

TUGAS AKHIR

**STUDI KARAKTERISTIK PERMEABILITAS LUMPUR LIMBAH YANG
DICAMPUR DENGAN ABU AMPAS TEBU DAN TANAH SEBAGAI
LAPISAN PENUTUP HARIAN TEMPAT PEMROSESAN AKHIR
SAMPAH (TPA)**



SELSI

D131 17 1012

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

2021

TUGAS AKHIR

STUDI KARAKTERISTIK PERMEABILITAS LUMPUR LIMBAH YANG DICAMPUR DENGAN ABU AMPAS TEBU DAN TANAH SEBAGAI LAPISAN PENUTUP HARIAN TEMPAT PEMROSESAN AKHIR SAMPAH (TPA)

Diajukan sebagai Tugas Akhir dalam rangka Penyelesaian Studi
Sarjana S1 Teknik Lingkungan pada Departemen Teknik Lingkungan



SELSI

D131 17 1012

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

2021



LEMBAR PENGESAHAN

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

Judul : **Studi Karakteristik Permeabilitas Lumpur Limbah Yang di Campur dengan Abu Ampas Tebu dan Tanah Sebagai Lapisan Penutup Harian Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA).**

Disusun Oleh :

Nama : Selsi

D131171012

Telah diperiksa dan disetujui
Oleh Dosen Pembimbing

Gowa, 25 Nopember 2021

Pembimbing I

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

Pembimbing II

Dr. Eng. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T.
NIP. 19721119200121001

Menyetujui,
Ketua Departemen Teknik Lingkungan



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

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Selsi
NIM : D131 17 1012
Program Studi : Teknik Lingkungan
Jenjang : Strata-1 (S1)

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**STUDI KARAKTERISTIK PERMEABILITAS LUMPUR LIMBAH
YANG DICAMPUR ABU AMPAS TEBU DAN TANAH SEBAGAI LAPISAN
PENUTUP HARIAN TEMPAT PEMROSESAN AKHIR SAMPAH (TPA)**

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

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

Gowa, 28 November 2021

Yang membuat pernyataan,



Selsi

NIM : D131171012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-nya saya selaku penulis dapat menyelesaikan penelitian dan skripsi ini yang berjudul “Studi Karakteristik Nilai Permeabilitas Lumpur Limbah yang Dicampur dengan Tanah dan Abu Ampas Tebu sebagai Bahan Alternatif Material Penutup Harian Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)”. Penyelesaian tugas akhir ini menjadi salah satu syarat kelulusan Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Pencapaian tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, dan tidak terlepas dari jasa-jasa orang tua. Ungkapan terima kasih penulis persembahkan kepada Ayahanda Muslimin yang selalu memberikan support dan doa-doa yang beliau panjatkan, kepada Ibunda tercinta Alm.Sana terima kasih atas didikan beliau kepada penulis selama hidupnya salah satu perkataan Almarhum ibu yang selalu teringat akan pentingnya menuntut pendidikan sampai kejenjang yang lebih tinggi. Terima kasih kepada saudara-saudara saya, Arsip, Serli dan Suami, Sulastri dan Suami, dan adik saya tercinta Sulpia. Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini tidak terlepas dari bimbingan dan dukungan dari beberapa pihak terkait, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan rasa terima kasih kepada;

1. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Ibu Dr.Eng. Kartika Sari, S.T., M.T. selaku dosen Pembimbing I yang senantiasa memberikan waktu luang untuk membimbing penulis, serta memberikan saran, masukan dan dukungan kepada penulis selama penyusunan tugas akhir.
3. Bapak Dr. Eng. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing II yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis selama penyusunan tugas akhir.
4. Bapak/Ibu Dosen Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bantuannya kepada penulis selama menempu

perkuliahan, terutama kepada staf S1 Teknik Lingkungan Ibu Sumiati. A.S. dan Pak Olan.

5. Untuk rekan seperbimbingan Tugas Akhir saya, Nidya Anastasya Nirwan selaku partner permeabilitas yang paling tegas dan tergercep, Azhim Hidayat dan Imamul Khair Khas. Terima kasih atas kerja samanya dan telah menjadi partner terbaik penulis selama proses meneliti. Dan terima kasih banyak kepada teman-teman lingkungan 2017 yang telah ikut berperan dalam pengambilan sampel penelitian.
6. Kepada semua asisten Laboratorium Mekanika Tanah Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Kepada Apriani Astuti Safaat selaku partner tugas kelompok baik itu tugas kecil maupun tugas besar selama perkuliahan, Nurindah Mahmur teman paling rendah hati dan estetik, Sitti Alifah Nurwasima selaku tempat meminta saran dan solusi *ter-the best*, Dinah Khairia yang selalu meluangkan waktunya untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan penulis di *WhatsApp*. Kawan-kawan Enrekang Reski OP sitti Fatimah, Nanda Latifah Rahma. Dan semua teman-teman lingkungan 2017.

Akhir kata, penulis berharap Kepada Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga laporan tugas akhir ini bisa memberi manfaat bagi pengembangan ilmu.

Gowa, 1 Oktober 2021

Penulis,

SELSI

D131 17 1012

ABSTRAK

SELSI. *Studi Karakteristik Nilai Permeabilitas Lumpur Limbah yang Dicampur dengan Abu Ampas Tebu dan Tanah sebagai Lapisan Penutup Harian Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)* (dibimbing oleh Kartika Sari dan Irwan Ridwan Rahim).

Penelitian mengenai penggunaan lumpur limbah sebagai material alternatif lapisan penutup harian TPA telah ada sebelumnya yaitu penelitian yang dilakukan oleh Jun He, dkk (2015). Namun penggunaan lumpur limbah sebagai lapisan penutup harian perlu dimodifikasi untuk memperbaiki karakteristiknya. Untuk memperbaiki sifat mekanik lumpur limbah dalam penelitian ini digunakan campuran tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) yang didalamnya terkandung silika yang bersifat *pozzolon* yaitu bahan dengan keberadaan air dapat membentuk massa padat. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui nilai permeabilitas campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah sebagai lapisan penutup harian TPA. Dengan menggunakan metode kuantitatif melalui teknik eksperimental dan pemodelan laboratorium.

Dari hasil penelitian, nilai koefisien permeabilitas campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah untuk 3 jenis cairan didapatkan nilai paling baik ditunjukkan pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10% yaitu untuk air sebesar $1,2 \times 10^{-5}$ cm/det; larutan etanol $1,9 \times 10^{-5}$ cm/det dan larutan CaCl_2 cm/det sebesar $2,5 \times 10^{-5}$ cm/det. Sedangkan nilai permeabilitas lumpur limbah tanpa campuran didapatkan sebesar 0,0790 cm/det. Berdasarkan nilai koefisien permeabilitas campuran yang didapatkan, campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah telah memenuhi syarat sebagai lapisan penutup harian TPA dengan ketentuan nilai koefisien permeabilitas sebesar 1×10^{-5} cm/det menurut Jun He, dkk (2015).

Kata kunci: lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel), tanah, lapisan penutup harian.

ABSTRACT

SELSI. Study of the Permeability Value Characteristics of Waste Sludge Mixed with Sugarcane Bagasse Ash and Soil as an Daily Covering for Final Waste Processing Sites (TPA) (supervised by Kartika Sari and Irwan Ridwan Rahim).

The Research on the use of sewage sludge as an alternative material for daily landfill cover has existed before, namely research conducted by Jun He, et al (2015). However, the use of sewage sludge as a daily cover layer needs to be modified to improve its characteristics. To improve the mechanical properties of the sewage sludge in this study, a mixture of soil and clay was used Bagasse ash which contains silica which is pozzolon, which is a material in the presence of water that can form a solid mass. The purpose of this study was to determine the permeability value of a mixture of sewage sludge, bagasse ash, and soil as a daily cover layer for landfills. By using quantitative methods through experimental techniques and laboratory modeling.

From the results of the study, the coefficient of permeability of the mixture of waste sludge, bagasse ash, and soil for 3 types of liquids obtained the best value indicated in the variation of the addition of bagasse ash as much as 10%, namely for tap water of 1.2×10^{-5} cm/sec; an ethanol solution of 1.9×10^{-5} cm/s and a CaCl₂ cm/s solution of 2.5×10^{-5} cm/s. Meanwhile, the permeability value of the untreated sewage sludge is 0.0790 cm/sec. Based on the coefficient of permeability of the mixture obtained, the mixture of sewage sludge, bagasse ash, and soil has met the requirements as a daily cover layer for the landfill with the provision of a permeability coefficient value of 1×10^{-5} cm/s according to Jun He, et al (2015).

Keywords: sewage sludge, bagasse ash, soil, daily cover.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	3
C. Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	3
D. Ruang Lingkup	4
E. Sistematika Penulisan	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)	6
B. Lapisan Penutup Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA).....	7
C. Lindi	10
D. Lumpur Limbah.....	12

E. Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	13
F. Tanah.....	15
G. Karakteristik Fisik Tanah	18
H. Kompaksi	20
I. Permeabilitas	21
J. Penelitian Terdahulu	23

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

A. Rancangan Penelitian	26
B. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	27
C. Alat dan Bahan	28
D. Kerangka Penelitian.....	31
E. Teknik Pengumpulan Data	33
F. Teknik Analisa.....	40

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Penelitian.....	44
B. Hasil Pengujian Karakteristik Fisis dan Mekanis Lumpur Limbah	45
C. Hasil Pengujian Karakteristik Abu Ampas Tebu (Abu Ketel).....	47
D. Hasil Pengujian Karakteristik Fisis dan Mekanis Tanah.....	48
E. Hasil Pengujian Berat Jenis Campuran Benda Uji	54
F. Hasil Pengujian Kompaksi Campuran Benda Uji.....	56
G. Hasil Pengujian Permeabilitas Campuran Benda Uji.....	62
H. Kandungan Unsur Logam Berat Lumpur Limbah	71

BAB 5 PENUTUP

A. Kesimpulan.....	72
B. Saran	72

DAFTAR TABEL

1. Komposisi Lindi pada TPA baru dan TPA matang	11
2. Baku Mutu Logam Berat Lumpur Limbah	13
3. Komposisi Kimia Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	14
4. Penggolongan Tanah dengan Ukuran Butiran.....	16
5. Berat Jenis Tanah.....	18
6. Rentang Nilai Indeks Plastisitas Material Tanah.....	20
7. Kisaran Permeabilitas Tanah pada Temperatur 20°C	23
8. Variasi Komposisi Campuran Benda Uji.....	34
9. Cairan Pengganti Lindi	34
10. Hasil Pengujian Karakteristik Lumpur Limbah.....	45
11. Hasil Pengujian Karakteristik Tanah	48
12. Rentang Nilai Indeks Plastisitas Material Tanah.....	51
13. Klasifikasi AASTHO untuk Butiran Halus.	54
14. Rekapitulasi Berat Jenis Tiap Variasi Campuran	54
15. Komposisi Campuran Material Benda Uji.....	63
16. Cairan yang Digunakan dalam Pengujian Permeabilitas Bemda Uji	63
17. Hasil Pengujian Permeabilitas Variasi Campuran	64
18. Unsur Logam Berat dalam Lumpur Limbah	71

DAFTAR GAMBAR

1. Batas-batas Atterberg	19
2. Lokasi Pengambilan Sampel	27
3. Alat Pengujian Kadar Air	29
4. Alat Pengujian Berat Jenis	29
5. Alat Pengujian Analisa Saringan	29
6. Alat Pengujian Batas-batas Atterberg	30
7. Alat Pengujian Kompaksi	30
8. Alat Pengujian Permeabilitas	31
9. Bagan Alir Penelitian	31
10. Grafik Analisa Saringan Lumpur Limbah	45
11. Grafik Analisa Saringan Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	46
12. Grafik Analisa Saringan dan Hidrometer Tanah	49
13. Pengujian Hidrometer Tanah	50
14. Pengujian Batas Batas <i>Atterberg</i>	51
15. Grafik Pengujian Kompaksi Tanah	52
16. Diagram Indeks PLastisitas Tanah	53
17. Grafik Berat Jenis Campuran Benda Uji	55
18. Pengujian Berat Jenis Campuran Benda Uji	55
19. Grafik kompaksi variasi penambahan 0% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	56
20. Grafik kompaksi variasi penambahan 5% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	57
21. Grafik kompaksi variasi penambahan 10 Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	58
22. Grafik kompaksi variasi penambahan 20% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	58

23. Grafik kompaksi variasi penambahan 30% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)...	59
24. Grafik kompaksi variasi penambahan 40% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)...	60
25. Grafik Rekapitulasi Pengujian Kompaksi Variasi Campuran	60
26. Grafik Berat Isi Kering Optimum Campuran Benda Uji	61
27. Grafik Berat Isi Kering 60% dari Kadar Air Optimum	62
28. Pengujian Permeabilitas Campuran Benda Uji	64
29. Grafik Permeabilitas Campuran Benda Uji	65
30. Grafik Nilai Angka Pori Campuran Benda Uji	66
31. Sampel Kadar Air Campuran Benda Uji.....	66
32. Grafik Koefisien Permeabilitas menggunakan Air.....	67
33. Grafik Koefisien Permeabilitas Menggunakan Etanol.....	68
34. Grafik Koefisien Permeabilitas Menggunakan CaCl_2	69

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel Perhitungan Koefisien Permeabilitas Lumpur Limbah

Tabel Perhitungan Koefisien Permeabilitas Tanah

Tabel Perhitungan Koefisien Permeabilitas Campuran Lumpur Limbah, dengan

Abu Ampas Tebu (Abu Ketel) dan Tanah

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Bertambahnya kebutuhan masyarakat dalam kehidupan sehari-hari akan sejalan dengan meningkatnya jumlah produksi pada industri pabrik, yang akan berdampak pada peningkatan jumlah limbah yang dihasilkan, diantaranya yaitu berupa *sludge* (lumpur limbah) dan abu ampas tebu (abu ketel). Berdasarkan data produksi limbah pada PT. Kawasan Industri Makassar dihasilkan lumpur limbah kurang dari 50 kg/hr atau sekitar 18.000 kg/thn. Adapun jumlah limbah abu ampas tebu (abu ketel) yang dihasilkan Pabrik Gula PT. Perkebunan Nusantara XIV tiga tahun berturut-turut yaitu sebanyak 4.282,03 ton/periode giling; 4.135,13 ton/periode giling; dan 4.764,88 ton/periode giling.

Lumpur limbah hasil industri jika tidak ditangani dengan baik akan berdampak buruk bagi lingkungan yaitu dapat mencemari air tanah dan badan air. Menurut Hermanto (2018) limbah abu ampas tebu (abu ketel) dapat memberikan dampak bagi manusia dan tanaman. Hal ini disebabkan karena abu ampas tebu (abu ketel) mengandung butiran partikel abu dengan ukuran 1-10 mikron yang dapat menyebabkan penyakit *pneumoconiosis* pada manusia dan dapat menyebabkan kerak tebal pada daun tanaman sehingga dapat menghambat proses fotosintesis dan pertukaran CO₂ dengan atmosfer. Untuk meminimalisir dampak limbah industri bagi lingkungan sekitar, perlu dilakukan pemanfaatan limbah tersebut dengan melihat kurangnya material sebagai lapisan penutup harian untuk itu dalam penelitian ini dilakukan pemanfaatan lumpur limbah dan abu ampas tebu (abu ketel) sebagai material alternatif lapisan penutup harian Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA).

Tempat Pemrosesan Akhir sampah (TPA) merupakan salah satu tempat pengembalian sampah ke media lingkungan secara aman. Dalam pengoperasian, TPA harus dapat memenuhi fungsi sebagai tempat berakhirnya sampah yang diharapkan tidak merusak lingkungan. Namun, pengelolaan sampah dengan

sistem *open dumping* sering menjadi salah satu penyebab terjadinya pencemaran lingkungan. Dalam meminimalisir dan mengatasi dampak akibat buruknya penanganan sampah di TPA perlu adanya tindakan dan upaya untuk mengubah skema metode pengelolaan sampah di TPA. Berdasarkan UU No.18 Tahun 2008 tentang pengelolaan sampah diwajibkan pemerintah daerah mengganti TPA dengan sistem *open dumping* menjadi TPA dengan sistem *sanitary landfill*. Penggunaan metode *sanitary landfill* dapat menjamin pengoperasian TPA akan lebih aman bagi lingkungan hal ini disebabkan karena metode ini dilengkapi dengan beberapa media pelindung lingkungan seperti penggunaan lapisan penutup harian disetiap hari akhir operasi.

Dalam pengaplikasian material sebagai lapisan penutup harian TPA perlu diperhatikan sifat mekaniknya sehingga memenuhi persyaratan konstruksi, diantaranya yaitu dengan melihat koefisien rembesan air pada material yang akan digunakan guna mengurangi banyaknya rembesan air eksternal ataupun air lindi dari sampah yang masuk kedalam badan TPA. Menurut Jun He, Dkk (2015) nilai permeabilitas yang ideal untuk lapisan penutup harian TPA yaitu 1×10^{-5} cm/detik. Nilai permeabilitas akan berpengaruh terhadap lapisan penutup harian jika nilai koefisien lapisan terlalu tinggi bahan penutup tidak akan mencegah infiltrasi air ke dalam TPA sedangkan jika terlalu rendah lindi yang timbul akan termigrasi ke dalam TPA dan menyebabkan lindi akan tertahan diatas permukaan lapisan penutup.

Lumpur limbah memiliki nilai koefisien permeabilitas bervariasi yaitu dapat berkisar antara 4×10^{-2} cm/s (Qian dkk, 2010). Hal ini menjadikan lumpur limbah belum memenuhi syarat sebagai lapisan penutup harian TPA, oleh karena itu perlu dilakukan modifikasi untuk memperbaiki sifat mekaniknya. Pemanfaatan abu ampas tebu (abu ketel) diyakini mampu memperbaiki karakteristik lumpur limbah hal ini disebabkan karena abu ampas tebu (abu ketel) memiliki kandungan silika yang bersifat *pozzolon* yaitu bahan dengan keberadaan air dapat membentuk massa padat dan bahan ini tidak larut didalam air yang menjadikan suatu material dengan bahan campuran abu ampas tebu (abu ketel) akan memiliki kemampuan untuk meloloskan air lebih kecil. Menurut Fatoni (2014).

Berdasarkan uraian diatas penulis tertarik untuk melakukan penelitian terkait penanganan sampah khususnya pada bagian lapisan penutup harian TPA yang tertuang dalam penulisan Tugas Akhir dengan judul “Studi Karakteristik Nilai Permeabilitas Lumpur Limbah yang Dicampur dengan Abu Ampas Tebu dan Tanah Sebagai Material Alternatif Lapisan Penutup Harian Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA).

B. Rumusan Masalah

1. Bagaimana karakteristik fisik dan permeabilitas lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah sebagai material alternatif lapisan penutup harian TPA
2. Bagaimana permeabilitas lumpur limbah yang dicampur dengan abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah sebagai material alternatif lapisan penutup harian TPA?

C. Tujuan dan Manfaat Penelitian

1. Tujuan
 - a. Untuk menentukan karakteristik fisik dan permeabilitas lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah sebagai material alternatif lapisan penutup harian TPA.
 - b. Untuk menentukan nilai permeabilitas campuran lumpur limbah dengan abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah sebagai bahan alternatif lapisan penutup harian TPA.
2. Manfaat
 - a. Untuk mengetahui karakteristik fisik dan permeabilitas lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah sebagai material alternatif lapisan penutup harian TPA.

- b. Untuk mengetahui potensi lumpur limbah yang dicampur dengan abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah sebagai bahan alternatif lapisan penutup harian TPA

D. Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Lumpur limbah yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah hasil olahan dari PT. Kawasan Industri Makassar.
2. Abu ampas tebu (abu ketel) yang digunakan dalam penelitian adalah limbah hasil pembakaran ampas tebu dari PT. Perkebunan Nusantara XIV Unit Usaha Pabrik Gula Takalar.
3. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari bantaran sungai Jeneberang, Desa Sokkolia, Kecamatan Bontomarannu.
4. Material campuran yang digunakan pada penelitian ini adalah Lumpur Limbah yang dicampur menggunakan abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah yang akan diuji di Laboratorium Mekanika Tanah, Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin.
5. Untuk pengujian permeabilitas tiap variasi campuran digunakan tiga jenis cairan yaitu air, larutan etanol dengan konsentrasi 100ml/l air, larutan CaCl_2 sebanyak 11,1gr/l.

E. Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah memahami permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini, maka dibuatlah susunan sistematika penulisan tugas akhir ini, sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup, serta sistematika dan organisasi.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan tentang metode atau alur tahapan pengujian dalam penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

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

BAB 5 PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

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

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)

Istilah TPA yang dulu dikenal sebagai Tempat Pembuangan Akhir. Namun setelah diberlakukannya Undang-Undang No.18 Tahun 2008 TPA didefinisikan sebagai Tempat Pemrosesan Akhir sampah dengan maksud untuk mengembalikan sampah ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan.

Berdasarkan SNI 19-2454-2002 tentang Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Perkotaan, secara umum teknologi pengolahan sampah dibedakan menjadi 3 metode yaitu metode Sanitary Landfill (Lahan Urug Saniter), metode Open Dumping serta metode Controlled Landfill (Penimbunan terkendali).

1. Metode *Open Dumping*

Open Dumping yaitu sistem pembuangan sampah yang dilakukan secara terbuka. Hal ini akan menjadi masalah jika sampah yang dihasilkan adalah sampah organik yang membusuk karena menimbulkan gangguan pembauan dan estetika serta menjadi sumber penularan penyakit.

2. Metode *Controlled Landfill*

Metode *Controlled Landfill* merupakan perbaikan dari open dumping, dimana sampah secara bertahap ditutup dengan lapisan tanah untuk mengurangi kemungkinan gangguan pencemaran terhadap lingkungan sekitarnya. Selain itu perlu dilakukan usaha proteksi pencemaran leachate dan gas dengan cara yang sederhana seperti: Pengumpulan leachate di dasar TPA, Pengumpulan dan penyaluran gas methane, Pengolahan leachate di dalam kolam-kolam, pemagaran lokasi dan sistem drainase merupakan fasilitas tambahan. Pada akhir pengoperasiannya TPA ini semua timbunan sampah akan tertutup oleh lapisan tanah.

