

SKRIPSI

POTENSI CAMPURAN ABU KETEL DAN *NATRIUM BENTONITE* SEBAGAI ALTERNATIF LAPISAN DASAR TEMPAT PEMROSESAN AKHIR SAMPAH (TPA)

Disusun dan diajukan oleh:

**BUYA IBNU FULQAN
D131 19 1014**



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

SKRIPSI

**POTENSI CAMPURAN ABU KETEL DAN *NATRIUM BENTONITE*
SEBAGAI ALTERNATIF LAPISAN DASAR TEMPAT PEMROSESAN
AKHIR SAMPAH (TPA)**

Disusun dan diajukan oleh:

**BUYA IBNU FULQAN
D131 19 1014**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

POTENSI CAMPURAN ABU KETEL DAN NATRIUM BENTONITSEBAGAI ALTERNATIF LAPISAN DASAR TEMPAT PEMROSESAN AKHIR (TPA)

Disusun dan diajukan oleh

Buya Ibnu Fulqan
D131191014

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

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



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

Pembimbing Pendamping,



Hardianti Alimuddin, S.T., M.Eng.
NIP 199406032023036000

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Buya Ibnu Fulqan
NIM : D131191014
Program Studi : Teknik Lingkungan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Potensi Campuran Abu Ketel dan *Natrium Bentonite* Sebagai Alternatif Lapisan Dasar Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)

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

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

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

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

Gowa, 26 September 2023

Yang Menyatakan

Buya Ibnu Fulqan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, dengan mengucapkan puji dan syukur kehadiran Allah SWT, atas segala nikmat yang telah diberikan berupa petunjuk dan ridho-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul "Potensi Campuran Abu Ketel dan *Natrium Bentonite* Sebagai Alternatif Lapisan Dasar Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)". Salam dan taslim penulis tuturkan kepada junjungan seluruh umat manusia yakni Nabi Muhammad SAW, yang menjadi pemimpin dan suri tauladan bagi seluruh umat manusia.

Adapun tujuan penulisan Tugas Akhir ini yakni untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) bagi mahasiswa S1 pada Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa terdapat berbagai hambatan dan tantangan. Namun, berkat usaha dan doa serta bantuan dari banyak pihak sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Pencapaian atas segala proses dalam pembuatan Tugas Akhir tak terlepas dari semua usaha dan jasa dari kedua orang tua penulis. Doa dan terima kasih penulis tuturkan kepada Orang Tua dan keluarga yang tentunya terus memberikan dukungan moral, material dan segala bentuk apapun yang dapat diberikan kepada penulis. Oleh karena itu, izinkan penulis untuk berterima kasih kepada orang tua yakni Kepada Bapak H. Panca Nurba & Ibunda Hj. Hasmawati Dg. Karra. Serta tentunya tak lupa kepada saudara penulis yakni Muq Tadir Haq yang telah memberikan dukungan penuh dan pembangkit semangat dalam proses pembuatan hingga penyelesaian Tugas Akhir.

Penulis Tugas Akhir juga tidak terlepas dari bantuan, dukungan, serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Ibu Dr. Eng. Kartika Sari, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu Hardianti Alimuddin, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu serta memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam Menyusun hingga menyelesaikan Tugas Akhir.

2. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM. selaku ketua Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak/ibu Dosen Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bantuannya kepada penulis selama menempuh jenjang perkuliahan, terutama kepada staf S1 Teknik Lingkungan Ibu Sumiati. A.S. dan Pak Olan.
4. Keluarga Bahagia yang terdiri dari 7 orang yang memiliki visi dan misi yang tinggi, yang beranggotakan Firman, Rifqi, Andini, Sirah, Uti, dan Riri. Juga selalu memberikan dukungan satu sama lain baik dalam dunia perkuliahan maupun dunia luar.
5. Teman-teman seperjuangan Lab. Riset konsentrasi Sanitasi dan Persampahan 2019 yang telah memberikan dorongan dalam Menyusun Tugas Akhir.
6. Teman-teman Teknik Lingkungan 2019 yang telah banyak memberikan makna selama proses perkuliahan hingga penyelesaian Tugas Akhir.
7. Teman-teman PORTLAND 2020 a.k.a Teknik Lingkungan dan Teknik Sipil Angkatan 2019 yang banyak memberikan makna, suka dan duka dan juga kenangan selama masa perkuliahan.
8. Ibu anti dan Kak Maksu yang telah memberikan banyak ilmu di dan telah menemani dalam pengujian permeabilitas di fakultas pertanian.
9. Saudari Nila Fitra Andini yang telah banyak memberikan bantuan selama pengambilan data dan support dalam menyelesaikan skripsi.
10. Saudara muh nasrul yang telah memberikan tempat tinggal selama di kampus sehingga penulis dapat nyaman mengerjakan penelitian.
11. Serta seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung proses dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
12. Terakhir, tentunya TERIMA KASIH yang sebesar-besarnya kepada diri penulis pribadi yang telah meluangkan banyak waktu, tenaga, dan pikiran dalam menghadapi segala proses dunia perkuliahan hingga dapat berada diposisi hingga titik akhir.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritis yang dapat membangun penulis akan dengan senang hati

menerima. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk kedepannya dan menjadi pengembangan ilmu pengetahuan.

Gowa, 26 September 2023

Penulis

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters that appear to be 'Buya Ibnu Fulqan'.

Buya Ibnu Fulqan

D131 19 1014

ABSTRAK

BUYA IBNU FULQAN. *Potensi Campuran Abu Ketel dan Natrium Bentonite Sebagai Alternatif Lapisan Dasar Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)* (dibimbing oleh **Kartika Sari** dan **Hardianti Alimuddin**)

Meningkatnya jumlah penduduk mengakibatkan jumlah sampah yang dihasilkan meningkat, tempat yang digunakan untuk mengembalikan sampah ke lingkungan secara aman adalah tempat pemrosesan akhir sampah. Salah satu bentuk TPA yang baik ialah TPA dengan metode *sanitary landfill* dan *controlled landfill*, TPA dengan metode ini memiliki beberapa jenis lapisan tanah diantaranya lapisan dasar, lapisan tanah penutup antara, dan lapisan tanah penutup harian. Terbatasnya tanah dan mahalnya lapisan dasar geosintetik menjadikan perlunya alternatif lapisan dasar yang lebih ekonomis dari pemanfaatan limbah. Salah satu bentuk pemanfaatan limbah ialah dengan memodifikasi limbah tersebut agar dapat dimanfaatkan kembali kelingkungan, namun limbah tersebut perlu dimodifikasi agar dapat dijadikan lapisan dasar TPA. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah abu ketel, dan *natrium bentonite*.

Penelitian ini bertujuan menganalisis sifat limbah abu ketel dan *natrium bentonite*, dan pengaruh variasi sampel terhadap permeabilitas dan kemampuan reduksi pencemar NaCl.

Jenis penelitian yang dilakukan adalah metode eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Sipil dan Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah Fakultas Pertanian.

Hasil dari pengujian, karakteristik abu ketel yang didapatkan yaitu nilai kadar air sebesar 85,8% dengan nilai berat jenis sebesar 2,095. *Natrium Bentonite* memiliki nilai kadar air sebesar 16,5%, berat jenis 2,628, dengan besar butiran kasar 100% lolos ayakan No.200 dimana kandungan silt sebesar 32,41% dan clay sebesar 67,59%. Pengujian Atterberg *Natrium Bentonite* menunjukkan *bentonite* yang digunakan masuk dalam kategori CH pada klasifikasi USCS. Pengujian permeabilitas *natrium bentonite* memiliki nilai koefisien permeabilitas sebesar $4,72 \times 10^{-9}$ cm/det dan campuran abu ketel dan *natrium bentonite* memiliki nilai permeabilitas terkecil pada campuran 85%BE;15%AK yakni sebesar $1,67 \times 10^{-7}$ cm/det. Hal ini juga didukung dengan adanya kemampuan campuran dalam mereduksi kandungan pencemar NaCl khususnya pada variasi 85%BE;15%AK dengan nilai sebesar 49,5%. Berdasarkan hasil yang didapatkan, variasi campuran abu ketel dan *natrium bentonite* dapat digunakan sebagai lapisan dasar TPA.

Kata Kunci: Lapisan Dasar, Abu ketel, *Natrium Bentonite*, Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, Permeabilitas, NaCl

ABSTRACT

BUYA IBNU FULQAN. *Potential of Boiler Ash and Natrium Bentonite Mis as an Alternative Base Layer for Final Waste Processing Sites* (supervised by **Kartika Sari** and **Hardianti Alimuddin**)

The increasing population has resulted in an increase in the amount of waste generated. The place used to safely return waste to the environment is the final waste processing facility. One good form of such a facility is a landfill with sanitary landfill and controlled landfill methods. This type of landfill has several layers of soil, including the base layer, intermediate cover layer, and daily cover soil layer. Limited land availability and the cost of geosynthetic base layers make it necessary to find more economical alternatives for waste utilization. One form of waste utilization is modifying the waste so that it can be reused in the environment, but the waste needs to be modified to serve as a landfill base layer. The materials used in this study are boiler ash and sodium bentonite.

The purpose of this research is to analyze the characteristics of boiler ash and sodium bentonite waste and the influence of sample variations on permeability and the ability to reduce NaCl pollutant.

The research conducted is an experimental method carried out in the Civil Soil Mechanics Laboratory and the Soil Chemistry and Fertility Laboratory of the Faculty of Agriculture.

The results of the tests show that the characteristics of the boiler ash include a moisture content of 85.8% and a specific gravity of 2.095. Sodium bentonite has a moisture content of 16.5%, a specific gravity of 2.628, with 100% passing through sieve No.200, where the silt content is 32.41% and the clay content is 67.59%. Atterberg testing of sodium bentonite indicates that the bentonite used falls into the CH category in the USCS classification. Permeability testing of sodium bentonite has a permeability coefficient of 4.72×10^{-9} cm/day, and the mixture of boiler ash and sodium bentonite has the lowest permeability value in the 85% sodium bentonite; 15% boiler ash mixture, which is 1.67×10^{-7} cm/day. This is also supported by the ability of the mixture to reduce the NaCl pollutant content, especially in the 85% sodium bentonite; 15% boiler ash variation, with a value of 49.5%. Based on the results obtained, variations of the boiler ash and sodium bentonite mixture can be used as a landfill base layer.

