

SKRIPSI

**ANALISIS HUBUNGAN PARAMETER ANGKA PORI (e)
DENGAN KECEPATAN REMBESAN PADA TANAH
BERBUTIR HALUS**



FADHILAH FAHMI
NIM : 105811117117

RIDHA ADRIANI
NIM : 105811119217

**PRODI TEKNIK PENGAIRAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR**

2022

**ANALISIS HUBUNGAN PARAMETER ANGKA PORI (e)
DENGAN KECEPATAN REMBESAN PADA TANAH
BERBUTIR HALUS**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Guna Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah
Makassar

Disusun dan Diajukan Oleh :

FADHILAH FAHMI
NIM : 105811117117

RIDHA ADRIANI
NIM : 105811119217

PRODI TEKNIK PENGAIRAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

03/09/2022
1 reg
Sub. Alumnus
R/0042/SIP/2200
FAH
a ¹



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

PENGESAHAN

Skrripsi atas nama **Fadhilah Fahmi** dengan nomor induk Mahasiswa 105 81 11171 17 dan **Ridha drian** dengan nomor induk mahasiswa 105 81 11192 17, dinyatakan diterima dan disahkan oleh Panitia Ujian Tugas Akhir/Skrripsi sesuai dengan Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar Nomor : 0008/SK-Y/22201/091004/2022, sebagai salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Pengairan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar pada hari Sabtu tanggal 13 Agustus 2022

Panitia Ujian :

Pengawas Umum

a. Rektor Universitas Muhammadiyah Makassar

Prof. Dr. H. Ambo Asse, M.Ag

b. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.

Penguji :

a. Ketua : Dr. Ir. H. Riswail K, ST., MT., IPM

b. Sekretaris : Kasmawati, ST., MT.

Anggota : 1. Dr. Ma'rufah, SP., MP
2. Dr. Fithriyah Arief Wangsa, ST., MT

3. Ir. Muhammad Syafa'at S Kuba, ST., MT

Mengetahui:

Pembimbing I

Prof. Dr. Ir. H. Darwis Panguriseng, M.Sc

Pembimbing II

Lutfi Hair Djunur, ST., MT

Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ir. Hj. Nurnawaty, S.T., M.T., IPM
NBM : 795 108



UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH MAKASSAR

FAKULTAS TEKNIK

GEDUNG MENARA IQRA LT. 3

Jl. Sultan Alauddin No. 259 Telp. (0411) 866 972 Fax (0411) 865 588 Makassar 90221

Website : www.unismuh.ac.id, e-mail : unismuh@gmail.com

Website : <http://teknik.unismuh.makassar.ac.id>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

HALAMAN PERSETUJUAN

Tugas akhir ini di ajukan untuk memenuhi syarat ujian guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Program Studi Teknik Pengairan Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

Judul Skripsi : **ANALISIS HUBUNGAN PARAMETER ANGKA PORI (e) DENGAN KECEPATAN REMBESAN PADA TANAH BERBUTIR HALUS**

Nama : **FADHILAH FAHMI**

RIDHA ADRIANI

No. Stambuk : 105 81 11171 17

105 81 11192 17

Makassar, 13 Agustus 2022

Telah Diperiksa dan Disetujui

Oleh Dosen Pembimbing

Pembimbing I

Prof. Dr. Ir. H. Darwis Panguriseng, M.Sc

Pembimbing II

Lutfi Hair Djunur, ST., MT

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Pengairan



Ir. M. Agusalin, S.T., M.T
NBM : 947 993

ABSTRAK

Secara umum, Gradasi tanah dapat mempengaruhi secara langsung angka pori tanah, jika butir-butir agregat tanah memiliki ukuran yang sama, maka rasio pori tanah akan besar. Jika ukuran butir berbeda, maka volume pori kecil. Kepadatannya tinggi karena butiran kecil mengisi pori-pori di antara butiran yang lebih besar. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menganalisis pengaruh karakteristik tanah berbutir halus terhadap kecepatan rembesan aliran air serta menganalisis pengaruh perubahan angka pori (e) terhadap kecepatan rembesan aliran air terhadap berbagai jenis tanah berbutir halus. Dalam penelitian ini menggunakan 3 jenis tanah berbutir halus yaitu, lempung lanau berpasir, lempung berpasir berlanau dan lanau lempung berpasir, serta 3 jenis intensitas curah hujan yaitu intensitas kala ulan 5 tahun (I_5), 15 tahun (I_{15}) serta 25 tahun (I_{25}). Pada pengujian pertama tanah lempung lanau berpasir dengan e_0 0,47, kecepatan rembesan arah horizontal yaitu 0,181 cm/menit sedangkan arah vertikal yaitu 0,264 cm/menit. Pada pengujian kedua tanah lempung lanau berpasir dengan e_0 0,51, kecepatan rembesan arah horizontal yaitu 0,182 cm/menit sedangkan untuk arah vertikal yaitu 0,286 cm/menit. Pada pengujian ketiga untuk lempung lanau berpasir dengan e_0 0,56, kecepatan rembesan arah horizontal yaitu 0,185 cm/menit sedangkan arah vertikal yaitu 0,327 cm/menit. Pada pengujian pertama tanah lempung berpasir berlanau dengan e_0 0,52, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,201 cm/menit sedangkan pada arah vertikal yaitu 0,270 cm/menit. Pada pengujian kedua tanah lempung berpasir berlanau dengan e_0 0,56, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,215 cm/menit, sedangkan untuk arah vertikal yaitu 0,297 cm/menit. Pada pengujian ketiga tanah lempung berpasir berlanau dengan e_0 0,61, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,231 cm/menit, sedangkan untuk arah vertikal yaitu 0,338 cm/menit. Pada pengujian pertama tanah lanau lempung berpasir dengan e_0 0,67, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,278 cm/menit, sedangkan arah vertikal 0,274 cm/menit. Pada pengujian kedua lanau lempung berpasir dengan e_0 0,72, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,305 cm/menit, sedangkan arah vertikal yaitu 0,310 cm/menit.

Pada pengujian ketiga dengan e_0 0,79 kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,347 cm/menit sedangkan arah vertikal yaitu 0,356 cm/menit. Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin kecil angka pori maka semakin lambat rembesan aliran airnya, begitupun sebaliknya.

Kata Kunci : Angka Pori, Rembesan, Tanah Berbutir Halus

ABSTRACT

In general, soil gradation can directly affect the void ratio of the soil, if the soil aggregate grains have the same size, the soil void ratio will be large. If the grain size is different, then the pore volume is small. The density is high because the small grains fill the pores between the larger grains. The purpose of this study is to analyze the effect of fine-grained soil characteristics on the speed of seepage of water flow and analyze the effect of changes in void ratio (e) on the speed of seepage of water flow on various types of fine-grained soils. In this study used 3 types of fine-grained soil, namely, sandy silt clay, silty sandy loam and silt sandy loam, as well as 3 types of rainfall intensity, namely the intensity of 5 years (I_5), 15 years (I_{15}) and 25 years (I_{25}). In the first observation, the sandy silt clay soil with an e_0 of 0.47, the seepage speed in the horizontal direction is 0.181 cm/minute while the vertical direction is 0.264 cm/minute. In the second observation, the sandy silt clay with e_0 of 0.51, the seepage speed in the horizontal direction is 0.182 cm/minute while for the vertical direction is 0.286 cm/minute. In the third observation for sandy silt clay with e_0 0.56, the seepage speed in the horizontal direction is 0.185 cm/minute while the vertical direction is 0.327 cm/minute. In the first observation the silty sandy clay soil with e_0 0.52, the horizontal seepage speed is 0.201 cm/minute while in the vertical direction is 0.270 cm/minute. In the second observation the silty sandy loam with e_0 0.56, the horizontal seepage speed is 0.215 cm/minute, while for the vertical direction is 0.297 cm/minute. In the third observation the silty sandy clay soil with e_0 0.61, the horizontal seepage speed was 0.231 cm/minute, while the vertical direction was 0.338 cm/minute. In the first observation, the soil was silt sandy loam with e_0 0.67, the horizontal seepage speed was 0.278 cm/minute, while the vertical

direction was 0.274 cm/minute. In the second observation, the silt is sandy clay with an e_0 of 0.72, the horizontal seepage speed is 0.305 cm/minute, while the vertical direction is 0.310 cm/minute. In the third observation with e_0 0.79 the horizontal seepage speed is 0.347 cm/minute while the vertical direction is 0.356 cm/minute. The results of this study indicate that the smaller the pore number, the slower the seepage of the water flow, and vice versa

Keywords: Pore Rate, Seepage, fine grained soil



KATA PENGANTAR

Assalamu 'Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena rahmat dan hidayah-Nyalah sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Proposal ini dengan baik. Salawat serta salam tak henti-hentinya kami haturkan kepada Baginda Rasulullah SAW beserta keluarga dan kerabatnya.

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus ditempuh dalam rangka menyelesaikan Program Studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar. Adapun judul tugas akhir kami adalah **"ANALISIS HUBUNGAN PARAMETER ANGKA PORI (e) DENGAN KECEPATAN REMBESAN PADA TANAH BERBUTIR HALUS"**.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis mendapatkan banyak masukan yang berguna dari berbagai pihak sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu dengan segala ketulusan serta keikhlasan hati, kami mengucapkan terimakasih dan penghargaan setinggi tingginya kepada:

1. Ayahanda dan Ibunda tercinta yang senantiasa memberikan limpahan kasih sayang, doa serta pengorbanan kepada penulis.
2. Ibu **Dr. Ir. Hj. Nurnawaty, ST., MT.**, sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.
3. Bapak **Ir. M. Agusalim, ST., MT.**, sebagai Ketua Program Studi Teknik Pengairan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Makassar.

4. Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Darwis Panguriseng, M.Sc** selaku pembimbing I dan Bapak **Lutfi Hair Djunur, ST., MT** selaku pembimbing II, yang telah meluangkan banyak waktu, memberikan bimbingan dan arahan sehingga terwujudnya tugas akhir ini.
5. Bapak dan Ibu dosen serta staff pegawai pada Fakultas Teknik atas segala waktunya yang telah mendidik dan melayani kami selama mengikuti proses belajar mengajar di Universitas Muhammadiyah Makassar.
6. Saudara serta rekan-rekan mahasiswa Fakultas Teknik terkhusus angkatan **Akurasi 2017** yang dengan rasa persaudaraan yang tinggi banyak membantu dan memberi dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Pada akhir penulisan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu penulis meminta saran dan kritik yang bersifat membangun sehingga laporan tugas akhir ini dapat menjadi lebih baik dan menambah penegetahuan kami dalam menulis laporan selanjutnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat berguna bagi penulis pada khususnya dan pembaca pada umumnya.

Wassalamualaikum Wr.Wb

Makassar, 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR NOTASI DAN ISTILAH.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Rumusan Masalah.....	2
C. Tujuan Penelitian.....	2
D. Manfaat Penelitian.....	3
E. Batasan Penelitian.....	3
F. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
A. Klasifikasi Tanah	5
1. Teori Tentang Tanah.....	5
2. Sistem Klasifikasi Tanah.....	6
3. Sifat dan Karakteristik Tanah Berbutir Halus.....	14

B. Teori Angka Pori	17
1. Pengertian Angka Pori	17
2. Pengaruh Gradasi Tanah Terhadap Angka Pori	19
C. Teori Rembesan Aliran Air Tanah	20
1. Pengertian Rembesan Aliran	20
2. Aliran Air Pada Tanah	22
D. Parameter Infiltrasi	23
1. Pengertian Infiltrasi	23
2. Pengertian Laju Infiltrasi	24
3. Pengertian Kapasitas Infiltrasi	25
E. Teori Intensitas Curah Hujan	26
1. Pengertian Intensitas Curah Hujan	26
2. Mekanisme Proses Terjadinya Intensitas Curah Hujan	27
3. Analisis Curah Hujan Rencana	30
BAB III METODE PENELITIAN	33
A. Jenis Penelitian	33
B. Tempat Penelitian	33
C. Variabel Penelitian	33
D. Defenisi Operasional Variabel	34
E. Rancangan Penelitian	35

1. Instrumen Penelitian.....	35
2. Prosedur Pengujian	37
3. Prosedur Perakitan	39
4. Kalibrasi Alat	40
5. Running Test	40
6. Prosedur Pengamatan Angka Pori.....	40
F. Teknik Analisis Data	41
G. Teknik Pengumpulan Data	41
H. Flow Chart	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	44
A. Hasil penelitian	44
1. Karakteristik tanah	44
2. Pengamatan Angka Pori Awal Pada Setiap Jenis Tanah	51
3. Kecepatan Rembesan	54
4. Hubungan Angka Pori Dengan Kecepatan Rembesan Horizontal.....	89
5. Hubungan Angka Pori Dengan Kecepatan <i>Seepage</i> Aliran Vertikal.....	93
B. Pembahasan	97
1. Hubungan Karakteristik Tanah Terhadap Kecepatan Rembesan.....	97
2. Hubungan Angka Pori Dengan Kecepatan Rembesan.....	98
BAB V PENUTUP.....	101

A. KESIMPULAN.....	101
B. SARAN	101
DAFTAR PUSTAKA.....	102
LAMPIRAN.....	103



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Lapisan Tanah.....	8
Gambar 2 Perbandingan Elemen Tanah	9
Gambar 3 Grafik Batas-Batas Atterberg (Hardiyatmo, 2002).....	14
Gambar 4 Siklus Hidrologi.....	28
Gambar 5 Skema Hubungan Variabel Penelitian	34
Gambar 6 Foto Model Alat.....	36
Gambar 7 Flow Chart	43
Gambar 8 Grafik Distribusi Butir Analisa Saringan (Lempung Lanau Berpasir)	45
Gambar 9 Grafik Distribusi Pembagian Butir Berdasarkan Hasil Pengujian Hidrometer (Lanau Lempung Berpasir).....	46
Gambar 10 Grafik Distribusi Butir Analisa Saringan (Lempung Berpasir Berlanau)	47
Gambar 11 Grafik Distribusi Pembagian Butir Berdasarkan Hasil Pengujian Hidrometer (Lempung Berpasir Berlanau).....	48
Gambar 12 Grafik Distribusi Butir Analisa Saringan (Lanau Lempung Berpasir)	49
Gambar 13 Grafik Distribusi Pembagian Butir Berdasarkan Hasil Pengujian Hidrometer (Lanau Lempung Berpasir).....	50
Gambar 14 Grafik Angka Pori Awal (e_0) Pada Pengujian Pertama	52
Gambar 15 Grafik Angka Pori Awal (e_0) Pada Pengujian Kedua	52
Gambar 16 Grafik Angka Pori Awal (e_0) Pada Pengujian Ketiga.....	53
Gambar 17 Grafik Gabungan Angka Pori Awal (e_0).....	53
Gambar 18 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama (Lempung Lanau Berpasir)	55

Gambar 19 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama (Lempung Berpasir Berlanau)	56
Gambar 20 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama (Lanau Lempung Berpasir)	57
Gambar 21 Grafik Gabungan Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama	58
Gambar 22 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua (Lempung Lanau Berpasir)	59
Gambar 23 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua (Lempung Berpasir Berlanau)	60
Gambar 24 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua (Lanau Lempung Berpasir)	61
Gambar 25 Grafik Gabungan Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua	62
Gambar 26 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga (Lempung Lanau Berpasir)	63
Gambar 27 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga (Lempung Berpasir Berlanau)	64
Gambar 28 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga (Lanau Lempung Berpasir)	65
Gambar 29 Grafik Gabungan Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga	66
Gambar 30 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I ₅ (Lanau Lempung Berpasir)	68
Gambar 31 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I ₅ (Lempung Berpasir Berlanau)	69
Gambar 32 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I ₅ (Lanau Lempung Berpasir)	70
Gambar 33 Grafik Gabungan Kecepatan <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I ₅	71
Gambar 34 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I ₁₅ (Lempung Lanau Berpasir)	72

Gambar 35 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I_{15} (Lempung Berpasir Berlanau)	73
Gambar 36 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I_{15} (Lanau Lempung Berpasir).....	74
Gambar 37 Grafik Gabungan Kecepatan <i>Seepage</i> Vertikal I_{15}	75
Gambar 38 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I_{25} (Lempung Lanau Berpasir)	76
Gambar 39 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I_{25} (Lempung Berpasir Berlanau)	77
Gambar 40 Grafik Kec. <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I_{25} (Lanau Lempung Berpasir)	78
Gambar 41 Grafik Gabungan Kecepatan <i>Seepage</i> Aliran Vertikal I_{25}	79
Gambar 42 Grafik Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal (1).....	81
Gambar 43 Grafik Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal (2).....	82
Gambar 44 Grafik Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal (3).....	83
Gambar 45 Grafik Gabungan Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal	84
Gambar 46 Kecepatan Rata-Rata <i>Seepage</i> Aliran Vertikal (I_5)	85
Gambar 47 Kecepatan Rata-Rata <i>Seepage</i> Aliran Vertikal (I_{15})	86
Gambar 48 Grafik Kecepatan Rata-Rata <i>Seepage</i> Aliran Vertikal (I_{25}).....	87
Gambar 49 Grafik Gabungan Kec. Rata-Rata <i>Seepage</i> Aliran Vertikal (I_5 , I_{15} , I_{25})	88
Gambar 50 Grafik Hub. Kec. Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori (e) Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir	90
Gambar 51 Grafik Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori (e) pada Tanah Lempung Berpasir Berlanau	91
Gambar 52 Grafik Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori Pada Tanah Lanau Lempung Berpasir.....	92
Gambar 53 Grafik Hub. Kecepatan <i>Seepage</i> Vertikal Dengan Angka Pori (e) Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir	94

Gambar 54 Grafik Hub. Kecepatan *Seepage* Vertikal (I_{15}) Dengan Angka Pori (e)
Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir 95

Gambar 55 Grafik Hub. Kecepatan *Seepage* Vertikal Dengan Angka Pori (e)
Pada Tanah Lanau Lempung Berpasir 96



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Sistem Klasifikasi USCS.....	11
Tabel 2 Sistem Klasifikasi Tanah <i>AASHTO</i>	13
Tabel 3 Angka Pori Awal (e_0)	51
Tabel 4 Tabel Kecepatan Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal	80
Tabel 5 Kecepatan Rata-Rata <i>Seepage</i> Aliran Vertikal	85
Tabel 6 Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori pada Tanah Lempung Lanau Berpasir.....	89
Tabel 7 Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori Pada Tanah Lempung Berpasir Berlanau	90
Tabel 8 Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori pada Tanah Lanau Lempung Berpasir.....	92
Tabel 9 Hubungan Kecepatan <i>Seepage</i> Aliran Vertikal Dengan Angka Pori Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir.....	93
Tabel 10 Hubungan Kecepatan <i>Seepage</i> Aliran Vertikal Dengan Angka Pori (e) pada tanah Lempung Berpasir Berlanau	94
Tabel 11 Hubungan Kecepatan <i>Seepage</i> Aliran Vertikal Dengan Angka Pori pada tanah lanau lempung berpasir	96

DAFTAR NOTASI DAN ISTILAH

GI	: Indeks kelompok (<i>group index</i>)
F	: persen (%) butiran lolos saringan no. 200 (0,075)
LL	: batas cair
PI	: indeks plastisitas
N	: Porositas
V_v	: Volume Pori
V	: Volume tanah total
V_s	: Volume tanah kering
V	: Volume total tanah
W	: kadar air
W_w	: berat air
W_s	: Berat butiran padat
γ	: Berat volume
W	: Berat tanah
V	: Volume total
I	: gradien hidrolis
S_x	: standar deviasi
X_i	: curah hujan rata-rata
X_r	: harga rata-rata
N	: jumlah data
K	: faktor frekuensi
Y_n	: harga rata-rata <i>reduce variate</i>

S_n : *reduced standard deviation*

Y_t : *reduced variate*

X_t : hujan dalam periode ulang tahun

X_r : harga rata-rata

K : faktor Frekuensi

R_t : besarnya curah hujan yang mungkin terjadi pada periode ulang T tahun

X_r : curah hujan rata-rata

K_t : standar variabel untuk periode ulang tahun



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

HASIL PENGUJIAN KARAKTERISTIK TANAH..... L1.1

Sampel Tanah Bili-Bili L1.3

Sampel Tanah Malino L1.11

Sampel Tanah Pakatto..... L1.14

LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN INTENSITAS CURAH HUJAN L2.1

Analisa Frekuensi Hujan L2.3

Intensitas Curah Hujan..... L2.13

LAMPIRAN 3

DATA REMBESAN..... L3.1

Data Pengamatan Rembesan Horizontal Pada Pengujian Pertama..... L3.1

Data Pengamatan Rembesan Horizontal Pada Pengujian Kedua..... L3.8

Data Pengamatan Rembesan Horizontal Pada Pengujian Ketiga L3.15

Data Pengamatan Kecepatan Rembesan Vertikal Pada Intensitas (I_5)..... L3.22

Data pengamatan Kecepatan Rembesan Vertikal Pada Intensitas (I_{15}) L3.28

Data pengamatan kecepatan Rembesan Vertikal Pada Intensitas (I_{25}) L3.34

LAMPIRAN 4

Analisa Perhitungan <i>Seepage</i> Vertikal Dan Rembesan Horizontal	L4.1
Kecepatan <i>Seepage</i> Aliran Vertikal	L4.1
Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal	L4.4

LAMPIRAN 5

ANALISA PERHITUNGAN ANGKA PORI AWAL	L5.1
Perhitungan Angka Pori Awal Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir	L5.1
Perhitungan Angka Pori Awal Pada Tanah Lempung Berpasir Berlanau	L5.4
Perhitungan Angka Pori Awal Pada Tanah Lanau Lempung Berpasir	L5.8

LAMPIRAN 6

Dokumentasi Kegiatan Penelitian	L6.1
---------------------------------------	------

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dalam pandangan teknik sipil, tanah adalah kumpulan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel. Ruang di antara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di permukaan bumi membentuk tanah. Air tanah adalah air yang terdapat pada lapisan tanah atau bebatuan dibawah permukaan tanah. Air tanah merupakan salah satu sumber daya air yang keberadaannya terbatas dan kerusakannya dapat mengakibatkan dampak yang luas serta pemulihannya sulit dilakukan.

Gradasi tanah dapat mempengaruhi secara langsung angka pori tanah, karena apabila butir-butir agregat mempunyai jenis ukuran yang sama (seragam), volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butir-butirnya bervariasi akan terjadi volume pori yang kecil. Hal ini karena butiran yang kecil akan mengisi pori antara butiran yang lebih besar sehingga pori-porinya menjadi sedikit dengan kata lain kemampatannya tinggi.

Air menutupi hampir 71% permukaan bumi terdapat 1,4 triliun kilometer kubik atau sekitar 330 juta mil³ tersedia di bumi. Seperti kita ketahui, hujan yang turun ke permukaan bumi jatuh pada permukaan tanah, permukaan air danau, sungai, laut, hutan, ladang, persawahan atau perkebunan. Air yang merembes ke

dalam tanah melalui pori-pori tanah akan terus sampai kedalaman tertentu dan mencapai permukaan air tanah (*groundwater*) yang disebut perkolasi. Jika aliran tanah muncul atau keluar akan menjadi mata air (*spring*). Mata air yang keluar dengan cara rembesan disebut *seepage*.