3. Metode *Sanitary Landfill* (lahan urug saniter)

Metode *Sanitary landfill* merupakan sarana pengurugan sampah ke lingkungan yang disiapkan dan dioperasikan secara sistematis, dengan penyebaran dan pemadatan sampah pada area pengurugan, serta penutupan sampah setiap hari (Damanhuri 2006). Pada metode ini dilakukan pemusnahan sampah dengan membuat lubang di tanah kemudian sampah dimasukkan dan ditimbun dengan tanah lalu dipadatkan.

B. Lapisan Penutup TPA (Tempat Pemrosesan Akhir Sampah)

Menurut Nurdin (2016), Sumber terbesar dari timbulnya lindi adalah akibat infiltrasi air melalui bagian atas landfill, baik melalui presipitasi langsung atau melalui limpasan masuk (runon). Oleh karenanya, aplikasi penutup pada landfill akan memegang peranan penting. Rancangan penutup hendaknya mempertimbangkan aspek kesehatan, keselamatan, estetika, permeabilitas, kekuatan dan pemanfaatan lahan. Fungsi tanah penutup TPA diantaranya adalah:

- mengontrol rodent
- mencegah lalat dan burung masuk ke lokasi penimbunan
- menumbuhkan tanaman
- mengatur kelembaban dan aliran gas
- lapisan dasar bagi jalan kerja

Untuk mengurangi adanya potensi gangguan terhadap lingkungan, TPA perlu dilengkapi dengan lapisan penutup yang dibutuhkan guna mencegah sampah berserakan, adanya bau, terjadinya kebakaran, mencegah berkembangnya binatang pembawa vector penyakit serta mengurangi timbulan lindi. Bila pada lapisan penutup *landfill* diharapkan tidak adanya air yang masuk kedalam timbunan sampah maka digunakan material dengan permeabilitas yang rendah. Sedangkan lapisan penutup yang diaplikasikan digunakan sebagai ventilasi aliran air maka digunakan nilai rembesan/permeabilitas yang berlawanan. Jenis tanah menjadi pertimbangan yang cukup penting dalam pemilihan material penutup, umumnya tanah dengan organik tinggi dengan bagian tanah *top soil* dihindari karena tanah tersebut sulit untuk dipadatkan dan lengket.

Terdapat beberapa jenis penutupan sampah dengan menggunakan material tanah ataupun dapat menggunakan material bahan lain, berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia nomor 03 tahun 2013 tahapan penutupan tanah untuk lahan urug saniter terdiri dari 3 bagian penutupan yaitu penutup tanah harian, penutup antara dan penutupan tanah akhir.

1. Lapisan Penutup Harian

Pada setiap hari akhir operasi penimbunan sampah di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) diperlukan penutupan lapis sampah padat yang sering disebut dengan lapisan penutup harian dengan menggunakan tanah atau bahan lain seperti humas hasil *landfill mining* atau plastik *biodegradable*. Ataupun dapat menggunakan terpal, tetapi dalam penggunaannya, bahan ini harus dilepas bila diatas lapisannya akan dilakukan kembali penimbunan sampah baru (Damanhuri, 2010).

Dalam sistem pengelolaan sampah di TPA lapisan penutup harian hanya dilakukan pada metode pengelolaan sampah melalui *sanitary landfill* sedangkan pada metode *controlled landfill* lapisan penutup harian tidak dipergunakan. Fungsi utama dari penggunaan penutup harian meliputi:

- Mencegah tersebarnya sampah akibat hembusan angin ataupun gangguan dari luar.
- Mencegah timbulnya bau dan mengurangi emisi gas metan.
- Mengontrol kelembaban sampah
- Mencegah berkembangnya binatang pembawa vektor penyakit
- Mengurangi resiko terjadinya kebakaran.
- Menjaga estetika lingkungan sekitar TPA dengan meningkatnya tampilan fisik dari TPA.

Penggunaan material sebagai bahan penutup harian hendaknya digunakan material yang tidak menghambat aliran air dalam lapisan-lapisan sampah, baik aliran ke bawah melalui proses gravitasi atau yang ke atas (osmosis) guna menghindari banyaknya limpasan air lindi yang

timbul akibat sampah yang terurai, sehingga dalam hal ini dibutuhkan nilai angka rembesan air yang tidak terlalu rendah ataupun terlalu tinggi, Menurut Jun He, Dkk (2015) nilai permeabilitas yang ideal untuk lapisan penutup harian TPA yaitu 1×10^{-5} cm/detik.

Berdasarkan peraturan menteri pekerjaan umum nomor 03 tahun 2013 kemiringan tanah penutup harian memiliki ketebalan lapisan sebesar 10 hingga 15 cm. Harus cukup untuk dapat mengalirkan air hujan keluar dari atas lapisan penutup. Pada musim hujan, perlu dilakukan pengamatan rutin terhadap kemiringan tanah penutup harian, untuk menjamin pengaliran *run off* dari atas lapisan penutup mengalir secara lancar menuju ke saluran drainase. Dalam pengaplikasian lapisan penutup harian di TPA perlu memerhatikan jenis dan integrasi serta sifat kestabilan dari jenis tanah dengan melihat informasi nilai sudut geser dan kohesi dari material yang akan digunakan.

2. Lapisan Penutup Antara (*Intermediate cover*)

Lapisan antara mempunyai fungsi sebagai dasar bagi timbunan sampah, memudahkan aliran air permukaan mengalir ke luar timbunan sampah, untuk memudahkan pelintasan kendaraan di atasnya. lapisan penutup antara memiliki tebal 30 sampai 40 cm, lapisan ini dapat dibiarkan selama ½ sampai 1 tahun. Selain itu lapisan antara dapat berfungsi sebagai pengontrol terhadap pembentukan gas akibat proses dekomposisi sampah sehingga dapat mencegah timbulnya kebakaran.

Material yang dapat digunakan sebagai lapisan penutup antara TPA yaitu dapat berupa tanah asli, sampah kompos, residu pertanian, geomembrane serta limbah konstruksi. Diantara jenis material tersebut pembuatan lapisan antara TPA dengan tanah asli dan geomembran yang paling efektif dalam membatasi banyaknya limpasan air permukaan ke dalam TPA (Tchobanoglous, 1993).

3. Lapisan Penutup Akhir (*Final cover*)

Lapisan penutup akhir merupakan lapisan penutupan tanah terakhir setelah kapasitas TPA terpenuhi. Tanah penutup akhir memiliki fungsi untuk mencegah infiltrasi air luar masuk ke dalam timbunan sampah, menjaga kestabilan timbunan, serta sebagai tempat tumbuhnya vegetasi hijau. lapisan disyaratkan memiliki kemiringan tidak lebih dari 30 derajat untuk menghindari terjadinya erosi, dengan ketebalan lapisan 50 sampai 100 cm. Pada lahan urug saniter urutan komponen pelapis penutup akhir yaitu dibagian atas timbunan sampah dilakukan penimbunan tanah setebal 30 cm, selanjutnya di atasnya terdapat lapisan kerikil dengan diameter 30-50 mm, dilengkapi lapisan tanah liat setebal 20 cm dengan maksimum permeabilitas sebesar 1×10^{-7} cm/det jika tidak ditemui tanah liat yang sesuai dengan persyaratan dapat digunakan lapisan geotextile nonwoven. Dilengkapi lapisan tanah humus setebal minimum 60 cm untuk media tumbuhnya tanaman.

C. Lindi

Berdasarkan peraturan menteri LHK No.59 tahun 2016 tentang baku mutu lindi bagi usaha dan/atau kegiatan tempat pemrosesan akhir sampah, lindi adalah cairan yang berasal dari materi-materi terlarut termasuk didalamnya materi organik hasil dekomposisi secara biologi dalam timbunan sampah, yang dipengaruhi oleh masuknya air dari luar timbunan sampah.

Variasi komposisi lindi sangat tergantung pada usia TPA dan waktu pengambilan sampel lindi, jika sampel lindi dikumpulkan selama fase asam nilai pH akan rendah, unsur BOD₅, TOC, COD, nutrisi dan logam berat akan tinggi. Sebaliknya jika sampel lindi dikumpulkan selama fase fermeantasi metana pH akan berada dikisaran dari 6,5 hingga 7,5 dan nilai BOD₅, TOC, COD, nutrisi dan logam berat akan lebih rendah karena logam akan lebih sedikit larut pada pH netral (*Tchobanoglous, 1993*). Data komposisi lindi pada TPA baru dan matang ditunjukkan dalam tabel 1.

Tabel 1. Data Komposisi Lindi pada TPA Baru dan TPA Matang

Parameter	Konsentrasi (mg/L)		
	TPA baru (< 2 tahun)		TPA matang
	Range	Tipikal	
BOD ₅	2.000-30.000	10.000	100-200
TOC	1.500-20.000	6.000	80-160
COD	3.000-60.000	18.000	100-500
TSS	200-2.000	500	100-400
Organik Nitrogen	10-800	200	80-120
Amonia Nitrogen	10-800	200	20-40
Nitrat	5-40	25	5-10
Total phosphor	5-100	30	5-10
Ortho phosphor	4-80	20	4-8
Alkalinitas (CaCO ₃)	1.000-10.000	3.000	200-1.000
pH	4,5-7,5	6	6,6-7,5
Total hardnes (CaCO ₃)	300-10.000	3.500	200-1000
Kalsium	200-3.000	1.000	100-400
Magnesium	50-1.500	250	50-200
Potassium	200-1.000	300	50-400
Sodium	200-2.500	500	100-200
Klorida	200-3.000	500	100-400
Sulfat	50-1.000	300	20-50
Besi	50-1.200	60	20-200

Sumber: Tchobanoglous (1993).

Cairan lindi dalam penggunaannya dapat dimodifikasi dengan melihat beberapa unsur komposisi penyusun lindi. Penelitian mengenai penggunaan senyawa kimia sebagai cairan pengganti lindi telah dilakukan salah satunya yaitu, penelitian yang dilakukan oleh Jhinchun Chai, dkk. Dalam penelitiannya dengan judul “*effect of type of leachate on self-healing capacity of geosynthetic clay liner*” yang menggunakan 10gr/l larutan NaCl, 11,1 gr/l CaCl₂ dan 10ml/l larutan etanol sebagai cairan pengganti lindi.

D. Lumpur Limbah

Lumpur limbah merupakan hasil dari pengolahan air limbah untuk menghilangkan kandungan zat pengotor baik organik maupun anorganik yang ada dalam larutannya. Hasil pengolahan tersebut menyebabkan perpindahan konsentrasi dari kandungan zat pengotor ke dalam volume dari larutan disebut lumpur. Biasanya lumpur limbah adalah campuran lumpur primer dari primer dan biologis lumpur dari unit pengolahan biologis. Jika proses perawatan termasuk tersier pengolahan, maka lumpur limbah juga dapat mencakup lumpur tersier. Dengan demikian, lumpur limbah adalah bentuk terkonsentrasi dari kotoran yang diekstraksi dari air limbah domestik, dalam upaya untuk meningkatkan kualitas limbah. Pengelolaan lumpur yang tepat selama pembuangan memegang kunci keberhasilan operasi pengolahan air limbah (Vigneswaran, 2019).

Memodifikasi lumpur menjadi bahan seperti tanah yang bisa digunakan sebagai penutup harian dapat meringankan masalah kapasitas penyimpanan TPA dan pembuangan lumpur yang dihasilkan. Penutup harian yang akan digunakan tidak disarankan memiliki nilai permeabilitas yang terlalu tinggi ataupun terlalu rendah. Jika nilai permeabilitasnya tinggi, lapisan penutup harian tidak akan mencegah infiltrasi air dari luar ke dalam timbunan sampah tetapi jika nilai permeabilitasnya terlalu rendah, maka lapisan penutup harian akan memblokir migrasi lindi dan menyebabkan banyaknya limpasan lindi diatas permukaan lapisan penutup harian.

Lumpur dapat digunakan sebagai bahan alternatif untuk lapisan penutup harian TPA. Akan tetapi, lumpur biasanya memiliki kadar air dan kekuatan rendah, sehingga perlu dilakukan modifikasi untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Lumpur mengandung sejumlah besar bahan polutan yang dapat menyebabkan pencemaran sekunder terhadap lingkungan jika tidak ditangani dengan benar (Xihui Fan dkk, 2011). Nilai permeabilitas untuk lumpur limbah bervariasi yaitu berkisar antara $3,7 \times 10^{-5}$ cm/s and 4×10^{-2} cm/s (Qian dkk, 2010).

Baku mutu logam berat yang terdapat dalam cairan lindi lumpur limbah berdasarkan peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No.045 Tahun 2006 tentang pengelolaan lumpur bor, limbah lumpur dan serbuk bor pada kegiatan pengeboran minyak dan gas bumi dapat dilihat dalam tabel 2.

Tabel 2. Baku Mutu Logam Berat Lumpur Limbah

No.	Nama Kimia	Simbol	Baku Mutu, mg/l
1.	Arsen	As	5,0
2.	Barium	Ba	100,0
3.	Cadmium	Cd	1,0
4.	Chromium	Cr	5,0
5.	Copper	Cu	10,0
6.	Lead	Pb	5,0
7.	Mercury	Hg	0,2
8.	Selenium	Se	1,0
9.	Silver	Ag	5,0
10.	Zinc	Zn	50,0

Sumber: PerMen Energi dan Sumber Daya Mineral No.045 Tahun 2006

E. Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Abu ampas tebu (abu ketel) merupakan butiran terbentuk dari hasil pengolahan ampas tebu yang sudah diperas niranya dan telah melalui proses pembakaran pada ketel-ketel uap. Proses terjadinya abu ampas tebu (abu ketel) adalah sebagai berikut: (Fatoni, 2014).

- Setelah tebu ditebang kemudian diangkut ke pabrik gula.
- Batang-batang tebu tersebut kemudian digiling untuk dikeluarkan air gulanya sehingga tersisa ampas tebu yang dalam keadaan kering.
- Ampas tebu ini kemudian diangkut ke dapur pembakaran ketel-ketel uap dan dimanfaatkan sebagai bahan bakar mesin-mesin pabrik dengan cara dibakar.

- Sisa dari pembakaran ampas tebu tersebut yang dinamakan abu ampas tebu yang merupakan limbah dari pabrik gula tersebut.

Abu pembakaran ampas tebu dapat berupa *Bottom ash* dan *Fly Ash*, saat pembakaran ampas tebu keduanya memiliki unsur dan jumlah yang terkandung didalamnya sama. Tetapi memiliki perbedaan pada bagian ukuran butiran. *Fly ash* memiliki ukuran butiran yang lebih halus dari *Bottom ash*. Abu ampas tebu (abu ketel) terbentuk setelah proses pemanasan boiler di pabrik gula dengan menggunakan bahan bakar berupa ampas tebu. Abu ampas tebu (abu ketel) yang tertinggal pada tungku pembakaran disebut *Bottom ash*, sedangkan abu yang terbang ke cerobong asap disebut *Fly ash*.

Pembakaran ampas tebu akan menghasilkan abu ampas tebu (abu ketel) yang memiliki kandungan senyawa silikan (SiO_2) yang cukup besar yaitu sebanyak 50%, sehingga memiliki sifat *pozzolan* (senyawa bersifat semen), *pozzolan* merupakan bahan alam ataupun buatan yang sebagian besar terdiri dari unsur silika dan atau *alumina* yang reaktif. Silika yang terkandung dalam abu ampas tebu dalam bentuk butiran halus serta dengan kehadiran kelembaban, bahan ini secara kimia dapat bereaksi dengan *kalsium hidroksida* sehingga membentuk senyawa semen dalam kondisi suhu biasa. Butiran silika yang halus bila digunakan sebagai bahan campuran, dapat mengisi ruang pori-pori tanah ataupun material campuran lainnya.

Tabel 3. Komposisi Kimia Abu Ampas Tebu.

Senyawa Kimia	Jumlah %
SiO_2	55
Al_2O_3	5,1
Fe_2O_3	4,1
CaO	11
MgO	0,9
$\text{K}_2 + \text{Na}_2\text{O}$	1,4
SO_3	2,2

Sumber: Hafiz (2019).

Menurut Fatoni (2014), Penambahan abu ampas tebu (abu ketel) pada tanah dapat memperbaiki sifat fisis dan mekanis tanah yaitu menurunkan nilai permeabilitas tanah campuran disebabkan abu ampas tebu (abu ketel) dapat mengisi rongga-rongga tanah sehingga kemampuan tanah untuk meloloskan air menjadi kecil.

Penambahan abu ampas tebu (abu ketel) pada tanah lempung ekspansif dengan persentase yang ditentukan mampu mengurangi fraksi lempung yang memiliki sifat kembang susut dan mampu mengisi ruang yang terdapat pada butiran tanah sehingga menurunkan pengembangan/swelling (Budiman, 2013). Secara kimiawi, unsur-unsur dalam abu ampas tebu dapat mengurangi potensi pengembangan. Partikel lempung yang bermuatan negatif akan menyerap kation di sekitarnya termasuk ion H^+ pada air (H_2O). Ketika tanah lempung ekspansif dicampur dengan abu ampas tebu (abu ketel), unsur-unsur dalam abu ampas tebu (abu ketel) yang meliputi Ca, Al, dan Mg akan terion dan diserap oleh partikel lempung. Ion-ion unsur tersebut dapat menggantikan ion H^+ diantara lapisan partikel lempung dan mencegah penyerapan air oleh partikel lempung sehingga potensi pengembangan dapat berkurang (Hafiz, 2019).

F. Tanah

Tanah dapat berfungsi sebagai bahan konstruksi maupun sebagai media (tempat) membangun konstruksi bangunan-bangunan sipil (Wesley, 1975). Tanah merupakan sekumpulan dari berbagai mineral, bahan-bahan organik, dan endapan-endapan yang berada di atas batuan dasar yang relatif lepas. Melalui proses fisik dan kimia tanah terbentuk akibat terjadinya pelapukan batuan atau proses geologi yang terjadi didekat permukaan bumi. Pembentukan tanah secara fisik yaitu dengan mengubah tanah menjadi partikel yang kecil yang disebabkan akibat pengaruh erosi, air, angin, es dan manusia serta akibat suhu dan cuaca. Sedangkan pembentukan batuan melalui proses kimia dapat terjadi akibat pengaruh oksigen, air terutama air dengan kandungan asam dan alkali, karbondioksida dan proses kimia lainnya (Hardiyatmo, 2012).

Jenis tanah untuk lapisan penutup TPA perlu diperhatikan dengan seksama untuk menjamin fungsinya. Kualitas tanah penutup yang baik akan meningkatkan stabilitas TPA dan mengurangi penurunan muka TPA. Pasir bercampur kerikil (dengan daya dukung lebih dari 5 ton/m²) diperlukan untuk lalu lintas kendaraan. Untuk bagian permukaan yang miring jenis tanah yang diperlukan adalah tanah dengan nilai kelekatan tinggi dan tahan terhadap air hujan. Kualitas tanah penutup yang diharapkan adalah mudah dalam pengerjaan, ikatan pontibel cukup baik dan cukup kuat. Untuk ini bahan yang paling sesuai adalah campuran antara pasir, lanau dan lempung. Umumnya jenis berpasir sangat menguntungkan namun pasir saja tidak cukup karena mudah ditembus air. Tanah dengan ukuran partikel yang halus juga kurang menguntungkan karena sulit dalam pengerjaan. Tanah lempung saja juga tidak baik karena mudah mengalami retakan dalam keadaan kering (Nurdin, 2016).

1. Klasifikasi Tanah

Terdapat dua sistem pengklasifikasian tanah yaitu sistem klasifikasi tanah *Unified* atau *USCS (Unified Soil Classification System)* dan *AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)*. Sistem ini menggunakan sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair serta indeks plastisitas.

a. Sistem Klasifikasi Tanah USCS (Unified Soil Classification System)

Dalam sistem klasifikasi tanah ini, digunakan pengelompokan tanah dengan jenis ukuran butiran, berbutir kasar dan halus serta dilanjutkan dengan pengujian batas-batas Atterberg untuk jenis tanah dengan butiran halus (D.Wesley, 2012).

Tabel 4. Penggolongan Tanah dengan Ukuran Butiran

Tanah berbutir kasar				Tanah berbutir halus	
Kerikil	Pasir			Lanau	Lempung
	Kasar	Sedang	Halus		
60	2	0,6	0,2	0,06	0,002
Ukuran butir (mm)					

Sumber: Mekanika tanah untuk tanah endapan dan residu, D.Wesley, 2012.

1) Tanah berbutir kasar

Tanah berbutir kasar merupakan tanah yang memiliki ukuran butiran lebih besar dari 0,06 mm sebanyak kurang dari 50% yaitu diukur dengan menggunakan ayakan serta juga merupakan butiran terkecil yang dapat dilihat menggunakan mata telanjang. Untuk tanah dengan butiran kasar dikelompokkan menjadi dua bagian yaitu kerikil dan pasir yang memiliki bentuk dan ukuran yang beragam. Kerikil biasanya terdiri atas pecahan batu tetapi kadang juga terdiri atas mineral tunggal sedangkan untuk butiran pasir biasanya terdiri atas mineral tunggal seperti kwarsa (D.Wesley, 2012).

2) Tanah berbutir halus

Tanah dengan butiran halus yaitu tanah yang memiliki ukuran butiran lebih kecil dari 0,06 mm yang sebanyak 50% lolos ayakan dengan diameter terkecil saringan ukuran 200 yang dapat dilihat dengan mata telanjang. Pada tanah berbutir halus dilakukan pembagian menjadi dua kelompok, yaitu lanau dan lempung yang didasarkan terhadap sifat tanah tersebut serta dari batas-batas Atterberg. Adapun secara visual yang memberikan perbedaan antara lanau dan lempung melalui uji dilatansi yaitu untuk tanah lanau memiliki ciri jenis tanah lunak, cukup basah dan lengket jika diletakkan pada telapak tangan serta runtuh saat digetarkan sedangkan pada tanah lempung ciri ini tidak ditemukan.

b. Sistem klasifikasi *AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials Classification)*

Sistem klasifikasi AASTHO mengklasifikasikan kelompok tanah dalam 7 bagian yaitu dari A-1 sampai A-7 yang didasarkan pada diameter ukuran butiran serta batas-batas Atterberg. Dalam

sistem ini dilakukan penggolongan tanah dalam kelompok granular, lanau dan lempung. Dengan kelompok A-1 sampai A-3 merupakan tanah granuler (dimana tanah A-1 merupakan tanah granuler dengan gradasi baik, tanah A-2 kelompok tanah granuler yang kurang dari 35% lolos saringan no.200. sedangkan A-3 merupakan kelompok pasir bersih dengan gradasi buruk). Untuk kelompok klasifikasi A-4 sampai A-7 merupakan kelompok tanah lanau dan lempung yang lolos saringan nomor 200 dengan yang membedakan antara keduanya didasarkan pada nilai batas-batas Atterberg (Hardiyatmo, 2002).

