

STUDI POTENSI CAMPURAN SERBUK GERGAJI DAN *NATRIUM BENTONITE* SEBAGAI ALTERNATIF LAPISAN DASAR PENAHAN LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA)



**ACHMAD GILBANI
D131201054**



**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

STUDI POTENSI CAMPURAN SERBUK GERGAJI DAN *NATRIUM BENTONITE* SEBAGAI ALTERNATIF LAPISAN DASAR PENAHAN LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA)

**ACHMAD GILBANI
D131201054**



**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

STUDI POTENSI CAMPURAN SERBUK GERGAJI DAN *NATRIUM BENTONITE* SEBAGAI ALTERNATIF LAPISAN DASAR PENAHAN LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA)

ACHMAD GILBANI

D131201054

Skripsi

sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana

Program Studi Teknik Lingkungan

pada

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI
**STUDI POTENSI CAMPURAN SERBUK GERGAJI DAN NATRIUM
BENTONITE SEBAGAI ALTERNATIF LAPISAN DASAR PENAHAN
LINDI DI TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA)**

ACHMAD GILBANI
D131201054

Skripsi,

telah dipertahankan di depan Panitia Ujian Sarjana Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada 19 November 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan
pada



Mengesahkan:

Pembimbing tugas akhir,



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

Mengetahui:

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul “**Studi Potensi Campuran Serbuk Gergaji dan *Natrium Bentonite* sebagai Alternatif Lapisan Dasar Penahan Lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)**” adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T.). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 19 November 2024



Achmad Gilbani
NIM D131201054

UCAPAN TERIMA KASIH

Maha Besar Allah Subhanahu Wata'ala dengan segala keagungan dan kekuasaannya yang telah memberikan kesehatan dan kesempatan hingga pada hari ini, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul "Studi Potensi Campuran Serbuk Gergaji dan *Natrium Bentonite* sebagai Alternatif Lapisan Dasar Penahan Lindi di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA)". Sholawat dan salam senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah SAW., yang telah membawa umat manusia dari alam kegelapan ke masa yang cerah seperti saat sekarang ini.

Penelitian yang penulis lakukan dapat terlaksana dengan sukses serta dapat terampungkan dalam bentuk tugas akhir ini atas bimbingan, diskusi, dan arahan dari Ibu Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak/Ibu dosen serta karyawan dan staf Departemen Teknik Lingkungan yang telah memberikan banyak pengetahuan kepada penulis selama bangku perkuliahan.

Teruntuk teman-teman Lingkungan 2020 serta ENTITAS 2021, penulis berterima kasih atas segala cerita dan pengalaman yang kalian berikan kepada penulis selama menjalani dinamika perkuliahan. Terima kasih kepada **Putri Amelia S.T.**, yang selalu menjadi sosok rumah bagi penulis, terimakasih sudah mau mendengarkan keluh kesah penulis sepanjang pembuatan skripsi ini. Semoga kedepannya tetap selalu kebersamai menuju jalan kesuksesan. Serta kepada seluruh pihak yang membantu selama penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian.

Tugas akhir ini penulis persembahkan kepada kedua orang tua penulis, **Bapak Supriarto A.Md.** dan **Ibu Chaerani Achmad Rachim A.Md.** yang senantiasa mendoakan dan memberi dukungan moral dan materiil sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih telah merawat dan membesarkan penulis dengan segala kasih sayang yang kalian miliki. Semoga hal-hal baik selalu menghampiri keluarga kita.

Penulis,
Achmad Gilbani

ABSTRAK

ACHMAD GILBANI. **Studi potensi campuran serbuk gergaji dan *natrium bentonite* sebagai alternatif lapisan dasar penahan lindi di tempat pemrosesan akhir (TPA)** (dibimbing oleh Kartika Sari)

Latar Belakang. Lapisan dasar memegang peranan penting dalam meningkatkan kualitas tempat pemrosesan akhir sampah dari sistem *open dumping* menuju ke sistem *sanitary landfill* ataupun *controlled landfill*. Lapisan dasar berfungsi sebagai penahan lindi agar lindi tidak masuk ke dalam tanah dan mencemari lingkungan. Untuk mengurangi kendala dalam membuat lapisan dasar seperti keterbatasan penggunaan tanah yang bernilai eksklusif, diperlukan alternatif lain yang bernilai ekonomis dan mampu memanfaatkan limbah yang ada. Salah satu solusi yang dapat ditawarkan adalah penggunaan serbuk gergaji yang dimodifikasi dengan *natrium bentonite*. Serbuk gergaji berfungsi sebagai adsorben yang kuat untuk kontaminan logam berat. **Tujuan.** Penelitian ini berfokus pada potensi campuran serbuk gergaji dan *natrium bentonite* dalam mereduksi logam berat berupa kadmium (Cd). Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis sifat limbah serbuk gergaji dan *natrium bentonite* terhadap nilai permeabilitas lapisan dasar. **Metode.** Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Departemen Teknik Sipil, Laboratorium Kualitas Air, dan Laboratorium Persampahan Departemen Teknik Lingkungan. Variasi penambahan serbuk gergaji yang diuji pada penelitian ini adalah sebesar 2%, 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%. **Hasil.** Hasil percobaan menunjukkan bahwa penambahan serbuk gergaji menurunkan kekuatan dan daya dukung tanah sebagai lapisan dasar namun dalam batas aman. Penambahan serbuk gergaji dapat meningkatkan permeabilitas dari semula sebesar $6,51 \times 10^{-9}$ cm/detik menjadi $1,15 \times 10^{-8}$ cm/detik dengan penambahan serbuk gergaji sebesar 15%. Disisi lain, penambahan serbuk gergaji dapat meningkatkan kapasitas reduksi Cd dengan persentase hingga 82,43% pada campuran 85% *natrium bentonite*; 15% serbuk gergaji. **Kesimpulan.** Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, seluruh variasi campuran sampel serbuk gergaji dan *natrium bentonite* memiliki potensi sebagai lapisan dasar penahan lindi di tempat pemrosesan akhir sampah (TPA). Namun, diperlukan tambahan material lain untuk mendukung perkuatan stabilitas tanah.

Kata Kunci: Lapisan Dasar, Serbuk Gergaji, *Natrium Bentonite*, Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, Permeabilitas, Cd

ABSTRACT

ACHMAD GILBANI. **Study of the potential Mixture of sawdust and natrium bentonite as an alternative base layer to retain leachate at final processing sites** (supervised by Kartika Sari)

Background. The base layer plays an important role in improving the quality of the final waste processing site from an open dumping system to a sanitary landfill or controlled landfill system. The base layer functions as a leachate barrier so that the leachate does not enter the soil and pollute the environment. To reduce obstacles in making the base layer, such as limited use of land with exclusive value, other alternatives are needed that have economic value and are able to utilize existing waste. One solution that can be offered is the use of sawdust modified with natrium bentonite. Sawdust functions as a powerful adsorbent for heavy metal contaminants. **Aim.** This research focuses on the potential of a mixture of sawdust and natrium bentonite in reducing heavy metals in the form of kadmium (Cd). Apart from that, this research also aims to analyze the properties of sawdust waste and natrium bentonite on the permeability value of the base layer. **Method.** The method used in this research is the experimental method carried out in the Soil Mechanics Laboratory of the Civil Engineering Department, the Water Quality Laboratory, and the Waste Laboratory of the Environmental Engineering Department. The variations in sawdust addition tested in this study were 2%, 5%, 8%, 10%, 12%, and 15%. **Results.** Experimental results show that the addition of sawdust reduces the strength and bearing capacity of the soil as a base layer but within safe limits. The addition of sawdust can increase permeability from the original 6.51×10^{-9} cm/second to 1.15×10^{-8} cm/second with the addition of 15% sawdust. On the other hand, the addition of sawdust can increase the Cd reduction capacity with a percentage of up to 82.43% in a mixture of 85% natrium bentonite;15% sawdust. **Conclusion.** Based on the research results obtained, all variations of sawdust and natrium bentonite sample mixtures have potential as a base layer to retain leachate at final waste processing sites (TPA). However, additional materials are needed to support strengthening soil stability.

Keywords: Base Layer, Sawdust, Natrium Bentonite, Final Processing Sites, Permeability, Cd

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup/Batasan Masalah	4
1.6 Teori	5
BAB II METODE PENELITIAN	30
2.1 Diagram Alir Penelitian	30
2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian	32
2.3 Alat dan Bahan	32
2.4 Metode Pengumpulan Data	36
2.5 Standar Pengujian	37
2.6 Variasi Pengujian	38
2.7 Prosedur Pengujian Sampel	38
2.8 Analisa Data	43
BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN	48
3.1 Hasil Pengujian Karakteristik Serbuk Gergaji	48
3.2 Hasil Pengujian Karakteristik <i>Natrium Bentonite</i>	50
3.3 Karakteristik Hasil Pengujian Variasi campuran Serbuk Gergaji dan <i>Natrium Bentonite</i>	55
3.4 Pengujian Permeabilitas (<i>Falling Head Permeability</i>)	62
3.5 Hasil Pengujian Kemampuan Reduksi kandungan Logam Berat Kadmium (Cd) Campuran Serbuk Gergaji dan <i>Natrium Bentonite</i>	65
3.6 Potensi Campuran Serbuk Gergaji dan <i>Natrium Bentonite</i> Sebagai Lapisan Dasar TPA	73
BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN	78
4.1 Kesimpulan	78
4.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN	83

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. Linier pengendap bahan geosintetis	6
2. Lapisan penutup controlled landfill dan sanitary landfill	7
3. Skema pembentukan landfill	8
4. Pemasangan linier geosintetis	9
5. Diagram alir penelitian	31
6. Lokasi pengambilan serbuk gergaji.....	32
7. Alat pengujian kadar air	33
8. Alat pengujian berat jenis.....	33
9. Alat pengujian batas-batas Atterberg.....	33
10. Alat pengujian analisa saringan	34
11. Alat pengujian analisa hidrometer.....	34
12. Alat pengujian kompaksi	34
13. Alat pengujian permeabilitas <i>falling head</i>	35
14. Sampel serbuk gergaji	35
15. Sampel natrium bentonite	36
16. Sampel larutan induk kadmium (Cd).....	36
17. Reaktor uji reduksi pencemar Kadmium (Cd)	42
18. Grafik distribusi ukuran material sampel serbuk gergaji.....	49
19. Grafik distribusi ukuran material sampel serbuk gergaji.....	52
20. Grafik batas cair bentonite	52
21. Pengklasifikasian tanah berdasarkan USCS.....	54
22. Grafik hubungan kadar air dengan berat isi kering natrium bentonite	55
23. Rekapitulasi berat jenis campuran natrium bentonite dan serbuk gergaji	56
24. Grafik kompaksi variasi 98% bentonite : 2% serbuk gergaji.....	57
25. Grafik kompaksi variasi 95% bentonite : 5% serbuk gergaji.....	58
26. Grafik kompaksi variasi 92% bentonite : 8% serbuk gergaji.....	58
27. Grafik kompaksi variasi 90% bentonite : 10% serbuk gergaji.....	59
28. Grafik kompaksi variasi 88% bentonite : 12% serbuk gergaji.....	59
29. Grafik kompaksi variasi 85% bentonite : 15% serbuk gergaji.....	60
30. Grafik berat isi kering optimum campuran benda uji	61
31. Grafik kadar air campuran benda uji	62
32. Grafik koefisien permeabilitas	64
33. Hasil pengujian penurunan kadar kadmium	67
34. Hubungan konsentrasi penambahan adsorben terhadap hasil reduksi kadar kadmium	68
35. Kurva hasil uji linieritas standar kadmium	70

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Komposisi umum serbuk gergaji	10
2. Efisiensi removal logam berat limbah serbuk gergaji	10
3. Kandungan unsur kimia yang terkandung pada bentonite	11
4. Kandungan kimia natrium bentonite CV Anugrah Mineral Industri.....	12
5. Kandungan unsur kimia yang terkandung pada air lindi	13
6. Persyaratan minimum berat contoh tanah dan ketelitian timbangan.....	14
7. Klasifikasi jenis tanah berdasarkan berat jenis	15
8. Hubungan indeks plastis dengan tingkat plastisitas dan jenis	20
9. Rentang nilai koefisien permeabilitas.....	21
10. Penelitian terdahulu	23
11. Standar pengujian sifat fisis tanah	37
12. Standar pengujian sifat mekanis tanah	38
13. Variasi pengujian sampel.....	38
14. Hasil pengujian sifat fisik serbuk gergaji	48
15. Kandungan kimia serbuk gergaji.....	50
16. Hasil pengujian sifat fisik natrium bentonite	51
17. Rekapitulasi pengujian berat jenis variasi campuran sampel.....	56
18. Variasi campuran pengujian kompaksi	57
19. Berat isi kering dan kadar air variasi campuran sampel.....	60
20. Variasi campuran pengujian permeabilitas falling head	63
21. Hasil pengujian permeabilitas sampel uji	63
22. Variasi campuran pengujian reduksi kadmium.....	65
23. Hasil pengujian kadar kadmium	66
24. Hasil uji kemampuan campuran mereduksi kadmium.....	66
25. Kriteria penerimaan validasi.....	69
26. Hasil uji linieritas	69
27. Hasil uji riptabilitas unspike sample.....	71
28. Hasil uji riptabilitas spike sample.....	72
29. Data hasil uji akurasi.....	72
30. Deposit timbulan serbuk gergaji sebagai lapisan dasar TPA.....	77

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Hasil Perhitungan Permeabilitas Serbuk gergaji, Natrium Bentonite, dan Variasi Campuran Sampel	84
2. Hasil Perhitungan Reduksi Kadmium Pada Campuran Sampel (Natrium Bentonite dan Serbuk Gergaji).....	89
3. Dokumentasi kegiatan	93

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara berkembang dengan pertumbuhan penduduk yang signifikan, dalam arti semakin banyak masyarakat yang tidak terlepas dari lingkungan sebagai tempat tinggal. Pertumbuhan penduduk merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi jumlah penduduk, pembangunan perumahan berdasarkan pertumbuhan penduduk, dan adanya aktivitas manusia di lingkungan penduduk. Kurangnya peran serta lingkungan rumah tangga dalam pengelolaan sampah merupakan kendala terpenting. Salah satu permasalahan besar yang dialami oleh hampir setiap negara, Kota ataupun daerah adalah terkait masalah penanganan dan pengelolaan sampah yang seakan tidak pernah ada habisnya untuk dibahas dan diselesaikan. Dimana, timbulan sampah semakin hari terus menerus bertambah, untuk itu sampah menjadi persoalan yang sangat serius terutama bagi sektor lingkungan hidup. Sebab, penanganan masalah sampah berhubungan erat dengan masalah lingkungan hidup yang akan berdampak pada kondisi kesehatan dan kebersihan lingkungan. (Cahyani dkk., 2021).

Sampah merupakan fenomena yang tidak dapat dikesampingkan terutama di wilayah perkotaan. Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) adalah tempat untuk memproses dan mengembalikan sampah ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan. (Prasetya & Setyawan, 2022). Sistem pengelolaan di Indonesia menurut Kajian Kebijakan *Sanitary Landfill* Tahun 2013 menyatakan bahwa di Indonesia masih terdapat 99% menggunakan sistem *Open Dumping* dengan 70% yang di desain secara *Controlled landfill/ Sanitary landfill*. Sistem operasional di Indonesia pada tempat pembuangan akhir banyak yang direncanakan menggunakan sistem *Sanitary landfill*, namun pada praktiknya masih banyak pembuangan sampah terbuka (*Open Dumping*) karena masalah pembiayaan pengelolaan TPA pada penerapan *Sanitary Landfill* yang sebagian besar ditanggung oleh pemerintah daerah. (Hendrawan dkk., 2020).

Lindi merupakan hasil dari perkolasi air hujan melalui sampah. Air lindi mengandung logam berat yang sangat toksik bagi kesehatan seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) (Qadriyah dkk., 2019). Air hujan akan meresap disela-sela timbunan sampah dan membawa senyawa-senyawa organik dan anorganik termasuk logam berat dengan konsentrasi yang cukup tinggi dan berpotensi mencemari lingkungan (Budihardjo, 2017). Sehingga diperlukan pemasangan lapisan semi kedap (*liner*) di bagian bawah TPA untuk mencegah masuknya lindi ke tanah dan mencemari lingkungan sekitar TPA (Falamaki dkk., 2018). Lapisan kedap air TPA biasanya terdiri dari bahan-bahan yang memiliki permeabilitas rendah untuk meminimalkan adanya infiltrasi.

