan untuk menjadi landasan dalam penelitian ini.

Tabel 8 Penelitian terdahulu

Nama	Judul	Metode	Hasil
Dona Ambia (2019)	Pemanfaatan Fly Ash Batubara Sebagai Adsorben Pada Penyerapan Polutan Di Pengolahan Air Lindi TPA Blang Bintang Aceh Besar	Metode penelitian menggunakan <i>fly ash</i> batubara dengan ukuran 100 mesh dan diaktivasi menggunakan larutan asam sulfat. Setelah itu dilakukan pengujian terhadap BOD, COD, Fe, Mn dan Zn dengan komposisi massa 35 gr, 50 gr, 65 gr, 80 gr, dan 100 gr dengan kecepatan pengadukan 300 rpm dengan waktu kontak 60 menit.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran adsorben, dan komposisi massa mempengaruhi efektivitas adsorpsi. Pada massa optimum 100 gr/L memiliki efektivitas Mn sebesar 98,09%, Zn sebesar 97,41%, Fe 97,20%, BOD 78,39% dan COD 14,80%.
Puspitarini et al., 2019	Pengaruh Ukuran Partikel, Zat Aktivator, Waktu Aktivasi Dan Waktu Kontak Adsorben Fly Ash Untuk Mengurangi Kadar Kadmium (Cd) Pada Air Lindi Di Tempat Pembuangan Akhir Purworejo, Jawa Tengah	Metode penelitian dengan pengayakan <i>fly ash</i> dengan ayakan 24 mesh (710 μ), 48 mesh (300 μ) dan 170 mesh (90 μ). Kemudian diaktivasi dengan H ₂ SO ₄ 2%, NaOH 3M dan MgSO ₄ 0,3 M masing-masing selama 120 dan 180 menit lalu dilakukan pengujian selama 60 menit, 90 menit, dan 120 menit.	Hasil penelitian menunjukkan ukuran partikel 90 μ m memiliki daya serap tinggi dalam menyerap logam kadmium dalam air lindi. NaOH merupakan zat aktivator yang paling efektif dalam meningkatkan kemampuan <i>fly ash</i> untuk mengadsorpsi kadmium (Cd), dengan waktu aktivasi optimum 180 menit.
et al.,	Kriteria Kadar Air-	Metode penelitian	Hasil penelitian



Nama	Judul	Metode	Hasil
2015	Kepadatan Bentonite Dicampur Dengan Fly Ash Untuk Compacted Soil Liner	dengan membuat 3 (tiga) buah benda uji yaitu Tanah A (30% B + 70% FA), Tanah B (50% B + 50% FA), dan Tanah C (70% B + 30% FA) kemudian dilakukan pengujian pemadatan, kadar air, permeabilitas, dan kuat tekan bebas.	menunjukkan campuran 70% bentonit + 30% fly ash memiliki permeabilitas paling kecil yang memenuhi standar parameter untuk compacted soil liner dengan nilai k kurang dari 1×10^{-6} cm/dtk dan kuat tekan bebas (qu) lebih besar dari $0,716 \text{ kg/cm}^2$.
Ronald Jembise (2014)	Agus dkk Penambahan Campuran Bentonit Dan Kaolin Pada Tanah Pasir Terhadap Koefisien Permeabilitas Dengan Kondisi Plastisitas Berbeda Pada Tingkat Kepadatan Maksimum	Metode penelitian dengan membuat bahan uji yaitu sampel 1 80% pasir, 0% bentonit, 20% kaolin; sampel 2 80% pasir, 5% bentonit, 15% kaolin; sampel 3 80% pasir, 10% bentonit, 10% kaolin; sampel 4 80% pasir, 15% bentonit, 5% kaolin; sampel 5 80% pasir, 20% bentonit, 0% kaolin. Kemudian dilakukan pengujian sifat fisik dan mekanisnya.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kadar bentonit dalam tanah campuran dan menurunnya kadar kaolin maka nilai indeks plastisitas akan meningkat sedangkan nilai kepadatan maksimum dan nilai koefisien permeabilitas tanah akan menurun.
Karim et. al, (2020)	Optimization of Soil to Fly-Ash Mix Ratio for Enhanced Engineering Properties of Clayey Sand for Subgrade Use	Metode penelitian dengan eksperimental menggunakan fly ash dan pasir berlempung untuk membandingkan specific gravity dan kepadatannya	Hasil penelitian menunjukkan penambahan fly ash menyebabkan peningkatan specific gravity, penurunan kadar air optimum (OMC) dan peningkatan kepadatan kering maksimum (MDD).
Zulfa (2020)	Sintesis Dan Karakterisasi Fly Ash Teraktivasi Koh	Metode penelitian dilakukan dengan	Hasil penelitian menunjukkan