G. Karakteristik Fisik Tanah

1. Kadar air dan berat isi

Kadar air adalah perbandingan antara berat air dengan berat butiran padat dalam tanah yang dinyatakan dalam persen.

2. Berat jenis

Berat jenis atau berat spesifik (*specific gravity*) adalah perbandingan antara berat volume butiran padat dengan berat volume air.

Tabel 5. Pengklasifikasian Tanah Berdasarkan Nilai Berat Jenis

Macam tanah	Berat jenis (Gs)
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lempung organic	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 - 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

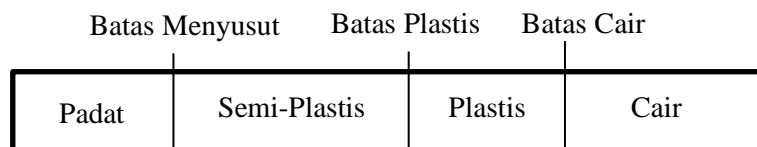
Sumber: Hary Crristady Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1, Edisi Ketiga*, 2002).

3. Analisis ukuran butiran

Analisa ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan, dengan ukuran diameter lubang tertentu. Penentuan ukuran butir untuk tanah berbutir kasar dilakukan dengan teknik menyaring yaitu dengan cara menyaring tanah lewat dengan satu unit saringan standar, tanah yang tertinggal pada tiap-tiap saringan ditimbang untuk mengetahui beratnya. Kemudian hitung presentase terhadap berat komulatif tanah, sedangkan untuk tanah dengan ukuran butir tanah kasar dapat ditentukan dengan cara sedimentasi melalui penentuan kecepatan mengendap butiran dalam larutan suspense.

4. Batas-batas Atterberg

Uji batas Atterberg dilakukan untuk penentuan sifat lempung atau lanau suatu tanah. Nilai dari batas Atterberg adalah kadar air pada batas keadaan plastis tanah. Kadar air yang menjadi batas dari tahap uji Atterberg yaitu batas susut, batas plastis, dan batas cair (Wesley, 2012).



Gambar 1. Batas-batas Atterberg (Wesley, 2012).

a. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair (LL), didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis.

b. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas plastis (PL), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung.

c. Batas Susut

Batas susut (SL), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Percobaan batas susut dilaksanakan dalam laboratorium dengan cawan porselin diameter 44,4 mm dengan tinggi 12,7 mm. Bagian dalam cawan dilapisi dengan pelumas dan diisi dengan tanah jenuh sempurna. Kemudian dikeringkan dalam oven.

d. Indeks plastisitas

Indeks plastisitas (PI) adalah selisih batas cair dan batas plastis, atau $PI = LL - PL$. Indeks plastisitas (PI) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis.

Tabel 6. Rentang Nilai Indeks Plastisitas Material Tanah

No.	Indeks plastisitas (PI)	Sifat	Macam tanah	Kohesi
1.	0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
2.	< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
3.	7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
4.	>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber: Mekanika Tanah (2002).

H. Kompaksi

Uji kompaksi atau pemadatan dilakukan untuk menentukan hubungan antara kadar air dengan berat volume serta untuk mengevaluasi tanah agar memenuhi persyaratan kepadatan. Proctor (1933) telah mengamati bahwa terdapat hubungan antara kadar air dan berat volume kering tanah padat, terdapat satu nilai kadar air optimum tertentu dalam mencapai berat volume kering maksimumnya untuk berbagai jenis tanah. Hal yang dapat mempengaruhi berat volume kering setelah pemadatan yaitu jenis tanah yang diuji, kadar air, serta usaha yang diberikan oleh alat penumbuknya (Hardiyatmo, 2002).

Penentuan karakteristik kepadatan tanah dapat dilakukan dengan pengujian standar uji proctor dengan prinsip pengujian menggunakan alat pemadat berupa silinder *mould* ($9,44 \times 10^{-4}$), tanah dalam *mould* dipadatkan dengan penumbuk yang beratnya 2,5 kg dengan tinggi jatuh 30,5 cm, tanah dipadatkan dalam tiga lapisan dengan tiap lapisan ditumbuk 25 kali pukulan. Dalam uji pemadatan percobaan diulangi paling sedikit 5 kali menggunakan variasi nilai kadar air tiap percobaan. Kemudian hubungan antara kadar air dan berat volume kering dapat di gambarkan dalam sebuah kurva, yang memperlihatkan nilai kadar air terbaik untuk mencapai berat volume kering terbesar atau kepadatan maksimum (Hardiyatmo, 2002).

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

I. Permeabilitas

Permeabilitas (kelulusan) tanah adalah parameter utama yang selalu digunakan dalam meneliti waktu yang dibutuhkan dalam menghitung migrasi (perkolasi) lindi menuju air tanah melalui media berpori seperti tanah clay (Damanhuri, 2010). Menurut D, Wesley (2012), tanah memiliki sifat permeabilitas, yaitu air dapat mengalir atau merembes melalui butiran, walaupun dengan kecepatan yang sangat lambat pada jenis tanah berbutir halus (lempung dan lanau).

Permeabilitas didefinisikan sebagai sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air atau minyak mengalir lewat rongga pori. Pori-pori tanah saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya, sehingga air dapat mengalir dari titik dengan tinggi energi tinggi ke titik dengan tinggi energi yang lebih rendah. Untuk tanah, permeabilitas dilukiskan sebagai sifat tanah yang mengalirkan air melalui rongga pori tanah (Hardiyatmo, 2002).

Sifat aliran dalam tanah dapat berupa aliran laminar ataupun turbulen. Aliran yang terjadi dipengaruhi oleh jenis tanah yang dialiri, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, dan bentuk geometri rongga pori. Terdapat dua istilah dalam kemampuan tanah meloloskan air yaitu *permeable* dan *impermeable*. Yang dimaksud dengan *permeable* yaitu tanah yang benar-benar memiliki sifat mudah dalam meloloskan air sedangkan *impermeable* yaitu tanah dengan kemampuan meloloskan air sangat kecil ataupun kedap terhadap air.

Terdapat dua macam pengujian untuk menentukan koefisien permeabilitas yang dapat dilakukan secara langsung di laboratorium yaitu pengujian permeabilitas dengan uji tinggi energi tetap (*constant-head*) dan pengujian dengan uji tinggi energi turun (*falling-head*). Adapun pengujian di laboratorium dengan penentuan nilai permeabilitas secara tidak langsung yaitu melalui uji konsolidasi dan uji kapiler horizontal.

1. Uji Permeabilitas dengan Tinggi Energi Tetap (*Constant-head*)

Pengujian ini cocok untuk jenis tanah granular. Dengan prinsip pengujian Tanah benda uji diletakkan di dalam silinder. Banyaknya air yang keluar ditampung di dalam gelas ukuran. Waktu pengumpulan air dicatat.

2. Uji Permeabilitas dengan Tinggi Energi Turun (*Falling-head*)

Uji permeabilitas dengan tinggi energi turun (*falling-head*) lebih cocok untuk tanah berbutir halus. Dengan prinsip kerja, tanah benda uji dimasukkan di dalam tabung. Pipa pengukuran didirikan mengalir lewat benda uji. Air dituangkan lewat pipa pengukur dan dibiarkan mengalir lewat benda uji. Ketinggian air pada awal pengujian (h_1) pada saat waktu $t_1 = 0$ dicatat. Pada waktu tertentu (t_2) setelah pengujian berlangsung, muka air menjadi h_2 (Hardiyatmo, 2002).

Koefisien permeabilitas terutama tergantung pada ukuran rata-rata pori yang dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, bentuk partikel, dan struktur tanah. Secara garis besar, makin kecil ukuran partikel, makin kecil pula ukuran pori dan makin rendah koefisien permeabilitasnya dan begitu

juga sebaliknya. Koefisien permeabilitas tanah biasanya dinyatakan pada temperature 20°C (Tronics, 2011).

Kisaran nilai koefisien permeabilitas beberapa jenis tanah dapat dilihat dalam tabel 7. yang dinyatakan dalam temperatur 20° C.

Tabel 7. Kisaran Permeabilitas Tanah pada Temperatur 20° C

Jenis Tanah	k (mm/det)
Butiran kasar	$10 - 10^{-3}$
Kerikil halus, butiran kasar bercampur pasir butiran sedang	$10^{-2} - 10$
Pasir halus, lanau longgar	$10^{-4} - 10^{-2}$
Lanau padat, lanau berlempung	$10^{-5} - 10^{-4}$
Lempung berlanau, lempung	$10^{-8} - 10^{-5}$

Sumber: *Mekanika tanah I (2002)*.

J. Penelitian Terdahulu

1. Penelitian Jun He, Dkk (2015), dengan judul *Modified sewage sludge as temporary landfill cover material*.

Penelitian mengenai pemanfaatan lumpur limbah yang telah distabilisasi sebagai bahan alternatif penutup harian TPA telah umum dilakukan jauh sebelum penelitian ini dilakukan. Namun stabilisasi lumpur limbah sebagai bahan penutup harian TPA menggunakan tanah dengan penambahan bahan campuran abu ampas tebu (abu ketel) dapat dikatakan hal yang baru.

Salah satu penelitian mengenai pemanfaatan lumpur limbah sebagai bahan penutup harian TPA yaitu dilakukan oleh Jun He, dkk (2015), dengan judul *Modified sewage sludge as temporary landfill cover material*. Lumpur limbah yang digunakan dalam penelitian tersebut dimodifikasi untuk mendapatkan sifat mekanik lumpur limbah sehingga memenuhi syarat untuk dimanfaatkan sebagai lapisan penutup harian TPA, dimana digunakan bahan berupa kapur, semen, tanah lanau dan Agregat

(TDA). Penelitian ini difokuskan terhadap sifat karakteristik lumpur limbah yaitu nilai koefisien permeabilitasnya. Dimana nilai koefisien permeabilitas yang didapatkan sebesar 1×10^{-5} cm/s dengan persentase bahan campuran yaitu (Lumpur limbah: kapur: semen: tanah lanau: Agregat (TDA) dengan rasio berturut-turut sebesar (100: 15:5:70:15).

2. Penelitian yang dilakukan oleh Mochamad Fatoni (2014), Tinjauan Kuat Tekan dan Permeabilitas Terhadap Tanah Lempung Yang Distabilisasi Dengan Kapur Dan Abu Ampas Tebu.

Tujuan dari penelitian ini yaitu: (1) untuk mengetahui besarnya kuat tekan bebas tanah asli dan tanah yang sudah distabilisasi menggunakan campuran kapur dan abu ampas tebu (abu ketel) pada kondisi kadar air optimum. (2) untuk mengetahui nilai koefisien permeabilitas tanah asli dan tanah yang sudah distabilisasi menggunakan campuran kapur dan abu ampas tebu pada kondisi kadar air optimum. Dalam penelitian ini, menggunakan kombinasi campuran (tanah, kapur dan abu ampas tebu), dengan memvariasikan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) pada pengujian yaitu variasi 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. kapur sebanyak 8% dengan tanah dengan butiran lolos saringan no. 4 dengan catatan setiap variasi sebanyak 3 kg sampel.

Dari hasil penelitian tersebut, diketahui untuk uji kuat tekan nilai kuat tekan optimum pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 3% dengan nilai kuat tekan sebesar 572,0 sedangkan nilai untuk tanah asli sebesar 185,6. Dan untuk pengujian permeabilitas dilihat dari hasil penelitian nilai koefisien terendah terjadi pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 3% yaitu sebesar $6,086 \times 10^{-10}$ dengan nilai rembesan pada tanah asli sebanyak $1,242 \times 10^{-9}$. Dari penelitian yang dilakukan oleh Fatoni (2014) dapat membuktikan bahwa tanah campuran dengan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) memiliki stabilitas dan daya dukung yang lebih baik dari pada tanah asli.

3. Penelitian Xihun Fan, Dkk (2019), yang berjudul meningkatkan konduktivitas hidrolik lumpur limbah padat untuk digunakan sebagai lapisan penutup sementara TPA.

Penelitian ini difokuskan kepada pengaruh konduktivitas hidrolik yang dipadatkan dengan menggunakan semen *Portland* biasa (OPC) atau semen *sulfoaluminat* (SAC). Lumpur limbah yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari pabrik pengolahan air limbah di Nanjing, Cina. Rasio campuran semen terhadap lumpur sebesar 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%. Lumpur limbah asli sebelum dicampur dengan semen memiliki kadar air 80% dan material organik 50% dari massa berat memiliki nilai konduktivitas hidrolik sebesar 10^{-6} - 10^{-7} yang terlalu rendah untuk lapisan penutup sementara TPA, namun setelah lumpur divetak dengan konten semen *sulfoaluminat* (SAC) lebih dari 40% menjadikan nilai konduktivitas hidrolik meningkat menjadi 10^{-4} yang menjadikan bahan layak sebagai lapisan sementara TPA.

4. Penelitian tentang pemanfaatan abu ampas tebu (abu ketel) yang digunakan sebagai bahan campuran beton porous dengan meninjau nilai permeabilitasnya.

Penelitian ini dilakukan oleh Hieryco Manalip, Dkk (2020) dengan judul penelitian “Pengaruh Substitusi Parsial Semen dengan Abu Ampas Tebu (abu ketel) terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas Beton Porous”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen dengan menggunakan abu ampas tebu (abu ketel) terhadap kuat tekan dan permeabilitasnya. Variasi campuran yang digunakan dalam penelitian ini yaitu penggunaan agregat kasar 55% dan variasi abu ampas tebu terdiri dari 5 variasi yaitu 0%, 5%, 10%, 15% dan 20%. Dari hasil pengujian didapatkan masing-masing nilai permeabilitas yaitu 4,92 cm/det; 4,26 cm/det; 3,42 cm/det; 3,03 cm/det; dan untuk variasi 20% didapatkan nilai permeabilitas paling kecil yaitu sebesar 2,75 cm/det. Dari hasil pengujian penambahan abu ampas tebu (abu ketel) dari 0% hingga 20% terjadi penurunan nilai permeabilitas.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Rancangan Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan sebagai bentuk penelitian eksperimental dengan melakukan pengujian di laboratorium. Sampel diberi perlakuan, diamati, dikaji dan dirangkum menjadi suatu kesimpulan dari penelitian. Penelitian dilakukan dengan melalui beberapa tahap pengerjaan, yaitu dimulai dengan memahami beberapa studi literatur terkait penelitian yang akan digunakan dalam penulisan laporan yang menjadi acuan dalam kegiatan penelitian. Selanjutnya pada tahap pengerjaan terbagi menjadi dua yaitu pengerjaan lapangan dan laboratorium, pada tahap pengerjaan lapangan dilakukan pengambilan sampel dilokasi, kemudian dilanjutkan dengan pengujian di laboratorium yaitu berupa pengujian sifat-sifat fisis dan sifat mekanis dari sampel uji.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui koefisien permeabilitas lumpur limbah yang dicampur dengan tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) yang akan digunakan sebagai bahan alternatif lapisan penutup harian TPA. Dalam perancangan penelitian dilakukan identifikasi terhadap variabel yang akan digunakan dalam penelitian yaitu variabel bebas dan variabel terikat.

Variabel bebas adalah variabel yang dalam sebuah eksperimen dilakukan manipulasi oleh peneliti sedangkan variabel terikat adalah variabel yang tidak dimanipulasi oleh peneliti tetapi memiliki hasil yang berpengaruh terhadap keadaan variabel bebas dalam sebuah penelitian. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan yaitu variasi penggunaan sampel uji dimana diberikan variasi lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 6 variasi. Sedangkan yang menjadi variabel terikat dalam penelitian ini yaitu nilai koefisien permeabilitas yang diuji dalam tiap variasi sampel uji.

B. Waktu dan Lokasi Penelitian

Lokasi tempat penelitian ini adalah di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang dimulai pada tanggal 15 Maret 2021 sampai selesai. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini berupa lumpur limbah yang berasal dari PT. KIMA (Kawasan Industri Makassar) yang berlokasi di JL. Perintis Kemerdekaan KM.15 Daya Kecamatan. Biringkanaya Kota Makassar, Sedangkan Abu Ampas Tebu (abu ketel) yang digunakan berasal dari PT. Perkebunan Nusantara XIV yang terletak di lokasi Desa Pa'rappunganta Kecamatan Polongbangkeng Utara Kabupaten Takalar Sulawesi Selatan, serta sampel uji tanah yang digunakan berada di Sungai Jeneberang Desa Sökkolia Kecamatan Bontomarannu Kab. Gowa derada pada koordinat -5.267528,119.511231. Untuk tanah dilakukan pengambilan langsung sampel asli yang belum terganggu yaitu pada bantaran sungai.



Gambar 2. Lokasi Sungai Jeneberang Desa Sökkolia

(Sumber : Google Earth, 2020)

C. Alat dan Bahan

1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu

- a. Lumpur limbah dari PT. Kawasan Industri Makassar sebagai bahan utama pembuatan lapisan penutup harian TPA.
- b. Abu ampas tebu (abu ketel) dari PT. Perkebunan Nusantara XIV Unit Usaha Pabrik Gula Takalar. Yang digunakan sebagai bahan campuran pembuatan material alternatif lapisan penutup TPA.
- c. Tanah dari sungai Jeneberang yang berasal dari bantaran sungai Jeneberang, Desa Sokkolia, Kecamatan Bontomarannu sebagai bahan campuran pembuatan material alternatif lapisan penutup TPA.
- d. Serta larutan kimia yang digunakan sebagai larutan pengganti cairan lindi atau menyerupai lindi yaitu larutan etanol dan CaCl_2 . Digunakan dalam pengujian permeabilitas variasi campuran lumpur limbah dengan abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah.

2. Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian saat melakukan pengujian sifat fisik dan mekanik tanah dan sampel uji merupakan alat yang disediakan oleh Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang berupa;

- a. Satu set alat pengujian kadar air dan berat isi yang digunakan dalam penentuan besar kadar air penentuan besar berat isi basah dan kering sampel yang diuji.



Gambar 3. Alat Pengujian Kadar Air

- b. Satu set alat pengujian berat jenis yang digunakan untuk mengetahui jenis tanah yang digunakan dalam penelitian dengan melihat nilai berat jenis sampel yang didapatkan.



Gambar 4. Alat Pengujian Berat Jenis

- c. Satu set alat pengujian Analisa saringan dan Hidrometer yang digunakan dalam penentuan besar ukuran butiran sampel serta susunan butir (gradasi) sampel uji.



Gambar 5. Alat Pengujian Analisa Saringan

- d. Satu set alat pengujian Batas-batas Atterberg yang digunakan untuk menentukan jenis tanah berbutir halus serta menggambarkan batas-batas konsistensi dari benda uji.



Gambar 6. Alat Pengujian Batas-Batas Atterberg

- e. Satu set alat pengujian Kompaksi digunakan Untuk mengetahui hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah dengan mendapatkan nilai kadar air maksimum untuk mendapatkan nilai pemadatan optimum tanah.



Gambar 7. Alat Pengujian Kompaksi

- f. Satu set alat uji Permeabilitas digunakan dalam penentuan nilai koefisien permeabilitas sampel.