Berdasarkan PERMEN PU Tahun 2013 nilai permeabilitas untuk lapisan dasar yaitu tidak lebih besar dari 10^{-6} cm/s dan berdasarkan *Environmental Protection Agency* (EPA) nilai permeabilitas lapisan dasar berkisar 10^{-9} – 10^{-7} cm/detik. Salah satu contoh lapisan dasar yang biasa digunakan ialah tipe tanah liat (*clay*) dengan permeabilitas antara 10^{-11} – 10^{-8} cm/s.

Selain pengujian permeabilitas lapisan dasar juga diharapkan dapat mereduksi kandungan pencemar pada air lindi sehingga tidak mencemari air tanah, berdasarkan penelitian yang dilaksanakan oleh Qadriyah dkk. (2019), Kandungan kadmium dalam air lindi dapat meresap kedalam tanah mengikuti gerakan aliran tanah yang dipengaruhi oleh topografi tanah dan jenis tanah sehingga dapat masuk kedalam sumur gali. Namun karena mahalnya biaya pembuatan lapisan dasar, perlu adanya bahan alternatif karena harga yang tersedia di pasaran relatif mahal untuk menggantinya. Dalam penelitian ini bahan alternatif yang digunakan adalah serbuk gergaji dicampur dengan natrium bentonit sebagai bahan campuran tanah lapisan dasar TPA.

Salah satu jenis tanah liat yang sering digunakan sebagai liner TPA adalah bentonit. Bentonit memiliki nilai permeabilitas yang rendah sehingga cocok digunakan sebagai lapisan penahan lindi (Budihardjo, 2018). Bentonit akan mengembang apabila terkena air, namun akan menyusut apabila dalam kondisi kering. Walaupun bentonit memiliki nilai permeabilitas yang rendah, stabilitas gesernya tidak begitu kuat sehingga berpotensi mengalami keretakan. Kondisi kembang-susut ini akan mempengaruhi kemampuan lapisan bentonit sebagai penahan lindi (Tripathy dalam Budihardjo, 2017). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Huang dkk. (2021), kriteria umum penambahan bentonite pada campuran industri semen mengakibatkan nilai permeabilitas yang optimal yaitu 10^{-7} cm/s.

Adapun alternatif material untuk mengurangi pengembangan bentonit adalah dengan mencampur bentonit dengan serbuk gergaji. Adapun hal yang mendasari pemilihan material serbuk gergaji yaitu bahan yang mudah didapat, murah, tahan terhadap air, higroskopis (mampu menyerap air), antibakteri (mampu menyerap bau), dan ramah lingkungan. Serbuk gergaji dapat meningkatkan kuat geser, menurunkan batas cair, batas plastis dan mengurangi indeks pengembangan bebas bentonit sehingga lapisan penutup harian TPA dapat optimal dalam penyerapan lindi (Budihardjo, 2017). Serbuk gergaji sendiri mudah didapatkan karena merupakan limbah hasil penggergajian kayu di setiap meubel. Salah satu industri kayu terbesar yang ada di Makassar yaitu PT Somel Makassar. Berdasarkan observasi langsung yang dilakukan oleh penulis, PT Somel Makassar memiliki berbagai macam produk kayu, seperti kayu gergajian, kayu lapis, dan papan MDF. Perusahaan ini memiliki kapasitas produksi kayu sebesar 200.000 m³/tahun, Hal ini akan berbanding lurus dengan limbah serbuk gergaji yang dihasilkan yaitu berkisar 20.000 m³/tahun.

Upaya peningkatan stabilitas tanah dasar kedap air penahan lindi TPA adalah melalui penambahan serbuk gergaji yang memiliki kuat geser yang tinggi. Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi

penambahan serbuk gergaji dan bentonite sebagai alternatif lapisan dasar yang memenuhi persyaratan lapisan dasar, mengetahui pengaruh penambahan serbuk gergaji terhadap nilai permeabilitas bahan campuran tersebut. serta kemampuan yang dihasilkan dari pencampuran serbuk gergaji dan natrium bentonit dalam menurunkan kandungan kontaminan logam berat air lindi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Apa saja karakteristik fisik dan mekanis limbah serbuk gergaji dan natrium bentonite yang berperan sebagai alternatif campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)?
2. Bagaimana pengaruh variasi campuran limbah serbuk gergaji dan natrium bentonite terhadap nilai permeabilitas yang memengaruhi kinerja lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)?
3. Bagaimana efektivitas variasi campuran limbah serbuk gergaji dan natrium bentonit terhadap efisiensi reduksi logam berat seperti kadmium (Cd) pada lindi tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)?
4. Bagaimana efektivitas variasi campuran limbah serbuk gergaji dan natrium bentonite sebagai alternatif lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis karakteristik fisik dan mekanis limbah serbuk gergaji dan natrium bentonite yang berperan sebagai alternatif campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).
2. Menganalisis pengaruh variasi campuran limbah serbuk gergaji dan natrium bentonite terhadap nilai permeabilitas yang memengaruhi kinerja lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).
3. Menganalisis efektivitas variasi campuran limbah serbuk gergaji dan natrium bentonit terhadap efisiensi reduksi logam berat seperti kadmium (Cd) pada lindi tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).
4. Mengevaluasi efektivitas variasi campuran limbah serbuk gergaji dan natrium bentonite sebagai lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini yaitu :

1. Bagi mahasiswa, hasil penelitian ini berguna untuk menambah wawasan dan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya dalam menciptakan inovasi terkait

potensi dan pemanfaatan limbah yang dapat digunakan sebagai alternatif lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).

2. Bagi masyarakat dan pemerintah, hasil penelitian ini dapat menjadi panduan/*guidance* mengenai pemanfaatan limbah sebagai alternatif lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA) untuk diaplikasikan di TPA setempat.
3. Bagi bidang keilmuan, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan nilai tambah terkait inovasi pemanfaatan limbah sebagai pengembangan ilmu dibandingkan dengan penelitian ilmiah terdahulu lainnya terutama yang berkaitan dengan pemanfaatan limbah sebagai lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).

1.5 Ruang Lingkup/Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut :

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini, yaitu :
 - a. Serbuk gergaji (serbuk kayu) yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah hasil penggergajian kayu balok dari PT. Somel Makassar, Kota Makassar, Sulawesi Selatan.
 - b. *Natrium Bentonite* yang digunakan pada penelitian ini diambil dari CV. Anugrah Mineral Industri, Kota Bandung, Jawa Barat.
 - c. Air lindi yang digunakan merupakan air lindi rekayasa dalam hal ini larutan kadmium (Cd) yang dibuat di Laboratorium kualitas air, Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Hasanuddin.
2. Material campuran yang digunakan pada penelitian ini adalah serbuk gergaji yang dicampur dengan *Natrium Bentonite* yang akan diuji di Laboratorium Mekanika Tanah, Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
3. Pengujian permeabilitas akan dilakukan pada sampel yang telah dicampur dengan beberapa komposisi dan di uji menggunakan air suling berdasarkan standar pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.
4. Pengujian kemampuan reduksi zat pencemar pada air lindi pada penelitian ini difokuskan pada logam berat seperti kadmium (Cd) agar dapat diketahui kemampuannya terhadap satu atau lebih jenis pencemar.
5. Penelitian ini akan meneliti sifat fisis dan mekanik sampel, diantaranya:
 - a. Pengujian berat jenis dan kadar air
 - b. Pengujian analisa saringan dan hidrometer
 - c. Pengujian atterberg
 - d. Pengujian kompaksi
 - e. Pengujian permeabilitas
 - f. Pengujian penyerapan zat pencemar kadmium (Cd)

1.6 Teori

1.6.1 Tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)

Sesuai dengan UU No. 18 tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah, Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA) adalah tempat untuk memproses dan membuang sampah dengan benar ke lingkungan dengan cara yang aman bagi manusia dan lingkungan. Adapun pengertian Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA) berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga, Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA) adalah tempat untuk menyimpan sampah yang tidak dapat didaur ulang atau dimanfaatkan kembali.

Tempat Pemrosesan Akhir Sampah merupakan lokasi terakhir untuk mengelola sampah sebelum dibuang ke lingkungan. Penyingkiran limbah ke dalam tanah (*land disposal*) merupakan cara yang paling sering dijumpai dalam pengelolaan limbah. Cara penyingkiran limbah ke dalam tanah dengan pengurugan atau penimbunan dikenal sebagai *landfilling*. Di negara berkembang, sampah umumnya ditampung pada lokasi pembuangan dengan menggunakan sistem *Sanitary Landfill*. *Sanitary Landfill* adalah sistem pengelolaan sampah yang karena aplikasinya memperhatikan aspek sanitasi lingkungan (Damanhuri & Padi, 2018). Berdasarkan SNI 03-3241-1994, *Controlled Landfill* merupakan sistem pengelolaan sampah dengan cara dipadatkan dan ditutup dengan tanah penutup sekurang-kurangnya setiap tujuh hari. Metode ini merupakan metode yang bersifat antara, sebelum mampu menerapkan metode *sanitary landfill*. Saat ini, sebagian besar TPA di Indonesia masih dioperasikan dengan sistem *open dumping* (sistem terbuka). Dalam sistem *open dumping* sampah dibuang begitu saja tanpa ada pengolahan yang berkelanjutan. Akibatnya adalah terjadi pencemaran air tanah dan udara di sekitar TPA (Ulhasanah dkk., 2023).

Berdasarkan Peraturan Menteri LHK No. 12 Tahun 2012 tentang Pedoman Teknis Pengelolaan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA) di Indonesia diklasifikasikan menjadi 3 jenis, yaitu :

1. *Open Dumping* (Sistem Terbuka)

Merupakan metode pembuangan sampah yang paling sederhana dan tidak memerlukan proses pengolahan. Sampah dibuang begitu saja di suatu tempat tanpa ada sistem pengelolaan yang memadai. Penerapan metode ini tidak memiliki sistem pengelolaan yang baik dan berpotensi mencemari lingkungan.

2. *Controlled Landfill* (Lahan Urug Terkendali)

Metode ini memiliki sistem pengelolaan yang lebih baik daripada *Open Dumping*, tetapi tidak sebaik *Sanitary Landfill*. *Controlled Landfill* merupakan proses pengelolaan sampah yang mencakup perataan dan pemadatan sampah yang masuk untuk mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi pembuangan sampah secara keseluruhan. metode pengelolaan sampah ini berfungsi sebagai langkah perantara antara teknik pembuangan terbuka tradisional menjadi metode TPA sanitasi yang lebih canggih.

3. *Sanitary Landfill* (Lahan Urug saniter)

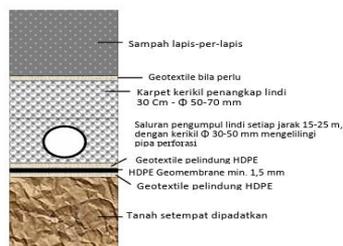
Merupakan sistem pengelolaan sampah dengan sarana pengurugan sampah ke lingkungan yang disiapkan dan dioperasikan secara sistematis, dengan penyebaran dan pemadatan sampah pada area pengurugan, serta penutupan sampah setiap hari. *Sanitary landfill* dirancang untuk memenuhi peraturan dan standar lingkungan yang ketat untuk memastikan pembuangan bahan limbah yang aman sekaligus meminimalkan dampak buruk terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat.

1.6.2 Lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)

Berdasarkan PP No. 81 Tahun 2012 tentang pengelolaan sampah rumah tangga dan sampah sejenis rumah tangga, TPA dengan sistem lahan urug saniter harus memiliki sarana pengurugan sampah ke lingkungan yang disiapkan dan dioperasikan secara sistematis, dengan penyebaran dan pemadatan sampah pada area pengurugan, serta penutupan sampah setiap hari. Tanah penutup yang baik dapat mencegah atau meminimasi air yang masuk kedalam lahan urug, terutama berasal dari air hujan. Menurut Damanhuri & Padi (2018), lapisan dasar sebuah lahan urug terdiri dari 3 komponen utama, yaitu :

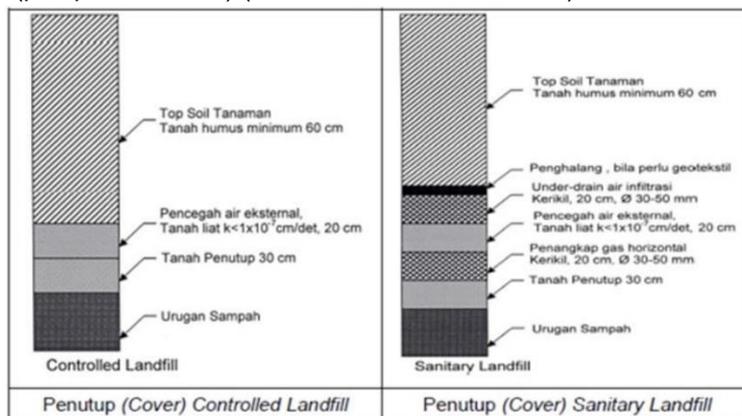
1. Lapisan kedap, yaitu lapisan terbawah yang menahan resapan lindi ke air tanah, dapat berasal dari bahan geosintetis atau alami.
2. Lapisan media drainase, yaitu lapisan yang berfungsi sebagai wadah untuk mengalirkan lindi ke pipa saluran pengumpul lindi.
3. Lapisan media pelindung, yaitu lapisan yang berfungsi untuk melindungi lapisan kedap dari gangguan lainnya.

Lapisan dasar TPA (Tempat Pemrosesan Akhir) adalah lapisan paling bawah dalam konstruksi TPA yang dibuat untuk mencegah air lindi meresap ke dalam tanah. Lapisan dasar ini juga membantu mencegah emisi gas metana yang berasal dari pembusukan sampah. Selain itu, fungsi dari lapisan dasar memberikan kestabilan kepada TPA dan membantu mencegah longsor (Isni dkk., 2020). Dalam perencanaan lapisan liner, material yang digunakan harus kedap air sehingga lindi terhambat meresap kedalam tanah dan tidak mencemari air tanah. Material ini dapat berupa tanah lempung yang dipadatkan atau geomembran setebal 1,5-2 mm. Pada dasar TPA, saluran pipa pengumpul lindi (Leachate) harus memiliki kemiringan minimal 2% ke arah penampungan lindi dan saluran pengumpul. (Winardi dkk., 2022).



Gambar 1. Linier pengendap bahan geosintetis
Sumber : Damanhuri & Padi, (2018)

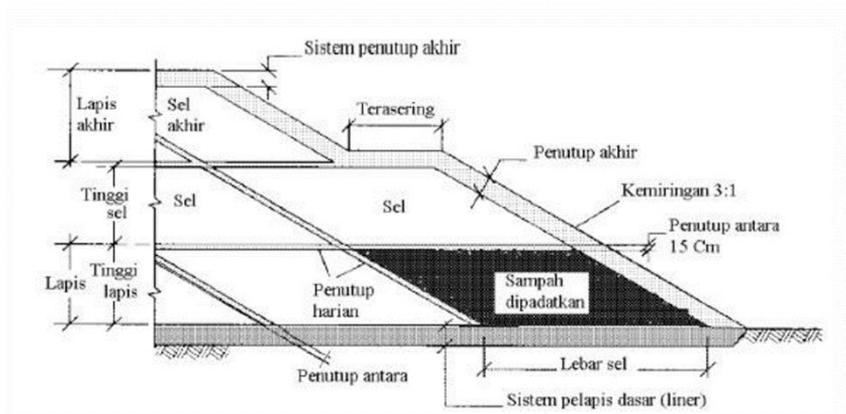
Kelulusan minimal dari campuran tanah tersebut diharapkan mempunyai nilai maksimum 1×10^{-7} cm/det sehingga dibutuhkan waktu yang relatif lama bagi lindi tersebut untuk mencapai air tanah. Pengendap yang banyak diterapkan adalah menggunakan geosintesis, yaitu geomembrane. Bahan sintesis yang digunakan adalah HDPE. Penggunaan pelapis ini membutuhkan pelindung geotekstil, agar geomembrane tersebut tidak rusak (Diamanis dkk., 2022). Dari susunan bahan pelapis yang biasa diterapkan, maka dikenal sistem pelapis dasar ganda (*double liner*) untuk limbah berbahaya, pelapis dasar tunggal (*single liner*) untuk limbah industri dan sampah kota, dan pelapis liat (*clay liner*) untuk sampah kota. Sistem tersebut merupakan cara pengendapan dasar yang biasa digunakan di Amerika Serikat. Lapisan ke dua dari pelapis ganda untuk limbah B3 digunakan untuk pendeteksi kebocoran. Di Indonesia, sistem pelapis LU limbah B3 dibagi menjadi LU kategori I (pelapis dasar ganda), LU kategori II (pelapis dasar tunggal) dan LU kategori III (pelapis dasar liat) (Damanhuri & Padmi, 2018).