Mengingat begitu pentingnya untuk mengetahui bagaimana pengaruh tersebut terhadap proses penyerapan air dalam tanah maka perlu dilakukan analisis secara spesifik dari masing-masing jenis tanah dan melakukan pengujian eksperimental, salah satu yang penting untuk diteliti adalah "**Analisis Hubungan Angka Pori (e) Dengan Kecepatan Rembesan Pada Tanah Berbutir Halus**".

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Pengaruh sifat dan karakteristik tanah berbutir halus terhadap kecepatan rembesan aliran air.
2. Pengaruh perubahan angka pori (e) terhadap kecepatan rembesan aliran air pada berbagai jenis tanah berbutir halus.

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh karakteristik tanah berbutir halus terhadap kecepatan rembesan aliran air.
2. Menganalisis pengaruh perubahan angka pori (e) terhadap kecepatan rembesan aliran air terhadap berbagai jenis tanah berbutir halus.

D. Manfaat Penelitian

Pada penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat diantaranya:

1. Dapat memberikan gambaran secara langsung perilaku dan karakteristik air tanah, kecepatan rembesan aliran air tanah serta pengaruh perubahan angka pori terhadap tanah berbutir halus.
2. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan kualitas IPTEK khususnya tentang hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan pada tanah berbutir halus.

E. Batasan Penelitian

Agar memudahkan dalam memberikan penjelasan permasalahan maka diberikan batasan penelitian pada penulisan tugas akhir ini, yaitu :

1. Penelitian ini hanya berfokuskan pada media tanah berbutir halus .
2. Sampel tanah yang digunakan hanya 3 jenis tanah yaitu, Lempung Lanau Berpasir (*sandy silty clay*), Lempung Berpasir Berlanau (*silty sandy clay*), dan Lanau Lempung Berpasir (*sandy clayey silt*).
3. Intensitas curah hujan digunakan hanya I_5 , I_{15} , I_{25} .

F. Sistematika Penulisan

Secara umum sistematika penulisan proposal ini dapat diuraikan sebagai berikut ;

BAB I PENDAHULUAN, berisi tentang penjelasan umum mengenai materi pembahasan yaitu latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II KAJIAN PUSTAKA, berisi tentang teori dan hasil penelitian terdahulu yang ada hubungannya dengan penelitian ini, bagian ini akan memberikan gambaran umum mengenai karakteristik tanah dan pemecahan masalah.

BAB III METODE PENELITIAN, berisi tentang metode penelitian yang terdiri atas lokasi dan waktu penelitian, jenis penelitian dan sumber data, rancangan penelitian seperti persiapan alat dan bahan, skema model, prosedur penelitian, variabel penelitian, analisis data, dan bagan alur penelitian (*flow chart*).

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi tentang wujud dari hasil penelitian dan uraian data hasil penelitian beserta pembahasan secara sistematis.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN, berisi tentang hasil akhir dari penelitian ini yang dituangkan dalam bentuk kesimpulan dan saran dari penulis yang diharapkan untuk merangkum penelitian ini secara baik.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Klasifikasi Tanah

1. Teori Tentang Tanah

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, 1994) tanah dapat diartikan sebagai :

- a. Permukaan bumi atau lapisan bumi yang di atas sekali.
- b. Keadaan bumi di suatu tempat.
- c. Permukaan bumi yang diberi batas.
- d. Daratan.
- e. Permukaan bumi yang terbatas yang ditempati suatu bangsa yang diperintah suatu negara atau menjadi daerah negara.
- f. Bahan-bahan dari bumi, bumi sebagai sesuatu (pasir, napal, cadas).

Tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksidasida yang menghadap di antara partikel-partikel. Ruang di antara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi didekat permukaan bumi membentuk tanah (Hardiyatmo, 2018).

Tanah menurut Teknik sipil dapat didefinisikan sebagai sisa atau produk yang dibawa dari pelapukan batuan dalam proses geologi yang dapat digali tanpa

peledakan dan dapat ditimbus dengan peralatan pengambilan contoh (sampling) pada saat pemboran (Hendarsin, 2000).

Pembentukan tanah dari induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, terjadi akibat pengaruh erosi, angin, es, air, manusia, atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca. Partikel-partikel mungkin berbentuk bulat, bergerigi maupun bentuk-bentuk diantaranya.

Umumnya, pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen, karbon dioksida air (terutama yang mengandung asam atau alkali) dan proses-proses kimia yang lain. Jika hasil pelapukan masih berada ditempat asalnya, maka tanah ini disebut tanah residual (*residual soil*) dan apabila tanah berpindah tempatnya, disebut tanah terangkut (*transported soil*) (Hardiyatmo, 2018).

2. Sistem Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah ilmu yang mempelajari cara-cara membedakan sifat-sifat tanah antara satu dengan yang lain dan mengelompokkan tanah kedalam kelas-kelas tertentu berdasarkan kesamaan sifat dan ciri yang dimiliki (Harjowigeno, 1993).

Selanjutnya, tanah yang diklasifikasikan adalah benda alami yang terdiri dari padatan (mineral dan bahan organik), cairan dan gas, yang terbentuk di permukaan bumi dari hasil pelapukan bahan induk oleh interaksi faktor iklim, relief, organisme dan waktu, berlapis-lapis dan mampu mendukung pertumbuhan

tanaman, sedalam 2 meter atau sampai batas aktivitas biologi tanah (Soil Survey Staff, 2010).

Sistem klasifikasi tanah dibuat pada dasarnya untuk memberikan informasi tentang karakteristik dan sifat-sifat fisis tanah. Karena variasi sifat dan perilaku tanah yang begitu beragam, sistem klasifikasi secara umum mengelompokkan tanah ke dalam kategori yang umum di mana tanah memiliki kesamaan sifat fisis. Klasifikasi tanah juga berguna untuk studi yang lebih terperinci mengenai keadaan tanah tersebut serta kebutuhan akan pengujian untuk menentukan sifat teknis tanah seperti karakteristik pemadatan, kekuatan tanah, berat isi dan sebagainya (Joseph E. Bowles, 1989).

Menurut bowles (1989) dalam fauzick (2018) tanah adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis berikut:

- a. Berangkal (*boulders*), merupakan potongan batu yang besar, biasanya lebih besar dari 250 mm sampai 300 mm. Untuk kisaran antara 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm.
- b. Kerikil (*gravel*), partikel batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm.
- c. Pasir (*sand*), partikel batuan yang berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, berkisar dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm).
- d. Lanau (*silt*), partikel batuan berukuran dari 0,002 mm sampai 0,074 mm. lanau dan lempung dalam jumlah besar ditemukan dalam deposit yang disedimentasikan ke dalam danau atau di dekat garis pantai pada muara sungai.

- e. Lempung (*clay*), partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,022 mm. partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
- f. Koloid (*colloids*), partikel mineral yang “diam” yang berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

Lapisan tanah terbagi menjadi :

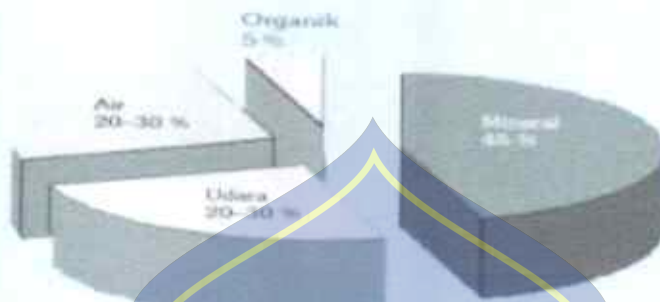


Sumber: Haryono (2006)

Gambar 1 Lapisan Tanah

a. Tanah lapisan atas

Tanah lapisan atas berwarna gelap dan kehitam-hitaman, tebalnya antara 10-30 cm, lapisan ini ialah lapisan tersubur, karena adanya bunga tanah atau humus. Lapisan tanah atas ialah bagian yang optimum untuk kehidupan tumbuh-tumbuhan. Semua komponen-komponen tanah terdapat di lapisan ini, yaitu 45% mineral, 5% bahan organik, 20-30% udara dalam tanah (Haryono, 2006). Perbandingan elemen tanah dapat dilihat seperti gambar dibawah ini :



Sumber : jamulya (1973)

Gambar 2 Perbandingan Elemen Tanah

b. Tanah lapisan bawah

Tanah lapisan bawah warnanya lebih cerah dan juga lebih padat daripada tanah lapisan atas. Lapisan tanah ini tebalnya berkisaran 50-60 cm lebih tebal dari lapisan tanah atas dan sering disebut tanah cadas atau tanah keras. Lapisan tanah ini kegiatan jasad hidup mulai berkurang. Biasanya ditumbuhi tanaman berumur Panjang dan juga berakar tunggung dalam dan Panjang agar mencapai lapisan tanah (Haryono, 2006)

c. Batuan induk tanah

Batuan induk ialah batuan asal dari tanah. Lapisan tanah ini warnanya kemerah-merahan atau kelabu keputih-putihan. Lapisan ini bisa pecah dan juga dibuhan dengan mudah, tetapi sulit ditembus akar. Di lereng-lereng gunung, lapisan itu sering terlihat jelas karena lapisan atasnya telah hanyut oleh air hujan. Semakin dalam lapisan ini ialah batuan pejal yang belum menjalani proses pemecahan. Pada lapisan ini tumbuhan jarang sekali bisa hidup (Haryono, 2006).

Dalam ilmu mekanika tanah terdapat dua sistem klasifikasi yang umum dikelompokkan. Kedua sistem tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butiran dan batas-batas Atterberg, sistem sistem tersebut adalah :

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

sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh Casagrande (1942) untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang yang dilaksanakan oleh *The Army Corps of Engineers*.

Sistem klasifikasi berdasarkan hasil-hasil percobaan laboratorium yang paling banyak dipakai secara meluas adalah sistem klasifikasi kesatuan tanah percobaan laboratorium yang dipakai adalah analisis ukuran butir dan batas-batas Atterberg. Semua tanah diberi dua huruf penunjuk berdasarkan hasil-hasil percobaan ini. Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu (*Das, 1993 ; 70*) :

- 1) Tanah berbutir kasar (*coarse grained soil*), yaitu tanah kerikil dan tanah pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200. symbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G, adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil dan S, adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.
- 2) Tanah berbutir halus (*fine grained soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Symbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik dan O untuk lanau-organik dan lempung-organik. Symbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), muck dan tanah-tanah lain dengan kadar organik tinggi.

Sumber : Hardiyatmo, Hary Christady (2002)

b. Sistem Klasifikasi AASHTO

Menurut Hardiyatmo, Hary Christady (2002), sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials Classification*) berguna untuk menentukan kualitas tanah untuk perencanaan timbunan jalan, *subbase* dan *subgrade*.

Sistem klasifikasi AASHTO membagi tanah kedalam 8 kelompok, A-1 sampai A-8 termasuk sub-sub kelompok. Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan adalah analisis saringan dan batas-batas Atterberg.

Indeks kelompok (*group indeks*) digunakan untuk mengevaluasi lebih lanjut tanah-tanah dalam kelompoknya. Dalam buku *Mekanika Tanah 1*, Edisi 3, Hary Christady Hardiyatmo, sistem klasifikasi AASHTO indeks kelompok dihitung dengan persamaan, sebagai berikut :

$$GI = (F-35) [0,2 + 0,005 (LL - 40) + 0,01(F-15)(PI-10)] \dots \dots \dots (1)$$

Dimana mana :

GI = Indeks kelompok (*group index*)

F = persen (%) butiran lolos saringan no. 200 (0,075)

LL = batas cair

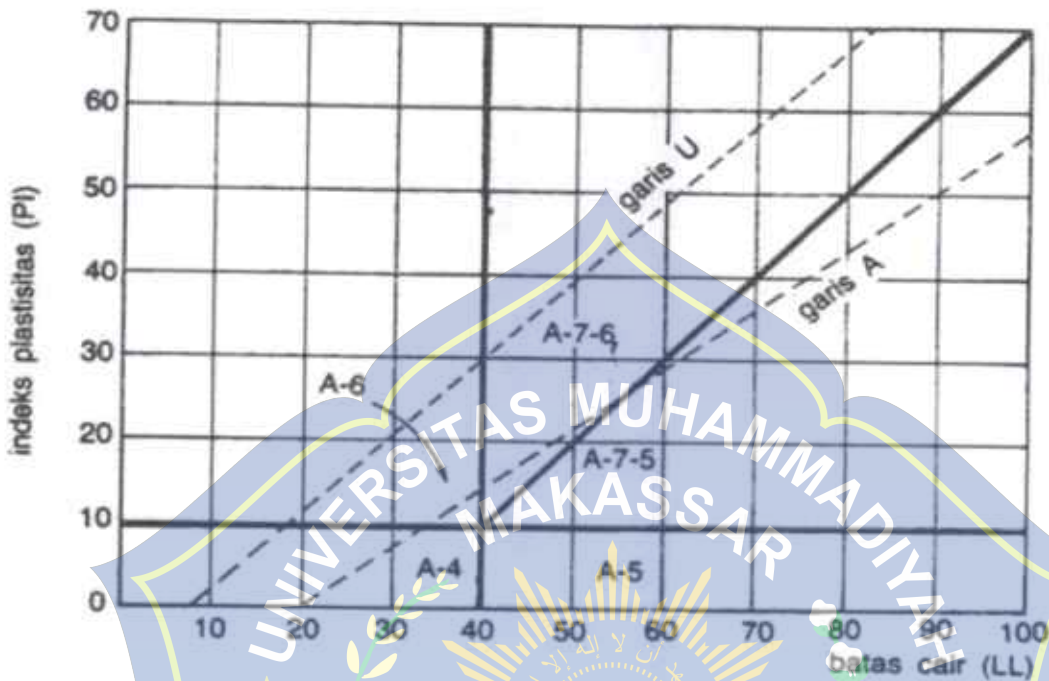
PI = indeks plastisitas

Tabel 2 Sistem Klasifikasi Tanah AASHTO

Klasifikasi Umum	Material Berbutir Kasar (35% atau kurang lolos saringan No. 200)							Material Lanau -Lempung (lebih dari 35% lolos saringan No. 200)			
Klasifikasi Group	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Analisa Tapis, persen lolos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
No. 10	50 max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 40	30 max	50 max	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Karakteristik fraksi lolos saringan No. 40:											
Batas Cair				40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Indeks Plastisitas	0 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min*
Jenis Material Pokok	Fragmen batu kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan Pasir Kelerengan atau kelerengungan				Tanah lanau		Tanah lempung	
Tingkat Kegunaan sebagai Subgrade	Sangat baik hingga baik							Cukup baik hingga buruk			

Sumber : Hardiyatmo, Hary Christady (2002)

Bila nilai indeks kelompok (CI) semakin tinggi, maka semakin berkurang ketepatan dalam penggunaan tanahnya. Tanah berbutir halus diklasifikasikan dari A-4 sampai A-7, yaitu tanah lempung- lanau. Perbedaan keduanya berdasarkan pada batas-batas Atterberg. Pada gambar dapat digunakan untuk memperoleh batas-batas antara batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk kelompok A-4 sampai A-7 dan untuk sub kelompok dalam A-2



Gambar 3 Grafik Batas-Batas Atterberg (Hardiyatmo, 2002)

Pada grafik diatas bisa dilihat, garis A dari casagrande dan garis U digambarkan bersama-sama. Tanah organik tinggi seperti tanah gambut (peat) diletakkan dalam kelompok A-8.

3. Sifat dan Karakteristik Tanah Berbutir Halus

Menurut bowles (1986), mendefinisikan tanah berbutir halus sebagai deposit yang mempunyai partikel berukuran lebih kecil atau sama dengan 0,002 mm dalam jumlah lebih dari 50 %.

Secara umum dari hasil survey lapangan dan test laboratorium, tanah memiliki sifat-sifat sebagai berikut :

- Permeabilitas tanah.
- Kemampuan dan konsoliditas tanah.
- Kekuatan tegangan geser tanah.

d. Klasifikasi tanah

Sifat tanah berdasarkan lekatnya adalah sebagai berikut (Bowles, 1991) :

- a. Tanah kohesif adalah tanah yang mempunyai sifat lekatan antara butir-butirnya seperti tanah lempung.
- b. Tanah non kohesif adalah tanah yang tidak mempunyai atau sedikit sekali lekatan antara butir-butirnya atau hampir tidak mengandung lempung seperti pasir.
- c. Tanah organik adalah tanah yang sifatnya sangat dipengaruhi oleh bahan-bahan organik seperti sisa-sisa hewani maupun tumbuh-tumbuhan.

Didalam penelitian ini digunakan 3 jenis tanah berbutir halus yaitu sandy clay, sandy silt, dan clayey silt. Berdasarkan klasifikasi USCS tanah tersebut dapat dikategorikan sebagai berikut :

- a. Lempung Lanau Berpasir (*sandy silt clay*) adalah jenis tanah berbutir halus yang memiliki kriteria *plastis index* dibawah 4 ($PI < 4$) dan berada dibawah garis A dalam grafik plastisitas, dan memiliki symbol (ML). Memiliki gradasi butiran secara umum $> 50\%$ lolos saringan 200m (0,074 mm) dan memiliki ukuran butiran $< 0,002$ mm. Serta memiliki batas cair (LL) $< 50\%$.
- b. Lempung Berpasir Berlanau (*silty sandy clay*) adalah jenis tanah berbutir halus yang memiliki kriteria *plastis index* diatas 7 ($PI > 7$) Atau berada di atas garis A dalam grafik plastisitas, dan memiliki symbol (CL). Memiliki gradasi butiran secara umum jika $> 50\%$ lolos saringan 200 (0,074 mm) untuk tanah lanau memiliki ukuran butiran $< 0,002$ mm. serta batas cair (LL) $\leq 50\%$.

- c. Lanau Lempung Berpasir (*Sandy Clayly Silt*) adalah jenis tanah berbutir halus yang memiliki kriteria *plastis index* diatas 7 ($PI > 7$) atau berada diatas garis A, dan memiliki symbol (CL). Serta memiliki gradasi butiran secara umum jika $> 50\%$ lolos saringan 200 (0,074 mm) untuk jenis tanah lanau berlempung memiliki ukuran butiran 0,002 – 0,06. Serta memiliki batas cair (LL) $\leq 50\%$.

Berdasarkan klasifikasi AASHTO untuk tanah berbutir halus dalam hal ini tanah berlanau dan tanah berlempung dikategorikan sebagai berikut :

a. Tanah Berlanau :

- 1) Analisa saringan, jika memiliki minimal 36% lolos saringan 200, masuk klasifikasi kelompok A4 dan A5.
- 2) Batas cair (LL) jika memiliki batas cair maks 40% termasuk klasifikasi kelompok A4, sedangkan jika memiliki batas cair maks 41% termasuk klasifikasi kelompok A5.
- 3) Indeks Plastisitas (PI) jika memiliki indeks plastisitas maks 10% maka termasuk klasifikasi kelompok A4 dan A5.

b. Tanah Berlempung :

- 1) Analisa saringan, jika memiliki minimal 36% lolos saringan 200, termasuk klasifikasi kelompok A6 dan A7.
- 2) Batas cair (LL) jika memiliki batas cair maks 40% termasuk klasifikasi kelompok A6, sedangkan jika memiliki batas cair maks 41% termasuk klasifikasi A7.

3) Indeks plastisitas (PI), jika memiliki indeks plastisitas min 11% maka termasuk klasifikasi kelompok A4 dan A5.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Klasifikasi AASHTO Untuk Tanah Berbutir Halus (Tabel 2).

B. Teori Angka Pori

1. Pengertian Angka Pori

Angka pori adalah perbandingan volume rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s), biasanya dinyatakan dalam persen atau desimal (Hardiyatmo, 2002). Dalam buku Das, B. M., (1995), Merumuskan formulasi untuk angka pori (e), sebagai berikut:

a. Angka pori

$$e = \frac{V_v}{V_s} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

e = Angka pori

V_v = Volume rongga

V_s = Volume butiran

Dalam buku Hardiyatmo, Hary Christady (2002), merumuskan formulasi untuk volume pori (V_v), sebagai berikut :

$$V_v = V - V_s \dots\dots\dots (3)$$

b. Porositas disebut juga sebagai perbandingan antara volume pori dengan volume tanah total, yang dinyatakan dalam persen (Hary Cristady Hardiyatmo, 2012), atau

$$n = \frac{V_v}{V} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan :

n = Porositas

V_v = Volume Pori

V = Volume tanah total

- c. Dalam buku Darwis, (2014), merumuskan formulasi untuk perhitungan volume tanah kering (V_s), sebagai berikut :

$$V_s = V - V_v \dots \dots \dots (5)$$

Dimana :

V_s = Volume tanah kering

V = Volume total tanah

- d. Kadar air (w), didefenisikan sebagai *Water Content* yang diartikan sebagai perbandingan antara berat air dengan berat butiran padat dari volume tanah yang diselidiki (Hary Cristady Hardiyatmo, 2012), atau :

$$W = \frac{w_w}{w_s} \dots \dots \dots (6)$$

Keterangan :

W = kadar air

w_w = berat air

w_s = Berat butiran padat

- e. Berat volume (γ) yaitu, berat tanah persatuan volume (Hary Cristady Hardiyatmo, 2012)

$$\gamma = \frac{w}{v} \dots \dots \dots (7)$$

Keterangan :

γ = Berat volume

W = Berat tanah

V = Volume total

2. Pengaruh Gradasi Tanah Terhadap Angka Pori

Gradasi tanah dapat mempengaruhi secara langsung angka pori tanah, karena apabila butir-butir agregat mempunyai ukuran yang sama, volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butiran-butirannya bervariasi akan terjadi volume pori yang kecil. Hal ini karena butiran yang kecil akan mengisi pori antara butiran yang lebih besar sehingga pori-porinya menjadi sedikit dengan kata lain kemampatannya tinggi (Umy, 2015).

Gradasi tanah disebut dengan gradasi agregat dimana gradasi agregat adalah distribusi dari variasi ukuran butiran agregat. Dapat juga disebut pengelompokan agregat dengan ukuran yang berbeda sebagai presentase dari total agregat, atau presentase kumulatif butiran yang lebih kecil, atau lebih besar dari masing-masing seri bukan saringan (fakhi, 2014).

Gradasi agregat akan mempengaruhi luas permukaan tanah sekaligus akan mempengaruhi jumlah pasta/air yang lebih kecil. Apabila ditinjau dari volume pori (ruang kosong) antara butiran, maka tanah dengan butiran agregat yang bervariasi akan mengakibatkan volume pori lebih kecil dengan kata lain kemampuan menjadi tinggi. Hal ini berbeda dengan ukuran agregat yang seragam yang akan mempunyai volume ruang kosong yang lebih besar (Fakhi, 2014).

Dalam butiran tanah ada beberapa macam gradasi agregat yaitu :

a. Gradasi Seragam (*Uniform Graded*)

Gradasi seragam adalah gradasi agregat dengan ukuran butir yang hampir sama. Gradasi seragam disebut juga dengan gradasi terbuka (*open graded*), karena hanya mengandung sedikit agregat halus sehingga terdapat banyak rongga/ruang kosong antar agregat.

b. Gradasi Rapat (*Dense Graded*)

Gradasi rapat adalah gradasi agregat dimana terdapat butiran dari agregat kasar sampai halus, sehingga sering disebut dengan gradasi menerus, atau gradasi baik (*well graded*).

c. Gradasi Senjang (*Gap Graded*)

Gradasi senjang adalah gradasi agregat dimana ukuran agregat yang ada tidak lengkap, atau terdapat fraksi agregat yang tidak ada jumlahnya sedikit sekali.