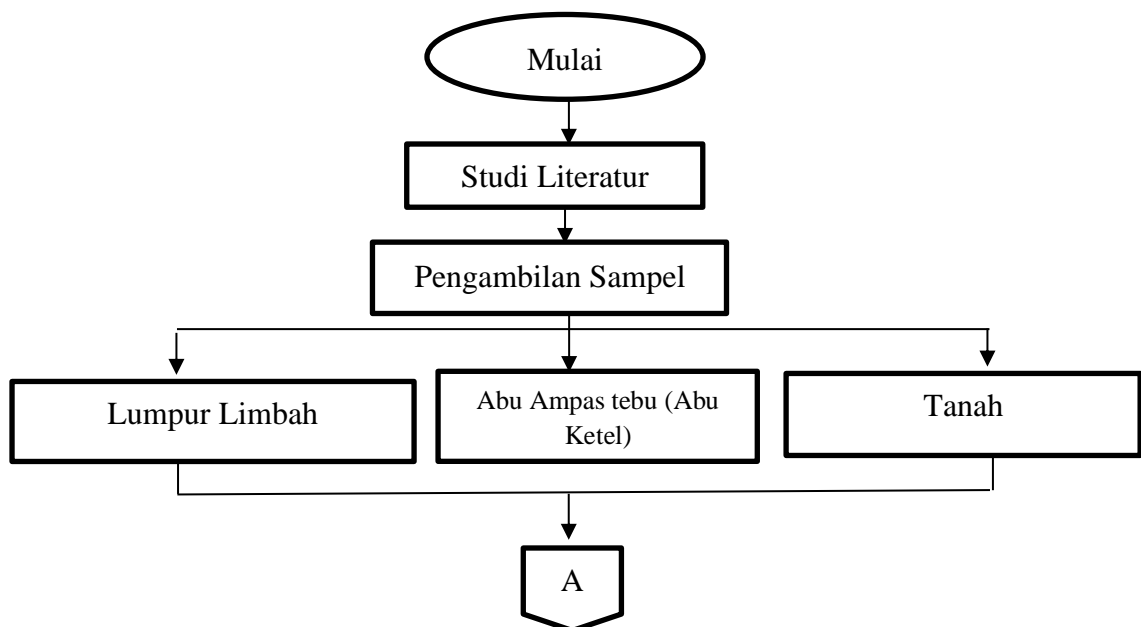


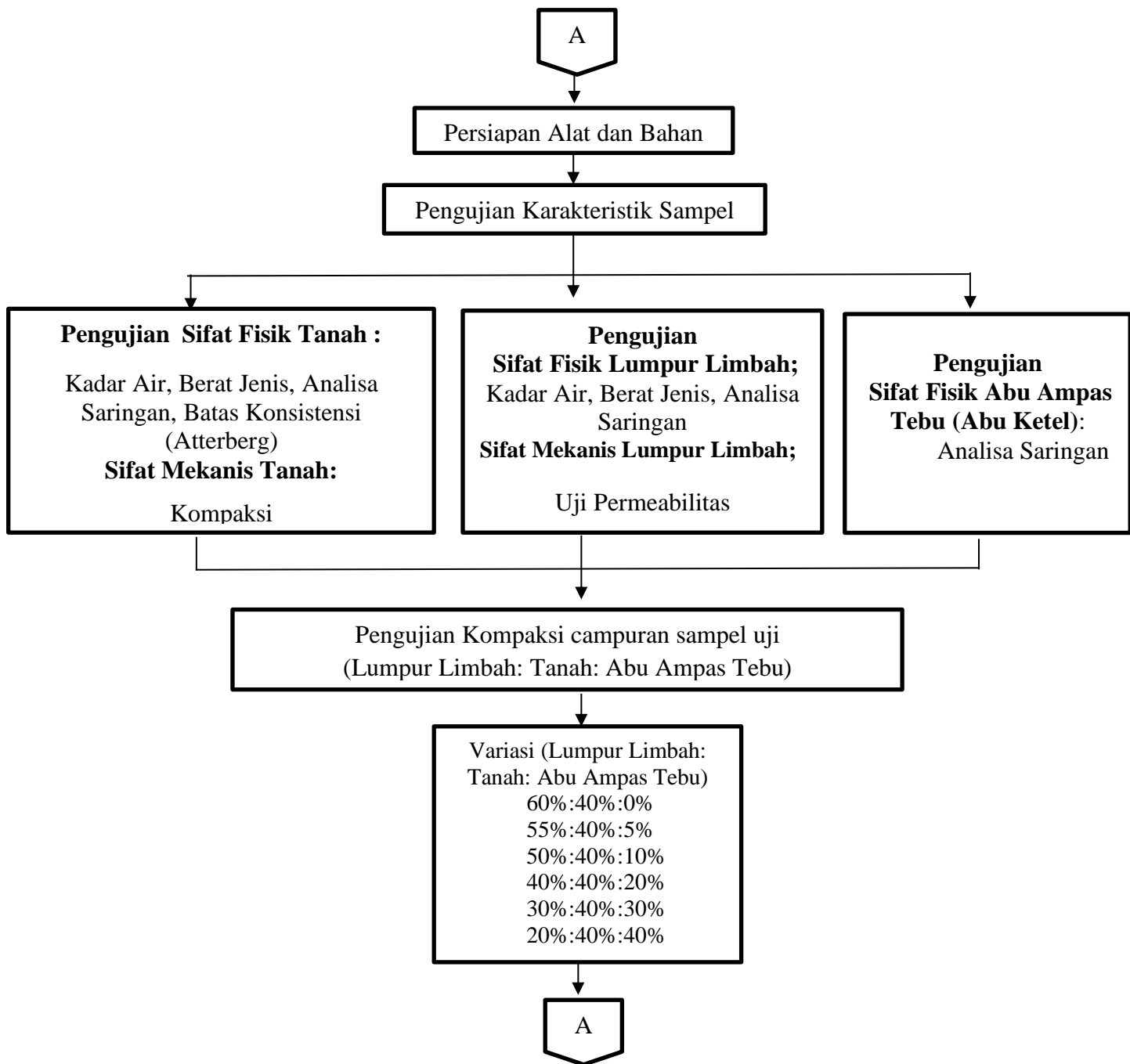
Gambar 8. Alat pengujian permeabilitas

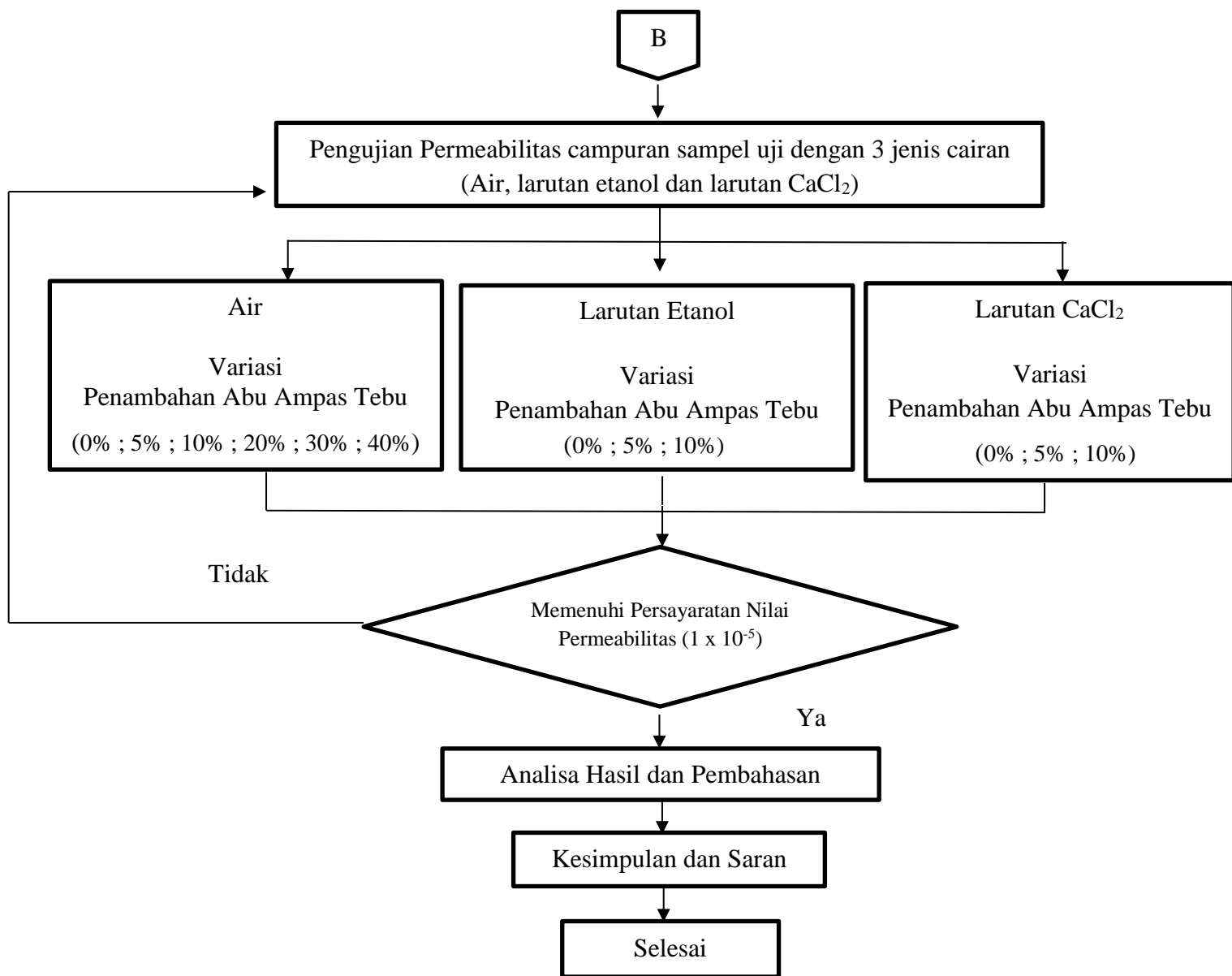
C. Kerangka Penelitian

1. Bagan alir penelitian

Agar penelitian yang dilakukan dapat berjalan secara sistematis dan tepat pada sasaran sehingga dapat tercapainya tujuan penelitian terlebih dahulu dibuat langkah-langkah pelaksanaan alur kegiatan penelitian. Dapat dilihat pada gambar 8. Bagan alir penelitian.







Gambar 9. Bagan alir proses pengerjaan tugas akhir

D. Teknik Pengumpulan Data

Terdapat beberapa metode-metode yang digunakan dalam mengumpulkan data penelitian yaitu terlebih dahulu mempelajari referensi terkait penelitian yang dilakukan melalui beberapa studi literatur. Sehingga didapatkan pemahaman tentang teori, bagaimana konsep, serta metode yang dapat dilakukan dalam mengumpulkan data-data yang dibutuhkan dalam penelitian. Teknik pengumpulan data dimulai dengan melakukan pengujian karakteristik sifat sampel lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) yang digunakan kemudian membuat

rancangan benda uji yaitu variasi campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel). Yang selanjutnya masing-masing diuji karakteristiknya dalam skala laboratorium.

1. Rancangan benda uji

Variasi kombinasi campuran benda uji dapat dilihat pada tabel 8, tiap variasi di uji sifat mekaniknya menggunakan pengujian kompaksi dan permeabilitas, serta dilakukan pengujian sifat fisik yaitu pengujian berat jenis. Untuk membuat rancangan benda uji dalam pembuatan lapisan penutup harian menggunakan lumpur limbah abu ampas tebu dan tanah dilakukan pemberian variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) yaitu sebanyak 6 variasi sedangkan pada penambahan tanah digunakan persentase yang tetap untuk tiap variasi hal ini untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan abu ampas tebu (abu ketel) terhadap campuran benda uji, sedangkan untuk penentuan persentase lumpur limbah yaitu total persentase campuran benda uji (100%) dikurangi dengan persentase tanah dan abu ampas tebu (abu ketel).

$$\begin{aligned} \text{Contoh variasi 0\% abu ampas tebu} &= 100\% - (40\% \text{ tanah} + 0\% \text{ abu ketel}) \\ &= 60\% \text{ lumpur limbah.} \end{aligned}$$

Tabel 8. Variasi Komposisi Campuran Benda Uji

Jenis Pengujian		Lumpur Limbah	Tanah	Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	Total
Kompaksi	Permeabilitas	60%	40%	0%	100%
		55%	40%	5%	
		50%	40%	10%	
		40%	40%	20%	
		30%	40%	30%	
		20%	40%	40%	

Dalam pengujian permeabilitas tiap variasi campuran benda uji digunakan tiga jenis cairan yaitu air dan cairan menyerupai air lindi yaitu

larutan Etanol dan CaCl_2 . Dengan konsentrasi tiap larutan dapat dilihat dalam tabel 9.

Tabel 9. Cairan dalam Pengujian Permeabilitas

Cairan	Komposisi
Air	-
Etanol	100 ml/lit
CaCl_2	11,1 gram.lit

2. Pengujian sifat fisik

Pengujian sifat fisik bertujuan untuk mengetahui indeks properties dari sampel uji sehingga dapat diketahui karakteristik dasar serta jenis klasifikasi tanah dan sampel uji yang digunakan dalam penelitian. Terdapat beberapa jenis pengujian sifat fisik tanah yang dilakukan dalam penelitian yaitu sebagai berikut:

a. Pengujian kadar air

Pengujian kadar air yang akan dilakukan mengacu pada standar ASTM D2216-71, yaitu dengan cara timbang tinbox kosong, masukkan tanah yang akan diperiksa ke dalam tinbox, kemudian timbang tinbox berisi tanah dan masukkan kedalam oven dengan suhu 105° - 110°C selama 24 jam. Setelah itu tinbox didinginkan pada suhu ruangan dan timbang kembali tinbox.

b. Pengujian berat isi

Pengujian berat isi yang akan dilakukan mengacu pada standar ASTM D2216. Dengan prosedur pelaksanaan yaitu siapkan ring berat isi dan cawan kemudian timbang dan ukur diameter dan tinggi ring yang digunakan. Kemudian cetak benda uji dalam ring sampai benda uji memenuhi permukaan ring, selanjutnya timbang kembali ring dan cawan yang berisi sampel uji. Kemudian masukkan kedalam oven dengan suhu 105° - 110°C selama 24 jam. Setelah di oven dinginkan dan timbang.

c. Pengujian berat jenis

Pengujian berat jenis bertujuan untuk menentukan berat jenis tanah yang lolos saringan No.40 dengan menggunakan piknometer. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM 854-06 (ASTM,2007) dengan prosedur pengerjaan yaitu, benda uji lolos saringan 40 dioven selama ± 24 jam. Siapkan dan timbang piknometer kosong, kemudian masukkan sampel uji yang telah di oven sebanyak 10gram. Selanjutnya tambahkan air kedalam piknometer sampai setengah penuh, kemudian keluarkan gelembung udara yang terperangkap didalam sampel uji dengan cara memanaskan piknometer diatas kompor listrik setidaknya selama 10 menit. Setelah itu, isi kembali piknometer dengan air dan diamkan di cawan perendam ± 24 jam. Selanjutnya tambahkan air suling sampai batas kalibrasi kemudian timbang. Keluarkan tanah dan air dari dalam piknometer dan masukkan ke dalam cawan penguap, setelah itu timbang dan oven selama ± 24 jam. Selanjutnya timbang berat tanah kering pada cawan penguap.

d. Pengujian analisa saringan dan hidrometer

Tes ini ditentukan dengan menggunakan satu unit saringan dengan ukuran diameter lubang tertentu. Sedangkan untuk pengujian hidrometer digunakan untuk uji distribusi ukuran butir tanah berbutir halus yaitu tanah yang lolos saringan No. 200 dengan ukuran diameter 0.075 mm. Pengujian analisa saringan dan hidrometer mengikuti standar ASTM 136-96a (ASTM,2007).

Pengujian analisa saringan dilakukan dengan cara menyiapkan tanah oven yang lolos saringan No. 4 sebanyak 500 gram, susun masing-masing saringan dengan urutan dari atas No. 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200 dan PAN. Masukkan sampel kedalam susunan saringan melalui saringan paling atas, kemudian letakkan susunan saringan ke alat mesin pengguncang. Hidupkan mesin

selama ± 15 menit. Selanjutnya timbang masing-masing berat saringan dan lakukan Analisa perhitungan.

Untuk pengujian hidrometer dilakukan dengan cara menyiapkan tanah kering oven sebanyak 50 gram lolos saringan 200, campur sampel uji dengan larutan pelarut sebanyak 125 ml. Masukkan larutan sampel uji kedalam gelas ukur dengan kapasitas 1000 ml lalu tambahkan air sampai batas 1000 ml. lalu letakkan gelas ukur kedalam bak air dengan memasukkan alat hidrometer berskala ke dalam gelas ukur, kemudian catat pembacaannya pada alat hidrometer sesuai dengan waktu yang ditentukan.

e. Pengujian batas-batas atterberg

Pada pengujian batas-batas Atterberg digunakan tanah kering oven yang lolos saringan No. 40. Dengan prosedur pengujian mengacu pada standar ASTM D-4318-00. Dengan pelaksanaan masing-masing batas konsistensi tanah dijelaskan sebagai berikut:

1) Pemeriksaan batas cair

Sampel uji sebanyak 250gram dimasukkan kedalam mangkok porselen campurkan air sampai membentuk pasta. Letakkan sebagian pasta kedalam mangkok kuningan, bentuk alur dibagian tengah cetakan tanah pada mangkok kuningan dengan menggunakan *grooving tool*. Nyalakan alat *Casagrande* dan hitung jumlah ketukan mangkok kuningan sampai tanah yang terpisah tadi dapat menyatu, jika jumlah ketukan sesuai yang diinginkan ambil sampel tanah dan letakkan kedalam tinbox kemudian timbang dan oven selama ± 24 jam.

2) Pemeriksaan batas plastis

Letakkan sampel kering oven sebanyak 20gram kedalam mangkok proselen, tambahkan air sampai tercampur rata. Lalu pilin sampel basah membentuk elips

hingga mencapai diameter 3,18 dengan panjang ± 1 cm. lakukan hingga hasil pilinan sebanyak ± 15 gram. Selanjutnya simpan hasil pilinan didalam tinbox dan oven selama ± 24 jam.

3) Pemeriksaan batas susut

Siapkan tanah kering oven sebanyak 100 gram, tambahkan air pada tanah sampai membentuk pasta krim. Siapkan pagoda lalu lapisi dengan Vaseline kemudian timbang. Isi pagoda dengan tanah berbentuk pasta sampai penuh lalu timbang kembali dan oven selama ± 24 jam. Sampel kering pada pagoda ditimbang, selanjutnya untuk menentukan volume dari pagoda isi pagoda kosong dengan air raksa, ratakan permukaan air raksa kemudian timbang.

3. Pengujian sifat mekanik tanah

Pemeriksaan sifat mekanik tanah yang dilakukan di laboratorium menggunakan alat uji dengan standar ASTM. Berikut pengujian mekanik terhadap sampel uji dan standar metode yang digunakan:

a. Pengujian Kompaksi

Pengujian pemadatan dilakukan menggunakan alat uji Proctor standart dengan metode ASTM D-698. Dalam pengujian ini digunakan sampel uji sekitar 2,7 kg lolos saringan no. 4.

Langkah dalam pengujian ini yaitu; timbang *mould* yang akan digunakan, lalu pasang *collar* diatas *mould*. Isi tanah basah kedalam *mould* dengan tiga lapis. Tiap lapisan harus ditumbuk sebanyak 25 kali menggunakan mesin kompaksi. Setelah itu angkat *collar* ratakan tanah yang terdapat dalam *mould*, lalu timbang. Keluarkan tanah dari dalam *mould* lalu ambil bagian tengah dari sampel yang telah dikeluarkan dari *mould* masukkan kedalam tinbox yang sudah ditimbang. Kemudian timbang kembali tinbox yang telah berisi tanah lalu oven. Untuk mendapatkan berat isi kering dan kadar air optimum ulangi langkah tersebut sebanyak 3

sampai 5 kali. Dengan catatan berat *mould* yang berisi tanah hasil kompaksi (tumbukan) yang awalnya akan meningkat sesuai kadar air yang meningkat dan kemudian akan menurun jika telah melebihi batas optimum.

b. Pengujian permeabilitas

Pengujian permeabilitas yang dilakukan dalam penelitian ini mengacu pada standar standar ASTM D-2434-68. dengan menggunakan metode *Constant Head* untuk sampel uji tanah asli sedangkan metode *Falling Head* digunakan untuk menentukan nilai koefisien permeabilitas benda uji dengan beberapa kombinasi campuran.

1) Metode *Constant Head*

Langkah pertama yang dilakukan yaitu timbang tabung sampel, batu pori, pegas, kertas saring dan penutupnya. Lalu ambil tabung permeabilitas masukkan batu pori dan kertas saring diatas batu pori. Kemudian masukkan sampel uji setinggi ± 10 cm, pasang batu pori diatas sampel. Dan letakkan pegas diatas batu pori. Pasang penutup tabung, kemudian timbang seluruh system tersebut. Pasang alat permeabilitas di dekat wastafel/sumber air. Jalankan air dari corong di atas. Atur sumber air yang masuk pada corong agar ketinggian airnya konstan pada waktu yang sama, biarkan air melewati sampel dan keluar melewati saluran keluar dari *constant head chamber* selama kurang lebih 10 menit. Setelah alirannya stabil lakukan pengujian dengan menghitung volume air yang keluar dengan menggunakan waktu tampung yang diinginkan.

2) Metode *Falling head*

Untuk pengujian permeabilitas menggunakan metode *Falling head* dilakukan penyiapan sampel sama halnya dengan metode *constant head*. Namun yang

membedakan saat pengujian pada metode ini digunakan buret sebagai tempat masuknya air sebelum air melalui sampel. Saat pengujian biarkan air yang masuk melalui buret melewati sampel sampai air menjenuhkan sampel dan tidak ada lagi gelembung udara dalam sampel. Kemudian tandai nilai h_1 dan h_2 untuk memulai pengujian. selanjutnya lakukan pengujian dengan menghitung waktu yang ditempu air dalam melewati h_1 sampai h_2 . Dengan bersamaan hitung jumlah air yang keluar melewati sampel uji.

Dalam penelitian ini, untuk menentukan nilai koefisien dari tiap variasi rancangan uji digunakan metode *Falling head*. Air yang dipakai dalam pengujian digunakan 3 jenis cairan yaitu air, Etanol dengan campuran sebanyak 100ml/lit air biasa dan CaCl_2 dengan campuran 11,1 gram/lit air basah. Pengujian menggunakan air buatan dari Etanol dan CaCl_2 digunakan untuk menguji beberapa variasi sampel uji yaitu dengan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 0%, 5% dan 10%. Larutan Etanol dan CaCl_2 diharapkan mampu berperan sebagai cairan lindi yang terdapat pada lokasi tempat pemrosesan akhir sampah (TPA).

E. Teknik Analisa

Penelitian ini bersifat kuantitatif. Data yang diperoleh dari pengujian di laboratorium diuji kemudian dianalisis menggunakan metode berdasarkan standar-standar yang berlaku serta mengacu pada teori-teori yang ada, sehingga didapatkan data berupa angka-angka yang dianalisis berdasarkan prosedur statistik kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Pada setiap pengujian yaitu uji sifat fisik dan mekanik tanah dilakukan analisa perhitungan terhadap data-data yang didapatkan dari hasil pengujian di laboratorium dengan mengacu pada

ASTM dan SNI yang berlaku berikut disajikan rumus-rumus analisa data yang digunakan pada setiap pengujian yang dilakukan.

