

**PENGARUH PENAMBAHAN KOMPOSISI BAHAN KIMIA  
(FLY ASH, KAPUR DAN BIO-BAKTERI) TERHADAP  
PARAMETER FISIK, MEKANIK DAN DINAMIK AKIBAT  
SIKLUS PEMBASAHAN-PENGERINGAN PADA TANAH  
RESIDUAL DI DAERAH LERENG**

Nama Mahasiswa : Dewinta Maharani Prastiwi (3109100004)  
Agusti Nilasari (3109100041)  
Bebby Idhiani Nikita (3109100075)

Dosen Konsultasi : Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng  
Musta'in Arif, ST.,MT.

**ABSTRAK**

*Dalam penelitian ini, untuk meningkatkan daya dukung tanah, digunakan metode perbaikan tanah dengan cara kimiawi berupa penambahan bahan kimia yaitu kapur aktif atau Hydrated Lime ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), Fly Ash dan juga dengan proses mikrobiologi yang menggunakan Bio-bakteri. Kapur aktif atau yang sering disebut dengan gamping adalah senyawa kimia dengan rumus kimia  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dimana dapat berupa kristal tak berwarna atau bubuk putih yang dihasilkan melalui reaksi kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ) dengan air. Adapun penambahan bio-bakteri sebagai bahan stabilisasi yang ramah lingkungan yang berbentuk cairan. Produk ini terbuat dari material organik, protein denaturasi, biopolimer surfaktan dan organominerals yang telah difermentasi oleh mikroba menguntungkan. Produk ini mudah dalam pengaplikasian di lapangan tetapi pada suhu diatas  $30^\circ\text{C}$ , proses mikrobiologi akan non-aktif secara sementara.*

*Penelitian ini menggunakan uji Bender Elemen yang kemudian dilakukan di laboratorium pada kondisi awal. Pengujian sifat fisik yang meliputi pengujian gravimetri dan volumetri yang*

dilanjutkan dengan menentukan batas-batas Atterberg yang meliputi penentuan kadar air ( $W_c$ ), batas cair (liquid limit,  $LL$ ), batas plastis (plasticity limit,  $PL$ ) dan batas susut (shrinkage limit,  $SL$ ). Pengujian sifat mekanik yang meliputi penentuan kohesi ( $c'$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Pengujian sifat dinamik yang meliputi penentuan nilai modulus geser. Pengujian terakhir yaitu pengujian suction untuk penentuan nilai tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ).

Dari penelitian ini diperoleh berbagai perbedaan nilai-nilai parameter antara tanah natural dengan yang terstabilisasi oleh fly ash, kapur dan bio-bakteri. Secara umum berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, peningkatan terus terjadi pada parameter  $PI$  dengan campuran bio-bakteri sebagai bahan yang memberikan pengaruh paling besar. Sedangkan pada parameter  $PL$ , kapur memberikan pengaruh paling besar dan malah menurun dengan bahan fly ash maupun bio-bakteri. Secara keseluruhan, bahan campuran kapur meningkatkan parameter  $LL$ ,  $PL$  dan  $PI$  pada tanah residual.

**Kata kunci:** tanah residual, bio-bakteri, fly ash, kapur aktif, kemuning lor

***EFFECT OF CHEMICAL ADDITION COMPOSITION (FLY ASH, LIME AND BIO-BACTERIA) TOWARDS PHYSICAL, MECHANICAL AND DYNAMIC PARAMETERS RESULT IN WETTING-DRYING CYCLES IN THE RESIDUAL SOIL FOR THE SLOPE LAND***

Students' Names : Dewinta Maharani Prastiwi (3109100004)  
Agusti Nilasari (3109100041)  
Bebby Idhiani Nikita (3109100075)

Lecturer Consultant : Dr. Ir. Ria Asih Aryani Soemitro, M.Eng  
Musta'in Arif, ST.,MT.

***ABSTRACT***

*In this study, to increase the bearing capacity of the soil, soil improvement method is used with the addition of a chemical means like active lime or Hydrated Lime ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), Fly Ash and also with the microbiological process using Bio-bacteria. Active lime or limestone is often referred as a chemical compound with the chemical formula  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  which can be shaped like colorless crystals or white powder produced through the reaction of calcium oxide ( $\text{CaO}$ ) with water. The addition of bacteria as a bio-stabilization materials that are environmentally friendly liquid. This product is made from the organic material, protein denaturation and organominerals surfactant biopolymer that has been fermented by beneficial microbes. This product is easy in the application in the field but at temperatures above  $30^\circ\text{C}$ , the process of microbiological would be non-active temporarily.*

*This study uses Bender Element test conducted in the laboratory and then in the initial conditions. Testing of physical properties include gravimetric and volumetric testing, followed by determining Atterberg Limits which includes determining the water content ( $W_c$ ), liquid limit (liquid limit,  $LL$ ), plastic limit (plasticity*

*limit, PL) and shrinkage limit (shrinkage limit, SL). The test involves determining the mechanical properties of cohesion ( $c'$ ) and friction angle in the ( $\phi$ ). The test involves determining the dynamic properties of the shear modulus values. Final testing is to determine the value of suction pore negative voltage ( $-U_w$ ).*

*From this research could be obtained the differences between the parameter values with the natural soil stabilized by fly ash, lime and bio-bacteria. In general based on the results from this study, the increasing point keeps happening on the PI's parameter with the mix of bio-bacteria as a chemical addition that gives the most effect. Then on the PL's parameter, lime gives the biggest influence and fly ash or bio-bacteria does the opposite. Overall, chemical addition lime increases the LL, PL and PI's parameters of residual soils.*

***Kata kunci: residual soil, bio-bacteria, fly ash, active lime, kemuning lor***

## DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1.....	23
Rumus 2.2.....	23
Rumus 2.3.....	27
Rumus 2.4.....	28

**DAFTAR ISTILAH**

Istilah	Keterangan
<i>LL</i>	<i>Liquid Limit</i> , Batas Cair
<i>PL</i>	<i>Plastic Limit</i> , Batas Plastis
<i>SL</i>	<i>Shrinkage Limit</i> , Batas Susut
<i>PI</i>	<i>Plasticity Index</i> , Indeks Plastisitas
<i>UCS</i>	<i>Unconfined Compression Strength</i>
<i>UU</i>	<i>Unconsolidated Undrained</i>
<i>USCS</i>	<i>Unified Soil Classification System</i>
<i>AASHTO</i>	<i>American Association Of State Highway and Transporting Official</i>

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pengertian Tanah**

Tanah dibentuk oleh bebatuan dan organisme-organisme hidup dalam jangka waktu yang sangat lama sebagai respon terhadap pengaruh gaya-gaya alami yang bekerja dari dalam kerak bumi dan pengaruh-pengaruh dari gaya-gaya atmosfer. Pada bagian tanah yang jauh dari permukaan, massa tanah secara radikal mengalami perubahan akibat adanya gempa-gempa bumi yang menyebabkan retakan-retakan yang besar serta longsor di permukaan bumi dan juga gempa-gempa bumi tersebut juga menyebabkan letusan vulkanis yang membawa lava dan debu dari dalam inti bumi ke atas permukaan bumi serta membentuk lapisan tanah yang baru (Wesley, 1997).

Menurut Brand & Philipson (1985) tanah residual merupakan tanah yang dibentuk oleh pelapukan batuan di tempatnya, tetapi dengan kondisi batuan asli telah terlapuk dengan sempurna. Sowers (1985) mendefinisikan tanah residual sebagai produk pelapukan batu yang tertinggal di tempatnya akibat proses pembasahan-pengeringan batuan induk. Wesley (1997) juga menyatakan bahwa tanah residual adalah tanah yang terjadi dari pelapukan batu asal yang masih berada di atas batuan asalnya. Berdasarkan definisi-definisi tersebut maka dapat dibedakan antara tanah residual dan tanah sedimen dimana ada perbedaan pengendapan hasil pelapukan batuan.

Sifat fisik tanah yang utama menurut Das (1990) meliputi plastisitas indeks tanah untuk melihat konsistensi tanah, gravimetri dan tanah yang meliputi kadar air, derajat kejenuhan, spesifik gravity, angka pori dan berat volume tanah, serta distribusi ukuran butiran tanah. Sifat-sifat tanah residual dapat dianggap bergantung pada dua faktor utama, yaitu komposisi serta struktur. Komposisi

meliputi sifat-sifat butir sendiri, yaitu ukuran, bentuk, serta jenis mineral dan struktur meliputi keadaan asli tanah setempat meliputi kepadatan, gaya tarik menarik yang kuat antara butir (*interparticle bonds*) (Wesley, 1998). Wesley (2000) juga menyatakan bahwa tanah residual memiliki rentang sifat fisik dan sifat mekanik yang besar tergantung pada mineral pembentuk batuan induk, intensitas pelapukan, jumlah curah hujan dan suhu. Faktor-faktor ini juga dipengaruhi oleh letak geografis dan kondisi cuaca yang berlaku. Sifat fisik dan mekanik ini tidak hanya bervariasi dengan jarak (*spatial location*), tetapi juga dengan kedalaman.

Sifat mekanik tanah meliputi kuat geser, konsolidasi, pemampatan, dan permeabilitas tanah. Kuat geser tanah menggambarkan kekuatan geser tanah persatuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser. Mohr (1980) menyimpulkan sebuah teori tentang keruntuhan pada material yang menyatakan bahwa keruntuhan terjadi pada suatu material akibat kombinasi antara tegangan normal dan tegangan geser. Beberapa hasil penelitian sifat mekanik tanah residual telah dipublikasikan diantaranya oleh De Graft-Johnson dan Vargas (1983), hasil penelitian tanah residual berjenis Andisols dan Laterite dari Hawaii dan Kenya, diperoleh sudut geser dalam tanah residual mempunyai interval nilai antara 18 derajat sampai dengan 41 derajat, sedangkan kohesi tanah bervariasi dari 22 sampai 345 kPa. Aspek yang paling menarik dan penting dari hasil penelitian ini adalah bahwa kadar air memainkan peran penting terhadap karakteristik kuat geser tanah, dimana kohesi berkurang hampir 50% dan sudut geser berkurang dikisaran 30%. Sehingga jelas bahwa derajat kejenuhan tanah residual dapat memiliki efek yang signifikan terhadap segmentasi dari tanah residual. Marcelo (2000) menyatakan bahwa tegangan geser (*shear strength*) tanah residual tergantung dari kandungan mineral, distribusi ukuran butir, batuan asal dan derajat pelapukan tanah. Wesley (2005) mengatakan bahwa tanah residual merah dari Jawa Barat memiliki karakteristik yang khusus dimana tanah yang dibentuk kembali (*remoulded*) dan tanah *undisturbed* tidak memiliki pengaruh yang signifikan

terhadap perubahan properties teknik (*engineering*) tanah. Wesley (2005) juga menyatakan bahwa parameter kuat geser *undrained*, sensitivitas dan derajat kejenuhan pada tanah residual jenis Latosol dan Andosol tidak banyak variasi. Soemitro dan Muntaha (2005) mendapatkan dari penelitian tanah residual Gunung Kawi bahwa musim pengambilan sampel sangat mempengaruhi karakteristik tanah residual terutama kadar air, derajat kejenuhan dan tegangan air pori negatif. Rahardjo (2007) dari hasil penelitian tanah residual merah dari Jawa Barat menyimpulkan bahwa tanah residual mempunyai karakteristik yang berbeda-beda. Muntaha (2010) dari penelitian karakteristik tanah residual Jember menyatakan bahwa tanah permukaan sampai kedalaman 30 meter mendapatkan beberapa kondisi empiris yang diturunkan dari tanah sedimen (endapan) tidak berlaku untuk tanah residual Jember. Muntaha (2012) dari penelitian karakteristik tanah residual di Jember menyatakan bahwa perubahan kadar air, kadar lempung dan angka pori (kepadatan) berpengaruh terhadap modulus geser tanah. Perubahan kadar air dari kondisi kering udara ke kondisi jenuh, tanah yang mempunyai kadar lempung lebih dari 15% dan kepadatan yang lebih tinggi mempunyai rentang modulus geser yang lebih tinggi daripada tanah yang mempunyai kadar lempung kurang dari 15%. Penurunan kohesi dan sudut geser tanah akibat perubahan musin berulang, berdasarkan hasil penelitian rata-rata penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam adalah 10%.

## 2.2 Stabilisator Tanah Residual

### 2.2.1 Bio-Bakteri

Bio-Bakteri merupakan bahan stabilisasi tanah organik yang berasal dari hasil fermentasi menggunakan mikroba. Mikroba itu sendiri adalah organisme yang berukuran sangat kecil sehingga untuk mengamatinya diperlukan alat bantu mikroskop (Madigan, MT; Martinko JM, Dunlap PV, Clark DP).

Bio-Bakteri digunakan sebagai inovasi untuk memperbaiki tanah asli yang mempunyai daya dukung kurang, agar menambah kekuatan dari daya dukung tanah tersebut. Bio-Bakteri bersifat ramah lingkungan, tidak beracun dan tidak berbahaya bagi manusia dan makhluk hidup lainnya yang berhubungan dengan pengerjaan dalam stabilisasi tanah.

Bio-Bakteri merupakan salah satu inovasi bioteknologi berbentuk cairan yang dibuat dari bahan organik, protein, biopolimer yang difermentasikan oleh mikroba yang menguntungkan. Produk ini mudah dalam pengaplikasian di lapangan tetapi pada suhu diatas  $30^{\circ}\text{C}$ , proses mikrobiologi akan non-aktif secara sementara. Namun, belum dilakukan penelitian lebih lanjut tentang sifat kimia dari bahan ini.

### 2.2.2 Kapur Aktif (*Hydrated Lime*)

Oates (1998) mendefinisikan batu kapur sebagai batuan padat yang mengandung banyak kalsium karbonat, berwarna putih, abu-abu kuning tua, abu-abu kebiruan, jingga dan hitam. Berat jenisnya  $2,6 - 2,8 \text{ gr/cm}^3$  dan dalam keadaan murni berbentuk kristal kalsit, terdiri dari  $\text{CaCO}_3$  apabila diberi larutan asam (HCL), batu kapur akan larut dan mengeluarkan gas tak berbau yaitu  $\text{CO}_2$ , kalsinasi batu kapur pada suhu agak tinggi akan melepaskan gas  $\text{CO}_2$  dan sisanya disebut "*quicklime*" yang terdiri dari kalsium oksida (CaO). Apabila *quicklime* tersebut di beri air, maka akan terjadi penghidratan yang cepat menjadi kalsium hidroksida ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) atau disebut "*hydrated lime*" (Oates,1998).

Kapur aktif atau yang sering disebut dengan gamping adalah senyawa kimia dengan rumus kimia  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dimana dapat berupa kristal tak berwarna atau bubuk putih. Senyawa ini juga dapat dihasilkan dalam bentuk endapan melalui pencampuran larutan kalsium klorida ( $\text{CaCl}_2$ ) dengan larutan natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ).

Kalsium hidroksida juga dinamakan *slaked lime*, atau *hydrated lime* (kapur yang di airkan). Nama mineral  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  adalah *portlandite*, karena senyawa ini dihasilkan melalui pencampuran air dengan semen Portland. Suspensi partikel halus kalsium hidroksida dalam air disebut juga *milk of lime*. Larutan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  disebut air kapur dan merupakan basa dengan kekuatan sedang. Larutan tersebut bereaksi hebat dengan berbagai asam, dan bereaksi dengan banyak logam dengan adanya air. Larutan tersebut menjadi keruh bila dilewatkan karbon dioksida, karena mengendapnya kalsium karbonat. Pada  $512\text{ }^\circ\text{C}$ , kalsium hidroksida terurai menjadi kalsium oksida dan air (Halstead, Moore, *J.Chem.Soc* (1957) 3873).

### 2.2.3 Fly Ash

*Fly ash* merupakan satu bahan tambah (*additive*) yang cukup populer saat ini untuk digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton dan bahan untuk stabilisasi tanah ekspansif.

*Fly ash* adalah bahan limbah dari pembakaran batu bara, yang dikategorikan sebagai limbah B3 (*PP No. 85 tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*).

SNI 03-6414-2002 mendefinisikan pengertian *fly ash*/abu terbang :

“Abu terbang adalah limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar dan bersifat pozolanik”

ASTM C-618 mendefinisikan bahan yang bersifat pozolan sebagai:

***“A siliceous or siliceous and aluminous material which, in itself, possesses little or no cementitious value but which will, in finely divided form in the presence of moisture, react chemically with calcium hydroxide at ordinary temperature to form compounds possessing cementitious properties”***

Dengan demikian pengertian *fly ash* sebagai bahan pozolanik adalah bahan yang mengandung senyawa silika atau silika + alumina yang secara independen sangat sedikit atau tidak mempunyai kemampuan mengikat (*non-cementitious*) dalam bentuk yang sangat halus dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (dengan kelembaban yang cukup & dalam suhu kamar) untuk membentuk suatu bahan yang mempunyai sifat mengikat (*cementitious*).

*Fly ash* terutama terdiri atas senyawa *silicate glass* yang mengandung silika (Si), alumina (Al), ferrum (Fe), dan kalsium (Ca). Kandungan kecil senyawa lain yang terdapat dalam *fly ash* adalah magnesium (Mg), sulfur (S), sodium (Na), potassium (P), dan karbon (C). Kandungan bahan berbahaya yang ada dalam *fly ash* antara lain : arsenic, berilium, boron, cadmium, chromium, cobalt, lead, mangan, merkuri, selenium, strontium, thallium, vanadium, juga mengandung dioksin dan senyawa PAH (*polycyclic aromatic hydrocarbon*).

*Fly ash* umumnya terdiri dari partikel solid yang berbentuk bulat dan sebagian adalah partikel bulat berongga serta partikel bulat yang berisi partikel-partikel bulat lain yang lebih kecil. Ukuran partikel *fly ash* bervariasi mulai yang lebih kecil dari 1  $\mu\text{m}$  (mikrometer) sampai yang lebih besar dari 100  $\mu\text{m}$  (beberapa literatur menyebutkan ukuran 0,5  $\mu\text{m}$  - 300  $\mu\text{m}$ ), dengan sebagian besar partikel berukuran kurang dari 20  $\mu\text{m}$ . Umumnya hanya sekitar 10% sampai 30% ukuran partikel *fly ash* lebih besar dari 50  $\mu\text{m}$ .

Luas permukaan *fly ash* umumnya berkisar 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  - 500  $\text{m}^2/\text{kg}$  *fly ash*, dengan batas bawah 200  $\text{m}^2/\text{kg}$  dan batas atas 700  $\text{m}^2/\text{kg}$ . *Specific Gravity* (Gs) *fly ash* bervariasi, ada beberapa institusi yang memberikan rentang nilai *specific gravity*, rentang

terbesar yang diberikan dari institusi-institusi tersebut adalah antara 1,6 - 3,1. Pada umumnya *specific gravity* material *fly ash* berkisar antara 1,9 - 2,55. Massa jenis *fly ash* dalam kondisi *loose* berkisar 540 - 860 kg/m<sup>3</sup>, dan dalam kondisi dipadatkan dengan penggetaran dalam kemasan pada umumnya mempunyai massa jenis 1.120 - 1.500 kg/m<sup>3</sup>.

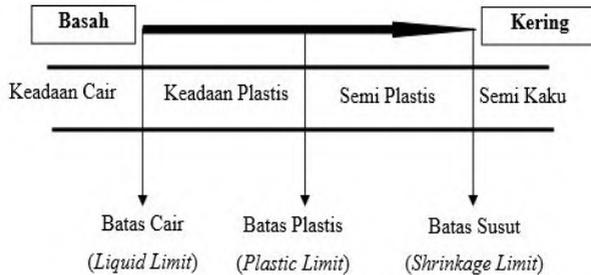
## 2.3 Klasifikasi Tanah

Sistem Klasifikasi Tanah adalah suatu sistem penggolongan yang sistematis dari jenis-jenis tanah yang mempunyai sifat-sifat yang sama ke dalam kelompok-kelompok dan sub kelompok berdasarkan pemakaiannya (Das,1995).

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 dimana 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 (Bowles, 1989).

### 2.3.1 Batas-batas Atterberg (*Atterberg Limits*)

Batas konsistensi tanah atau yang biasa disebut Atterberg Limit merupakan hal yang penting dan selalu dilakukan pada saat penyelidikan. Penyelidikan ini khusus dilakukan pada tanah berbutir halus dan dikarenakan batas-batas ini tidak merupakan sifat-sifat fisika yang jelas maka dipakai cara empiris untuk menentukannya. Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat teknik yang buruk yaitu kekuatannya rendah, sedangkan compressibilitinya tinggi sehingga sulit dalam hal pematatannya. Batas-batas konsistensi tanah dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.1 Batas-batas konsistensi tanah.  
(Braja M.Das, Noor Endah, Indrasurya B. Mochtar)

Kadar air dinyatakan dalam prosen, dimana terjadi transisi dari keadaan semi plastis ke semi kaku didefinisikan sebagai batas susut (*shrinkage limits, SL*). Kadar air dimana transisi dari keadaan plastis ke keadaan semi plastis terjadi dinamakan batas plastis (*plastic limits, PL*), dan dari keadaan cair ke keadaan plastis dinamakan batas cair (*liquid limits, LL*). Batas-batas ini yang dinamakan dengan Batas-batas Atterberg.

Panjang daerah kadar air tanah pada kondisi plastis disebut Indeks Plastis.  $IP = LL - PL$  = selisih batas cair dan batas plastis. Setiap tanah memiliki LL, PL, SL, IP yang tidak sama satu dengan yang lainnya (plastisitas masing-masing tanah tidak sama).

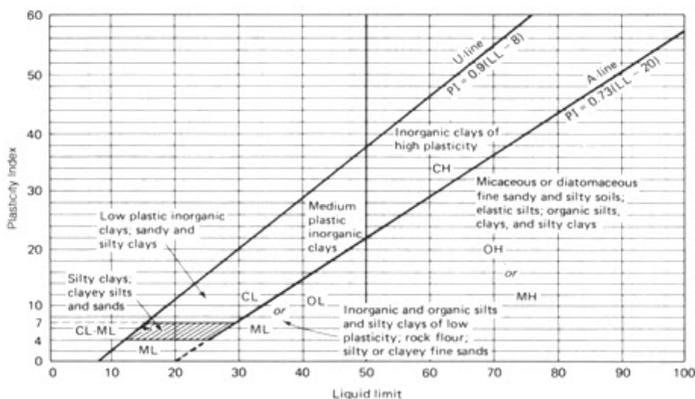
### 2.3.2 Sistem *Unified Soil Classification System (USCS)*

Klasifikasi tanah sistem ini diajukan pertama kali oleh *Casagrande* dan selanjutnya dikembangkan oleh *United State Bureau of Reclamation (USBR)* dan *United State Army Corps of Engineer (USACE)*. Kemudian *American Society for Testing and Materials (ASTM)* telah memakai USCS sebagai metode standar guna mengklasifikasikan tanah. Dalam bentuk yang sekarang, sistem ini banyak digunakan dalam berbagai pekerjaan geoteknik.