C. Teori Rembesan Aliran Air Tanah

1. Pengertian Rembesan Aliran

Aliran air tanah adalah aliran yang terjadi dibawah permukaan air tanah ke elevasi yang lebih rendah yang akhirnya menuju sungai atau langsung ke laut. Air tanah mengalir dari titik berenergi potensial tinggi kearah titik berenergi potensial rendah, antara titik-titik yang berenergi potensial sama tidak terdapat pengaliran air tanah (Luknanto, 2000).

Didalam tanah, sifat aliran mungkin laminar atau turbulen. Tahanan terhadap aliran bergantung pada jenis tanah, ukuran butiran, rapat massa, serta

bentuk geometris rongga pori. Temperatur juga sangat mempengaruhi tahanan aliran (kekentalan dan ketegangan permukaan). Walaupun secara teoritis, semua jenis tanah lebih atau kurang mempunyai rongga pori, dalam praktek, istilah mudah meloloskan air (*permeable*), bilah tanah tersebut mempunyai kemampuan meloloskan air yang sangat kecil, sehingga konsep dasar rembesan dari tinggi energi dan kehilangan energi. Ketika air mengalir melalui tanah telah disebutkan ketika air mengalir melalui medium berpori seperti tanah akan terjadi kehilangan energi yang terserap oleh tanah (Hardiyanto HC, 2012).

Menurut (Asiyanto, 2011) rembesan merupakan aliran yang secara terus menerus mengalir dari hulu menuju hilir. Aliran air ini merupakan aliran air dari sungai melalui material yang lolos air (*permeable*), baik melalui tubuh bendungan maupun pondasi.

Koefisien rembesan tanah adalah tergantung pada beberapa factor, yaitu: kekentalan cairan, distribusi

Rembesan air dimaksudkan untuk mengukur kemampuan tanah dilewati oleh air melalui pori-porinya. Menurut hukum Darcy oleh Henri Darcy, debit air (Q) yang melalui penampang massa tanah (A) adalah :

$$Q = k \cdot i \cdot A \dots \dots \dots (8)$$

Keterangan :

k = koefisien rembesan (*coefficient of permeability*)

i = gradien hidrolik

Satuan yang biasa dipakai adalah cm/det, dalam sistim cgs dan ft/day dalam satuan f.p.s. Koefisien rembesan (k) dalam laboratorium dapat ditentukan sebagai berikut :

- a. Pengukuran dalam “Tegangan Tetap” (*Constant Head*)
- b. Pengukuran dalam “Tegangan Berubah” (*Variable Falling Head*)

Permeability → kemampuan tanah untuk dapat dirembesi oleh air

Seepage → proses dimana air dapat mengalir melalui ruang pori, yang perlu diperhatikan :

- a. Banyaknya air yang akan merembes

Tegangan air didalam tanah akibat rembesan

2. Aliran Air Pada Tanah

Air tanah adalah air yang berada di dalam tanah. Air tanah dibagi menjadi dua, air tanah dangkal dan air tanah dalam. Air tanah dangkal merupakan air yang berasal dari air hujan yang diikat oleh akar pohon. Air tanah ini terletak tidak jauh dari permukaan tanah serta berada diatas lapisan kedap air. Sedangkan air tanah dalam adalah air hujan yang meresap kedalam tanah lebih dalam lagi melalui proses absorpsi serta filtrasi oleh batuan dan mineral didalam tanah. sehingga berdasarkan prosesnya air tanah air tanah dalam lebih jernih dari air tanah dangkal (Kumalasari, 2011).

Air tanah (*groundwater*) merupakan air yang berada di bawah permukaan tanah. Air tanah ditemukan pada akifer pergerakan air tanah sangat lambat kecepatan arus berkisar antara $10^{-10} - 10^{-3}$ m/detik dan dipengaruhi oleh porositas, permeabilitas dari lapisan tanah, dan pengisian kembali air. Karakteristik utama

yang membedakan air tanah dan air permukaan adalah pergerakan yang sangat lambat dan waktu tinggal yang sangat lama, dapat mencapai puluhan bahkan ratusan tahun (Effendi, 2003).

D. Parameter Infiltrasi

1. Pengertian Infiltrasi

Infiltrasi merupakan peristiwa atau proses masuknya air ke dalam tanah, umumnya melalui permukaan tanah dan secara vertikal. Infiltrasi adalah proses masuknya air ke dalam tanah melalui permukaan tanah dalam tingkatan prosesnya melalui (Utomo, 2016), yaitu:

- a. Ambibisi, yaitu proses masuknya air ke dalam tanah melalui permukaan tanah atau serapan matrik tanah.
- b. Bergeraknya air ke dalam permukaan tanah, dimana ambibisi masih berlangsung.
- c. Redistribusi air tanah setelah proses ambibisi berakhir.

Menurut Darwis (2018), infiltrasi dimaksudkan sebagai proses masuknya air ke permukaan tanah. Proses ini merupakan bagian yang sangat penting dalam daur hidrologi maupun dalam proses pengalihragaman hujan menjadi aliran di sungai, danau, waduk, dan pengimbuhan air tanah. dalam kaitan ini terdapat tiga pengertian tentang kuantitas infiltrasi, yaitu kapasitas infiltrasi (*infiltration capacity*) dan laju infiltrasi (*infiltration rate*) serta infiltrasi komulatif (*comulative infiltration*).

Proses infiltrasi melibatkan tiga proses yang saling tidak tergantung satu sama lain (Asdak, 2014), yaitu:

- a. Proses masuknya air hujan melalui pori-pori permukaan tanah.
- b. Tertampungnya air hujan tersebut di dalam tanah .
- c. Proses mengalirnya air tersebut ke tempat lain (bawah, samping, dan atas).

Ketika air hujan menyentuh permukaan tanah, sebagian atau seluruh air hujan tersebut masuk ke dalam tanah melalui pori-pori permukaan tanah. Proses masuknya air hujan ke dalam tanah disebabkan oleh tarikan gaya gravitasi dan gaya kapiler tanah. Laju air infiltrasi yang dipengaruhi gaya gravitasi dibatasi oleh besarnya diameter pori-pori tanah. Di bawah pengaruh gaya gravitasi, air hujan mengalir tegak lurus ke dalam tanah melalui profil tanah. Pada sisi lain, gaya kapiler bersifat mengalirkan air tersebut tegak lurus ke atas, ke bawah, dan ke arah horizontal. Gaya kapiler tanah ini bekerja nyata pada tanah dengan pori-pori yang relatif kecil (USDA Resources Conservation Service, 1998).

2. Pengertian Laju Infiltrasi

Laju infiltrasi adalah banyak air pada satuan waktu yang masuk melalui permukaan tanah. Laju infiltrasi terbesar pada saat permulaan hujan dan menurun hingga mencapai angka minimum yang konstan. Laju infiltrasi dipengaruhi oleh variasi intensitas hujan. Bila suatu saat air mulai menggenang di permukaan tanah, berarti laju penambah air di permukaan tanah melalui laju infiltrasi tertinggi. Laju infiltrasi maksimum dinamakan kapasitas infiltrasi (Horton, 1993).

Tanah yang berbeda-beda menyebabkan air meresap dengan laju yang berbeda-beda. Setiap tanah memiliki daya resap yang berbeda, yang di ukur dalam milimeter per jam (mm/jam). Jenis tanah berpasir umumnya cenderung mempunyai laju infiltrasi tinggi, akan tetapi tanah liat sebaliknya, cenderung

mempunyai laju infiltrasi rendah. Untuk satu jenis tanah yang sama dengan kepadatan yang berbeda mempunyai laju infiltrasi yang berbeda pula. Makin padat makin kecil laju infiltrasinya (Wilson, 1983).

Menurut Soemarto (1995), bahwa laju infiltrasi dapat diukur dengan beberapa cara, antara lain)

- a. Dengan menggunakan testplot (*infiltrometer*) : pengukuran daya infiltrasi dengan menggunakan infiltrometer hanya dapat dilakukan terhadap luasan yang kecil saja, sehingga sukar untuk mengambil kesimpulan terhadap besarnya daya infiltrasi bagi daerah yang lebih luas. Untuk mengatasi hal ini dipilih tanah datar yang dikelilingi tanggul dan digenangi air, laju infiltrasi didapat dari banyaknya air yang ditambahkan agar permukaan airnya konstan.
- b. Dengan menggunakan *Lysimeter* : alat ini berupa tangki beton yang ditanam di dalam tanah, yang diisi tanah dan tanaman yang sama dengan sekelilingnya, dilengkapi dengan fasilitas drainase dan pemberian air.
- c. Test penyiraman (*sprinkling Test*) : di atas sebidang tanah dengan luas beberapa puluh meter persegi, diberikan hujan tiruan dengan intensitas yang diketahui dan konstan. Permukaan tanahnya dibuat agak miring, sehingga limpasan permukaan dapat dihitung.

3. Pengertian Kapasitas Infiltrasi

Kapasitas infiltrasi adalah suatu sifat dinamis yang dapat berubah secara nyata selama kejadian hujan badai tertentu, sebagai reaksi terhadap perubahan-perubahan musiman dalam air tanah, suhu, dan penutupan vegetasi, maupun sebagai akibat kegiatan-kegiatan pengolahan hutan. Apabila aliran kapasitas

infiltrasi semakin besar, maka aliran air di permukaan tanah semakin berkurang. Sebaliknya semakin kecil kapasitas infiltrasi yang disebabkan banyaknya pori tanah yang tersumbat, maka aliran air permukaan bertambah atau meningkat (Kartasapoetra, 1989).

Kapasitas infiltrasi merupakan suatu sifat dinamis, kapasitas tersebut paling besar bila curah hujan mulai, dan menurun secara progresif bila koloid-koloid tanah mengembang dan mengurangi ukuran pori-pori. Pada tingkat-tingkat kandungan air tanah yang sangat tinggi, infiltrasi dapat dihambat dengan adanya udara di dalam tanah karena udara tersebut akan sulit keluar untuk menciptakan ruang bagi air tambahan (Lee, 1990).

E. Teori Intensitas Curah Hujan

1. Pengertian Intensitas Curah Hujan

Intensitas curah hujan adalah jumlah curah hujan yang dinyatakan dalam tinggi hujan atau volume hujan atau volume hujan tiap satuan waktu, yang terjadi pada satu kurun waktu air hujan terkonsentrasi (Wesli, 2008). Besarnya intensitas curah hujan berbeda-beda tergantung lamanya curah hujan dan frekuensi kejadiannya. Intensitas curah hujan yang tinggi umumnya berlangsung dengan durasi yang singkat atau pendek dan meliputi daerah yang tidak luas.

Menurut Hanafi (1998), intensitas curah hujan adalah banyaknya curah hujan yang jatuh per satuan waktu, dinyatakan dalam mm/jam. Intensitas hujan menunjukkan lebat tidaknya hujan. Intensitas hujan yang besar, berarti air yang dicurahkan jumlahnya banyak dalam waktu singkat, butiran airnya besar, dan

akan menyebabkan erosi lebih besar lagi, karena limpasan permukaan yang besar, sementara resapan air akan terhambat.

Curah hujan jangka pendek dinyatakan dalam intensitas per jam yang disebut intensitas curah hujan (mm/jam). Intensitas curah hujan rata-rata dalam t jam (I_t) dinyatakan (Suyono & Takeda, 1980) :

$$I_t = \frac{Rt}{t} \quad (9)$$

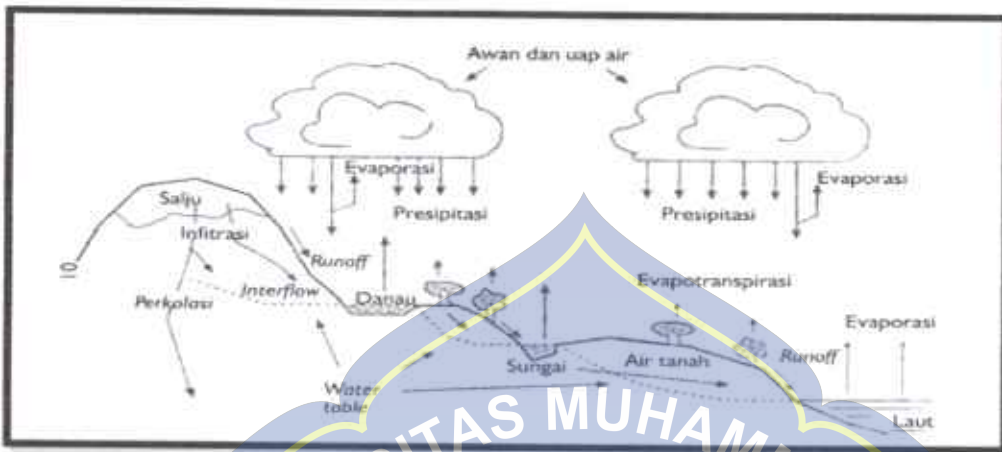
dengan R_t = curah hujan selama t jam

2. Mekanisme Proses Terjadinya Intensitas Curah Hujan

Beberapa ahli berpendapat mengenai pengertian hidrologi. Menurut Asdak (1995), hidrologi adalah ilmu yang mempelajari air dalam segala bentuknya (cairan, gas, padat) pada dalam dan di atas permukaan tanah. Sedangkan Arsyad (2009) berpendapat bahwa hidrologi adalah ilmu yang mempelajari proses penambahan, penampungan, dan kehilangan air di bumi. Maka dapat disimpulkan bahwa

Objek hidrologi meliputi aspek presipitasi, evaporasi dan transpirasi aliran permukaan dan air tanah. secara umum, pergerakan air di alam terdiri dari beberapa peristiwa (Sumantri, Arif. 2010), yaitu:

- a. Penguapan air (*evaporasi*),
- b. Pembentukan awan (*kondensasi*),
- c. Jatuhnya air ke bumi (*presipitasi*) dan
- d. Aliran air pada permukaan bumi dan di dalam tanah.



Sumber : sumantri, Arif. 2010

Gambar 4 Siklus Hidrologi

Unsur hujan yang harus diperhatikan dalam mempelajari curah hujan ialah jumlah curah hujan, dan intensitas atau kekuatan tetesan hujan. Lingkungan air disebut sebagai hidrosfer yang erat kaitannya dengan berlangsungnya kebutuhan air secara kualitatif dan kuantitatif. Sekalipun air jumlahnya relatif konstan, tidak diam, bersikulasi akibat pengaruh cuaca, sehingga terjadi suatu siklus yang disebut siklus hidrologi (Sumantri, Arif, 2010).

Sumantri, Arif (2010) menyatakan bahwa air di bumi mengalami sirkulasi yang terjadi terus-menerus sepanjang masa. Menguap, mengembun, dan mengalir. Air menguap ke udara dari permukaan bumi berubah menjadi awan setelah melalui beberapa proses, kemudian jatuh kembali ke permukaan bumi dalam bentuk hujan, baik hujan air maupun hujan es atau salju.

Air hujan yang jatuh di permukaan bumi, sebagian masuk ke dalam tanah, sebagian lainnya masuk mengisi lekuk-lekuk permukaan tanah, mengalir ke daerah-daerah yang rendah dan kemudian masuk ke sungai kemudian bermuara ke laut (Sumantri, Arif. 2010).

Sebagian air yang masuk ke dalam tanah keluar memasuki sungai kemudian mengalir ke laut. Akan tetapi, sebagian besar tersimpan di dalam tanah sebagai air tanah, dan dalam jangka waktu yang lama air yang tersimpan dalam tanah keluar sedikit demi sedikit ke daerah yang rendah di permukaan tanah (Sumantri, Arif. 2010).

Sementara itu butir-butir air yang mengalir di permukaan tanah, yaitu air yang tidak sampai masuk ke dalam tanah, tidak seluruhnya mengalir ke laut. Dalam perjalanannya menuju laut sebagian menguap kembali ke udara. Uap air yang naik ke atmosfer bumi ini kembali terbentuk menjadi awan dan jatuh kembali ke permukaan bumi berupa hujan. Kegiatan ini berlangsung terus menerus sepanjang masa tanpa pernah berhenti.

Menurut sumantri, Arif (2010) proses pengembunan uap air menjadi hujan dan jatuh menuju bumi ini dinamakan presipitasi (*precipitation*). Proses menguapnya air dari daratan dan lautan menuju atmosfer bumi dinamakan evaporasi (*evaporation*), dan proses menguapnya air dari tanaman disebut transpirasi (*transpiration*), keduanya disebut evapotranspirasi.

Adapun proses masuknya air ke dalam tanah yang menyusup melalui pori-pori tanah dinamakan infiltrasi (*infiltration*) atau perkolasi (*percolation*). Aliran air di permukaan bumi dari daratan ke sungai kemudian akhirnya ke laut dinamakan aliran permukaan (*surface stream flow*) (Sumantri, Arif. 2010).

Aliran air yang masuk ke dalam tanah tapi kemudian segera kembali keluar dan menuju sungai disebut aliran intra (*intra flow*). Air yang tersimpan di dalam tanah atau di antara lapisan-lapisan tanah dinamakan air tanah (*ground water*).

Secara keseluruhan, sirkulasi air yang berlangsung di bumi mencakup semua proses tadi dan disebut daur hidrologi (*hidrological cycle*) (Sumantri, Arif, 2010).

3. Analisis Curah Hujan Rencana

Curah hujan sering disebut dengan presipitasi yang juga diartikan sebagai jumlah air hujan yang turun pada wilayah tertentu dan pada kurun waktu tertentu. Jumlah curah hujan adalah volume air yang terkumpul pada permukaan bidang datar pada periode tertentu, seperti harian, mingguan, bulanan serta tahunan (sumber: Rimbakita).

Curah hujan rencana maksimum dengan periode ulang tertentu dapat ditentukan dengan cara menganalisis data curah hujan harian maksimum. Curah hujan rencana tersebut dipergunakan untuk menentukan debit rencana dengan periode ulang tertentu yang sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Hujan rencana adalah hujan harian maksimum yang akan digunakan untuk menghitung intensitas curah hujan (Anonymous, 2013). Untuk mendapatkan curah hujan rancangan (R_t) dilakukan melalui Analisa frekuensi, antara lain metode Log Normal, Gumbel dan Log Person tipe III (Soemarto C. D, 1995).

1) Perhitungan Curah Hujan Rencana Metode Gumbel

Langkah-langkah perhitungan curah hujan rencana dengan metode gumbel adalah sebagai berikut:

a) Perhitungan Curah Hujan Rencana Metode Gumbel

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots \dots \dots (10)$$

Dimana :

S_x = standar deviasi

X_i = curah hujan rata-rata

X_r = harga rata-rata

N = jumlah data

b) Hitung Nilai Faktor Frekuensi (K)

$$K = \frac{Y_t - Y_n}{S_n} \quad (11)$$

Dimana :

K = faktor frekuensi

Y_n = harga rata-rata reduce variate

S_n = reduced standard deviation

Y_t = reduced variate

c) Hitung Hujan Dalam Periode ulang T Tahun

$$X_t = X_r + (K \cdot S_x) \quad (12)$$

Dimana :

X_t = hujan dalam periode ulang tahun

X_r = harga rata-rata

K = faktor Frekuensi

S_x = standar deviasi

2) Perhitungan Curah Hujan Rencana Metode Log Normal

Rumus-rumus yang digunakan dalam perhitungan curah hujan rencana dengan metode log normal sebagai berikut :

$$R_t = X_r + K_t \cdot S_x \quad (13)$$

Dimana :

R_t = besarnya curah hujan yang mungkin terjadi pada periode ulang T tahun

X_r = curah hujan rata-rata

K_t = standar variabel untuk periode ulang tahun

S_x = standar deviasi

3) Perhitungan Curah Hujan Rencana Metode Log Person Type III

Langkah-langkah perhitungan distribusi Log Person Type III adalah:

a) Hitung nilai rata-ratanya

$$\log x = \frac{\sum(\log X)}{n} \quad (14)$$

b) Hitung nilai deviasi standarnya dari $\log X$:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum(\log X)}{n}} \quad (15)$$

Gaya pukulan curah hujan/butiran hujan terhadap permukaan akan mengurangi debit resapan air hujan. Akibat jatuhnya tersebut butir-butir tanah yang lebih luas dilapisan permukaan tanah akan terpencar dan masuk kedalam ruang-ruang antara butir-butir tanah, sehingga terjadi efek pemampatan. Permukaan tanah yang terdiri atas lapisan yang bercampur tanah liat akan menjadi kedap air karena dimampatkan oleh pukulan butir-butir hujan tersebut. Tapi tanah pasiran tanpa campuran bahan-bahan lain tidak akan dipengaruhi oleh gaya pukulan partikel butir hujan.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental model (*Experimental Research*). Penelitian eksperimental adalah suatu penelitian yang didalamnya ditemukan minimal satu variabel yang dimanipulasi untuk mempelajari hubungan sebab-akibat.

Penelitian ini akan menggunakan model penelitian eksperimental tentang “Analisis Hubungan Antara Angka Pori (e) Dengan Kecepatan Rembesan Pada Tanah Berbutir Halus dengan metode simulasi (uji laboratorium)” dengan menggunakan hujan buatan dari alat simulasi yang telah didesain dan dibuat khusus (*specific equipment*).

B. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada dua lokasi yaitu pengujian karakteristik tanah dilaksanakan di Laboratorium Universitas Bosowa Dan Laboratorium Politeknik Negeri Ujung Pandang, sedangkan pengujian model dilakukan di jalan poros Malino, Desa Lonjoboko, Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa.

C. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas merupakan variabel yang mempengaruhi atau menjadi sebab perubahannya atau timbulnya variabel terikat (*independent variable*).

Variabel bebas pada penelitian ini yaitu:

a. Angka Pori Awal (e_0)

2. Variabel terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat (*Dependent Variable*) merupakan variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi akibat, karena adanya variabel bebas.