1. Analisa Pengujian sifat fisik tanah

a. Kadar air dan berat isi

$$w = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} \times 100\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dengan :

w = Kadar air (gram)

W_w = Berat air (gram)

W_s = Berat butiran padat (gram)

W_1 = Berat tinbox kosong (gram)

W_2 = Berat tinbox + tanah basah (gram)

W_3 = Berat tinbox + tanah kering (gram)

b. Berat jenis

$$G_s = \frac{W_s}{(w_1 + w_s) - w_2}$$

Dengan :

G_s = Berat Jenis tanah

W_s = Berat tanah kering (gram)

W_1 = Berat piknometer dan air suling (gram)

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

c. Analisa ukuran butiran

$$\%finer = \frac{AR_{cp}}{W_s} \times \left(\frac{\text{persen lolos saringan No.200}}{100} \right)$$

Dengan :

$\%finer$ = Persen lolos

A = Koreksi berat jenis

R_{cp} = Koreksi pembacaan hydrometer untuk pembacaan persen lolos

W_s = Berat tanah kering (gram)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

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

Dengan :

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.

d. Batas-batas Atterberg

- Batas Cair (*Liquid Limit*)

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

Dengan :

N = jumlah ketukan

W_N = kadar air pada N tumbukan (%)

LL = batas cair tanah (%)

- Batas Plastis (*Plastic Limit*)

$$PL(\%) = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} \times 100\%$$

Dimana :

W_1 = Berat tinbox kosong (gram)

W_2 = Berat tinbox + tanah basah (gram)

W_3 = Berat tinbox + tanah kering (gram)

PL = Batas Plastis (%)

PI = Indeks plastisitas (%)

- Batas Susut

$$SL = w_i - \frac{(w_4 - w_5)}{13,6 (w_3 - w_1)} \times 100$$

Dengan :

W_i = Kadar air (%)

W_1 = berat pagoda yang telah dilapisi *vaseline* (gram)

$W3$ = Berat pagoda + tanah basah (gram)
 $W4$ = Berat air raksa yang memenuhi pagoda (gram)
 SL = Batas Susut (%)

- Indeks Plastisitas

$$PI (\%) = LL - PL$$

Dimana :

$W1$ = Berat tinbox kosong (gram)
 $W2$ = Berat tinbox + tanah basah (gram)
 $W3$ = Berat tinbox + tanah kering (gram)
 PL = Batas Plastis (%)
 PI = Indeks plastisitas (%)

2. Analisa Pengujian sifat Mekanik

a. Kompaksi

Untuk menghitung nilai kadar air dapat digunakan rumus sebagai berikut

$$w(\%) = \frac{w4 - w5}{w5 - w3} \times 100$$

Perhitungan berat volume kering pada saat tidak ada udara dalam

$$\text{pori} : \gamma_{\text{dry}} = \frac{w_{\text{dry}}}{v}$$

b. Permeabilitas

- Uji *Constand Head*

Persamaan untuk mendapatkan nilai koefisien permeabilitas sebagai berikut;

$$k = \frac{QL}{hAt}$$

Dengan:

A = Luar area sampel
 Q = volume air yang tertampung
 L = panjang benda uji

- Uji *Falling head*

Persamaan koefisien permeabilitas untuk *falling head* :

$$k_1 = 2,302 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$$

Dengan:

h = perbedaan tinggi pada sembarang waktu t (m)

A = luas potongan melintang benda uji (m^2)

a = luas area buret (m^2)

L = Panjang benda uji / panjang pengaliran(cm)

V_w = Volume air yang terkuras di buret (cm^3)

A = Luas area sampel (cm^2)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Penelitian

Sampel lumpur limbah yang dijadikan objek penelitian diambil dengan pertimbangan agar lumpur limbah yang ada dapat menjadi bahan alternatif sebagai lapisan penutup harian TPA sampah dan untuk memanfaatkan kembali limbah hasil buangan industri pabrik. Lumpur limbah yang digunakan memiliki sifat mekanik yang kurang baik yaitu daya dukung dan nilai permeabilitas yang rendah, sehingga dilakukan modifikasi untuk meningkatkan sifat mekaniknya, yaitu melalui pencampuran lumpur limbah dengan tanah dan abu ampas tebu (abu ketel).

Data penelitian diperoleh dari hasil pengujian di Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Hasanuddin. Data primer didapatkan melalui pengujian sifat fisik dan mekanik sampel uji; lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel). Untuk pengujian karakteristik fisis lumpur limbah dilakukan beberapa pengujian yaitu pemeriksaan kadar air, berat isi, berat jenis dan analisa saringan. Untuk pemeriksaan karakteristik fisis tanah dilakukan pengujian kadar air, berat isi, berat jenis, analisa saringan dan hidrometer, Batas-batas konsistensi Serta pengujian sifat mekanik yaitu uji kompaksi dan permeabilitas. Sedangkan untuk material abu ampas tebu (abu ketel) dilakukan penentuan karakteristiknya melalui pengujian analisa saringan.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian karakteristik mekanik sampel uji melalui pengujian kompaksi dan permeabilitas dengan pembagian beberapa variasi rancangan uji yang telah dijelaskan dalam sub bagian pada bab 3. Pengujian kompaksi dilakukan untuk mendapatkan nilai kepadatan maksimum tiap variasi sehingga data tersebut dapat digunakan dalam pengujian permeabilitas, dimana tingkat kepadatan yang digunakan dalam pengujian permeabilitas yaitu tingkat kepadatan 60% dari kepadatan maksimum.

B. Hasil Pengujian Karakteristik Fisis dan Mekanis Lumpur Limbah

Untuk mengetahui karakteristik dari sampel uji yang digunakan dilakukan pengujian karakteristik fisis dan mekanik. Karakteristik fisis merupakan sifat yang dimiliki suatu sampel yang didasarkan pada bentuk, ukuran, warna serta bau yang dimilikinya, untuk menentukan karakteristik fisis sampel benda uji digunakan pengujian berupa uji kadar air dan berat isi, berat jenis, Analisa ukuran butir, serta batas-batas Atterberg, sedangkan karakteristik mekanis yaitu sifat yang menentukan kekuatan serta daya dukung dari suatu sampel seperti dalam penelitian ini digunakan pengujian kompaksi dan permeabilitas sampel uji yang digunakan.

Dari hasil pengujian sifat fisis dan mekanik yang dilakukan dapat menggambarkan karakteristik lumpur limbah yang akan dimanfaatkan sebagai bahan alternatif lapisan penutup harian TPA. Sifat fisis dan mekanik lumpur limbah ditampilkan dalam tabel 10.

Tabel 10. Karakteristik Fisis dan Mekanik Lumpur Limbah

Karakteristik Lumpur Limbah	Satuan	Hasil
Kadar Air	%	73,78
Berat Jenis	-	2,158
Analisa Ukuran Butir :		
Tertahan saringan No. 10	%	8,80
Tertahan saringan No. 200	%	89,60
Lolos saringan No. 200	%	10,40
Cu	-	11,106
Cc	-	2,747
Permeabilitas	Cm/det	0,0790

Sumber: Hasil Pengujian (2021)

1. karakteristik fisis lumpur limbah
 - a. Kadar air

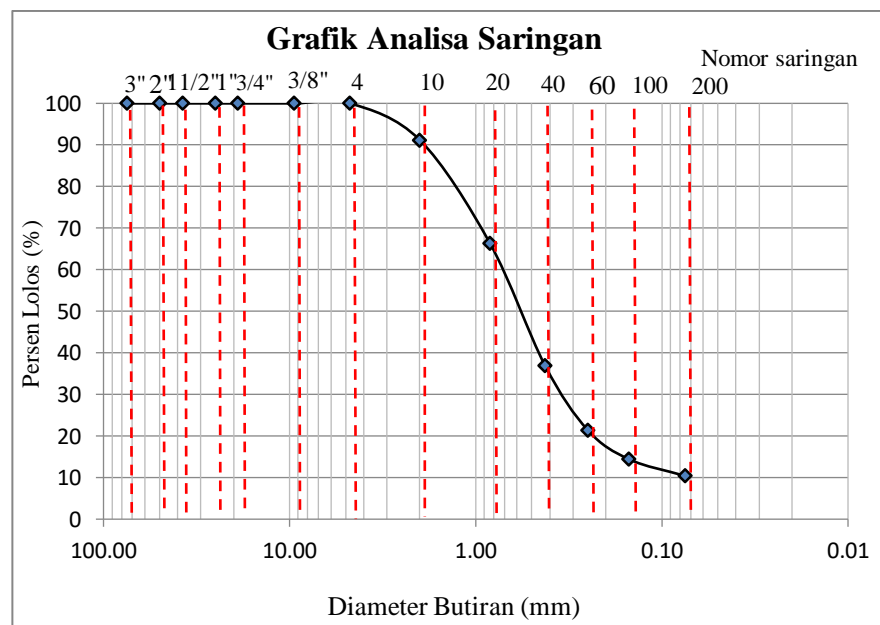
Nilai kadar air (W) lumpur limbah yang didapat dalam hasil pengujian sebesar 73,78%.

b. Berat jenis

Pada pengujian berat jenis didapatkan nilai berat jenis lumpur limbah sebesar 2,158. Berdasarkan nilai tersebut dapat diketahui bahwa jenis lumpur limbah yang digunakan dalam penelitian tidak termasuk dalam kategori jenis tanah.

c. Analisa saringan

Gambaran distribusi ukuran partikel lumpur limbah ditunjukkan pada gambar 10 diperoleh melalui pengujian analisa saringan, dari hasil pengujian didapatkan lumpur limbah yang tertahan saringan No. 200 dengan ukuran diameter 0,075 mm lebih dari 50% yaitu sebanyak 89,6% yang menunjukkan lumpur limbah tersebut termasuk dalam jenis ukuran butiran kasar dengan fraksi distribusi ukuran paling banyak memiliki kemiripan seperti pasir. Selain itu didapatkan koefisien gradasi (C_c) sebesar 2,747 sehingga dapat dikatakan bahwa lumpur limbah tersebut bergradasi baik karena memiliki koefisien gradasi $1 < C_c < 3$. Grafik hasil Analisa saringan lumpur limbah dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 10. Grafik Analisa Saringan Lumpur Limbah

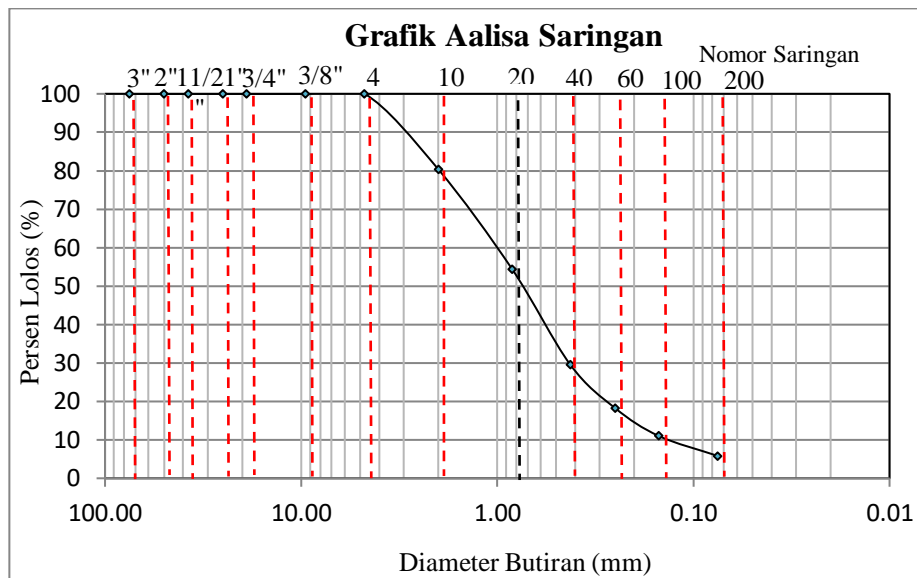
d. Karakteristik mekanis lumpur limbah

Untuk mengetahui kelayakan lumpur limbah sebagai bahan penutup harian TPA dilakukan pengujian mekanis yaitu uji permeabilitas guna mengetahui daya rembes yang dimiliki lumpur limbah.

Dari pengujian permeabilitas yang dilakukan didapatkan nilai koefisien permeabilitas lumpur limbah tanpa campuran tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) didapatkan nilai sebesar 0,0676 cm/det. Dimana nilai permeabilitas tersebut tidak memenuhi persyaratan sebagai penutup harian TPA sampah karena memiliki daya rembes yang cukup besar, oleh karena itu diperlukan campuran tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) untuk memperbaiki kelayakan lumpur limbah sebagai lapisan penutup harian TPA.

C. Hasil Pengujian Karakteristik Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Penentuan karakteristik yang dilakukan untuk material abu ampas tebu (abu ketel) yaitu pengujian Analisa saringan. Dari hasil uji didapatkan persentase butiran tertahan pada saringan nomor 10 sebanyak 19,60 % dan persentase tertahan disaringan 200 yaitu sebanyak 94,20 yang menunjukkan abu ampas tebu (abu ketel) tersebut termasuk dalam jenis ukuran butiran kasar dengan fraksi distribusi ukuran paling banyak memiliki kemiripan seperti pasir. Selain itu didapatkan juga nilai C_u sebesar 6,887 dan C_c 1,353 diketahui bahan uji dengan koefisien keseragaman (C_u) lebih besar dari 4 dan Koefisien gradasi C_c dengan nilai $1 < C_c < 3$ termasuk dalam kategori bahan bergradasi baik. Sehingga dapat dikatakan abu ampas tebu (abu ketel) yang digunakan memiliki sifat ukuran butiran dengan gradasi baik.



Gambar 11. Grafik Analisa Saringan Abu Ampas Tebu (Abu Ketel).

D. Hasil Pengujian Karakteristik Fisis dan Mekanis Tanah

Tanah yang digunakan dalam penelitian berfungsi sebagai bahan campuran lumpur limbah yang memiliki sifat kohesif yang dapat mengisi rongga-rongga lumpur limbah. Pengujian yang dilakukan di laboratorium dalam menentukan sifat fisis dan mekanik tanah terdiri dari pengujian kadar air, berat jenis, analisa ukuran butiran dan batas-batas Atterberg, serta pengujian mekanik yaitu kompaksi dan permeabilitas. Yang dapat dilihat pada tabel 11.

Tabel 11. Hasil Pengujian Karakteristik Tanah.

NO	Properties Tanah	Satuan	Hasil
1.	Kadar Air	%	51,94
3.	Berat Jenis	-	2,639
4.	Analisa Ukuran Butir dan Hidrometer	%	0,60
	Kerikil	%	11,20
	Pasir	%	87,94
	Lanau	%	0,26
	Lempung		
5.	Batas-Batas Atterberg		
	Batas Plastis	%	31,38

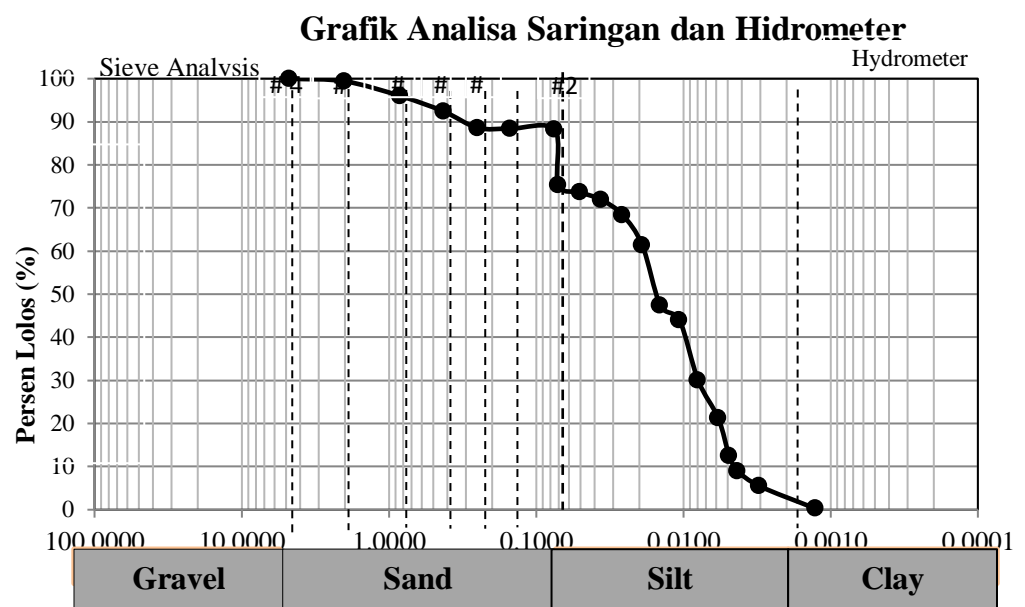
	Batas Cair	%	41,32
	Indeks Plastisitas	%	9,94
6.	Kompaksi		
	Berati isi kering maksimum	gr/cm ³	1,505
	Kadar air optimum	%	26,39
7.	Permeabilitas	cm/det	0,081

Sumber: Hasil Pengujian, 2021.

1. Pengujian karakteristik fisis tanah

- a. Kadar air Nilai kadar air tanah yang didapatkan dari hasil pengujian sebesar 51,94%.
- b. Analisa ukuran butiran

Hasil analisa ukuran butiran yang dilakukan dengan pengujian analisa saringan di ketahui hasil pengujian butiran tanah yang lolos saringan No. 200 sebanyak 88,2% yaitu lebih dari 50%. Yang menunjukkan bahwa tanah tersebut merupakan tanah berbutir halus. Sehingga perlu dilakukan analisa ukuran butiran untuk tanah berbutir halus melalui analisa hidrometer. Dari hasil uji hidrometer didapatkan jenis tanah yang diuji termasuk dalam kelompok jenis tanah *silt/lanau* yaitu sebanyak 87,94%.



Gambar 12. Grafik Analisa Saringan dan Hidrometer Tanah



Gambar 13. Pengujian Hidrometer Tanah

c. Berat Jenis

Nilai berat jenis tanah yang didapat dari hasil pengujian sebesar 2,639. Yang menunjukkan sampel tanah yang digunakan termasuk dalam jenis tanah lanau anorganik.

d. Batas-batas Atterberg

Pengujian batas-batas Atterberg yang dilakukan menunjukkan nilai batas konsistensi tanah yang digunakan, didapatkan nilai sebagai berikut;

1) Batas plastis (*plastic limit*)

Batas plastis tanah yaitu kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dengan semi padat. Dari hasil pengujian batas-batas Atterberg diperoleh nilai batas plastis sebesar 31,38%.

2) Batas cair (*liquid limit*)

Batas cair yaitu kadar air tanah pada kedudukan antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Nilai batas cair yang didapatkan dalam pengujian sebesar 41,32%.

3) Batas susut (*shrinkage limit*)

Batas susut merupakan persentase kadar air dimana pengurangan kadar air tidak mengakibatkan pengurangan volume tanah. Nilai batas susut yang didapatkan sebesar 25,46%.

4) Indeks platisitas (*plasticity Index*)

Nilai indeks platisitas didapatkan dari selisih antara batas cair dan batas plastis. Nilai indeks platisitas tanah didapatkan sebesar 9,94% yang menunjukkan tanah yang digunakan termasuk dalam kategori lempung berlanau dengan indeks platisitas sedang dan bersifat kohesif.

Tabel 12. Rentang Nilai Indeks Plastisitas Material Tanah

No.	Indeks plastisitas (PI)	Sifat	Macam tanah	Kohesi
1.	0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
2.	< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
3.	7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
4.	>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber: *Mekanika Tanah* (2002).

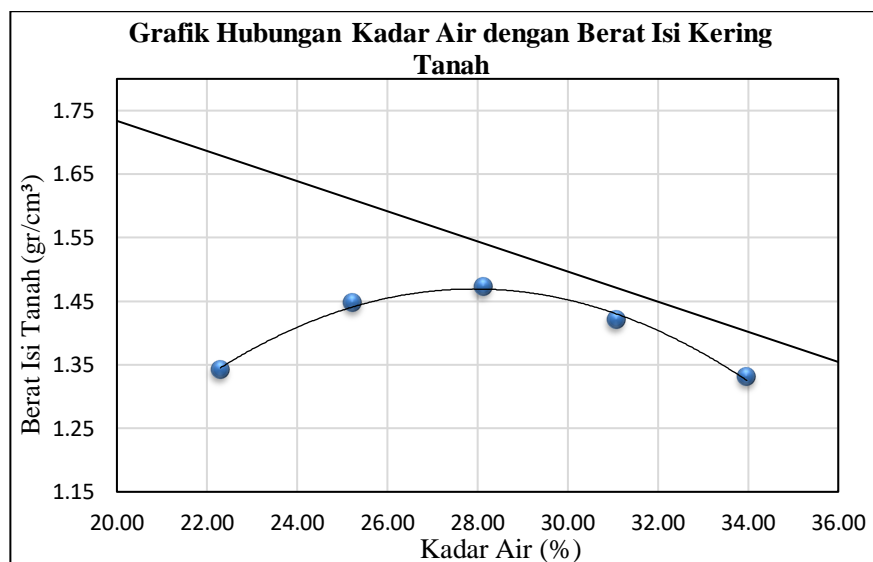


Gambar 14. Pengujian Batas-batas Atterberg

2. Pengujian karakteristik mekanis tanah

a. Kompaksi

Pada pengujian pemadatan yang dilakukan dengan metode *proctor standard test*. Didapatkan nilai kadar air optimum (w_{opt}) sebesar 31,32 % dengan berat isi kering maksimum 1,51 (gr/cm^3).



Gambar 15. Grafik Pengujian Kompaksi Tanah

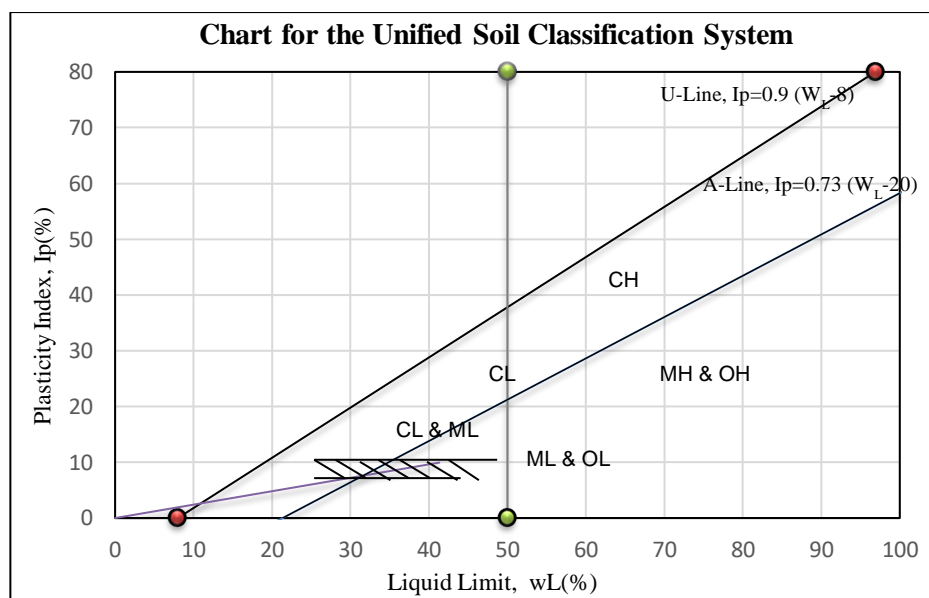
b. Permeabilitas

Nilai koefisien rembesan air dari tanah yang digunakan sebagai bahan campuran lumpur limbah yaitu sebesar 0,081 cm/det . Dimana tanah yang diuji merupakan sampel undisturbed yaitu masih dalam bentuk aslinya dilapangan tanpa dilakukan modifikasi dalam skala laboratorium.

3. Klasifikasi tanah

Tanah yang digunakan dalam penelitian ini sebagai bahan campuran lumpur limbah berdasarkan hasil pengujian analisa ukuran butiran didapatkan bahwa tanah lolos saringan No.200 lebih dari 50% yang menunjukkan bahwa tanah tersebut tergolong dalam jenis tanah berbutir halus. Terdapat dua sistem pengklasifikasian tanah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sistem klasifikasi USCS dan AASTHO.