Keywords: Base Layer, Boiler Ash, Sodium Bentonite, Waste Processing Facility, Permeability, NaCl

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian/Perancangan.....	4
1.4. Manfaat Penelitian/Perancangan.....	4
1.5. Ruang Lingkup/Batasan Masalah	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA).....	6
2.2. Lapisan Dasar Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA).....	7
2.3. Abu Ketel	12
2.4. <i>Natrium Bentonite</i>	15
2.5. Air Lindi.....	17
2.6. Batas Konsistensi (<i>Atterberg Limit</i>).....	19
2.7. Kompaksi	22
2.8. Permeabilitas.....	23
2.9. Penurunan Kandungan Pencemar NaCl.....	26
2.10. Penelitian Terdahulu.....	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	37
3.1. Diagram Alir Penelitian	37
3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian	39
3.3. Alat dan Bahan.....	40
3.4. Metode Pengumpulan Data.....	45
3.4.1. Rancangan Penelitian	45
3.5. Variasi Pengujian	52
3.6. Analisa Data.....	53
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Abu Ketel	57
4.2. Hasil Pemeriksaan Karakteristik <i>Natrium Bentonite</i>	59
4.3. Pengujian Kompaksi Abu Ketel yang Dicampur dengan <i>Natrium Bentonite</i>	67
4.4. Hasil Pengujian Permeabilitas	77
4.5. Hasil Pengujian Kemampuan Reduksi Kandungan NaCl.....	80
4.6. Potensi Campuran Abu Ketel dan <i>Natrium Bentonite</i> Sebagai Lapisan Dasar TPA.....	83

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA	87

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Kandungan kimia abu ketel pabrik gula takalar.....	14
Tabel 2 Perbandingan kandungan kimia abu ketel dengan peraturan.....	14
Tabel 3 Unsur kimia bentonit.....	15
Tabel 4 Komposisi kimia <i>bentonite</i> CV Anugrah Mineral Industri.....	17
Tabel 5 Karakteristik air lindi	18
Tabel 6 Nilai indeks plastisitas dan macam tanah	21
Tabel 7. Harga batas atterberg untuk mineral lempung	21
Tabel 8 Harga koefisien permeabilitas.....	24
Tabel 9 Penelitian terdahulu.....	31
Tabel 10 Standar pengujian fisik.....	46
Tabel 11 Standar pengujian sifat mekanik	49
Tabel 12 Variasi pengujian campuran benda uji.....	52
Tabel 13 Hasil Pengujian Sifat Fisik Abu Ketel	57
Tabel 14 Hasil uji kandungan kimia abu ketel pabrik gula takalar	58
Tabel 15 Perbandingan kandungan kimia abu ketel dengan peraturan.....	59
Tabel 16 Hasil pengujian fisik <i>natrium bentonite</i>	59
Tabel 17 Klasifikasi tanah berdasarkan sistem AASHTO.....	64
Tabel 18 Rekapitulasi pengujian sifat fisis dan mekanik abu ketel dan <i>bentonite</i>	66
Tabel 19 Variasi campuran pengujian kompaksi	67
Tabel 20 Rekapitulasi pengujian berat jenis variasi campuran sampel.....	67
Tabel 21 Berat isi kering dan kadar air variasi campuran sampel	73
Tabel 22 Deposit timbulan abu ketel sebagai lapisan dasar.....	76
Tabel 23 Variasi campuran pengujian permeabilitas	77
Tabel 24 Hasil pengujian permeabilitas tanah murni dan campuran	78
Tabel 25 Variasi campuran pengujian reduksi NaCl	80
Tabel 26 Grafik hasil pengujian kadar NaCl.....	81
Tabel 27 Grafik kemampuan campuran mereduksi NaCl.....	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Struktur dasar TPA sampah.....	8
Gambar 2 Skema sistem liner ganda dan tanah yang dipadatkan	9
Gambar 3 Klasifikasi geotekstil	11
Gambar 4 Model sistem liner	12
Gambar 5 Diagram alir penelitian.....	38
Gambar 6 Lokasi pengambilan abu ketel.....	39
Gambar 7 Satu set alat pengujian kadar air dan berat isi	40
Gambar 8 Satu set alat pengujian berat jenis	41
Gambar 9 Satu set alat analisa saringan dan hidrometer.....	41
Gambar 10 Satu set alat pengujian batas-batas Atterberg.....	42
Gambar 11 Satu set alat pengujian kompaksi	42
Gambar 12 Satu set alat pengujian permeabilitas	43
Gambar 13 Sampel abu ketel	43
Gambar 14 Sampel <i>bentonite</i>	44
Gambar 15 Bahan kimia NaCl	44
Gambar 16 Reaktor Uji Serapan NaCl	51
Gambar 17 Grafik analisa saringan dan hidrometer <i>bentonite</i>	61
Gambar 18 Grafik pengujian batas cair <i>bentonite</i>	62
Gambar 19 Klasifikasi tanah menurut sistem USCS	63
Gambar 20 Grafik hubungan kadar air dengan berat isi kering hasil kompaksi <i>bentonite</i>	65
Gambar 21 Rekapitulasi berat jenis campuran sampel	68
Gambar 22 Grafik kompaksi variasi 85% <i>bentonite</i> : 15% abu ketel.....	69
Gambar 23 Grafik kompaksi variasi 80% <i>bentonite</i> : 20% abu ketel.....	69
Gambar 24 Grafik kompaksi variasi 75% <i>bentonite</i> : 25% abu ketel.....	70
Gambar 25 Grafik kompaksi variasi 70% <i>bentonite</i> : 30% abu ketel.....	70
Gambar 26 Grafik kompaksi variasi 65% <i>bentonite</i> : 35% abu ketel.....	71
Gambar 27 Grafik kompaksi variasi 60% <i>bentonite</i> : 40% abu ketel.....	71
Gambar 28 Grafik berat isi kering optimum campuran benda uji	72
Gambar 29 Grafik kadar air variasi campuran sampel.....	73
Gambar 30 Grafik pengujian permeabilitas	79
Gambar 31 Hasil pengujian penurunan kadar NaCl	82
Gambar 32 Hubungan kepadatan dan kemampuan campuran sampel terhadap reduksi NaCl.....	83

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Sampel.....	90
Lampiran 2 Dokumentasi Pengujian Sampel.....	91
Lampiran 3 Hasil Pengujian Permeabilitas	97

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
I_F	Indeks Aliran
W1	Kadar Air (%) pada N1 Pukulan
W2	Kadar Air (%) Pada N2 Pukulan
γ_w	Berat Volume Air
n	Kekentalan Air
K	Rembesan Absolut
W	Kadar Air
Gs	Berat Jenis Tanah
Ws	Berat Tanah Kering
%finer	Persen Lolos
A	Koreksi Berat Jenis
Rcp	Koreksi Pembacaan Hydrometer Untuk Perhitungan Lolos
LL	Batas Cair
wN	Kadar Air Pada N Ketukan
N	Jumlah Ketukan
PL	Batas Plastis
PI	Indeks Plastis
SL	Batas Susut
γ_{dry}	Berat Isi Tanah Kering
γ_{wet}	Berat Isi Tanah Basah
Q	Debit
k	Koefisien Permeabilitas
ΔH	Beda Tinggi Muka Air
L	Panjang Contoh Tanah
A_p	Luas Potongan Melintang Sampel
h1	Tinggi Muka Air di dalam Tabung
h2	Tinggi Muka Air di dalam Tabung Setelah Melewati Interval waktu t

t	Waktu pengujian
N AgNO ₃	Normalitas larutan AgNO ₃
V	Volume Larutan
A	Volume larutan baku AgNO ₃ untuk titrasi sampel
B	Volume larutan baku AgNO ₃ untuk titrasi blanko

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada era globalisasi, pertumbuhan penduduk sangat pesat. Pertumbuhan penduduk ini diikuti dengan bertambahnya kebutuhan manusia, yang menyebabkan adanya peningkatan jumlah sampah, berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2023 laju pertumbuhan penduduk di Indonesia hingga tahun 2023 menunjukkan rata-rata peningkatan sebesar 1,17%. Menurut Selsi (2021), seiring bertambahnya jumlah penduduk maka kebutuhan masyarakat dalam kehidupan sehari-hari juga meningkat yang akan berdampak pada peningkatan jumlah timbulan sampah dan produksi pabrik. Banyaknya masyarakat yang tidak mengelola sampah dengan baik dan hanya membuangnya di lingkungan sekitarnya, hal ini menyebabkan pencemaran lingkungan yang semakin parah setiap harinya.

Salah satu tempat yang digunakan untuk mengembalikan sampah ke lingkungan secara aman adalah Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Namun, pengelolaan sampah yang banyak ditemukan di TPA Indonesia saat ini ialah dengan sistem *open dumping* (M Nizar, dkk 2018). Pengelolaan sampah dengan sistem *Open Dumping* Sebagian besar hanya akan menimbulkan pencemaran lingkungan (M Nizar, dkk 2018). Untuk mengurangi dampak buruk dari penanganan sampah di TPA, perlu dilakukan tindakan untuk mengubah skema metode pengelolaan sampah di TPA. Berdasarkan aturan UU No.18 Tahun 2008 tentang pengelolaan sampah, pemerintah daerah diwajibkan untuk mengganti sistem *open dumping* dengan sistem *sanitary landfill* di TPA. Metode *sanitary landfill* dapat memberikan keamanan lebih bagi lingkungan dalam pengoperasian TPA, karena dilengkapi dengan beberapa media pelindung lingkungan seperti lapisan penutup harian setiap hari operasi (Kartika Nurrachmah, 2016).

Pada penerapan sistem *Sanitary Landfill* ataupun *Controlled Landfill* terdapat beberapa lapisan tanah yang terdapat pada TPA, seperti lapisan dasar, lapisan tanah penutup antara, dan lapisan tanah penutup harian. Pada lapisan dasar membutuhkan lapisan yang memiliki nilai (k) permeabilitas yang rendah (Kartika Nurrachmah, 2016). Hal tersebut dikarenakan lapisan dasar ini berfungsi sebagai lapisan kedap

yang diharapkan dapat menahan agar air lindi tidak masuk dan bercampur kedalam tanah. Berdasarkan PERMEN PU Tahun 2013 nilai permeabilitas untuk lapisan dasar yaitu tidak lebih besar dari 10^{-6} cm/s dan berdasarkan *Environmental Protection Agency* (EPA) nilai permeabilitas lapisan dasar berkisar 10^{-9} - 10^{-7} . Beberapa contoh lapisan dasar yang biasa digunakan ialah Geosintetis dengan permeabilitas antara 10^{-5} – 1 cm/s dan tipe tanah liat (*clay*) dengan permeabilitas antara 10^{-11} – 10^{-8} cm/s. Menurut (Hendtlass dalam Kartika Nurrachmah, 2016) tanah liat yang kedap sangat baik untuk digunakan sebagai pelapis dasar, jenis ini relatif lebih permeabel terhadap air dibandingkan liner sintesis dan tanah yang direkayasa akan lebih kedap dibandingkan dengan tanah yang tidak dipadatkan.

Selain pengujian permeabilitas lapisan dasar juga diharapkan dapat mereduksi kandungan pencemar pada air lindi sehingga tidak mencemari air tanah, berdasarkan penelitian yang dilaksanakan oleh Miftah (2018), kadar klorida yang tinggi pada air sumur sekitar lindi menandakan terjadinya pencemaran oleh resapan air lindi ke dalam air tanah. Namun, karena biaya untuk membuat lapisan dasar seperti yang terdapat dipasaran relatif mahal, maka diperlukan bahan alternatif untuk menggantikannya. Dalam penelitian ini, bahan alternatif yang dipakai adalah abu ampas tebu (abu ketel) yang dicampur dengan *natrium bentonite* sebagai bahan tanah campuran.

Penggunaan material *bentonite* tipe Na (*Sodium Bentonite*) yang akan menjadi bahan tanah campuran dengan kandungan mineral *montmorillonite* sebagai kandungan utamanya dengan rumus kimia $(Mg.Ca)O.Al_2O_3.5SiO_2.nH_2O$. Tingginya kandungan *montmorillonite* pada *bentonite* yang cukup tinggi menyebabkan *bentonite* dapat bersifat lunak dan plastis hal ini dapat menjadikan daya mengembang atau mengerut dari *bentonite* yang dapat menyerap dan memfikasi ion-ion logam dan persenyawaan organik (Kartika Nurrachmah, 2016). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kristia (2020), penambahan *bentonite* pada campuran limbah industri logam mengakibatkan nilai permeabilitas yang diharapkan tercapai yakni 10^{-6} cm/s.