Variabel terikat pada penelitian ini, yaitu :

a. Rembesan Horizontal

b. *Seepage* Vertikal

3. Hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dalam penelitian ini dapat

Digambar dengan sketsa sebagai berikut :



Gambar 5 Skema Hubungan Variabel Penelitian

D. Defenisi Operasional Variabel

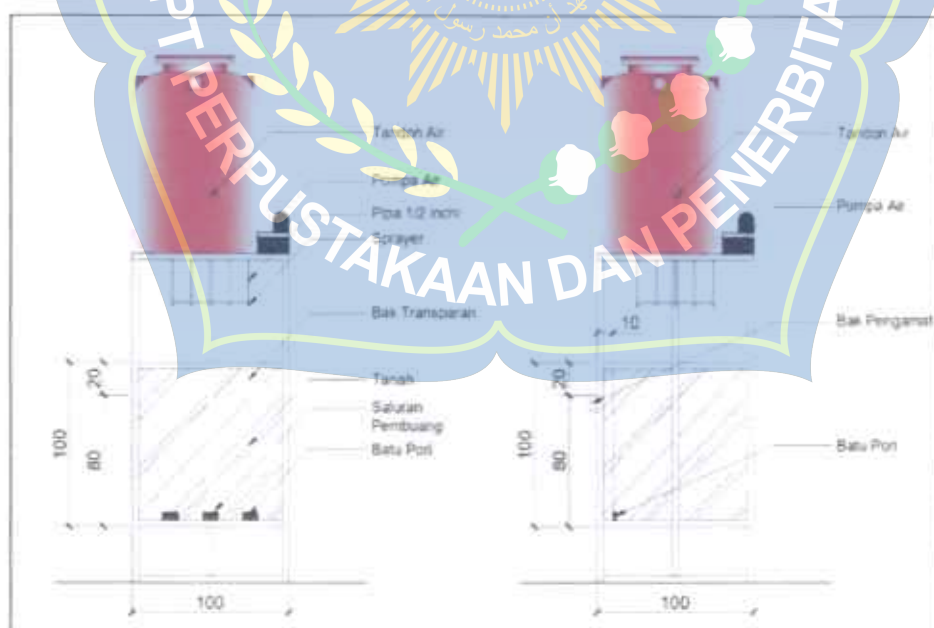
Definisi operational menjelaskan cara tertentu yang digunakan untuk meneliti dan mengoperasikan kontrak, sehingga memungkinkan bagi peneliti yang lain untuk melakukan replikasi pengukuran dengan cara yang sama atau mengembangkan cara pengukuran kontrak yang lebih baik. Dalam penelitian ini terdapat dua variabel yang divariasikan dan diamati, antara lain:

1. Angka pori awal adalah nilai yang diambil dari sampel tanah sebelum dilakukan running atau sebelum tanah diujani.
2. Seepage horizontal adalah proses yang dilakukan pada saat tanah belum diujani dengan menghitung kecepatan rembesan tanah permenit.
3. Seepage vertikal adalah proses yang dilakukan pada saat tanah sedang diujani atau proses running sementara berjalan dengan menghitung kecepatan rembesan tanah permenit.

E. Rancangan Penelitian

1. Instrumen Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan alat simulasi hujan yang terdapat di laboratorium Hidrologi Universitas Muhammadiyah Makassar.



Tampak depan

Tampak samping



Gambar 6 Foto Model Alat

1) Komponen alat pengujian

- a. Bak air kapasitas 600 L
- b. Mesin air
- c. Pipa PVC

- d. Keran air
- e. *Sprayer* (pipa semprot)
- f. Gorden plastic
- g. Bak kaca transparan
- h. Mistar ikur
- i. Batu pori

2) Alat bantu yang digunakan dalam penelitian ini :

- a. Satu set saringan (ayakan)
- b. Stopwatch untuk mengukur durasi
- c. Table isian data dan alat tulis
- d. Kamera untuk dokumentasi
- e. Berbagai alat pendukung lain yang dibutuhkan dalam penelitian
- f. Tanah : jenis tanah yang digunakan adalah tanah berbutir halus
- g. Air : jenis air yang digunakan dalam penelitian ini adalah air yang tidak terkontaminasi dengan air limbah, untuk membuat hujan buatan dengan menggunakan alat simulasi hujan

2. Prosedur Pengujian

Adapun proses pengujian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut :

a. Tahapan persiapan

Tahap persiapan dilakukan untuk mengantisipasi segala keadaan yang berkaitan dengan prosedur penelitian, seperti:

- 1) Persiapan alat
- 2) Pengecekan alat dan bahan yang akan diuji

- 3) Persiapan perangkat instrument yang dibutuhkan
 - 4) Persiapan personil pengamatan serta persatuan persepsi dalam melakukan Tindakan pengujian, pengamatan dan pengambilan data.
- b. Tahap penentuan dan pemeriksaan media tanah

Penentuan jenis tanah dengan melakukan uji karakteristik tanah sesuai dengan tanah yang akan diamati yaitu, tanah berbutir halus. Setelah pengambilan sampel tanah, tanah tersebut terlebih dahulu dijemur dibawah sinar matahari sampai kering, setelah tanah dalam keadaan kering kemudian tanah tersebut disaring dengan nomor ayakan bervariasi sesuai dengan kebutuhan penelitian, agar mendapatkan kondisi tanah yang bagus untuk dilakukan penelitian pada alat simulasi hujan.

Berikut ini tabel saringan yang digunakan dalam pemeriksaan media tanah:

Nomor Saringan	Diameter Saringan	Berat agregat = (Gr)			
		Tertahan		persentase	
		(Gram)	(%)	Tertahan	Lolos
4					
8					
16					
30					
40					
50					
60					
100					
200					
Jumlah					
PAN					

Langkah selanjutnya dilakukan pengklasifikasian jenis tanah berbutir halus berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO

3. Prosedur Perakitan

- 1) Menyediakan beberapa besi siku dan besi hollow yang akan digunakan untuk membuat struktur rangkat alat penelitian dengan model persegi Panjang yang berukuran Panjang 110 cm, lebar 100 cm, dan tinggi 200 cm.
- 2) Memasang bak kaca dengan ketebalan 12 mm disetiap sisi yang telah diukur sesuai dengan ukuran yang telah ditentukan, yang terdiri atas dua bilik yakni bilik pertama untuk bak tanah, dan bilik kedua untuk bak pengamatan genangan.
- 3) Memasang tiga batu pori antara bak tanah yang dimaksudkan untuk mengalirkan air tanah kedalam bak pengamatan.
- 4) Memasang mistar ukur disisi depan dan sisi belakang alat untuk mengetahui fliruktuasi muka air tanah, kedalaman infiltrasi dan ketinggian tekanan kapiler.
- 5) Memasang alat hujan buatan yang terdiri pvc, stop keran, dan nozzle sebanyak 5 unit.
- 6) Memasang mesin air untuk membantu mengalirkan hujan buatan secara konstan.
- 7) Memasang bak air (tendon) untuk menampung air mensimulasikan hujan buatan sesuai kebutuhan pengujian.

4. Kalibrasi Alat

Sebelum prosedur pengujian model simulasi hujan perlu dilakukan kalibrasi alat terlebih dahulu. Alat simulasi hujan disesuaikan dengan intensitas curah hujan.

5. Running Test

Sebelum prosedur pengujian model alat simulasi hujan dilaksanakan, terlebih dahulu dilakukan pemadatan tanah pada bak uji. Adapun tinggi sampel yang di rencanakan sekitar 80 cm.

- 1) Tanah yang sudah kering dimasukkan kedalam bak tanah dengan ketebalan lapisan tanah sekitar 80 cm.
- 2) Tanah yang telah dimasukkan kedalam bak tanah kemudian dikondisikan untuk mendeteksi kondisi lapangan.
- 3) Pengambilan data angka pori dilakukan sebelum dan setelah tanah diujani
- 4) Pengambilan data rembesan aliran air dilakukan sebelum diujani bak air tanah diisi setinggi 20 cm.
- 5) Mengamati dan mengukur kecepatan rembesan horizontal sebelum diujani.
- 6) Mengamati dan mengukur kecepatan rembesan vertikal saat tanah sedang diujani

6. Prosedur Pengamatan Angka Pori

Adapun pengujian angka pori adalah sebagai berikut :

- 1) Setelah tanah direkondisikan dalam bak, kemudian dilakukan pengambilan sampel sebanyak 50 ml untuk keperluan perhitungan angka pori awal (e_0) yaitu pada saat tanah belum diujani

Prosedur pengamatan angka pori :

- 1) Tanah yang telah direkondisikan dalam bak diambil sebanyak 50 ml menggunakan gelas ukur.
- 2) Tanah yang telah diambil kemudian dicampur dengan air hujan sebanyak 70 ml
- 3) Tanah yang telah tercampur dengan air kemudian didiamkan sampai tanah tersebut jenuh.
- 4) Setelah tanah jenuh selanjutnya dapat dilakukan pengukuran angka pori.

F. Teknik Analisis Data

Data hasil pengamatan akan diolah dengan metode statistic biasa, baik dalam perhitungan numerik maupun dalam penggambaran perubahan angka pori. Dari hasil pengolahan data selanjutnya akan dilakukan analisis empiris sehingga dapat dirumuskan formulasi hubungan antar parameter yang dihasilkan dari pengolahan data hasil penelitian. Korelasi parameter yang ingin dilihat dalam penelitian ini antara lain:

1. Hubungan antara angka pori dengan jenis tanah berbutir halus yang diamati sebelum dan sesaat setelah hujan sampai mencapai kondisi stabil
2. Hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan aliran yang diamati sebelum dan setelahn tanah dihujani sampai mencapai kondisi stabil.

G. Teknik Pengumpulan Data

Data-data yang perlu dikumpulkan dalam penelitian ini, terdiri atas beberapa macam, antara lain :

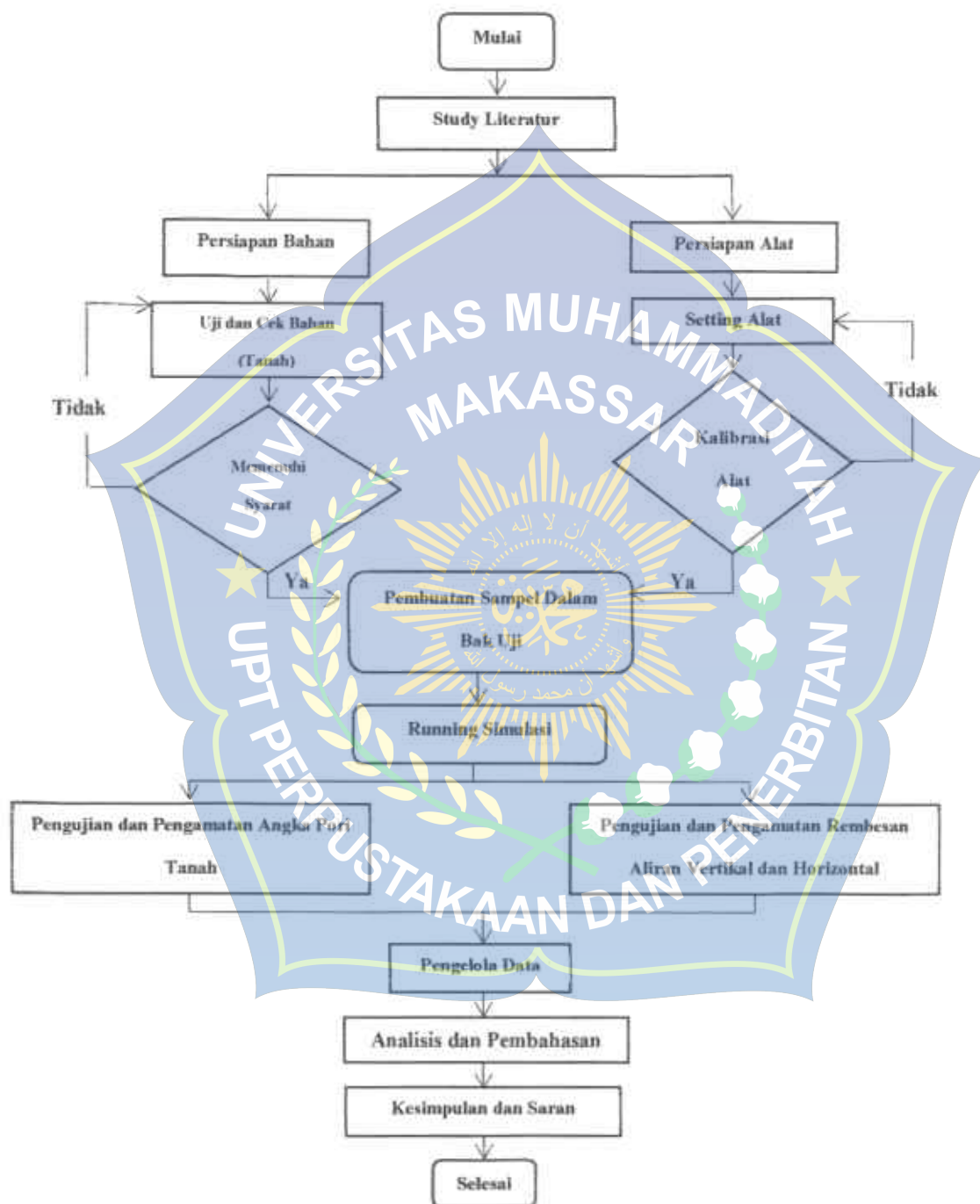
1. Data pra kondisi (*pre test*), yaitu parameter media (tanah) antara lain, ukuran partikel (*grain size*), angka pori (e), kadar air (w). pengambilan data tersebut

dilakukan setelah pemadatan lapisan tanah (media), dan sebelum pemberian air genangan di dasar lapisan.

2. Data preliminary *test*, antara lain, pengambilan data dan kecepatan rembesan. Pengambilan data tersebut dilakukan setelah pemberian air genangan di dasar lapisan, dan diamati sampai rembesan alirannya ke ujung.
3. Data pengamatan hasil pengujian (*main test*), antara lain angka pori, kecepatan rembesan aliran air, kedalaman infiltrasi. Pengambilan data tersebut dilakukan pada setiap tahap sebelum diujani dan saat diujani.



H. Flow Chart



Gambar 7 Flow Chart

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil penelitian

Dari hasil penelitian menggunakan alat simulasi hujan dan menggunakan 3 jenis sampel tanah (lempung lanau berpasir, lempung berpasir berlanau, lanau lempung berpasir) dan 3 variasi intensitas curah hujan yaitu intensitas curah hujan kala 5 tahun (I_5), intensitas curah hujan kala 15 tahun (I_{15}) dan intensitas curah hujan kala 25 tahun (I_{25}) terhadap perubahan angka pori dan kecepatan rembesan didapatkan hasil sebagai berikut :

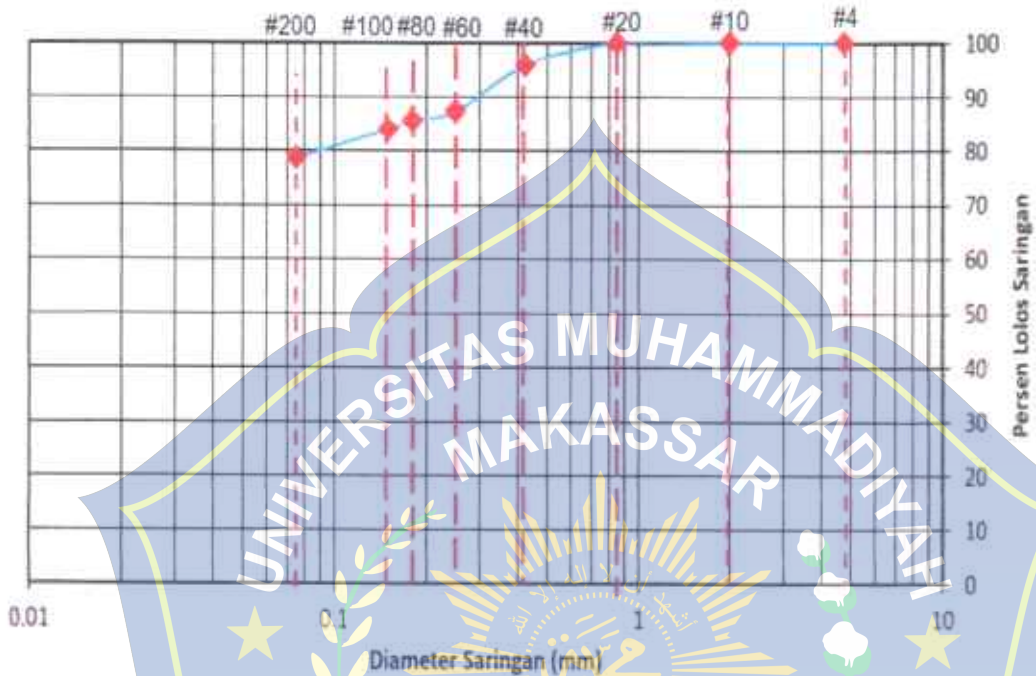
1. Karakteristik tanah

Berdasarkan hasil pengamatan sampel tanah pada laboratorium Teknik sipil Universitas Bosowa dan Politeknik Negeri Ujung Pandang, didapatkan hasil klasifikasi tanah lempung lanau berpasir, lempung berpasir berlanau, lanau lempung berpasir dengan data hasil Analisa saringan sebagai berikut :

a. Lempung Lanau Berpasir (*sandy Silt Clay*)

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik tanah (**Lihat Lamp.1, Hal.2-6**) dikategorikan sebagai jenis tanah Lempung Lanau Berpasir yang diambil dari lokasi Bili-Bili Kec. Parangloe, Kab. Gowa. Adapun grafik hasil pengujian sebagai berikut :

GRAFIK ANALISA SARINGAN



Gambar 8 Grafik Distribusi Butir Analisa Saringan (Lempung Lanau Berpasir)

Dari Gambar 8 dapat dideskripsikan bahwa berat tanah yang lolos pada saringan No. 4 (4,75 mm) dan No. 10 (2,00 mm) memiliki kesamaan yaitu 100%, sedangkan saringan No. 20 (0,85 mm) adalah 99,96%, saringan No.40 (0,43 mm) adalah 95,80%, saringan No.60 (0,25 mm) adalah 87,26%, saringan No. 80 (0,18 mm) adalah 85,56%, saringan No. 100 (0,15 mm) adalah 84,00% dan saringan No. 200 (0,0075 adalah 78,60%. Dengan demikian tanah yang lolos pada saringan No. 200 masuk kategori tanah berbuti halus secara umum karena gradasi halus yang lolos lebih dari 50%.

Yang akan dilanjutkan pada tahap uji hidrometer seperti grafik di bawah

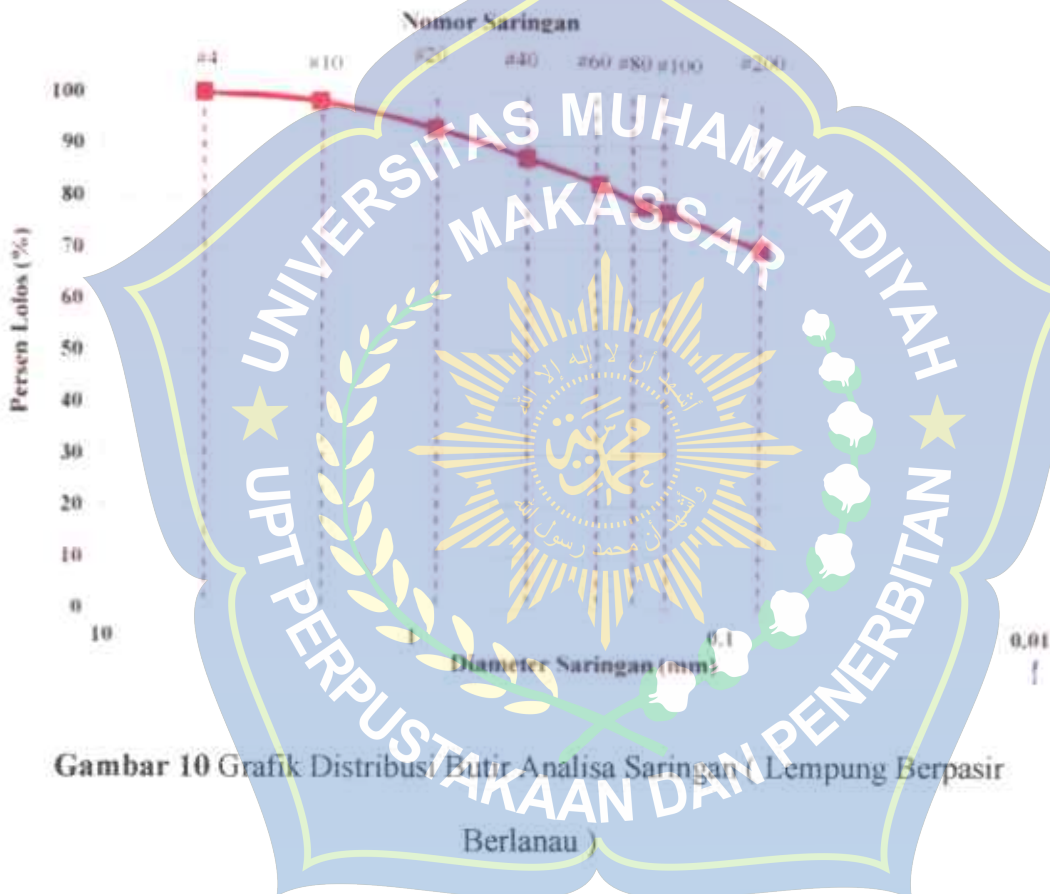


Gambar 9 Grafik Distribusi Pembagian Butir Berdasarkan Hasil Pengujian Hidrometer (Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 9 Grafik pembagian butir analisa hidrometer menunjukkan bahwa persentase ukuran butiran lempung adalah 43,65%, Lanau adalah 34,95% dan pasir adalah 21,04%. Hal ini menunjukkan adanya dominan Lempung secara signifikan dibandingkan pada kandungan lanau ditambah dengan kandungan pasir.

b. Lempung Berpasir Berlanau (*Silty Sandy Clay*)

Berdasarkan uji karakteristik di Laboratorium (Lihat Lamp.1, Hal.8-11) dikategorikan sebagai tanah Lempung Lanau Berpasir yang diambil dari lokasi Malino, Kec. Parigi, Kab. Gowa. Dengan data hasil penelitian sebagai berikut :

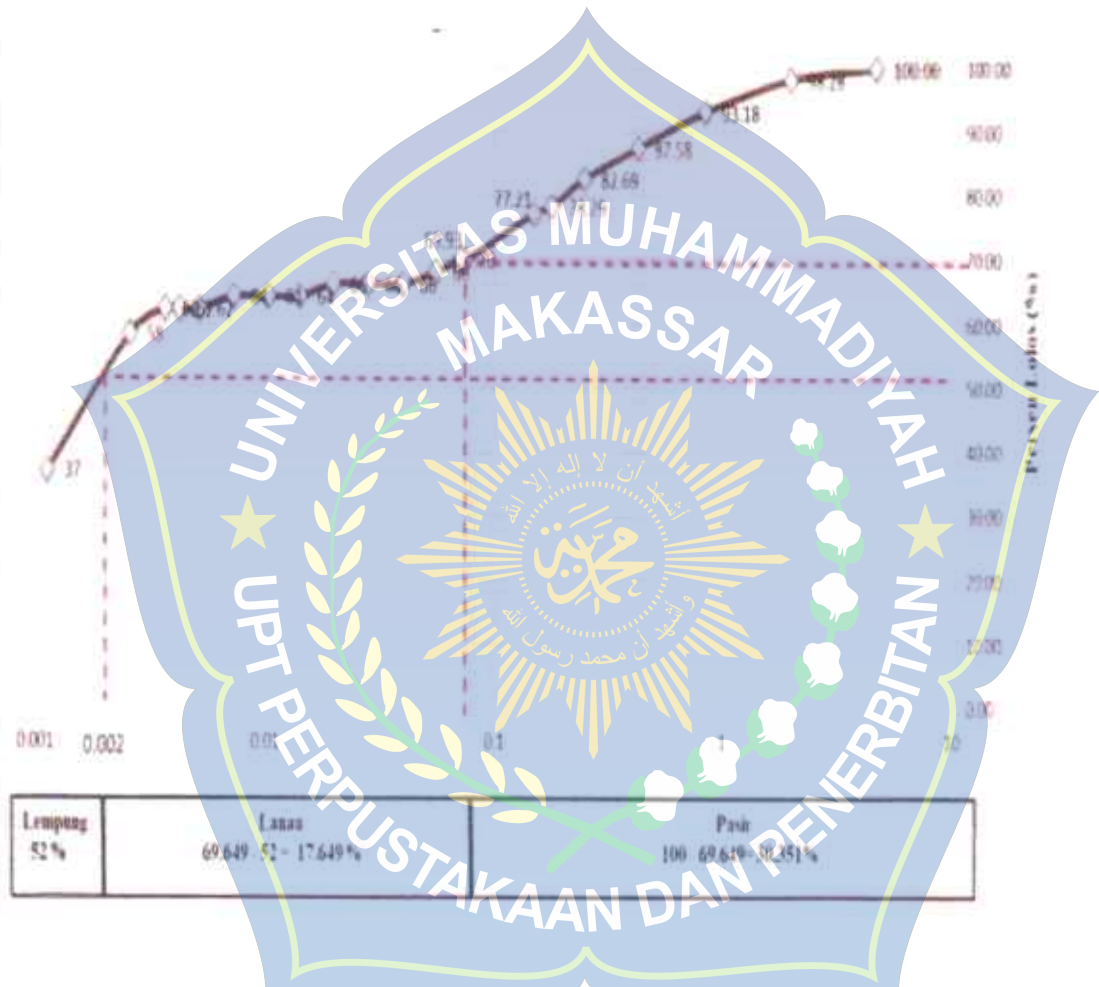


Gambar 10 Grafik Distribusi Butir Analisa Saringan (Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 10 dapat dideskripsikan bahwa persentase berat tanah yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) adalah 100%, saringan No. 10 (2,00 mm) adalah 98,28%, saringan No. 20 (0,85 mm) adalah 93,18%, saringan No. 40 (0,43 mm) adalah 87,58%, saringan No. 60 (0,25 mm) adalah 82,70%, saringan No. 80 (0,18 mm) adalah 78,29%, saringan No.100 (0,15 mm) adalah 77,21% dan saringan No. 200 (0,075 mm) adalah 69,93%. Data tersebut menunjukkan secara jelas bahwa tanah ini dapat dikategorikan sebagai salah satu tanah berbutir halus karena

ukuran butiran yang lolos saringan No. 200 memiliki selisih sekitar 20% dari batas ketentuan pada umumnya.