Dalam USCS, suatu tanah diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama yaitu :

1. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ( $F_{200} < 50$ ). Simbol kelompok diawali dengan G untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil (*gravelly soil*) atau S untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir (*sandy soil*).
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ( $F_{200} \geq 50$ ). Simbol kelompok diawali dengan M untuk lanau inorganik (*inorganic silt*), atau C untuk lempung inorganik (*inorganic clay*), atau O untuk lanau dan lempung organik. Simbol Pt digunakan untuk gambut (*peat*), dan tanah dengan kandungan organik tinggi.

Simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi adalah W untuk gradasi baik (*well graded*), P—gradasi buruk (*poorly graded*), L—plastisitas rendah (*low plasticity*) dan H—plastisitas tinggi (*high plasticity*).



Gambar 2.2 Grafik Plastisitas Casagrande untuk klasifikasi tanah USCS

(Sumber: Arthur Casagrande, 1959, NAVFAC DM7.01)

Garis pemisah pada grafik Casagrande dalam Gambar 2.2, garis A pada umumnya memisahkan material seperti tanah liat (*clay*) dari material tanah gambut (*silty*), dan organik dari non-

organik. Sedangkan Garis U menyatakan batas teratas untuk tanah pada umumnya.

Jika batas pengukuran tanah berada di kiri garis U, maka perlu dilakukan pengecekan ulang. (Holtz and Kovacs, 1981). Cara lainnya ditunjukkan dalam tabel 2.1 dan tabel 2.2.

Tabel 2.1(a) Klasifikasi tanah USCS Bagian 1

Major divisions		Group symbols	Typical names
Coarse-grained soils. More than 50% retained on No. 200 sieve	Gravels, 50% or more of coarse fraction retained on No.4 sieve	Clean Gravels	GW Well-graded gravels and gravel-sand mixtures, little or no fines
			GP Poorly graded gravels and gravel-sand mixtures, little or no fines
		Gravels with fines	GM Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures
			GC Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures
	Sands. More than 50% of coarse fraction passes No.4 sieve	Clean sands	SW Well-graded sands and gravelly sands, little or no fines
			SP Poorly graded sands and gravelly sands, little or no fines
		Sands with fines	SM Silty sands, sand-silt mixtures
			SC Clayey sands, sand-clay mixtures
Fine-grained soils 50% or more passes No. 200 sieve	Silts and clays Liquid limit 50% or less	ML Inorganic silts, very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands	
		CL Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays	
		OL Organic silts and organic silty clays of low plasticity	
	Silts and clays Liquid limit greater than 50%	MH Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sands or silts, elastic silts	
		CH Inorganic clays of high plasticity, fat clays	
		OH Organic clays of medium to high plasticity	
Highly organic soils	Pt Peat, muck, and other highly organic soils		

(Sumber: Krebs, R.D. & Walker, R.D., *Highway Materials*)

Tabel 2.1(b) Klasifikasi tanah USCS Bagian 2

Group symbols	Classification criteria		
GW	<i>Classification on basis of percentage of fines</i> GW, GP, SW, SP GM, GC, SM, SC Borderline classification requiring use of dual symbols  Less than 5% pass No. 200 sieve More than 12% pass No. 200 sieve 5% to 12% pass No. 200 sieve	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 4  $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Between 1 and 3	
GP		Not meeting both criteria for GW	
GM		Atterberg limits plot below A line or plasticity index less than 4	Atterberg limits plotting in hatched area are borderline classifications
GC		Atterberg limits plot above A line and plasticity index greater than 7	requiring use of dual symbols
SW		$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ Greater than 6  $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Between 1 and 3	
SP		Not meeting both criteria for SW	
SM		Atterberg limits plot below A line or plasticity index less than 4	Atterberg limits plotting in hatched area are borderline classifications
SC		Atterberg limits plot above A line and plasticity index greater than 7	requiring use of dual symbols
ML			
CL			
OL			
MH			
CH			
OH			
PT	Visual-manual identification, see ASTM D 2488		

(Sumber: Krebs, R.D. & Walker, R.D., *Highway Materials*)

### **2.3.3 Sistem *American Association Of State Highway and Transporting Official (AASHTO)***

Sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh Hoentogler dan Terzaghi, yang akhirnya diambil oleh *Bureau Of Public Roads*. Penglasifikasian sistem ini berdasarkan kriteria ukuran butir dan plastisitas. Maka dalam menglasifikasikan tanah membutuhkan pengujian analisis ukuran butiran, pengujian batas cair dan batas plastis.

Penglasifikasian yang digunakan dalam klasifikasi ini adalah ASTM D3282-09. Bentuk dari klasifikasi akan terlihat seperti pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Klasifikasi AASHTO

General Classification	Granular Materials (35 % or less passing No. 200)				Silt-Clay Materials (More than 35 % passing No. 200)						
	A-1		A-3	A-2		A-4	A-5	A-6	A-7		
Group classification	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5, A-7-6
Sieve analysis, % passing:	50 max	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 10 (2.00 mm)	30 max	50 max	51 min	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425 $\mu$ m)	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
No. 200 (75 $\mu$ m)	...	...	...	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Characteristics of fraction passing No. 40 (425 $\mu$ m):	...	...	...	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min <sup>A</sup>
Liquid limit	6 max	Stone Fragments, Gravel and Sand	N.P.	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Plasticity index	...	...	...	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Usual types of significant constituent materials	...	...	...	Silty or Clayey Gravel and Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand	Silty or Clayey Gravel and Sand	Silty Soils	Silty Soils	Clayey Soils	Clayey Soils
General rating as subgrade	Excellent to Good										
Fair to Poor											

<sup>A</sup> Plasticity index of A-7-5 subgroup is equal to or less than LL minus 30. Plasticity index of A-7-6 subgroup is greater than LL minus 30 (see Fig. 1).

(Sumber: ASTM D3282-09)

## 2.4 Pengujian Laboratorium

### 2.4.1 Pengujian *Unconfined Compression Strength*

Pada material tanah, parameter yang perlu ditinjau adalah kekuatan geser tanahnya. Pengetahuan mengenai kekuatan geser diperlukan untuk menyelesaikan masalah-masalah yang berkaitan dengan stabilisasi tanah.

Salah satu pengujian yang digunakan untuk mengetahui parameter kuat geser tanah adalah uji kuat tekan bebas. Yang dimaksud dengan kekuatan tekan bebas adalah besarnya beban aksial persatuan luas pada saat benda uji mengalami keruntuhan atau pada saat regangan aksial mencapai 20 %. Percobaan kuat tekan bebas di laboratorium dilakukan pada sampel tanah dalam keadaan asli maupun buatan (*remoulded*). Tekanan aksial yang terjadi pada tanah dapat ditulis dalam persamaan berikut :

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana :

P = beban yang bekerja

A = luas penampang tanah

Sedangkan untuk kuat geser tanahnya dapat dituliskan dalam persamaan berikut :

$$c_u = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

$c_u$  = kekuatan geser *undrained* (*undrained shear strength*)

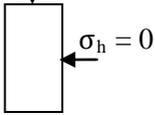
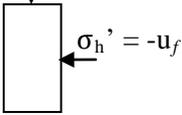
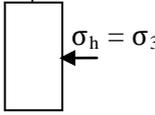
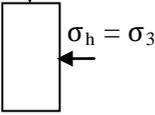
$\sigma_3 = 0$

$q_u$  = *unconfined compressive strength*

#### **2.4.2 Pengujian *Triaxial Unconsolidated Undrained***

Untuk mengetahui parameter geser suatu jenis tanah, percobaan yang umum dilakukan adalah uji triaksial. Uji triaksial dibedakan menjadi 3 (tiga) macam, bergantung dari kondisinya. Namun, yang digunakan pada penelitian ini hanyalah uji triaksial tak terkonsolidasi tak terdrainasi (*Unconsolidated Undrained Test*).

Pada kondisi ini, kondisi tanah yang dilakukan uji dapat berupa tanah jenuh ataupun tak jenuh. Pada kondisi ini *unconsolidated undrained* tanah tidak mengalami proses konsolidasi. Proses kompresi dilakukan di bawah tekanan sel tertentu, lalu digunakan selisih tegangan utama secara tiba-tiba tanpa adanya pengaliran dalam pori-pori tanah. Percepatan kompresi beban (*load rate*) yang diberikan tergolong cepat. Contoh uji kondisi *unconsolidated undrained* di lapangan adalah pembuatan pondasi dangkal yang sebelumnya dilakukan penggalian. Pada penggalian untuk pondasi dangkal yang sebelumnya dilakukan penggalian. Pada penggalian untuk pondasi dangkal, waktu yang dibutuhkan relatif cepat sehingga air dalam tanah tidak sempat mengalir. Nilai kuat geser tanah yang didapat merupakan nilai kuat geser tanah dari pembebanan yang dilakukan secara cepat tanpa ada proses konsolidasi seperti yang terlihat pada gambar 2.3.

Setelah saturasi	$\sigma_v = 0$  $\sigma_h = 0$	$u = u_f$ 	$\sigma_v' = -u_f$  $\sigma_h' = -u_f$
Pemberian $\sigma_3$ tanpa drainasi	$\sigma_v = \sigma_3$  $\sigma_h = \sigma_3$	$u = u_f +$ 	$\sigma_v' = -u_f + (1-B)$  $\sigma_h' = -u_f + (1-B) \sigma_3$
Proses kompresi tanpa drainasi	$\sigma_v = \sigma_3 + \Delta\sigma$  $\sigma_h = \sigma_3$	$u = u_f +$ $B\sigma_3 + A \Delta\sigma$ 	$\sigma_v' = -u_f + (1-B) \sigma_3$  $+ (1-A) \Delta\sigma$ $\sigma_h' = -u_f + (1-B) \sigma_3$ $- A \Delta\sigma$

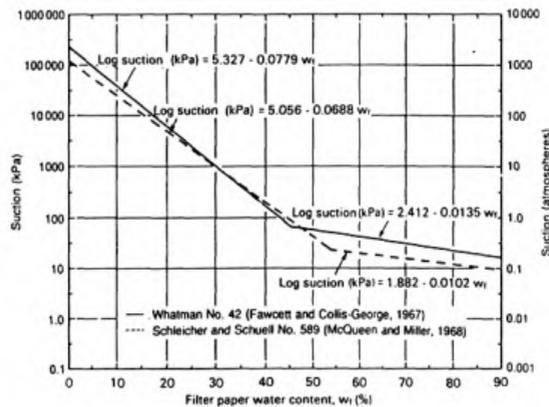
Gambar 2.3 Kondisi tegangan pada *Triaxial Unconsolidated Undrained Test* (Holtz & Kovacs, 1981)

### 2.4.3 Pengukuran *Suction* dengan Metode Kertas Filter

Metode pengukuran menggunakan kertas filter mampu mengukur *matric suction* dari beberapa kilopascal sampai ratusan ribu kilopascal. Prinsip dasar dari metode kertas filter adalah pada suatu hipotesis bahwa pada suatu titik keseimbangan tegangan air pori negatif atau *suction* di dalam suatu contoh tanah dan di dalam suatu kertas filter yang berada dalam kondisi kontak dengan contoh tanah tersebut adalah sama. Dalam prakteknya kertas filter kering ditempatkan pada contoh tanah yang ingin diketahui besarnya

*suction*, air akan mengalir dari kertas hingga tercapai kondisi keseimbangan. Selama waktu itu, maka contoh tanah harus dijaga agar kadar airnya konstan dan tidak terjadi perubahan temperatur sekeliling yang terlalu drastis. Setelah terjadi keseimbangan, maka kadar air pada kertas filter diukur (Fredlund dan Rahardjo, 1993).

Kertas filter yang digunakan dalam percobaan ini adalah kertas filter *Whatman No. 42*. Pengukuran *matric suction* menggunakan tiga kertas filter yang berhubungan langsung dengan sample tanah. Kertas filter yang di tengah digunakan untuk mengukur kadar air. Sedangkan kertas filter yang di luar digunakan untuk melindungi kertas filter yang di tengah dari partikel tanah. Dari grafik kalibrasi kertas filter bila kadar air kertas filter diketahui, maka akan dapat dicari harga *suction*. Grafik hubungan kadar air dengan *suction* ini dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Grafik kalibrasi *suction* untuk dua jenis kertas filter (Fredlund dan Rahardjo, 1993)

#### 2.4.4 Alat Uji Elemen Bender (*Bender Element Test*)

Elemen bender menggunakan prinsip kecepatan gelombang geser (*shear wave velocity*) untuk memperoleh modulus geser tanah ( $G$ ). Alat ini pertama kali dikembangkan oleh Jacques dan Pierre Curie pada tahun 1880. Kemudian dikembangkan oleh beberapa peneliti diantaranya Shirley dan Hampton (1978), Shirley (1978), serta Dyvik dan Madshus (1985). Cara bekerja alat ini cukup sederhana dan cukup baik untuk menghitung modulus geser tanah pada regangan rendah (*small strain shear modulus*) yakni melalui pengukuran kecepatan perambatan gelombang geser yang melalui simpul tanah. Dari penelitiannya Dyvik dan Mashus (1985), Karg et al. (2005) mendapatkan bahwa hasil  $G_{maks}$  yang sama antara Elemen Bender dan Kolom Resonansi. Tommi dan Adex (2011) meneliti modulus geser tanah lempung yang distabilisasi dengan abu terbang, hasil penelitian menunjukkan rentang nilai modulus yang hampir sama dengan penelitian Yusdiantoro (2001).

Pada awalnya alat Elemen Bender dibuat menyatu atau merupakan komponen tambahan dari alat Triaksial, akan tetapi sekarang Elemen Bender juga telah di buat sebagai suatu alat yang mandiri (lihat gambar 2.5). Ada beberapa keuntungan penggunaan tipe ini, diantaranya kemudahan pelaksanaan pengukuran, pengukuran rambatan gelombang secara horizontal dan vertikal. Akan tetapi tekanan keliling (*confining pressure*) pada tanah tidak dapat di modelkan dengan menggunakan alat ini.

Dengan alat Elemen Bender, kecepatan gelombang geser,  $V_s$  dapat dihitung. Persamaan 2.3 di gunakan untuk menghitung  $V_s$ :

$$V_s = \frac{L}{t} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana  $L$  adalah jarak efektif atau panjang sampel tanah, sedangkan  $t$  adalah waktu tempuh yang diperlukan oleh gelombang geser untuk merambat di tanah. Kemudian dengan menggunakan

persamaan 2.4 maka modulus geser maksimum ( $G_{\text{maks}}$ ) dapat ditentukan.

$$G_{\text{maks}} = \rho V^2 \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :

- $\rho$  : kerapatan massa tanah =  $\gamma/g$  ( $\text{gr} \cdot \text{dt}^2 / \text{cm}^4$ )  
 $V$  : kecepatan rambat gelombang geser ( $\text{cm}/\text{dt}$ )  
 $\gamma$  : berat volume tanah ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )



Gambar 2.5 Alat Elemen Bender yang digunakan untuk pengujian  
 (Sumber : Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil  
 ITS)

#### 2.4.5 Siklus Pembasahan-Pengeringan Berulang

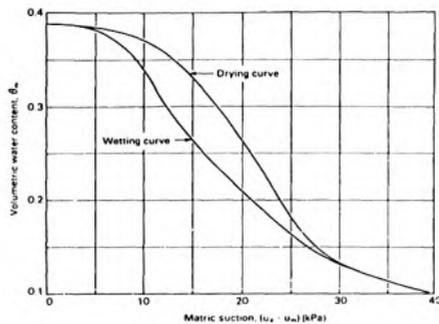
Secara alamiah, siklus pembasahan-pengeringan yang berulang secara terus-menerus akan mengakibatkan terjadinya perubahan pada kekuatan tanah. Maekawa dan Miyakita (1991) menyimpulkan bahwa jumlah pengulangan siklus pembasahan-pengeringan dan tingkat pengeringan mempengaruhi kekuatan geser tanah. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa jumlah siklus pembasahan-pengeringan mempengaruhi parameter tanah.

Maekawa dan Miyata (1991) menyatakan adanya hubungan erat antara perubahan musim yang ekuivalen dengan perubahan kadar air dalam tanah dengan variasi tegangan air pori negatif (*suction*) yang terjadi. Terlihat bahwa nilai tegangan air pori negatif akan turun selama musim hujan dan meningkat setelah musim hujan berlalu. Hal ini membuktikan bahwa tanah akan selalu mengalami perubahan tegangan air pori negatif yang disebabkan oleh proses pengeringan dan pembasahan.

Panjaitan dan Soemitro (2000), Soemitro dan Saing (2001) menunjukkan bahwa siklus pembasahan – pengeringan mengakibatkan perubahan volume tanah, perubahan tegangan air pori negatif dan perubahan kuat tekan tanah. Yusdiantoro (2001) dan Asmaranto (2001) melakukan penelitian siklus pembasahan – pengeringan pada tanah lempung ekspansif yang distabilisasi seperti penelitian – penelitian sebelumnya. Yusdiantoro (2001) juga menyimpulkan siklus pembasahan – pengeringan mempengaruhi indeks properties tanah dan setelah siklus ke empat perubahan properties tanah cenderung konstan. Paulus (2007) menyatakan dari hasil penelitian penambahan kapur pada tanah lempung bahwa penerapan siklus berulang pada benda uji tanah lempung yang distabilisasi dengan kapur dan dicampur dengan garam mempunyai angka pori yang lebih kecil dari tanah lempung murni dan lempung yang distabilisasi kapur yang dicampur dengan air tawar.

Proses pengeringan (*drying*) adalah suatu kondisi dimana kadar air didalam suatu pori-pori tanah mengalami penurunan. Sebaliknya, proses pembasahan (*wetting*) adalah suatu kondisi dimana terjadi peningkatan kadar air didalam pori-pori suatu massa tanah. Gambar 2.3 menunjukkan adanya hubungan antara nilai tegangan air pori negatif (*suction*) dan kadar air pada suatu tanah yang membentuk suatu polahysteresis dan merupakan bentuk khas dari kurva pengeringan dan pembasahan (*drying-wetting curve*) suatu tanah. Kurva yang tidak berhimpit tersebut disebabkan karena tanah bukan material yang bersifat elastis. Dari gambar ini dapat diambil suatu kesimpulan bahwa proses pengeringan akan

menyebabkan meningkatnya air pori negatif dan sebaliknya proses pembasahan dapat menyebabkan mengecilnya tegangan air pori negatif. Proses pembasahan dilakukan dengan meneteskan sampel tanah setetes demi setetes dalam rentang waktu tiga puluh menit sampai tanah mencapai kadar air yang diinginkan. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar air dapat meresap ke dalam tanah. Proses pembasahan dilakukan dengan mengangin-anginkan sampel tanah sampai tanah mencapai kadar air yang diinginkan (Fredlund dan Rahardjo, 1993).



Gambar 2.6 Bentuk khas kurva pengeringan dan pembasahan (Fredlund dan Rahardjo, 1993).

## 2.5 Penelitian Terdahulu

### 2.5.1 Penelitian Mohammad Muntaha (2012) “Karakteristik Statik dan Dinamik Tanah Residual Tidak Terganggu (Undisturbed Residual Soils) Akibat Pengaruh Siklus Pembasahan – Pengeringan”

Penelitian lapangan di 3 lokasi (Malang, Mojokerto dan Jember) dimulai dengan pengambilan benda uji tanah permukaan ( $\pm 0,5$  m) lalu dilakukan borlog sampai kedalaman 5 m kemudian dilakukan uji sondir. Setelah dilakukan uji sondir dapat dilakukan pengujian di laboratorium. Pengujian di laboratorium dimulai dengan

kalibrasi alat uji Elemen Bender. Untuk kondisi awal dilakukan pengujian sifat fisik (gravimetri-volumetri, batas-batas Atterberg, ayakan dan hydrometer), pengujian sifat mekanik (kohesi dan sudut geser dalam), pengujian sifat dinamik (modulus geser), pengujian jenis mineralogy (X-RD dan petrografi), pengujian mikropori (SEM) dan pengujian *suction*. Setelah dilakukan pengujian di laboratorium untuk kondisi awal maka benda uji di lakukan pengondisian kadar air dan siklus pembasahan – pengeringan. Proses pembasahan – pengeringan benda uji hanya dilakukan siklus 1 x, siklus 2 x, siklus 3 x, siklus 4 x dan siklus 6 x. Pada masing-masing akhir siklus dilakukan pengujian sifat fisik, pengujian sifat mekanik, pengujian sifat dinamik dan pengujian *suction*. Lalu dilakukan pengolahan data hasil uji laboratorium (kadar air, berat volume, berat spesifik, angka pori, kohesi dan sudut geser dalam, modulus geser, tegangan air pori negatif). Setelah mendapatkan hasil pengolahan data dari hasil uji laboratorium dilakukan pembuatan kurva hubungan antar parameter tanah (kadar air – angka pori, angka pori – kohesi, *suction* – kohesi, modulus geser – angka pori). Lalu dilakukan analisis perilaku statik dan dinamik tanah residual serta penyusunan laporan serta didapatkan kesimpulan dan saran.