Material lain yang ditambahkan pada penelitian ini ialah penggunaan material abu ketel, selain karena limbah ini masih terbatas pemanfaatannya sifat dari abu ketel yang tahan lama, kuat terhadap gesekan, tahan terhadap air, dan tidak mudah

membusuk, abu ketel dapat meningkatkan kuat tekan dan menurunkan nilai permeabilitas untuk air sebesar $1,2 \times 10^{-5}$ (Nidya, 2021). Salah satu sumber penghasil abu ketel di Indonesia ialah pada pabrik gula yang melakukan pembakaran ampas tebu yang sudah kering pada ketel uap (boiler) (Nuraldi Mulya, 2022). Salah satu pabrik yang menghasilkan abu ketel di Indonesia ialah pada daerah Sulawesi Selatan, Takalar. Dari data yang ada Pabrik Gula PT. Perkebunan Nusantara XIV menghasilkan limbah abu ampas tebu (abu ketel) sebesar 4.282,03 ton/periode giling, 4.135,13 ton/periode giling, dan 4.764,88 ton/periode giling selama tiga tahun berturut-turut (Selsi, 2021).

Berdasarkan penjelasan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi pencampuran bahan abu ketel dan *bentonite* sebagai alternatif yang dapat dijadikan lapisan dasar yang memenuhi syarat lapisan dasar juga kemampuan dari hasil pencampuran abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap kemampuan mereduksi kandungan pencemar dalam hal ini NaCl pada air lindi.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun penelitian ini dilaksanakan dalam upaya mencari :

1. Bagaimana sifat fisik bahan limbah abu ketel serta sifat fisik dan mekanis tanah *natrium bentonite* yang digunakan sebagai alternatif bahan campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)?
2. Bagaimana pengaruh variasi campuran abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap nilai permeabilitas sebagai alternatif bahan campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)?
3. Bagaimana efektivitas variasi campuran abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap kemampuan reduksi zat pencemar pada lindi khususnya NaCl?
4. Bagaimana potensi variasi pencampuran abu ketel dan *natrium bentonite* sebagai alternatif lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)?

1.3. Tujuan Penelitian/Perancangan

Tujuan penelitian yang dihasilkan yakni :

1. Menganalisis sifat fisik bahan limbah abu ketel serta sifat fisik dan mekanis tanah *natrium bentonite* yang digunakan sebagai alternatif bahan campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)
2. Menganalisis pengaruh variasi campuran abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap nilai permeabilitas sebagai alternatif bahan campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)
3. Menganalisis efektivitas variasi campuran abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap kemampuan reduksi zat pencemar pada lindi khususnya NaCl
4. Menganalisis potensi variasi pencampuran abu ketel dan *natrium bentonite* sebagai alternatif lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)

1.4. Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun manfaat penelitian ini sebagai berikut:

1. Memberikan informasi sifat fisik bahan limbah abu ketel serta sifat fisik dan mekanis tanah *natrium bentonite* yang digunakan sebagai alternatif bahan campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)
2. Memberikan informasi pengaruh variasi campuran abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap nilai permeabilitas sebagai alternatif bahan campuran lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)
3. Memberikan informasi efektivitas variasi campuran abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap kemampuan reduksi zat pencemar pada lindi khususnya NaCl
4. Memberikan keterangan potensi variasi pencampuran abu ketel dan *natrium bentonite* sebagai alternatif lapisan dasar tempat pemrosesan akhir sampah (TPA)

1.5. Ruang Lingkup/Batasan Masalah

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:
 - a. Abu ketel (ampas tebu) yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah hasil pembakaran ampas tebu dari PT. Perkebunan Nusantara XIV Unit Usaha Pabrik Gula Takalar.
 - b. *Natrium Bentonite* yang digunakan pada penelitian ini diambil dari CV. Anugrah Mineral Industri, Kabupaten Bandung, Jawa Barat.
 - c. Air lindi yang digunakan merupakan air lindi rekayasa dalam hal ini NaCl yang dibuat di Laboratorium Kualitas Air, Departemen Teknik Lingkungan, Universitas Hasanuddin.
2. Material campuran yang digunakan pada penelitian ini adalah abu Abu ketel yang dicampur dengan *Natrium Bentonite* yang akan diuji di Laboratorium Mekanika Tanah, Teknik Sipil, dan Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah, Fakultas pertanian, Universitas Hasanuddin.
3. Pengujian permeabilitas akan dilakukan pada sampel yang telah dicampur dengan beberapa komposisi dan diuji menggunakan air suling berdasarkan standar pengujian di laboratorium kimia dan kesuburan tanah, fakultas pertanian.
4. Pengujian kemampuan reduksi zat pencemar pada air lindi pada penelitian ini difokuskan pada larutan NaCl agar dapat diketahui kemampuannya terhadap satu jenis pencemar.
5. Penelitian ini akan meneliti sifat fisis dan mekanik sampel, diantaranya:
 - a. Pengujian berat jenis dan kadar air
 - b. Pengujian atterberg
 - c. Pengujian kompaksi
 - d. Pengujian permeabilitas
 - e. Pengujian penyerapan zat pencemar (NaCl)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)

Menurut Undang-undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah bahwa tempat pemrosesan akhir merupakan tempat dimana sampah diproses dan dikembalikan ke media lingkungan secara aman bagi manusia dan lingkungan. Sedangkan menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2013 tentang penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Persampahan Dalam Penanganan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Rumah Tangga, Tempat Pemrosesan Akhir yang selanjutnya disingkat TPA adalah tempat untuk memproses dan mengembalikan sampah ke media lingkungan.

TPA sampah adalah tahap terakhir dalam proses pengelolaan sampah. Ada berbagai metode penguraian sampah, termasuk *landfill*. *Sanitary landfill* adalah metode *landfill* yang dianggap paling baik. Di Indonesia, terdapat istilah *Controlled Landfill* atau lahan urug terkendali, yang merupakan peningkatan dari metode *open dumping* tetapi masih kurang baik dibandingkan dengan *sanitary landfill*. Perbaikan ini antara lain melalui penutupan sampah secara berkala. *Sanitary landfill* membutuhkan penutup harian, sedangkan *open dumping* tidak melakukan penutupan sama sekali, tetapi *controlled landfill* hanya menunda penutupan sampai 5-7 hari sesuai siklus hidup lalat. Namun, istilah *controlled landfill* sering salah dipahami, sehingga bila suatu TPA secara berkala melakukan penutupan sampah, maka dianggap sebagai *controlled landfill* (Damanhuri dan Tri, 2008).

Menurut Darmasetiawan (2004), pembuangan sampah di Indonesia beberapa tahapan perkembangan metode dalam pelaksanaannya yaitu:

1. *Open Dumping*

Cara pembuangan sederhana dimana sampah hanya dihamparkan pada suatu lokasi dibiarkan terbuka tanpa pengamanan dan ditinggalkan setelah lokasi tersebut penuh. Penerapan cara ini umumnya dikarenakan alasan keterbatasan sumber daya baik kemampuan teknik manusia maupun kemampuan lingkungan.

2. *Controlled Landfill*

Peningkatan atas metode *open dumping* dimana setelah jangka waktu tertentu timbunan sampah yang telah dipadatkan akan ditutup dengan lapisan tanah sehingga berbagai dampak negatif dapat dikurangi. Di Indonesia sendiri metode *controlled landfill* dianjurkan untuk diterapkan di kota sedang dan kecil.

3. *Sanitary Landfill*

Metode ini merupakan metode standar yang dipakai secara internasional dimana penutupan sampah dilakukan setiap hari sehingga potensi gangguan yang timbul dapat diminimalkan.

2.2. Lapisan Dasar Tempat Pemrosesan Akhir Sampah (TPA)

TPA sampah sistem lahan urug berlapis terkendali atau lahan urug berlapis bersih, semuanya memerlukan lapisan kedap pada struktur dasarnya untuk mencegah lindi agar tidak mencemari lingkungan. Menurut Damanhuri (2008), komponen utama sistem liner paling tidak terdiri dari 3 jenis, yaitu:

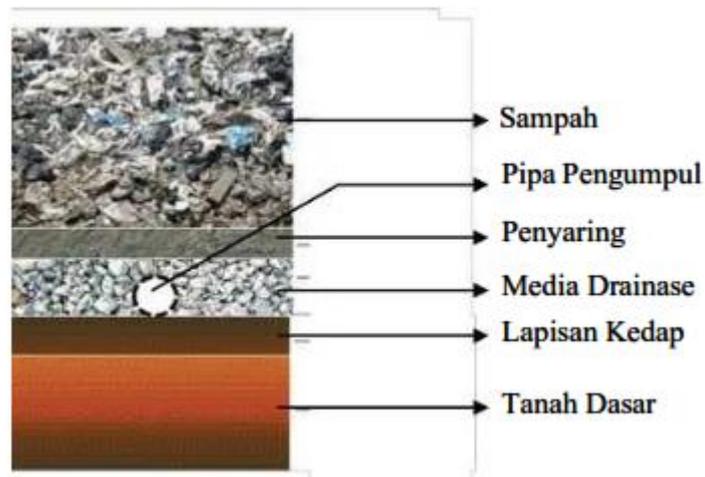
1. Lapisan kedap : lapisan terbawah yang berfungsi sebagai penahan resapan lindi ke lapisan tanah di bawahnya.
2. Lapisan pasir : lapisan yang berfungsi sebagai tempat pengaliran lindi menuju ke saluran pengumpul.
3. Lapisan tanah pelindung : berfungsi sebagai pelindung lapisan kedap dari perlintasan kendaraan dan gangguan-gangguan lainnya.

Pemasangan pelapis dasar (*liner*) TPA memiliki fungsi untuk melindungi air tanah dari kontaminasi lindi. Pelapis dasar dibuat sebelum TPA digunakan sebagai tempat pembuangan sampah, umumnya digunakan bahan yang memiliki permeabilitas rendah sebagai pelapis dasar TPA (Diharto, 2009). Hal tersebut juga dikatakan dalam salami (2013) disitasi Anne dan Fred (1993) bahwa resiko dari pencemaran dapat dikurangi dengan menggunakan lapisan kedap (*impermeable*) pada rancangan desain TPA. Disamping untuk meminimalisasi infiltrasi lindi ke lapisan tanah, pelapis dasar juga berfungsi untuk mencegah larinya gas ke udara tanpa terkumpul dalam *gas storage* yang telah disediakan.

Lapisan dasar TPA haruslah kedap air sehingga lindi terhambat meresap kedalam tanah dan tidak mencemari air tanah. Pelapisan dasar kedap ini dilakukan

dengan cara melapisi dasar TPA dengan geomembran setebal 1,5 mm. Pada dasar TPA dilengkapi dengan saluran pipa pengumpul lindi (*Leachate*) dan kemiringan minimal 2% ke arah saluran pengumpul maupun penampungan lindi.

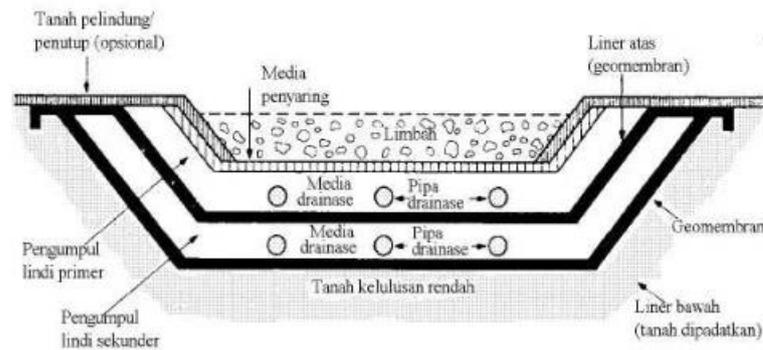
Pelapisan kedap pada struktur dasar TPA sampah sistem lahan-urug berlapis terkendali atau lahan-urug berlapis bersih pada umumnya menggunakan produk-produk geosintetik.