Gambar 2. Lapisan penutup *controlled landfill* dan *sanitary landfill*

Sumber : Damanhuri & Padmi, (2018)

Sebagian besar TPA di Indonesia masih dioperasikan dengan sistem *open dumping* (sistem terbuka). Hal ini tidak sesuai dengan peraturan yang berlaku seperti SNI 03-3241-1994 tentang Tata Cara Pemilihan Lokasi TPA yang merekomendasikan sistem persampahan *Controlled Landfill* dan *Sanitary Landfill*. *Controlled landfill* dan *sanitary landfill* memiliki tujuan yang sama untuk pengelolaan sampah yang terkendali dan berwawasan lingkungan. Hanya saja, terdapat perbedaan yang signifikan terkait filter lapisan tanah yang dimiliki oleh keduanya. *Controlled landfill* pada umumnya tergolong kedalam pelapis dasar tunggal, sedangkan *sanitary landfill* tergolong pelapis dasar tunggal. Pembentukan dasar TPA harus dilakukan secara bertahap sesuai dengan urutan zona/blok dengan urutan pertama sedekat mungkin ke kolam pengolahan lindi.



Gambar 3. Skema pembentukan landfill
Sumber : Wahyu (2014)

Menurut Damanhuri & Padmi (2018), Terdapat 3 jenis pilihan lapisan kedap yang biasa digunakan pada sebuah TPA, antara lain :

1. Pelapis dasar alami (tanah liat)

Pelapis kedap alamiah yang biasa digunakan adalah tanah liat (*clay*), Tanah ini mempunyai tekstur yang sangat halus dan dapat merupakan campuran *silt* dan pasir. Sifat fisika dan kimianya sangat bervariasi. Dalam keadaan kering, tanah liat bersifat keras, dan dapat menahan beban yang berat. Bila terdapat air, tanah ini akan menyerap air, mengembang dan menjadi sangat lembut/lunak dan licin, permeabilitasnya menjadi lebih rendah. Namun pada saat kering akan mudah retak dan volumenya akan mengecil, sehingga bila terpapar matahari tanpa ada sampah di atasnya, lapisan ini akan menjadi rusak. Kriteria pemilihan tanah liat yang utama adalah didasarkan atas permeabilitas dalam kondisi lapangan.

Sebuah tanah liat yang dapat mencapai permeabilitas sampai 1×10^{-7} cm/det bila dipadatkan pada 90-95 % densitas kering Proctor dapat digunakan sebagai liner. Tanah liat dengan *liquid limit* (LL) yang tinggi cenderung menimbulkan *crack* (kering), sedang tanah dengan *plasticity index* (PI) rendah juga tidak bekerja baik. Sistem liner alamiah ini perlu menjadi pertimbangan utama sebelum memilih alternatif liner yang lain. Salah satu jenis tanah yang baik sebagai liner adalah *bentonite* yang dianggap mempunyai sifat-sifat yang baik sebagai campuran linear. Jenis tanah ini mempunyai daya sorpsi terhadap logam berat yang besar, serta dapat menyimpan cairan sehingga sistem liner menjadi *impermeable* (kedap).

2. Pelapis dasar geosintetis

Pelapis dasar ini disebut juga *Flexible Membrane Liner* (FML). Lapisan ini direkomendasikan untuk lahan urug pengelolaan limbah B3 dan sejenisnya. Adapun Susunan jenis geosintetis yang biasa digunakan sebagai pelapis dasar, yaitu :

- Geotekstil sebagai filter: merupakan jenis geosintetis yang dibuat agar permeabel, dengan sifat-sifat utama sebagai filtrasi yaitu menyaring materi tersuspensi dari lindi dan memungkinkan aliran cairan melalui lapisan ini;

- Geonet sebagai sarana drainase: merupakan geosintetis pengganti kerikil yang berfungsi untuk mengumpulkan dan mengalirkan air menuju sistem pipa pengumpul
- Geomembran dan geokomposit sebagai lapisan pengedap: merupakan pelapis kedap, keduanya memiliki fungsi yang sama yaitu mencegah kebocoran cairan dan gas, namun memiliki perbedaan dalam hal komposisi dan karakteristik. Lapisan ini terbuat dari bahan polimer biasanya dari bahan *high-density polyethylene* (HDPE) yang tahan terhadap reaksi kimia yang dijumpai pada limbah B3. Lapisan ini membutuhkan pelindung (biasanya geotekstil pelindung) agar tidak rusak karena adanya batu atau komponen sampah yang dapat merobeknya.



Gambar 4. Pemasangan linier geosintetis
Sumber: Damanhuri & Padmi, (2018)

3. Pelapis dasar campuran (*admixed*)

Merupakan sistem pelapis tercampur (*admixed*) yang dibentuk langsung di lapangan telah banyak digunakan, seperti beton aspal, semen tanah dan aspal tanah. Beton aspal merupakan campuran panas antara aspal dengan agregat kualitas baik, yang dipadatkan secara merata, seperti halnya beton aspal pada jalan raya, namun dengan porsi mineral pengisi dan semen aspal yang lebih banyak. Pelapis ini juga cocok digunakan sebagai lapisan dasar lahan urug namun harus menyesuaikan dengan komposisi campuran yang ada (Damanhuri & Padmi, 2018).

1.6.3 Serbuk gergaji (serbuk kayu)

Serbuk gergaji merupakan bahan yang berfungsi sebagai adsorben untuk menghilangkan logam berat dari air limbah karena memiliki banyak manfaat. Serbuk gergaji banyak didapatkan dari limbah hasil penggergajian kayu dan dijual dengan harga yang sangat murah. Selain itu, serbuk gergaji bersifat *biodegradable*, artinya pembuangannya tidak boleh membahayakan lingkungan atau elemen apa pun di dalamnya. Pada sifat fisik serbuk gergaji, serbuk gergaji berukuran bubuk berwarna coklat muda. Sifat dari serbuk gergaji juga bergantung pada komposisi kimianya. Kandungan kimia utama serbuk gergaji adalah hemiselulosa berkisar antara 15% - 35%, selulosa 35% - 60% dan lignin 15% - 30%. (Meez dkk., 2021).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Meez dkk. (2021), perkiraan umum komposisi kimia serbuk gergaji dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Komposisi umum serbuk gergaji

Komposisi	Persentase (%)
Abu	1,0 – 1,8
Protein Mentah	0,9 – 1,2
Serat deterjen asam	26,4 – 34,4
Serat kasar	62,6 – 68,4
Bahan Kering	95,0 – 99,1

Sumber : Meez dkk., 2021

Tabel 1 menunjukkan perkiraan umum komposisi serbuk gergaji. Serbuk gergaji terutama mengandung selulosa dan lignin yang terdapat dalam serat deterjen asam yang merupakan bagian dari serbuk gergaji, dan juga mengandung beberapa gugus hidroksil, seperti tanin. Unsur-unsur ini berperan penting dalam menarik kation melalui proses pertukaran ion logam berat. Selain itu, penggunaan serbuk gergaji dapat mengurangi besarnya limbah pabrik penggergajian kayu dan membantu mengatasi masalah pembuangan limbah serta meningkatkan kualitas air dengan menggunakan serbuk gergaji sebagai bahan adsorben. Meskipun serbuk gergaji memiliki sifat kimia yang baik untuk menghilangkan timbal, metode perbaikan bahan perlu dipelajari untuk meningkatkan efisiensi penghilangan timbal ataupun logam berat lainnya (Praipipat dkk., 2023).

Tabel 2. Efisiensi removal logam berat limbah serbuk gergaji

Bahan penyerap	Logam berat	Dosis	Waktu Kontak	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Konsentrasi (mg L^{-1})	Removal (%)
Serbuk Gergaji	Timbal (Pb^{2+})	0,1 gr	24 jam	25	6	10	99 %
	Tembaga (Cu^{2+})	0,1 gr	24 jam	25	6	10	
	Seng (Zn^{2+})	0,1 gr	24 jam	25	7.5	10	
	Kadmium (Cd^{2+})	0,3 gr L^{-1}	2 jam	25	6	130	

Sumber : Praipipat dkk., 2023

Serbuk gergaji pada umumnya memiliki karakteristik fisik dan kimia sesuai dengan jenis kayunya. Selain itu, ukuran partikel serbuk gergaji juga mempengaruhi banyak sifat-sifatnya dan dapat menunjukkan kualitas bahan serta kinerjanya. Baik untuk stabilitas suspensi, reaktivitas, penampilan, viskositas, aliran, kepadatan pengepakan, tekstur dan rasa atau banyak karakteristik lainnya, ukuran partikel suatu bahan merupakan komponen yang sangat penting dalam memahami kinerja suatu produk. Luas permukaan spesifik juga bertambah jika partikel mempunyai pori-pori. Luas permukaan spesifik penting untuk proses industri dan reaksi kimia. Bahkan dengan bahan yang sama yang memiliki berat dan volume yang sama, aktivitas permukaan dan volume adsorpsi berubah sesuai dengan luas

permukaan spesifik. Sangat penting untuk mengukur luas permukaan spesifik untuk mengevaluasi aktivitas dan kapasitas adsorpsi bahan (Meez dkk., 2021).

Dari karakteristik fisik dan kimia serbuk gergaji, penggunaan serbuk gergaji ini diharapkan dapat meningkatkan potensi pencampuran dengan natrium bentonite sebagai lapisan dasar TPA dikarenakan sifat dari serbuk gergaji ini memiliki kemampuan sebagai adsorben logam berat yang baik, menurunkan batas cair, batas plastis dan mengurangi indeks pengembangan bebas bentonite sehingga campuran bentonite dan serbuk gergaji tidak retak (Budihardjo, 2017).

1.6.4 Natrium bentonite

Bentonite adalah sejenis batuan sedimen yang kaya akan *montmorillonit*, yang memiliki beberapa sifat yang sangat baik seperti penyerapan air yang baik, pembengkakan, dan memiliki struktur kristalnya yang unik. *Bentonite* juga memiliki kinerja yang baik dalam menyerap kontaminan kationik melalui pertukaran kation. Penambahan bentonite meningkatkan konten padat, meningkatkan viskositas dan stabilitas, serta mengatasi porositas rendah. Mineral *bentonite* pada umumnya memiliki diameter kurang dari 2 μm yang mencakup dari bermacam-macam *mineral phyllosilicate* yang menyimpan *silica*, *aluminium oksida* dan *hidroksida* yang bisa mengikat air (Lestari dkk., 2022).

Struktur kristal bentonit terdiri dari 2 lapisan silika tetrahedral mengapit satu lapisan alumina oktahedral yang saling berikatan secara lemah dan memungkinkan terjadinya interkalasi air pada lapisan interlayer sehingga terjadinya *swelling* (Lestari dkk., 2022). Terdapat dua jenis *bentonite* di alam diantaranya *natrium bentonite* dan *kalsium bentonite*. *Natrium bentonite* memiliki lebih banyak ion Na^+ daripada ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} (Shieddieque dkk., 2022).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Shieddieque dkk. (2022), kandungan unsur kimia yang terkandung pada *bentonite* dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Kandungan unsur kimia yang terkandung pada *bentonite*

Senyawa	Na-Bentonit (%)	Ca-Bentonit (%)
Al_2O_2	19,8	17,33
Fe_2O_3	3,9	5,30
CaO	0,6	3,68
MgO	1,3	3,30
Na_2O	2,2	0,30
K_2O	0,4	0,33
SiO_2	61,3 – 61,4	62,12
H_2O	7,2	7,22

Sumber : Shieddieque dkk., 2022

Berdasarkan hasil penelitian Karapinar (2009) dalam Hussain (2020) tentang metode adsorpsi kadmium dan tembaga, Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi untuk kadmium sebesar 87,0% dan tembaga sebesar 84,5% pada *natrium bentonite*. Selain itu, *bentonite* juga dapat mereduksi dan menghilangkan timbal (Pb^{+2}). Hal-hal yang dapat memengaruhi reduksi logam berat

pada *bentonite* antara lain : Waktu kontak, pengaruh pH, konsentrasi awal logam, dan massa adsorben dalam proses adsorpsi (Hussain & Khaleefa Ali, 2020).

Tanah liat jenis *natrium bentonite* memiliki sifat sangat keras dalam keadaan kering dan mudah dibentuk pada kadar air sedang, sedangkan pada kadar air lebih tinggi tanah liatnya bersifat lengket (kohesif) dan sangat lunak. Pemanfaatan *bentonite* diharapkan dapat meningkatkan potensi pencampuran dengan serbuk gergaji sebagai lapisan dasar TPA karena sifat tanah lempung ini yaitu mempunyai permeabilitas rendah, kenaikan air kapiler tinggi, bersifat kohesif, mempunyai laju pengembangan yang tinggi dan proses konsolidasi yang stabil.

Pada penelitian ini, *bentonite* yang digunakan adalah *natrium bentonite* yang berasal dari CV Anugrah Mineral Industri dengan karakteristik kimia sebagai berikut.

Tabel 4. Kandungan kimia natrium bentonite CV Anugrah Mineral Industri

Senyawa	Unit	Index
SiO ₂	%	58,90
Al ₂ O ₂	%	17,35
Fe ₂ O ₃	%	6,37
CaO	%	1,69
MgO	%	0,98
Na ₂ O	%	1,74
K ₂ O	%	0,51
Pb	%	<0,01
As	%	<0,01

1.6.5 Air lindi

Lindi (*Leachate*) adalah cairan yang merembes melalui tumpukan sampah dengan membawa materi terlarut atau tersuspensi terutama hasil proses dekomposisi materi sampah atau dapat pula didefinisikan sebagai limbah cair yang timbul akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah, melarutkan dan membilas materi terlarut, termasuk juga materi organik hasil proses dekomposisi biologis. Secara umum leachate mengandung zat organik dan anorganik dengan konsentrasi tinggi, terutama pada timbunan sampah yang masih baru. Air lindi juga mengandung logam berat bersifat toksik yang dapat menyebabkan gangguan pada kesehatan dan kerusakan pada lingkungan. Air lindi yang masuk ke dalam tanah berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan di sekitar TPA (Marta & Afdal, 2019).

Pada umumnya, kuantitas dan kualitas bahan pencemar di dalam lindi bervariasi dan berfluktuasi. Adapun kuantitas yang dihasilkan lindi selain dari hasil proses dekomposisi sampah, lindi juga berasal dari sumber eksternal seperti saluran drainase, air hujan, air permukaan, air tanah dan mata air bawah tanah. Pencemaran air oleh lindi disebabkan karena tidak adanya lapisan dasar dan tanah penutup yang akan menyebabkan lindi semakin banyak terbentuk sehingga pencemaran air dan tanah di sekitarnya tidak dapat dihindarkan. Selain itu, air lindi juga dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti aplikasi tanah penutup, kemiringan permukaan, kondisi iklim,

dan komposisi sampah, ketebalan timbunan sampah, aliran permukaan, kelembaban dan cara operasional TPA (Heny dkk., 2022).

Menurut Damanhuri & Padmi (2018) kualitas lindi akan tergantung dari beberapa hal, seperti variasi dan proporsi komponen sampah yang ditimbun, curah hujan dan musim, umur timbunan, pola operasional, waktu dilakukannya sampling. Karakter kualitas lindi antara lain :

1. lindi dari lahan urug yang muda cenderung bersifat asam, berkandungan organik yang tinggi, sehingga mempunyai ion-ion terlarut yang juga tinggi serta rasio BOD/COD relatif tinggi.
2. lindi dari lahan urug yang sudah tua sudah mendekati netral, mempunyai kandungan karbon organik dan mineral yang relatif menurun serta rasio BOD/COD relatif menurun.

Secara umum, air lindi mengandung komponen kimia seperti hidrokarbon, kadmium, klorida, fosfat, dan logam berat lainnya. Berikut lebih jelas komponen-komponen kimia yang terkandung dalam air lindi dapat dilihat dalam tabel 5.