Berdasarkan hasil tes ayakan dan hydrometer, tes batas-batas Atterberg, tes SEM pada tanah yang telah mengalami siklus pembasahan-pengeringan. Pengerian berulang dapat disimpulkan bahwa memang benar terjadi erosi (*wash out*) partikel halus ke dasar sampel tanah. Siklus pembasahan-pengeringan menyebabkan tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) turun pada akhir siklus keenam, tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) tanah residual dengan kandungan lempung di atas 15% menurun sekitar 10% di tanah yang mempunyai kandungan lempung dibawah 15% menurun

sekitar 20%. Perubahan kadar air berpengaruh terhadap kohesi dan sudut geser dalam tanah. Dari kondisi kering udara ke kondisi jenuh, rentang perubahan kohesi ketiga tanah residual hampir dua kali; tanah residual Malang kohesi berubah dari 12 kPa-15 kPa (perubahan  $\pm 25\%$ ), tanah residual Mojokerto dari 14 kPa-29 kPa (perubahan  $\pm 107\%$ ), tanah residual Jember berubah dari 12 kPa-27 kPa (perubahan  $\pm 125\%$ ). Sudut geser dalam tanah residual Malang berubah  $12^\circ$ - $19^\circ$  (perubahan  $\pm 58\%$ ), tanah residual Mojokerto dari  $22^\circ$ - $52^\circ$  (perubahan  $\pm 136\%$ ) dan tanah residual Jember dari  $18^\circ$ - $45^\circ$  (perubahan  $\pm 150\%$ ). Siklus pembasahan-pengeringan mempengaruhi angka pori ( $e$ ) tanah siklus pembasahan-pengeringan mengakibatkan perubahan struktur atau deformasi ruang pori tanah sehingga mempengaruhi angka pori ( $e$ ) tanah residual dengan kandungan lempung di atas 15% mengalami sekitar 5%, tanah residual dengan kandungan kadar lempung dibawah 15% mengalami penurunan sekitar 10%. Perubahan kadar air, kadar lempung dan angka pori (kepadatan) berpengaruh terhadap modulus geser tanah. Siklus pembasahan-pengeringan menyebabkan peningkatan modulus geser ( $G_{UBE}$ ) tanah. Modulus geser tanah residual dengan kandungan lempung diatas 15% meningkat sebesar 5%.

### **2.5.2 Penelitian Tommy dan Rano Adex (2011) “Pengaruh Siklus Pembasahan - Pengeringan Berulang terhadap Properti Dinamik Tanah Lempung Ekspansif Tidak Jenuh yang Distabilisasi dengan Fly Ash menggunakan Alat Uji Elemen Bender”**

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari lokasi di Perumahan Citra Raya (Surabaya Barat). Penelitian dimulai dengan pengujian sifat fisik tanah, dimana pengujian tersebut terdiri dari indeks konsistensi tanah, distribusi ukuran butiran dan analisa hidrometer. Lalu

dilanjutkan dengan pengujian berat jenis kemudian pencampuran dengan bahan kimia *bentonite* dan *fly ash* lalu diperam selama 2 hari. Setelah dilakukan pemeraman dilanjutkan pengujian pemadatan (Proctor Standar) untuk memperoleh kepadatan kering maksimum dan kadar air optimum yang kemudian dilakukan perhitungan nilai  $\gamma'_d$  maks dan  $w_{opt}$ . Setelah diperoleh nilai  $\gamma'_d$  maks dan  $w_{opt}$  dilakukan pengujian dengan kertas filter dan tanpa kertas filter lalu dilakukan pemeraman benda uji hingga dicapai kesetimbangan benda uji seperti yang diinginkan. Lalu dilakukan proses pengeringan-pembasahan. Pada proses pengeringan, benda uji dengan kondisi awal (initial condition) dijenuhkan (inundation) hingga mencapai kadar air 100%, kemudian dikeringkan dengan tahapan pengurangan air yaitu 25%( $w_f - w_i$ ), 50%( $w_f - w_i$ ), 75%( $w_f - w_i$ ) hingga akhirnya sama atau mendekati kadar air awalnya. Sedangkan pada proses pembasahan, benda uji dengan kondisi inisial dijenuhkan secara bertahap dengan penambahan air 25%( $w_f - w_i$ ), 50%( $w_f - w_i$ ), 75%( $w_f - w_i$ ), hingga mencapai jenuh 100% (*inundation*). Penelitian ini menggunakan siklus pengeringan-pembasahan 1x, 2x, 4x dan 6x. Perlakuan tersebut diterapkan pada benda uji yang digunakan untuk pengujian Elemen Bender. Pengujian Elemen Bender menggunakan prinsip kecepatan gelombang geser (*shear wave velocity*) untuk memperoleh modulus geser tanah (G). Sedangkan pengujian menggunakan kertas filter untuk mengukur tekanan air pori negatif, dipasang dengan 2 (dua) buah kertas filter, berukuran 1,5 x 1,5cm<sup>2</sup>. Pada masing-masing kertas filter tipe *Whatman* tersebut dilapisi dengan kertas filter biasa pada lapisan atas dan bawahnya dengan tujuan untuk menghindari supaya tidak rusak atau kotor. Setelah diperoleh modulus geser tanah dan tekanan air pori negatif dilakukan analisis data dan interpretasi kemudian dapat diperoleh kesimpulan dari penelitian ini.

Hubungan antara angka pori, kadar air, derajat kejenuhan, kepadatan kering, tegangan air pori negatif dan Modulus Geser dari hasil pengujian Proctor Standard dan siklus pengeringan-pembasahan terhadap tanah lempung natural dan tanah lempung natural + 15 % *fly ash* tampak bahwa untuk kadar air yang sama, benda uji natural memiliki angka pori yang lebih kecil dibanding benda uji yang distabilisasi. Pada kondisi ini benda uji natural yang memiliki angka pori lebih besar daripada benda uji yang distabilisasi dengan 15% *fly ash*. Akan tetapi pada saat optimum benda uji natural memiliki nilai angka pori paling tinggi daripada benda uji yang distabilisasi. Angka pori adalah parameter yang sangat berpengaruh terhadap kepadatan tanah, semakin kecil angka pori maka kepadatan tanah akan semakin tinggi. Hal ini berarti bahwa benda uji yang distabilisasi memiliki kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan benda uji natural dan pada saat optimum benda uji natural memiliki kepadatan paling rendah. Dapat disimpulkan bahwa pada kondisi optimum Proctor akibat penambahan 15% *fly ash* pada tanah lempung ekspansif mengakibatkan penurunan nilai angka pori, kadar air dan derajat kejenuhan, sedangkan nilai kepadatan kering meningkat. Pada penerapan siklus 1x pada kedua benda uji natural dan yang distabilisasi pada proses pembasahan mengakibatkan rata-rata nilai tegangan air pori negatif menurun, Modulus Geser maksimum berkurang dan angka pori meningkat. Sedangkan proses pengeringan siklus pertama mengakibatkan rata-rata nilai angka pori berkurang, tegangan air pori negatif meningkat, dan Modulus Geser maksimum meningkat. Siklus pengeringan-pembasahan berulang yang diterapkan pada kedua jenis tanah natural dan yang distabilisasi mengakibatkan di akhir siklus 6x nilai angka pori berkurang, nilai tegangan air pori negatif berkurang, Modulus Geser maksimum berkurang dan kepadatan kering berkurang. Serta perbandingan hasil

modulus geser yang dihasilkan antara alat uji kolom resonansi dan elemen bender pada siklus pengeringan-pembasahan berulang yang diterapkan pada kedua jenis tanah natural dan yang distabilisasi mengakibatkan meningkat.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 Pendahuluan**

Penelitian Tugas Akhir ini dilakukan untuk optimasi mengetahui variasi hasil pengeringan-pembasahan tanah residual dengan stabilisasi menggunakan *fly ash*, kapur dan bio-bakteri. Untuk mendapatkan hasil yang baik, diperlukan langkah-langkah penelitian yang tepat dan berurutan. Hal ini dimaksudkan untuk memberikan kemudahan bagi peneliti dalam pembuktian kebenaran, analisis dan perbaikan kesalahan yang juga berguna bagi pengembangan selanjutnya. Dalam bagian ini akan diuraikan langkah-langkah penelitian yang akan dilakukan peneliti dalam memecahkan permasalahan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

#### **3.2 Persiapan Benda Uji**

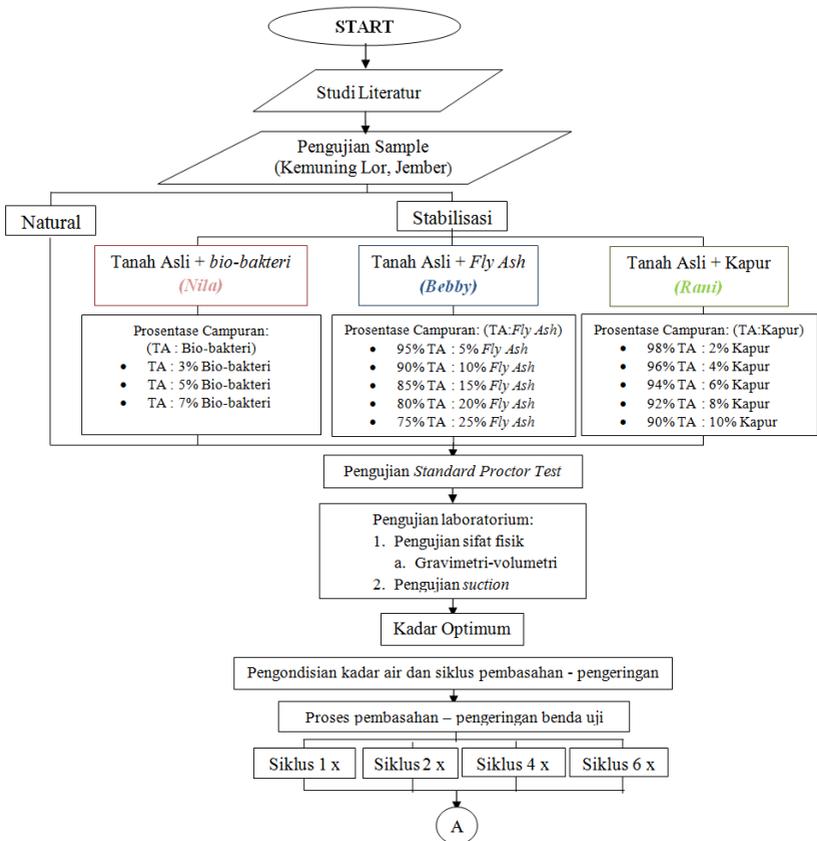
Tanah benda uji yang dipersiapkan adalah tanah yang diambil dari daerah Desa Kemuning Lor, Jember. Benda uji yang terdiri dari tanah *undisturbed* dan *disturbed* ini kemudian di cetak sesuai kebutuhan pengujian.

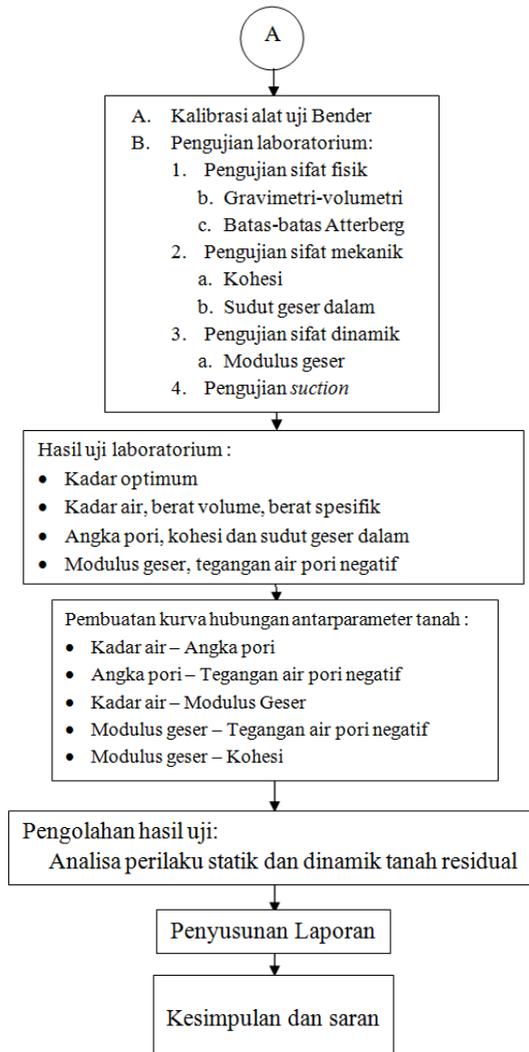
Untuk benda uji *undisturbed* akan diperlakukan tanpa adanya pencampuran bahan stabilisasi, sedangkan benda uji *disturbed* akan dicampur dengan ketiga bahan stabilisasi yaitu kapur aktif, *fly ash* dan bio-bakteri.

Adapun persiapan media pengujian lainnya yaitu kertas filter *Whatman* no.42 untuk pengukuran tekanan air pori negatif dan alat uji Elemen Bender untuk pengukuran modulus geser pada benda uji *undisturbed* maupun *disturbed*.

### 3.3 Langkah-langkah Penelitian

Jenis pengujian dan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ditunjukkan pada gambar 3.1 dan 3.2.





Gambar 3.2 Diagram Alir (2)

### 3.4 Pengujian Sifat-sifat Fisik Tanah

Ada berbagai pengujian sifat-sifat fisik tanah yang dilakukan dalam penelitian ini. Di antaranya adalah sebagai berikut.

#### 3.4.1 Indeks Konsistensi

Parameter utama yang digunakan untuk mengetahui karakteristik tanah adalah Indeks Plastis (*Plasticity Index*). Pengujian yang harus dilakukan terlebih dahulu adalah:

- a. Kadar air (*water content*,  $w_c$ ), digunakan standar uji ASTM D 2216-71
- b. Batas cair (*liquid limit*,  $LL$ ), digunakan standar uji ASTM D 432-66
- c. Batas plastis (*plastic limit*,  $PL$ ), digunakan standar uji ASTM D 424-74
- d. Batas susut (*shrinkage limit*,  $SL$ ), digunakan standar uji ASTM D 427-74

Secara empiris, nilai indeks plastis merupakan selisih antara batas cair dan batas plastis ( $IP = LL - PL$ ). Batas cair, batas plastis, batas susut dan indeks plastis biasanya lebih dikenal dengan batas Atterberg (*Atterberg Limit*).

#### 3.4.2 Ukuran Butiran dan Analisis Hidrometer

Pengukuran butiran tanah (analisis ayakan) dilakukan dengan menggunakan standar uji ASTM D 422-63 dan analisis hidrometer menggunakan standar uji ASTM 1140-54. Kedua pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan gradasi butiran terutama fraksi lanau dan lempungnya (fraksi  $\leq 0,002$  mm).

### 3.4.3 Pengujian *Specific Gravity*

Pengujian *specific gravity* (berat jenis) dilakukan dengan menggunakan standar uji ASTM D 854-72. Nilai berat jenis (Gs) yang diperoleh akan membantu dalam klasifikasi jenis tanah yang diuji.

### 3.5 Pengujian Proctor Standard

Uji pemadatan dengan pengujian Proctor Standard dilakukan dengan menggunakan standar uji ASTM D 698-70. Hasil data dari pengujian ini nantinya untuk menggambarkan kurva hubungan antara kepadatan kering dengan kadar air. Berdasarkan kurva pemadatan tersebut, harga kepadatan kering maksimum (*maximum dry density*, MDD) dan kadar air optimum (*optimum moisture content*, OMC) dapat ditentukan. Harga MDD dan OMC merupakan kondisi inisial benda uji ( $w_i = w_{opt}$  dan  $\gamma_{di} = \gamma_{dmax}$ ) yang akan digunakan dalam pengujian Elemen Bender dan tegangan air pori negatif. Dalam pengujian Proctor Standard ini juga dilakukan pengukuran tegangan air pori negatif menggunakan kertas filter tipe *Whatman* no.42 yang diletakkan pada lapisan kedua dan ketiga dari benda uji yang dipadatkan.

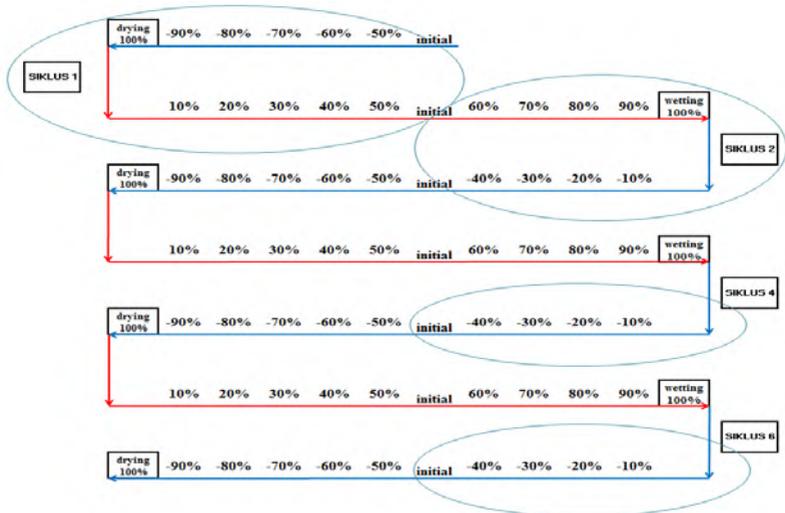
### 3.6 Proses Pembasahan-Pengeringan

Proses pembasahan dan pengeringan dilakukan secara bertahap berdasarkan persentase pengurangan dan penambahan kadar air. Untuk perhitungan penambahan air untuk siklus *drying-wetting* akan dijelaskan pada lampiran. Contoh tanah yang digunakan adalah tanah initial *undisturbed* yang telah melalui uji gravimetri-volumetri dan uji *Unconfined Compression* dalam penelitian ini.

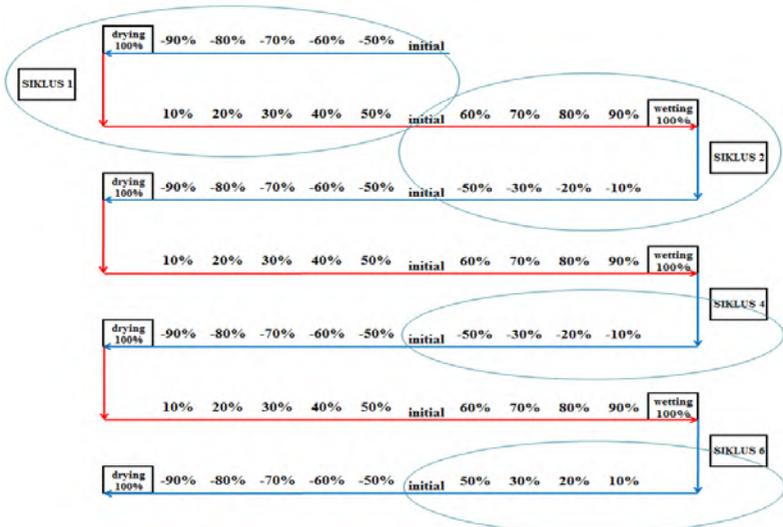
Penelitian ini menggunakan siklus pengeringan-pembasahan 1x, 2x, 4x dan 6x. Perlakuan tersebut diterapkan pada benda uji yang digunakan untuk pengujian Elemen Bender dan pengukuran

tegangan air pori negatif. Pengukuran tegangan air pori negatif, kertas filter *Whatman* no. 42, dihimpit pada dua benda uji gravimetri-volumetri dan Elemen Bender sehingga satu pasang benda uji terdapat satu buah kertas filter.

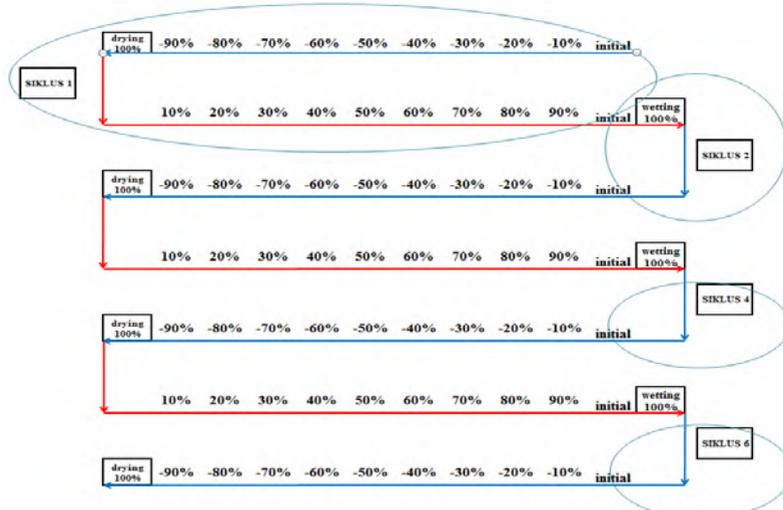
Tahapan yang dilakukan dalam proses ini seperti yang ada pada gambar 3.3, 3.4, 3.5 dan 3.6 sebagai berikut.



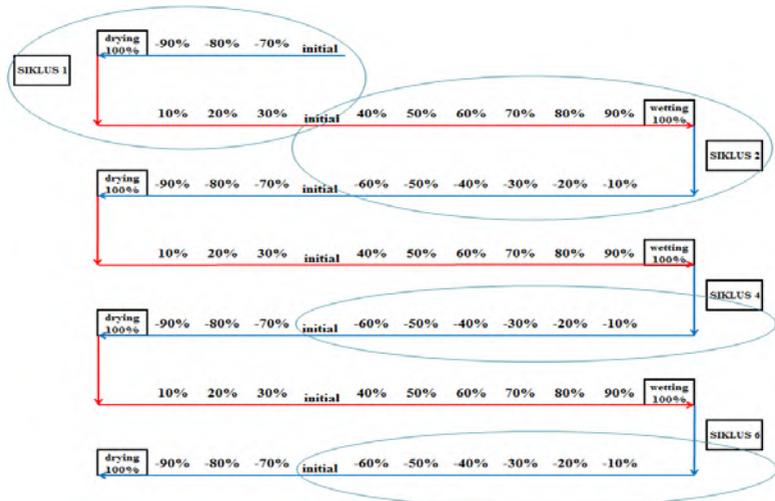
Gambar 3.3 Siklus pengeringan-pembasahan tanah natural



Gambar 3.4 Siklus pengeringan-pembasahan tanah natural + 7% bio-bakteri



Gambar 3.5 Siklus pengeringan-pembasahan tanah natural + 5% fly ash



Gambar 3.6 Siklus pengeringan-pembasahan tanah natural + 6% kapur

Keterangan:

- Dibasahi
- Dikeringkan

### 3.7 Pengujian Sifat Mekanik

#### 3.7.1 Pengujian Triaksial *Unconsolidated Undrained (UU)*

Pengujian Triaksial *Unconsolidated Undrained* ini dilakukan menggunakan alat uji *Triaxial Unconsolidated Undrained Test* untuk mendapatkan hasil sifat mekanik tanah, yakni kohesi ( $c_u$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Hasil yang didapat berasal dari benda uji yang telah diuji untuk kemudian diolah ke dalam grafik Mohr. Acuan yang digunakan dalam pengujian ini sesuai dengan peraturan pada ASTM D 698-70. Secara fisik, alat Triaksial UU diperlihatkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Alat uji Triaksial *Unconsolidated Undrained*  
(Sumber: Lab Mekanika Tanah Jurusan D3 Teknik Sipil ITS)

### 3.7.2 Pengujian *Unconfined Compression Strength*

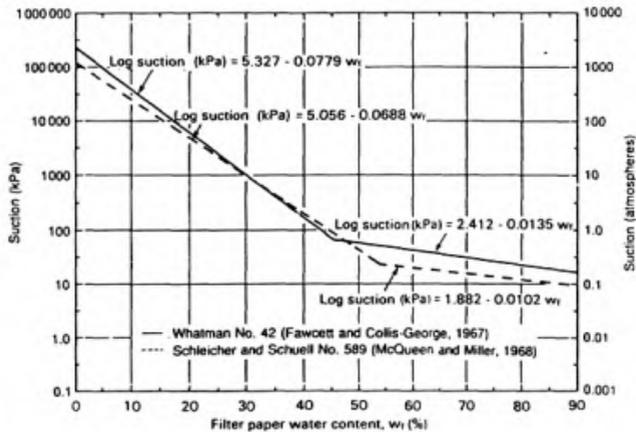
Pengujian ini dilakukan menggunakan alat UCS untuk mendapatkan hasil kohesi ( $c_u$ ). Acuan pengujian ini sesuai dengan peraturan ASTM D2166-00. Secara fisik, alat Triaksial UU diperlihatkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Alat uji *Unconfined Compression Strength*  
(Sumber: Lab Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil ITS)

### 3.7.3 Pengukuran Tegangan Air Pori Negatif

Nilai tegangan air pori negatif diperoleh dari grafik korelasi antara kadar air kertas filter tipe *Whatman* no. 42 dengan nilai *suction* setelah diberikan kalibrasi yang diberikan pada gambar 3.9.