Gambar 1 Struktur dasar TPA sampah

Sumber : Kartika Nurrachmah, (2016)

Menurut Damanhuri (2008), dari susunan bahan pelapis biasa diterapkan, dikenal sistem pelapis dasar ganda (*double liner*), pelapis tunggal (*Single liner*) dan pelapis liat (*clay liner*). Sistem tersebut merupakan cara pengendalian dasar yang biasa digunakan di Amerika Serikat. Sistem pelapis dengan tanah liat tetap membutuhkan sistem pengumpul lindi dan sistem pendeteksi kebocoran seperti sistem pelapis sebelumnya. Namun dalam hal ini tidak digunakan geomembrane sebagai pembatas antara lapisan alamiah yang ada. Di Indonesia, sistem pelapis dasar ini diterapkan sebagai *landfill* untuk limbah B3 kategori I (pelapis dasar ganda), *landfill* kategori II (pelapis dasar tunggal) dan *landfill* kategori III (pelapis dasar liat).



Gambar 2 Skema sistem liner ganda dan tanah yang dipadatkan
Sumber : Kartika Nurrachmah,(2016)

Dalam pelaksanaannya TPA mengenal beberapa metode yaitu *open dumping*, *controlled landfill* (banyak dianjurkan di Indonesia) dan *sanitary landfill* (baru dianjurkan untuk kota besar dan metropolitan). Terdapat banyak persamaan antara metode *controlled landfill* dan *sanitary landfill*. Salah satu diantaranya adalah pemasangan sistem pelapis dasar yang bertujuan mengurangi mobilitas lindi ke dalam air tanah. Oleh karenanya dasar sebuah TPA akan terdiri dari lapisan bahan atau liner dan terdapat sistem pengumpul lindi untuk mencegah migrasi cemaran keluar dari TPA. Sebuah TPA harus dirancang dan dibangun untuk menerima sistem limbah yang sangat bervariasi. Desain ini harus dapat mencegah pencemaran air tanah, mengumpulkan lindi, memungkinkan adanya ventilasi dan pemantauan gas dan menyediakan tanah penutup (Shukla, S.K dan Jian-Hua Yin, 2006).

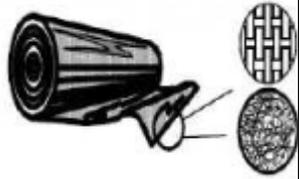
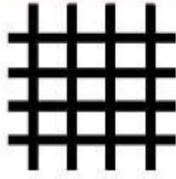
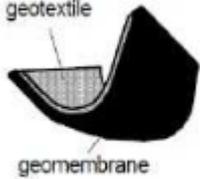
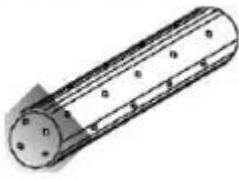
Pelapis dasar yang dianjurkan, terutama untuk TPA *controlled landfill* yaitu terdiri dari :

1. Geosintetis, jenis geosintetis yang biasa digunakan menurut (Bathrust, 2000) adalah:
 - a. Geotekstil sebagai filter, merupakan jenis geosintetis yang dibuat agar permeabel dan berfungsi melindungi sistem drainase dalam lindi. Menurut Shukla, S.K and Jian-Hua Yin (2006) bentuk geotekstil seperti lembaran kain yang dianyam, dirajut, maupun dikompres yang terbuat dari serat-serat polimer. Geotekstil pada lahan TPA memiliki fungsi utama sebagai *filter* untuk menyaring materi tersuspensi dari lindi. Selain itu karena sifatnya yang kuat dan anti tembus, geotekstil dapat juga berfungsi melindungi lapisan geomembran di bawahnya agar tidak

sobek akibat tusukan benda keras. Nilai permeabilitas geotekstil sekitar 10^{-5} m/s sampai 1 m/s, menjadi beberapa tipe, yaitu:

- *Woven* : tipe Geotekstil dengan pori yang lebih besar dan anyaman seratnya lebih teratur, memiliki porositas 35-45%.
- *Non-woven* : tipe Geotekstil dengan pori sangat kecil dan seratnya tidak teratur dan tidak dianyam, memiliki porositas 55-93%.
- *Knitted* : Geotekstil yang dibuat berongga seperti rajutan menggunakan mesin anyam atau alat tenun.
- *Stitched* : Geotekstil yang seratnya atau rajutannya dirapatkan dengan dijahit (Shukla And Yin, 2006).

- b. Geogrid sebagai penahan atau sistem penguatan pada tanah.
- c. Geonet sebagai sarana drainase untuk membawa cairan atau gas dalam jumlah besar. Menurut Shukla, S.K dan Jian-Hua Yin (2006) geonet memiliki nilai permeabilitas 10^{-2} atau 10^{-1} m/s.
- d. Geomembran dan geokomposit sebagai lapisan penghalang, geosintetis dari bahan polimer yang dibuat kedap. Bahan yang dianggap baik adalah dari *high-density polyethylene* (HDPE) yang tahan terhadap reaksi kimia yang dijumpai pada limbah B3. Menurut Shukla, S.K dan Jian-Hua Yin (2006) ketebalan geomembran berkisar antara 0,25 mm – 7,5 mm dan permeabilitas antara $0,5 \times 10^{-12}$ – $0,5 \times 10^{-15}$ m/s. *Dry density* untuk geomembran sekitar 0,932-0,940 g/cm³.
- e. Geopipe, pipa berlubang untuk drainase cairan atau gas (termasuk lindi atau pengumpul gas pada TPA) yang dibungkus dengan filter geotekstil.
- f. *Geosynthetic Clay Liner* (GCL). Menurut Bouazza (2001) *Geosynthetic Clay Liner* (GCL) terbentuk dari kombinasi geosintetik dan *Sodium bentonite clay* maupun *natrium bentonite clay*. Ada 2 macam kombinasi, yaitu: geotextile dan *sodium bentonite clay* maupun *natrium bentonite clay*. Keuntungan utama dari GCL adalah ketebalan terbatas, fleksibilitas pemenuhan yang baik, instalasi yang mudah dengan biaya yang relatif rendah. Di sisi lain, ketebalan yang terbatas dapat menghasilkan konduktivitas hidrolis, kompatibilitas kimia dan difusi.

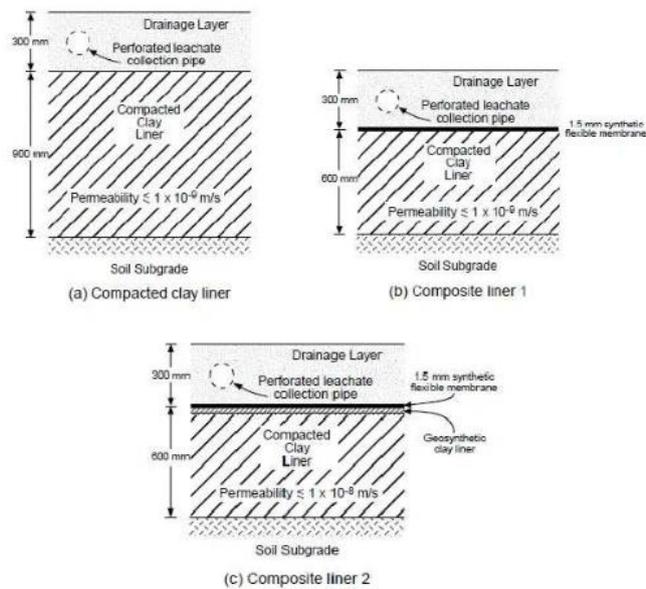
Geotekstil	Geogrid	Geonet
		
Geomembran	Geokomposit	Geopipe
		
Geosynthetic Clay Liner		
		

Sumber : Bathrust, 2000

Gambar 3 Klasifikasi geotekstil
Sumber : Kartika Nurrachmah,(2016)

2. Tanah Liat

Ketersediaan tanah (sebagai *liner* ataupun sebagai tana penutup) memegang peranan penting dalam aplikasi *landfill*. Tanah liat yang kedap sangat baik untuk digunakan sebagai pelapis dasar, jenis ini relatif lebih permeabel terhadap air dibanding *liner* sintetis dan tanah yang direkayasa akan lebih kedap dibanding tanah yang tidak dipadatkan. Menurut Hendtlass (2000) permeabilitas untuk *compacted Clay Liner* adalah $<10^{-9}$ m/s. Sedangkan menurut Wesley disitasi oleh Cipta Aji, 2012 Koefisien permeabilitas untuk tanah lempung 1×10^{-11} - 1×10^{-8} m/s dan untuk tanah lanau 1×10^{-7} - 1×10^{-6} m/s.



Gambar 4 Model sistem liner
Sumber : Hendtlass, 2000

3. Gravel (Kerikil)

Menurut Das (1995) disitasi oleh Irawan, nilai koefisien permeabilitas untuk kerikil sedang sampai kasar $>10^{-1}$ cm/dt. Sedangkan menurut Wesley disitasi oleh Cipta Aji, 2012 koefisien permeabilitas kerikil adalah 1×10^{-2} – 1 m/s.

2.3. Abu Ketel

Abu ketel atau yang dikenal sebagai abu ampas tebu merupakan abu yang ditemukan dari sisa-sisa tebu yang telah diperas kemudian melalui tahap pembakaran di ketel uap yang menggunakan ampas tebu sebagai bahan bakar. Fungsi ketel uap tersebut adalah sebagai sumber tenaga untuk menggerakkan mesin penggiling tebu dalam industri gula (Nidya, 2021).

Berikut merupakan proses terbentuknya abu ampas tebu (Gerry, 2013):

1. Setelah tebu ditebang kemudian diangkut ke pabrik gula
2. Batang tebu tersebut kemudian digiling untuk dikeluarkan air gulanya sehingga tersisa ampas tebu dalam keadaan kering.
3. Ampas tebu ini kemudian dengan peralatan mekanik diangkut ke dapur pembakaran ketel-ketel uap.

4. Apabila ampas tebu tersebut terbakar halus/ habis, abu tersebut dikeluarkan dari dapur pembakaran untuk kemudian dibuang. Abu inilah yang merupakan limbah yang akan dimanfaatkan sebagai substitusi parsial semen dalam campuran beton.

Menurut (Nidya, 2021), Abu ampas Tebu perlu melewati tahap pembakaran dengan suhu lebih dari 600°C agar bisa berubah warna dari hitam (karena mengandung karbon) menjadi coklat agak kemerahan. Pada tahap ini, kandungan silika dalam Abu Ampas Tebu menjadi lebih tinggi.

Adapun komposisi abu ampas tebu adalah $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ berkisar antara 70%-80%. Dan kadar CaO berkisar 3%-5%. Sedangkan komposisi *fly ash* tipe F memiliki komposisi $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ berkisar lebih dari atau sama dengan 70% dan untuk kadar CaO memiliki nilai kurang dari 8%. Oleh karena itu, abu ampas tebu dapat dikategorikan sebagai *fly ash* tipe F karena kandungan silika abu ampas tebu mencapai 71%. Selanjutnya, abu ampas tebu yang tertinggal pada tungku pembakaran disebut *bottom ash* (Igit Nugraha, 2016).