Yang akan dilanjutkan pada tahap uji hydrometer seperti grafik di bawah :



Gambar 11 Grafik Distribusi Pembagian Butir Berdasarkan Hasil Pengujian Hidrometer (Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 11 Grafik pembagian butir Analisa hidrometer menunjukkan bahwa persentase ukuran butiran Lempung adalah 52,00%, pasir adalah 30,35% dan Lanau adalah 17,65%. Data ini memberikan gambaran jenis tanah yang mirip dengan sampel pertama, dengan tingkat dominan yang sangat signifikan pada

kandungan lempung. Diikuti dengan beberapa kandungan pasir dan kandungan lanau sangat sedikit.

c. Lanau Lempung Berpasir

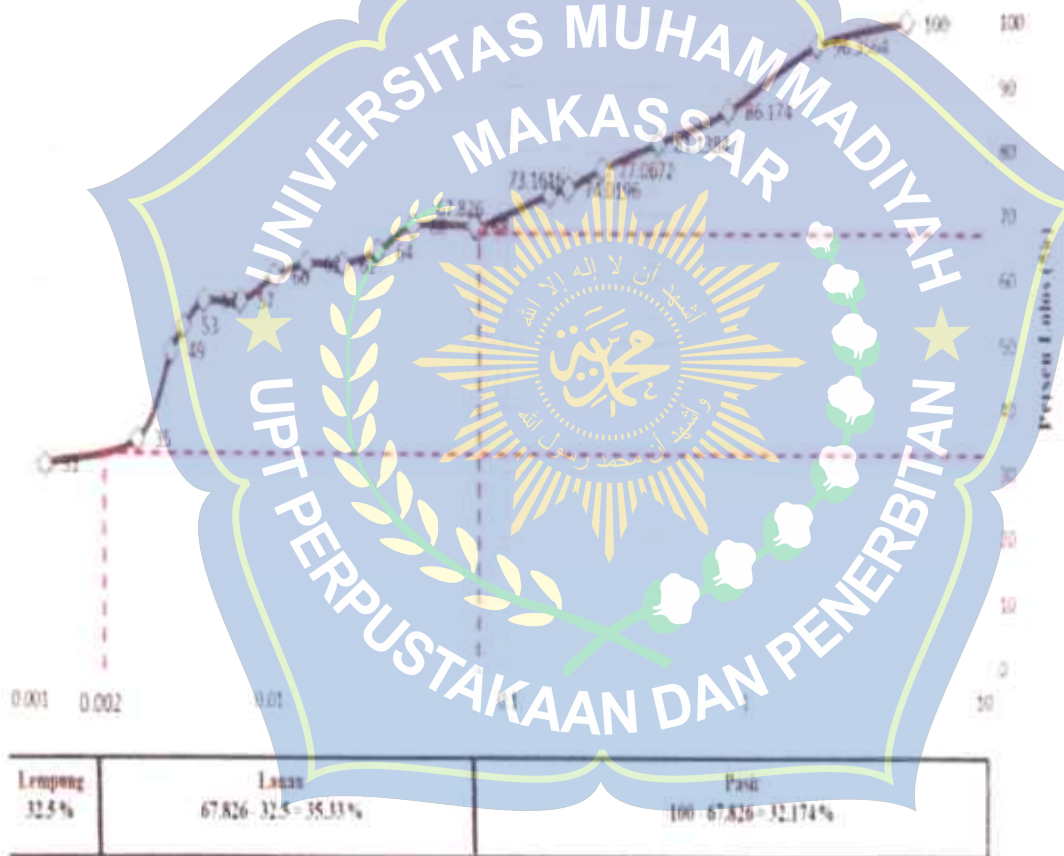
Berdasarkan data uji karakteristik tanah di laboratorium (Lihat Lamp.1, Hal.12-15) dari jenis tanah yang memiliki jenis kandungan yang sedikit berbeda dibandingkan dua tanah sebelumnya, tanah tersebut dikategorikan sebagai jenis tanah Lanau Lempung Berpasir yang diambil dari lokasi Pakatto, Kec. Bontomarannu, Kab. Gowa. Adapun data hasil pengamatan sebagai berikut :



Gambar 12 Grafik Distribusi Butir Analisa Saringan (Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 12 dapat dideskripsikan bahwa persentase berat tanah yang lolos saringan No.4 (4,75 mm) adalah 100%, saringan No.10 (2,00 mm) adalah 96,36%, saringan No.20 (0,85 mm) adalah 86,17%, saringan No.40 (0,43 mm) adalah 81,14%, saringan No.60 (0,25 mm) adalah 77,07%, saringan No.80 (0,18

mm) adalah 74,02%, saringan No.100 (0,15 mm) adalah 73,16% dan saringan No.200 (0,075 mm) adalah 67,83%. Dengan demikian tanah yang lolos saringan 200 memiliki kesamaan pada jenis tanah kedua, akan tetapi berat dari lempung dan lanau memiliki perbedaan, hal itu dapat dilihat dari hasil pengujian hidrometer sebagai berikut :



Gambar 13 Grafik Distribusi Pembagian Butir Berdasarkan Hasil Pengujian Hidrometer (Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 13 grafik pembagian butir Analisa hydrometer menunjukkan bahwa persentase ukuran btiran Lanau adalah 35,33%, Lempung adalah 32,50% dan Pasir adalah 32,17%. Dengan melihat hasil persentase pembagian butiran tanah tersebut, menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan pada setiap

kandungannya. Akan tetapi kandungan Lanau tetap dominan dibandingkan dengan kandungan lempung dan pasir. Sedangkan pada kandungan lempung dan pasirnya hanya memiliki selisih 0,3%.

2. Pengamatan Angka Pori Awal Pada Setiap Jenis Tanah

Dalam penelitian ini dilakukan pengamatan dengan menggunakan alat simulasi hujan. Analisis angka pori pada tiga jenis tanah dilakukan pengujian pada saat kondisi tanah belum diujani. Analisis angka pori dilakukan secara berturut – turut dengan 3 jenis sampel tanah yaitu lempung lanau berpasir, lempung berpasir berlanau, lanau lempung berpasir. Setiap jenis tanah dilakukan pengambilan sampel dan pengamatan angka pori sebanyak tiga kali (Lihat Lampiran 5). Untuk hasil pengamatan angka pori pada proses tersebut disajikan dalam tabel 3 berikut:

Tabel 3 Angka Pori Awal (e_0)

Jenis Tanah	Angka Pori Awal (e_0)		
	1	2	3
Lempung Lanau Berpasir	0,47	0,51	0,56
Lempung Berpasir Berlanau	0,52	0,56	0,61
Lanau Lempung Berpasir	0,67	0,72	0,79

Dari hasil pengamatan angka pori awal (e_0) pada 3 jenis tanah yang terdapat pada Tabel 3 maka dituangkan dalam grafik sebagai berikut :



Gambar 14 Grafik Angka Pori Awal (e_0) Pada Pengujian Pertama



Gambar 15 Grafik Angka Pori Awal (e_0) Pada Pengujian Kedua



Gambar 16 Grafik Angka Pori Awal (e_0) Pada Pengujian Ketiga



Gambar 17 Grafik Gabungan Angka Pori Awal (e_0)

Dari Grafik Gabungan Angka Pori Awal (e_0) , menjelaskan bahwa setiap jenis tanah dilakukan pengamatan sebanyak tiga kali sebelum tanah di hujani. Pengujian angka pori awal (e_0) pada tiga jenis tanah dalam keadaan belum dihujani menunjukkan nilai (e_0) lempung lanau berpasir yaitu 0,47, 0,51 dan 0,56. Untuk (e_0) lempung berpasir berlanau yaitu 0,52, 0,56 dan 0,61. Sedangkan (e_0) lanau lempung berpasir yaitu 0,67, 0,72 dan 0,79.

3. Kecepatan Rembesan

a. Rembesan Aliran Horizontal

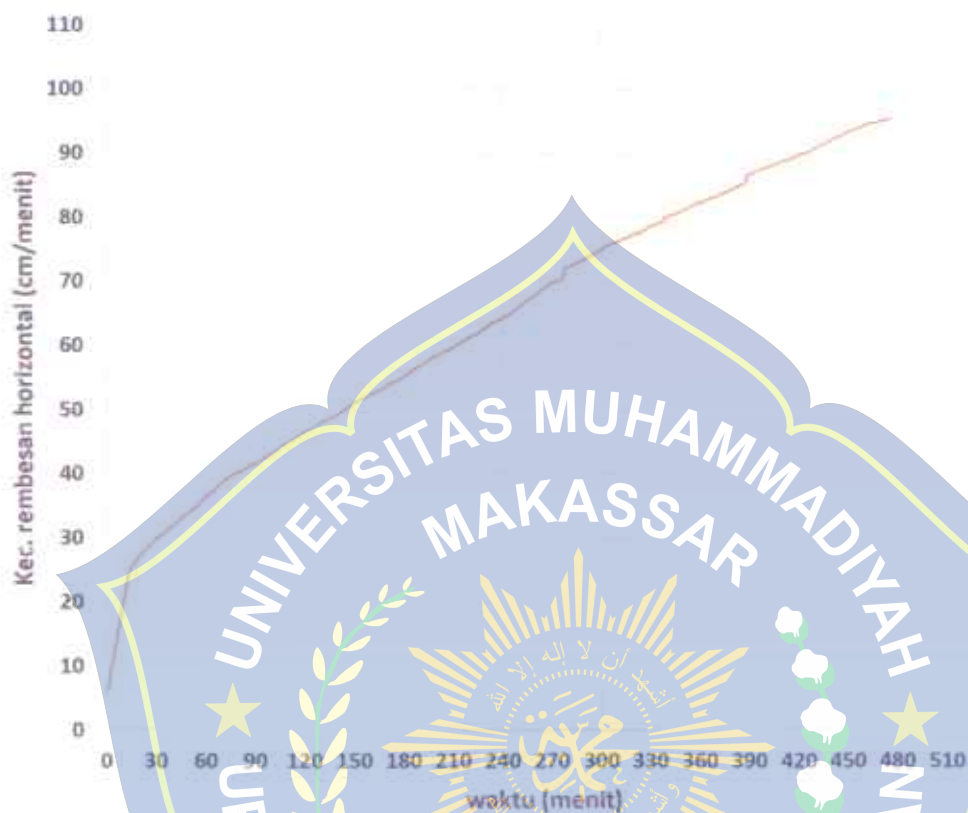
Untuk pengamatan rembesan aliran horizontal, dilakukan dilakukan pengamatan sebanyak tiga kali untuk setiap jenis tanah (Lihat Lamp3.1-Lamp3.15). Untuk hasil pengamatan rembesan aliran horizontal dapat disajikan dalam grafik berikut berikut :

1) Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama



Gambar 18 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama
(Lempung Lanau Berpasir)

Dari Gambar 18 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung lanau berpasir mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 529 menit.



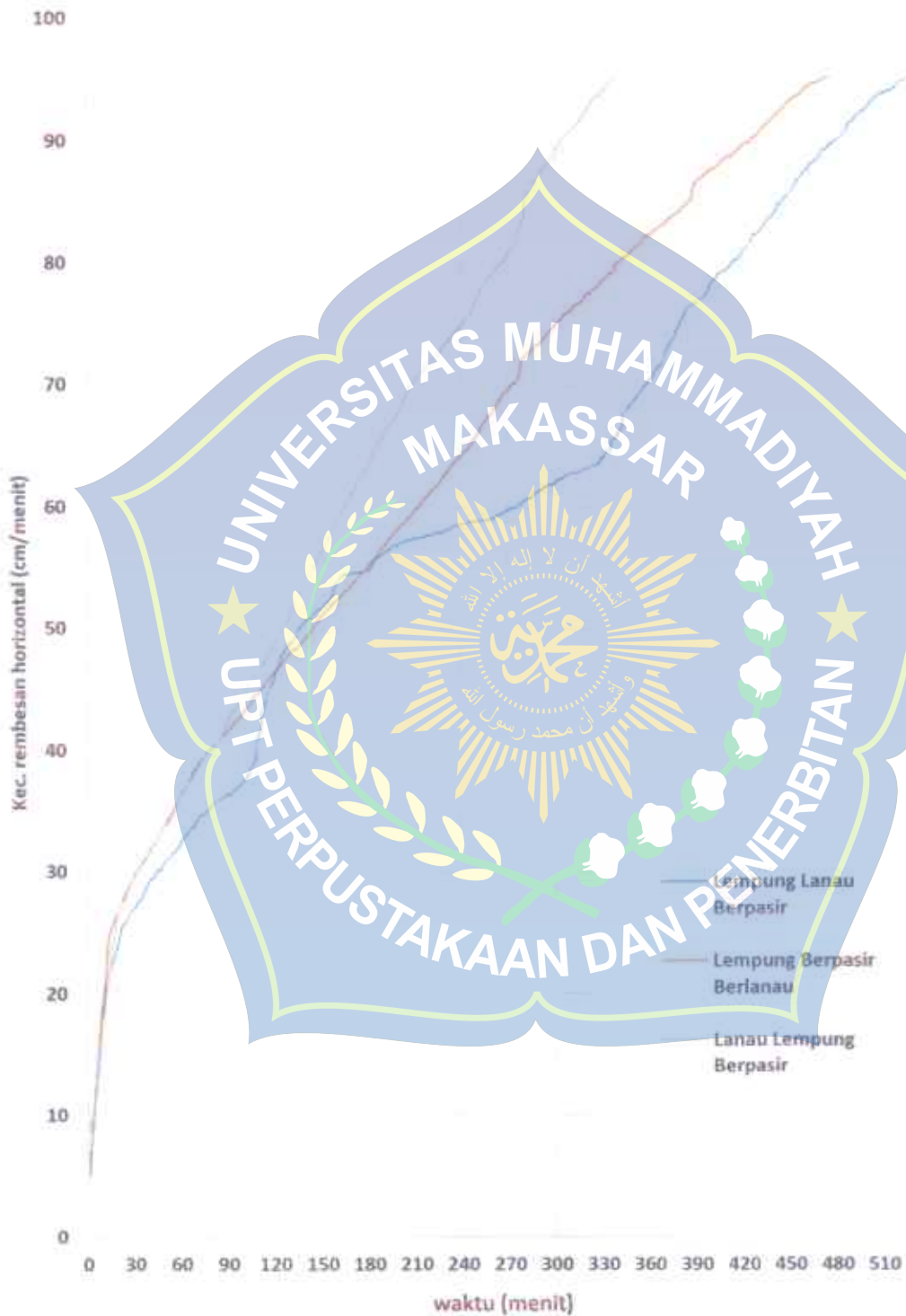
Gambar 19 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama (Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 19 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung berpasir berlanau mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 476 menit.



Gambar 20 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama
(Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 20 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 343 menit.



Gambar 21 Grafik Gabungan Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Pertama

2) Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua



Gambar 22 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua
(Lempung Lanau Berpasir)

Dari Gambar 22 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung lanau berpasir mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 523 menit.



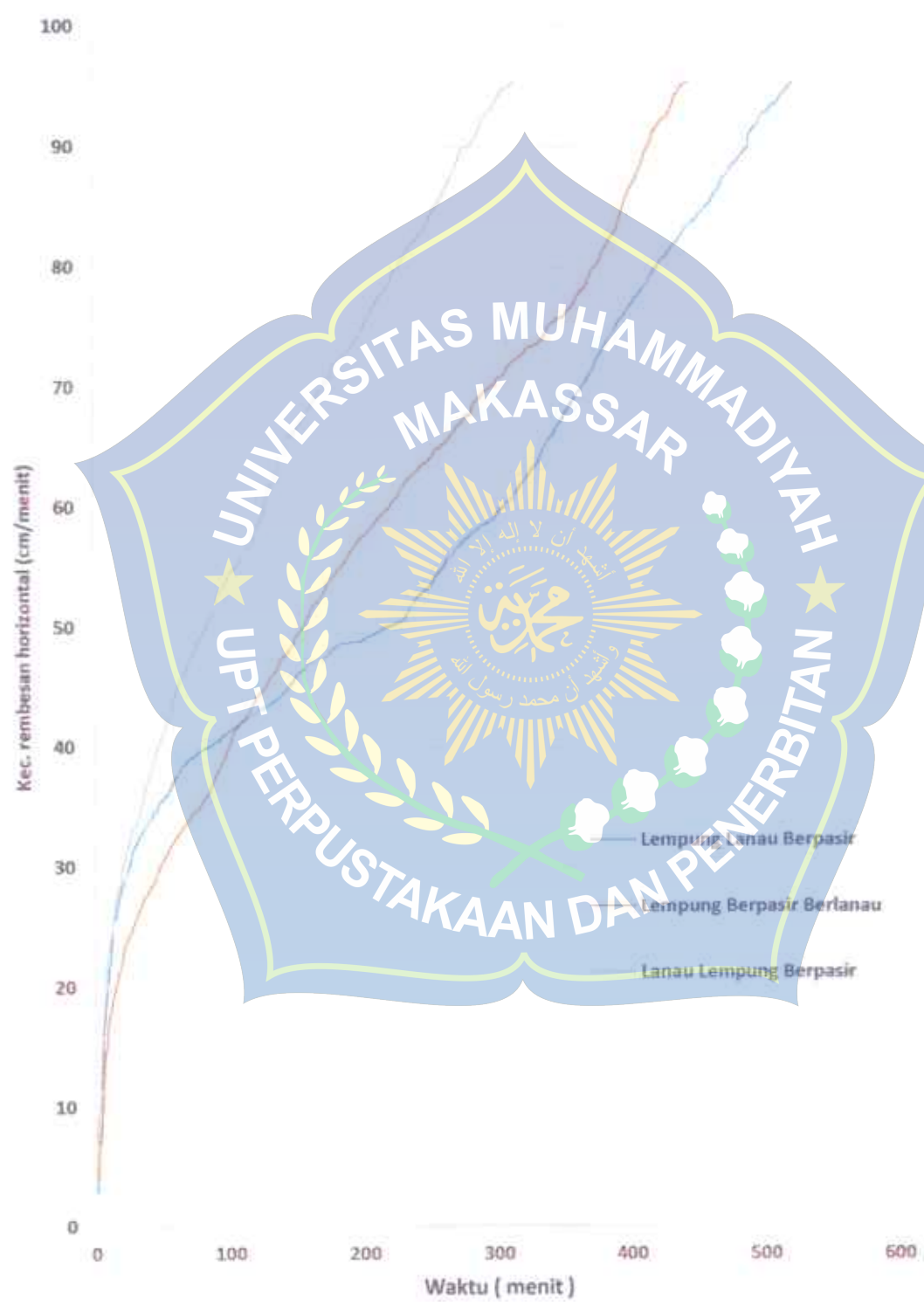
Gambar 23 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua
(Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 23 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung berpasir berlanau mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 444 menit.



Gambar 24 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua
(Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 24 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 313 menit.



Gambar 25 Grafik Gabungan Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Kedua

3) Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga



Gambar 26 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga
(Lempung Lanau Berpasir)

Dari Gambar 38 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung lanau berpasir mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 516 menit.



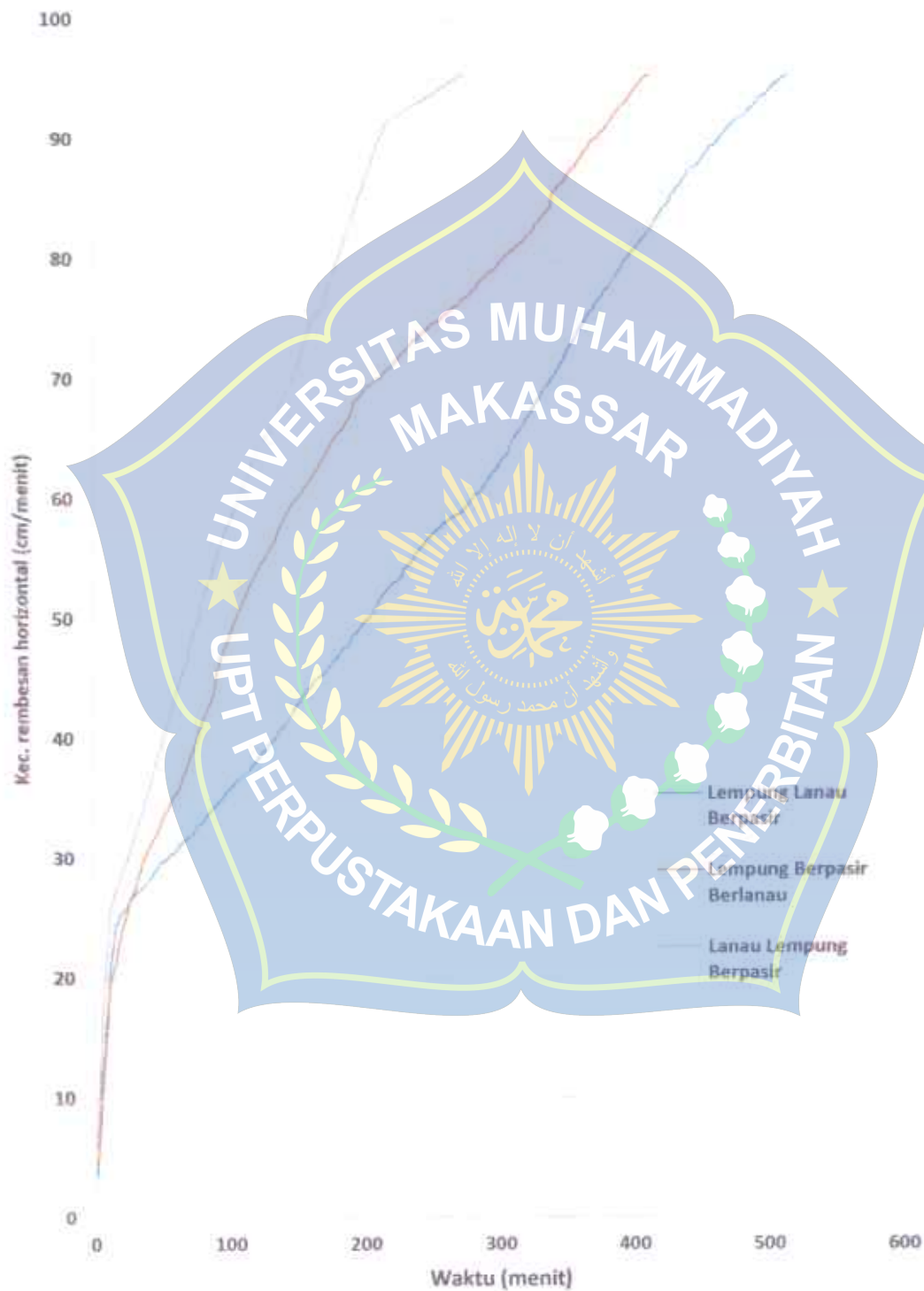
Gambar 27 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga
(Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 27 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung berpasir berlanau mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 414 menit.