Tabel 5. Kandungan unsur kimia yang terkandung pada air lindi

No.	Komponen	Kadar (ppm)	
		Rendah	Tinggi
1.	pH	6,0	6,5
2.	Kesadahan (CaCO ₃)	890	7600
3.	Alkalinitas (CaCO ₃)	730	9500
4.	Ca	240	2330
5.	Mg	64	410
6.	Na	85	1700
7.	Fe Total	8,7	220
8.	Fe	6,5	87
9.	Cl	96	2350
10.	Sulfat	84	730
11.	Phospate	0,3	29
12.	Organik N	2,4	465
13.	NH ₄ -N	0,22	480
14.	BOD	2170	3030
15.	COD	150	10000
16.	Pb	8	1020
17.	Cd	0.05	140

Sumber : Qasim, 1994

Menurut Qasim (1994), komposisi sampah, ketebalan timbunan sampah, laju air, jenis operasi TPA (aerobik, semi aerobik, atau anaerobik), umur TPA, dan interaksi leachate dengan TPA adalah semua faktor yang mempengaruhi kualitas leachate. Sedangkan menurut Damanhuri (1995), selain faktor-faktor yang disebutkan di atas, faktor-faktor kondisi saat sampling juga diperhitungkan.

1.6.6 Pengujian sifat fisis

Uji sifat fisis tanah terdiri dari kadar air, berat jenis, analisa saringan dan hydrometer, serta batas-batas atterberg. Tujuannya adalah untuk mengetahui indeks properties

tanah/sampel. Indeks properties tanah digunakan dalam menentukan klasifikasi dan identifikasi tanah yang kemudian digunakan untuk menentukan jenis bahan stabilisasi yang sesuai dan menentukan perkiraan awal jumlah kadar bahan stabilisasi yang perlu ditambahkan ke dalam tanah yang distabilisasi.

Kadar Air. Kadar air adalah pengujian yang mengukur jumlah air dalam sampel tanah atau tanah. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan berat air sampel dengan berat kering tanah. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kadar air optimum yang dapat diserap oleh tanah yang disebut kapasitas lapang. Kapasitas lapang yaitu kemampuan tanah untuk menahan air setelah dilakukan pemberian air sampai berada pada titik jenuh. Dimana nilai kapasitas lapang sangat beragam tergantung jenis tanah yang diuji. Kadar air pada kapasitas lapang adalah jumlah air yang ada dalam tanah setelah kelebihan air gravitasi keluar. Ini biasanya ditunjukkan dalam bentuk persentase berat (Khoirunnisa, 2021).

Adapun perhitungan untuk mengetahui kadar air suatu sampel tanah antara lain:

- Perhitungan berat air :

$$W_w = W_2 - W_3 \quad (1)$$

- Perhitungan berat tanah kering:

$$W_s = W_3 - W_1 \quad (2)$$

- Perhitungan kadar air:

$$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan :

W_w = Berat air (gram)

W_s = Berat tanah kering (gram)

W_1 = Berat tinbox kosong (gram)

W_2 = Berat tinbox + tanah basah (gram)

W_3 = Berat tinbox + tanah kering (gram)

w = Kadar air (%)

ASTM D2216 menetapkan berat minimum contoh tanah yang harus digunakan dalam pengujian untuk mendapatkan kadar air yang lebih tepat, dan berat minimum tersebut tergantung pada ukuran butiran, seperti yang ditunjukkan dalam tabel berikut:

Tabel 6. Persyaratan minimum berat contoh tanah dan ketelitian timbangan

Maksimum ukuran partikel (100% lolos)	Metode A pembacaan kadar air $\pm 1\%$		Metode B Pembacaan kadar air $\pm 1\%$	
	Berat sampel	Ketelitian timbangan	Berat sampel	Ketelitian timbangan
Ukuran saringan				
75 mm (3 in)	5 kg	10	50 kg	10
37,5 mm ($1\frac{1}{2}$ in)	1 kg	10	10 kg	10
19 mm ($\frac{3}{4}$ in)	250 gr	1	2,5 kg	1
9,5 mm ($\frac{3}{8}$ in)	50 gr	0,1	500 gr	0,1
4,75 mm (No. 4)	20 gr	0,1	100 gr	0,1
2 mm (No.10)	20 gr	0,1	20 gr	0,01

Sumber : ASTM D2216-19, *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*

Berat jenis. Secara umum definisi dari berat jenis (*specific gravity*), adalah rasio (perbandingan) antara berat per volume bahan di udara dengan berat per volume air suling, pada suhu tertentu. Berat jenis merupakan salah satu sifat fisis tanah yang sangat penting dan mendasar yang dapat digunakan untuk menilai mutu suatu tanah. Semakin tinggi nilai berat jenis yang dihasilkan maka akan semakin tinggi pula nilai kekuatan dari tanah tersebut. Adapun perhitungan untuk mengetahui berat jenis tanah yaitu :

$$G_s = \frac{W_s}{(W_1 + W_s) - W_2} \quad (4)$$

Keterangan :

G_s = Berat jenis tanah

W_s = Berat tanah kering (gram)

W_1 = Berat piknometer dan air suling (gram)

W_2 = Berat piknometer, tanah, dan air suling (gram)

Berat jenis tanah (G_s) merupakan parameter yang penting untuk perhitungan hubungan berat dan volume. Pada umumnya, berat jenis tanah dapat digunakan untuk membuat klasifikasi jenis tanah seperti pasir, kerikil, lanau anorganik, lempung organik, dan lain sebagainya. Untuk memperoleh nilai berat jenis yang lebih akurat, diperlukan pengujian paling minimal 2 kali dimana nilai hasil akhir setiap pengujian tidak boleh mempunyai hasil yang berbeda lebih dari 2 – 3 %. Adapun pengklasifikasian jenis tanah berdasarkan berat jenis dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Klasifikasi jenis tanah berdasarkan berat jenis

Macam Tanah	Berat Jenis
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: Hary Christady Hardiyatmo, Mekanika Tanah 1, Edisi Ketiga. 2002

Analisa saringan dan hidrometer. Pengujian analisa saringan dan analisa hidrometer pada umumnya dilakukan untuk melihat komposisi dari butiran suatu tanah. Pengujian analisis saringan bertujuan untuk menentukan persentase ukuran butir tanah pada benda uji yang tertahan saringan no. 200 dan untuk menentukan pembagian butiran (gradasi) agregat halus dan agregat kasar. Adapun pengujian analisis hidrometer adalah untuk menentukan distribusi ukuran butir-butir untuk tanah yang tidak mengandung butir tanah tertahan oleh saringan no. 200 (Horman dkk., 2023).

Pada pengujian analisa saringan ada beberapa analisa perhitungan untuk menentukan pengkategorian jenis tanah. Antara lain :

- Perhitungan persen tertahan pada saringan ke- n :

$$R_n = \frac{W_n}{W} \times 100\% \quad (5)$$

- Perhitungan persen kumulatif tertahan pada saringan ke- n :

$$\sum R_n = \sum_{i=2}^{i=n} R_n \quad (6)$$

- Perhitungan persen kumulatif lolos saringan ke- n :

$$\%finer = 100 - \sum_{i=2}^{i=n} R_n \quad (7)$$

- Perhitungan nilai koefisien keseragaman :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (8)$$

- Perhitungan nilai koefisien gradasi :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (9)$$

Keterangan :

W_n = Berat tertahan pada saringan ke- n

W = Berat total tanah

R_n = Persen tertahan pada saringan ke- n

$\sum R_n$ = Persen kumulatif tertahan pada saringan ke- n

$\%finer$ = Persen kumulatif lolos pada saringan ke- n

C_u = Koefisien keseragaman

C_c = Koefisien gradasi

D_{10} = Diameter butiran yang sesuai dengan 10% lolos

D_{30} = Diameter butiran yang sesuai dengan 30% lolos

D_{60} = Diameter butiran yang sesuai dengan 60% lolos

Ukuran partikel tanah sangat beragam dan bervariasi, tergantung pada ukuran partikel paling dominan. Tanah biasanya diklasifikasikan sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), atau lempung (*clay*). Pada umumnya digunakan saringan No.200 untuk membedakan tanah berbutir kasar dan halus. Tanah berbutir kasar adalah butiran yang tertahan saringan No.200 dan memiliki kandungan fraksi lebih dari 50%, sedangkan tanah berbutir halus adalah butiran yang lolos saringan No.200 dan memiliki kandungan fraksi lebih dari 50% (Nurmaidah dkk., 2022).

Pengujian analisis hidrometer merupakan suatu metode untuk menentukan distribusi ukuran butir-butir untuk tanah yang tidak mengandung butir tanah tertahan oleh saringan no. 200. Analisis hidrometer juga merupakan metode yang digunakan untuk menentukan distribusi ukuran butir tanah berdasarkan prinsip sedimentasi. Sederhananya, pengujian ini dapat menentukan klasifikasi jenis tanah tergantung berapa banyak butir tanah dengan ukuran tertentu yang terkandung dalam sampel tanah. Uji hidrometer didasarkan pada Hukum Stokes, yang menjelaskan bagaimana kecepatan penurunan suatu benda dalam fluida dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, dan berat jenis benda tersebut. Dalam uji hidrometer, tanah yang didispersikan dalam air akan mengendap dengan kecepatan yang berbeda-beda, tergantung pada ukuran butirnya. Pengujian ini berfungsi sebagai pengklasifikasian tanah, perencanaan irigasi, desain fondasi, analisis erosi, dan penelitian tanah (Horman dkk., 2023). Adapun perhitungan analisa hidrometer pada sampel tanah yaitu :

- Perhitungan koreksi temperatur (untuk nilai T antara 15°C sampai 28°C) :

$$F_T = - 4,85 + 0,25 T \quad (10)$$

- Perhitungan koreksi pembacaan hidrometer untuk perhitungan persen lolos :

$$R_{cp} = R + F_T - F_2 \quad (11)$$

- Perhitungan persen lolos :

$$\%finer = \frac{a R_{cp}}{W_s} \quad (12)$$

- Perhitungan koreksi terhadap berat jenis :

$$a = \frac{G_s (1,65)}{(G_s - 1) 2,65} \quad (13)$$

- Perhitungan koreksi pembacaan untuk penentuan panjang efektif :

$$R_{cL} = R + F_m \quad (14)$$

- Perhitungan diameter butiran :

$$D = A \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (15)$$

Keterangan :

R = Pembacaan hidrometer

R_{cp} = Koreksi pembacaan hidrometer perhitungan % lolos

F_T = Koreksi temperatur

F_s = Koreksi nol

F_m = Koreksi meniskus

a = Koreksi terhadap berat jenis

W_s = Berat tanah kering pada pemeriksaan hidrometer

G_s = Berat jenis tanah

R_{cL} = Koreksi pembacaan hidrometer untuk panjang efektif

L = Panjang efektif

A = Faktor A, fungsi G_s bergantung pada temperatur sampel

D = Diameter butiran

Hasil analisis hidrometer biasanya disajikan dalam bentuk grafik distribusi kumulatif butir tanah (kurva gradasi). Grafik ini menunjukkan persentase butir tanah yang lebih besar dari diameter tertentu. Berdasarkan kurva gradasi, tekstur tanah dapat diklasifikasikan menggunakan sistem klasifikasi tekstur tanah, seperti sistem USCS, dan lain sebagainya. Analisa hidrometer dapat memberikan hasil persen lolos dari tanah yang berdiameter lebih kecil dari 0,002 mm. Telah disepakati bahwa tanah berdiameter lebih kecil dari 0,002 mm termasuk kedalam fraksi lempung. Keberadaan lempung dalam tanah berhubungan dengan plastisitas tanah itu sendiri (Horman dkk., 2023).

Batas konsistensi (*atterberg limit*). Batas Atterberg merupakan serangkaian pengujian untuk mengklasifikasikan tanah lempung dan lanau berdasarkan perilaku tanah pada kadar air yang berbeda. Pengujian ini membantu untuk memahami sifat fisik dan mekanik tanah, sehingga mereka dapat memprediksi bagaimana tanah tersebut akan berperilaku dalam berbagai kondisi. Batas konsistensi juga merupakan pengujian kadar air optimum yang dipergunakan sebagai dasar pengolahan tanah untuk mengurangi resiko kerusakan struktur dan pemadatan sekecil mungkin, terdiri dari batas cair, batas plastis, batas susut, dan indeks plastisitas (Zulfa & Bowo, 2023).

a. Batas cair (*Liquid limit*)

Kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan plastis, juga dikenal sebagai batas atas atau daerah plastis, disebut batas cair. Istilah "batas cair" juga mengacu pada kadar air minimum di mana tanah masih dapat mengalir di bawah beratnya. Alat Cassagrande digunakan untuk mengetahuinya. Tanah yang telah dicampur dengan air dimasukkan ke dalam mangkuk Cassagrande, dan di dalamnya dibuat alur dengan menggunakan alat spatel, yang juga dikenal sebagai alat membuat alur. Tampak bahwa bentuk alur sebelum dan sesudah percobaan berbeda. Setelah engkol dibuka, mangkuk dinaikkan dan dijatuhkan ke dasar. Jumlah pukulan dihitung sampai kedua tepi alur berhimpit. Percobaan ini biasanya dilakukan terhadap beberapa contoh tanah dengan kadar air yang berbeda, dan banyaknya pukulan dihitung untuk setiap kadar air (Fahriana dkk., 2019). Adapun perhitungan penentuan batas cair pada sampel tanah :

- Perhitungan batas cair (rumus empiris) :

$$LL = w_N (\%) \left(\frac{N}{25}\right)^{0,121} \quad (16)$$

Keterangan :

LL = Batas cair tanah

N = Jumlah ketukan

w_N = Kadar air pada N tumbukan

b. Batas plastis (*Plastic limit*)

Batas plastis (*plastic limit*) adalah kadar air pada batas bawah daerah plastis atau kadar air minimum dimana tanah dapat digulung-gulung sampai diameter 3,1 mm (1/8 inchi). Kadar air ini ditentukan dengan menggiling tanah pada plat kaca hingga diameter dari batang yang dibentuk mencapai 1/8 inch. Bilamana tanah mulai pecah pada saat diameternya 1/8 inchi, maka kadar air tanah itu adalah batas plastis. Batas cair dan batas plastis tidak secara langsung memberi angka-angka yang dapat dipakai dalam perhitungan desain atau desain. Hasil dari percobaan *Atterberg* limit ini adalah gambaran secara garis besar akan sifat-sifat tanah yang bersangkutan. Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat-sifat teknis yang buruk, yaitu kekuatannya rendah, kompresibilitasnya tinggi dan sulit dalam pematatannya. Untuk macam-macam tanah tertentu *Atterberg* limit dapat dihubungkan secara empiris dengan sifat-sifat lainnya, misalnya dengan kekuatan geser atau *compression index* dan sebagainya (Fahriana dkk., 2019). Adapun perhitungan penentuan batas plastis pada sampel tanah :

- Perhitungan batas plastis :

$$PL = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% \quad (17)$$

Keterangan :

PL = Batas plastis tanah

W_1 = Berat tinbox kosong (gram)

W_2 = Berat tinbox + tanah basah (gram)

W_3 = Berat tinbox + tanah kering (gram)

c. Batas susut (*Shrinkage limit*)

Batas susut (*Shrinkage limit*) adalah titik terendah kadar air tanah yang dapat dicapai ketika tanah dikeringkan dengan udara pada tekanan uap jenuh. Pada titik ini, semua pori tanah telah terisi udara, dan tidak ada lagi air yang tersisa dalam bentuk film di permukaan butiran tanah. Batas susut menunjukkan kadar air atau batas dimana tanah dalam keadaan jenuh yang sudah kering tidak akan menyusut lagi, meskipun dikeringkan terus atau batas dimana sesudah kehilangan kadar air selanjutnya tidak menyebabkan penyusutan volume tanah. Percobaan batas susut (*shrinkage limit*) ini bertujuan untuk mengetahui batas menyusut tanah (Fahriana dkk., 2019). Adapun perhitungan penentuan batas susut pada sampel tanah :

- Perhitungan perubahan kadar air sebelum pengurangan volume :

$$\Delta w_1 (\%) = \frac{(V_i - V_f) \rho_w}{\text{massa tanah kering}} = \frac{(W_4 - W_5)}{13,6 (W_3 - W_1)} \times 100 \quad (18)$$

- Perhitungan batas susut :

$$SL = w_i - \frac{(W_4 - W_5)}{13,6 (W_3 - W_1)} \times 100 \quad (19)$$

Keterangan :

w_i = Kadar air (%)

W_1 = Berat pagoda yang telah diisi vaseline (gram)

W_2 = Berat pagoda + tanah basah (gram)

W_3 = Berat pagoda + tanah kering (gram)

W_4 = Berat air raksa yang memenuhi pagoda (gram)

Δw_1 = Perubahan w_i sebelum pengurangan volume (%)

ρ_w = Berat jenis air = 1

SL = Batas susut (gram/cm³)

d. Indeks Plastisitas

Selisih antara batas cair dan batas plastis ialah daerah dimana tanah tersebut dalam keadaan plastis (*plasticity index*). Indeks Plastisitas merupakan pengujian kemampuan tanah untuk diubah bentuknya tanpa retak dan dinyatakan dalam persen (%). Indeks plastisitas dihitung berdasarkan perbedaan antara Batas Cair (*liquid limit*) dan Batas Plastis (*plastic limit*) tanah. Semakin tinggi nilai indeks plastisitas, semakin mudah tanah dibentuk, namun juga semakin mudah retak dan menyusut ketika kering. Tanah dengan Indeks plastisitas tinggi umumnya memiliki tekstur lempung dan banyak mengandung bahan organik (Zulfa & Bowo, 2023).

