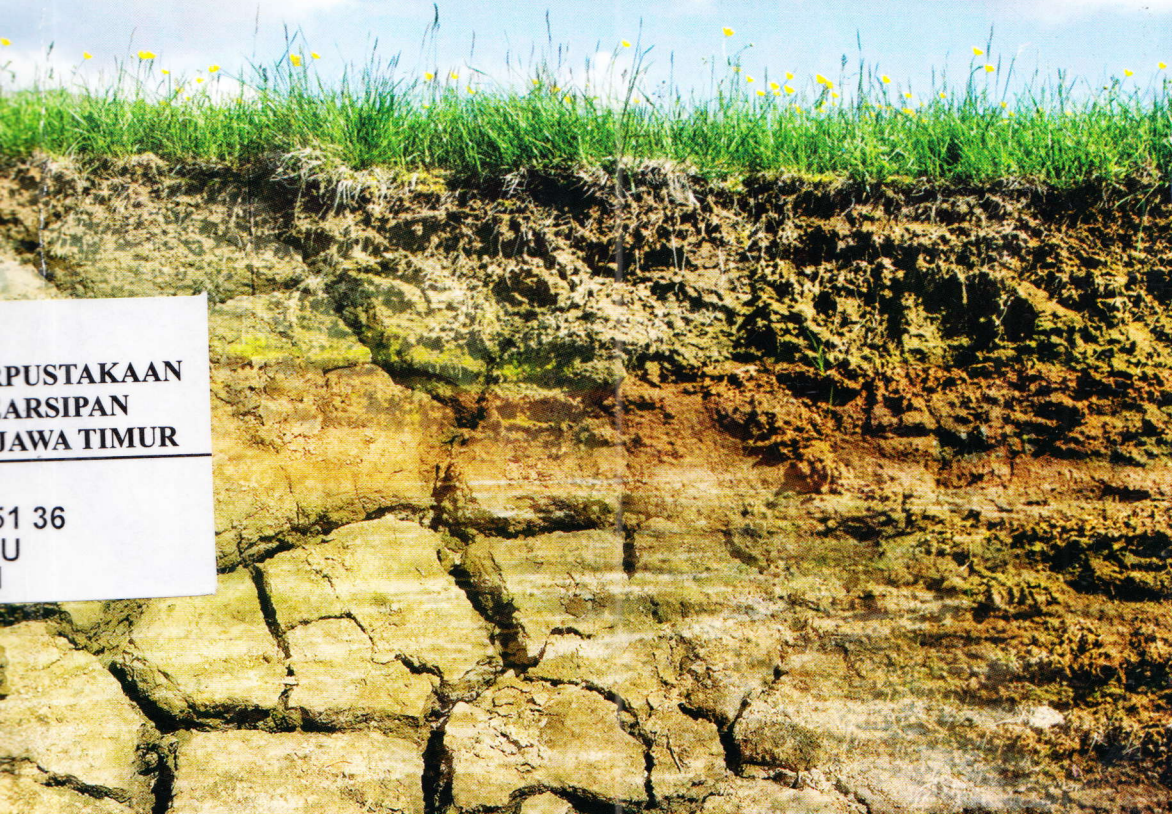
GRAHA ILMU

Dr. Agus Tugas Sudjianto, S.T., M.T.

Tanah Ekspansif

Karakteristik & Pengukuran Perubahan Volume



RPUSTAKAAN
ARSIPAN
JAWA TIMUR

51 36
U

Tanah Ekspansif

Karakteristik & Pengukuran Perubahan Volume

Dr. Agus Tugas Sudjianto, S.T., M.T.

GRAHA ILMU

MILIK
Badan Perpustakaan
dan Kearsipan
Propinsi Jawa Timur
5875/BPK/P/2016

TANAH EKSPANSIF; Karakteristik & Pengukuran Perubahan Volume,
oleh Dr. Agus Tugas Sudjianto, S.T., M.T.
Hak Cipta © 2015 pada penulis

GRAHA ILMU
Ruko Jambusari 7A Yogyakarta 55283
Telp: 0274-882262; 0274-889398; Fax: 0274-889057;
E-mail: info@grahailmu.co.id

Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, secara elektronis maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

ISBN: 978-602-262-490-5
Cetakan Pertama, tahun 2015

Semua informasi tentang buku ini, silahkan scan QR Code di cover belakang buku ini

KATA PENGANTAR

Tanah ekspansif merupakan salah satu jenis tanah bermasalah bagi bangunan teknik sipil di dunia. Tanah ini akan mengalami perubahan volume akibat fluktuasi kadar air, perilakunya akan mengembang ketika kondisi tanah basah dan akan menyusut ketika kondisi tanah kering, sehingga tanah ini sering disebut tanah kembang susut atau tanah bergerak.