Pada pengklasifikasian tanah berdasarkan sistem klasifikasi USCS (*The Unified Soil Classification System*), Untuk tanah berbutir halus dengan nilai batas cair (LL) sebesar 41,32% dengan indeks plastisitas tanah sebesar 9,94% yang didapatkan dari hasil pengujian batas-batas Atterberg, sehingga didapatkan jenis tanah termasuk golongan ML yang berarti bahwa tanah yang digunakan merupakan tanah lanau dengan batas cair dan indeks plastisitas sedang.



Gambar 16. Diagram indeks plastisitas tanah

Sedangkan untuk pengklasifikasian tanah berdasarkan sistem AASTHO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), dari hasil analisa saringan tanah yang digunakan dalam sistem klasifikasi AASTHO tanah termasuk dalam kelompok jenis tanah berlanau dan lempung yaitu A-4 sampai A7. Jika dilanjutkan pengklasifikasian tanah berdasarkan hasil pengujian batas-batas Atterberg diketahui bahwa nilai batas cair dan indeks plastisitas yang didapatkan menunjukkan bahwa kelompok tanah yang digunakan termasuk dalam klasifikasi kelompok A-5 yaitu tanah berlanau.

Tabel 13. Klasifikasi AASTHO Untuk Butiran Halus

Klasifikasi tanah	Lolos saringan No.200	Batas Cair	Indeks plastisitas	Tipe material	Penilaian sebagai material	
A-4	Min. 36	Maks. 40	Maks. 10	Lanau	Biasa-buruk	
A-5	Min. 36	Min. 41	Maks. 10	Lanau	Biasa-buruk	
A-6	Min. 36	Maks. 40	Min. 11	Lempung	Biasa-buruk	
A-7	A-7-5	Min. 36	Min. 41	Min. 11	Lempung	Biasa-buruk
	A-7-6	Min. 36	Maks. 40	Min. 11	Lempung	Biasa-buruk

Sumber: *Mekanika Tanah (2012)*.

E. Hasil Pengujian Berat Jenis Campuran Lumpur Limbah dengan Tanah dan Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

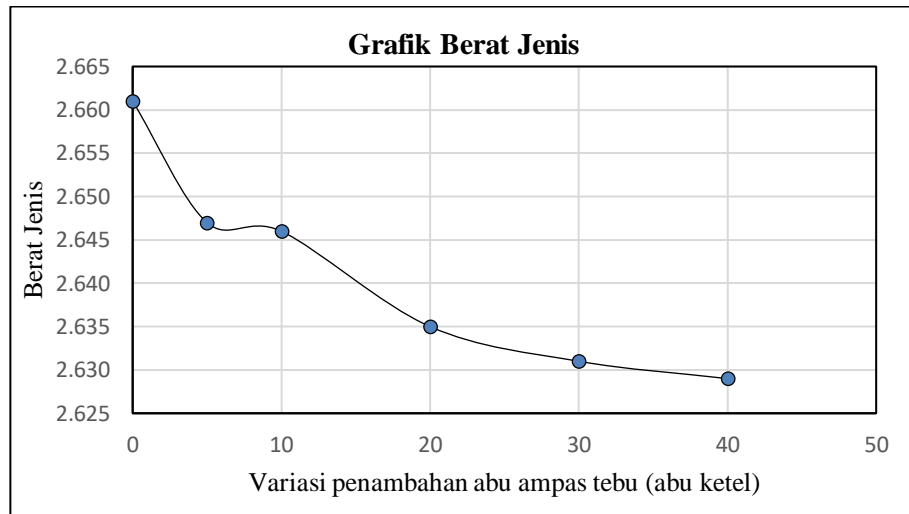
Pengujian berat jenis untuk tiap variasi campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) dilakukan untuk mendapatkan nilai berat jenis yang berfungsi sebagai data pendukung dalam pengolahan data pengujian kompaksi dan permeabilitas. Berikut disajikan data berat jenis tiap variasi campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) dalam bentuk tabel dan grafik;

Tabel 14. Rekapitulasi Berat Jenis Campuran Benda Uji

No.	Jenis Sampel	Berat Jenis
1.	Lumpur Limbah	2,1
2.	Abu ampas tebu 0%	2,661
3.	Abu ampas tebu 5%	2,647
4.	Abu ampas tebu 10%	2,646
5.	Abu ampas tebu 20%	2,635
6.	Abu ampas tebu 30%	2,631
7.	Abu ampas tebu 40%	2,629

Sumber : *Hasil pengujian 2021*.

Untuk mengetahui tren nilai berat jenis tiap variasi campuran. disajikan dalam bentuk grafik sebagai berikut;



Gambar 17. Grafik Berat Jenis Campuran Benda Uji.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai berat jenis variasi campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) cenderung mengalami penurunan yaitu dari variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 0% sampai 40%. Diketahui bahwa nilai berat jenis lumpur limbah tanpa penambahan bahan campuran sebesar 2,158 yang menunjukkan lumpur limbah bukan termasuk dalam jenis tanah sedangkan untuk nilai berat jenis sampel campuran menunjukkan angka berat jenis berkisar antara 2,629 samapi 2,650 yang menunjukkan bahwa bahan campuran benda uji termasuk dalam kategori jenis tanah.



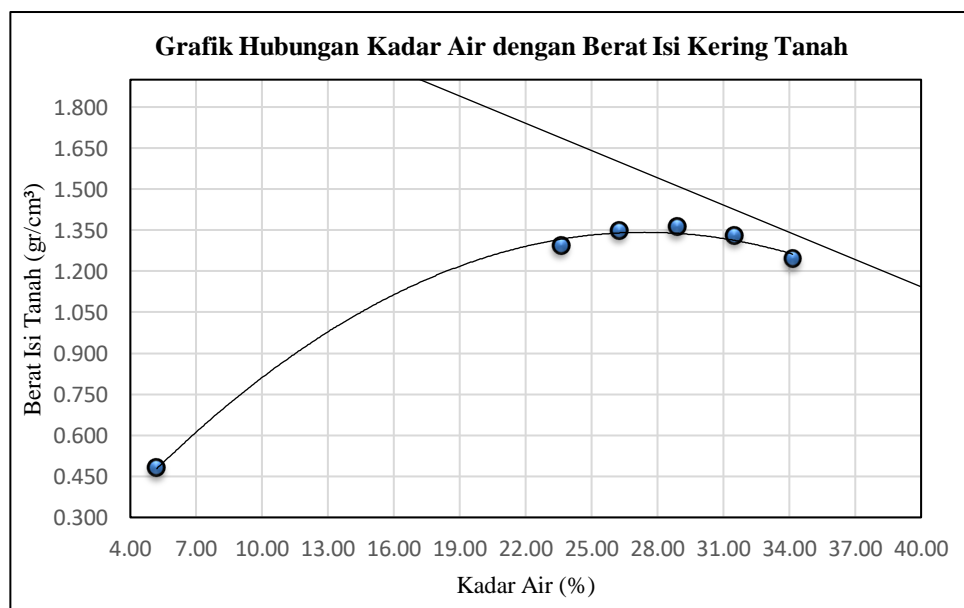
Gambar 18. Pengujian berat jenis campuran benda uji

F. Hasil Pengujian Kompaksi Campuran Lumpur Limbah Abu Ampas Tebu (Abu Ketel) dan Tanah

Untuk mengetahui kelayakan lumpur limbah yang dicampur dengan tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) sebagai bahan alternatif lapisan penutup harian TPA. Dilakukan pengujian karakteristik campuran benda uji yaitu pengujian kompaksi dan permeabilitas.

Uji pemadatan dengan kompaksi merupakan usaha untuk mendapatkan kepadatan maksimum (γ_{dry}) dan kadar air optimum (w_{opt}) dengan usaha pemadatan standar. Pengujian kompaksi yang dilakukan untuk mengetahui tingkat kepadatan tiap variasi campuran benda uji. Dari pengujian kompaksi didapatkan nilai berat kering maksimum dan kadar air optimum tiap variasi. Nilai kompaksi dalam penelitian ini dijadikan acuan dalam menentukan berat tiap sampel yang digunakan dalam pengujian permeabilitas. Yaitu digunakan 60% dari kadar air optimum. Dibawah ini adalah grafik pengujian kompaksi tiap variasi kombinasi campuran sampel uji, yang menggambarkan hubungan antara kadar air dengan berat kering optimum sampel uji.

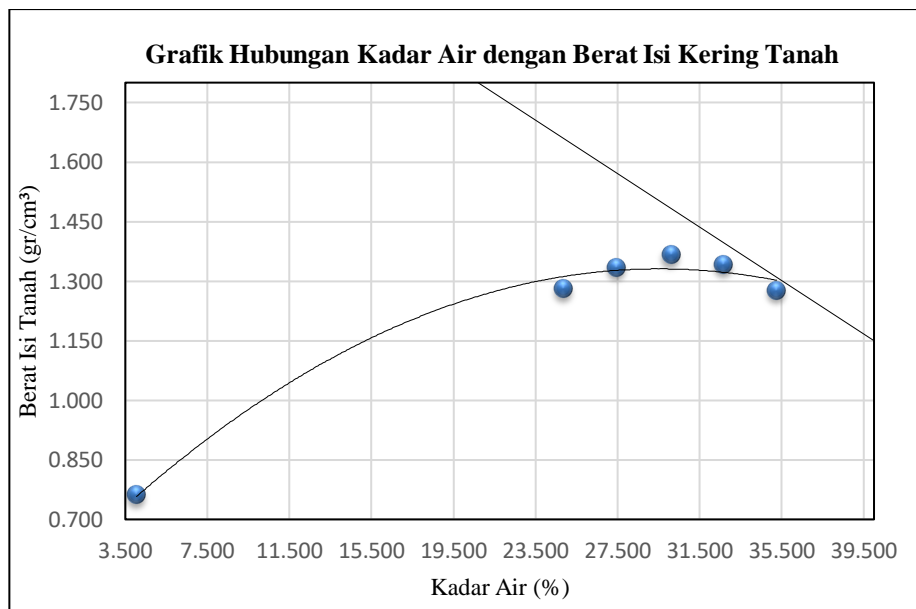
1. Hasil pengujian kompaksi dengan variasi 0% abu ampas tebu (abu ketel)



Gambar 19. Grafik Kompaksi Variasi 0% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Berdasarkan gambar 19 diketahui bahwa nilai berat kering optimum sebesar $1,359 \text{ gr/cm}^3$ dengan kadar air sebesar 28,88% pada pengujian benda uji dengan kombinasi campuran lumpur limbah sebanyak 60% dengan tanah sebanyak 40% tanpa penambahan abu ampas tebu (abu ketel).

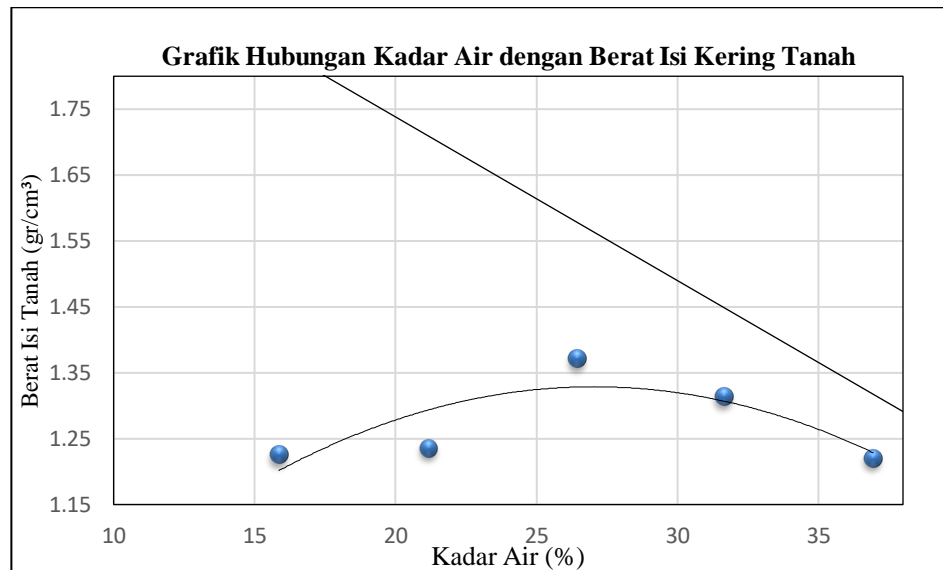
2. Hasil pengujian kompaksi dengan variasi 5% abu ampas tebu (abu ketel)



Gambar 20. Grafik Kompaksi Variasi 5% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Dari gambar diatas pengujian kompaksi dengan penggunaan lumpur limbah sebanyak 55%, tanah sebanyak 40% dan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 55%. Dapat dilihat nilai berat kering optimum sebesar $1,365 \text{ gr/cm}^3$ dengan kadar air sebesar 30,10%.

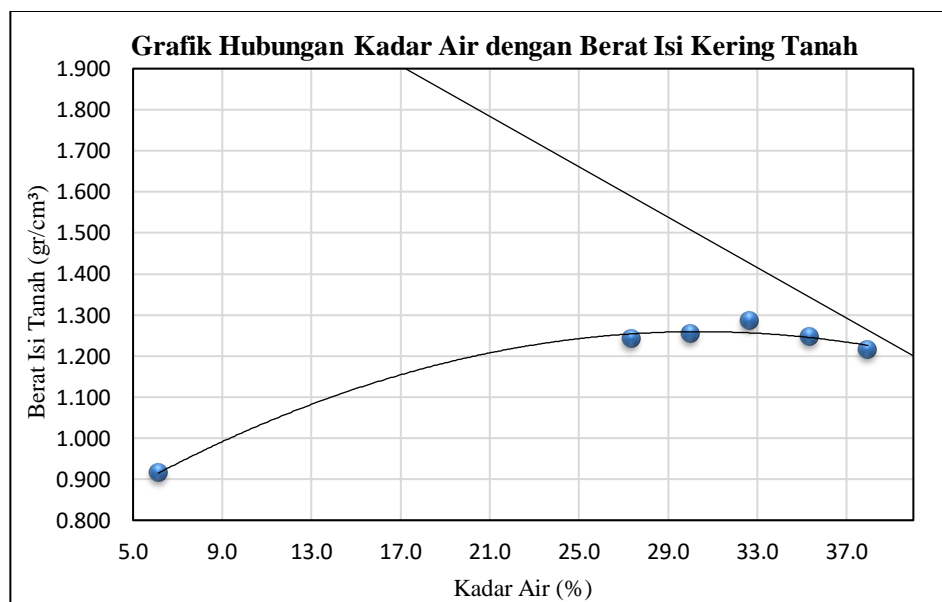
3. Hasil pengujian kompaksi dengan variasi 10% abu ampas tebu



Gambar 21. Grafik Kompaksi Variasi 10% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Gambar 21 menggambarkan nilai berat kering optimum sebesar 1,370 gr/cm³ dengan kadar air sebesar 26,45%. Pada pengujian kompaksi dengan variasi campuran penggunaan lumpur limbah sebanyak 50%, tanah sebanyak 40% dan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10%.

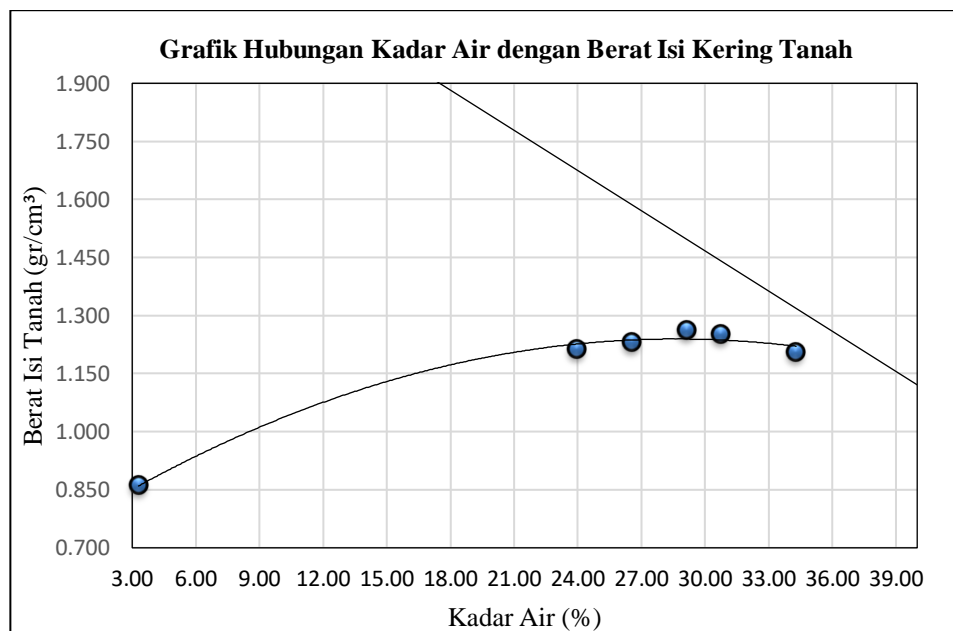
4. Hasil pengujian kompaksi dengan variasi 20% abu ampas tebu (abu ketel)



Gambar 22. Grafik Kompaksi Variasi 20% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Berdasarkan gambar 22 diketahui bahwa nilai berat kering optimum sebesar $1,285 \text{ gr/cm}^3$ dengan kadar air sebesar 32,65% pada pengujian sampel uji dengan kombinasi campuran lumpur limbah sebanyak 40%, dengan campuran tanah sebanyak 40% dan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 20%.

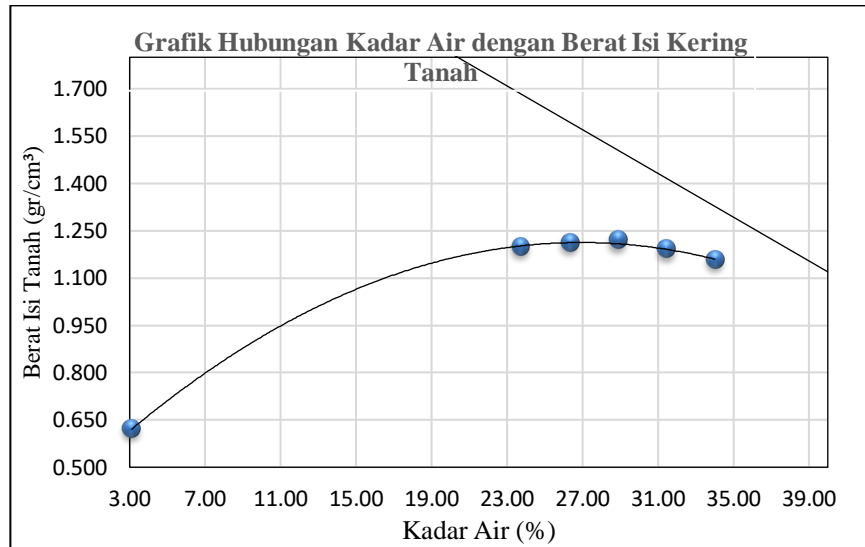
5. Hasil pengujian kompaksi dengan variasi 3% abu ampas tebu (abu ketel)



Gambar 23. Grafik Kompaksi Variasi 30% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Berdasarkan gambar 23 pada pengujian kompaksi dengan penggunaan lumpur limbah sebanyak 30%, tanah sebanyak 40% dan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 30%. Dapat dilihat nilai berat kering optimum sebesar $1,262 \text{ gr/cm}^3$ dengan kadar air sebesar 29,12%.

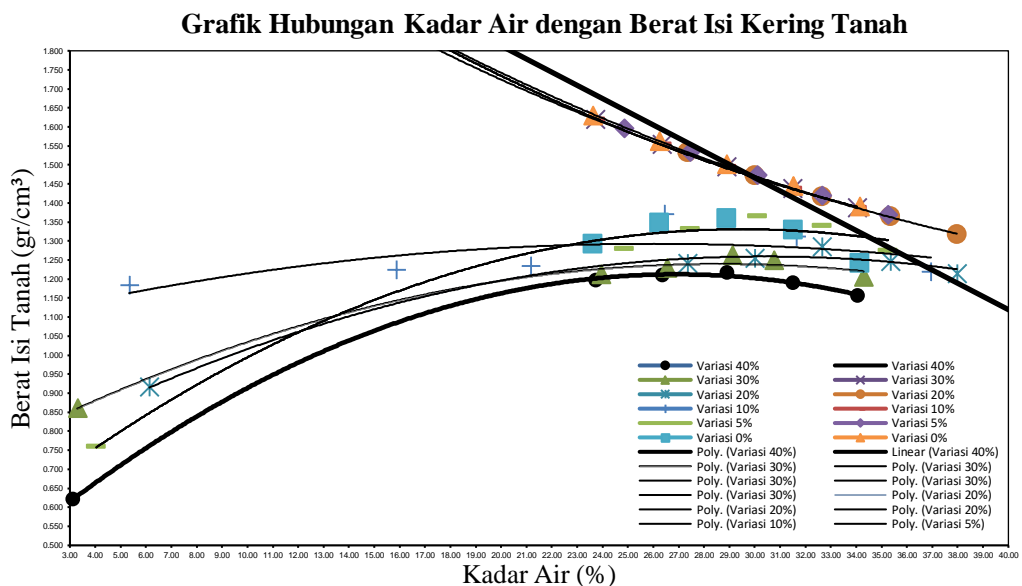
6. Hasil pengujian kompaksi variasi 40% abu ampas tebu (abu ketel)



Gambar 24. Grafik kompaksi variasi 40% abu ampas tebu (abu ketel)

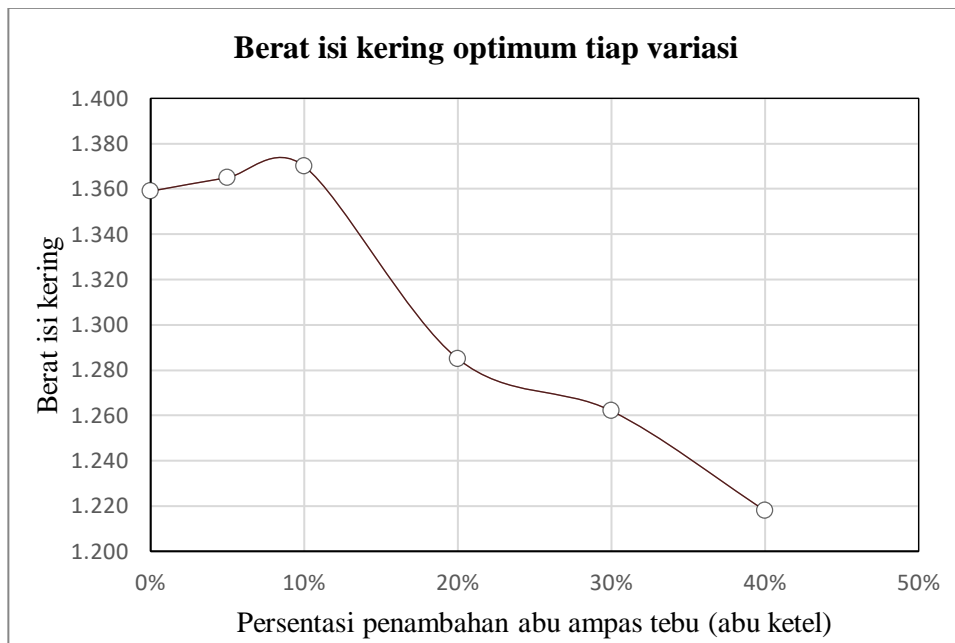
Gambar 24 menunjukkan nilai berat kering optimum sebesar 1,218 gr/cm³ dengan kadar air sebesar 28,88%. Pada pengujian kompaksi dengan variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 40%.