Indeks plastisitas (*plasticity index*) didefinisikan sebagai perbedaan antara batas cair dan batas plastis, dan dapat dihitung menggunakan perhitungan indeks plastisitas (Fahriana dkk., 2019).

$$PI = LL - PL \quad (20)$$

Keterangan :

PI = Indeks plastisitas

LL = Batas Cair

PL = Batas plastis

Nilai Indeks plastisitas dipengaruhi oleh berbagai faktor, beberapa diantaranya yaitu: tekstur tanah, kandungan bahan organik, dan kadar air dalam tanah (Fahriana dkk., 2019). Atterberg memberikan batasan untuk indeks plastisitas, sifat tanah, dan kohesi, seperti yang dapat dilihat pada tabel 8 dibawah ini

Tabel 8. Hubungan indeks plastis dengan tingkat plastisitas dan jenis

PI	Tingkat Plastisitas	Jenis Tanah	Kohesi
0	Tidak plastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7 - 17	Plastisitas sedang	Lanau-Lempung	Kohesif
>17	Plastisitas Tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber : Fahriana dkk., 2019

1.6.7 Uji sifat mekanis

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai kompaksi (pemadatan tanah) dan permeabilitas sampel tanah. Adapun uji mekanis yang dilakukan adalah uji pemadatan (*Standar Proctor Test*) dan pengujian permeabilitas.

Kompaksi. Uji pemadatan tanah atau uji kompaksi merupakan metode pengujian untuk menentukan kadar air yang optimum dimana suatu jenis tanah tertentu akan menjadi paling padat dan mencapai kepadatan maksimum. Tujuan utama dari kompaksi adalah untuk meningkatkan kepadatan tanah dan mengurangi ruang pori di dalamnya. Adapun faktor -faktor yang dapat mempengaruhi kompaksi antara lain jenis tanah, kadar air, ketebalan lapisan tanah, dan jumlah lintasan pemat. Kompaksi tanah merupakan proses penting dalam konstruksi untuk meningkatkan daya dukung tanah dan stabilitas struktur (Mahardika & Pratama, 2020).

Untuk menentukan karakteristik kepadatan tanah, dapat dilakukan dengan menggunakan pengujian *standar Proctor*. Pengujian *standar proctor* dilakukan pada jenis tanah berbutir halus dan memiliki daya rekat antar partikel (kohesif) yang cukup tinggi, *interlock* antar partikel sangat bagus, sehingga sudah cukup apabila menggunakan pemadatan *standard*. Sedangkan pemadatan *Modified* diperuntukkan untuk tanah berbutir kasar dan memiliki rongga antar partikel yang cukup besar. Proses kompaksi pada umumnya melibatkan penggunaan alat bergetar, seperti mesin penggetar atau *wacker plate*, untuk menghasilkan getaran dan guncangan yang mengkompaksi material tersebut. Dalam beberapa tahapan, prosedur ini meliputi persiapan sampel tanah, penentuan kadar air, pemadatan sampel dengan variasi kadar air menggunakan mold standar, dan analisis hasil uji untuk menentukan kadar air optimal bagi pencapaian kepadatan yang diinginkan (Ghufran & Kawanda, 2021).

Pengujian ini melibatkan pemadatan sampel tanah dalam cetakan standar menggunakan sejumlah pukulan palu tertentu, dengan setiap lapisan menerima 25 pukulan. Tanah terlebih dahulu dikeringkan di udara kemudian dipisahkan menjadi beberapa sampel dengan kadar air yang bervariasi. Kadar air setiap sampel disesuaikan dengan menambahkan air secara bertahap, biasanya antara 3% hingga 5% tergantung pada jenis tanah. Tanah kemudian dipadatkan dalam tiga lapisan di

dalam cetakan, dengan masing-masing lapisan menerima standar 25 pukulan palu. Setelah pengujian, massa jenis kering dan kadar air masing-masing sampel ditentukan, dan dibuat kurva untuk menunjukkan hubungan antara berat isi kering dan kadar air. Dari kurva tersebut dapat ditentukan kadar air optimum untuk mencapai kepadatan kering maksimum. Pengujian kepadatan tanah memerlukan perhatian pada kadar air yang digunakan. Pada kadar air yang rendah, berat volume kering tanah dapat berkurang, sedangkan pada kadar air yang tinggi, tanah cenderung menjadi kaku dan sulit dipadatkan. Namun, jika udara yang terperangkap dalam tanah dapat dikeluarkan selama proses pemadatan, tanah akan berada dalam keadaan jenuh dan berat volume keringnya akan meningkat (Melinda dkk., 2024).

Permeabilitas. Permeabilitas tanah didefinisikan sebagai sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air atau minyak mengalir lewat rongga pori tanah. Adapun faktor yang mempengaruhi permeabilitas tanah antara jenis tanah, ukuran dan bentuk butiran, rapat massa, dan bentuk geometri rongga pori memengaruhi tahanan aliran di dalam tanah. Aliran di dalam tanah dapat berupa aliran laminar atau turbulen. Selain itu, temperatur juga penting dalam mengukur tahanan aliran, termasuk tegangan permukaan dan kekentalan. Pada dasarnya, setiap jenis tanah memiliki rongga pori. Namun, permeabilitas setiap jenis tanah berbeda – beda. kata "permeabel" biasanya digunakan untuk merujuk pada tanah yang secara efektif dapat memungkinkan air mengalir melaluinya. Sedangkan tanah yang memiliki kemampuan terbatas dalam meloloskan air disebut impermeabel (Mulyono dkk., 2019).

Koefisien rembesan atau koefisien permeabilitas (k) adalah suatu ukuran yang menggambarkan kecepatan air mengalir melalui tanah. Koefisien rembesan tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kekentalan cairan, distribusi ukuran pori, distribusi ukuran butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah, dan derajat kejenuhan tanah. Koefisien rembesan untuk tanah yang tidak jenuh air biasanya rendah, tetapi dapat meningkat dengan meningkatnya derajat kejenuhan tanah. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi sifat rembesan tanah lempung adalah konsentrasi ion dan ketebalan lapisan air yang menempel pada butiran lempung. Harga koefisien rembesan (k) untuk tiap-tiap tanah adalah berbeda-beda (Khoiroh dkk., 2020). Data koefisien permeabilitas hasil pengujian akan dianalisis kesesuaian rentangnya terhadap rentang-rentang nilai yang telah didapatkan seperti diusulkan oleh beberapa peneliti seperti pada Tabel 9.

Tabel 9. Rentang nilai koefisien permeabilitas

Peneliti	Karakteristik	Nilai k (cm/dt)
Bowles (1991)	Lanau Kelempungan	$10^{-4} - 10^{-9}$
Das (1995)	Kerikil bersih	$> 10^{-1}$
	Pasir kasar	$10^{-1} - 10^{-3}$
	Pasir halus	$10^{-3} - 10^{-5}$
	Lanau berlempung	$10^{-4} - 10^{-6}$
	Lempung gemuk	$< 10^{-7}$

Sumber : Indrawan., 2007

Menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 3 Pada Lampiran 3 Persyaratan Teknis Penyediaan Pengoperasian Penutupan atau Rehabilitasi TPA tahun 2013, Koefisien permeabilitas TPA untuk lapisan dasar tidak lebih dari 10^{-6} hingga 10^{-7} cm/det. Sedangkan menurut *Environmental Protection Agency* (EPA) untuk semua tempat pembuangan limbah non B3 di bagian bawah dari lapisan dasar atau lapisan liner harus terdiri dari lapisan tanah yang tebal sebanyak 1 meter dengan permeabilitas yang sama atau kurang dari 1×10^{-9} cm/s. Pengujian permeabilitas sesuai standar ASTM D-2434-68, terdiri dari 2 pengujian yaitu *constant head permeameter* dan *falling head permeameter*. *Constant head permeameter* yaitu alat dengan tinggi tekanan air yang tetap, alat ini digunakan untuk jenis tanah yang relatif sangat mudah terlewati air. Sedangkan *falling head permeameter* yaitu alat dengan tinggi tekanan air berubah-ubah, alat ini digunakan pada jenis tanah yang cukup rapat seperti lempung, lumpur, dan sebagainya (Khoiroh dkk., 2020).

1. Metode *Constant Head*

Uji permeabilitas *constant head* adalah metode pengujian koefisien permeabilitas tanah yang melibatkan pengujian air yang mengalir melalui tanah dengan menggunakan alat permeameter dan mengukur kecepatan aliran air tersebut. Kecepatan aliran air ini digunakan untuk menghitung koefisien permeabilitas tanah. Metode ini cocok untuk jenis tanah granular seperti pasir, kerikil, atau beberapa campuran pasir dan lanau yang memiliki nilai permeabilitas yang tinggi. Adapun prinsip kerja dari metode *constant head* ini pengujian menggunakan air dialirkan ke atas kolom tanah dengan kecepatan konstan, menjaga ketinggian air (*head*) di atas permukaan tanah tetap konstan. Waktu yang dibutuhkan air untuk mengalir melalui kolom tanah diukur dan dicatat hasilnya.

2. Metode *Falling Head*

Metode *Falling Head* merupakan salah satu metode umum untuk mengukur permeabilitas tanah dengan jenis tanah seperti tanah lanau atau lempung. Metode ini menggunakan penurunan ketinggian air dalam tabung untuk mengukur waktu yang dibutuhkan air untuk mengalir melalui kolom tanah. Adapun prinsip dasar dari metode *falling head* ini pada umumnya hampir mirip dengan metode *constant head*, namun yang membedakan adalah pengujiannya dilakukan dengan tinggi tekanan air berubah-ubah.

1.6.8 Penurunan Kandungan Pencemar Kadmium (Cd)

Kuantitas lindi yang dihasilkan pada TPA tergantung pada jumlah masuknya air dari luar, terutama air hujan, Selain itu, kuantitas lindi juga dipengaruhi oleh aspek operasional yang diterapkan di TPA seperti aplikasi tanah penutup, kemiringan permukaan, kondisi iklim, dan sebagainya sehingga bervariasi dan fluktuatif. Air hujan yang sudah terkontaminasi sampah mengeluarkan zat yang terdekomposisi dan akan langsung terinfiltrasi ke tanah dan menuju aliran air tanah (Qadriyah dkk., 2019). Salah satu jenis logam berat yang banyak ditemukan dari hasil aktivitas manusia adalah kadmium (Cd). Untuk TPA baru (5 tahun) kandungan kadmium

dapat berkisar 0,2 – 0,3 mg/liter. Dan untuk TPA matang (> 10 tahun) berkisar 0,3 – 0,5 mg/liter (Dian Pratiwi dkk., 2018).

Kadmium merupakan cemaran logam berat yang dapat meresap kedalam tanah mengikuti gerakan aliran tanah yang dipengaruhi oleh topografi tanah dan jenis tanah sehingga dapat masuk kedalam sumur gali. Kadmium dapat masuk kedalam tubuh manusia melalui 3 cara yaitu gastrointestinal, inhalasi dan dermal. Penyerapan kadmium melalui gastrointestinal pada manusia sekitar 5% dari jumlah kadmium yang dicerna dan sebesar 95% diambil dari makanan dan minuman. Kadmium memiliki toksisitas yang tinggi pada manusia yang dapat menyebabkan gangguan saluran pencernaan sedangkan untuk paparan berulang dari kadmium dapat mengakibatkan gangguan fungsi ginjal. paparan kadmium lingkungan juga merupakan faktor yang signifikan terhadap perkembangan penyakit (Qadriyah dkk., 2019).

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI No. P.59/MENLHK/Setjen/Kum.1/7/2016 nilai kadar maksimal kadmium dalam baku mutu lindi adalah 0,1 mg/liter. Sehingga, perlu dilakukan penelitian sederhana menggunakan reaktor uji campuran sampel serbuk gergaji dan *natrium bentonite* terhadap kemampuan reduksi kandungan kadmium pada air lindi dalam hal ini pencemar Cd.

1.6.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dan perbandingan dengan penelitian yang akan dilakukan. Berikut penelitian-penelitian terdahulu yang relevan mengenai pengurangan kandungan pencemar air lindi dalam hal ini kadmium dengan menggunakan campuran serbuk gergaji dan *natrium bentonite*, disajikan dalam tabel 10 di bawah.

Tabel 10. Penelitian terdahulu

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Metode
Mochamad Arief Budiharjo (2017)	Kemampuan Tanah Liat Dengan Campuran Serbuk Gergaji Sebagai Penahan Lindi Di Tempat Pengolahan Akhir Sampah	Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi campuran tanah liat yang mempengaruhi karakteristik dari <i>bentonite</i> . Pengujian batas-batas <i>atterberg</i> seperti batas cair, batas plastis, pengembangan bebas dan permeabilitas dari bentonit dengan penambahan serbuk gergaji dilakukan untuk mengetahui pengaruh serbuk gergaji terhadap perilaku bentonit. Penambahan serbuk gergaji yang diuji pada studi ini adalah sebesar 2%, 3% dan	Eksperi mental

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Metode
		<p>5% dari total berat kering. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penambahan serbuk gergaji menurunkan batas cair, batas plastis dan pembengkakan bebas dari <i>bentonite</i>. Disisi lain, penambahan serbuk gergaji meningkatkan permeabilitas <i>bentonite</i> dari semula sebesar $1,24 \times 10^{-11}$ m/detik menjadi $3,98 \times 10^{-10}$ m/detik dengan penambahan serbuk gergaji sebesar 8%.</p>	
Mochamad Arief Budiharjo (2018)	<p>Peningkatan Stabilitas Lereng Lapisan Tanah Liat Penahan Lindi TPA dengan Penambahan Limbah Bangunan</p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kuat geser tanah liat <i>bentonite</i> yang digunakan sebagai lapisan penahan lindi TPA dapat ditingkatkan dengan penambahan limbah bangunan yang memiliki kuat geser tinggi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa Pada penambahan limbah bangunan sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% pada tegangan normal 50 kPa, diperoleh tegangan geser yang semakin meningkat seiring dengan adanya penambahan limbah bangunan. Peningkatan tegangan geser juga terjadi pada tegangan normal 100 kPa dan 200 kPa seiring dengan penambahan persentase limbah bangunan. Peningkatan konsentrasi limbah bangunan juga menyebabkan meningkatnya nilai koefisien permeabilitas, namun tidak secara signifikan. Nilai koefisien permeabilitas akibat penambahan limbah bangunan sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% adalah berturut-turut sebesar $1,27 \times 10^{-11}$ cm/s; $2,13 \times 10^{-11}$ cm/s; $6,82 \times 10^{-11}$ cm/s; dan $1,51 \times 10^{-11}$ cm/s. Penambahan</p>	Eksperi mental

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Metode
		limbah bangunan campuran masih memenuhi nilai permeabilitas lapisan <i>landfill</i> berdasarkan EPA, yaitu kurang dari atau sama dengan 10^{-7} cm/detik.	
Hamsyah, dan Jumardi Syafri (2020)	Pengaruh Penambahan Serbuk <i>Bentonite</i> Pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Beton	Tujuan penelitian ini untuk mengetahui menganalisa pengaruh penambahan serbuk bentonit pada campuran beton terhadap kuat tekan beton K 225, dan mengevaluasi perbandingan serbuk bentonit pada campuran beton terhadap kuat tekan beton K 225. hasil analisa penelitian dapat ditarik sebuah kesimpulan yaitu penambahan bentonit pada campuran beton akan meningkatkan kuat tekan beton. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada beton dengan kadar bentonit 10%, dengan hasil rata-rata sebesar 22,175 MPa. Sedangkan pada kadar bentonit 25 % dan 50 %, beton mulai mengalami penurunan kuat tekan sebesar 16,301 MPa dan 9,979 Mpa. Kuat tekan beton dengan kadar penambahan bentonit sebesar 10 %, 25 %, 50 % dengan rata-rata kuat tekan sebesar 22,175 Mpa, 16,301 Mpa dan 9,979 Mpa tidak mencapai spesifikasi standar mutu beton K 225 (22,5 Mpa).	Eksperi mental
Dita Indah Lestari dkk., (2011)	Modifikasi Tanah Dengan Campuran <i>Kaolinite</i> Dan <i>Bentonite</i> Dalam Mengurangi Nilai Permeabilitas (K)	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi campuran <i>kaolinite</i> dan <i>bentonite</i> dalam mengurangi nilai permeabilitas tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kadar <i>kaolinite</i> dan <i>bentonite</i> pada suatu tanah maka akan semakin kecil nilai permeabilitas yang	Eksperi mental