Apabila terdapat kandungan *fly ash* pada abu ampas tebu maka hal ini memiliki dampak negatif terhadap Kesehatan maupun lingkungan. Abu ampas tebu dalam jumlah besar yang tidak dikelola dengan baik dapat menyebar di lingkungan luas, masuk ke dalam air, udara, atau tanah sehingga dapat mencemari lingkungan. Selain itu, abu ampas tebu dapat berpengaruh pada kesehatan manusia, yaitu terkait dengan penyakit gangguan saluran pernafasan kronik, *pneumoconiosis*, dan dapat meracuni saraf manusia (Anapis, 2015)

Penambahan ampas tebu pada stabilisasi tanah dapat meningkatkan nilai angka pori. Hal ini disebabkan karena terjadinya reaksi *pozzolanic*. Reaksi *pozzolanic* menyebabkan kerapatan butiran pada saat tanah dipadatkan akan semakin tinggi sehingga mengurangi jumlah pori dalam tanah. Perubahan ini dapat menyebabkan nilai porositas akan berbanding lurus dengan perubahan nilai angka pori (Ari, 2013 dalam Nidya, 2021)

Abu ketel yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari PT Perkebunan Nusantara, Pabrik Gula Takalar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nidya (2021) dan Selsi (2021), kandungan kimia abu ketel pabrik gula takalar dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Kandungan kimia abu ketel pabrik gula takalar

Unsur Kimia	Hasil Pemeriksaan ($\mu\text{g}/\text{gram}$)
Cr	7,32
Cd	0,01
As	0,26
Pb	0,77

Sumber : Nidya, 2021

Hasil dari kandungan kimia diatas apabila dibandingkan dengan peraturan yang ditetapkan oleh *U.S. Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 6 tahun 2021 tentang tata cara dan persyaratan pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun adalah sebagai berikut.

Tabel 2 Perbandingan kandungan kimia abu ketel dengan peraturan

Unsur Kimia	Hasil Pemeriksaan (PPM)	Ambang Batas U.S EPA thn. 1993 (PPM)	Ambang Batas		Keterangan
			PERMEN LHK No. 6 tahun 2021 (PPM)		
Cr	7,32	3000	2000		Dibawah baku mutu
Cd	0,01	85	400		Dibawah baku mutu
As	0,26	75	2000		Dibawah baku mutu
Pb	0,77	420	6000		Dibawah baku mutu

Sumber : Nidya, 2021

Dari tabel diatas kandungan kimia logam berat yang terkandung dalam abu ketel yang digunakan tidak melebihi ambang batas untuk tanah yang telah ditetapkan oleh U.S. EPA atau Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 6 Tahun 2021, sehingga aman untuk digunakan sebagai tanah lapisan dasar (*liner*) TPA.

2.4. Natrium Bentonite

Bentonite merupakan istilah untuk lempung yang terdiri atas mineral montmorillonite sebagai kandungan utamanya dengan rumus kimia $(Mg.Ca)O.Al_2O_3.5SiO_2.nH_2O$. Kandungan montmorillonite pada *bentonite* berkisar antara 70-80%. Oleh karena itu *bentonite* sering disebut sebagai nama dagang dari montmorillonite. Selain montmorillonite, kandungan mineral lain dalam *bentonite* antara lain berupa mineral kaolinit, illit, kuarsa, plagioklas, kristobalit, dan sebagainya (Kartika Nurrachmah, 2016).

Klasifikasi *bentonite* dibuat terlebih dahulu dengan menyelidiki karakteristik structural seperti komposisi kimia dan mineralogi, kapasitas tukar kation dan luas permukaan spesifik. Berdasarkan jenisnya, *bentonite* dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Na-bentonit-Swelling Bentonite

Na bentonit memiliki daya mengembang hingga delapan kali apabila dicelupkan ke dalam air, dan tetap terdispersi beberapa waktu di dalam air. Dalam keadaan kering berwarna putih atau krem, pada keadaan basah dan terkena matahari sinar matahari akan berwarna mengkilap. Perbandingan soda dan akpur tinggi, suspense koloidal mempunyai pH 8,5-9,8, tidak dapat diaktifkan, posisi pertukaran diduduki oleh ion-ion sodium (Na^+).

2. Ca-bentonit-Non Swelling Bentonite

Ca bentonit ditandai dengan kemampuan penyerapan air dan kemampuan mengembang yang rendah dan tidak mampu untuk tetap tersuspensi dalam air. Perbandingan kandungan Na dan Ca rendah, suspense koloid memiliki pH 4-7. Posisi pertukaran ion lebih banyak diduduki oleh ion-ion kalsium dan magnesium. Dalam keadaan kering bersifat *rapid slaking*, berwarna abu-abu, biru, kuning, merah dan coklat (Kartika Nurrachmah, 2016).

Bentonite termasuk mineral yang memiliki gugus aluminosilikat. Unsur-unsur kimia yang terkandung dalam bentonit dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3 Unsur kimia bentonit

Senyawa	Na-Bentonit (%)	Ca-Bentonit (%)
SiO ₂	61,3-61,4	62,12

Senyawa	Na-Bentonit (%)	Ca-Bentonit (%)
Al ₂ O ₃	19,8	17,33
Fe ₂ O ₃	3,9	5,30
CaO	0,6	3,68
MgO	1,3	3,30
Na ₂ O	2,2	0,50
K ₂ O	0,4	0,55
H ₂ O	7,2	7,22

Sumber : Kartika Nurrachmah, 2016

Sifat – sifat fisika *bentonite* antara lain berkilap seperti lilin, umumnya lunak dan plastis, berwarna pucat dengan kenampakan putih, hijau muda, kelabu hingga merah muda dalam keadaan segar dan menjadi krem bila lapuk yang kemudian berubah menjadi kuning, merah, coklat hingga hitam. Bila diraba terasa licin seperti sabun. Bila dimasukkan ke dalam air, akan menyerap air, sedikit atau banyak, bila kena air hujan *bentonite* dapat berubah menjadi bubur dan kering akan menimbulkan rekahan yang nyata. Sifat fisik lainnya berupa massa jenis 2,2-2,8 g/L; indek bias 1,547-1,557; dan titik lebur 1330-1430 °C (Kartika, 2016)

Struktur bangun lembaran *bentonite* terdiri dari 2 lapisan tetrahedral yang disusun unsur utama Silika (O, OH) yang mengapit satu lapisan octahedral yang disusun oleh unsur M (O, OH) (M=Al, Mg, Fe) yang disebut juga mineral tipe 2:1. Ruang dalam lembaran ini dapat Menyusun hamper 85% dari *bentonite* (Kartika, 2016).

Montmorillonite umumnya berukuran sangat halus, sedangkan komponen-komponen dalam lapisan tidak terikat kuat. Jika terjadi sentuhan dengan air, maka ruang di antara lapisan mineral mengembang, menyebabkan volume clay dapat berlipat ganda. Terdapat tanda bahwa jarak dasar (*basic Spacing*) montmorillonite meningkat secara seragam jika terjadi penyerapan air. Beberapa peneliti mencatat bahwa meningkatnya jarak dasar dapat berlangsung perlahan-lahan, yaitu pertanda pembentukan kulit hidrasi di sekeliling kation-kation yang terdapat di antara lapisan. Tingginya daya mengembang atau mengerut dari montmorillonite menjadi alasan kuat mengapa mineral ini dapat menyerap dan memfiksasi ion-ion logam dan persenyawaan organik (Kartika, 2016).

Jenis *Na-Bentonite* yang merupakan tanah lempung memiliki sifat sangat keras dalam keadaan kering dan bersifat plastis pada kadar air sedang, sedangkan pada keadaan air lebih tinggi, tanah lempung bersifat lengket (kohesif) dan sangat lunak (Das, 1995 dalam Qunik, 2018). Penggunaan *Bentonite* ini diharapkan dapat meningkatkan potensi pencampuran dengan abu ketel sebagai lapisan dasar TPA dikarenakan sifat dari tanah lempung ini memiliki permeabilitas rendah, kenaikan air kapiler yang tinggi, bersifat kohesif, kadar kembang susut (*Swelling*) yang tinggi, dan proses terjadinya konsolidasi lambat. (Qunik, 2018)

Bentonite yang digunakan pada penelitian ini berasal dari CV Anugrah Mineral Industri yang merupakan tipe *sodium bentonite* (*Na-Bentonite*) yang memiliki karakteristik kimia berikut.

Tabel 4 Komposisi kimia *bentonite* CV Anugrah Mineral Industri

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

2.5. Air Lindi

Air lindi merupakan cairan yang berasal dari sampah. Cairan ini mengandung unsur-unsur terlarut. Apabila turun hujan, maka air lindi akan memiliki kandungan mineral dan zat organik yang tinggi. Air lindi yang dibiarkan begitu saja mengalir ke permukaan tanah akan menyebabkan pencemaran lingkungan khususnya air tanah. Salah satu yang perlu diperhatikan adalah karakteristik air lindi (Munawir Ali, 2011).

Air lindi mempunyai karakter yang khas tergantung pada umur TPA, yaitu (Damanhuri, 1996):

1. Lindi dari *landfill* yang muda bersifat asam, kandungan organik yang tinggi, mempunyai ion-ion terlarut tinggi serta rasio BOD/COD yang relatif tinggi.
2. Lindi dari *landfill* yang sudah tua sudah mendekati netral, mempunyai kandungan karbon organik dan mineral yang relatif menurun serta rasio BOD/COD relatif menurun.

Selain itu air lindi juga dipengaruhi oleh proses yang terjadi dalam TPA, yaitu fisik, kimia, dan biologis. Selanjutnya, proses yang terjadi di TPA dipengaruhi oleh jenis sampah, lokasi TPA, hidrogeologi, dan sistem pengoperasian. Adapun karakteristik air lindi dapat dilihat pada Tabel 5 dibawah ini.

Tabel 5 Karakteristik air lindi

Parameter	Satuan	Range
COD	mg/liter	150 – 100000
BOD ₅	mg/liter	100 – 90000
pH	-	5,3 – 8,5
Alkalinitas	(mg CaCO ₃ /liter)	300 – 11500
Hardness	(mg CaCO ₃ /liter)	500 – 8900
NH ₄	mg/liter	1 – 1500
N-Organik	mg/liter	1 – 2000
N-Total	mg/liter	50 – 5000
NO ₃ (Nitrit)	mg/liter	0,1 – 50
NO ₂ (Nitrat)	mg/liter	0 – 25
P-Total	mg/liter	0,1 – 30
PO ₄	mg/liter	0,3 - 25
Ca	mg/liter	200 - 3000
Mg	mg/liter	50 – 1150
Na	mg/liter	50 – 4000
K	mg/liter	10 – 2500
SO ₄	mg/liter	10 – 1200
Cl	mg/liter	30 – 4000
Fe	mg/liter	0,4 – 2200
Zn	mg/liter	0,05 – 170
Mn	mg/liter	0,4 - 50
CN	mg/liter	0,04 – 90
Aoxa	mg/liter	320 – 3500
Phenol	mg/liter	0,04 – 44
As	mg/liter	5 – 1600
Cd	mg/liter	0,5 – 140
Co	mg/liter	4 - 950
Ni	mg/liter	20 – 2050
Pb	mg/liter	8 – 1020
Cr	mg/liter	300 – 1600

Parameter	Satuan	Range
Cu	mg/liter	4 – 1400
Hg	mg/liter	0,2 - 50

Sumber : Munawar Ali, 2011

Air lindi juga dipengaruhi oleh keadaan iklim. Pada proses penguraian biologi dalam pembentukan air lindi, infiltrasi air hujan juga berperan karena dapat membawa kontaminan dari tumpukan sampah dan memberikan kelembaban. Pembentukan lindi akan cepat apabila intensitas hujan yang tinggi dan sifat timbunan yang tidak padat (Munawir Ali, 2011 dalam Nidya, 2021).