Grafik rekapitulasi pengujian kompaksi campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah dapat dilihat pada gambar 25.



Gambar 25. Grafik rekapitulasi hasil pengujian kompaksi campuran sampel uji

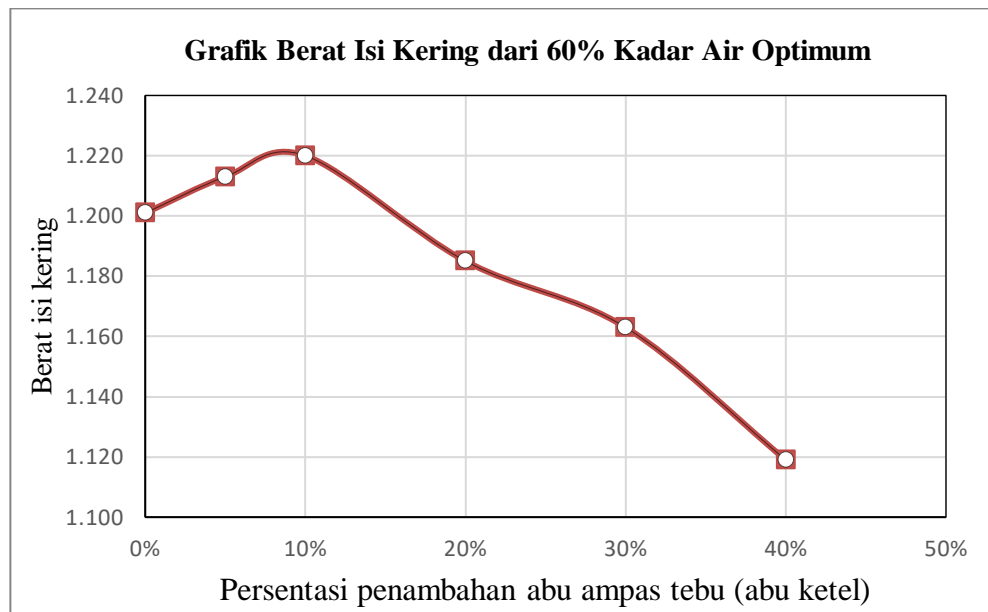
Grafik berat isi kering optimum semua variasi campuran benda uji lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) dapat dilihat pada gambar 26.



Gambar 26. Grafik berat isi kering optimum campuran benda uji

Gambar diatas merupakan data berat isi kering optimum campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) menunjukkan bahwa material campuran yang memiliki nilai berat isi kering optimum tertinggi yaitu pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10% sedangkan nilai berat isi kering terendah yaitu pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 40%, sehingga dapat dikatakan variasi yang memiliki tingkat kepadatan tertinggi yaitu pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10%.

Data kompaksi yang digunakan dalam pengujian permeabilitas yaitu data 60% kadar air optimum. Grafik data berat isi kering yang digunakan dalam pengujian permeabilitas kombinasi campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) dapat dilihat pada gambar 27.



Gambar 27. Grafik Berat Isi Kering.

G. Hasil Pengujian Permeabilitas Campuran Lumpur Limbah dengan Tanah dan Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Pengujian permeabilitas untuk mendapatkan nilai seberapa besar kemampuan material campuran dalam meloloskan air pada pori-porinya. Dalam mengetahui persyaratan nilai permeabilitas untuk lapisan penutup harian TPA digunakan rujukan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Jun He, Dkk (2015) yang mengatakan bahwa besar nilai permeabilitas yang ideal untuk lapisan penutup harian yaitu sebesar 1×10^{-5} .

Jumlah sampel yang digunakan dalam pengujian permeabilitas berdasarkan data hasil kompaksi yaitu digunakan tingkat kepadatan 60% dari kadar air optimum. Dari data hasil kompaksi didapatkan rincian komposisi campuran material benda uji dapat yang dilihat pada tabel 15. Berat tiap sampel merupakan persentase terhadap nilai berat tanah kering (w_{dry}) yang merupakan hasil perkalian antara berat isi kering (γ_{dry}) hasil kompaksi dengan volume sampel ($302,78 \text{ cm}^3$). Sedangkan untuk penambahan air yang diberikan berdasarkan nilai kadar air hasil kompaksi dan besar nilai berat tanah kering (w_{wet}).

Tabel 15. Komposisi Campuran Benda Uji

Jenis Sampel	Lumpur Limbah	Tanah	Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	Penambahan Air
Lumpur limbah 60% + tanah 40% + Abu ampas tebu 0%	218,18 gr	145,45 gr	0,00 gr	63,01gr
Lumpur limbah 55% + tanah 40% + Abu ampas tebu 5%	202,00 gr	146,91 gr	18,36 gr	66,33gr
Lumpur limbah 50% + tanah 40% + Abu ampas tebu 10%	184,69 gr	147,76 gr	36,94 gr	58,59gr
Lumpur limbah 40% + tanah 40% + Abu ampas tebu 20%	143,52 gr	143,52 gr	71,76 gr	70,29gr
Lumpur limbah 30% + tanah 40% + Abu ampas tebu 30%	105,64 gr	140,85 gr	105,64 gr	61,52gr
Lumpur limbah 20% + tanah 40% + Abu ampas tebu 40%	67,76 gr	135,52 gr	135,52 gr	58,71gr

Sumber: Hasil pengujian 2021.

Pengujian permeabilitas variasi campuran dilakukan dengan metode *falling head* dapat dilihat pada gambar 29. Untuk penggunaan cairan dalam pengujian permeabilitas untuk mengalir air melewati sampel uji digunakan 3 jenis cairan yang dapat dilihat pada tabel 16.

Variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) yang digunakan dalam pengujian permeabilitas menggunakan air terdiri dari 6 variasi yakni 0%, 5%, 10%, 20%, 30% dan 40% sedangkan untuk penggunaan larutan Etanol dan CaCl₂ hanya dilakukan pengujian sampel benda uji sebanyak 3 variasi yaitu 0%, 5% dan 10%, hal ini disebabkan karena saat pengerjaan dilaboratorium terdapat kendala dalam pencetakan sampel yakni tidak tersedianya alat pencetak dalam pembuatan sampel permeabilitas menggunakan alat *press hidrolik* sehingga dalam melakukan penelitian ini dilakukan pencetakan langsung pada tabung permeabilitas sedangkan diketahui bahwa saat pencetakan sampel menggunakan alat *press hidrolik* terdapat tekanan yang besar dari alat tersebut untuk membentuk sampel

sesuai yang diinginkan sehingga dikhawatirkan akan terjadi kerusakan pada tabung permeabilitas, hal ini yang menjadi alasan dilakukan pengurangan variasi pada pengujian permeabilitas dalam penggunaan larutan Etanol dan CaCl₂. Dengan melihat pengujian yang telah dilakukan untuk semua variasi dalam penggunaan cairan berupa air didapatkan hasil optimum pada 10%, sehingga untuk penggunaan larutan Etanol dan CaCl₂ hanya dilakukan pengujian sebanyak 3 variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) yaitu 0%, 5% dan 10%. Hasil pengujian permeabilitas untuk tiap variasi dengan 3 jenis penggunaan cairan dapat dilihat dalam tabel 17.

Tabel 16. Cairan Pengujian Permeabilitas Campuran

Jenis Cairan	Komposisi	Ph
Air	-	7
Etanol	100ml/lt	6
CaCl ₂	11,1 gr/l	7

Sumber: Hasil pengujian 2021

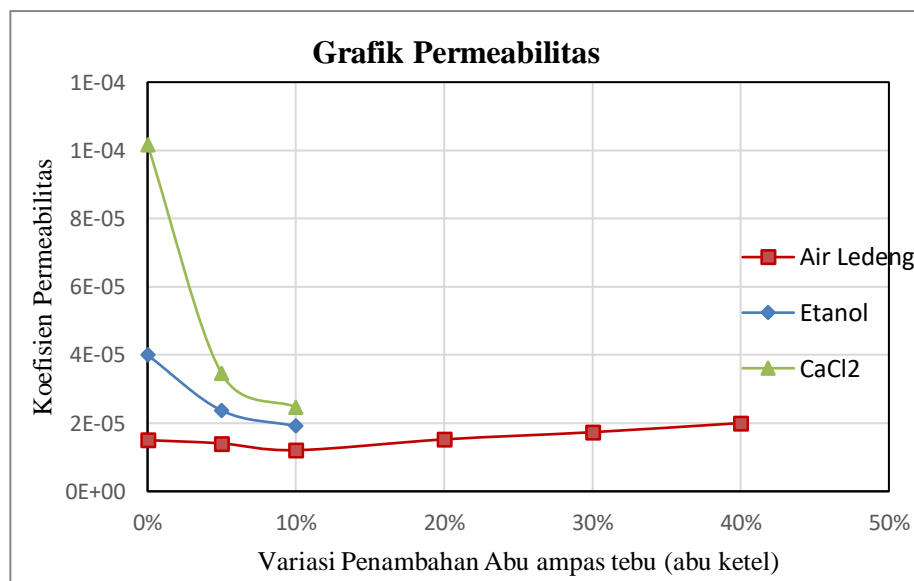
Tabel 17. Hasil Pengujian Permeabilitas Campuran Benda Uji

No.	Jenis Sampel	Koefisien Permeabilitas (Cm/det)		
		Air	Larutan Etanol	Larutan CaCl ₂
1.	Lumpur limbah	0,0790	-	-
2.	Lumpur limbah 60% + tanah 40% + Abu ampas tebu 0%	$1,5 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5}$
3.	Lumpur limbah 55% + tanah 40% + Abu ampas tebu 5%	$1,4 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-5}$
4.	Lumpur limbah 50% + tanah 40% + Abu ampas tebu 10%	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$
5.	Lumpur limbah 40% + tanah 40% + Abu ampas tebu 20%	$1,5 \times 10^{-5}$	-	-
6.	Lumpur limbah 30% + tanah 40% + Abu ampas tebu 30%	$1,7 \times 10^{-5}$	-	-
7.	Lumpur limbah 20% + tanah 40% + Abu ampas tebu 40%	$2,0 \times 10^{-5}$	-	-

Sumber: Hasil pengujian 2021.

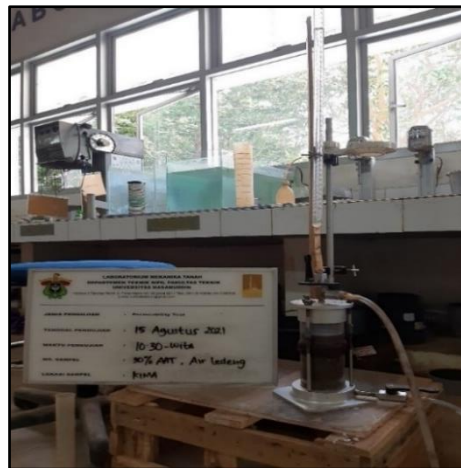
Dari hasil pengujian permeabilitas yang terdapat pada tabel 17, dapat menunjukkan bahwa pengaruh penambahan abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah pada lumpur limbah dapat menurunkan permeabilitas tanah dimana koefisien permeabilitas lumpur limbah tanpa campuran yaitu sebesar 0,0790 cm/det sedangkan setelah dilakukan pencampuran didapatkan nilai permeabilitas dengan rentang 1×10^{-5} cm/det. Hal ini disebabkan karena adanya sifat kohesif pada tanah yaitu sifat tarik-menarik antar partikel yang menyebabkan adanya sifat lekat pada benda campuran, selain itu adanya sifat *pozzolon* dari senyawa silika yang dimiliki abu ampas tebu (abu ketel). Sedangkan lumpur limbah pada pengujian Analisa saringan diketahui memiliki distribusi ukuran paling banyak berupa pasir sedangkan jenis butiran tersebut tidak memiliki daya lekat seperti pada tanah butiran halus hal ini yang menyebabkan lumpur limbah memiliki nilai koefisien permeabilitas lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai rembesan setelah dicampur dengan abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah

Grafik koefisien permeabilitas campuran benda uji menggunakan air, larutan etanol dan CaCl_2 ditunjukkan dalam gambar 28.



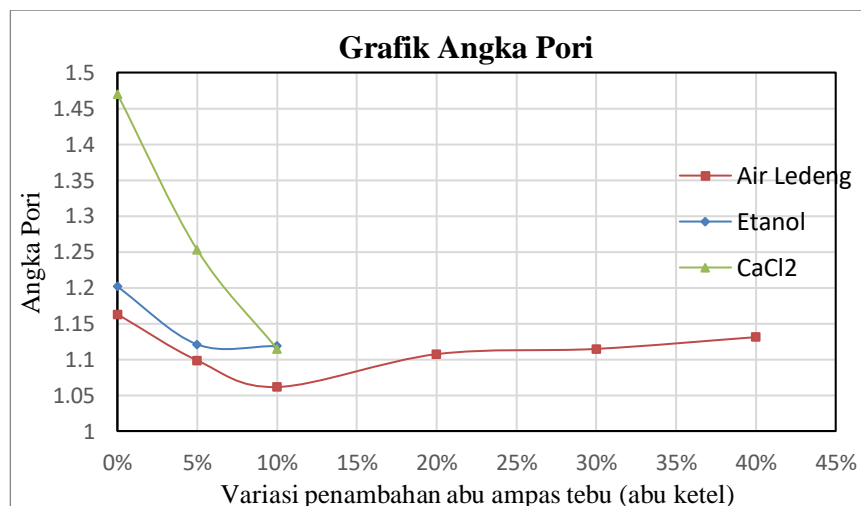
Gambar 28. Grafik Permeabilitas Campuran Benda Uji

Pada grafik diatas penggunaan jenis cairan yang berbeda-beda mempengaruhi nilai koefisien permeabilitas campuran. Nilai permeabilitas paling tinggi berada pada penggunaan larutan CaCl_2 dan nilai koefisien terendah pada penggunaan air. Dapat dilihat bahwa dari penggunaan ketiga cairan tersebut nilai koefisien permeabilitas terendah yaitu pada penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10%.



Gambar 29. Pengujian Permeabilitas

Nilai angka pori tiap variasi didapatkan melalui pengujian kadar air pada 34. Besarnya nilai angka pori dapat mempengaruhi koefisien permeabilitas suatu sampel, jika sampel uji memiliki nilai angka pori kecil maka nilai koefisien sampel tersebut akan rendah karena kecilnya pori-pori sebagai jalan yang akan dilalui air.



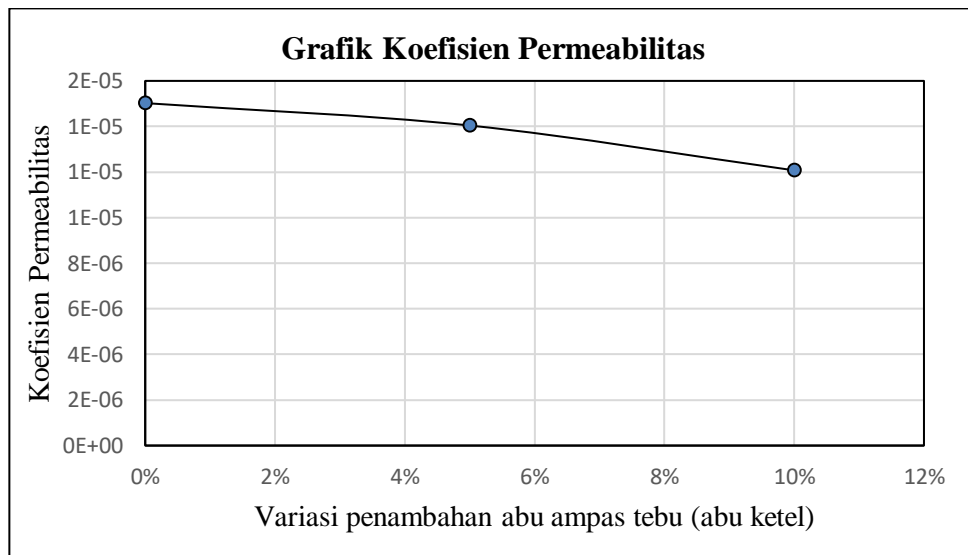
Gambar 30. Grafik Nilai Angka Pori Campuran Benda Uji



Gambar 31. Sampel Kadar Air Campuran Benda Uji

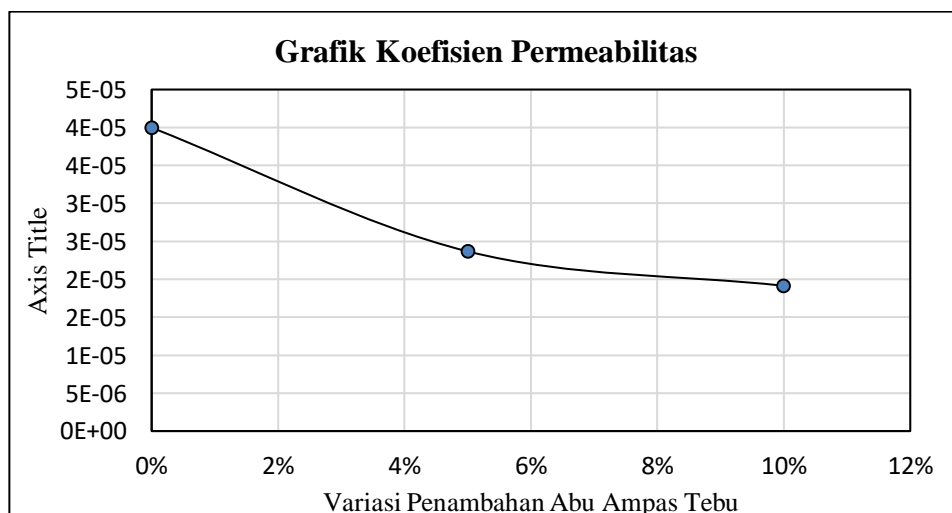
1. Pengujian permeabilitas campuran benda uji dengan menggunakan air.

Hasil uji permeabilitas menggunakan air yang ditunjukkan pada gambar 28 bahwa nilai permeabilitas terendah yaitu pada penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10% dengan nilai koefisien permeabilitas sebesar $1,2 \times 10^{-5}$ cm/det sedangkan nilai tertinggi yaitu pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 40% sebesar $2,0 \times 10^{-5}$ cm/det. Penambahan abu ampas tebu (abu ketel) cenderung mengalami penurunan dari penambahan sebanyak 0% hingga 10% tetapi pada penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 20% sampai 40% cenderung mengalami kenaikan. Hal ini dapat disebabkan karena tingkat kepadatan campuran benda uji pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 20%, 30% dan 40% cenderung mengalami penurunan yaitu dapat dilihat pada gambar 26. Selain itu dari hasil pengujian Analisa saringan didapatkan bahwa nilai fraksi terbanyak untuk abu ampas tebu (abu ketel) yaitu ukuran butiran tertahan saringan 200 yang menunjukkan abu ampas tebu (abu ketel) cenderung memiliki jenis ukuran butiran seperti pasir sehingga pada penambahan abu ampas tebu (abu ketel) dengan persentase yang tinggi dapat menutupi sifat kohesif yang dimiliki oleh tanah.



Gambar 32. Grafik Koefisien Permeabilitas Air.

2. Pengujian permeabilitas campuran benda uji menggunakan larutan Etanol
 Larutan etanol dalam pengujian permeabilitas campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel), digunakan dengan konsentrasi sebanyak 100ml/lt air. Berdasarkan grafik pada gambar 33 menunjukkan nilai koefisien permeabilitas dengan penambahan abu ampas tebu (abu ketel) 0%, 5% dan 10% cenderung mengalami penurunan dengan nilai koefisien terendah sebesar $1,9 \times 10^{-5}$ pada penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10%.