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Metode
		didapatkan, dalam arti air akan semakin sulit untuk melewati pori-pori yang terdapat didalam tanah tersebut.	
Reza Pahlevi Munirwan (2023)	Potensi Penambahan Pasir <i>Bentonite</i> Pada Tanah Lempung Untuk Stabilisasi Tanah	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi pemanfaatan teknik stabilisasi tanah. Peningkatan daya dukung tanah lempung dapat dicapai melalui penerapan teknik stabilisasi kimia seperti penggunaan pasir bentonit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Pengujian eksperimental modifikasi tambahan diterapkan pada pasir <i>bentonite</i> dengan konsentrasi 2%, 4%, dan 6%. Hasil penambahan pasir bentonit ke dalam tanah lempung dievaluasi berdasarkan nilai kepadatan kering maksimum (MDD) dan kadar air optimum (OMC). Secara umum, penambahan pasir bentonit meningkatkan nilai MDD tanah lempung dan juga membuat nilai OMC tanah lempung naik. Hal ini dikarenakan sifat bentonit yang dapat menarik air menyatu dengan partikel tanah.	Eksperi mental
Mahdi Keramatikeran dkk., (2017)	<i>An investigation into effect of sawdust treatment on permeability and compressibility of soil-bentonite slurry cut off wall</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan serbuk gergaji terhadap konduktivitas hidrolik dan kompresibilitas dinding cut-off slurry Soil-Bentonite (SB). Serangkaian uji konduktivitas hidrolik dan konsolidasi dilakukan pada timbunan SB yang diubah dengan kandungan serbuk gergaji 2%, 5% dan 10%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian serbuk gergaji menurunkan	Eksperi mental

Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Metode
		<p>konduktivitas hidrolik akhir (kf) pada kisaran $2,13 \times 10^{-10} \leq kf \leq 3,5 \times 10^{-10}$ m/s. Nilai konduktivitas hidraulik yang dihitung menggunakan teori konsolidasi (teori k) juga menunjukkan tren penurunan yang identik dalam kisaran $5,10 \times 10^{-11} \leq k_{teori} \leq 3,50 \times 10^{-10}$ m/s pada tekanan lapisan penutup efektif $24 \leq \sigma'_n \leq 1280$ kPa (σ'_n). Koefisien konsolidasi (cv) yang dihitung dengan menggunakan metode <i>Casagrande</i> dan <i>Taylor</i> menunjukkan nilai kisaran kesepakatan yang baik. Selain itu, indeks kompresi (Ci) dan indeks pembengkakan (Cs) yang dihitung menggunakan rasio rongga dan grafik tekanan lapisan penutup efektif ($e - \log \sigma'_n$) menunjukkan bahwa penggunaan serbuk gergaji lumayan berdampak signifikan terhadap penurunan timbunan SB.</p>	
<p>Mohammad Reza Sabour dkk., (2022)</p>	<p><i>The swelling performance of raw and modified bentonite of geosynthetic clay liner as the leachate barrier exposed to the synthetic E-waste leachate</i></p>	<p>Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja pembengkakan GCL mentah dan termodifikasi dengan polimer anionik hidrofilik yang disebut <i>Carboxy Methyl Cellulose</i> (CMC) dengan persentase berat 8%, 10%, dan 12% bentonite kering terhadap sintetik lindi logam berat yang mengandung tembaga dan seng, baik secara bersamaan maupun terpisah, hasil dari penelitian ini adalah indeks gelombang <i>bentonite</i>. <i>Bentonite</i> yang dimodifikasi menurun dengan peningkatan konsentrasi ion larutan. Hasil yang diperoleh dari pencampuran <i>bentonite</i> juga</p>	<p>Eksperi mental</p>

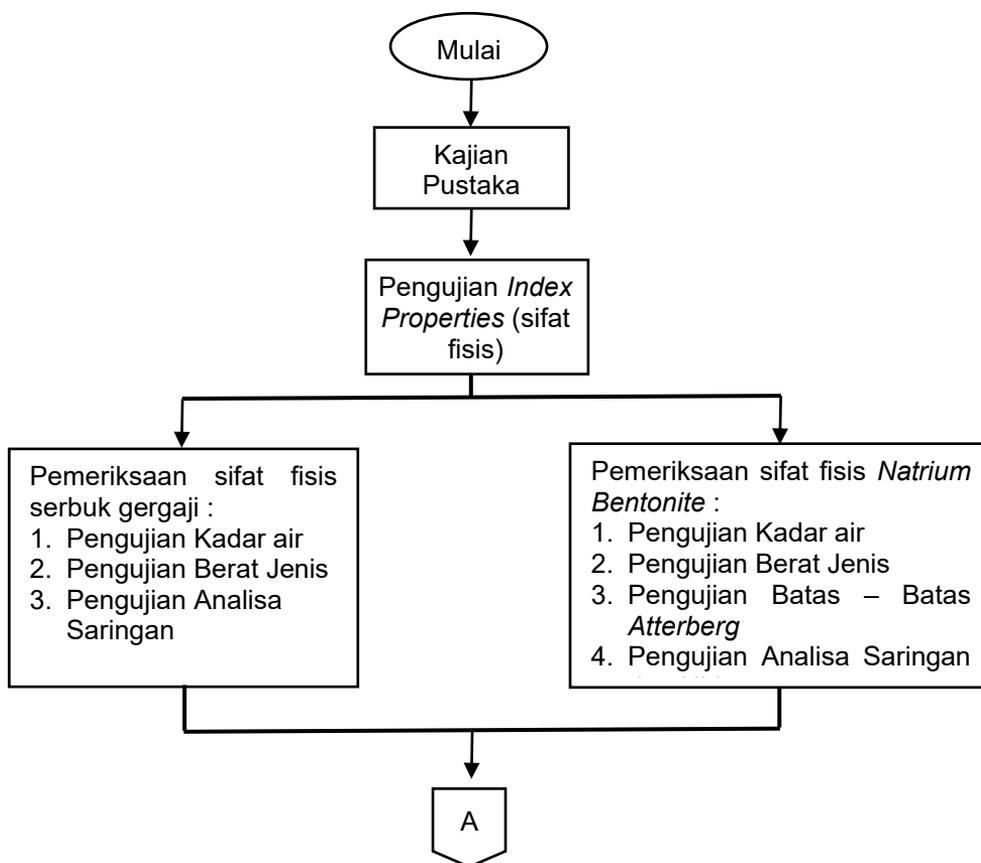
Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Metode
Kayode Adesina Adegoke dkk., (2022)	<i>Sawdust-biomass based materials for sequestration of organic and inorganic pollutants and potential for engineering application</i>	<p>mengurangi kadar logam berat seperti seng dan tembaga dalam sampah elektronik.</p> <p>Penelitian ini memaparkan lebih lanjut mengenai sumber, jenis, komposisi, fabrikasi dan konfigurasi adsorben serbuk gergaji. Kategori polutan yang dipertimbangkan dalam penelitian ini dikelompokkan menjadi bahan kimia pengganggu endokrin, pewarna, pestisida, herbisida dan bahan kimia pertanian, serta logam berat. Adapun hasil yang didapatkan dari penelitian ini yaitu kapasitas adsorpsi berbagai adsorben berbahan dasar serbuk gergaji berkisar antara 10 hingga 667,9 mg/g (untuk menghilangkan bahan kimia pengganggu endokrin dan kontaminan baru lainnya), 69,44 - 372 mg/g (untuk menghilangkan pestisida, herbisida, dan bahan kimia pertanian), 3,42 - 526,3 mg /g (untuk menghilangkan pewarna) dan 2,87 - 325 mg/g (untuk menghilangkan logam berat).</p>	Eksperi mental
Elie Meez dkk., (2021)	<i>Sawdust for the Removal of Heavy Metals from Water</i>	<p>Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi serbuk gergaji dalam mereduksi pencemar logam berat. Adapun hasil dari penelitian ini yaitu serbuk gergaji terbukti memiliki struktur yang baik dan cocok untuk proses pemurnian air. Parameter yang mempengaruhi mekanisme adsorpsi logam berat ke dalam serbuk gergaji telah dipelajari dan terbukti bahwa pH, waktu kontak dan beberapa parameter lainnya dapat</p>	Eksperi mental

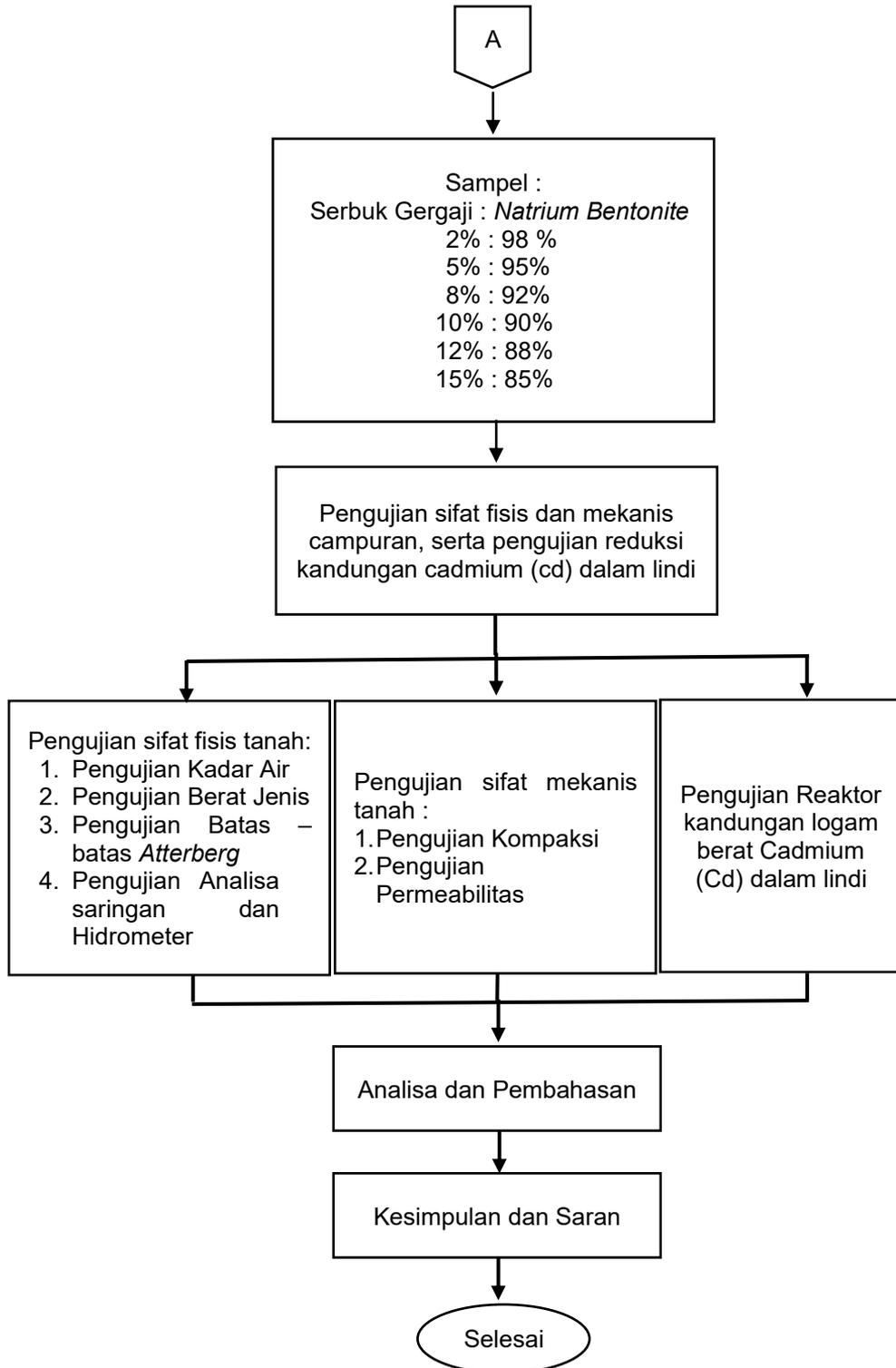
Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Metode
Apang Djafar Shieddieque dkk., (2022)	Pengaruh Variasi Campuran Bentonit Terhadap Karakteristik Pasir Cetak Untuk Proses <i>Sand Casting</i>	<p>memainkan peran utama dalam meningkatkan proses adsorpsi. Serbuk gergaji dapat mereduksi pencemar logam berat dengan baik salah satu contohnya tembaga (Cu) dan timbal (Pb).</p> <p>Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan potensi <i>natrium bentonite</i> dan <i>calcium bentonite</i> dalam meningkatkan stabilitas tanah. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah <i>natrium bentonite</i> lebih baik daripada <i>calcium bentonite</i>. Hal ini dikarenakan campuran <i>natrium bentonite</i> dapat meningkatkan kuat tekan tanah dan menurunkan permeabilitas tanah.</p>	Eksperi mental

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Diagram Alir Penelitian

Sebelum melakukan penelitian ini maka dibuat langkah-langkah pelaksanaan alur kegiatan penelitian agar dapat berjalan secara sistematis dan tepat sasaran tercapainya tujuan penelitian. Langkah awal yang perlu dilakukan adalah studi pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, rumusan masalah dan tujuan penelitian, kemudian dikaji dalam kajian Pustaka dan landasan teori. Langkah selanjutnya adalah melakukan penelitian berdasarkan metodologi yang telah dirancang, melakukan pengujian terhadap benda uji yang telah dibuat, dan menganalisis hasil yang diperoleh. Hasil dari penelitian ini kemudian dijadikan acuan untuk menarik kesimpulan. Lebih lengkapnya dapat dilihat pada gambar 5 sebagai berikut :





Gambar 5. Diagram alir penelitian

2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Lokasi pelaksanaan penelitian ini bertempat di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Adapun lokasi pengambilan sampel terdiri dari 3 tempat, yakni sesuai dengan sampel penelitian yang telah ditentukan.

1. Serbuk Gergaji

Lokasi pengambilan sampel serbuk gergaji yang digunakan dalam penelitian ini diambil di PT. Somel Kayu Makassar yang terletak di Jalan Rahmatullah, Kelurahan Tamangapa, Kecamatan Manggala, Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan, dengan koordinat titik 5.104953° , 119.293617°



Gambar 6. Lokasi pengambilan serbuk gergaji

2. *Natrium Bentonite*

Natrium Bentonite yang dijadikan sebagai sampel pada penelitian ini berasal dari CV. Anugrah Mineral Industri, Kabupaten Bandung, Jawa Barat.

3. Zat Pencemar Lindi

Zat pencemar lindi yang akan digunakan pada penelitian ini ialah logam berat Kadmium dengan konsentrasi 0,1 M yang menjadi lindi artifisial dan dibuat di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Hasanuddin.

2.3 Alat dan Bahan

2.3.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah peralatan yang ada di Laboratorium Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Berikut ini alat yang digunakan untuk menguji sifat fisis tanah dan pengujian sifat mekanis tanah

a. Pengujian Kadar Air

Pada pengujian kadar air, digunakan alat-alat seperti tinbox, label, cawan, dan timbangan digital dengan ketelitian 0,01 gr. Peralatan ini digunakan untuk mengetahui kadar air yang terkandung dalam masing-masing sampel dan penentuan berat kering dari sampel yang diuji. Berikut merupakan gambar alat dari pengujian kadar air.



Gambar 7. Alat pengujian kadar air

b. Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis dilakukan untuk mengetahui golongan jenis tanah dari sampel yang digunakan. Untuk mengukur berat jenis dengan akurat, tersedia berbagai alat yang dapat digunakan seperti piknometer dengan kapasitas 50 ml, kompor listrik, corong, aquades, termometer dan timbangan dengan ketelitian 0,01 gr. Berikut merupakan gambar alat pengujian berat jenis.