Tanah ekspansif banyak didominasi oleh tanah berbutir halus jenis lempung dan lanau. Tanah ini sangat sensitif terhadap air karena adanya kandungan mineral *montmorillonite*, mineral ini akan menyebabkan tanah mengembang ketika kontak dengan air. Sehingga tanah lempung atau lanau yang tidak mengandung mineral *montmorillonite* tidak akan mengalami pengembangan.

Pengembangan dan penyusutan tanah ekspansif berdampak terhadap kerusakan bangunan ringan dan jalan raya. Kerusakan bangunan ringan yang terjadi retak-retak pada dinding dan lantai hingga pondasi, sedangkan pada jalan raya mulai retak memanjang hingga retak longitudinal. Akibat kerusakan ini, hampir semua negara yang memilikki kandungan tanah ekspansif mengalami kerugian yang cukup banyak, bahkan di Amerika Seri-

kat, kerusakan yang diakibatkan oleh tanah ekspansif melebihi kerusakan yang diakibatkan oleh angin tornado.

Pada buku ini dijabarkan dua hal terpenting, yaitu karakteristik tanah ekspansif dan metode pengukuran perubahan volume. Karakteristik tanah ekspansif sangat kompleks yang dipengaruhi oleh faktor eksteren dan interen butiran tanah tersebut. Faktor Eksteren dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar terutama iklim. Di Negara tropis seperti Indonesia, proses pembasahan akibat hujan dan pengeringan akibat kemarau menyebabkan tanah ekspansif akan mengalami perubahan volume secara rutin. Sedangkan faktor interen yang mempengaruhi perubahan volume butiran tanah ekspansif adalah sifat tanah ekspansif tersebut terutama mineral lempung yang mengandung *montmorillonite*. Dengan adanya perubahan volume yang terjadi pada tanah ekspansif maka pada penjabaran yang kedua pada buku ini, penulis memberikan metode pengukuran perubahan volume yang terjadi pada tanah ekspansif dengan metode secara langsung maupun tidak langsung.

Karakteristik tanah ekspansif khususnya pengembangan (*swelling*) selain perilaku kembang vertikal (1D) juga diberikan konsep pengembangan secara volumetrik (3D). Demikian pula metode untuk mengukur perubahan volume tanah ekspansif, selain metode pengukuran *swelling* vertikal (1D), di buku ini diberikan metode pengukuran *swelling* tanah ekspansif secara volumetrik (3D).

Buku ini disusun oleh penulis berdasarkan kajian literatur dan hasil-hasil penelitian yang penulis lakukan selama ini. Dengan hadirnya buku ini, diharapkan pembaca dapat dengan mudah untuk mengetahui ciri dan perilaku tanah ekspansif serta dapat memprediksi atau mengukur perubahan volume yang terjadi pada tanah tersebut.

Penyajian buku ini telah diusahakan sebaik mungkin, namun penulis menyadari masih banyak kekurangan yang harus dilengkapi. Untuk itu, demi kesempurnaan penyajian buku ini, penulis mengharapkan kritik dan saran para pembaca.

Ahirnya penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas perhatian, pengertian dan dukungannya dari istriku tersayang **Wahyu Bekti, SE**, dan putra-putraku tercinta: **Muhamad Zulfikar Darmawan** dan **Muhamad Iqbal Devanto.**

Malang, Desember 2014

Dr. Agus Tugas Sudjianto, S.T, M.T.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR		**v**
DAFTAR ISI		**ix**
BAB I	**PENDAHULUAN**	**1**
	1.1 Definisi Tanah Ekspansif	1
	1.2 Penyebaran Tanah Ekspansif	2
	1.3 Kerugian Akibat Tanah Ekspansif	5
BAB II	**KARAKTERISTIK TANAH LEMPUNG EKSPANSIF**	**11**
	2.1 Mineral dan Struktur Kristal Tanah Lempung Ekspansif	11
	2.2 Mikro Struktur Tanah Lempung Ekspansif	18
	2.3 Pengaruh Air Pada Tanah Lempug Ekspansif	23
BAB III	**IDENTIFIKASI TANAH EKSPANSIF**	**27**
	3.1 Umum	27
	3.2 Metode Tidak Langsung	27
	3.3 Metode Langsung	37
	3.4 Metode Kombinasi	41
	3.5 Metode Mineralogi	47

BAB IV KLASIFIKASI TANAH LEMPUNG EKSPANSIF 63
4.1 Umum 63
4.2 Klasifikasi Tanah Sistem *Cassagrande* 64
4.3 Klasifikasi Tanah Sistem Merwe 66
4.4 Klasifikasi Tanah Berdasarkan Aktivitas (A) Tanah 67
4.5 Klasifikasi Tanah Sistem Holtz dan Gibbs 71