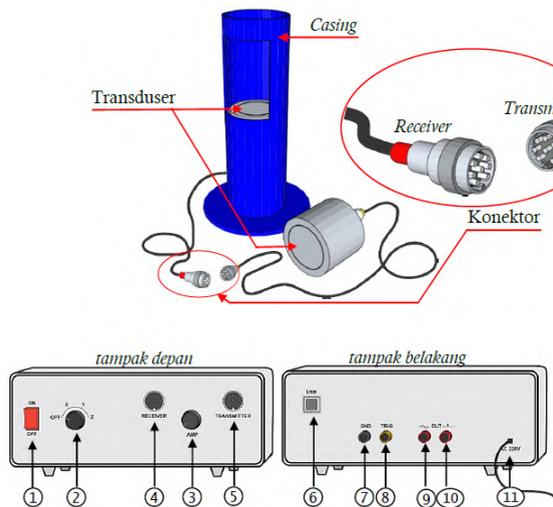


Gambar 3.9 Grafik kalibrasi kertas filter  
(Sumber: Fredlund dan Rahardjo, 1993)

Dasar pertimbangannya adalah mudah dalam pelaksanaannya dan murah biayanya dibandingkan dengan metode lain. Selain itu, dengan metode ini akan didapatkan jangkauan pengukuran yang relatif besar. Setiap benda uji yang akan dilakukan pengujian tekanan air pori negatif ini akan dipasang satu buah kertas filter dengan dilapisi kertas filter biasa pada bagian atas dan bawahnya guna menghindari pengotoran pada kertas filter *Whatman*.

### 3.8 Pengujian Properti Dinamik Tanah dengan Uji Elemen Bender

Alat uji Elemen Bender yang digunakan untuk pengukuran adalah secara manual dan digital. Pengukuran secara manual dilakukan menggunakan osiloskop yang pemancar (*transmitter*) dan penerimanya (*receiver*) dihubungkan dengan komputer untuk kemudian dilakukan pembacaan secara digital. Alat yang terpasang sebagai pembaca digital dinamakan *Ultrasonic Time Analyzer*.



Gambar 3.10 Transduser dan *electronic unit*

Bagian-bagian pada *electronic unit* beserta fungsinya adalah sebagai berikut:

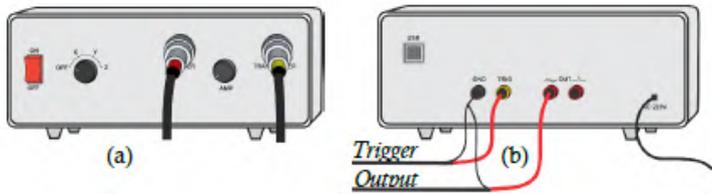
1. *Power Switch*, saklar *ON/OFF*
2. *Selector XYZ*, digunakan untuk memilih gelombang yang dibangkitkan (X-Y-Z)
3. *Amplifier*, penguat sinyal gelombang yang diterima oleh *receiver*.

4. *Receiver Port*, digunakan sebagai penghubung probe receiver.
5. *Transmitter Port*, digunakan sebagai penghubung probe transmitter.
6. *USB Port*, digunakan untuk menghubungkan perangkat (*electronic unit*) ke komputer.
7. *Ground*, titik referensi tegangan untuk pengukuran waktu tempuh dengan osiloskop.
8. *Trigger*, pengukuran sinyal yang dibangkitkan pada transmitter.
9. *Output* sinusoid, sinyal keluaran asli dari receiver (sebelum di-filter).
10. *Digital Output*, sinyal keluaran digital (hasil filter sinyal asli/sinusoid).
11. *Power Source*, sumber daya untuk perangkat (AC 220V). Dengan pengukuran manual menggunakan perangkat pada nomor 7 hingga 10 yang merupakan bagian dari osiloskop.

### **3.8.1 Pengukuran Manual Dengan Osiloskop**

Pengukuran manual waktu tempuh gelombang dengan osiloskop dilakukan dengan beberapa tahap, yakni sebagai berikut:

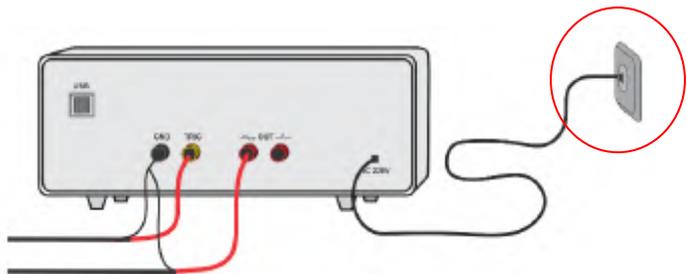
1. Persiapkan sampel benda uji, sampel yang digunakan berbentuk silinder berdiameter 3,8 cm dengan tinggi 2,7-3,2 cm. Permukaan sampel yang nantinya ditempelkan pada transduser harus rata.
2. Hubungkan transduser pada panel depan *electronic unit* seperti yang terlihat pada gambar 3.12(a).



Gambar 3.11(a) Panel depan

(b) Panel belakang

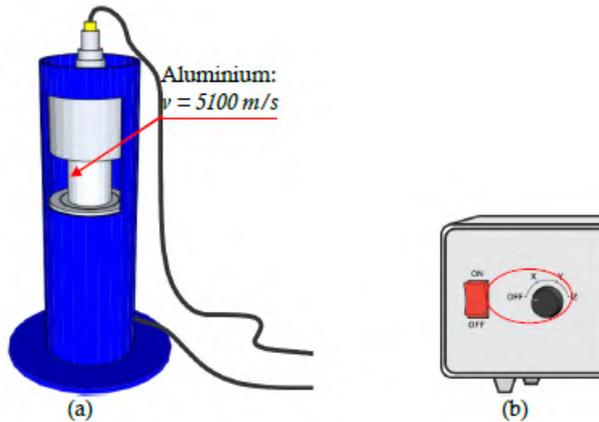
3. Hubungkan probe osiloskop pada panel belakang *electronic unit* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.12(b).
4. Hubungkan kabel *Power Source* ke jaringan listrik AC 220V seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3.12 Perangkat yang terhubung ke jaringan listrik

5. Nyalakan tombol *ON* pada *Power Switch* pada panel depan untuk menyalakan osiloskop.
6. Kalibrasi. Kalibrasi dilakukan untuk memberikan koreksi pengukuran agar sesuai dengan nilai yang sebenarnya. Kalibrasi ini dilakukan menggunakan batang logam Aluminium yang diletakkan pada transduser seperti yang terlihat pada gambar 3.14(a). Kecepatan rambat gelombang bunyi (gelombang mekanik) pada bahan ini adalah 5100 m/s, sehingga untuk batang aluminium sepanjang 3,7 cm yang telah tersedia, waktu tempuh gelombang yang terukur

seharusnya adalah  $7,3 \mu\text{s}$ . Dengan mengetahui nilai ini, waktu tempuh gelombang pada batang aluminium diukur dengan alat uji Elemen Bender, nilai yang terukur pada osiloskop kemudian dibandingkan dengan nilai yang sebenarnya. Selisih yang diperoleh digunakan sebagai koreksi pengukuran sampel berikutnya (sampel tanah).



Gambar 3.13(a) Batang aluminium pada transduser  
(b) *Selector XYZ*

7. Kalibrasi dilakukan untuk setiap mode gelombang X, Y dan Z dengan mengubah posisi pada *Selector XYZ* yang ditunjukkan pada gambar 3.14(b).
8. Pengujian sampel siap dilakukan dengan membaca selisih waktu gelombang dengan pengurangan/penambahan factor kalibrasi yang telah diperoleh.

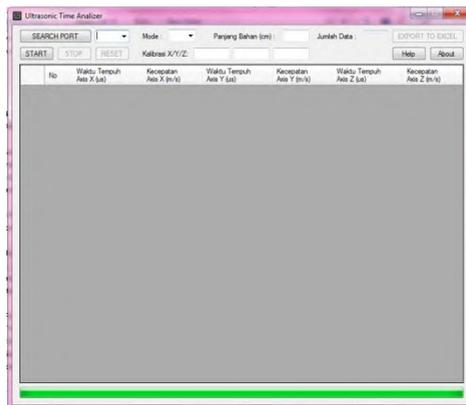
### 3.8.2 Pengukuran Digital Dengan Komputer Menggunakan *Ultrasonic Time Analyzer (UTA)*

Pengukuran digital dilakukan dengan media komputer menggunakan *software Ultrasonic Time Analyzer*. Berikut adalah

langkah-langkah penggunaan setelah pengukuran manual dilakukan.

1. Persiapkan sampel uji. Sampel yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 3,8 cm dan tinggi 3 cm. Permukaan sampel uji diharuskan diratakan terlebih dahulu untuk mempermudah pembacaan.
2. Sebelum melakukan pembacaan digital, lakukan instalasi kabel pada panel yang tepat.
3. Buka *software Ultrasonic Time Analyzer* (lihat gambar 3.15). Lakukan kalibrasi menggunakan tabung aluminium untuk pengukuran.

Faktor kalibrasi =  $7,3\mu s$  - (rata-rata waktu terukur).



Gambar 3.14 *Software UTA*

4. Masukkan sampel uji ke dalam tabung transduser. Lakukan sesuai prosedur hingga pembacaan digital dapat terbaca.
5. Hasil waktu tempuh per axisnya (X-Y-Z) dan kecepatan per axisnya terbaca.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB IV**

### **HASIL DAN ANALISIS PENELITIAN**

Pada penelitian ini dilakukan pengujian laboratorium terhadap jenis tanah residual terganggu (*disturbed*) dan tidak terganggu (*undisturbed*) dari Desa Kemuning Lor, Jember, Jawa Timur. Parameter-parameter tanah hasil pengujian yang dibahas meliputi: pengaruh kandungan tanah residual terhadap parameter fisik, mekanik dan dinamik serta pengaruh pembasahan-pengeringan terhadap parameter fisik, mekanik dan dinamik tanah residual. Perubahan sifat fisik yang terjadi akibat pengaruh siklus pembasahan-pengeringan yang akan dibahas terdiri dari: perubahan kadar air, derajat kejenuhan, angka pori, kepadatan kering; sifat mekanik terdiri dari kohesi dan sudut geser dalam dan sifat dinamik adalah modulus geser.

Di samping perubahan sifat fisik, mekanik dan dinamik juga dilihat perubahan nilai tegangan air pori negatif (*suction*). Hasil-hasil penelitian di atas akan disajikan dalam bentuk tabel dan kurva yang menunjukkan hubungan antarparameter yang akan dibahas. Pola perubahan dari tabel dan kurva tersebut kemudian dianalisa untuk mengetahui fenomena yang terjadi dan menjelaskan kemungkinan yang menjadi penyebabnya.

#### **4.1 Hasil Pengujian Tanah Natural**

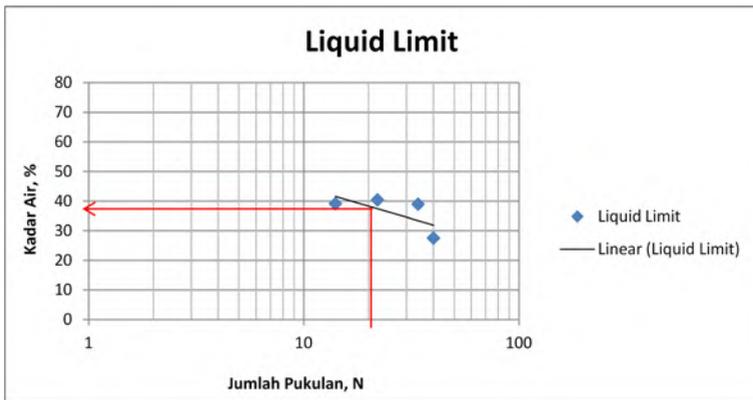
##### **4.1.1 Sifat Fisik Tanah Natural**

Bagian ini akan menjelaskan beberapa pengujian sifat fisik tanah residual natural *undisturbed* dan *disturbed*. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini di antaranya yakni, pengujian Atterberg Limit, analisis ukuran butir dan klasifikasi tanah.

###### **4.1.1.1 Pengujian Atterberg Limit**

Batas konsistensi tanah atau yang biasa disebut Atterberg Limit merupakan hal yang penting dan selalu dilakukan

pada saat pengujian. Pengujian ini khusus dilakukan pada tanah berbutir halus dan dikarenakan batas-batas ini tidak merupakan sifat-sifat fisika yang jelas maka dipakai cara empiris untuk menentukannya. Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat teknik yang buruk yaitu kekuatannya rendah, sedangkan kompresibilitasnya tinggi sehingga sulit dalam hal pematatannya. Kadar air dinyatakan dalam persen, dimana terjadi transisi dari keadaan semi plastis ke semi kaku didefinisikan sebagai batas susut (*Shrinkage Limits, SL*). Kadar air dimana transisi dari keadaan plastis ke keadaan semi plastis terjadi dinamakan batas plastis (*Plastic Limits, PL*) dan dari keadaan cair ke keadaan plastis dinamakan batas cair (*Liquid Limits, LL*). Batas-batas ini yang dinamakan dengan Batas-batas Atterberg. Batas cair tanah natural ditunjukkan pada gambar 4.1 berikut.

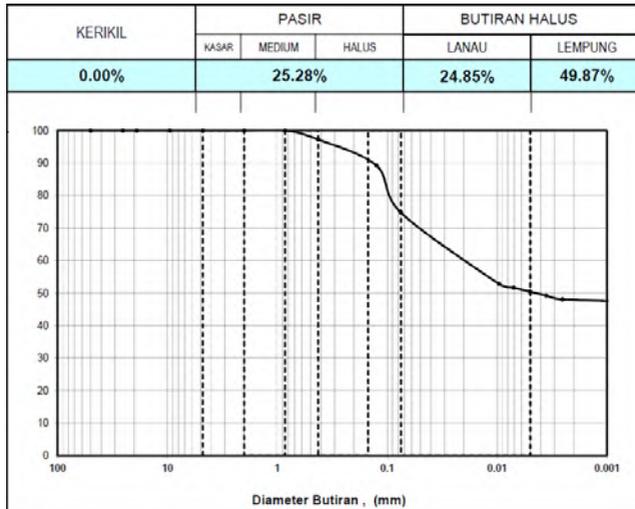


Gambar 4.1 Hasil pengujian *Liquid Limit* pada tanah residual natural. (Sumber: Hasil penelitian)

#### 4.1.1.2 Pengujian Analisis Ukuran Butir

Sistem klasifikasi tanah dibuat pada dasarnya untuk memberikan informasi tentang karakteristik dan sifat-sifat fisik tanah. Karena variasi sifat dan perilaku tanah yang begitu beragam, sistem klasifikasi secara umum mengelompokkan ukuran

butir tanah ke dalam kategori yang umum dimana tanah memiliki kesamaan sifat fisik. Hasil dari pengklasifikasian tanah residual natural tersaji dalam Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Hasil analisis pembagian butir tanah natural. (Sumber: Hasil penelitian)

#### 4.1.1.3 Klasifikasi Tanah

Sifat-sifat fisik bahan dasar dan benda uji yang digunakan pada penelitian ini didasarkan pada pengujian indeks konsistensi, distribusi ukuran butiran dan analisis hidrometer serta berat jenis. Sedangkan klasifikasi tanah diperoleh dengan menggunakan klasifikasi standard USCS dan ASHTO yang didasarkan pada sifat-sifat tanahnya. Sifat-sifat fisik dan klasifikasi tanah natural hasil pengujian tersebut ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian sifat fisik tanah natural

Pengujian	Tanah Residual Natural
<b>Analisa Saringan dan Hidrometer</b>	
- Fraksi kerikil ( <i>gravel</i> )	0%
- Fraksi pasir ( <i>sand</i> )	25,28%
- Fraksi lanau-lempung ( <i>silt-clay</i> )	74,72%
<b>Indeks Konsistensi</b>	
- Batas cair (LL)	36,8%
- Batas plastis (PL)	29,177%
- Indeks plastis (PI)	7,623%
- Batas susut (SL)	6,546%
<i>Activity (A)</i>	0,271
<i>Specific Gravity (Gs)</i>	2,532
<b>Klasifikasi Tanah</b>	
- USCS	CL (Lempung berpasir)
- AASHTO	A-7-6

(Sumber: Hasil penelitian)

#### 4.1.2 Sifat Mekanik Tanah Natural

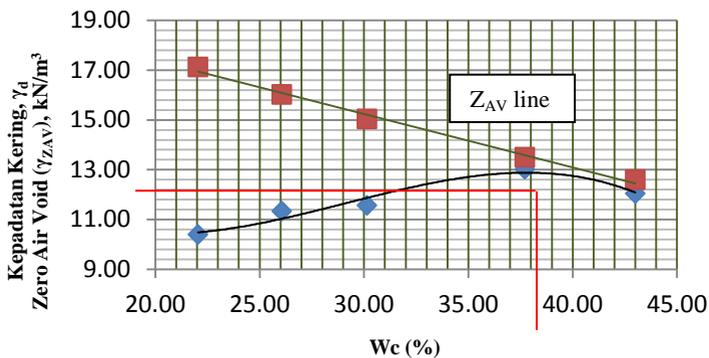
Bagian ini akan menjelaskan pengujian sifat mekanik tanah residual natural. Beberapa pengujiannya meliputi pengujian Proctor Standard dan Triaksial *Unconsolidated Undrained*.

##### 4.1.2.1 Pengujian Pemadatan Proctor Standard

Pengujian Proctor Standard dimaksudkan untuk memperoleh tingkat kepadatan maksimum dan kadar air optimum yang akan dipakai sebagai kondisi awal benda uji yang dipadatkan. Pada saat pengujian, dilakukan juga pengukuran tegangan air pori

negatif (*suction*) tiap benda uji menggunakan kertas filter tipe *Whatman* no. 42 yang diletakkan pada 1/3 dan 2/3 tinggi benda uji. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui besarnya tegangan air pori negatif (*suction*) tanah pada tingkat kepadatan maksimum.

Dari hasil pengujian Proctor Standard untuk tanah residual natural Kemuning Lor, Jember ini didapat nilai kepadatan kering maksimum sebesar  $13,016 \text{ kN/m}^3$  dengan nilai kadar air optimum sebesar 37,701% seperti yang terlihat pada Gambar 4.3.

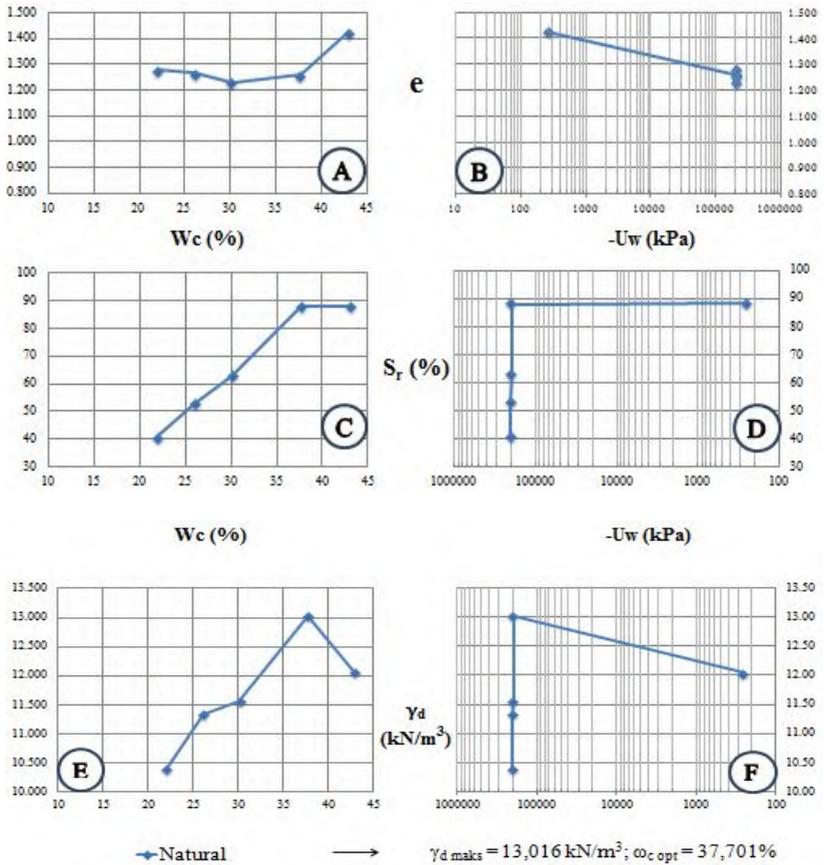


Gambar 4.3 Hasil grafik pemadatan Proctor Standard pada tanah residual natural. (Sumber: Hasil penelitian)

#### 4.1.2.2 Analisis Hasil Pengujian Pemadatan Proctor Standard

Gambar 4.4 memperlihatkan mengenai hubungan parameter fisik yang dijabarkan dalam bentuk grafik hubungan antarsifat sifik dari hasil pengujian Proctor Standard terhadap tanah residual natural.