Gambar 8. Alat pengujian berat jenis

c. Pengujian Batas-batas *Atterberg*

Pada pengujian batas-batas *Atterberg*, pengujian ini terdiri dari batas cair, batas plastis, dan batas susut. Adapun alat – alat yang digunakan dari ketiga pengujian tersebut antara lain cawan porselen, spatula, alat *Casagrande*, plat kaca, saringan No. 40, tinbox, cawan gelas, kaca arloji, pagoda, dan timbangan dengan ketelitian 0,01 gr. Berikut merupakan gambar alat pengujian batas-batas *Atterberg*.



Gambar 9. Alat pengujian batas-batas *Atterberg*

d. Pengujian Analisa Saringan dan Hidrometer

Pada dasarnya, kedua metode pengujian ini menggunakan peralatan yang berbeda. Dimana metode pengujian analisa saringan menggunakan peralatan seperti saringan diameter No. 4, No. 10, No. 20, No. 40, No. 60, No. 100, No. 200, Pan, dan kuas untuk pemisahan fisik partikel. Sedangkan analisa hidrometer menggunakan peralatan seperti satu set alat hidrometer, silinder graduasi, pipet, pengaduk mekanik, dan gelas ukur untuk menentukan distribusi ukuran partikel tanah dengan prinsip pendekatan *Stokes*. Berikut merupakan gambar alat pengujian analisa saringan dan hidrometer.



Gambar 10. Alat pengujian analisa saringan



Gambar 11. Alat pengujian analisa hidrometer

e. Pengujian Kompaksi

Pengujian kompaksi dilakukan untuk menentukan kepadatan tanah dan tingkat kejenuhannya. Pada pengujian ini digunakan alat – alat seperti satu set alat kompaksi yang terdiri dari cetakan (*mold, base plat, collar*), palu kompaksi, talam, tinbox, pisau pemotong, *extruder*, saringan No. 40, timbangan analitik dengan ketelitian 0,01 gram dan timbangan analitik dengan ketelitian 1 gram. Berikut merupakan gambar alat pengujian kompaksi.



Gambar 12. Alat pengujian kompaksi

f. Pengujian Permeabilitas

Pada umumnya, pengujian ini terbagi atas dua yaitu *constant head* dan *falling head*. Pengujian ini menggunakan metode *falling head* dimana peralatan yang digunakan antara lain satu set alat permeabilitas *falling head*, gelas ukur, buret, termometer, timbangan dengan ketelitian 0,01 gram, plastisin, sendok, dan stopwatch. Berikut merupakan gambar alat pengujian permeabilitas metode *falling head*.



Gambar 13. Alat pengujian permeabilitas *falling head*

2.3.2 Bahan

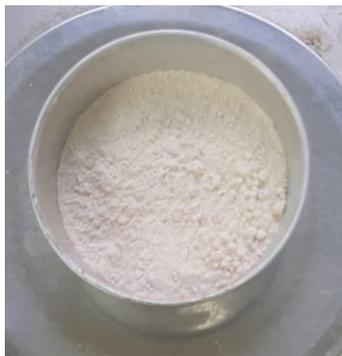
Penelitian ini akan menguji berbagai variasi campuran bahan dan limbah. Pengujian dilakukan dengan mengikuti standar yang diakui secara internasional seperti ASTM, dan SNI. Adapun beberapa material bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut :

- a. Serbuk gergaji (Kayu Kalimantan) yang digunakan dalam penelitian ini merupakan serbuk gergaji yang berasal dari PT. Somel Kayu Makassar yang terletak di Jalan Rahmatullah, Kelurahan Tamangapa, Kecamatan Manggala, Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan. Serbuk gergaji ini dilakukan pengujian fisik berupa pengujian kadar air dan berat jenis untuk mengetahui golongan jenisnya. Sebelum dilakukan penelitian, sampel serbuk gergaji dikeringkan menggunakan oven dengan suhu sekitar 105°C selama 24 jam. Setelah itu, dilakukan proses penyaringan menggunakan saringan No.40 sebelum dicampur dengan *Natrium Bentonite* dengan variasi tertentu. Berikut merupakan gambar sampel dari serbuk gergaji.



Gambar 14. Sampel serbuk gergaji

- b. *Natrium Bentonite* yang berasal dari CV. Anugrah Mineral Industri di Kabupaten Bandung, Jawa Barat, akan diuji sifat fisik dan mekanisnya. Pengujian ini dilakukan dengan cara memasukkan sampel *bentonite* ke dalam oven bersuhu $\pm 105^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam, sama seperti sampel serbuk gergaji. Selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap sifat-sifat bentonit, seperti kadar air, berat jenis, analisa saringan dan hidrometer, batas-batas *Atterberg*. Sebelum dicampur dengan sampel lain, bentonit disaring terlebih dahulu menggunakan saringan No. 40. Berikut merupakan gambar sampel dari serbuk *Natrium Bentonite*.



Gambar 15. Sampel *natrium bentonite*

- c. Lindi artifisial yang digunakan sebagai media untuk pengujian reaktor reduksi kandungan logam berat kadmium (Cd) pada lindi dibuat dengan konsentrasi 0,1 M.



Gambar 16. Sampel larutan induk kadmium (Cd)

2.4 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan pada bahan-bahan yang akan digunakan untuk pembuatan benda uji. Langkah pertama dalam penelitian ini adalah menentukan data primer dan data sekunder. Dimana, data primer yang ditentukan terdiri dari karakteristik fisik serbuk gergaji, karakteristik fisik dan mekanis *Natrium Bentonite*, dan kemampuan dari pencampuran serbuk gergaji dan *Natrium Bentonite* dalam

mereduksi kandungan logam berat kadmium dalam air lindi. Pemilihan bahan dalam penelitian ini sangat memperhatikan karakteristiknya secara visual maupun non visual. Adapun pengujian-pengujian karakteristik sifat fisis tanah yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengujian kadar air, berat jenis, analisa saringan dan hydrometer, pengujian batas-batas Atterberg. Selain pengujian karakteristik sifat fisis tanah, dilakukan pengujian sifat mekanis tanah yang meliputi pengujian pemadatan standar (*Standar Proctor*) dan pengujian permeabilitas (*Permeability Test*).

Adapun data sekunder yang diperoleh berasal dari penelitian-penelitian yang dilakukan sebelumnya dan berkaitan erat dengan penelitian ini. Penelitian-penelitian sebelumnya juga dapat dijadikan sebagai standar acuan untuk menentukan hasil optimal yang dapat diperoleh dari penelitian ini. Selain itu, terdapat tiga variabel yang digunakan pada penelitian ini yakni variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Dimana variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi pencampuran serbuk gergaji dan *Natrium Bentonite* sebanyak 6 variasi. Sedangkan variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai permeabilitas dan kemampuan reduksi logam berat berupa kadmium yang diuji dari tiap sampel pengujian. Adapun variabel kontrol dalam penelitian ini adalah variasi *natrium bentonite* 100% dan ketebalan 10 cm untuk semua variasi pada pengujian adsorpsi logam berat. Data karakteristik yang didapatkan dari setiap bahan merupakan variabel-variabel yang akan dianalisis sebagai bahan landasan untuk mengukur hasil penelitian berdasarkan data hasil pengujian. Kemudian, data hasil pengujian yang telah dianalisis akan dijadikan dasar dalam membuat kesimpulan.

2.5 Standar Pengujian

Pada standar pengujian yang dilakukan, Nilai-nilai karakteristik dasar material yang digunakan dalam penelitian ini diuji berdasarkan acuan pada standar-standar yang dikeluarkan oleh ASTM (*American Standar Testing Method*), Seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 11. Standar pengujian sifat fisis tanah

Tipe Pengujian	Standard Method
Pengujian Berat Jenis	ASTM D854 – 14
Pengujian Kadar Air	ASTM D2216 – 19
Pengujian Batas-batas Atterberg	ASTM D4318 – 10
	ASTM D4943 – 08
Pengujian Analisa Saringan	ASTM D6913 – 17
Pengujian Hidrometer	ASTM D7928 – 17

Selain pengujian sifat fisis, terdapat juga standarisasi pengujian mekanis yang berfungsi sebagai acuan dasar dalam penelitian sampel campuran serbuk gergaji dan *Natrium Bentonite* yang akan di maksimalkan potensinya sebagai lapisan dasar penutup harian tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).

Tabel 12. Standar pengujian sifat mekanis tanah

Tipe Pengujian	Standard Method
Pengujian Kompaksi (<i>Standard Proctor Test</i>)	ASTM D698 – 12
Pengujian Permeabilitas (<i>Falling Head</i>)	ASTM D5085 – 08

2.6 Variasi Pengujian

Variasi pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu pencampuran serbuk gergaji dengan *Natrium Bentonite* dengan komposisi sebesar 2%, 5%, 8%, 10%, 12%, dan 15%. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Budihardjo (2017), pengujian komposisi serbuk gergaji yang diteliti sebesar 0%, 2%, 5%, dan 8%. pertimbangan komposisi limbah serbuk gergaji yang digunakan lebih sedikit dibanding *Natrium Bentonite* karena penambahan komposisi serbuk gergaji dapat meningkatkan koefisien permeabilitas dari sampel. Sehingga perlu dipertimbangkan komposisinya agar sesuai dengan standar EPA dimana permeabilitas tanah harus lebih kecil dari 10^{-7} cm/detik. Dari acuan tersebut, penambahan dan perbesaran variasi dilakukan dalam penelitian ini hingga 10%, 12%, dan 15% agar didapatkan hasil yang optimal dalam pemanfaatan limbah serbuk gergaji. Adapun variasi campuran serbuk gergaji dan *Natrium Bentonite* sebagai berikut.

Tabel 13. Variasi pengujian sampel

No	Variasi Pengujian		Total	Jumlah Sampel
	Serbuk Gergaji	<i>Natrium Bentonite</i>		
1	2%	98%	100%	1
2	5%	95%	100%	1
3	8%	92%	100%	1
4	10%	90%	100%	1
5	12%	88%	100%	1
6	15%	85%	100%	1

2.7 Prosedur Pengujian Sampel

Pada prosedur penelitian ini, pengujian dibagi menjadi dua jenis pengujian, yaitu pengujian sifat fisis untuk masing-masing sampel serbuk gergaji dan *Natrium Bentonite*, dimana untuk pengujian fisis pada serbuk gergaji terdiri dari pengujian kadar air dan berat jenis. Sedangkan pengujian fisis pada *Natrium Bentonite* terdiri dari pengujian kadar air, berat jenis, batas-batas *Atterberg*, analisa saringan dan hidrometer. Adapun pengujian mekanis dilakukan untuk sampel serbuk gergaji dan *Natrium Bentonite* yang telah tercampur. Pengujian mekanis dilakukan untuk menentukan nilai kompaksi dan nilai permeabilitas pada campuran sampel tanah. Selain itu, dilakukan juga pengujian reaktor reduksi kandungan pencemar kadmium (Cd) pada air lindi.

2.7.1 Uji Sifat Fisis

Uji Sifat fisis sampel campuran tanah yaitu kadar air, berat jenis, batas-batas *atterberg*, analisa saringan dan hidrometer bertujuan untuk mengetahui *indeks properties* tanah. *Indeks properties* tanah digunakan dalam menentukan klasifikasi dan identifikasi campuran sampel tanah yang kemudian digunakan untuk alternatif lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).

1. Pengujian Kadar Air

Tujuan pengujian kadar air tanah yaitu untuk menentukan kadar air sampel tanah. langkah pertama yaitu timbang tinbox kosong beserta penutupnya yang akan dipakai, kemudian beri nomor atau penanda lalu timbang, kemudian masukkan tanah yang akan diperiksa ke dalam tinbox lalu timbang, masukkan ke dalam oven dengan suhu $\pm 105^{\circ}\text{C}$ selama 24 jam, setelah dikeringkan dalam oven, tinbox dikeluarkan hingga mencapai suhu ruangan lalu ditimbang.

2. Pengujian Berat Jenis

Langkah pertama yaitu siapkan sampel yang lolos saringan no. 40 dan piknometer yang akan digunakan, piknometer diisi air suling sampai batas kalibrasi kemudian timbang dan catat suhunya, kemudian ambil tanah 5 gram dikarenakan sifatnya yang mudah mengembang, lalu masukkan ke dalam piknometer dengan ukuran 50 ml dan tambahkan air secukupnya sampai sampel terendam. Diamkan selama 1 hari hingga membentuk tekstur pasta, kemudian tambahkan air hingga setengah penuh dan keluarkan gelembung udara yang ada di dalam piknometer dengan kompor listrik. Setelah itu, masukkan piknometer ke dalam cawan perendam sampai mencapai suhu kamar, isi air sampai batas kalibrasi lalu timbang, kemudian keluarkan tanah dan air ke dalam cawan penguap dan masukkan ke dalam oven dengan suhu ± 105 selama 24 jam. Setelah itu, keluarkan dari oven tunggu sampai suhu ruangan lalu timbang berat tanah kering. Lakukan analisa data untuk mendapatkan nilai berat jenis tanah.

3. Pengujian Batas-batas *Atterberg*

Dalam pemeriksaan batas-batas *Atterberg*, terdapat tiga komponen yang akan ditinjau yaitu batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastic limit*), dan batas susut (*shrinkage limit*). Adapun indeks plastisitas sampel dapat dihitung setelah pengujian batas cair dan batas plastis.

a. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair adalah kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis (yaitu batas atas atau daerah plastis) atau menyatakan kadar air minimum dimana tanah masih dapat mengalir di bawah beratnya. Cara menentukannya adalah dengan menggunakan alat *Cassagrande*. Tanah yang telah dicampur dengan air ditaruh di dalam mangkuk *Cassagrande* dan di dalamnya dibuat alur dengan menggunakan alat spatel (*grooving tool*). Bentuk alur sebelum dan sesudah percobaan tampak berbeda. Umumnya percobaan ini dilakukan terhadap beberapa contoh tanah dengan kadar air yang berbeda dan banyaknya pukulan dihitung untuk masing-masing kadar air. Dengan demikian dapat dibuat grafik kadar air terhadap banyaknya pukulan.

b. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas Plastis (*plastic limit*) adalah kadar air pada batas bawah daerah plastis atau kadar air minimum dimana tanah dapat digulung sampai diameter 3,1 mm (1/8 inch). Kadar air ini ditentukan dengan menggiling tanah pada plat kaca hingga diameter dari batang yang dibentuk mencapai 1/8 inch. Bilamana tanah mulai pecah pada saat diameternya 1/8 inch. Maka, kadar air tanah itu adalah batas plastis.

c. Batas Susut (*Shrinkage Limit*)

Batas susut adalah kadar air maksimum, dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak menyebabkan berkurangnya volume tanah. pada percobaan batas susut dilakukan dengan cawan porselen atau pagoda dengan diameter 44,4 mm dengan tinggi 12,7 mm. Pada bagian dalam cawan porselen dilapisi dengan pelumas dan diisi dengan tanah jenuh sempurna, kemudian dikeringkan dengan oven. Selama proses pengeringan. Akan sampai pada suatu kondisi dimana pengeringan akan mengurangi kandungan air tetapi tidak mengurangi volume tanahnya.

4. Pengujian Analisa Saringan

Langkah pertama yaitu siapkan tanah kering oven yang lolos saringan no. 4 sebanyak 500 gram beserta saringan no 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200 serta pan. Timbang masing-masing berat saringan dan susun sesuai standar yang digunakan, kemudian masukkan sampel ke dalam susunan saringan ke alat pengguncang saringan. Hidupkan mesin pengguncang selama 15 menit setelah itu diamkan selama 5 menit untuk memberikan kesempatan agar debu-debu mengendap. Setelah itu, timbang masing-masing saringan beserta benda uji yang tertahan di dalamnya. Perlu diperhatikan bahwa jika jumlah tanah fraksi lanau dan lempung banyak yang tertahan di saringan no. 200, maka perlu dilakukan dengan cara basah yaitu dilakukan pencucian tanah yang tertahan di saringan no. 200 menggunakan air, sampai air yang melewati saringan menjadi jernih. Setelah itu, pindahkan ke cawan penguap lalu oven sampai beratnya konstan. Kemudian timbang berat tanah kering yang lolos saringan no. 200. Lakukan analisa perhitungan analisa saringan.

5. Pengujian Analisa Hidrometer

Pengujian analisa hidrometer bertujuan untuk menentukan ukuran dari susunan butir (gradasi tanah) yang lolos saringan no. 200. Langkah pertama yaitu siapkan tanah kering oven yang lolos saringan no. 200 sebanyak 50 gram beserta larutan calgon. Lalu ambil larutan calgon sebanyak 125 ml dan campurkan ke dalam sampel tanah tadi, dan diamkan selama 8 sampai 12 jam. Lalu, ambil gelas ukur dengan kapasitas 1000 ml lalu ditambahkan 875 ml air dan 125 ml larutan calgon yang sudah dicampurkan dengan sampel tanah, kemudian aduk sampai rata. Letakkan gelas ukur ke dalam bak yang telah dipasang alat pengatur suhu, lalu letakkan alat hidrometer ke dalam gelas ukur dan catat pembacaannya. Adapun dalam menghitung waktu pembacaan telah diatur dalam standar yang digunakan. Setelah itu lakukan analisa perhitungan.