Nama	Judul	Metode	Hasil
	Sebagai Material Adsorben Limbah Ion Kadmium (Cd^{2+})	mengaktivasi <i>fly ash</i> dengan konsentrasi 1M hingga 5M. Proses adsorpsi dilakukan dalam berbagai komposisi kondisi yaitu pH, konsentrasi larutan kadmium dan waktu kontak.	adsorben teraktivasi KOH 1M lebih efektif dalam menyerap ion logam Cd^{2+} dibandingkan dengan adsorben teraktivasi KOH yang lain. Hal tersebut ditunjukkan berdasarkan nilai kapasitas adsorpsi yaitu sebesar 3,9966 mg/g.
Kasman et al. (2014)	Rice Husk Packed Bed Column Reactor To Remove Cadmium From Landfill Leachate	Metode penelitian menggunakan sekam padi yang dicuci lalu dioven pada suhu 100°C. Kemudian dikontakkan dengan lindi menggunakan reaktor dengan variasi kecepatan aliran lalu diuji penyerapan cadmium menggunakan spektrofotometer serapan atom (SSA).	Hasil penelitian menunjukkan efektivitas penurunan kadar kadmium berkisar antara 52%-57%
Simangungsong et al. (2022)	Solidification/Stabilization Of Waste Containing Lead Using Fly Ash And Bentonite	Metode penelitian dengan mencampurkan <i>fly ash</i> dan bentonit pada komposisi tertentu lalu dicampurkan dengan larutan timbal dan dibentuk pada wadah selama 24 jam lalu diukur kuat tekan bebas dan TCLP.	Hasil penelitian menunjukkan semakin meningkatnya <i>fly ash</i> semakin efektif untuk kuat tekan bebas yaitu 3220 ton/m ² dan TCLP timbal 0,03 mg/L.
ad ljo	Kemampuan Tanah Liat dengan Campuran Serbuk Gergaji sebagai Penahan Lindi di Tempat Pengolahan Akhir Sampah	Metode penelitian dilakukan dengan pengujian batas-batas atterberg seperti batas cair, batas plastis,	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk gergaji menurunkan



Nama	Judul	Metode	Hasil
		<p>pengembangan bebas dan permeabilitas dari bentonit dengan penambahan serbuk gergaji. Penambahan serbuk gergaji yang diuji pada studi ini adalah sebesar 2%, 3% dan 5% dari total berat kering.</p>	<p>batas cair, batas plastis dan mengurangi indeks pengembangan bebas bentonit. Namun, penambahan serbuk gergaji pada bentonit meningkatkan koefisien permeabilitas dari bentonit.</p>
Kartika Nurrachmah Sari dkk (2016)	Kemampuan Geosynthetic Clay Liner (GCL) sebagai Pelapis Dasar TPA Terhadap Penyisihan Konsentrasi Besi (Fe) dan Timbal (Pb) dalam Lindi	Metode penelitian menggunakan 3 reaktor yaitu reaktor kontrol yang berisi tanah yang dipadatkan dan kerikil; reaktor <i>single liner</i> yang berisi tanah, bentonit, kerikil kecil; reaktor <i>double liner</i> yang berisi tanah, bentonit, kerikil kecil yang disusun dua kali kemudia air lindi dialirkan pada reaktor lalu diuji.	Hasil penelitian menunjukkan pada reaktor kontrol menyisihkan Fe sebesar 36% dan Pb sebesar 34,48%, reaktor <i>single liner</i> menyisihkan Fe sebesar 45,45% dan Pb sebesar 4,85%, dan reaktor <i>double liner</i> menyisihkan Fe sebesar 53,02% dan Pb sebesar 57,99%,