Pada bagian ini akan dibuat berbagai grafik hubungan antara lain: kadar air ( $w_c$ ) dengan derajat kejenuhan ( $S_r$ ), kadar air ( $w_c$ ) dengan angka pori ( $e$ ), kadar air ( $w_c$ ) dengan berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ ), tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan derajat kejenuhan ( $S_r$ ), tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan angka pori ( $e$ ) dan tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan kadar air ( $w_c$ ).



Gambar 4.4 Hubungan antara kadar air, angka pori, derajat kejenuhan, kepadatan kering dan tegangan air pori negatif hasil pengujian Proctor Standard pada benda uji natural (Sumber: Hasil Penelitian)

#### **4.1.2.2.1 Hubungan Antara Angka Pori ( $e$ ) dengan Kadar Air ( $w_c$ )**

Gambar 4.4(A) memperlihatkan kurva hubungan antara kadar air ( $w_c$ ) dengan angka pori ( $e$ ) untuk kedua benda uji natural dan yang distabilisasi. Terlihat bahwa kadar air tanah natural mengalami kenaikan yang bervariasi, kemudian untuk nilai angka pori mengalami penurunan yang bervariasi pula (lihat gambar 4.4). Begitu pula dengan angka pori tanah natural sebesar 1,264 untuk tanah natural. Angka pori adalah parameter yang sangat berpengaruh terhadap kepadatan tanah, semakin kecil angka pori maka kepadatan tanah akan semakin tinggi dan sebaliknya.

#### **4.1.2.2.2 Hubungan Antara Tegangan Air Pori Negatif dengan Angka Pori**

Gambar 4.4(B) memperlihatkan bahwa kurva hasil Proctor Standard terhadap hubungan antara tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan angka pori ( $e$ ) untuk seluruh benda uji natural dan yang distabilisasi. Pada rentan nilai tegangan air pori negatif kurang lebih antara 202000-204000 kPa, memiliki nilai angka pori 1,264 untuk tanah natural.

Jika siklus pengeringan-pembasahan dianalogikan dengan siklus pemberian-peniadaan beban dalam peristiwa konsolidasi, maka peningkatan tegangan efektif akan berakibat pada penurunan angka pori.

#### **4.1.2.2.3 Hubungan Antara Kadar Air dengan Derajat Kejenuhan**

Gambar 4.4(C) adalah kurva hubungan antara kadar air dengan derajat kejenuhan pada keseluruhan benda uji natural dan yang distabilisasi.

Dari gambar 4.4(C) terlihat hasil uji tanah natural dan yang distabilisasi mempunyai pola yang sama, bahwa derajat kejenuhan terus meningkat dengan bertambahnya kadar air, hingga mencapai kondisi jenuh. Penambahan air ke dalam benda uji menyebabkan ruang pori yang masih kosong akan terisi oleh air.

Semakin banyak air yang ditambahkan, maka akan semakin sedikit ruang pori yang belum terisi oleh air, hingga suatu saat seluruh ruang pori akan terisi air. Bila kondisi ini tercapai maka benda uji berada dalam kondisi jenuh air. Untuk proses pengeringan akan terjadi sebaliknya, dimana penurunan kadar air menyebabkan derajat kejenuhan berkurang. Dengan demikian derajat kejenuhan adalah rasio antara volume air dengan volume pori ( $S_r = V_w/V_v$ ) dan dengan asumsi bahwa untuk kadar air yang sama, maka penurunan volume pori akan mengakibatkan derajat kejenuhan meningkat. Sebagai contoh, untuk nilai kadar air dengan rentan antara 26-28% masing-masing memiliki nilai derajat kejenuhan ( $S_r$ ) sebesar 52,902 untuk tanah natural.

#### **4.1.2.2.4 Hubungan Antara Tegangan Air Pori Negatif dengan Derajat Kejenuhan**

Gambar 4.4(D) menunjukkan bahwa efek dari stabilisasi pada benda uji natural adalah meningkatkan tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ). Perbedaan nilai tegangan air pori negatif ini dipengaruhi oleh perbedaan nilai angka pori seperti yang dijelaskan. Dari kurva terlihat bahwa untuk rentan nilai tegangan air pori negatif antara 202000-204000 kPa, masing-masing memiliki nilai derajat kejenuhan ( $S_r$ ) sebesar 52,902 untuk tanah natural.

#### **4.1.2.2.5 Hubungan Antara Kadar Air dengan Kepadatan Kering**

Kurva dalam gambar 4.4(E) memperlihatkan bahwa benda uji natural. Seperti diketahui, kepadatan kering adalah rasio antara berat butiran solid dengan volume total ( $\gamma_d = W_s/V$ ). Penambahan bahan stabilisasi pada tanah natural mengakibatkan bertambahnya volume dan berat butiran solid. Dengan demikian, karena  $V = V_s + V_v$  dan dengan asumsi bahwa volume total konstan, maka peningkatan volume butiran solid harus diiringi dengan penurunan volume pori. Implikasi dari meningkatnya berat butiran solid dan menurunnya volume pori adalah bertambah besarnya kepadatan kering.

Fenomena lain yang tampak adalah kadar air optimum benda uji natural ( $w_{opt} = 37,701\%$ ). Hal ini berarti bahwa untuk memperoleh kepadatan kering maksimum yang lebih besar, penambahan air yang diperlukan pada benda uji natural. Sebagai contohnya, pada rentan nilai kadar air ( $w_c$ ) antara 26-28% masing-masing memiliki nilai kepadatan kering ( $\gamma_d$ ) sebesar  $11,336 \text{ kN/m}^3$  untuk tanah natural.

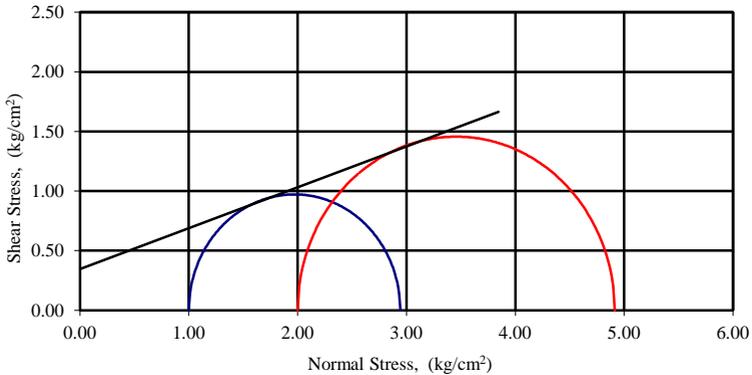
#### **4.1.2.2.6 Hubungan Antara Tegangan Air Pori Negatif dengan Kepadatan Kering**

Gambar 4.4(F) memperlihatkan kurva hubungan antara tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan kepadatan kering ( $\gamma_d$ ) untuk kedua benda uji natural. Fenomena ini disebabkan karena pada tanah natural akan membuat berat dan volume butiran ( $W_s$  dan  $V_s$ ) bertambah dan volume porinya berkurang. Dengan demikian, karena definisi kepadatan kering adalah ( $\gamma_d = W_s/V$ ), maka penambahan berat butiran solid dan totalnya berimplikasi pada meningkatnya kepadatan kering. Sebagai contoh, pada rentan nilai tegangan air pori antara 202000-204000 kPa, memiliki nilai kepadatan kering ( $\gamma_d$ ) sebesar  $11,336 \text{ kN/m}^3$  untuk tanah natural.

#### **4.1.2.3 Pengujian Triaksial**

Bagian ini akan menyajikan hasil dari pengujian triaksial *Unconsolidated Undrained*. Hasil pengujian ini berupa nilai kohesi ( $c_u$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ).

Gambar di bawah ini menunjukkan bahwa hasil grafik dari pengujian triaksial. Hasil tersebut ditunjukkan pada gambar 4.5 berikut.

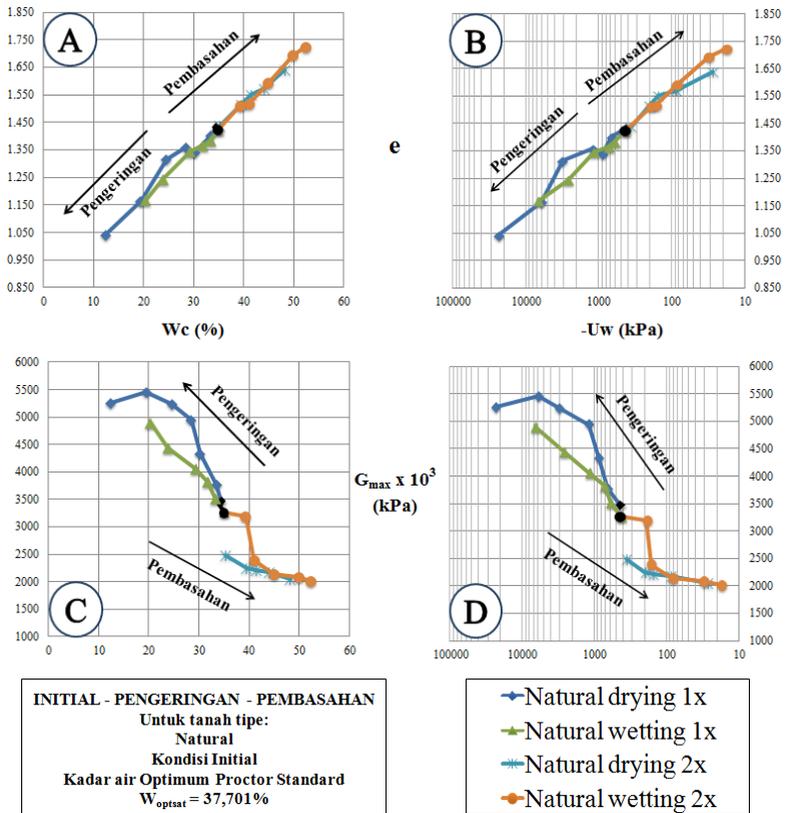


Gambar 4.5 Hasil grafik pengujian Triaksial *UU* tanah natural. (Sumber: Hasil penelitian)

Dari hasil grafik pada gambar 4.5 triaksial di atas menunjukkan hasil dari kohesi ( $c_u$ ) sebesar 34,5 kPa dan sudut geser dalam ( $\phi$ ) sebesar  $18,9^\circ$ .

#### 4.1.3 Analisis Hubungan Parameter Tanah Hasil Pengujian Proses Pengeringan dan Pembasahan (Siklus Pertama dan Kedua)

Dalam penelitian ini benda uji dibuat dengan dua kondisi awal yaitu kondisi awal (tanah *undisturbed*) yang dipadatkan sesuai dengan kepadatan. Pada sub-bab ini, hasil Proctor untuk kondisi natural (dengan tanah residual *disturbed*) adalah dengan nilai kadar optimum 37,701% yang nantinya akan diterapkan pada siklus pembasahan-pengeringan. Proses pengeringan-pembasahan tersebut dilakukan untuk siklus pertama dan kedua. Dari berbagai proses siklus pembasahan dan pengeringan ini kemudian dilakukan uji elemen bender untuk mengetahui sifat-sifat dinamik tanah, uji tegangan air pori negatif (*suction*), uji gravimetri-volumetri untuk mengetahui perubahan angka pori ( $e$ ) dengan kadar air ( $w_c$ ) dan derajat kejenuhan ( $S_r$ ). Dari hasil pengujian tersebut kemudian dapat dibuat korelasi antara parameter-parameternya.



Gambar 4.6 Pengaruh siklus pengeringan-pembasahan siklus pertama dan kedua terhadap hubungan antara kadar air, angka pori, modulus geser dan tegangan air pori negatif pada benda uji natural. (Sumber: Hasil penelitian)

#### 4.1.3.1 Hubungan Antara Kadar Air dengan Angka Pori

Gambar 4.6(A) memperlihatkan kurva hubungan antara kadar air ( $w_c$ ) dengan angka pori ( $e$ ) untuk benda uji natural. Tampak juga bahwa pada saat tanah mengalami pengeringan, terjadi penyusutan yang menyebabkan angka pori tanah mengecil akibat mengecilnya volume pori, sedangkan pada saat tanah mengalami pembasahan terjadi pengembangan yang menyebabkan angka pori karena membesarnya volume pori. Sebagai contoh, dalam keadaan inisial benda uji memiliki nilai angka pori sebesar 1,433 ( $w_c = 34,417\%$ ) pada tahap pengeringan siklus pertama. Kemudian nilai angka pori inisial pada tahap pengeringan siklus kedua, benda uji memiliki nilai angka pori sebesar 1,439 ( $w_c = 35,26\%$ ). Prosentase peningkatan angka pori yang terjadi adalah sebesar 0,417%.

#### 4.1.3.2 Hubungan Antara Tegangan Air Pori Negatif dengan Angka Pori

Gambar 4.6(B) memperlihatkan kurva pengaruh siklus pengeringan-pembasahan pertama dan kedua terhadap hubungan antara tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan angka pori ( $e$ ) untuk seluruh benda uji natural dan yang distabilisasi. Kecendrungan yang ditunjukkan oleh kurva tersebut hampir sama dengan Gambar 4.6(A), yaitu untuk tegangan air pori negatif yang sama, benda uji natural memiliki angka pori yang lebih besar dibandingkan dengan benda uji yang distabilisasi pada proses pembasahan. Dengan demikian tampak bahwa selain kadar air, faktor yang juga berpengaruh terhadap perubahan angka pori adalah tegangan air pori negatif.

Fenomena ini kemungkinan besar terkait terhadap pemahaman selama ini bahwa perubahan tegangan efektif mengakibatkan volume tanah pun akan berubah dan sebaliknya. Sebagai contoh, untuk tahap pembasahan pada siklus pertama, pada tegangan air pori negatif dalam keadaan inisial, benda uji memiliki nilai angka pori sebesar 1,423 (nilai inisial  $-U_w=429,495$  kPa). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada

tegangannya air pori negatif dalam keadaan *wet* 100%, benda uji memiliki nilai angka pori sebesar 1,724 (nilai *wet* 100% –  $U_w=17,360$  kPa). Peningkatan nilai angka pori dari titik inisial pembasahan hingga ke *wet* 100% adalah sebesar 17,46%.

#### 4.1.3.3 Hubungan Antara Kadar Air dengan Modulus Geser Maksimum

Gambar 4.6(C) memperlihatkan kurva pengaruh pengeringan-pembasahan pertama dan kedua terhadap hubungan antara kadar air dengan modulus geser maksimum ( $G_{maks}$ ) untuk benda uji natural.

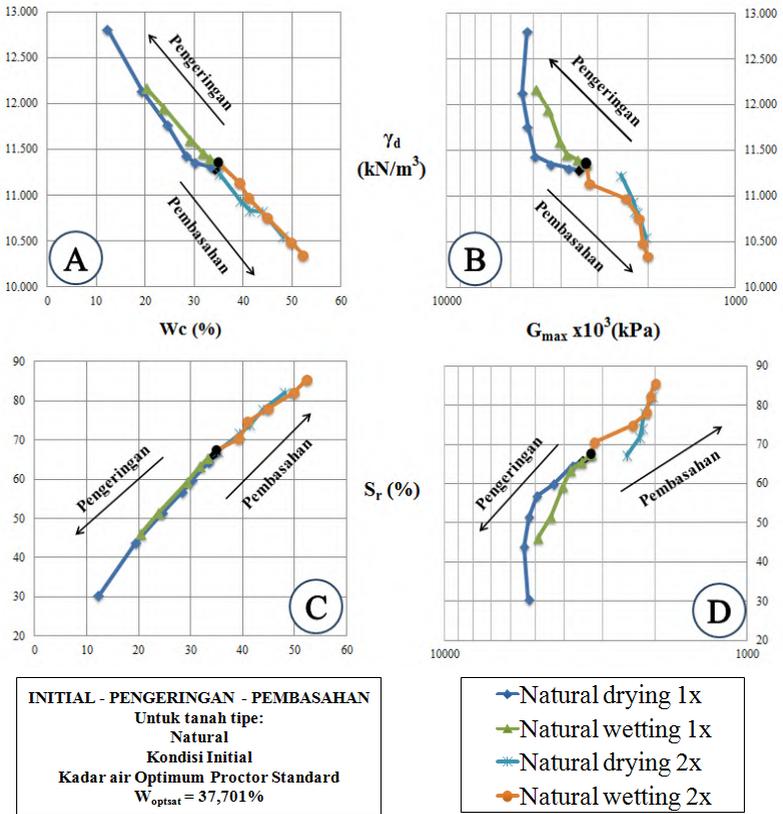
Tampak bahwa pada kadar air yang sama, benda uji natural memiliki nilai modulus geser yang lebih besar pada tahap pengeringannya.

Ketika proses pembasahan dilakukan, air yang masuk ke dalam tanah menyebabkan peningkatan volume butiran solid. Akibatnya volume pori menjadi kecil, yang berarti angka porinya meningkat. Dengan meningkatnya angka pori, maka butiran solid tanah akan semakin mempersempit bidang singgung antar butirannya sehingga mengakibatkan modulus geser maksimum juga akan menurun.

#### 4.1.3.4 Hubungan Antara Tegangan Air Pori Negatif dengan Modulus Geser Maksimum

Gambar 4.6(D) adalah kurva hubungan antara tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan modulus geser maksimum ( $G_{maks}$ ) untuk semua benda uji natural. Akibat penerapan siklus pembasahan-pengeringan terlihat bahwa tegangan air pori negatif benda uji natural pada tahap pengeringan memiliki modulus geser maksimum lebih besar. Sebagai contoh, untuk tahap pengeringan pada siklus pertama, pada tegangan air pori negatif inisial, benda uji natural memiliki nilai modulus geser maksimum sebesar  $3457,156 \times 10^3$  kPa ( $-U_w$  inisial = 432,764 kPa). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada tegangan air pori negatif inisial benda uji natural memiliki nilai modulus geser sebesar

$3269,342 \times 10^3$  kPa ( $-U_w$  inisial = 429,495 kPa). Prosentase penurunan nilai modulus geser pada kedua titik inisial ini adalah sebesar 5,43%.



Gambar 4.7 Pengaruh siklus pengeringan-pembasahan siklus pertama dan kedua terhadap hubungan antara kadar air, kepadatan kering, derajat kejenuhan dan modulus geser pada benda uji natural. (Sumber: Hasil penelitian)

#### 4.1.3.5 Hubungan Antara Kadar Air dengan Kepadatan Kering

Gambar 4.7(A) memperlihatkan kurva hubungan antara kadar air ( $w_c$ ) dengan kepadatan kering ( $\gamma_d$ ) untuk benda uji natural. Tampak bahwa pada saat tanah mengalami pembasahan, terjadi penyusutan yang menyebabkan kepadatan kering mengecilnya berat volume kering, sedangkan pada saat tanah mengalami pengeringan, terjadi pengembangan yang menyebabkan kepadatan kering membesar akibat membesarnya berat volume kering. Sebagai contoh, untuk titik *dry* 100% tahap pengeringan pada siklus pertama, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $12,807 \text{ kN/m}^3$ . Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua di titik *wet* 100%, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $10,341 \text{ kN/m}^3$ . Prosentase penurunan nilai kepadatan kering yang terjadi dari titik *dry* 100% ke *wet* 100% adalah sebesar 19,26%.

#### 4.1.3.6 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum dengan Keypadatan Kering

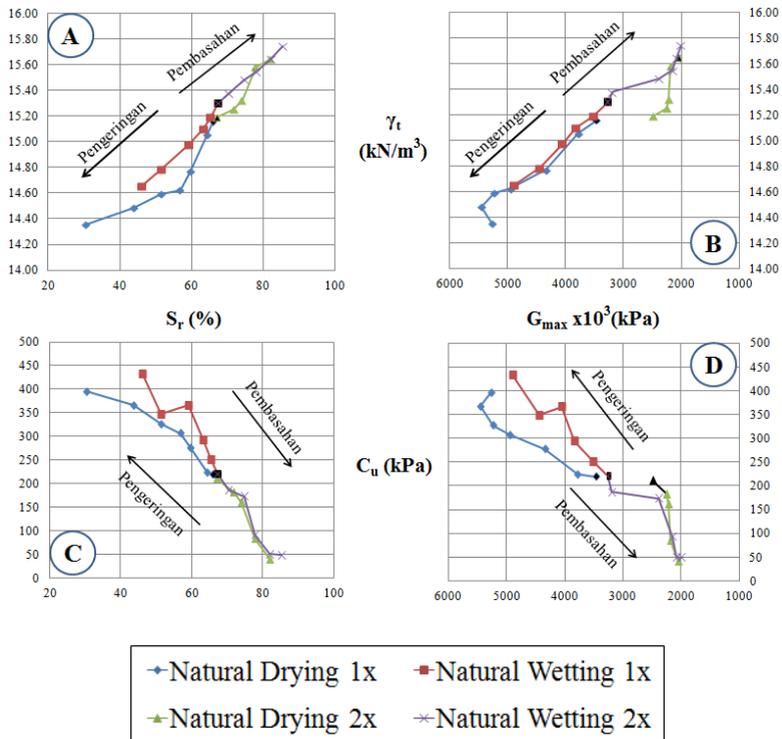
Gambar 4.7(B) memperlihatkan kurva hubungan antara modulus geser maksimum ( $G_{maks}$ ) dengan kepadatan kering ( $\gamma_d$ ) untuk benda uji natural. Tampak bahwa selain kadar air, faktor yang juga berpengaruh terhadap perubahan kepadatan kering adalah modulus geser maksimum. Fenomena ini kemungkinan besar terkait terhadap pemahaman selama ini bahwa peningkatan berat volume kering seolah-olah tidak diikuti dengan peningkatan efektif sehingga  $G_{maks}$  pun tidak berubah. Sebagai contoh, untuk tahap pembasahan pada siklus pertama, pada nilai modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $11,349 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{maks}$  inisial =  $3269,342 \times 10^3 \text{ kPa}$ ). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada nilai modulus geser maksimum dalam keadaan *wet* 100%, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $10,341 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{maks}$  *wet* 100% =  $2007,162 \times 10^3 \text{ kPa}$ ). Prosentase penurunan nilai kepadatan keringnya adalah sebesar 8,88%.