Gambar 28 Grafik Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian Ketiga
(Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 28 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan rembesan aliran horizontal sejauh 95,5 cm selama 275 menit.



Gambar 29 Grafik Gabungan Kec. Rembesan Aliran Horizontal Pada Pengujian

Ketiga

Dari Gambar grafik diatas dapat dinyatakan kecepatan rembesan aliran air dari 3 jenis tanah yang diamati untuk kecepatan rembesan aliran horizontal, jenis tanah lempung lanau berpasir dan lempung berpasir berlanau mengalami rembesan yang sangat lambat, sedangkan kecepatan rembesan aliran untuk jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami rembesan aliran yang paling cepat.

b. Kecepatan Seepage Aliran Vertikal

Untuk *seepage* vertikal, dilakukan tiga kali pengamatan untuk setiap jenis tanah dengan intensitas curah hujan yang berbeda-beda yaitu I_5 , I_{15} , I_{25} (Lihat Lamp3.22–Lamp3.34). Untuk hasil pengamatan *seepage* vertikal dapat disajikan dalam grafik berikut berikut:

1) Kecepatan *Seepage* Aliran Vertikal ($I_s = 230,38$ liter/jam)



Gambar 30 Grafik Kec *Seepage* Aliran Vertikal I_s (Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 30 dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung lanau berpasir mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal sejauh 55 cm selama 208 menit.



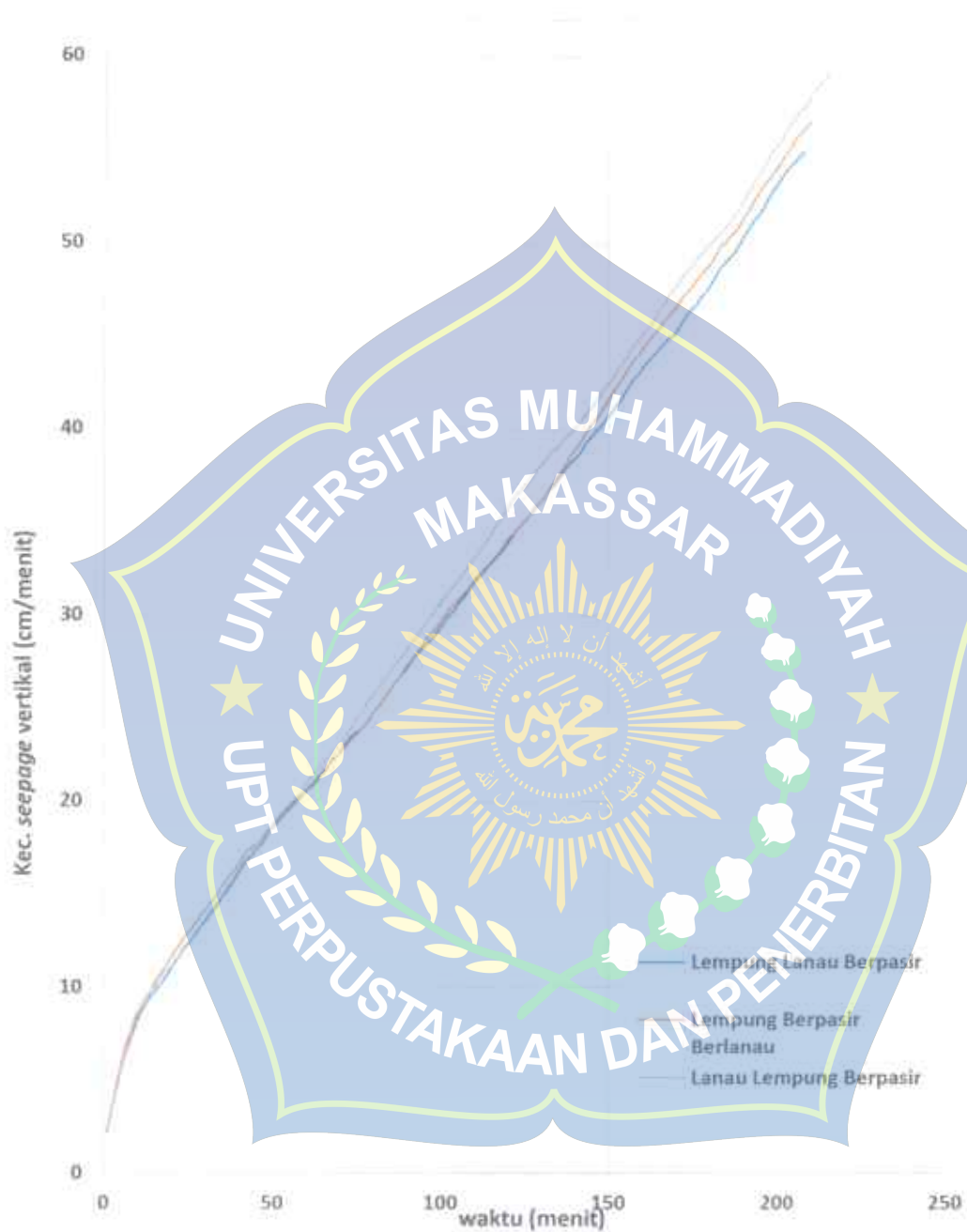
Gambar 31 Grafik Kec. Seepage Aliran Vertikal Is (Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 31 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung berpasir berlanau mengalami kecepatan seepage aliran vertikal sejauh 56,6 cm selama 210 menit.



Gambar 32 Grafik Kec. Seepage Aliran Vertikal I_s (Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 32 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal sejauh 59,1 cm selama 215 menit.



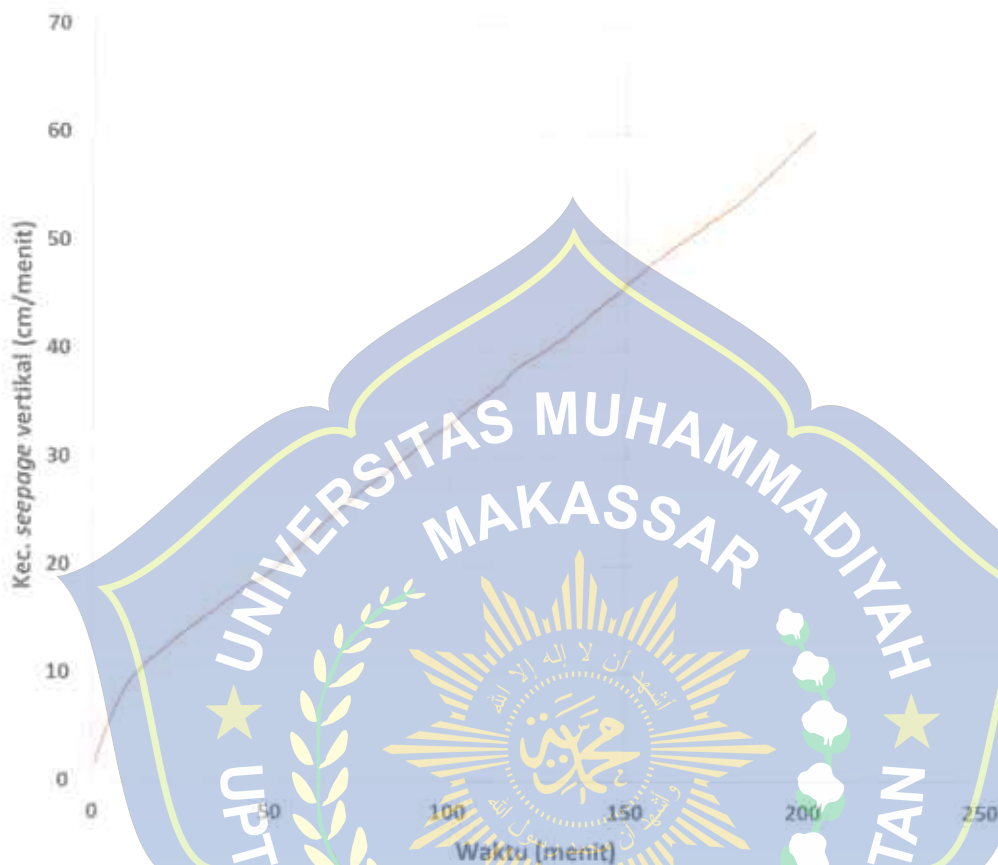
Gambar 33 Grafik Gabungan Kecepatan Seepage Aliran Vertikal Is

2) Kecepatan *Seepage* Aliran Vertikal ($I_{15} = 375,94$ liter/jam)



Gambar 34 Grafik Kec. *Seepage* Aliran Vertikal I_{15} (Lempung Lanau Berpasir)

Dari Gambar 34 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung lanau berpasir mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal sejauh 59 cm selama 206 menit.



Gambar 35 Grafik Kec. Seepage Aliran Vertikal I₁₅ (Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 35 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung berpasir berlanau mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal sejauh 60,3 cm selama 203 menit.



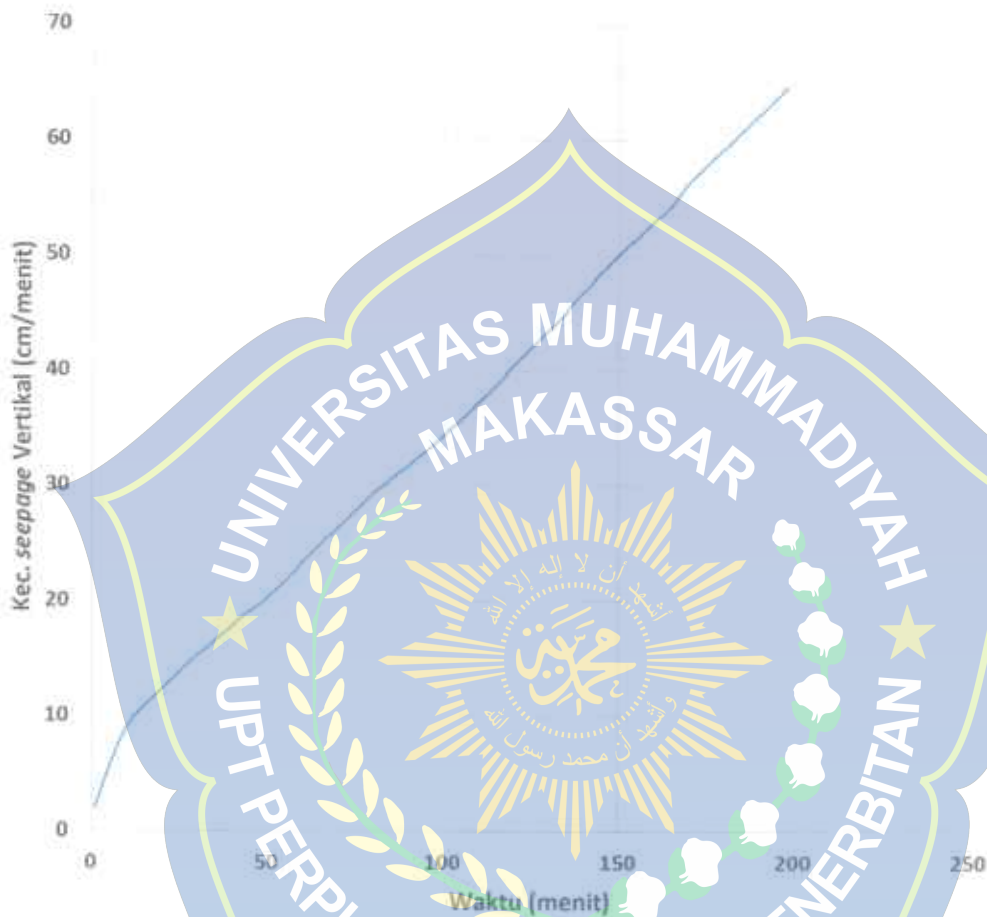
Gambar 36 Grafik Kec. Seepage Aliran Vertikal Is (Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 36 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal sejauh 63,2 cm selama 204 menit.



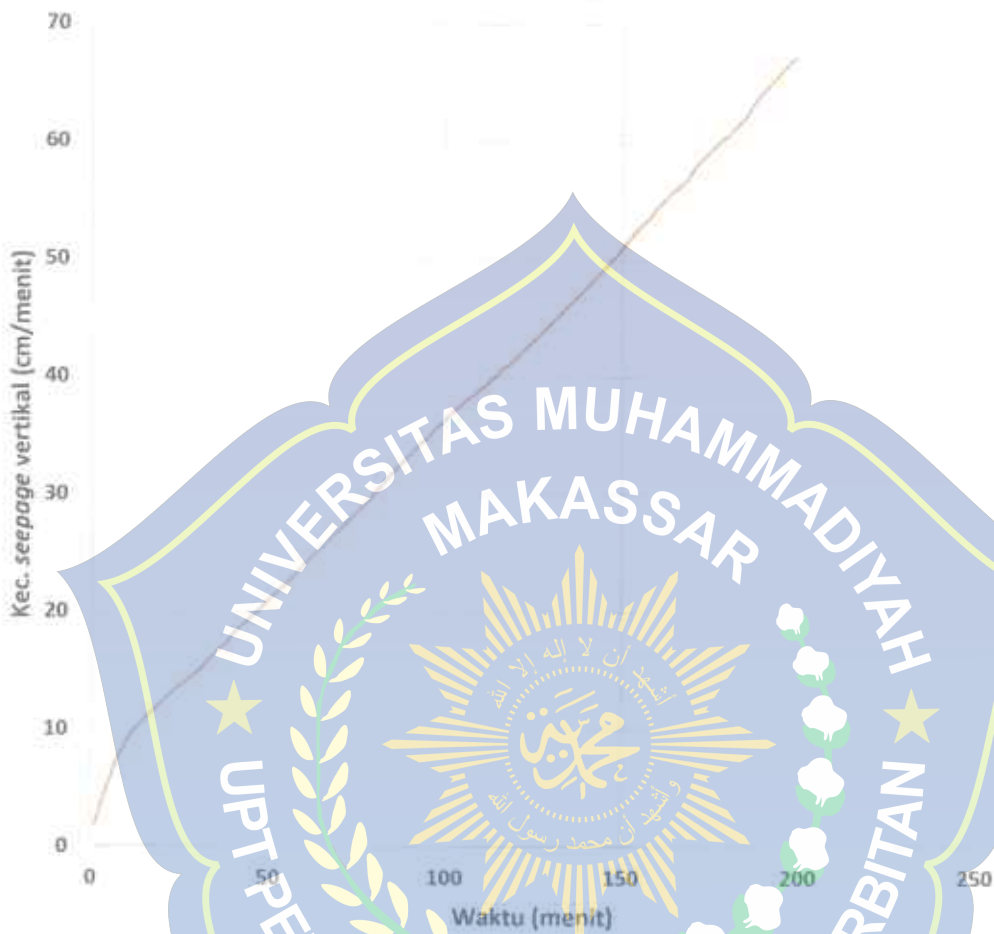
Gambar 37 Grafik Gabungan Kecepatan *Seepage* Vertikal I₁₅

3) Kecepatan *Seepage* Aliran Vertikal ($I_{25} = 496,48$ liter/jam)



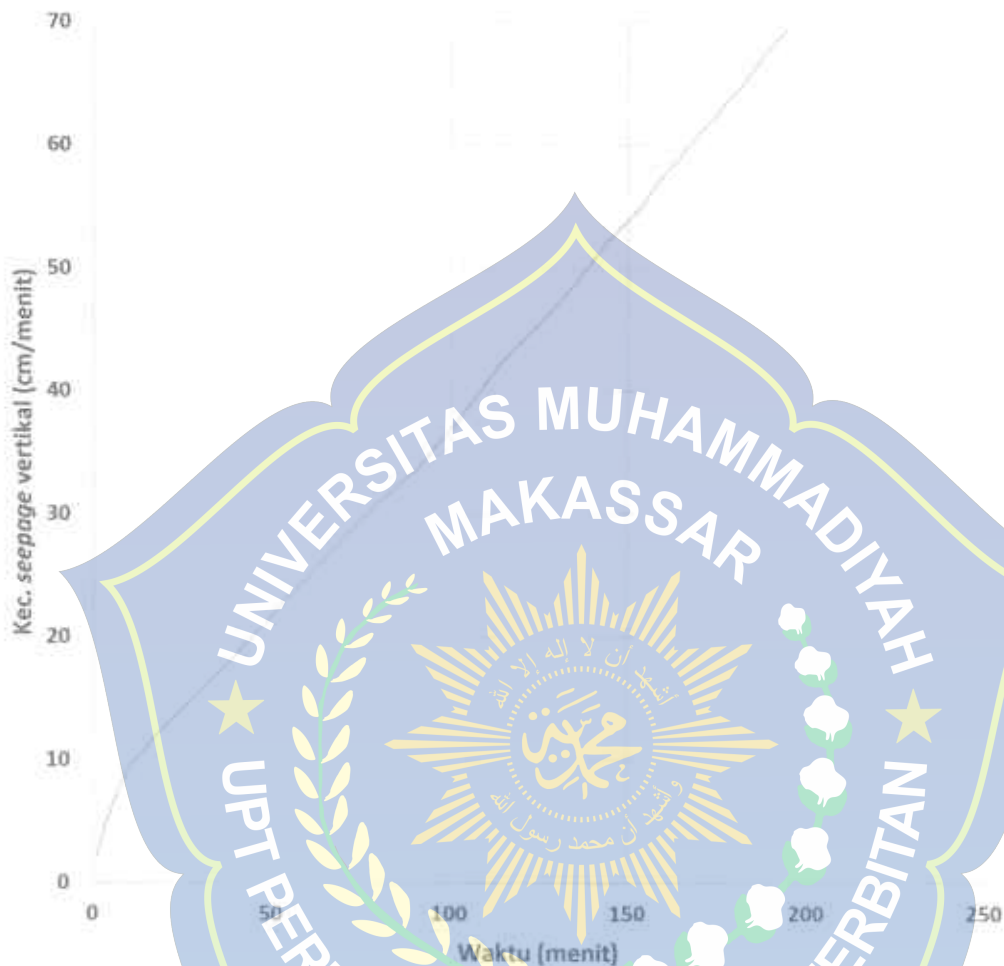
Gambar 38 Grafik Kec. *Seepage* Aliran Vertikal I_{25} (Lempung Lanau Berpasir)

Dari Gambar 38 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal sejauh 64,7 cm selama 198 menit.



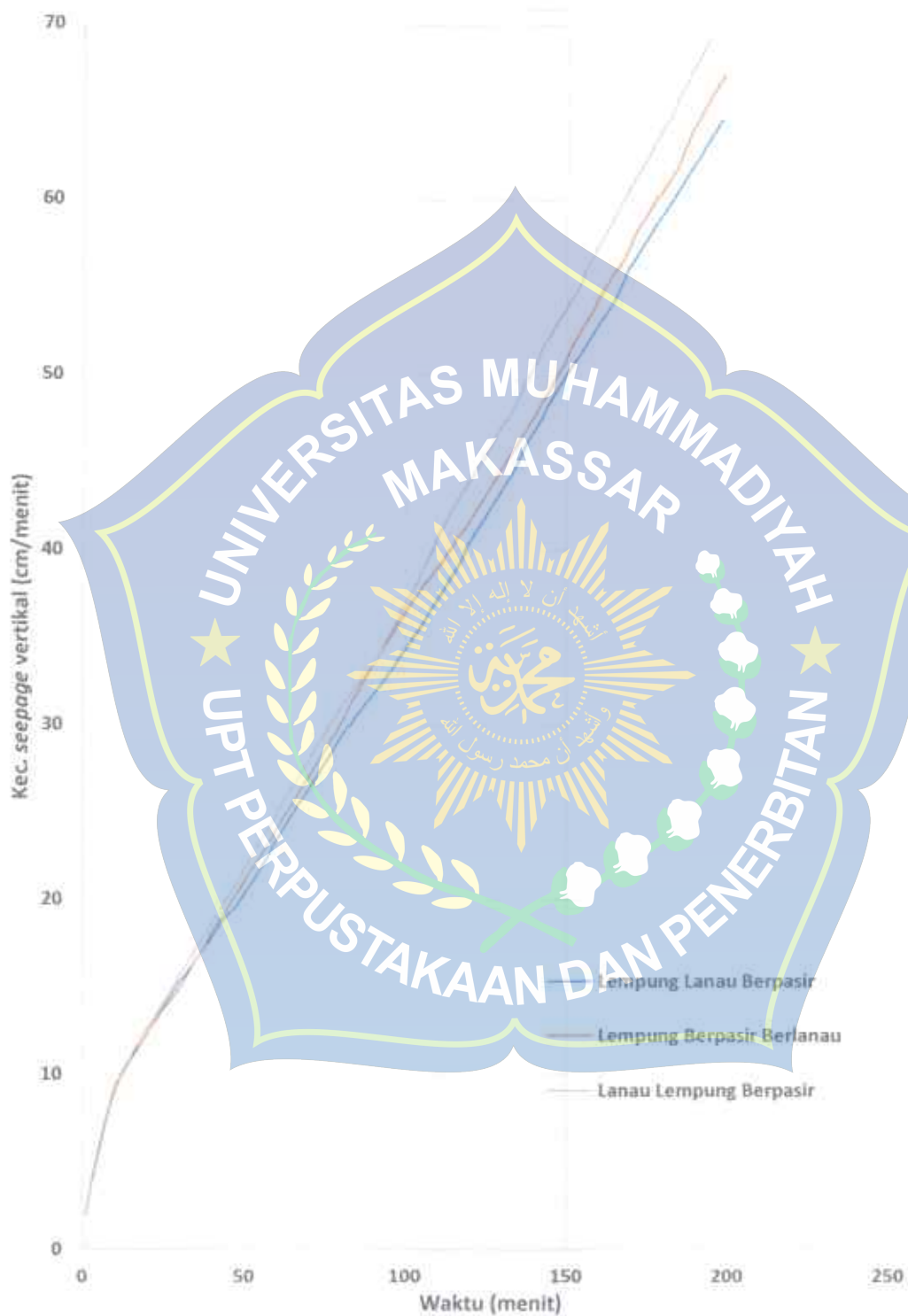
Gambar 39 Grafik Kec. Seepage Aliran Vertikal I_{15} (Lempung Berpasir Berlanau)

Dari Gambar 39 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lempung berpasir berlanau mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal rembesan sejauh 67,3 cm selama 199 menit.