2.6. Batas Konsistensi (*Atterberg Limit*)

Pada permulaan abad ke-20, seorang ahli sains asal Swedia bernama Atterberg mengembangkan suatu teknik untuk menjelaskan karakteristik konsistensi tanah butiran halus yang bervariasi dalam kadar air. Ketika kadar airnya sangat tinggi, campuran tanah dan air akan menjadi sangat lunak, menyerupai cairan. Karena itu, berdasarkan kandungan air yang terdapat di dalamnya, tanah dapat dibagi menjadi empat kondisi dasar, yaitu padat, semi padat, plastis, dan cair. (Braja M. Das, 1995).

Batas susut (*shrinkage limit*) didefinisikan sebagai kadar air dalam persen di mana terjadi perubahan dari keadaan padat ke keadaan semi-padat. Batas plastis (*plastic limit*) didefinisikan sebagai kadar air di mana terjadi perubahan dari keadaan semi-padat ke keadaan plastis, sedangkan perubahan dari keadaan plastis ke keadaan cair disebut batas cair (*liquid limit*). Ketiga batas ini dikenal sebagai batas-batas Atterberg (*Atterberg limits*) (Braja M. Das, 1995).

a. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair (LL) adalah titik di mana tanah memiliki kadar air yang cukup untuk berada pada keadaan cair, dan ini merupakan batas atas dari wilayah plastis. Metode umum yang digunakan untuk menentukan batas cair adalah Uji Casagrande (1948), di mana contoh tanah dimasukkan ke dalam cawan dengan ketinggian sekitar 8 mm. Alat pembuat alur kemudian digunakan untuk membuat goresan di tengah cawan hingga mencapai dasar. Setelah itu, cawan diketuk dengan alat penggetar dan jatuhkan dari ketinggian 1 cm pada landasan. Batas cair tanah dapat ditentukan dengan mengukur persentase kadar air yang

dibutuhkan untuk menutup celah sepanjang 12,7 mm pada dasar cawan setelah 25 kali pukulan. Hal ini didefinisikan oleh Hary (2002).

Karena sulit untuk mengendalikan kadar air agar tepat pada saat celah menutup pada 25 kali pukulan, maka seringkali percobaan dilakukan beberapa kali dengan variasi kadar air dan jumlah pukulan yang berbeda, antara 15 sampai 35 kali. Setelah itu, hubungan antara kadar air dan jumlah pukulan dicatat dalam bentuk grafik semi-logaritmik untuk menentukan kadar air yang tepat pada saat 25 kali pukulan dilakukan, seperti yang dijelaskan oleh Hary (2002).

Indeks aliran (flow index) didefinisikan sebagai kemiringan garis pada kurva tersebut, dan dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 (Hary, 2002).

$$I_F = \frac{W_1 - W_2}{\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right)} \quad (1)$$

dimana,

- I_F : Indeks Aliran
- W_1 : kadar air (%) pada N_1 Pukulan
- W_2 : kadar air (%) pada N_2 Pukulan

b. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas plastis (PL) didefinisikan sebagai kadar air pada posisi antara wilayah plastis dan semi-padat, yaitu persentase kadar air di mana tanah mulai retak-retak ketika digulung menjadi silinder dengan diameter 3,2 mm, seperti yang dijelaskan oleh Hery (2002).

c. Batas susut (*Shrinkage Limit*)

Batas susut (SL) didefinisikan sebagai kadar air pada posisi antara wilayah semi-padat dan padat, yaitu persentase kadar air di mana pengurangan lebih lanjut pada kadar air tidak akan mengakibatkan perubahan volume tanah. Percobaan batas susut dilakukan di dalam laboratorium dengan menggunakan cawan porselin berdiameter 44,4 mm dan tinggi 12,7 mm. Bagian dalam cawan dilapisi dengan pelumas dan diisi dengan tanah yang sudah jenuh sempurna. Selanjutnya, tanah di oven untuk dikeringkan. Volume dapat dihitung menggunakan Persamaan 3, seperti yang dijelaskan oleh Hery (2002).

d. Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*)

Indeks plastisitas (PI) adalah selisih antara batas cair dan batas plastis, dan interval kadar air tersebut menunjukkan sifat keplastisan tanah. Jadi, PI dapat digunakan untuk menunjukkan seberapa plastis tanah tersebut. Jika PI tinggi, maka tanah tersebut mengandung banyak butiran lempung, sedangkan jika PI rendah seperti pada tanah lanau, sedikit pengurangan kadar air saja dapat membuat tanah menjadi kering. Tabel 6 di Atterberg memberikan batasan untuk indeks plastisitas, sifat tanah, dan kohesi, seperti yang dijelaskan oleh Hery (2002).

Tabel 6 Nilai indeks plastisitas dan macam tanah

PI	Sifat	Macam tanah	Kohesi
0	Non Plastis	Pasir	Non Kohesif
< 7	Plastisitas Rendah	Lanau	Kohesif Sebagian
7 – 17	Plastisitas Sedang	Lempung Berlanau	Kohesif
> 17	Plastisitas Tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber : Hery, 2002

Tabel 7. Harga batas atterberg untuk mineral lempung

Mineral	Batas Cair	Batas Plastis	Batas Kerut
Montmorillonite	100 - 900	50 – 100	8,5 – 1,5
Nontronite	32 - 72	19 – 27	
Illite	60 – 120	35 – 60	15 – 17
Kaolinite	30 – 110	25 – 40	25 - 29
Halloysite terhidrasi	50 – 70	47 – 60	
Halloysite	35 – 55	30 – 45	
Attapulgit	160 – 230	100 – 120	
Chlorite	44 – 47	36 – 40	
Allophane	200 - 250	130 - 140	

Sumber : Hery, 2002

2.7. Kompaksi

Uji kompaksi atau pemadatan dilakukan untuk memperoleh informasi tentang bagaimana kadar air berhubungan dengan berat volume, dan juga untuk mengevaluasi kemampuan tanah dalam mencapai kepadatan tertentu. Proctor (1933) menemukan bahwa ada hubungan antara kadar air dan berat volume kering tanah padat, di mana ada satu nilai kadar air tertentu yang dapat mencapai berat volume kering maksimum untuk berbagai jenis tanah. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi berat volume kering setelah pemadatan meliputi jenis tanah yang diuji, kadar air, serta usaha yang dilakukan oleh alat penumbuk. (Hardiyatmo, 2002).

Untuk menentukan karakteristik kepadatan tanah, dapat dilakukan dengan menggunakan pengujian standar uji Proctor. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat pemadat berbentuk silinder mould dengan ukuran $9,44 \times 10^{-4}$. Tanah yang akan diuji dimasukkan ke dalam mould dan dipadatkan menggunakan penumbuk yang beratnya 2,5 kg dengan ketinggian jatuh 30,5 cm. Proses pemadatan dilakukan dalam tiga lapisan, dengan setiap lapisan ditumbuk sebanyak 25 kali. Untuk mendapatkan hasil yang akurat, percobaan pemadatan harus diulangi paling sedikit 4-5 kali dengan variasi nilai kadar air yang berbeda pada setiap percobaan. Setelah selesai dilakukan pengujian, hubungan antara kadar air dan berat volume kering dapat digambarkan dalam sebuah kurva. Kurva ini menunjukkan nilai kadar air terbaik untuk mencapai berat volume kering terbesar atau kepadatan maksimum. Dengan demikian, karakteristik kepadatan tanah dapat ditentukan dengan melihat kurva tersebut. (Hardiyatmo, 2002).

Dalam pengujian kepadatan tanah, penting untuk memperhatikan nilai kadar air yang digunakan. Pada kadar air yang tinggi, berat volume kering tanah dapat berkurang, sedangkan pada kadar air yang rendah, tanah cenderung menjadi kaku dan sulit untuk dipadatkan. Namun, jika dalam proses pemadatan, semua udara yang terperangkap dalam tanah dapat dikeluarkan, maka tanah akan berada dalam keadaan jenuh dan nilai berat volume kering akan mencapai titik maksimum.

2.8. Permeabilitas

Permeabilitas merujuk pada kemampuan bahan yang berpori untuk memungkinkan aliran rembesan cairan, baik itu berupa air atau minyak, melalui rongga pori. Rongga pori dalam tanah saling terhubung satu sama lain, yang memungkinkan aliran air dari area dengan energi tinggi ke area dengan energi yang lebih rendah. Permeabilitas tanah dijelaskan sebagai sifat tanah yang memungkinkan air mengalir melalui pori-pori tanah (Hery, 2002).

Aliran di dalam tanah dapat berupa aliran laminar atau turbulen, dan tahanan terhadap aliran dipengaruhi oleh jenis tanah, ukuran dan bentuk butiran, rapat massa, dan bentuk geometri rongga pori. Temperatur juga memiliki peran penting dalam menentukan tahanan aliran, termasuk kekentalan dan tegangan permukaan. Meskipun pada dasarnya semua jenis tanah memiliki rongga pori, dalam praktiknya, istilah permeabel digunakan untuk merujuk pada tanah yang secara efektif dapat memungkinkan air mengalir melaluinya. Sebaliknya, tanah yang disebut impermeabel memiliki kemampuan meloloskan air yang sangat terbatas (Hery, 2002).

Koefisien rembesan (*coefficient of permeability*) mempunyai satuan yang sama seperti kecepatan. Istilah koefisien rembesan sebagian besar digunakan oleh para ahli teknik tanah (geoteknik), para ahli geologi menyebutnya sebagai konduktivitas hidrolis (*Hydraulic conductivity*). Bilamana satuan Inggris digunakan, koefisien rembesan dinyatakan dalam ft/menit atau ft/hari, dan total volume dalam ft^3 . Dalam satuan SI, koefisien rembesan dinyatakan dalam cm/detik, dan total volume dalam cm^3 (Braja M. Das, 1995 dalam Nidya, 2021).

Koefisien rembesan tanah tergantung pada beberapa faktor, yaitu : kekentalan cairan, distribusi ukuran-pori, distribusi ukuran-butir, angka pori, kekasaran permukaan butiran tanah, dan derajat kejenuhan tanah. Pada tanah berlempung, struktur tanah memegang peranan penting dalam menentukan koefisien rembesan. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi sifat rembesan tanah lempung adalah konsentrasi ion dan ketebalan lapisan air yang menempel pada butiran lempung. Harga koefisien rembesan (k) untuk tiap-tiap tanah adalah berbeda-beda. Beberapa harga koefisien rembesan diberikan dalam Tabel 8 dibawah ini (Braja M. Das, 1995).

Tabel 8 Harga koefisien permeabilitas

Jenis Tanah	Koefisien Permeabilitas	
	(cm/detik)	(Ft/menit)
Kerikil Bersih	1,0 – 100	2,0 – 200
Pasir Kasar	1,0 – 0,01	2,0 – 0,02
Pasir Halus	0,01 – 0,001	0,02 – 0,002
Lanau	0,001 – 0,00001	0,002 – 0,00002
Lempung	Kurang dari 0,000001	Kurang dari 0,000002

Sumber : Braja M. Das (1995)

Lapisan dasar TPA memiliki ketentuan tersendiri dalam penggunaan lapisan kedap, menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia No. 3 Tahun 2013 Pada Lampiran 3 Persyaratan Teknis Penyediaan Pengoperasian, Penutupan atau Rehabilitasi TPA koefisien permeabilitas untuk lapisan dasar TPA tidak lebih besar atau berkisar 10^{-6} - 10^{-7} cm/det. Menurut *Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) untuk semua TPA limbah non B3 komponen bawah dari liner atau lapisan dasar harus terdiri dari lapisan tanah padat setebal 1m dengan permeabilitas kurang atau sama dengan 1×10^{-9} m/s dibangun dalam rangkaian yang dipadatkan tidak lebih tebal dari 250mm.