#### 4.1.3.7 Hubungan Antara Kadar Air dengan Derajat Kejenuhan

Gambar 4.7(C) adalah kurva hubungan antara kadar air dengan derajat kejenuhan untuk seluruh benda uji natural. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada kadar air  $\pm 30\%$  benda uji natural memiliki derajat kejenuhan 59,803. Pada proses pengeringan 2x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki derajat kejenuhan 67,158. Peningkatan yang terjadi pada nilai derajat kejenuhan di antara titik-titik tersebut adalah sebesar 10,95%.

#### 4.1.3.8 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum dengan Derajat Kejenuhan

Gambar 4.7(D) memperlihatkan kurva hubungan antara modulus geser maksimum ( $G_{maks}$ ) dengan derajat kejenuhan ( $S_r$ ) untuk benda uji natural. Dapat dilihat bahwa semakin kecil nilai modulus geser, maka semakin besar nilai derajat kejenuhannya. Berdasarkan hal ini dapat disimpulkan bahwa dengan peningkatan tegangan efektif maka modulus geser maksimum pun akan meningkat. Sebagai contoh, untuk tahap pembasahan pada siklus pertama, pada nilai modulus geser maksimum inisial, benda uji memiliki nilai derajat kejenuhan sebesar 67,44 ( $G_{maks}$  inisial =  $3269,342 \times 10^3$  kPa). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada nilai modulus geser maksimum dalam keadaan *wet* 100%, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 85,387 ( $G_{maks}$  *wet* 100% =  $2007,162 \times 10^3$  kPa). Peningkatan nilai derajat kejenuhan yang terjadi adalah sebesar 21,02%.



Gambar 4.8 Pengaruh siklus pengeringan-pembasaban siklus pertama dan kedua terhadap hubungan antara derajat kejenuhan, kepadatan tanah, modulus geser dan kohesi pada benda uji natural. (Sumber: Hasil Penelitian)

#### 4.1.3.9 Hubungan Antara Derajat Kejenuhan dengan Kepadatan Tanah ( $\gamma_t$ )

Gambar 4.8(A) adalah kurva hubungan antara derajat kejenuhan ( $S_r$ ) dengan kepadatan tanah ( $\gamma_t$ ) untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan nilai derajat kejenuhan cenderung meningkat seiring meningkatnya kepadatan tanah. Peningkatan

berat volume tanah meningkat kadar air yang bertambah berarti berat air bertambah sehingga berat tanah pun bertambah dan menyebabkan volume tanah basah semakin besar sehingga berat volume tanah meningkat. Semakin besar berat volume tanah semakin besar pula derajat kejenuhannya. Sebagai contoh, untuk tahap pembasahan pada siklus pertama, pada nilai derajat kejenuhan inisial benda uji natural memiliki nilai kepadatan tanah sebesar  $15,3 \text{ kN/m}^3$  ( $S_r$  inisial = 67,44). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada nilai derajat kejenuhan *wet* 100%, benda uji natural memiliki nilai kepadatan tanah sebesar  $15,745 \text{ kN/m}^3$  ( $S_r$  *wet* 100% = 85,387). Peningkatan nilai kepadatan tanah yang terjadi adalah sebesar 2,83%.

#### 4.1.3.10 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum dengan Kepadatan Tanah ( $\gamma_t$ )

Gambar 4.8(B) adalah kurva hubungan antara modulus geser maksimum ( $G_{maks}$ ) dengan berat volume tanah ( $\gamma_t$ ) untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan nilai modulus geser maksimum meningkat seiring menurunnya kepadatan tanah. Penurunan kepadatan tanah diakibatkan berat air yang berkurang. Sebagai contoh, untuk tahap pembasahan pada siklus pertama, pada nilai modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan tanah sebesar  $15,3 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{maks}$  inisial =  $3269,342 \times 10^3 \text{ kPa}$ ). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada nilai modulus geser maksimum dalam keadaan *wet* 100%, benda uji natural memiliki nilai kepadatan tanah sebesar  $15,745 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{maks}$  *wet* 100% =  $2007,162 \times 10^3 \text{ kPa}$ ).

#### 4.1.3.11 Hubungan Antara Derajat Kejenuhan dengan Kohesi

Gambar 4.8(C) adalah kurva hubungan antara derajat kejenuhan ( $S_r$ ) dengan kohesi ( $c_u$ ) untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan bahwa antara derajat kejenuhan dengan kohesi berbanding terbalik yaitu semakin kecil kohesi, maka semakin besar nilai derajat kejenuhan dan sebaliknya. Sebagai contoh, untuk tahap pembasahan pada siklus pertama, pada nilai

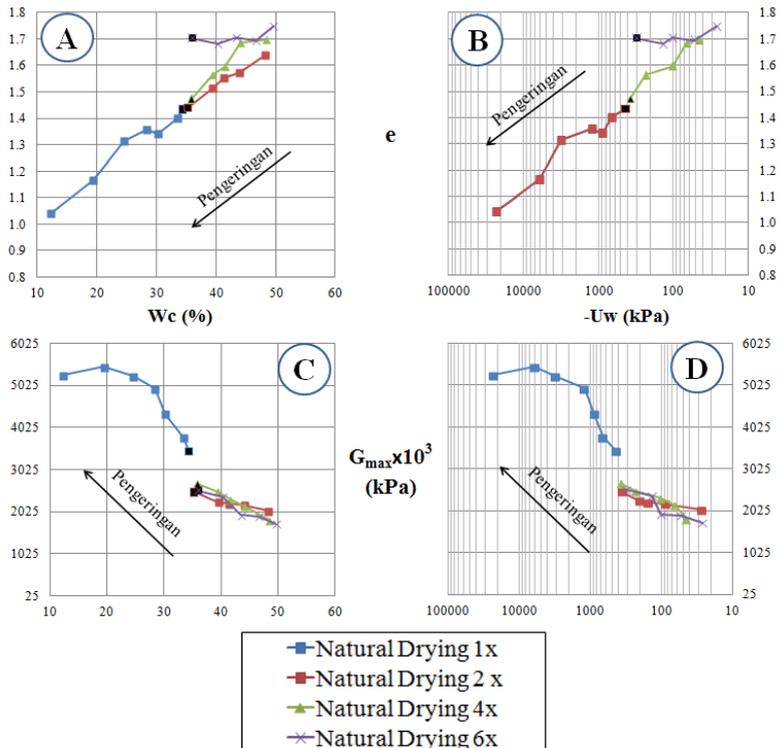
derajat kejenuhan inisial benda uji memiliki nilai kohesi sebesar 220,3 kPa untuk tanah natural ( $S_r$  inisial = 67,44). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada nilai derajat kejenuhan *wet* 100%, benda uji memiliki nilai kohesi sebesar 49,45 kPa untuk tanah natural ( $S_r$  *wet* 100% = 85,387). Penurunan yang terjadi adalah sebesar 77,55%.

#### **4.1.3.12 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum dengan Kohesi**

Gambar 4.8(D) adalah kurva hubungan antara modulus geser maksimum dengan kohesi untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan bahwa antara modulus geser maksimum dan kohesi berbanding lurus yaitu semakin turun nilai modulus geser maksimum, kohesi semakin turun (proses pembasahan) dan sebaliknya. Untuk modulus geser maksimum yang sama, nilai kohesi untuk benda uji yang telah distabilisasi lebih kecil dibandingkan nilai kohesi benda uji natural. Sebagai contoh, untuk tahap pembasahan pada siklus pertama, pada nilai modulus geser maksimum inisial, benda uji memiliki nilai kohesi sebesar 220,3 kPa untuk tanah natural ( $G_{maks}$  inisial =  $3269,342 \times 10^3$  kPa). Kemudian contoh dari tahap pembasahan siklus kedua, pada nilai modulus geser maksimum dalam keadaan *wet* 100%, benda uji memiliki nilai kohesi sebesar 49,45 kPa untuk tanah natural ( $G_{maks}$  *wet* 100% =  $2007,162 \times 10^3$  kPa).

#### **4.1.4 Analisa Hubungan Parameter Tanah Hasil Pengujian Proses Pengeringan Berulang (1 Kali, 2 Kali, 4 Kali, Dan 6 Kali)**

Proses pengeringan dilakukan untuk siklus 1x, 2x, 4x dan 6x. Dari berbagai proses siklus pembasahan dan pengeringan ini kemudian dilakukan uji elemen bender untuk mengetahui sifat-sifat dinamik tanah, uji tegangan air pori negatif (*suction*), uji gravimetri-volumetri untuk mengetahui perubahan angka pori ( $e$ ) dengan kadar air ( $W_c$ ) dan derajat kejenuhan ( $S_r$ ). Dari hasil pengujian tersebut kemudian dapat dibuat korelasi antarparameter-parameternya.



Gambar 4.9 Pengaruh proses pengeringan 1x, 2x, 4x dan 6x terhadap hubungan antara kadar air, angka pori, modulus geser maksimum dan tegangan air pori negatif pada benda uji natural. (Sumber: Hasil Penelitian)

#### 4.1.4.1 Hubungan Antara Kadar Air dengan Angka Pori

Gambar 4.9(A) memperlihatkan kurva hubungan antara kadar air dengan angka pori untuk benda uji natural. Tampak juga bahwa pada saat tanah mengalami pengeringan, terjadi penyusutan yang menyebabkan angka pori tanah mengecil akibat mengecilnya volume pori, sedangkan pada saat tanah mengalami pembasahan

terjadi pengembangan yang menyebabkan angka pori membesarnya volume pori. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada kadar air  $\pm 30\%$  benda uji natural memiliki angka pori 1,340. Pada proses pengeringan 2x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki angka pori 1,439. Pada proses pengeringan 4x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki angka pori 1,472. Pada proses pengeringan 6x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki angka pori 1,703.

#### **4.1.4.2 Hubungan Antara Tegangan Air Pori Negatif Dengan Angka Pori**

Gambar 4.9(B) memperlihatkan kurva pengaruh siklus pengeringan-pembasahan terhadap hubungan antara tegangan air pori negatif ( $-U_w$ ) dengan angka pori ( $e$ ) untuk benda uji natural. Kecendrungan yang ditunjukkan oleh kurva tersebut hampir sama dengan Gambar 4.9(A), yaitu untuk tegangan air pori negatif yang sama, benda uji natural memiliki angka pori yang lebih besar pada proses pembasahan. Dengan demikian tampak bahwa selain kadar air, faktor yang juga berpengaruh terhadap perubahan angka pori adalah tegangan air pori negatif. Fenomena ini kemungkinan besar terkait terhadap pemahaman selama ini bahwa perubahan tegangan efektif mengakibatkan volume tanah pun akan berubah dan sebaliknya. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada tegangan air pori negatif dalam keadaan inisial, benda uji natural memiliki angka pori 1,433. Pada proses pengeringan 2x, pada tegangan air pori negatif inisial benda uji natural memiliki angka pori 1,439. Pada proses pengeringan 4x, pada tegangan air pori negatif inisial benda uji natural memiliki angka pori 1,472. Pada proses pengeringan 6x, pada tegangan air pori negatif inisial benda uji natural memiliki angka pori 1,703.

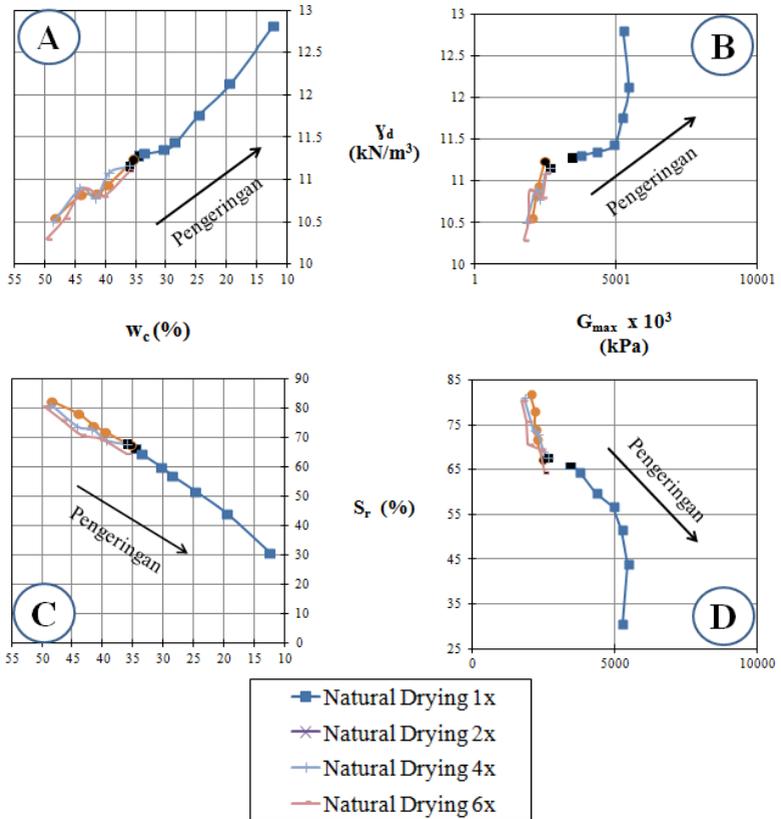
#### **4.1.4.3 Hubungan Antara Kadar Air Dengan Modulus Geser Maksimum**

Gambar 4.9(C) memperlihatkan kurva pengaruh proses pengeringan 1x, 2x, 4x dan 6x terhadap hubungan antara kadar air ( $w_c$ ) dengan modulus geser maksimum ( $G_{maks}$ ) untuk semua benda

uji natural. Tampak dalam Gambar 4.9 (C) bahwa pada kadar air yang sama, dibandingkan benda uji natural memiliki modulus geser yang lebih besar. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada kadar air  $\pm 30\%$  benda uji natural memiliki modulus geser maksimum sebesar  $4337,318 \times 10^3$  kPa. Pada proses pengeringan 2x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki nilai modulus geser maksimum sebesar  $2484,03 \times 10^3$  kPa ( $w_c$  inisial = 35,26). Pada proses pengeringan 4x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki nilai modulus geser  $2679,4938 \times 10^3$  kPa ( $w_c$  inisial = 35,881%). Pada proses pengeringan 6x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki nilai modulus geser maksimum  $2529,446 \times 10^3$  kPa ( $w_c$  inisial = 36,046%).

#### **4.1.4.4 Hubungan Antara Tegangan Air Pori Negatif Dengan Modulus Geser Maksimum**

Gambar 4.9(D) adalah kurva hubungan antara tegangan air pori negatif dengan modulus geser maksimum untuk semua benda uji natural. Akibat proses pengeringan terlihat bahwa untuk tegangan air pori negatif yang sama (seperti pada gambar 4.9(C)), benda uji natural memiliki modulus geser maksimum lebih besar. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada tegangan air pori negatif dalam keadaan inisial, benda uji natural memiliki nilai modulus geser maksimum sebesar 432,764 kPa ( $-U_w$  inisial =  $3457,156 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 2x, pada tegangan air pori negatif dalam keadaan inisial, benda uji natural memiliki nilai modulus geser maksimum 360,193 kPa ( $-U_w$  inisial =  $2484,03 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 4x, pada tegangan air pori negatif inisial benda uji natural memiliki modulus geser maksimum 371,356 kPa ( $-U_w$  inisial =  $2679,494 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 6x, pada tegangan air pori negatif inisial benda uji natural memiliki modulus geser maksimum 306,668 kPa ( $-U_w$  inisial =  $2529,446 \times 10^3$  kPa).



Gambar 4.10 Pengaruh proses pengeringan 1x, 2x, 4x dan 6x terhadap hubungan antara kadar air, berat volume kering, modulus geser maksimum dan derajat kejenuhan pada benda uji natural. (Sumber: Hasil Penelitian)

#### 4.1.4.5 Hubungan Antara Kadar Air Dengan Berat Volume Kering

Gambar 4.10(A) memperlihatkan kurva hubungan antara kadar air ( $w_c$ ) dengan kepadatan kering ( $\gamma_d$ ) untuk benda uji natural. Tampak bahwa pada saat tanah mengalami pengeringan, terjadi pengembangan yang menyebabkan kepadatan kering membesar akibat membesarnya berat volume kering. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada kadar air  $\pm 30\%$  benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $14,771 \text{ kN/m}^3$ . Pada proses pengeringan 2x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki nilai modulus geser maksimum sebesar  $15,19 \text{ kN/m}^3$  ( $w_c$  inisial =  $35,26\%$ ). Pada proses pengeringan 4x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki nilai modulus geser  $15,163 \text{ kN/m}^3$  ( $w_c$  inisial =  $35,881\%$ ). Pada proses pengeringan 6x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki nilai modulus geser maksimum  $15,089 \text{ kN/m}^3$  ( $w_c$  inisial =  $36,046\%$ ).

#### 4.1.4.6 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum Dengan Berat Volume Kering

Gambar 4.10(B) memperlihatkan kurva hubungan antara modulus geser maksimum dengan berat volume kering untuk benda uji natural. Tampak bahwa akibat proses pengeringan, untuk berat volume kering yang sama benda uji memiliki modulus geser maksimum yang lebih besar. Dengan demikian tampak bahwa selain kadar air, faktor yang juga berpengaruh terhadap perubahan berat volume kering adalah modulus geser maksimum.

Fenomena ini kemungkinan besar terkait terhadap pemahaman selama ini bahwa peningkatan berat volume kering seolah-olah tidak diikuti dengan peningkatan efektif sehingga  $G_{\text{maks}}$  pun tidak berubah. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $11,275 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{\text{maks}}$  inisial =

3457,156x10<sup>3</sup> kPa). Pada proses pengeringan 2x, pada modulus geser maksimum inisial benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 11,232 kN/m<sup>3</sup> ( $G_{maks}$  inisial = 2484,03x10<sup>3</sup> kPa). Pada proses pengeringan 4x, pada modulus geser maksimum inisial benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 11,155 kN/m<sup>3</sup> ( $G_{maks}$  inisial = 2679,4938x10<sup>3</sup> kPa). Pada proses pengeringan 6x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 11,099 kN/m<sup>3</sup> ( $G_{maks}$  inisial = 2529,446x10<sup>3</sup> kPa).

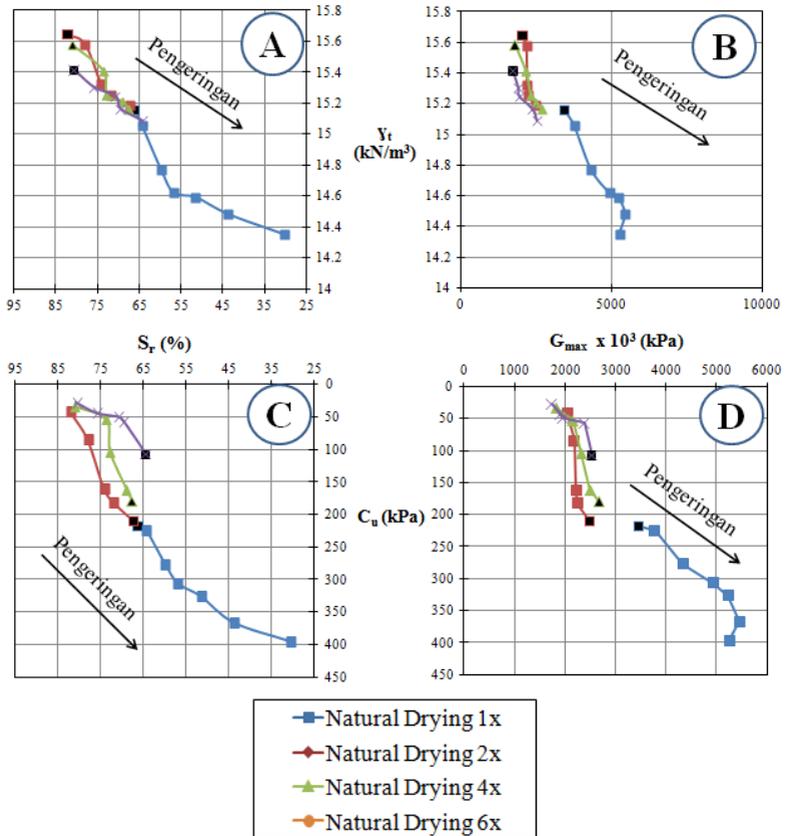
#### **4.1.4.7 Hubungan Antara Kadar Air Dengan Derajat Kejenuhan**

Gambar 4.10(C) adalah kurva hubungan antara kadar air dengan derajat kejenuhan untuk seluruh benda uji natural. Akibat penerapan siklus pengeringan-pembasahan terlihat bahwa benda uji natural memiliki nilai derajat kejenuhan yang lebih besar. Berdasarkan hal ini dapat disimpulkan bahwa benda uji natural membutuhkan air lebih banyak pada saat kondisi jenuh. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada kadar air ± 30% benda uji natural memiliki derajat kejenuhan 59,803. Pada proses pengeringan 2x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki derajat kejenuhan 67,158. Pada proses pengeringan 4x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki derajat kejenuhan 67,568. Pada proses pengeringan 6x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki derajat kejenuhan 64,331.

#### **4.1.4.8 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum Dengan Derajat Kejenuhan**

Gambar 4.10(D) memperlihatkan kurva hubungan antara modulus geser maksimum dengan derajat kejenuhan untuk benda uji natural. Tampak bahwa akibat proses pengeringan untuk derajat kejenuhan yang sama, benda uji natural memiliki modulus geser maksimum lebih besar. Berdasarkan hal ini dapat disimpulkan bahwa dengan peningkatan tegangan efektif maka modulus geser maksimum pun akan meningkat. Sebagai contoh untuk proses

pengeringan 1x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai derajat kejenuhan sebesar 66,051 ( $G_{\text{maks inisial}} = 3457,156 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 2x, pada modulus geser maksimum inisial benda uji natural memiliki nilai derajat kejenuhan sebesar 67,158 ( $G_{\text{maks inisial}} = 2484,03 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 4x, pada kadar air inisial benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 67,568 ( $G_{\text{maks inisial}} = 2679,4938 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 6x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 64,331 ( $G_{\text{maks inisial}} = 2529,446 \times 10^3$  kPa).