Gambar 40 Grafik Kec. *Seepage* Aliran Vertikal 1₁₅ (Lanau Lempung Berpasir)

Dari Gambar 40 di atas dapat dinyatakan bahwa jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan *seepage* aliran vertikal sejauh 69,3 cm selama 195 menit.



Gambar 41 Grafik Gabungan Kecepatan *Seepage* Aliran Vertikal I_{25}

Dari Gambar grafik diatas dapat dinyatakan kecepatan rembesan aliran air dari 3 jenis tanah dan 3 variasi intensitas curah hujan mengalami kecepatan rembesan yang berbeda-beda. Untuk intensitas curah hujan I_5 mengalami rembesan aliran air yang relatif lambat, sedangkan untuk intensitas curah hujan I_{25} mengalami rembesan aliran air yang cepat. Untuk kecepatan *seepage* aliran vertikal pada jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami seepage yang lambat, sedangkan kecepatan seepage pada jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami seepage yang relatif cepat.

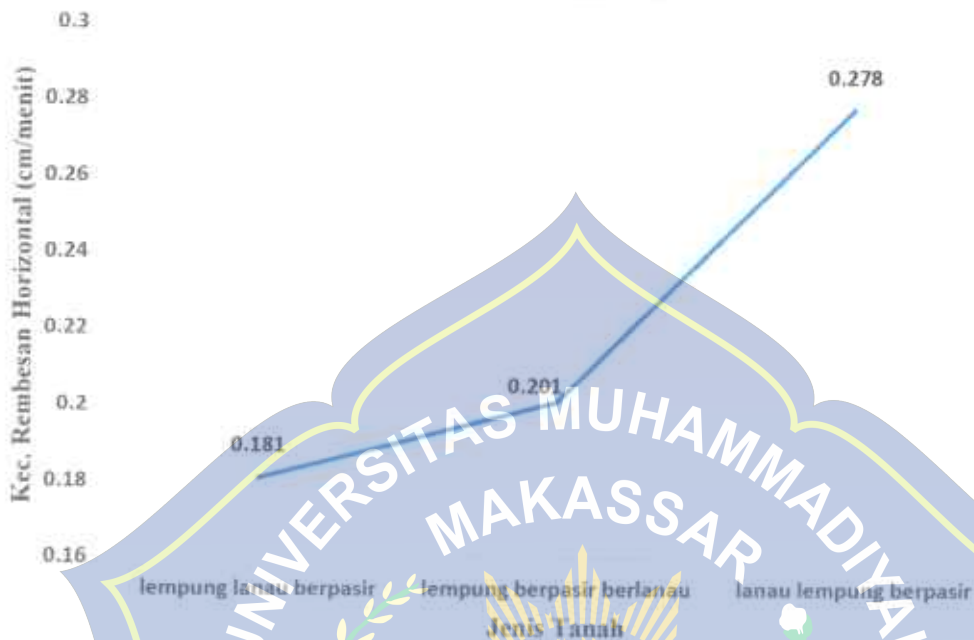
c. Kecepatan Rata-Rata Rembesan

1) Kecepatan Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal

Tabel 4 Tabel Kecepatan Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal

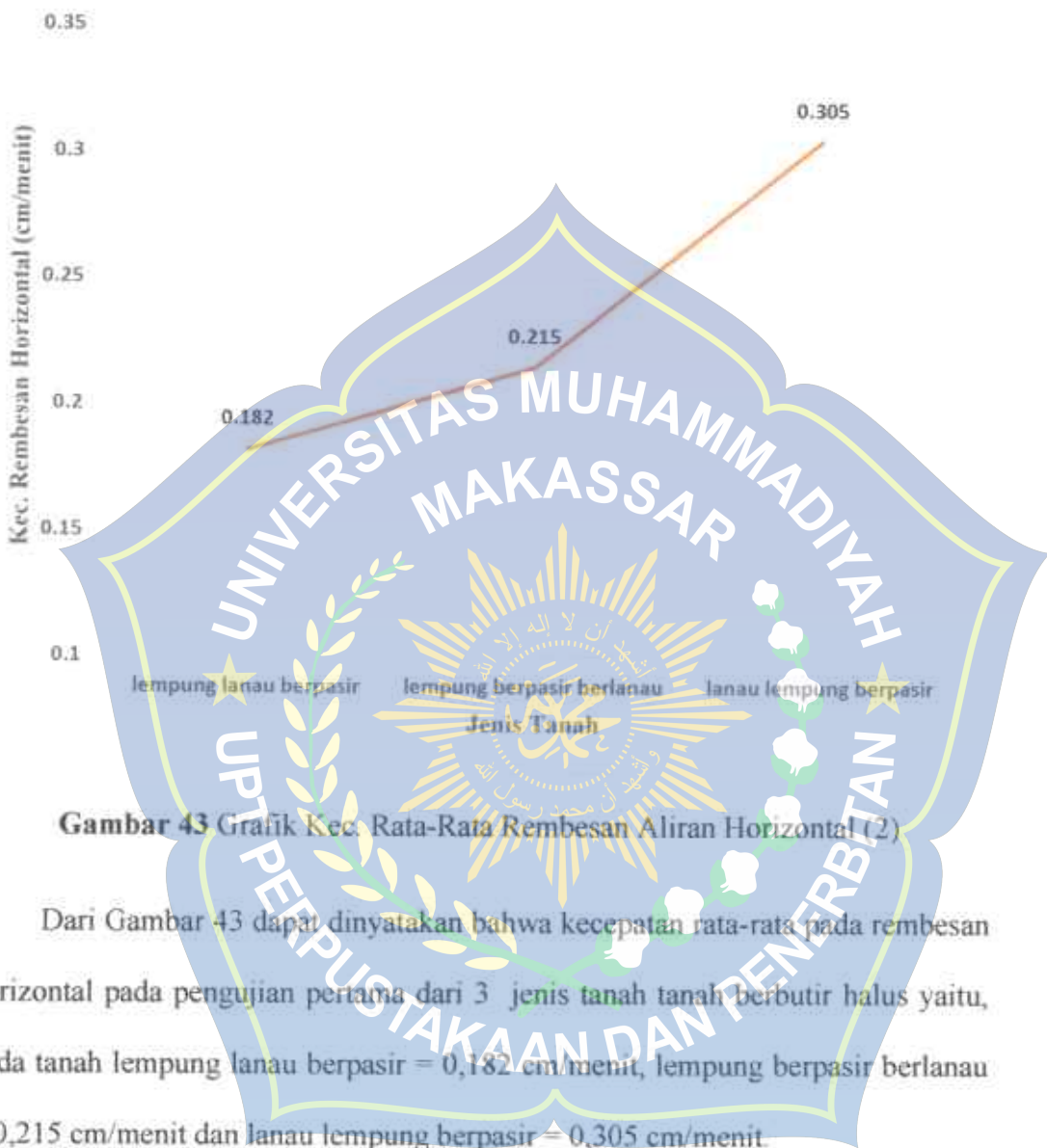
Jenis Tanah	Kec. Rata-Rata Rembesan Horizontal		
	1	2	3
lempung lanau berpasir	0,181	0,182	0,185
lempung berpasir berlanau	0,201	0,215	0,231
lanau lempung berpasir	0,278	0,305	0,347

Dari Tabel 4. Hasil Perhitungan kecepatan rata-rata rembesan horizontal dituangkan dalam grafik berikut :



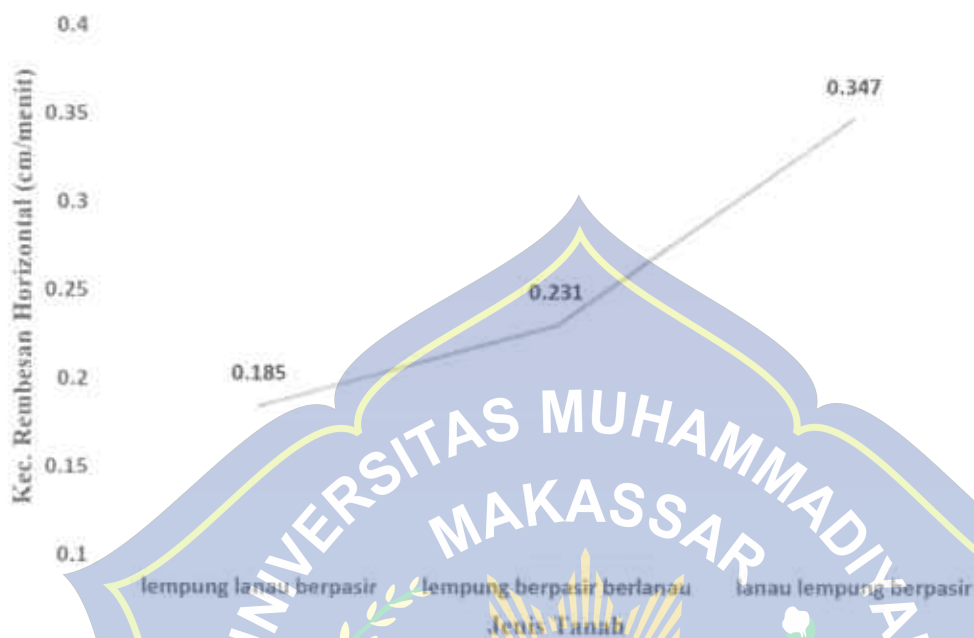
Gambar 42 Grafik Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal (1)

Dari Gambar 42 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata pada rembesan horizontal pada pengujian pertama dari 3 jenis tanah tanah berbutir halus yaitu, pada tanah lempung lanau berpasir = 0,181 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,201 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,278 cm/menit.



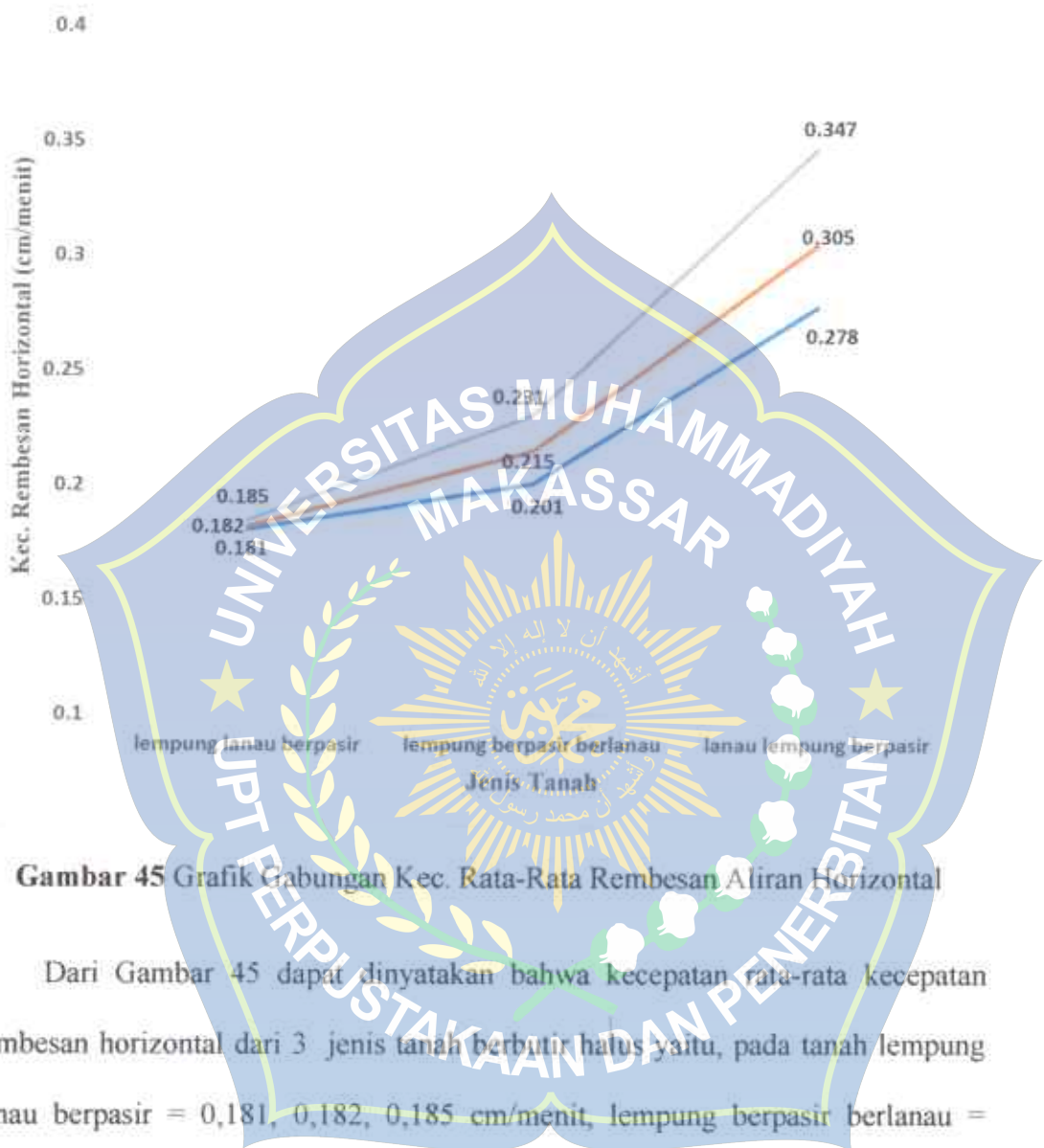
Gambar 43 Grafik Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal (2)

Dari Gambar 43 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata pada rembesan horizontal pada pengujian pertama dari 3 jenis tanah tanah berbutir halus yaitu, pada tanah lempung lanau berpasir = 0,182 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,215 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,305 cm/menit.



Gambar 44 Grafik Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal (3)

Dari Gambar 44 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata pada rembesan horizontal pada pengujian pertama dari 3 jenis tanah tanah berbutir halus yaitu, pada tanah lempung lanau berpasir = 0,185 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,231 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,347 cm/menit.



Gambar 45 Grafik Gabungan Kec. Rata-Rata Rembesan Aliran Horizontal

Dari Gambar 45 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata kecepatan rembesan horizontal dari 3 jenis tanah berbutir halus yaitu, pada tanah lempung lanau berpasir = 0,181, 0,182, 0,185 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,201, 0,215, 0,231 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,278, 0,305, 0,347 cm/menit.

2) Kecepatan Rata-Rata *Seepage* Aliran Vertikal (Infiltrasi)

Tabel 5 Kecepatan Rata-Rata *Seepage* Aliran Vertikal

Jenis Tanah	Kecepatan <i>Seepage</i> Vertikal (cm/menit)		
	I _s	I ₁₅	I ₂₅
lempung lanau berpasir	0,264	0,286	0,327
lempung berpasir berlanau	0,270	0,297	0,338
lanau lempung berpasir	0,274	0,310	0,356

Dari Tabel 5. Hasil Perhitungan kecepatan rata-rata *seepage* vertikal dituangkan dalam grafik berikut :



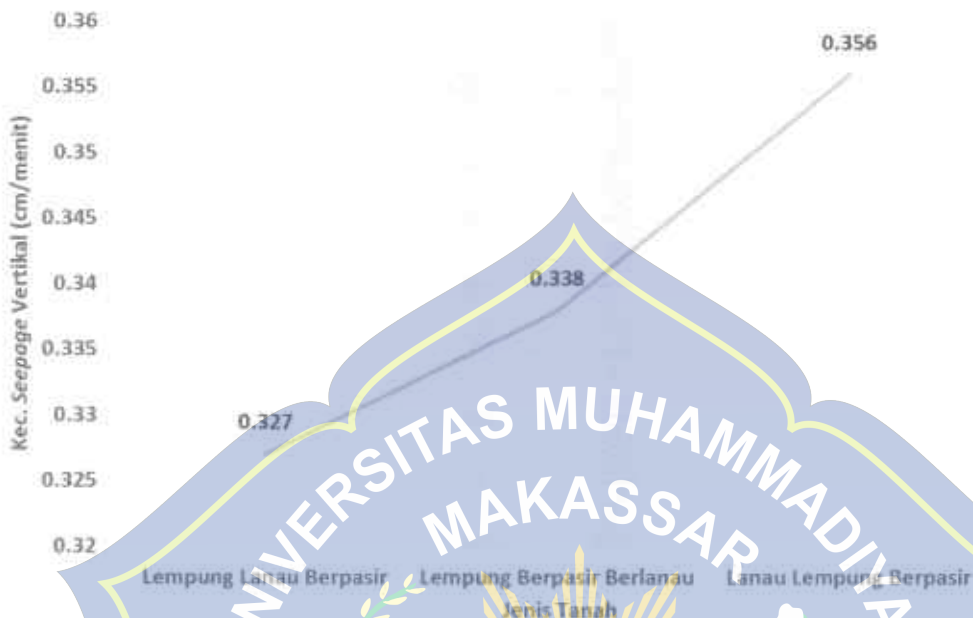
Gambar 46 Kecepatan Rata-Rata *Seepage* Aliran Vertikal (I_s)

Dari Gambar 46 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata pada *seepage* aliran vertikal pada intensitas curah hujan kala ulang 5 tahun (I_5) dari 3 jenis tanah tanah berbutir halus yaitu, pada tanah lempung lanau berpasir = 0,264 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,270 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,274 cm/menit.



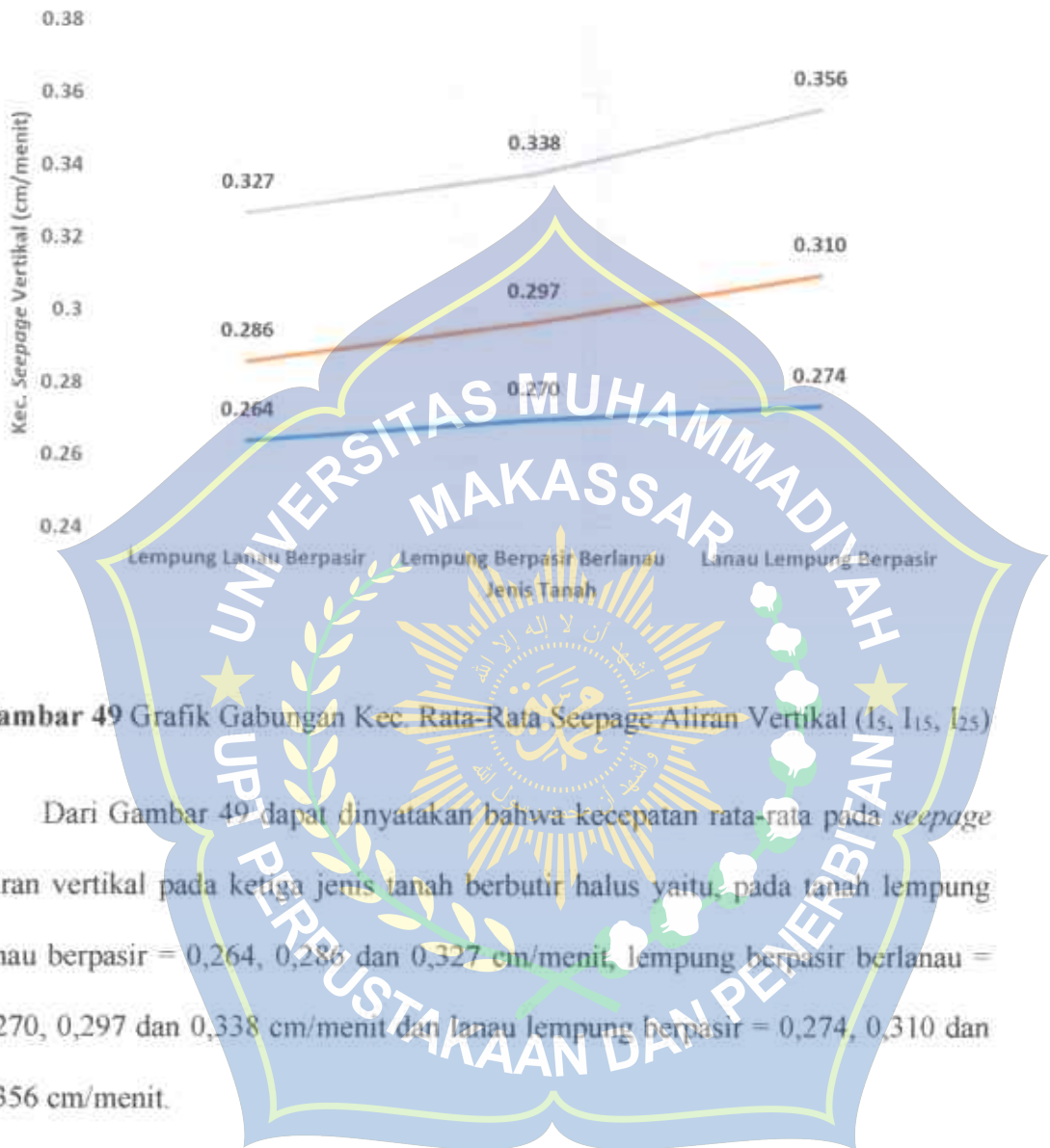
Gambar 47 Kecepatan Rata-Rata *Seepage* Aliran Vertikal (I_{15})

Dari Gambar 47 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata pada *seepage* aliran vertikal pada intensitas curah hujan kala ulang 15 tahun (I_{15}) dari 3 jenis tanah tanah berbutir halus yaitu, pada tanah lempung lanau berpasir = 0,286 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,297 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,310 cm/menit.



Gambar 48 Grafik Kecepatan Rata-Rata *Seepage* Aliran Vertikal (I_{25})

Dari Gambar 48 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata pada *seepage* aliran vertikal pada intensitas curah hujan kala ulang 25 tahun (I_{25}) dari 3 jenis tanah berbutir halus yaitu, pada tanah lempung lanau berpasir = 0,327 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,338 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,356 cm/menit.



Gambar 49 Grafik Gabungan Kec. Rata-Rata Seepage Aliran Vertikal (I_1 , I_{15} , I_{25})

Dari Gambar 49 dapat dinyatakan bahwa kecepatan rata-rata pada *seepage* aliran vertikal pada ketiga jenis tanah berbutir halus yaitu pada tanah lempung lanau berpasir = 0,264, 0,286 dan 0,327 cm/menit, lempung berpasir berlanau = 0,270, 0,297 dan 0,338 cm/menit dan lanau lempung berpasir = 0,274, 0,310 dan 0,356 cm/menit.