2.7.2 Uji Sifat Mekanis

Pengujian mekanis dilakukan untuk mengetahui daya dukung tanah maupun permeabilitas tanah. Adapun uji mekanis yang dilakukan adalah uji pemadatan (*Standar Proctor Test*) dan Pengujian permeabilitas (*Permeability Test*) menggunakan metode *falling head*.

1. Pengujian Kompaksi (*Standar Proctor Test*)

Pengujian ini dilakukan untuk pemadatan tanah, yaitu suatu proses pengeluaran udara pada tanah dengan cara digilas atau ditumbuk. Uji pemadatan tanah atau yang digunakan adalah metode laboratorium untuk menentukan eksperimental kadar air yang optimum dimana suatu jenis tanah tertentu akan menjadi paling padat dan mencapai kepadatan yang maksimum. Adapun prosedur pengujian berdasarkan standar yang digunakan. Alasan pada pengujian ini menggunakan *Standar Proctor* dari pada *Modified Proctor* adalah karena jenis sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah berbutir halus dan memiliki daya rekat antar partikel (kohesif) yang cukup tinggi, *interlock* antar partikel sangat bagus, sehingga sudah cukup apabila menggunakan pemadatan *Standard*. Pemadatan *Modified* diperuntukan untuk tanah berbutir kasar dan memiliki rongga antar partikel yang cukup besar.

2. Pengujian Permeabilitas (*Permeability Test*)

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan koefisien permeabilitas sampel tanah, dimana metode ini melibatkan pengukuran aliran cairan dari atas ke bawah memanfaatkan gaya gravitasi melalui sampel tanah dalam kondisi tertentu dan umumnya menggunakan hukum Darcy. Metode *Falling Head* memungkinkan pengukuran laju aliran masuk dan aliran keluar dengan mudah, dan membantu dalam mendeteksi perubahan sifat sampel. Permeabilitas metode *Falling Head* cocok untuk menilai permeabilitas sampel tanah yang berjenis lempung/lanau, dengan korelasi yang terbentuk antara nilai permeabilitas dan komposisi campuran, seperti kandungan bahan pengikat, rasio air terhadap sampel, dan jenis agregat. Dengan memanfaatkan metode ini, peneliti dapat secara akurat mengevaluasi kemampuan cairan untuk menembus berbagai struktur padat dan menilai dampak berbagai faktor terhadap tingkat permeabilitas.

2.7.3 Pengujian Reaktor Reduksi Kandungan Pencemar Cd

Pengujian ini berfokus pada air lindi artifisial yang dibuat dengan konsentrasi yang spesifik untuk satu bahan pencemar, yaitu Kadmium. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Lucyana dkk. (2023), air lindi mengandung berbagai macam zat pencemar termasuk logam berat seperti kadmium, timbal, cobalt, zinc, dan lain sebagainya. Kadmium (Cd) merupakan salah satu logam berat yang keberadaannya berbahaya di lingkungan. Sumber pencemar kadmium diantaranya terdapat pada limbah cair industri cat, minuman ringan, industri peleburan, pelapisan logam, dan lain-lain. Kadmium termasuk dalam logam berat bersifat toksik tinggi, sehingga kadarnya di lingkungan juga harus sangat kecil (Farida dkk., 2019).

Kemampuan reduksi dilakukan dengan pembuatan larutan uji artifisial Cd berdasarkan SNI 06:6989.16:2004 di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Adapun perakitan reaktor uji reduksi kandungan kadmium di Laboratorium Sanitasi dan Persampahan, Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas teknik, Universitas Hasanuddin.

1. Pembuatan Larutan Uji

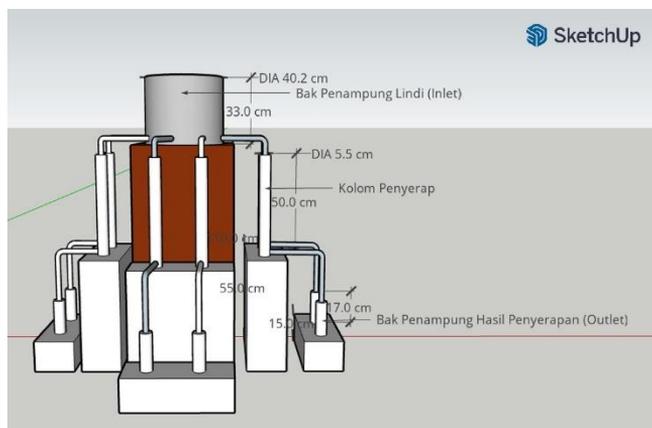
Untuk membuat larutan induk kadmium dengan konsentrasi 0,1 M, Pengujian ini dilakukan dengan melarutkan bubuk kadmium sebesar 0,5 mg dan dilarutkan dalam 100 mL aquades. Kemudian dikocok sampai homogen kedalam gelas piala. Setelah larutan homogen, masukkan ke dalam labu ukur 500 mL dan tambahkan aquades sampai batas labu ukur. setelah membuat larutan induk, dilakukan perhitungan pelarutan kadmium ke larutan uji untuk menyesuaikan kadar pencemar kadmium yang terdapat dalam lindi artifisial dan didapatkan 0,03 mL larutan induk kadmium lalu di larutkan ke dalam 10 liter aquades.

2. Pembuatan Sampel

Sampel campuran serbuk gergaji dan *Natrium Bentonite* dengan variasi yang sudah disesuaikan dibuat di Laboratorium Mekanika Tanah, Departemen Teknik Sipil, dengan menggunakan data kepadatan 80% dari hasil kompaksi dan ketebalan sampel 10 cm.

3. Pembuatan Reaktor

Pembuatan reaktor dirancang sebagai wadah pengujian sampel dengan satu tangki penampung air dan enam tabung uji yang terbuat dari pipa PVC dengan diameter pipa 2 inch atau 5,5 cm dan ketinggian 50 cm.



Gambar 17. Reaktor uji reduksi pencemar Kadmium (Cd)

Sumber : Kartika Sari (2023-)

Adapun sampel yang dimasukkan disesuaikan dengan lapisan dasar yang direncanakan yaitu tebal ¹⁰ cm dan diameternya disesuaikan dengan ukuran pipa PVC 2 inch atau 5,5 cm. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Kartika (2016) reaktor uji GCL dapat dibuat dengan tinggi 40-60 cm. Selain itu, untuk pengaliran lindi menggunakan sistem *batch* dengan volume lindi sebanyak 30 Liter.

2.8 Analisa Data

Data yang telah diambil dan dilakukan pengujian selanjutnya dianalisis untuk mengetahui *output* yang dihasilkan. Adapun analisa data yang dihitung meliputi analisa data pengujian fisis, pengujian mekanis, dan pengujian kadar Cd dalam lindi. Berikut merupakan analisa data yang dihitung, antara lain :

2.8.1 Perhitungan Pengujian Fisis

1. Kadar Air

Berdasarkan ASTM D2216 – 19, perhitungan untuk mengetahui kadar air suatu sampel tanah antara lain :

- Perhitungan berat air :

$$W_w = W_2 - W_3 \quad (21)$$

- Perhitungan berat tanah kering :

$$W_s = W_3 - W_1 \quad (22)$$

- Perhitungan kadar air :

$$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (23)$$

Keterangan :

W_w = Berat air (gram)

W_s = Berat tanah kering (gram)

W_1 = Berat tinbox kosong (gram)

W_2 = Berat tinbox + tanah basah (gram)

W_3 = Berat tinbox + tanah kering (gram)

w = Kadar air (%)

2. Berat Jenis

Berdasarkan ASTM D854 – 14, perhitungan berat jenis tanah antara lain :

$$G_s = \frac{W_s}{(W_1 + W_s) - W_2} \quad (24)$$

Keterangan :

G_s = Berat jenis tanah

W_s = Berat tanah kering (gram)

W_1 = Berat piknometer dan air suling (gram)

W_2 = Berat piknometer, tanah, dan air suling (gram)

3. Batas-batas *Atterberg*

Berdasarkan ASTM D4318 – 10, perhitungan batas-batas *Atterberg* terdiri dari batas cair, batas plastis, dan batas susut. Antara lain :

- Perhitungan batas cair (rumus empiris) :

$$LL = w_N (\%) \left(\frac{N}{25}\right)^{0,121} \quad (25)$$

Keterangan :

LL = Batas cair tanah

N = Jumlah ketukan

w_N = Kadar air pada N tumbukan

- Perhitungan batas plastis :

$$PL = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% \quad (26)$$

Keterangan :

PL = Batas plastis tanah

W_1 = Berat tinbox kosong (gram)

W_2 = Berat tinbox + tanah basah (gram)

W_3 = Berat tinbox + tanah kering (gram)

- Perhitungan perubahan kadar air sebelum pengurangan volume (Batas susut) :

$$\Delta w_1 (\%) = \frac{(V_i - V_f) \rho_w}{\text{massa tanah kering}} = \frac{(W_4 - W_5)}{13,6 (W_3 - W_1)} \times 100 \quad (27)$$

- Perhitungan batas susut :

$$SL = w_i - \frac{(W_4 - W_5)}{13,6 (W_3 - W_1)} \times 100 \quad (28)$$

Keterangan :

w_i = Kadar air (%)

W_1 = Berat pagoda yang telah diisi vaseline (gram)

W_2 = Berat pagoda + tanah basah (gram)

W_3 = Berat pagoda + tanah kering (gram)

W_4 = Berat air raksa yang memenuhi pagoda (gram)

Δw_1 = Perubahan w_i sebelum pengurangan volume (%)

ρ_w = Berat jenis air = 1

SL = Batas susut (gram/cm³)

- Perhitungan Indeks Plastisitas

$$PI = LL - PL \quad (29)$$

Keterangan :

PI = Indeks plastisitas

LL = Batas Cair

PL = Batas plastis

4. Analisa Saringan

Berdasarkan ASTM D6913 – 17, pada pengujian analisa saringan ada beberapa analisa perhitungan untuk menentukan pengkategorian jenis tanah. Antara lain :

- Perhitungan persen tertahan pada saringan ke- n :

$$R_n = \frac{W_n}{W} \times 100\% \quad (30)$$

- Perhitungan persen kumulatif tertahan pada saringan ke- n :

$$\sum R_n = \sum_{i=2}^{i=n} R_n \quad (31)$$

- Perhitungan persen kumulatif lolos saringan ke- n :

$$\% \text{finer} = 100 - \sum_{i=2}^{i=n} R_n \quad (32)$$

- Perhitungan nilai koefisien keseragaman :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (33)$$

- Perhitungan nilai koefisien gradasi :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (34)$$

Keterangan :

W_n = Berat tertahan pada saringan ke- n

W = Berat total tanah

R_n = Persen tertahan pada saringan ke- n

$\sum R_n$ = Persen kumulatif tertahan pada saringan ke- n

%*finer* = Persen kumulatif lolos pada saringan ke- n

C_u = Koefisien keseragaman

C_c = Koefisien gradasi

D_{10} = Diameter butiran yang sesuai dengan 10% lolos

D_{30} = Diameter butiran yang sesuai dengan 30% lolos

D_{60} = Diameter butiran yang sesuai dengan 60% lolos

5. Analisa Hidrometer

Berdasarkan ASTM D7928 – 17, Adapun perhitungan analisa hidrometer yaitu :

- Perhitungan koreksi temperatur (untuk nilai T antara 15°C sampai 28°C) :

$$F_T = -4,85 + 0,25 T \quad (35)$$

- Perhitungan koreksi pembacaan hidrometer untuk perhitungan persen lolos :

$$R_{cp} = R + F_T - F_2 \quad (36)$$

- Perhitungan persen lolos :

$$\%finer = \frac{a R_{cp}}{W_s} \quad (37)$$

- Perhitungan koreksi terhadap berat jenis :

$$a = \frac{G_s (1,65)}{(G_s - 1) 2,65} \quad (38)$$

- Perhitungan koreksi pembacaan untuk penentuan panjang efektif :

$$R_{cl} = R + F_m \quad (39)$$

- Perhitungan diameter butiran :

$$D = A \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (40)$$

Keterangan :

R = Pembacaan hidrometer

R_{cp} = Koreksi pembacaan hidrometer perhitungan % lolos

F_T = Koreksi temperatur

F_s = Koreksi nol

F_m = Koreksi meniskus

a = Koreksi terhadap berat jenis

W_s = Berat tanah kering pada pemeriksaan hidrometer

G_s = Berat jenis tanah

R_{cl} = Koreksi pembacaan hidrometer untuk panjang efektif

L = Panjang efektif

A = Faktor A, fungsi G_s bergantung pada temperatur sampel

D = Diameter butiran

2.8.2 Perhitungan Pengujian Mekanis

1. Perhitungan Kompaksi

Berdasarkan ASTM D698 – 12, adapun perhitungan kompaksi pada sampel tanah yaitu :

- Perhitungan berat tanah basah

$$W_{wet} = W_2 - W_1 \quad (41)$$

- Perhitungan berat isi tanah basah

$$\gamma_{wet} = \frac{W_2 - W_1}{V} \quad (42)$$

- Perhitungan kadar air

$$w (\%) = \frac{W_4 - W_5}{W_5 - W_3} \times 100 \quad (43)$$

- Perhitungan berat isi tanah kering

$$\gamma_{dry} = \frac{\gamma_{wet}}{1 + \frac{w (\%)}{100}} \quad (44)$$

- Perhitungan berat isi pada saat tidak ada udara dalam pori (*Zero Air Void*)

$$\gamma_{zav} = \frac{\gamma_w}{\frac{w (\%)}{100} + \frac{1}{G_s}} \quad (45)$$

Keterangan :

W_{wet} = Berat tanah basah (gram)

W_1 = Berat *mold* kosong (gram)

W_2 = Berat *mold* + tanah basah (gram)

W_3 = Berat tinbox kosong (gram)

W_4 = Berat tinbox + tanah basah (gram)

W_5 = Berat tinbox + tanah kering (gram)

w = Kadar air (%)

γ_{wet} = Berat isi tanah basah (gram/cm³)

γ_{dry} = Berat isi tanah kering (gram/cm³)

γ_{zav} = Berat isi tanah saat kondisi *zero air void* (gram/cm³)

γ_w = Berat isi air (gram/cm³)

G_s = Berat jenis isi

2. Perhitungan Permeabilitas (*Falling Head*)

Berdasarkan ASTM D5085 – 08, adapun perhitungan permeabilitas metode *falling head* pada sampel tanah yaitu :

- Perhitungan koefisien permeabilitas

$$k = 2,303 \frac{\alpha L}{A t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (46)$$

- Perhitungan luas area buret

$$\alpha = \frac{V_w}{(h_1 - h_2)} \quad (47)$$

- Perhitungan persamaan koefisien permeabilitas

$$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (48)$$

- Perhitungan koreksi koefisien permeabilitas terhadap suhu 20°C

$$k_{20^{\circ}C} = k_{T^{\circ}C} \frac{\eta_{T^{\circ}C}}{\eta_{20^{\circ}C}} \quad (49)$$

Keterangan :

L = Panjang sampel (cm)

a = Luas area buret (cm²)

A = Luas area sampel (cm²)

V_w = Volume air yang terkuras dari buret (cm³)

t = Waktu yang dibutuhkan $h_1 = h_2$ (s)

k = Koefisien permeabilitas (cm/s)

η = Nilai viskositas air pada suhu tertentu

2.8.3 Perhitungan Reduksi Kadar Kadmium (Cd)

Berdasarkan SNI 06-6989.16-2004, adapun perhitungan reduksi pencemar kadmium yaitu :

1. Perhitungan volume pengenceran kadmium

$$M_1 V_1 = M_2 V_2 \quad (50)$$

2. Perhitungan konsentrasi logam kadmium

$$Cd \text{ (mg/L)} = C \times fp \quad (51)$$

Keterangan :

M_1 = Molaritas sebelum pengenceran (mg/L)

M_2 = Molaritas setelah pengenceran (mg/L)

V_1 = Volume sebelum pengenceran (mL)

V_2 = Volume setelah pengenceran (mL)

C = Konsentrasi yang didapat hasil pengukuran (mg/L)

fp = faktor pengenceran