Gambar 4.11 Pengaruh proses pengeringan 1x, 2x, 4x dan 6x terhadap hubungan antara derajat kejenuhan, berat volume tanah basah, modulus geser maksimum dan kohesi pada benda uji natural. (Sumber: Hasil Penelitian)

#### 4.1.4.9 Hubungan Antara Derajat Kejenuhan Dengan Berat Volume Tanah Basah

Gambar 4.11(A) adalah kurva hubungan antara derajat kejenuhan ( $S_r$ ) dengan berat volume tanah ( $\gamma_t$ ) untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan nilai derajat kejenuhan cenderung meningkat seiring meningkatnya berat volume tanah. Peningkatan berat volume tanah berarti meningkatnya kadar air, maka berat tanah pun bertambah dan menyebabkan volume tanah basah semakin besar sehingga berat volume tanah meningkat. Semakin besar berat volume tanah semakin besar pula derajat kejenuhan. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada derajat kejenuhan inisial, benda uji natural memiliki nilai berat volume tanah sebesar  $15,155 \text{ kN/m}^3$  ( $S_r$  inisial = 66,051). Pada proses pengeringan 2x, pada derajat kejenuhan inisial benda uji natural memiliki nilai berat volume tanah sebesar  $15,19 \text{ kN/m}^3$  ( $S_r$  inisial = 67,158). Pada proses pengeringan 4x, pada derajat kejenuhan inisial benda uji natural memiliki nilai berat volume tanah sebesar  $15,163 \text{ kN/m}^3$  ( $S_r$  inisial = 67,568). Pada proses pengeringan 6x, pada derajat kejenuhan inisial, benda uji natural memiliki nilai berat volume tanah sebesar  $15,089 \text{ kN/m}^3$  ( $S_r$  inisial = 64,331).

#### 4.1.4.10 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum Dengan Berat Volume Tanah Basah

Gambar 4.11(B) adalah kurva hubungan antara modulus geser maksimum dengan berat volume tanah untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan nilai modulus geser maksimum meningkat seiring menurunnya berat volume tanah. Penurunan berat volume tanah diakibatkan berat air yang berkurang. Nilai modulus geser maksimum lebih besar pada tanah natural cenderung lebih besar. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $15,155 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{\text{maks}}$  inisial =  $3457,156 \times 10^3 \text{ kPa}$ ). Pada proses pengeringan 2x, pada modulus geser maksimum inisial benda uji natural memiliki

nilai kepadatan kering sebesar  $15,19 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{\text{maks}}$  inisial =  $2484,03 \times 10^3 \text{ kPa}$ ). Pada proses pengeringan 4x, pada modulus geser maksimum inisial benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $15,163 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{\text{maks}}$  inisial =  $2679,4938 \times 10^3 \text{ kPa}$ ). Pada proses pengeringan 6x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar  $15,089 \text{ kN/m}^3$  ( $G_{\text{maks}}$  inisial =  $2529,446 \times 10^3 \text{ kPa}$ ).

#### **4.1.4.11 Hubungan Antara Kohesi Dengan Derajat Kejenuhan**

Gambar 4.11(C) adalah kurva hubungan antara derajat kejenuhan dengan kohesi untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan bahwa antara derajat kejenuhan dengan kohesi berbanding terbalik yaitu semakin kecil kohesi, maka semakin besar nilai derajat kejenuhan dan sebaliknya. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada derajat kejenuhan inisial, benda uji natural memiliki nilai kohesi sebesar  $218,75 \text{ kPa}$  ( $S_r$  inisial =  $66,051$ ). Pada proses pengeringan 2x, pada derajat kejenuhan inisial benda uji natural memiliki nilai kohesi sebesar  $210,95 \text{ kPa}$  ( $S_r$  inisial =  $67,158$ ). Pada proses pengeringan 4x, pada derajat kejenuhan inisial benda uji natural memiliki nilai kohesi sebesar  $180,25 \text{ kPa}$  ( $S_r$  inisial =  $67,568$ ). Pada proses pengeringan 6x, pada derajat kejenuhan inisial, benda uji natural memiliki nilai kohesi sebesar  $107,8 \text{ kPa}$  ( $S_r$  inisial =  $64,331$ ).

#### **4.1.3.12 Hubungan Antara Modulus Geser Maksimum Dengan Kohesi**

Gambar 4.11(D) adalah kurva hubungan antara modulus geser maksimum dengan kohesi untuk benda uji natural. Kurva tersebut menunjukkan bahwa antara modulus geser maksimum dan kohesi berbanding lurus yaitu semakin turun nilai modulus geser maksimum, kohesi semakin turun (proses pembasahan) dan sebaliknya. Sebagai contoh untuk proses pengeringan 1x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kohesi sebesar  $218,75 \text{ kPa}$  ( $G_{\text{maks}}$  inisial =  $3457,156 \times 10^3 \text{ kPa}$ ). Pada proses pengeringan 2x, pada modulus geser maksimum

inisial benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 210,95 kPa ( $G_{maks}$  inisial =  $2484,03 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 4x, pada modulus geser maksimum inisial benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 180,25 kPa ( $G_{maks}$  inisial =  $2679,4938 \times 10^3$  kPa). Pada proses pengeringan 6x, pada modulus geser maksimum inisial, benda uji natural memiliki nilai kepadatan kering sebesar 107,8 kPa ( $G_{maks}$  inisial =  $2529,446 \times 10^3$  kPa).

## **4.2 Hasil Pengujian Tanah Natural+6% Kapur**

### **4.2.1 Sifat Fisik Tanah Natural+6% Kapur**

Sub-bab ini akan menjabarkan hasil dari tanah natural yang dicampur dengan 6% kapur. Beberapa hasil pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini di antaranya adalah hasil pengujian Atterberg, analisis dan klasifikasi tanah campuran, hasil pengujian Proctor Standard, hasil pengujian triaksial *Unconsolidated Undrained* dan pengeringan-pembasahan.

#### **4.2.1.1 Pengujian Atterberg Limit**

Batas konsistensi tanah atau yang biasa disebut Atterberg Limit merupakan hal yang penting dan selalu dilakukan pada saat pengujian. Pengujian ini khusus dilakukan pada tanah berbutir halus dan dikarenakan batas-batas ini tidak merupakan sifat-sifat fisika yang jelas maka dipakai cara empiris untuk menentukannya. Tanah yang batas cairnya tinggi biasanya mempunyai sifat teknik yang buruk yaitu kekuatannya rendah, sedangkan compressibilitynya tinggi sehingga sulit dalam hal pemadatannya. Kadar air dinyatakan dalam persen, dimana terjadi transisi dari keadaan semi plastis ke semi kaku didefinisikan sebagai batas susut (*shrinkage limits, SL*). Kadar air dimana transisi dari keadaan plastis ke keadaan semi plastis terjadi dinamakan batas plastis (*plastic limits, PL*), dan dari keadaan cair ke keadaan plastis dinamakan batas cair (*liquid limits, LL*). Batas-batas ini yang dinamakan dengan Batas-batas Atterberg. Batas cair tanah natural ditunjukkan pada gambar 4.12 berikut.

## BAB 5

### KESIMPULAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian didapatkan beberapa kesimpulan, yakni:

1. Dari pengujian Proctor Standard, didapatkan prosentase tanah dengan stabilisasi: tanah dengan bio-bakteri mendapatkan hasil optimum pada nilai kepadatan kering optimum ( $\gamma_d$ ) sebesar 13,269 kN/m<sup>3</sup> adalah 7%; tanah dengan *fly ash* mendapatkan hasil optimum pada nilai kepadatan kering optimum ( $\gamma_d$ ) sebesar 13,528 kN/m<sup>3</sup> adalah 5%; tanah dengan kapur mendapatkan hasil optimum pada nilai kepadatan kering optimum ( $\gamma_d$ ) sebesar 12,435 kN/m<sup>3</sup> adalah 6%.
2. Dari hasil analisa saringan dan hydrometer menunjukkan bahwa fraksi lanau-lempung adalah yang paling banyak terkandung dalam tanah residual natural dengan prosentase 74,72%, sehingga masuk ke dalam kategori CL atau Lempung Berpasir.
3. Hasil perbandingan LL, PL dan PI menunjukkan adanya peningkatan dan penurunan pada masing-masing parameter. Terjadi peningkatan dan penurunan nilai LL, PL dan PI pada tanah natural, natural+6% kapur, natural+5% *fly ash* dan natural+7% bio-bakteri. Peningkatan terus terjadi pada parameter PI dengan campuran bio-bakteri sebagai bahan yang memberikan pengaruh paling besar. Sedangkan pada parameter PL, kapur diduga memberikan pengaruh paling besar dan malah menurun dengan bahan *fly ash* maupun bio-bakteri. Secara keseluruhan, bahan campuran kapur meningkatkan parameter LL, PL dan PI pada tanah residual.

4. Pada kurva Proctor Standard, terlihat bahwa kadar air tanah natural dengan yang distabilisasi mengalami kenaikan yang bervariasi, kemudian untuk nilai angka pori mengalami penurunan yang bervariasi pula. Hal ini berarti bahwa benda uji yang distabilisasi memiliki kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji natural. Penambahan air ke dalam benda uji menyebabkan ruang pori yang masih kosong akan terisi oleh air. Semakin banyak air yang ditambahkan, maka akan semakin sedikit ruang pori yang belum terisi oleh air, hingga suatu saat seluruh ruang pori akan terisi air. Bila kondisi ini tercapai maka benda uji berada dalam kondisi jenuh air. Untuk proses pengeringan akan terjadi sebaliknya, dimana penurunan kadar air menyebabkan derajat kejenuhan berkurang. Fenomena lain yang tampak adalah kadar air optimum benda uji yang distabilisasi ( $w_{opt \text{ bio}} = 34,761\%$ ;  $w_{opt \text{ fa}} = 32,260\%$ ;  $w_{opt \text{ kapur}} = 28,548\%$ ) lebih kecil dibandingkan kadar air optimum benda uji natural ( $w_{opt} = 37,701\%$ ). Hal ini berarti bahwa untuk memperoleh kepadatan kering maksimum yang lebih besar, penambahan air yang diperlukan pada benda uji yang distabilisasi lebih sedikit dibandingkan pada benda uji natural.
5. Perubahan kadar air juga berpengaruh terhadap kohesi ( $c_u$ ) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Rentang perubahan antara tanah natural dengan yang terstabilisasi bervariasi, yakni penurunan hingga  $\pm 94\%$  untuk tanah natural+7% bio-bakteri; penurunan  $\pm 28\%$  untuk tanah natural+5% *fly ash* dan peningkatan hingga lebih dari dua kali dari tanah natural untuk tanah natural+6% kapur. Sudut geser dalam berubah dan mengalami peningkatan  $\pm 40\%$  untuk tanah natural+7% bio-bakteri;  $\pm 43\%$  untuk tanah natural+5% *fly ash* dan  $\pm 12\%$  untuk tanah natural+6% kapur.
6. Perubahan benda uji natural terhadap benda uji yang distabilisasi untuk siklus pengeringan pertama menyebabkan penurunan nilai angka pori ( $e$ ) pada kondisi inisial awal

sekitar 7-24% dan peningkatan nilai derajat kejenuhan ( $S_r$ ) dari kondisi awal sekitar 7-26%. Pada siklus 2x pembasahan dengan kadar air yang sama, benda uji natural juga memiliki nilai angka pori yang lebih kecil bila dibandingkan dengan benda uji terstabilisasi, yakni penurunan sekitar 17-26%. Hal ini karena penambahan air ke dalam benda uji menyebabkan ruang pori yang masih kosong akan terisi oleh air. Semakin banyak air yang ditambahkan, maka akan semakin sedikit ruang pori yang belum terisi oleh air, hingga suatu saat seluruh ruang pori akan terisi air. Bila kondisi ini tercapai maka benda uji berada dalam kondisi jenuh air.

Hubungan antara kadar air dengan derajat kejenuhan pada hasil uji tanah natural dan yang distabilisasi mempunyai pola yang sama, bahwa derajat kejenuhan terus meningkat dengan bertambahnya kadar air, hingga mencapai kondisi jenuh. Adapun hubungan derajat kejenuhan dengan tegangan air pori negatif, yakni semakin besar nilai tegangan air pori negatif (*suction*), maka semakin kecil nilai derajat kejenuhannya dan pada saat proses pengeringan menyebabkan nilai tegangan air pori negatif menjadi besar kembali. Sedangkan akibat pengulangan siklus pengeringan-pembasahan pertama dan kedua pada benda uji natural mengakibatkan nilai tegangan air pori negatif cenderung mengecil seiring dengan perubahan nilai derajat kejenuhan. Nilai tegangan air pori semakin kecil pada proses pengeringan 6x.

7. Pada penerapan proses pengeringan 1x, 2x, 4x dan 6x antara modulus geser maksimum dengan berat volume tanah, untuk benda uji natural dan yang distabilisasi menunjukkan nilai modulus geser maksimum meningkat seiring menurunnya berat volume tanah. Penurunan berat volume tanah diakibatkan berat air yang berkurang. Nilai modulus geser maksimum pada tanah yang distabilisasi cenderung lebih besar daripada tanah natural. Hal ini diakibatkan karena tanah

yang distabilisasi memiliki kepadatan tanah yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah natural.

8. Pada penerapan proses pengeringan 1x, 2x, 4x dan 6x antara modulus geser maksimum dengan kohesi, untuk benda uji natural dan yang telah distabilisasi menunjukkan bahwa antara modulus geser maksimum dan kohesi berbanding lurus yaitu semakin turun nilai modulus geser maksimum, kohesi semakin turun (proses pembasahan) dan sebaliknya. Untuk modulus geser maksimum yang sama, nilai kohesi untuk benda uji yang telah distabilisasi lebih kecil dibandingkan nilai kohesi benda uji natural.

## **PERHITUNGAN PENAMBAHAN AIR PADA SIKLUS *DRYING-WETTING***

Perhitungan penambahan air untuk siklus *drying-wetting* akan kami jelaskan melalui contoh. Contoh tanah yang kami gunakan adalah tanah initial *undisturbed* yang telah melalui uji gravimetri-volumetri dan uji *Unconfined Compression*. Keterangan perhitungan akan kami sertakan pada akhir perhitungan berikut.

Berat tanah basah = 18,667 gr

Berat tanah kering = 12,365 gr

$$W_c = \frac{18,667 - 12,365}{12,365} = 50,97\%$$

1. Contoh pada satu sampel UCS

$W_{tot} = 130,714$  gr (pada  $D=3,5$  cm;  $t=8$  cm)

$$W_c = \frac{W_w}{W_{tot} - W_w} \times 100\%$$

$$50,97 = \frac{W_w}{130,714 - W_w} \times 100\%$$

$$W_w = 44,13 \text{ gr}$$

2. Siklus *wetting* 100% ( $W_{sat}$ )

$$S_r = 100\%$$

$$G_s = 2,691$$

$$e = 1,52$$

$$S_r = \frac{W_{sat} \cdot G_s}{e}$$

$$1 = \frac{W_{sat} \cdot 2,691}{1,52}$$

$$W_{\text{sat}} = \frac{1,52}{2,691} = 0,5648$$

3. Siklus *drying* 100% ( $W_d$ )

$$W_{\text{tot}} = 130,714 \text{ gr}$$

$$W_s = 118,359 \text{ gr (air drained 7 hari)}$$

$$\begin{aligned} W_w &= W_{\text{tot}} - W_s \\ &= 130,714 - 118,359 \\ &= 12,365 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$W_d = \frac{W_w}{W_{\text{tot}} - W_w} \times 100\%$$

$$W_d = \frac{12,365}{130,714 - 12,365} \times 100\%$$

$$W_d = 10,448\%$$

$$\begin{aligned} \Delta W &= W_{\text{sat}} - W_d \\ &= 56,48\% - 10,448\% \\ &= 46,032\% \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta W}{10} = \frac{46,032}{10} = 4,6032\%$$

- Contoh penambahan kadar air pada satu prosentase dalam satu siklus:

$$\begin{aligned} W \text{ pada } 10\% &= 10,448\% + n. \left( \frac{\Delta W}{10} \right) \\ &= 10,448\% + 1(4,6032\%) \\ &= 15,0512\% \end{aligned}$$

Penambahan airnya...

$$W = \frac{W_w}{W_{\text{tot}} - W_w} \times 100\%$$

$$15,0512 = \frac{W_w}{130,714 - W_w} \times 100\%$$

$$W_w = 17,1 \text{ gr}$$

$$\begin{aligned}
 W_s &= W_{tot} - W_w \\
 &= 130,714 - 17,1 \\
 &= 113,614 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

Maka, penambahan air pada prosentase pertama, yakni 100%, adalah sebesar 17,1 mL dan berat akhir saat siklus *drying* 100% adalah 113,614 gr.

Keterangan:

- $W_c$  : kadar air (%)
- $W_w$  : berat air (gr)
- $W_s$  : berat tanah (gr)
- $W_{tot}$  : berat tanah total (gr)
- $S_r$  : derajat kejenuhan (%)
- $G_s$  : *specific gravity*
- $e$  : angka pori
- $W_{sat}$  : kadar air dalam keadaan jenuh (%)
- $W_d$  : kadar air siklus *drying* 100%
- $\Delta W$  : Selisih  $W_{sat}$  dan  $W_d$

**LEMBAR KERJA ATTERBERG LIMIT (LL, PL, IP)**  
**(TANAH NATURAL+7% BIO-BAKTERI)**

SNI 03-1966-1967-1990 ; ASTM D.423-59, D424-59 (1972)

(30 Januari 2014)

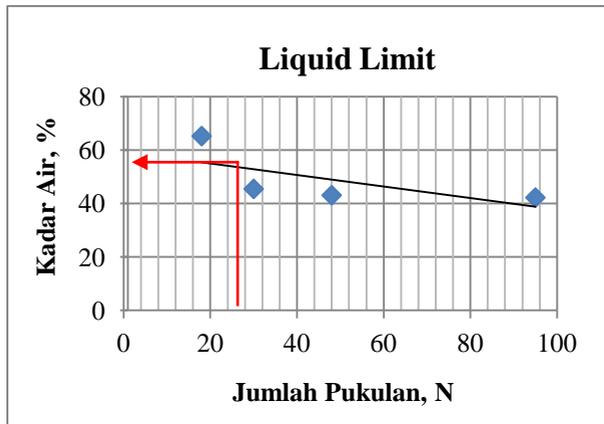
Material Dari : Kemuning Lor, Jember

LIQUID LIMIT (LL)		1	2	3	4	PL
Jumlah Pukulan	N	18	30	48	95	
Nomor Cawan	gr	43	3	93	185	180
Berat Cawan Kosong	gr	40.099	44.258	47.782	39.34	39.274
Berat Cawan + Tanah	gr	46.909	52.428	58.8	45.291	40.029
Berat Cawan + Tanah Kering	gr	44.22	49.874	55.481	43.524	39.869
Berat Air	gr	2.689	2.554	3.319	1.767	0.16
Berat Tanah Kering	gr	4.121	5.616	7.699	4.184	0.595
Kadar Air (Wc) (LL)	%	65.251	45.477	43.109	42.232	26.891

LL = 54

PL = 26,891

PI = 27,109



**LEMBAR KERJA ATTERBERG LIMIT (LL, PL, IP)**  
**(TANAH NATURAL+5% FLY ASH)**

SNI 03-1966-1967-1990 ; ASTM D.423-59, D424-59 (1972)

(27 Januari 2014)

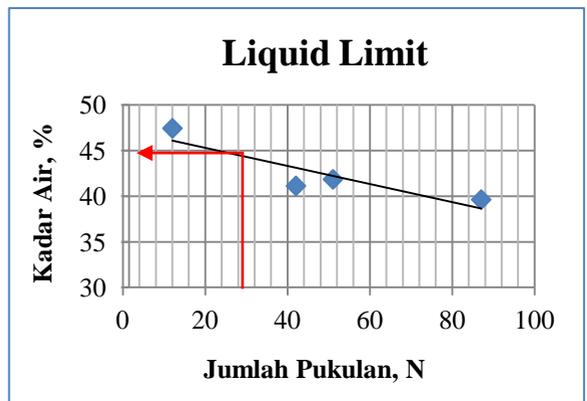
Material Dari : Kemuning Lor, Jember

LIQUID LIMIT (LL)		1	2	3	4	PL
Jumlah Pukulan	N	12	42	51	87	
Nomor Cawan	gr	819	49	45	32	118
Berat Cawan Kosong	gr	50.76	50.709	49.934	40.511	43.14
Berat Cawan + Tanah	gr	56.42	58.488	56.039	50.645	43.864
Berat Cawan + Tanah Kering	gr	54.599	56.221	54.238	47.769	43.707
Berat Air	gr	1.821	2.267	1.801	2.876	0.157
Berat Tanah Kering	gr	3.839	5.512	4.304	7.258	0.567
Kadar Air (Wc) (LL)	%	47.434	41.128	41.845	39.625	27.690

LL = 44,8

PL = 27,690

PI = 17,110



**LEMBAR KERJA ATTERBERG LIMIT (LL,PL, IP)**  
**(TANAH NATURAL+6% KAPUR)**

SNI 03-1966-1967-1990 ; ASTM D.423-59, D424-59 (1972)

(3 Februari 2014)

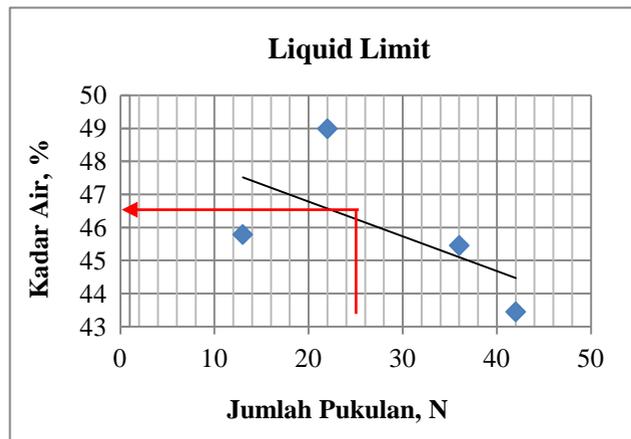
Material Dari : Kemuning Lor, Jember

LIQUID LIMIT (LL)		1	2	3	4	PL
Jumlah Pukulan	N	13	22	36	42	
Nomor Cawan	gr	8	187	34	171	5
Berat Cawan Kosong	gr	42.8	39.514	39.096	46.636	49.592
Berat Cawan + Tanah	gr	50.678	49.709	50.921	58.028	50.724
Berat Cawan + Tanah Kering	gr	48.204	46.357	47.226	54.578	50.432
Berat Air	gr	2.474	3.352	3.695	3.45	0.292
Berat Tanah Kering	gr	5.404	6.843	8.13	7.942	0.84
Kadar Air (Wc) (LL)	%	45.781	48.984	45.449	43.440	34.762