Koefisien rembesan tanah yang tidak jenuh air adalah rendah; harga tersebut akan bertambah secara cepat dengan bertambahnya derajat kejenuhan tanah yang bersangkutan. Koefisien rembesan juga dapat dihubungkan dengan sifat-sifat dari cairan yang mengalir melalui tanah yang bersangkutan dengan persamaan berikut ini (Braja M. Das, 1995):

$$k = \frac{\gamma_w}{n} K \quad (2)$$

dimana,

- γ_w : Berat Volume Air
- n : Kekentalan Air
- K : Rembesan Absolut

Pengujian permeabilitas dapat mengacu pada standar ASTM D-2434-68, yakni menggunakan metode *Constant Head* untuk sampel uji tanah asli sedangkan metode *Falling Head* untuk menentukan nilai permeabilitas benda uji dengan kombinasi campuran.

1. Metode *Constant Head*

Langkah pertama yang dilakukan yaitu timbang tabung sampel, batu pori, pegas, kertas saring dan penutupnya. Kemudian mengambil tabung permeabilitas lalu dimasukkan sampel uji setinggi ± 10 cm, pasang batu pori diatas sampel. Letakkan pegas diatas batu pori. Pasang penutup tabung, kemudian timbang seluruh sistem tersebut. Pasang alat permeabilitas di dekat wastafel/sumber air. Jalankan air dari corong atas, dengan mengatur 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 ± 10 menit. Setelah alirannya stabil dilakukan pengujian dengan menghitung volume air yang keluar dengan menggunakan waktu tamping yang diinginkan.

2. Metode *Falling Head*

Pada metode ini sedikit mirip dengan pengujian *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 h_1 dan h_2 untuk memulai pengujian. Selanjutnya lakukan pengujian dengan menghitung waktu yang ditempuh air dalam melewati h_1 dan h_2 . Dengan bersamaan hitung jumlah air yang keluar melewati sampel uji.

3. Metode *Constanta Permeameter*

Permeabilitas diartikan sebagai kecepatan Bergeraknya suatu cairan pada suatu media berpori dalam keadaan jenuh. Dalam hal ini sebagai cairan adalah air dan sebagai media berpori adalah tanah. Penetapan permeabilitas tanah dalam keadaan jenuh dilakukan mengikuti cara yang ditemukan oleh De Boodt (1967) berdasarkan Hukum Darcy. Langkah pertama yang dilakukan yaitu memasukkan sampel tanah kedalam ring, kemudian tanah yang telah dimasukkan di ring direndam dalam bak air sampai setinggi 3 cm dari dasar bak selama 24 jam. Maksud perendaman adalah untuk mengeluarkan udara yang ada dalam pori-pori tanah sehingga tanah menjadi jenuh. Setelah perendaman selesai contoh tanah disambung dengan satu tabung silinder yang

kemudian akan dipindahkan ke alat permeabilitas, air ditambahkan secara hati-hati dan tinggi air dipertahankan, kemudian melakukan pengukuran volume air yang mengalir melalui alat penetapan permeabilitas tanah dalam waktu tertentu, dan diukur volume air yang mengalir.

2.9. Penurunan Kandungan Pencemar NaCl

Penumpukan sampah di TPA dapat menyebabkan pencemaran air yang ditimbulkan oleh air lindi. Dimana cairan dari air lindi dapat merembes ke bawah dari tumpukan sampah yang terbentuk karena pelarutan dan pembilasan materi terlarut dan proses pembusukan oleh aktivitas mikroba setelah adanya air eksternal, termasuk air hujan yang masuk ke dalam tumpukan sampah. Hujan dalam mengeluarkan zat yang terdekomposisi sehingga air lindi akan mengalir ke sekitar rawa (Miftah, 2018). Salah satu zat pencemar yang terdapat pada air lindi ialah kadar klorida yang cukup tinggi. Untuk TPA baru (<2 tahun) kandungan klorida dapat berkisar antara 50-4000 mg/liter dan untuk TPA matang(>10tahun) berkisar 100-2000 mg/liter (Munawar Ali, 2011).

Klorida merupakan salah satu anion anorganik utama yang ditemukan secara alami di perairan. Keberadaan klorida berlebih di dalam air mengindikasikan bahwa air tersebut tercemar. Kadar klorida dalam air berpengaruh terhadap tingkat keasinan air. Semakin tinggi konsentrasi klorida maka semakin asin air yang menyebabkan turunnya kualitas air tersebut (Miftah, 2018)

Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 492/MENKES.SK/VI/2010 nilai kadar maksimal klorida dalam air minum ialah 250mg/liter, sedangkan untuk air bersih berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No.416/MENKES/PER/IX/1990 yakni sebesar 600 mg/liter, maka dari itu perlu dilakukan penelitian sederhana menggunakan reaktor uji campuran sampel abu ketel dan *natrium bentonite* terhadap kemampuan reduksi kandungan NaCl pada air lindi dalam hal ini pencemar NaCl.

2.10. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dan untuk melakukan perbandingan dengan penelitian ini. Tujuannya adalah untuk menghindari kemungkinan kesamaan dengan penelitian ini. Berikut adalah hasil dari penelitian sebelumnya.

1. Penelitian oleh Mochammad Arief, Dkk (2021)

Sumber rujukan pertama ialah jurnal yang berjudul Stabilitas Hidraulik Campuran Abu Terbang-*Bentonite* dalam sistem pengurangan TPA. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk menguji pengaruh bahan campuran *fly ash* dengan pengikat *Bentonite* sebagai alternatif penahan infiltrasi lindi dengan biaya yang relatif rendah.

Adapun hasil yang didapatkan dalam penelitian ini semakin besar kandungan *bentonite* dalam campuran maka tegangan geser yang dihasilkan juga semakin tinggi, penambahan *bentonite* juga dapat meningkatkan ikatan antar partikel, daya dukung, dan kekuatan geser material.

2. Penelitian oleh M.R Patil (2009)

Rujukan kedua ialah jurnal yang berjudul Bahan Alternatif Untuk Liner dan Penutup TPA. Penelitian yang menggunakan metode eksperimental dengan tujuan mencari alternatif pengganti tanah sebagai pelapis dan penutup dengan menggunakan tanah kolar dan granit polis digunakan sebagai bahan dasar dengan bantuan sodium *bentonite* untuk mencapai sifat bahan yang layak sebagai lapisan dan penutup tempat pembuangan sampah.

Adapun hasil dari penelitian ini menunjukkan penambahan sodium *bentonite* membawa permeabilitas ke rentang yang diperlukan sebagai bahan alternatif untuk lapisan dan penutup tempat pembuangan sampah.

3. Penelitian Sukiman Nurdin (2016)

Rujukan penelitian ketiga yakni disertasi Sukiman Nurdin Mahasiswa Universitas Hasanuddin tahun 2016 yang berjudul Kinerja Tanah Lunak Stabilisasi *Fly Ash* dengan perkuatan serat alami sebagai lapisan penutup landfill. Adapun metode yang digunakan pada penelitian eksperimental di laboratorium. Tujuan penelitian ini ialah menganalisis pengaruh pemanfaatan tanah lunak sebagai lapisan penutup akhir landfill yang diperbaiki dengan

stabilisasi menggunakan *Fly Ash* dan perkuatan serat tandan sawit dengan mendapat informasi ilmiah yaitu karakteristik fisik, mekanis dan mineral tanah lunak, perilaku kembang dan susut serta keretakan tanah lunak yang distabilisasi *fly ash* dan perkuatan serat terhadap siklus basah kering.

Adapun hasil dari penelitian ini didapatkan kinerja tanah lunak yang distabilisasikan dengan bantuan *fly ash* dan perkuatan serat tandan buah kelapa sawit dapat mengoptimalkan kinerja lapisan tanah lunak sebagai lapisan penutup akhir. Hal ini disebabkan sifat *fly ash* yang mempunyai kehalusan dan kekerasan partikel yang tinggi sehingga dapat mengisi rongga pada tanah dan dapat merubah volume pori dalam tanah menjadi kecil, sementara serat berfungsi memperkuat gaya tarik permukaan antara serat dan tanah karena sifat adhesi sehingga tanah tidak mudah runtuh.

4. Penelitian Agus Tugas Sudjianto (2012)

Rujukan penelitian selanjutnya yaitu jurnal ilmiah dosen Universitas Widyagama pada tahun 2012 dengan Kinerja Tanah Lunak stabilisasi *Fly Ash* dengan perkuatan serat alami sebagai lapisan penutup *landfill*. Adapun metode yang digunakan ialah Eksperimental dengan tujuan Memperbaiki sifat fisis dan mekanis tanah bekas timbunan sampah (*landfill*) dengan metode stabilisasi kimia. Yakni dengan menggunakan penambahan *fly ash*.

Adapun hasil yang didapatkan pada penelitian ini ialah penggunaan campuran abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan stabilisasi dapat meningkatkan kepadatan maksimum tanah, berat jenis tanah, serta mengurangi kadar air.

5. Penelitian Linda Irnawati Gunawan, dkk (2015)

Rujukan penelitian selanjutnya ialah jurnal ilmiah Universitas Brawijaya yang berjudul Kriteria Kadar Air-Kepadatan *Bentonite* dicampur dengan *Fly Ash* untuk *compacted soil liner*. Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimental di laboratorium dengan tujuan Menganalisis pengaruh penggunaan *fly ash* terhadap karakteristik mekanik (permeabilitas dan kuat tekan bebas), serta mengetahui komposisi campuran *bentonite* dengan *fly ash* yang paling sesuai untuk *compacted soil liner* berdasarkan hasil eksperimen.

Adapun hasil dari penelitian ini ialah Nilai koefisien permeabilitas (k) semakin meningkat dengan penambahan persentase *fly ash* dalam *bentonite*,

namun sebaliknya nilai koefisien permeabilitas (k) berbanding terbalik dengan Plasticity index. Hasil penelitian ini menunjukkan 70% *bentonite* + 30% *fly ash* memiliki konduktivitas hidraulik paling kecil dengan memenuhi standar parameter untuk compacted soil liner dengan nilai konduktivitas hidraulik (k) mencapai 1×10^{-6} .

6. Penelitian Hiercyvo Manalip, Dkk (2020)

Rujukan penelitian ke enam ialah jurnal yang berjudul Pengaruh Substitusi Parsial Semen dengan Abu Ampas Tebu (Abu ketel) terhadap kuat tekan dan permeabilitas beton porous. Penelitian ini menggunakan metode Eksperimental dengan tujuan Mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen dengan menggunakan tebu (abu ketel) terhadap kuat tekan dan permeabilitasnya.

Adapun hasil yang didapatkan pada penelitian ini ialah 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.

7. Penelitian Nidya Anastasia, (2021)

Rujukan referensi selanjutnya berjudul Studi karakteristik Permeabilitas lumpur limbah yang dicampur dengan abu ampas tebu dan serat sabut kelapa sebagai lapisan penutup harian tempat pemrosesan akhir (TPA). Adapun metode penelitian ini ialah eksperimental di laboratorium. Dimana tujuan penelitian ini ialah mengevaluasi sifat dasar limbah lumpur dari IPAL industri dan mengevaluasi sifat permeabilitas limbah lumpur yang dicampur dengan abu ampas tebu, tanah, dan serat sabut kelapa sebagai bahan alternatif lapisan penutup harian TPA.