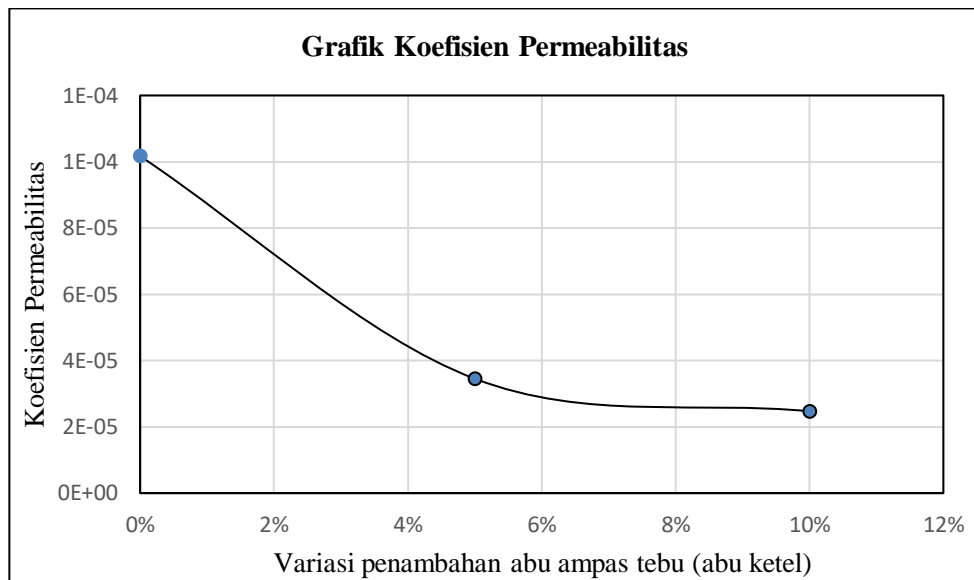


Gambar 33. Grafik Koefisien Permeabilitas Larutan Etanol

Pada gambar 28 dapat dilihat bahwa nilai koefisien permeabilitas campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah paling tinggi berada pada penggunaan larutan etanol. Hal ini disebabkan karena pengujian dengan menggunakan larutan etanol menjadikan pori-pori campuran benda uji lebih besar jika dibandingkan dengan pengujian menggunakan air hal ini disebabkan karena kation-kation pada larutan etanol tidak mampu mensubstitusi senyawa kimia dalam tanah sehingga sampel uji tidak mengembang. Selain itu, dalam penelitian yang dilakukan Jin, Dkk (2011) menjelaskan bahwa membran yang terbuat dari silika memiliki sifat permeselektivitas terhadap etanol yakni mampu melewati molekul etanol dijelaskan bahwa bertambahnya konsentrasi etanol dapat meningkatkan aliran pada membran yang mengandung silika. Sedangkan campuran lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) yang digunakan terkandung silika yang berasal dari abu ampas tebu (abu ketel) sehingga sifat inilah yang menyebabkan campuran benda uji dengan menggunakan larutan etanol memiliki nilai permeabilitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan air.

3. Pengujian permeabilitas campuran benda uji menggunakan larutan CaCl_2

Larutan CaCl_2 yang digunakan dalam pengujian permeabilitas dibuat dengan konsentrasi larutan 11,1 gr/l air. Jika dilihat dari hasil pengujian yang terdapat dalam gambar 28 di atas, nilai koefisien permeabilitas yang didapatkan lebih tinggi dari hasil pengujian menggunakan air dan etanol dengan koefisien permeabilitas paling rendah sebesar $2,4 \times 10^{-5}$ yang berada pada penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10%.



Gambar 34. Grafik Koefisien Permeabilitas Larutan CaCl_2

Meningkatnya nilai koefisien permeabilitas pada penggunaan larutan CaCl_2 disebabkan oleh besarnya angka pori sampel uji pada pengujian menggunakan larutan CaCl_2 jika dibandingkan dengan pengujian menggunakan air dan etanol hal ini dapat disebabkan karena konsentrasi dan valensi kation-kation yang terdapat dalam larutan dan campuran benda uji dimana kation dalam tanah tidak dapat mengikat kation-kation pada larutan sehingga sampel tidak mengembang yang menjadikan pori-pori sampel uji tidak tertutupi. Menurut Way (1952) dalam Darwis (2017), besarnya ukuran kation dari masing-masing unsur kimia sangat menentukan proses substitusi ionik di dalam reaksi kimia dalam tanah. Kation (K^+) yang memiliki wujud kristal di dalam tanah, kadang tidak dapat disubstitusi oleh kation kalsium (Ca^{2+}) disebabkan oleh jari-jari kation K^+ yang jauh lebih besar dari jari-jari kation Ca^{2+} .

Sehingga dari penjelasan tersebut dapat dikatakan bahwa ion (Ca^{2+}) dari CaCl_2 yang digunakan dalam pengujian tidak dapat mensubstitusi K^+ dalam tanah sehingga sampel uji tidak dapat mengalami pengembangan (*swelling*) yang dapat mempengaruhi rongga tanah sehingga tidak tertutupi yang mengakibatkan campuran benda uji pada pengujian menggunakan larutan CaCl_2 memiliki nilai koefisien

permeabilitas lebih tinggi. Selain itu, menurut A. Joisel dalam Wisnumurti (2007), pelarutan Ca^{2+} dapat menaikkan daya larut ion silika. Sehingga dapat dikatakan silika yang terkandung dalam campuran benda uji yang berasal dari abu ampas tebu (abu ketel) kemungkinan besar larut sehingga menurunkan sifat pozolon yang terdapat dalam campuran benda uji yang mengakibatkan terbukanya pori-pori campuran benda uji.

Berdasarkan hasil pengujian permeabilitas yang didapatkan yaitu dengan rentang nilai masing-masing variasi campuran sebesar 1×10^{-5} cm/det, menjadikan campuran material lumpur limbah, tanah dan abu ampas tebu (abu ketel) dengan kepadatan 60% dari kepadatan maksimum dapat dijadikan sebagai material alternatif lapisan penutup harian. berdasarkan pesyaratan standar nilai koefisien permeabilitas untuk tanah lapisan penutup harian TPA yaitu sebesar 1×10^{-5} cm/det (Jun He, Dkk 2015).

H. Kandungan Unsur Logam Berat pada Lumpur Limbah dan Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

Komposisi unsur kimia yang terkandung dalam limbah lumpur dapat dilihat pada tabel 18. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan di Laboratorium Produktivitas dan Kualitas Perairan didapatkan nilai beberapa logam berat yang terkandung dalam lumpur limbah dan abu ampas tebu (abu ketel) diantaranya yaitu logam berat kromium (Cr), Kadmium (Cd), Arsen (As) dan Timbal (Pb). Untuk mengetahui pencegahan dan penanggulangan pencemaran logam berat pada lapisan penutup harian yang dirancang maka penelitian ini mengacu kepada nilai ambang batas dalam tanah yang telah ditetapkan oleh U.S. *Environmental Protection Agency* (U.S. EPA). Adapun perbandingan nilai ambang batas logam berbahaya dan beracun adalah sebagai berikut (Tabel 18).

Tabel 18. Komposisi Unsur Logam Berat Lumpur Limbah

No.	Kode Sampel	Kadar (Lumpur Limbah)	Kadar (Abu Ampas Tebu/Abu Ketel)	Ambang Batas U.S EPA (PPM)
1.	Kromium (Cr)	7,50	7,32	3000
2.	Kadmium (Cd)	0,05	0,01	85
3.	Arsen (As)	0,21	0,26	75
4.	Timbal (Pb)	2,15	0,77	420

.Sumber: Hasil pengujian FIKP (2021).

Dari tabel diatas logam berat yang terkandung dalam lumpur limbah yang digunakan berdasarkan U.S. *Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) tidak melebihi nilai ambang batas baku mutu sehingga aman digunakan langsung ke lingkungan.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Karakteristik lumpur limbah yang didapatkan yaitu memiliki nilai kadar air 73,78% dengan nilai berat jenis sebesar 2,158. Dengan jumlah fraksi paling banyak menyerupai pasir (89,60%). Untuk abu ampas tebu (abu ketel) memiliki ukuran gradasi menyerupai pasir sebanyak (94,2%). Sedangkan untuk tanah memiliki nilai kadar air sebesar (51,94%), berat jenis (2,639), dengan nilai indeks plastisitas sebesar 9,94%.

2. Nilai permeabilitas yang didapatkan dari pengujian campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah dengan pengujian menggunakan 3 jenis cairan (air, larutan etanol dan CaCl_2) didapatkan nilai koefisien permeabilitas paling baik ditunjukkan pada variasi penambahan abu ampas tebu (abu ketel) sebanyak 10% dengan nilai tiap cairan yaitu untuk air sebesar $1,2 \times 10^{-5}$ cm/det; larutan etanol $1,9 \times 10^{-5}$ cm/det dan larutan CaCl_2 cm/det sebesar $2,5 \times 10^{-5}$ cm/det.

Berdasarkan nilai koefisien permeabilitas yang didapatkan. Campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah telah memenuhi syarat ideal dalam skala laboratorium, karena telah memenuhi syarat dengan ketentuan nilai koefisien permeabilitas yaitu sebesar 1×10^{-5} cm/det menurut Jun He, dkk (2015). oleh karena itu untuk pengaplikasian material campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah dilapangan sebagai material penutup harian TPA perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai bagaimana pengaplikasian dilapangan dengan penggunaan material tersebut.

B. Saran

1. Perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan komposisi campuran rancangan benda uji yang digunakan dalam penelitian dengan sampel yang berbeada sehingga dapat dibandingkan sesuai dengan peruntukannya.
2. Perlu dilakukan pengujian campuran lumpur limbah, abu ampas tebu (abu ketel) dan tanah dengan menggunakan cairan lindi yang dihasilkan di TPA.
3. Perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan penggunaan ukuran butiran material yang lebih bervariasi serta pengujian dengan penggunaan butiran material yang sesuai dengan keadaan aslinya sehingga didapatkan hasil yang nyata untuk diaplikasikan langsung dilapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiman, 2013. *Pengaruh Penambahan Abu Ampas Tebu Terhadap Sifat Fisik dan Sifat Mekanik Tanah Lempung Ekspansif*. Universitas Udayana. Denpasar.
- Damanhuri, Enri dan Tri Padmi. 2010. *Diktat Kuliah Pengelolaan Sampah*. Bandung: ITB.
- Darwis. 2017. *Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. Penerbit Pustaka AQ: Yogyakarta
- E. Sutarman (2013). *Konsep dan Aplikasi Mekanika Tanah*, Edisi ke I, Penerbit Andi: Yogyakarta.
- Fatoni, Mochamad. 2014. *Tinjauan Kuat Tekan Bebas dan Permeabilitas terhadap Tanah Lempung yang Distabilisasi dengan Kapur dan Abu Ampas Tebu*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Google Earth. 2018. Peta Citra, Sungai Jene'berang Desa Sokkolia Kecamatan Bontomarannu Kabupaten Gowa.
- Hafiz, M Imam, Dkk. 2019. *Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Bahan Tambahan Abu Ampas Tebu*. Politeknik Negeri Sriwijaya. Palembang.
- Hardiyatmo, H.C. 2001. *Prinsip-prinsip Mekanika Tanah dan Soal Penyelesaian I* (1st ed). Yogyakarta: Beta Offset.
- Hardiyatmo, H.C. 2002. *Mekanika Tanah I* (3rded). Yogyakarta : Gadjah Mada University Press. Teknologi Bandung.
- Jin, T, dkk. 2011. *Ethanol separation from ethanol aqueous solution by pervaporation using hydrophobic mesoporous silica membrane*. journal of Ceramic Society of Japan. 119 (7).
- Jun He, dkk. 2015. *Modified Sewage Sludge As Temporary Landfill Cover Material*. Universitas Teknologi Hubei, Wuhan.

- Kementrian ESDM. 2006. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral* No. 045 Tahun 2006. Tentang Pengelolaan Lumpur Bor, Limbah Lumpur dan Serbuk Bor Pada Kegiatan Pengeboran Minyak dan Gas Bumi.
- L.D.Wesley (2017). *Mekanika Tanah*. Edisi ke II, Penerbit Andi: Yogyakarta.
- L.D.Wesley (2012). *Mekanika Tanah, untuk Tanah Endapan dan Residu*. Edisi ke I, Penerbit Andi: Yogyakarta.
- Nurdin, Sukiman. 2016. *Kinerja Tanah Lunak Stabilisasi Fly Ash dengan Perkuatan Serat Alami sebagai Lapis Penutup Landfill*. Universitas Hasanuddin: Makassar
- Qian, X.D., Shi, J.Y., Liu, X.D., 2010. *Modern Sanitary Landfill Design and Construction*. China Construction Industry Press, Beijing (in Chinese).
- SNI Nomor 19-2425:2002. Tentang Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Persampahan Perkotaan.
- Susianto, Tiyongko Adi. 2017. *Studi Perencanaan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah Sanitary Landfill Lempeni Kabupaten Lumajang*. Universitas Muhammadiyah Malang.
- Tchobanoglous, G., et al. (1993). *Integrated Solid Waste Management*. McGrawHill. New York.
- Undang-undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 Tentang Pengelolaan Sampah. Jakarta: Sekretariat Negara.
- US. EPA. 1994. Clean Water Act, sec. 503. (U.S. Environmental Protection Agency Washington, D.C.). 58(32).
- US. EPA. *Guidance Note on Daily and Intermediate Cover at Landfills*, Environmental Protection Agency, Wexford, Ireland, 2014.

Vigneswaran. 2019. *Water And Wastewater Treatment Technologies*. University of Technology, Sydney.

Wisnumurti, dkk. 2007. *Pengaruh Penggunaan Akselerator Megaset Merah di Bawah Dosis Optimal Terhadap Kuat Tekan Beton dengan berbagai Variasi Umur Beton*. Universitas Brawijaya Malang.

Xihun Fan, dkk. 2019. *Increasing the Hydraulic Conductivity of Solidified Sewage sSludge for Use as Temporary Landfill Cover*. Universitas Hohai. China.

LAMPIRAN

PERHITUNGAN PERMEABILITAS LUMPUR LIMBAH

Permeabilitas Lumpur Limbah	
<i>Volume of Specimen, V</i>	384,17
<i>Specific Gravity of Soil Solids, G_s</i>	2.158
<i>Mass of specimen tube with fittings, W₁ (g)</i>	1320.77
<i>Mass of tube with fittings and specimen, W₂ (g)</i>	1785.76
<i>Dry density of specimen, ρ_{dry}</i>	7.79
<i>Void ratio of specimen, e</i>	0.15

Test No.	1	2	3
<i>Average flow, Q</i>	690	785	865
<i>Time of collection, t</i>	60	60	60
<i>Temperature of water, T</i>	28	28	28
<i>Head difference, h</i>	50	60	70
<i>Diameter of specimen, D</i>	6.44	6.44	6.44
<i>Length of Specimen, L</i>	11.80	11.80	11.80
<i>Area of specimen, A</i>	32.56	32.56	32.56
$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$ (cm/s)	0.0834	0.0790	0.0746
<i>Average k</i>	0,0790		

PERHITUNGAN PERMEABILITAS TANAH

Permeabilitas Tanah	
<i>Volume of Specimen, V</i>	384,17
<i>Specific Gravity of Soil Solids, G_s</i>	2.158
<i>Mass of specimen tube with fittings, W₁ (g)</i>	1320.77
<i>Mass of tube with fittings and specimen, W₂ (g)</i>	1785.76
<i>Dry density of specimen, ρ_{dry}</i>	7.79
<i>Void ratio of specimen, e</i>	0.15

Test No.	1	2	3
<i>Average flow, Q</i>	690	785	865
<i>Time of collection, t</i>	60	60	60
<i>Temperature of water, T</i>	28	28	28
<i>Head difference, h</i>	50	60	70
<i>Diameter of specimen, D</i>	6.44	6.44	6.44
<i>Length of Specimen, L</i>	11.80	11.80	11.80
<i>Area of specimen, A</i>	32.56	32.56	32.56
$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h \cdot t}$ (cm/s)	0.0834	0.0790	0.0746
<i>Average k</i>	0,0790		

**PERHITUNGAN PERMEABILITAS CAMPURAN LUMPUR LIMBAH,
ABU AMPAS TEBU DAN TANAH**

Pengujian menggunakan air

Permeabilitas Variasi 0% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
<i>Volume of Specimen, V</i>	302.7780168
<i>Specific Gravity of Soil Solids, G_s</i>	2.661
<i>Mass of specimen tube with fittings, W₁ (g)</i>	1191
<i>Mass of tube with fittings and specimen, W₂ (g)</i>	1622
<i>Dry density of specimen,</i>	1.42
<i>Void ratio of specimen, e</i>	1.166854492

Test No.	1	2
<i>Diameter of specimen, D</i>	6.44	6.44
<i>Length of Specimen, L</i>	9.30	9.30
<i>Area of specimen, A</i>	32.56	32.56
<i>Beginning Head difference, h₁</i>	35	30
<i>Ending head difference, h₂</i>	20	20
<i>Time of collection, t</i>	6662.33	4762.18
<i>volume of water flow through the specimen, V_w</i>	8.9	6.5
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000014	0.000016
<i>Average k</i>	0.000015	

Permeabilitas Variasi 5% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
<i>Volume of Specimen, V</i>	302.7780168
<i>Specific Gravity of Soil Solids, G_s</i>	2.647
<i>Mass of specimen tube with fittings, W₁ (g)</i>	1191
<i>Mass of tube with fittings and specimen, W₂ (g)</i>	1644
<i>Dry density of specimen,</i>	1.50
<i>Void ratio of specimen, e</i>	1.098403951

Test No.	1	2
<i>Diameter of specimen, D</i>	6.44	6.44
<i>Length of Specimen, L</i>	9.30	9.30
<i>Area of specimen, A</i>	32.56	32.56
<i>Beginning Head difference, h₁</i>	35	30
<i>Ending head difference, h₂</i>	20	20
<i>Time of collection, t</i>	7192.17	6113.31
<i>volume of water flow through the specimen, V_w</i>	10.0	7.0
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000015	0.000013
<i>Average k</i>	0.000014	

Permeabilitas Variasi 10% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.646
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1195
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1663
Dry density of specimen,	1.546
Void ratio of specimen, e	1.065

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	45	40
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	19271.42	17146.01
volume of water flow through the specimen, V_w	25.0	21.0
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000012	0.00001213
Average k	0.00001207	

Permeabilitas Variasi 20% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.635
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1191
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1640
Dry density of specimen,	1.483
Void ratio of specimen, e	1.103

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	35	30
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	3753.42	2535.31
volume of water flow through the specimen, V_w	5.10	3.5
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000014	0.00001599
Average k	0.00001524	

Permeabilitas Variasi 30% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.631
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1192
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1641
Dry density of specimen,	1.483
Void ratio of specimen, e	1.100

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	35	30
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	3569.27	2618.84
volume of water flow through the specimen, V_w	5.4	4.2
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000016	0.00001858
Average k	0.00001735	

Permeabilitas Variasi 40% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.629
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1192
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1626
Dry density of specimen,	1.433
Void ratio of specimen, e	1.136

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	35	30
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	7406.19	5429.47
volume of water flow through the specimen, V_w	13.0	10.0
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000019	0.00002134
Average k	0.00002002	

Pengujian menggunakan larutan etanol

Permeabilitas Variasi 0% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
<i>Volume of Specimen, V</i>	302.7780168
<i>Specific Gravity of Soil Solids, G_s</i>	2.661
<i>Mass of specimen tube with fittings, W₁ (g)</i>	1193
<i>Mass of tube with fittings and specimen, W₂ (g)</i>	1610
<i>Dry density of specimen,</i>	1.38
<i>Void ratio of specimen, e</i>	1.206029463

Test No.	1	2
<i>Diameter of specimen, D</i>	6.44	6.44
<i>Length of Specimen, L</i>	9.30	9.30
<i>Area of specimen, A</i>	32.56	32.56
<i>Beginning Head difference, h₁</i>	35	30
<i>Ending head difference, h₂</i>	20	20
<i>Time of collection, t</i>	3374.37	2754.66
<i>volume of water flow through the specimen, V_w</i>	12.0	10.0
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000038	0.000042
<i>Average k</i>	0.000040	

Permeabilitas Variasi 5% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
<i>Volume of Specimen, V</i>	302.7780168
<i>Specific Gravity of Soil Solids, G_s</i>	2.647
<i>Mass of specimen tube with fittings, W₁ (g)</i>	1192
<i>Mass of tube with fittings and specimen, W₂ (g)</i>	1635
<i>Dry density of specimen,</i>	1.46
<i>Void ratio of specimen, e</i>	1.12567809

Test No.	1	2
<i>Diameter of specimen, D</i>	6.44	6.44
<i>Length of Specimen, L</i>	9.30	9.30
<i>Area of specimen, A</i>	32.56	32.56
<i>Beginning Head difference, h₁</i>	35	30
<i>Ending head difference, h₂</i>	20	20
<i>Time of collection, t</i>	6480.00	5107.45
<i>volume of water flow through the specimen, V_w</i>	15.0	10.0
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000025	0.000023
<i>Average k</i>	0.0000237	

Permeabilitas Variasi 10% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.646
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1192
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1635
Dry density of specimen,	1.463
Void ratio of specimen, e	1.125

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	35	30
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	5329.40	3661.71
volume of water flow through the specimen, V_w	10.0	5.8
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000020	0.00001829
Average k	0.00001914	

Pengujian menggunakan larutan CaCl_2

Permeabilitas Variasi 0% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.661
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1192
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1535
Dry density of specimen,	1.13
Void ratio of specimen, e	1.466222408

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	35	30
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	1517.18	1182.10
volume of water flow through the specimen, V_w	15.0	10.0
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000105	0.000098
Average k	0.000102	

Permeabilitas Variasi 5% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.647
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1192
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1590
Dry density of specimen,	1.31
Void ratio of specimen, e	1.25295325

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	35	30
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	4552.17	3413.31
volume of water flow through the specimen, V_w	15.0	10.0
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000035	0.000034
Average k	0.0000345	

Permeabilitas Variasi 0% Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)	
Volume of Specimen, V	302.7780168
Specific Gravity of Soil Solids, G_s	2.646
Mass of specimen tube with fittings, W_1 (g)	1192
Mass of tube with fittings and specimen, W_2 (g)	1639
Dry density of specimen,	1.476
Void ratio of specimen, e	1.115

Test No.	1	2
Diameter of specimen, D	6.44	6.44
Length of Specimen, L	9.30	9.30
Area of specimen, A	32.56	32.56
Beginning Head difference, h_1	35	30
Ending head difference, h_2	20	20
Time of collection, t	4757.46	4376.19
volume of water flow through the specimen, V_w	14.2	6.7
$k = 2,303 \frac{V_w L}{(h_1 - h_2) A t} \log \frac{h_1}{h_2}$ (cm/s)	0.000032	0.00001763
Average k	0.00002469	

DOKUMENTASI PENGAMBILAN DATA DI LABORATORIUM

A. Dokumentasi Pengujian Karakteristik Sampel Lumpur Limbah, Tanah dan Abu Ampas Tebu (Abu Ketel)

1. Pengujian Basic Propertis
 - a. Pengujian berat jenis



- b. Pengujian batas-batas Atterberg



c. Pengujian Analisa saringan dan Hidrometer

Pengujian Analisa saringan



Pengujian Hidrometer



2. Dokumentasi Pengujian Sifat Mekanik

a. Kompaksi



b. Permeabilitas



B. Dokumentasi Pengujian Campuran Lumpur Limbah, Tanah dan Abu Ampas Tebu

a. Kompaksi



b. Permeabilitas