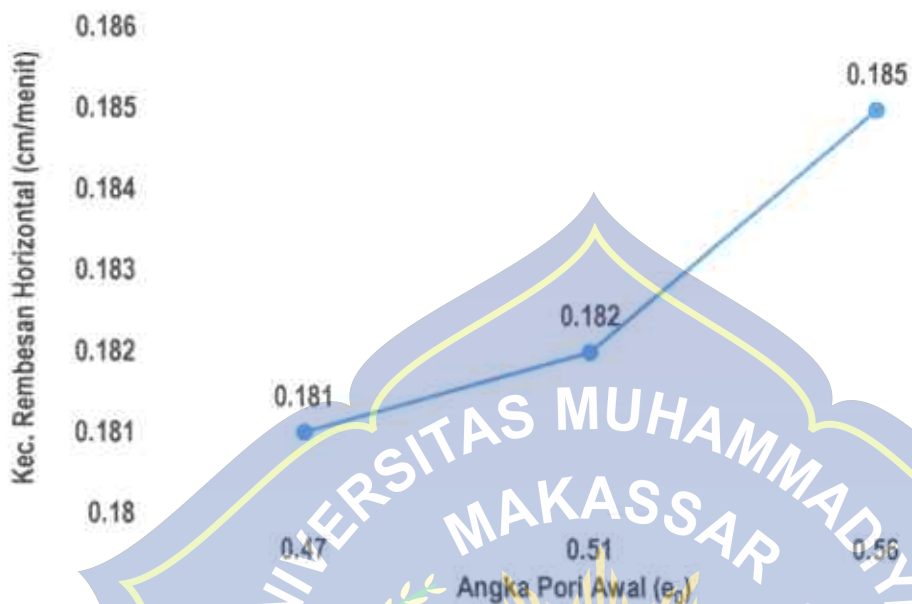
4. Hubungan Angka Pori Dengan Kecepatan Rembesan Horizontal

Dalam penelitian ini dilakukan 3 kali pembacaan kecepatan rembesan horizontal dan angka pori awal (e_0) untuk setiap jenis tanah. maka dapat dinyatakan dalam grafik dan tabel sebagai berikut :

1) **Tabel 6** Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori pada Tanah Lempung Lanau Berpasir

Angka Pori Awal (e_0)	Kec. Rembesan Horizontal (cm/menit)
0,47	0,181
0,51	0,182
0,56	0,185

Dari Tabel 6, dapat dilihat bahwa kecepatan *seepage* vertikal pada e_0 0,47 yaitu 0,181 cm/menit, pada e_0 0,51 yaitu 0,182 cm/menit dan pada e_0 0,56 yaitu 0,185 cm/menit. Untuk menguraikan hasil pengujian sesuai tabel diatas, maka perlu digambarkan grafik seperti yang tergambar dibawah



Gambar 50 Grafik Hub. Kec. Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori (e) Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir

Dari Gambar 50 dan Tabel 6 hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan aliran horizontal diatas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin halus butiran tanah maka semakin lambat pula kecepatan rembesannya dan semakin besar butirannya maka semakin cepai pula kecepatan rembesannya.

2) **Tabel 7** Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori

Pada Tanah Lempung Berpasir Berlanau

Angka Pori Awal (e_0)	Kec. Rembesan Horizontal (cm/menit)
0,52	0,201
0,56	0,215
0,61	0,231

Dari Tabel 7, dapat dilihat bahwa kecepatan *seepage* vertikal pada e_0 0,52 yaitu 0,201 cm/menit, pada e_0 0,56 yaitu 0,215 cm/menit dan pada e_0 0,61 yaitu 0,231 cm/menit. Untuk menguraikan hasil pengujian sesuai tabel diatas, maka perlu digambarkan grafik seperti yang tergambar dibawah



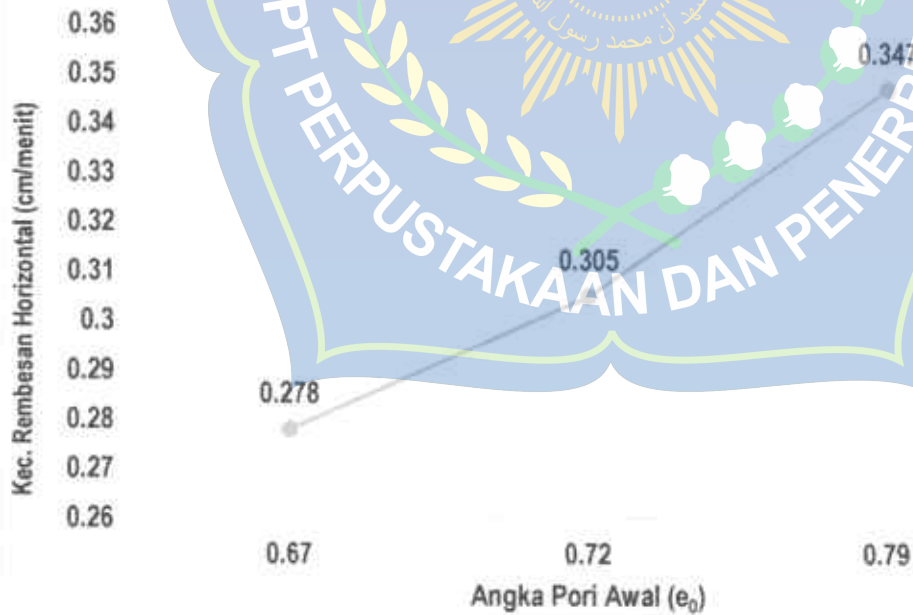
Gambar 51 Grafik Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori (e) pada Tanah Lempung Berpasir Berlanau

Dari Gambar 51 dan Tabel 7 hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan aliran horizontal diatas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin halus butiran tanah maka semakin lambat pula kecepatan rembesannya dan semakin besar butirannya maka semakin cepat pula kecepatan rembesannya.

3) **Tabel 8** Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori pada Tanah Lanau Lempung Berpasir

Angka Pori Awal (e_0)	Kec. Rembesan Horizontal (cm/menit)
0,67	0,278
0,72	0,305
0,79	0,347

Dari Tabel 8, dapat dilihat bahwa kecepatan *seepage* vertikal pada e_0 0,67 yaitu 0,278 cm/menit, pada e_0 0,72 yaitu 0,305 cm/menit dan pada e_0 0,79 yaitu 0,347 cm/menit. Untuk menguraikan hasil pengujian sesuai tabel diatas, maka perlu digambarkan grafik seperti yang tergambar dibawah



Gambar 52 Grafik Hub. Kecepatan Rembesan Aliran Horizontal Dengan Angka Pori Pada Tanah Lanau Lempung Berpasir

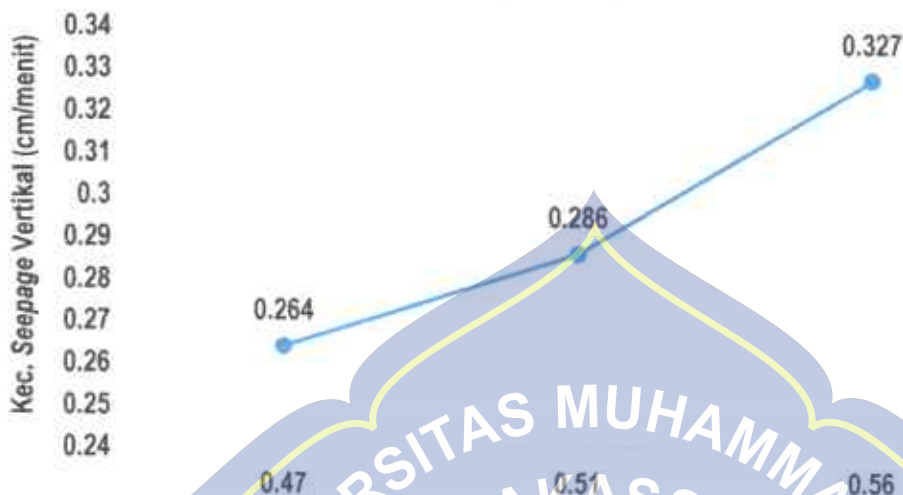
Dari Gambar 52 dan Tabel 8 hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan aliran horizontal diatas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin halus butiran tanah maka semakin lambat pula kecepatan rembesannya dan semakin besar butirannya maka semakin cepat pula kecepatan rembesannya.

5. Hubungan Angka Pori Dengan Kecepatan *Seepage* Aliran Vertikal

1) **Tabel 9** Hubungan Kecepatan *Seepage* Aliran Vertikal Dengan Angka Pori Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir

Angka Pori Awal (e_0)	Kec. <i>Seepage</i> Vertikal (cm/menit)
0,47	0,264
0,51	0,286
0,56	0,327

Dari Tabel 9, dapat dilihat bahwa kecepatan *seepage* vertikal pada e_0 0,47 yaitu 0,264 cm/menit, pada e_0 0,51 yaitu 0,286 cm/menit dan pada e_0 0,56 yaitu 0,327 cm/menit. Untuk menguraikan hasil pengujian sesuai tabel diatas, maka perlu digambarkan grafik seperti yang tergambar dibawah



Gambar 53 Grafik Hub. Kecepatan Seepage Vertikal Dengan Angka Pori (e) Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir

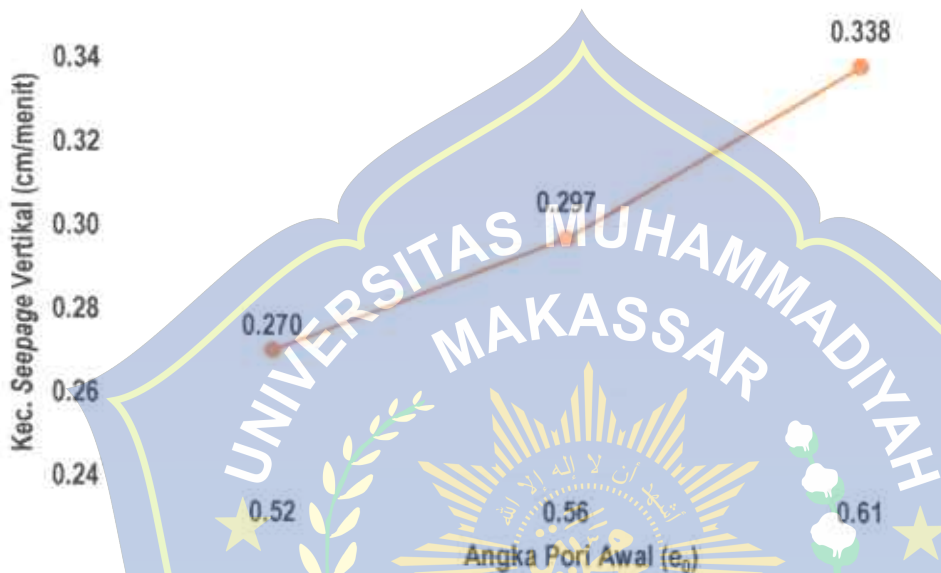
Dari Gambar 53 dan Tabel 9 hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan untuk aliran vertikal diatas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin halus butiran tanah maka semakin lambat pula kecepatan rembesannya dan semakin besar butirannya maka semakin cepat pula kecepatan rembesannya.

2) **Tabel 10** Hubungan Kecepatan Seepage Aliran Vertikal Dengan Angka Pori (e) pada tanah Lempung Berpasir Berlanau

Angka Pori Awal (e_0)	Kec. Seepage Vertikal (cm/menit)
0,52	0,270
0,56	0,297
0,61	0,338

Dari Tabel 10, dapat dilihat bahwa kecepatan seepage vertikal pada e_0 0,52 yaitu 0,270 cm/menit, pada e_0 0,56 yaitu 0,297 cm/menit dan pada e_0 0,61 yaitu

0,338 cm/menit. Untuk menguraikan hasil pengujian sesuai tabel diatas, maka perlu digambarkan grafik seperti yang tergambar dibawah



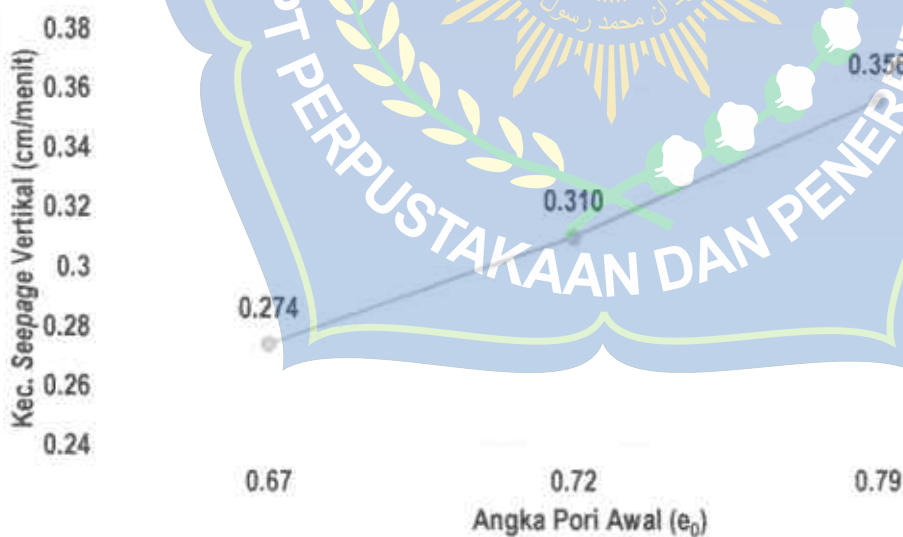
Gambar 54 Grafik Hub. Kecepatan Seepage Vertikal (i_{15}) Dengan Angka Pori (e) Pada Tanah Lempung Lanau Berpasir

Dari Gambar 54 dan Tabel 10 hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan untuk aliran vertikal diatas maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin halus butiran tanah maka semakin lambat pula kecepatan rembesannya dan semakin besar butirannya maka semakin cepat pula kecepatan rembesannya.

3) **Tabel 11** Hubungan Kecepatan Seepage Aliran Vertikal Dengan Angka Pori pada tanah lanau lempung berpasir

Angka Pori Awal (e_0)	Kec. Seepage Vertikal (cm/menit)
0,67	0,274
0,72	0,310
0,79	0,356

Dari Tabel 11, dapat dilihat bahwa kecepatan seepage vertikal pada e_0 0,67 yaitu 0,274 cm/menit, pada e_0 0,72 yaitu 0,310 cm/menit dan pada e_0 0,79 yaitu 0,356 cm/menit. Untuk menguraikan hasil pengujian sesuai tabel diatas, maka perlu digambarkan grafik seperti yang tergambar dibawah



Gambar 55 Grafik Hub. Kecepatan Seepage Vertikal Dengan Angka Pori (e) Pada Tanah Lanau Lempung Berpasir

Dari Gambar 55 dan Tabel 11 hubungan antara angka pori dengan kecepatan rembesan untuk aliran vertikal diatas maka dapat ditarik kesimpulan

bahwa semakin halus butiran tanah maka semakin lambat pula kecepatan rembesannya dan semakin besar butirannya maka semakin cepat pula kecepatan rembesannya.

B. Pembahasan

1. Hubungan Karakteristik Tanah Terhadap Kecepatan Rembesan

Tanah yang berbeda-beda menyebabkan air meresap dengan laju yang berbeda-beda. Setiap tanah memiliki daya resap yang berbeda, yang di ukur dalam milimeter per jam (mm/jam). Jenis tanah berpasir umumnya cenderung mempunyai laju infiltrasi tinggi, akan tetapi tanah liat sebaliknya, cenderung mempunyai laju infiltrasi rendah. Untuk satu jenis tanah yang sama dengan kepadatan yang berbeda mempunyai laju infiltrasi yang berbeda pula. Makin padat makin kecil laju infiltrasinya (Wilson, 1983).

Rembesan air dimaksudkan untuk mengukur kemampuan air melewati pori-pori tanah. Media tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis tanah berbutir halus, yaitu lempung lanau berpasir, lempung berpasir berlanau dan lanau lempung berpasir. Untuk *seepage* vertikal menggunakan 3 variasi intensitas curah hujan yaitu I_5 , I_{15} , I_{25} .

Berdasarkan hasil analisa kecepatan rembesan pada 3 jenis tanah menunjukkan bahwa kecepatan rembesan pada setiap jenis tanah berbeda-beda. Dimana tanah lempung lanau berpasir dan lempung berpasir berlanau mengalami kecepatan rembesan yang lama, sedangkan untuk jenis tanah lanau lempung berpasir mengalami kecepatan rembesan yang lebih cepat. Hal ini dikarenakan semakin kecil butiran tanah, maka kecepatan rembesannya akan semakin rendah

sebaliknya semakin besar ukuran butiran tanah maka kecepatan rembesannya semakin tinggi. Pada tanah lempung lanau berpasir, kecepatan rembesannya horizontalnya yaitu 0,181, 0,182, 0,185 cm/menit, sedangkan pada *seepage* vertikal yaitu 0,264, 0,286, 0,327 cm/menit. Pada tanah lempung berpasir berlanau, kecepatan rembesannya horizontalnya yaitu 0,201, 0,215 0,231 cm/menit, sedangkan pada *seepage* vertikal yaitu 0,270, 0,297, 0,338 cm/menit. Sedangkan untuk tanah lanau lempung berpasir, kecepatan rembesannya horizontalnya yaitu 0,278, 0,305, 0,347 cm/menit, sedangkan pada *seepage* vertikal yaitu 0,274, 0,310, 0,356 cm/menit.

2. Hubungan Angka Pori Dengan Kecepatan Rembesan

Angka pori adalah perbandingan volume rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s). Gradasi tanah dapat mempengaruhi secara langsung angka pori tanah, karena apabila butir-butir agregat mempunyai ukuran yang sama, maka volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butiran agregatnya bervariasi, akan terjadi volume pori yang kecil. Hal ini karena butiran yang kecil akan mengisi pori antara butiran yang lebih besar sehingga pori-porinya menjadi sedikit dengan kata lain kemampuannya tinggi (Umy,2015)

Ketika air hujan menyentuh permukaan tanah, sebagian atau seluruh air hujan tersebut masuk ke dalam tanah melalui pori-pori permukaan tanah. Proses masuknya air hujan ke dalam tanah disebabkan oleh tarikan gaya gravitasi dan gaya kapiler tanah. Laju air infiltrasi yang dipengaruhi gaya gravitasi dibatasi oleh besarnya diameter pori-pori tanah. Dibawah pengaruh gaya gravitasi, air hujan mengalir tegak lurus ke dalam tanah melalui profil tanah. Pada sisi lain, gaya

kapiler bersifat mengalirkan air tersebut tegak lurus ke atas, ke bawah, dan ke arah horizontal. Gaya kapiler tanah ini bekerja nyata pada tanah dengan pori-pori yang relatif kecil (USDA Resources Conservation Service, 1998)

Berdasarkan hasil pengamatan angka pori dan kecepatan rembesan pada 3 jenis tanah menunjukkan bahwa semakin besar angka pori maka semakin cepat rembesan aliran airnya, sebaliknya semakin kecil angka pori maka semakin lambat rembesan aliran airnya. Dalam penelitian ini tanah lempung lanau berpasir dan lempung berpasir berlanau memiliki angka pori yg lebih kecil sehingga kecepatan rembesannya menjadi lambat, sedangkan pada jenis tanah lanau lempung berpasir memiliki angka pori yang lebih besar sehingga kecepatan rembesannya lebih cepat.

Pada pengujian pertama tanah lempung lanau berpasir dengan dengan e_0 0,47, kecepatan rembesan arah horizontal yaitu 0,181 cm/menit sedangkan arah vertikal yaitu 0,264 cm/menit. Pada pengujian kedua tanah lempung lanau berpasir dengan e_0 0,51, kecepatan rembesan arah horizontal yaitu 0,182 cm/menit sedangkan untuk arah vertikal yaitu 0,286 cm/menit. Pada pengujian ketiga untuk lempung lanau berpasir dengan e_0 0,56, kecepatan rembesan arah horizontal yaitu 0,185 cm/menit sedangkan arah vertikal yaitu 0,327 cm/menit. Pada pengujian pertama tanah lempung berpasir berlanau dengan e_0 0,52, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,201 cm/menit sedangkan pada arah vertikal yaitu 0,270 cm/menit. Pada pengujian kedua tanah lempung berpasir berlanau dengan e_0 0,56, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,215 cm/menit, sedangkan untuk arah vertikal yaitu 0,297 cm/menit. Pada pengujian ketiga tanah lempung

berpasir berlanau dengan e_0 0,61, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,231 cm/menit, sedangkan untuk arah vertikal yaitu 0,338 cm/menit. Pada pengujian pertama tanah lanau lempung berpasir dengan e_0 0,67, kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,278 cm/menit, sedangkan arah vertikal 0,274 cm/menit. Pada pengujian kedua lanau lempung berpasir dengan e_0 0,72, kecepatan rembesan horizontal yaity 0,305 cm/menit, sedangkan arah vertikal yaitu 0,310 cm/menit. Pada pengujian ketiga dengan e_0 0,79 kecepatan rembesan horizontal yaitu 0,347 cm/menit sedangkan arah vertikal yaitu 0, 356 cm/menit. Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin kecil angka pori maka semakin lambat rembesan aliran airnya, begitupun sebaliknya.



BAB V

PENUTUP

A. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian model dan sesuai dengan pembahasan pada bagian sebelumnya, dapat di ambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Karakteristik tanah berbutir halus mempengaruhi kecepatan rembesan aliran dalam tanah, pada pengujian tiga jenis tanah dapat disimpulkan bahwa semakin besar gradasi tanah, maka semakin cepat pula rembesan aliran air di dalam lapisan tanah.
2. Nilai angka pori awal mempengaruhi kecepatan rembesan aliran air pada tanah berbutir halus, hal ini terlihat pada pengujian terhadap tiga jenis tanah dengan angka pori yang berbeda. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar angka pori awal (e_0) pada tanah maka semakin cepat rembesan aliran airnya..

B. SARAN

1. Dilakukan pengecekan atau perawatan secara berkala terhadap alat model, sehingga pada penelitian selanjutnya tidak ada kendala-kendala yang dapat menghambat penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Arsyad, S. 2008. Penyelamatan Air, Tanah dan Lingkungan. Yayasan Obor Indonesia dan Crestpent Press. Jakarta Bogor.
- Asdak, C. 2014. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Bowles, J. E. 1989. *Sifat-sifat fisis dan geoteknis tanah*. Erlangga. Jakarta.
- Bowles, J. E. Johan K. H. 1991. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika tanah)*. PT. Erlangga, Jakarta.
- Christady, Hary Hardiyatmo. 2012. *Tanah Longsor dan Erosi*. Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Das, Braja M. 1985. *Mekanika Tanah (Jilid 1) Terjemahan*. Jakarta: Erlangga
- Das, Braja, M., 1998. *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid-1*, Erlangga, Jakarta
- Hardiyatmo, Hary Christady (2002). *Mekanika Tanah 1*. Edisi-3. Gajah Mada University Press. Bulaksumur. Yogyakarta.
- Hardjowigeno, S. 1993. *Klasifikasi Tanah dan Pedogenesis*. Edisi Pertama. Akademika Pressindo. Jakarta.
- Hendarsin, Shirley L. *Perencanaan Teknik Jalan Raya*, Jurusan Teknik Sipil. Politeknik Negeri Bandung, Bandung. 2000.
- Luknanto, Djoko, 2000. *Aliran Air tanah*, Diklat Kuliah Aliran Air Tanah, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Panguriseng, Darwis. 2014. *Mekanika Tanah Dasar (1)*. Makassar: Pena Indis.
- Sumantri, Arif 2010. *Kesehatan Lingkungan*, Kencana Prenada Media Group, Jakarta.
- Suyono, S dan Takeda. 1980. Hidrologi untuk Pengairan. PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Wesli, Ir., 2008, *Drainase Perkotaan*, Yogya karta: Graha Ilmu.