Adapun hasil yang didapatkan pada penelitian ini ialah Hasil dari pengujian, yaitu lumpur limbah memiliki ukuran butiran dengan diameter 76,2 - 4,75 mm terdiri dari 8,8%, diameter 4,75 - 0,075 mm terdiri dari 80,80%, dan butiran dengan diameter <0,075 mm terdiri dari 10,40%. Lumpur limbah memiliki nilai koefisien permeabilitas sebesar 0,0657 cm/detik. Pada pengujian permeabilitas sampel campuran, diperoleh grafik trendline meningkat dengan permeabilitas

terkecil pada variasi penambahan sabut 0%, yaitu 1×10^{-5} . Namun, pada penggunaan cairan etanol dan CaCl_2 , nilai permeabilitas didapatkan lebih besar dari nilai permeabilitas pada air tawar, yaitu $1,51 \times 10^{-5}$ cm/detik dan $2,06 \times 10^{-5}$ cm/detik. Berdasarkan hasil yang didapatkan, sampel campuran setiap variasi dapat digunakan sebagai lapisan penutup harian TPA karena memiliki nilai permeabilitas sesuai dengan syarat, kecuali variasi penambahan 5%.

8. Penelitian Muhsinah Alfi (2017)

Rujukan penelitian terakhir berjudul Studi penggunaan abu ampas tebu dan *fly ash* pada pasta *geopolymer*. Metode penelitian ini ialah eksperimental dengan tujuan menganalisis seberapa besar pengaruh penggunaan abu ampas tebu dan *fly ash* pada pasta geopolimer yang meliputi setting time, kuat tekan, porositas, UPV, dan permeabilitas selama proses pengikatan hingga terbentuk pasta dengan umur 3 hari, 28 hari, dan 56 hari yang menggunakan curing pada suhu ruangan ± 31 °C.

Adapun hasil yang diperoleh dari penelitian ini ialah Dari hasil test kuat tekan, porositas, UPV dan permeabilitas terlihat pada benda uji pasta geopolimer semakin lama umur curing pasta dan semakin tinggi perbandingan aktivator maka semakin tinggi pula test yang didapat. Kuat tekan tertinggi selain komposisi 100% *fly ash* yaitu komposisi 20% abu ampas tebu dan 80% *fly ash* sebesar 42,32 Mpa dengan selisih 0,20 Mpa dari komposisi 100% *fly ash*. Sedangkan pada setting time, komposisi 100% abu ampas tebu dan campuran 50% abu ampas tebu dan 50% *fly ash* sangat lama mengalami penurunan sehingga dapat disimpulkan bahwa komposisi tersebut dapat memperlambat setting time. Untuk prosentase kandungan pozzolan pada kedua material sebesar 84,75 % pada abu ampas tebu dan 87,42% pada *fly ash* sehingga dari kandungan pozzolan ini, keduanya dapat menggantikan peran semen.

Tabel 9 Penelitian terdahulu

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
1	Mochamad Arief, Dkk (2021)	Hydraulic Stability of fly ash-Bentonite Mixtures in Landfill containment system	Penelitian ini bertujuan untuk menguji pengaruh bahan campuran <i>fly ash</i> dengan pengikat Bentonit sebagai alternatif penahan infiltrasi lindi dengan biaya rendah	Eksperimental	Dari hasil penelitian didapatkan semakin besar kandungan bentonit dalam campuran maka tegangan geser yang dihasilkan juga semakin tinggi, penambahan bentonit juga dapat meningkatkan ikatan antar partikel, daya dukung, dan kekuatan geser material.
2	Setiawan Dedi, dkk (2015)	Studi dan Analisa Campuran Tanah Lempung dan Abu Sekam padi Terhadap Nilai Permeabilitas Dengan Alat <i>Falling Head</i>	Menentukan pengaruh abu sekam padi terhadap nilai permeabilitas tanah.	Eksperimental	Hasil studi menunjukkan bahwa pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap tanah dapat memperbesar nilai permeabilitas.

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
3	Sukiman Nurdin (2016)	Kinerja Tanah Lunak stabilisasi Fly Ash dengan perkuatan serat alami sebagai lapisan penutup landfill	Menganalisis pengaruh pemanfaatan tanah lunak sebagai lapisan penutup akhir landfill yang diperbaiki dengan stabilisasi menggunakan <i>Fly Ash</i> dan perkuatan serat tandan sawit dengan mendapat informasi ilmiah yaitu karakteristik fisik, mekanis dan mineral tanah lunak, perilaku kembang dan susut serta keretakan tanah lunak yang distabilisasi fly ash dan perkuatan serat terhadap siklus basah kering	Eksperimental	kinerja tanah lunak yang distabilisasikan dengan bantuan fly ash dan perkuatan serat tandan buah kelapa sawit dapat mengoptimalkan kinerja lapisan tanah lunak sebagai lapisan penutup akhir. Hal ini disebabkan sifat fly ash yang mempunyai kehalusan dan kekerasan partikel yang tinggi sehingga dapat mengisi rongga pada tanah dan dapat merubah volume pori dalam tanah menjadi kecil, sementara serat berfungsi memperkuat gaya tarik permukaan antara serat dan tanah karena sifat adhesi sehingga tanah tidak mudah runtuh
4	Agus Tugas Sudjianto (2012)	Stabilisasi Landfill dengan fly ash	Memperbaiki sifat fisis dan mekanis tanah bekas timbunan sampah (landfill) dengan metode stabilisasi kimia. Yakni dengan menggunakan penambahan fly ash	Eksperimental	Penggunaan campuran abu terbang (fly ash) sebagai bahan stabilisasi dapat meningkatkan kepadatan maksimum tanah, berat jenis tanah, serta mengurangi kadar air

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
5	Linda Irnawati Gunawan, dkk (2015)	Kriteria Kadar Air-Kepadatan <i>Bentonite</i> dicampur dengan Fly ash untuk <i>compacted soil liner</i>	Menganalisis pengaruh penggunaan fly ash terhadap karakteristik mekanik (permeabilitas dan kuat tekan bebas), serta mengetahui komposisi campuran <i>bentonite</i> dengan fly ash yang paling sesuai untuk <i>compacted soil liner</i> berdasarkan hasil eksperimen.	Eksperimental	<p>Nilai koefisien permeabilitas (k) semakin meningkat dengan penambahan persentase fly ash dalam <i>bentonite</i>, namun sebaliknya nilai koefisien permeabilitas (k) berbanding terbalik dengan <i>Plasticity index</i>. Hasil penelitian ini menunjukkan 70% <i>bentonite</i> + 30% <i>fly ash</i> memiliki konduktivitas hidraulik paling kecil dengan memenuhi standar parameter untuk <i>compacted soil liner</i> dengan nilai konduktivitas hidraulik (k) mencapai 1×10^{-6}</p>
6	Hiercyvo Manalip, Dkk (2020)	Pengaruh Substitusi Parsial Semen dengan Abu Ampas Tebu (Abu ketel) terhadap kuat tekan dan permeabilitas beton porous	Mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen dengan menggunakan tebu (abu ketel) terhadap kuat tekan dan permeabilitasnya.	Eksperimental	<p>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.</p>

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
7	Nidya Anastasia, 2021	Studi karakteristik Permeabilitas lumpur limbah yang dicampur dengan abu ampas tebu dan serat sabut kelapa sebagai lapisan penutup harian tempat pemrosesan akhir (TPA)	mengevaluasi sifat dasar limbah lumpur dari IPAL industri dan mengevaluasi sifat permeabilitas limbah lumpur yang dicampur dengan abu ampas tebu, tanah, dan serat sabut kelapa sebagai bahan alternatif lapisan penutup harian TPA.	Eksperimental	Hasil dari pengujian, yaitu lumpur limbah memiliki ukuran butiran dengan diameter 76,2 - 4,75 mm terdiri dari 8,8%, diameter 4,75 – 0,075 mm terdiri dari 80,80%, dan butiran dengan diameter <0,075 mm terdiri dari 10,40%. Lumpur limbah memiliki nilai koefisien permeabilitas sebesar 0,0657 cm/detik. Pada pengujian permeabilitas sampel campuran, diperoleh grafik trendline meningkat dengan permeabilitas terkecil pada variasi penambahan sabut 0%, yaitu 1×10^{-5} . Namun, pada penggunaan cairan etanol dan CaCl ₂ , nilai permeabilitas didapatkan lebih besar dari nilai permeabilitas pada air tawar, yaitu $1,51 \times 10^{-5}$ cm/detik dan $2,06 \times 10^{-5}$ cm/detik. Berdasarkan hasil yang didapatkan, sampel campuran setiap variasi dapat digunakan sebagai lapisan penutup harian TPA karena memiliki nilai permeabilitas sesuai dengan syarat, kecuali variasi penambahan 5%.

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
8	Muhsinah Alfi, 2017	Studi penggunaan abu ampas tebu dan fly ash pada pasta geopolymer	Menganalisis seberapa besar pengaruh penggunaan abu ampas tebu dan fly ash pada pasta geopolimer yang meliputi setting time, kuat tekan, porositas, UPV, dan permeabilitas selama proses pengikatan hingga terbentuk pasta dengan umur 3 hari, 28 hari, dan 56 hari yang menggunakan curing pada suhu ruangan ± 31 °C.	Eksperimental	<p>Dari hasil test kuat tekan, porositas, UPV dan permeabilitas terlihat pada benda uji pasta geopolimer semakin lama umur curing pasta dan semakin tinggi perbandingan aktivator maka semakin tinggi pula test yang didapat. Kuat tekan tertinggi selain komposisi 100% fly ash yaitu komposisi 20% abu ampas tebu dan 80% fly ash sebesar 42,32 Mpa dengan selisih 0,20 Mpa dari komposisi 100% fly ash. Sedangkan pada setting time, komposisi 100% abu ampas tebu dan campuran 50% abu ampas tebu dan 50% fly ash sangat lama mengalami penurunan sehingga dapat disimpulkan bahwa komposisi tersebut dapat memperlambat setting time.</p> <p>Untuk prosentase kandungan pozzolan pada kedua material sebesar 84,75 % pada abu ampas tebu dan 87,42% pada fly ash sehingga dari kandungan pozzolan ini, keduanya dapat menggantikan peran semen.</p>

No	Nama	Judul	Tujuan	Metode	Hasil
9	Junaidi Eka, 2020	Bioadsorben Salinitas Sederhana Berbasis Limbah Lingkungan	Memberikan informasi serta rekomendasi ilmiah Upaya mengurangi kadar NaCl pada air laut yang berpotensi menjadi air layak minum secara sederhana	Eksperimental	Berdasarkan hasil eksperimen diperoleh komposisi adsorben paling optimal mengurangi kadar NaCl adalah Batang pisang 5 gram, Enceng Gondok 5 gram dan Abu Gosok 10 gram. Pada komposisi tersebut kemampuan adsorben mengadsorpsi NaCl rata-rata sebesar 0,08525 M atau NaCl yang teradsorpsi sebesar 85,25%. Sedangkan pada air laut sebesar 56,36%.
10	Huljani Mifta, 2018	Analisis Kadar Klorida Air Sumur Bor Sekitar TPA dengan Metode Titrasi Argentometri	Mengetahui Kadar klorida dalam air sumur bor di daerah sekitar TPA II Musi Kelurahan Karya Jaya Palembang dengan metode titrasi argentometri Mohr.	Eksperimental	Hasil penelitian ini menunjukkan kadar klorida pada air sumur bor sekitar TPA II Musi II Kelurahan Karya Jaya Palembang dengan metode titrasi argentometri yaitu 301,75 mg/L.