LL = 46,02

PL = 34,762

PI = 11,258





**LABORATORIUM MEKANIKA TANAH DAN BATUAN  
JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS**

Kampus ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya (60111)

Telp : 031-5928601, 5994251 Pesw. 1140 , Fax. 031-5928601

**LEMBAR KERJA  
PROKTOR STANDARD**

(AASHTO T 99-90; ASTM D 698-00; ASTM D 1557-00; SNI 03-1742-1989; SNI 03-1743-1990)

**NATURAL DISTURBED**

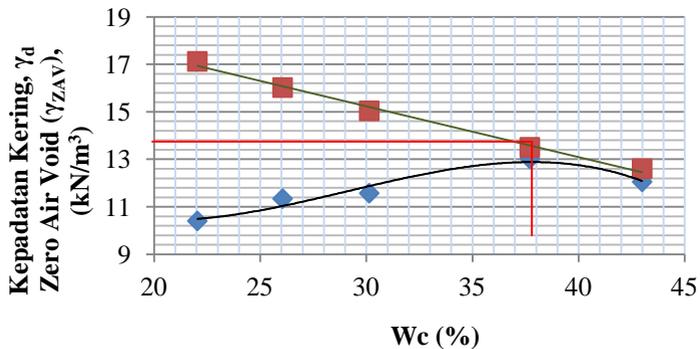
TANGGAL TES :

17 Desember 2013

DIUJI OLEH :

KELOMPOK TA 2013

Nomor cawan		144	56	8	49	28
Berat cawan	gr	50.126	38.996	42.792	38.993	50.242
Berat cawan + tanah	gr	106.757	132.311	112.726	128.262	136.117
Berat cawan + tanah kering	gr	96.53	113.023	96.531	103.821	110.297
Berat tanah basah	gr	56.631	93.315	69.934	89.269	85.875
Berat air	gr	10.227	19.288	16.195	24.441	25.82
Berat tanah kering	gr	46.404	74.027	53.739	64.828	60.055
Berat mold + tanah	kg	5.044	5.195	5.267	5.538	5.472
Berat mold	kg	3.846	3.846	3.846	3.846	3.846
Berat tanah	kg	1.198	1.349	1.421	1.692	1.626
Volume mold	cm <sup>3</sup>	944	944	944	944	944
Berat volume tanah ( $\gamma_t$ )	kN/m <sup>3</sup>	12.691	14.290	15.053	17.924	17.225
Kadar air ( $w_c$ )	%	22.039	26.055	30.136	37.701	42.994
Berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ )	kN/m <sup>3</sup>	10.399	11.336	11.567	<b>13.016</b>	12.046
Zero Air Void ( $\gamma_{zav}$ )	kN/m <sup>3</sup>	17.119	16.017	15.035	13.499	12.599



**LEMBAR KERJA**  
**PROKTOR STANDARD**

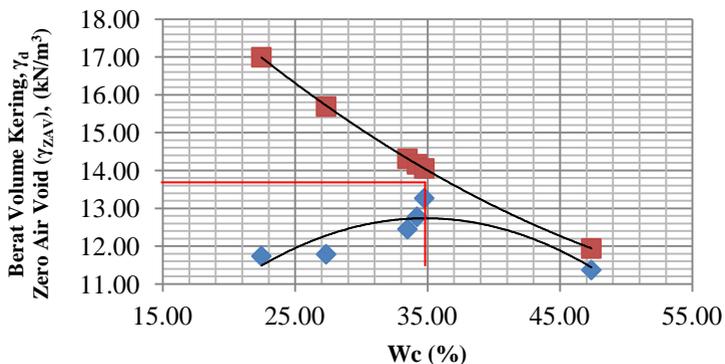
(AASHTO T 99-90; ASTM D 698-00; ASTM D 1557-00; SNI 03-1742-1989; SNI 03-1743-1990)

**Tanah+Biobakteri 7% (DISTURBED)**

TANGGAL TES : 19 Januari 2014

DIUJI OLEH : KELOMPOK TA 2013

		50 mL	100 mL	200 mL	250 mL	300 mL	400 mL	500 mL
Berat cawan	gr	44.551	39.073	39.603	46.179	43.314	49.606	75.829
Berat cawan + tanah	gr	66.551	59.699	62.263	74.961	88.457	71.289	107.44
Berat cawan + tanah kering	gr	62.516	55.269	56.578	67.624	76.812	64.319	98.737
Berat tanah basah	gr	21.999	20.626	22.66	28.782	45.143	21.683	31.614
Berat air	gr	4.035	4.4295	5.685	7.337	11.645	6.97	8.706
Berat tanah kering	gr	17.965	16.197	16.975	21.445	33.499	14.713	22.908
Berat mold + tanah	kg	5.589	5.619	5.801	5.821	5.92	5.784	5.891
Berat mold	kg	4.232	4.202	4.232	4.202	4.232	4.202	4.232
Berat tanah	kg	1.357	1.417	1.569	1.619	1.688	1.582	1.659
Volume mold	cm <sup>3</sup>	944	944	944	944	944	944	944
Berat volume tanah ( $\gamma_t$ )	kN/m <sup>3</sup>	14.375	15.011	16.621	17.150	17.881	16.758	17.574
Kadar air ( $w_c$ )	%	22.461	27.349	33.490	34.213	34.761	47.375	38.005
Berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ )	kN/m <sup>3</sup>	11.738	11.787	12.451	12.779	13.269	11.371	12.734
Zero Air Void ( $\gamma_{zav}$ )	kN/m <sup>3</sup>	16.996	15.692	14.313	14.166	14.057	11.940	13.444





**LABORATORIUM MEKANIKA TANAH DAN BATUAN  
JURUSAN TEKNIK SIPIL FTSP - ITS**

Kampus UTS. Keputih, Sukolilo, Surabaya (60111)

Telp : 031-5928601, 5994251 Pesw. 1140 , Fax. 031-5928601

**LEMBAR KERJA  
PROKTOR STANDARD**

(AASHTO T 99-90; ASTM D 698-00; ASTM D 1557-00; SNI 03-1742-1989; SNI 03-1743-1990)

**Tanah+FA 5% (DISTURBED) [15-35% AIR]**

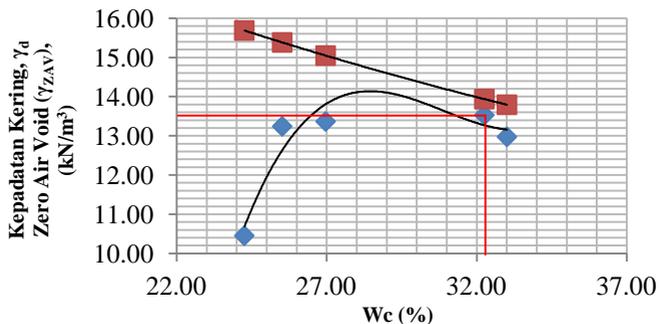
TANGGAL TES :

28 Desember 2013

DIUJI OLEH :

KELOMPOK TA 2013

		15%	20%	25%	30%	35%
Nomor cawan		10	46	48	161	71
Berat cawan	gr	42.051	51.085	41.855	49.349	50.46
Berat cawan + tanah	gr	82.066	70.753	66.896	77.527	77.576
Berat cawan + tanah kering	gr	74.254	66.754	61.577	70.654	70.846
Berat tanah basah	gr	40.015	19.668	25.041	28.178	27.116
Berat air	gr	7.812	3.999	5.319	6.873	6.73
Berat tanah kering	gr	32.203	15.669	19.722	21.305	20.386
Berat mold + tanah	kg	5.458	5.415	5.448	5.921	5.861
Berat mold	kg	4.232	3.846	3.846	4.232	4.232
Berat tanah	kg	1.226	1.569	1.602	1.689	1.629
Volume mold	cm <sup>3</sup>	944	944	944	944	944
Berat volume tanah ( $\gamma_t$ )	kN/m <sup>3</sup>	12.987	16.621	16.970	17.892	17.256
Kadar air ( $w_c$ )	%	24.259	25.522	26.970	32.260	33.013
Berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ )	kN/m <sup>3</sup>	10.452	13.241	13.366	13.528	12.973
Zero Air Void ( $\gamma_{zav}$ )	kN/m <sup>3</sup>	15.686	15.381	15.046	13.936	13.792





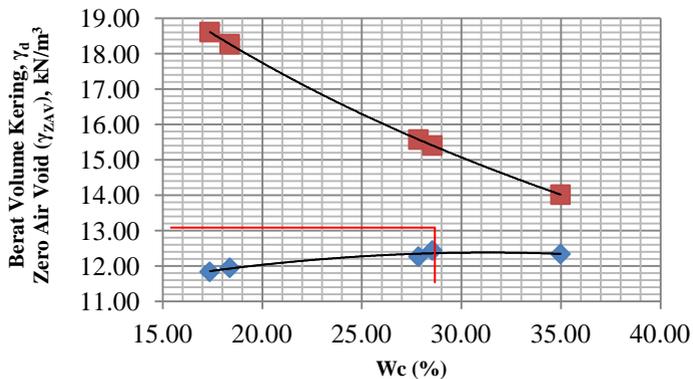
**LEMBAR KERJA**  
**PROKTOR STANDARD**

(AASHTO T 99-90; ASTM D 698-00; ASTM D 1557-00; SNI 03-1742-1989; SNI 03-1743-1990)

**Tanah+Kapur 6% (*DISTURBED*) [15-35%AIR]**

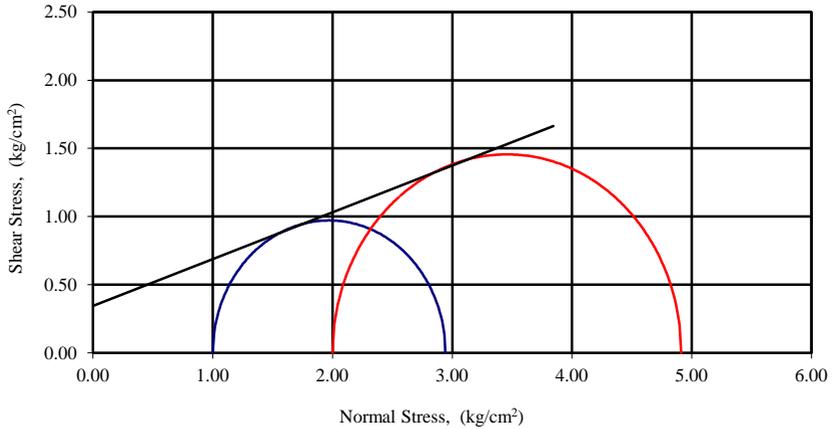
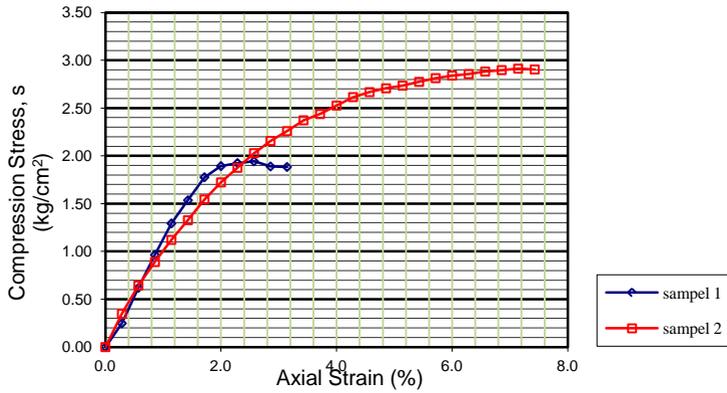
TANGGAL TES : Desember 2013  
 DIUJI OLEH : KELOMPOK TA 2013

		15%	20%	25%	30%	35%
Nomor cawan		201	69	43	11	69
Berat cawan	gr	48.753	48.89	40.099	39.217	48.89
Berat cawan + tanah	gr	94.29	90.223	63.219	64.46	79.46
Berat cawan + tanah kering	gr	87.553	83.808	58.183	58.854	71.537
Berat tanah basah	gr	45.537	41.333	23.12	25.243	30.57
Berat air	gr	6.737	6.415	5.036	5.606	7.923
Berat tanah kering	gr	38.8	34.918	18.084	19.637	22.647
Berat mold + tanah	kg	5.157	5.181	5.712	5.741	5.418
Berat mold	kg	3.846	3.846	4.232	4.232	3.846
Berat tanah	kg	1.311	1.335	1.48	1.509	1.572
Volume mold	cm <sup>3</sup>	944	944	944	944	944
Berat volume tanah ( $\gamma_t$ )	kN/m <sup>3</sup>	13.88771	14.14195	15.67797	15.98517	16.65254
Kadar air ( $w_c$ )	%	17.363	18.372	27.848	28.548	34.985
Berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ )	kN/m <sup>3</sup>	11.833	11.947	12.263	12.435	12.337
Zero Air Void ( $\gamma_{ZAV}$ )	kN/m <sup>3</sup>	18.60802	18.26535	15.57034	15.40238	14.01313



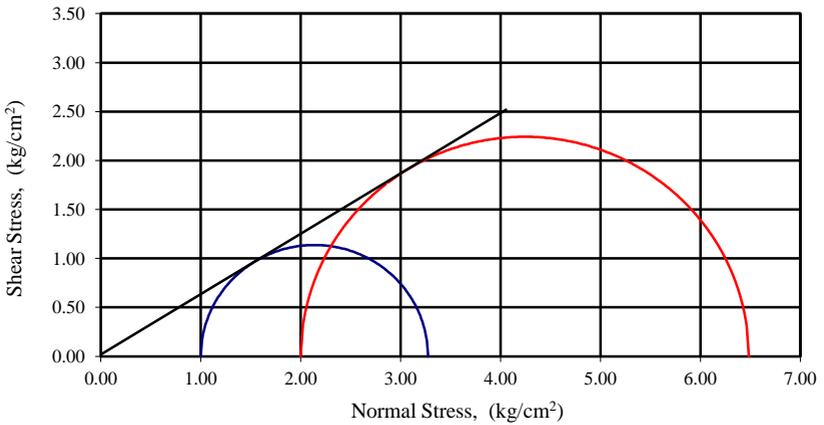
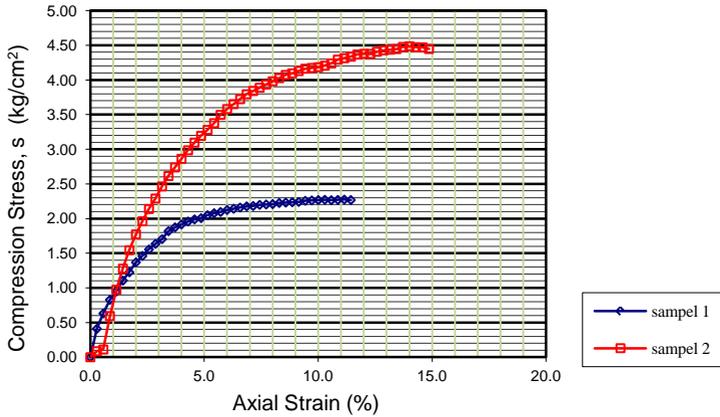
**UNCONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST ( UU Test )  
(Tanah Natural)**

Project : Tugas Akhir 2013-2014  
 Location : Kemuning Lor, Jember  
 Date of Testing : April 25th, 2014  
 Strain Rate : 0.5 %/min



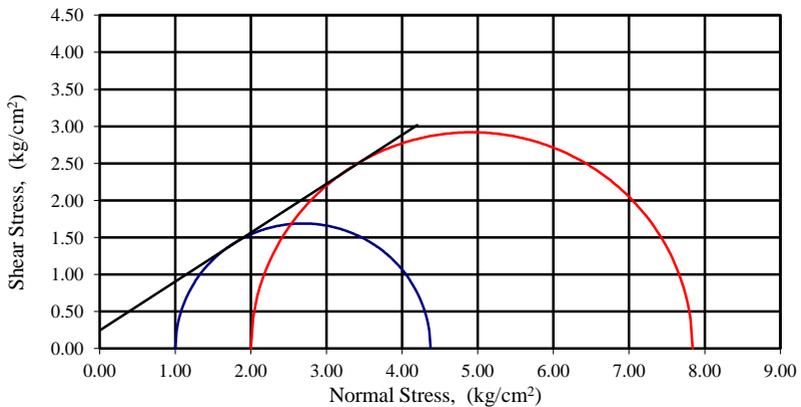
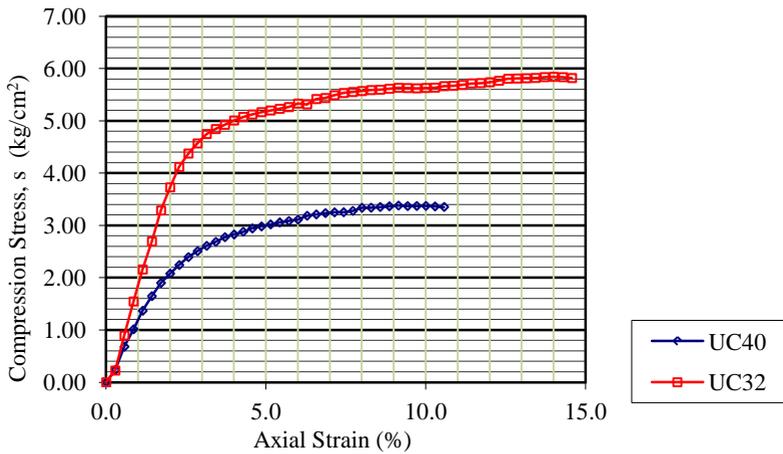
**UNCONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST ( UU Test )**  
**(Tanah Natural+7% Bio-bakteri)**

Project : Tugas Akhir 2013-2014  
Location : Kemuning Lor, Jember  
Date of Testing : April 25th, 2014  
Strain Rate : 0.5 %/min



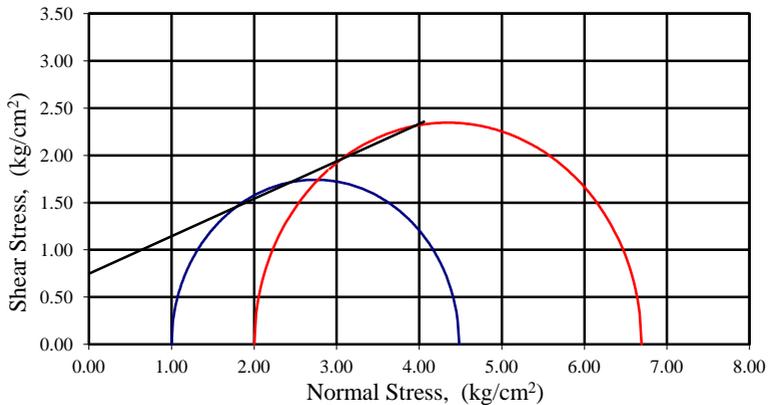
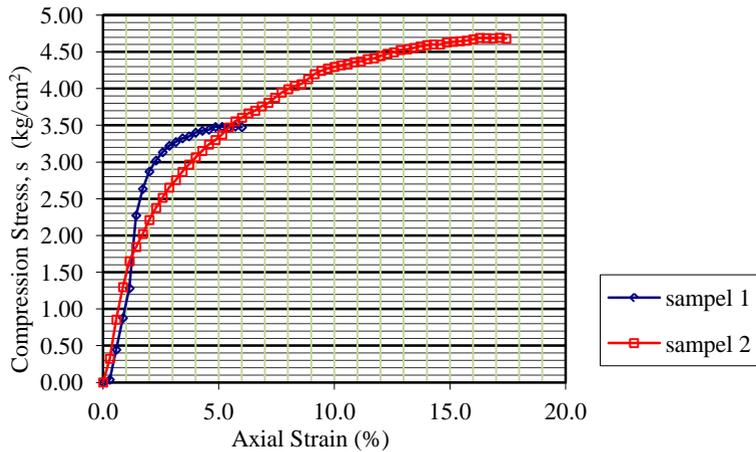
**UNCONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST ( UU Test )**  
**(Tanah Natural+5% Fly Ash)**

Project : Tugas Akhir 2013-2014  
Location : Kemuning Lor, Jember  
Date of Testing : April 25th, 2014  
Strain Rate : 0.5 %/min



**UNCONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST ( UU Test )**  
**(Tanah Natural+6% Kapur)**

Project : Tugas Akhir 2013-2014  
Location : Kemuning Lor, Jember  
Date of Testing : April 25th, 2014  
Strain Rate : 0.5 %/min







Penulis dilahirkan di Surabaya, 18 Juni 1991, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Angkasa IV Surabaya, SDN Dr. Soetomo VI Surabaya, SMP GIKI I Surabaya dan SMAN 5 Surabaya. Setelah lulus dari SMA tahun 2009, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS pada tahun 2009 dan terdaftar dengan NRP

3109100075.

Di jurusan Teknik Sipil ini Penulis mengambil Bidang Studi Geologi Teknik. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh Jurusan, Badan Eksekutif Lembaga Mahasiswa FTSP (BE-LM FTSP) dan Himpunan Mahasiswa Sipil (HMS).



Penulis dilahirkan di Sidoarjo, 20 Mei 1991, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Dharma Wanita Sidoarjo, SDN Siring 1 Sidoarjo, SMPN 1 Candi Sidoarjo dan SMAN 1 Sidoarjo. Setelah lulus dari SMA tahun 2009, Penulis mengikuti PMDK Mandiri dan diterima di Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS pada tahun 2009 dan terdaftar

dengan NRP 3109100004.

Di jurusan Teknik Sipil ini Penulis mengambil Bidang Studi Geoteknik. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh Jurusan.



Penulis dilahirkan di Surabaya, 13 Juli 1991, merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Dharma Wanita Taman, SDN Geluran 1 Sidoarjo, SMPN 1 Taman Sidoarjo dan SMA Bhayangkari 1 Surabaya. Setelah lulus dari SMA tahun 2009, Penulis mengikuti PMDK Mandiri dan diterima di Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS pada tahun 2009 dan terdaftar

dengan NRP 3109100041.

Di jurusan Teknik Sipil ini Penulis mengambil Bidang Studi Geologi Teknik. Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Sipil (HMS) dan juga di beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh Jurusan.