BAB V PERUBAHAN VOLUME TANAH LEMPUNG EKSPANSIF 75
5.1 Umum 75
5.2 Kembang Susut Tanah Lempung Ekspansif 77
5.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kembang – Susut Tanah 79
5.4 Pengembangan 82
5.5 Parameter Pengembangan 85
5.6 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Pengembangan 88
5.7 Penyusutan 110

BAB VI MENGUKUR PERUBAHAN VOLUME 115
6.1 Umum 115
6.2 Uji Pengembangan (*Swelling Test)* 116
6.3 Uji Kembang bebas (*Free Swelling Test*) 144
6.4 Uji Tekanan Pengembangan (*Swelling Pressure Test*) 150
6.5 Uji Penyusutan 157

DAFTAR PUSTAKA 163

-oo0oo-

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 DEFINISI TANAH EKSPANSIF

Setiap pekerjaan teknik sipil tidak lepas dengan aspek yang paling penting yaitu tanah. Sejumlah masalah dengan bangunan teknik sipil yang sering dijumpai di lapangan adalah akibat dari sifat-sifat teknis tanah yang buruk, yang ditandai dengan kadar air tanah yang tinggi, kompresibilitas yang besar dan daya dukung yang rendah. Sebagian dari jenis tanah yang memiliki sifat buruk tersebut adalah tanah yang mudah mengalami kembang susut besar (Sudjianto, 2012).

Beberapa jenis tanah yang memiliki potensi kembang susut besar adalah tanah yang dapat mengalami perubahan volume secara signifikan seiring dengan perubahan kadar airnya. Tanah jenis ini merupakan tanah lempung yang banyak mengandung mineral-mineral dengan potensi kembang tinggi. Tanah dengan kondisi seperti ini sering disebut sebagai tanah lempung ekspansif (Hardiyatmo, 2006).

Tanah lempung ekspansif adalah salah satu jenis tanah berbutir halus berukuran koloidal yang terbentuk dari mineral-mineral ekspansif yaitu: *montmorillonite*, *illite*, *kaolinite*, *halloysite*, *chlorite*, *vermiculite*, dan *attapulgite* (Chen, 1975). Tanah lempung ekspansif ini memiliki po-

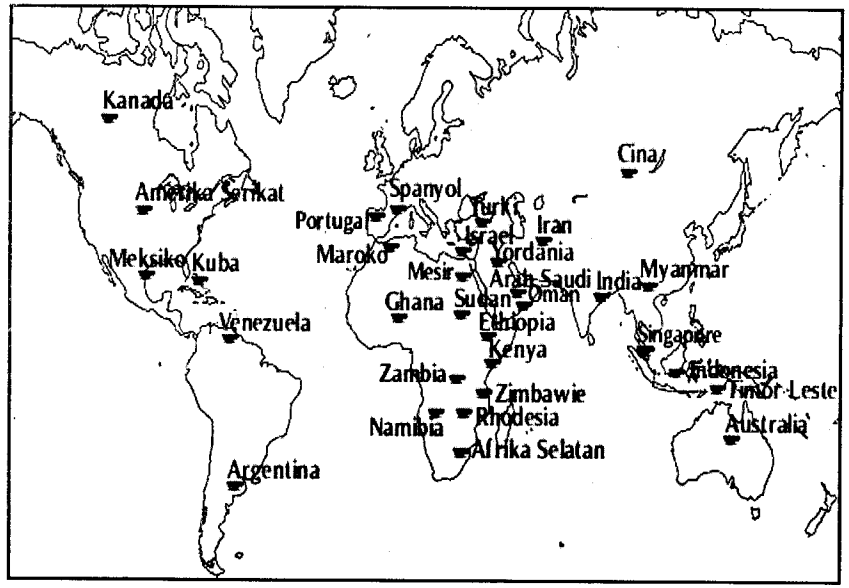
tensi kembang - susut yang tinggi, apabila terjadi perubahan kadar air. Sifat kembang - susut ini berhubungan langsung dengan kadar mineral lempung khususnya mineral *montmorillonite* dan *illite*. Bila kadar mineral lempung naik, maka luas permukaan akan naik, dan batas cair serta indeks plastisitas akan naik, sehingga potensi kembang - susut akan naik (Muhunthan, 1991).

Fenomena pengembangan pada tanah ekspansif terjadi pada kondisi pembasahan dengan nilai derajat kejenuhan (S_r) < 1, berarti tanah berada pada kondisi tidak jenuh. Pada kondisi tidak jenuh ini, maka tanah ekspansif terdiri dari tiga fase, yaitu: butiran, air dan udara, sehingga menghasilkan nilai *suction*. Akibat perubahan nilai derajat kejenuhan (S_r) dan angka pori (e), maka nilai *suction* akan naik, sehingga *suction* yang terjadi pada tanah ekspansif akan mempengaruhi perilaku kembang – susut tanah tersebut (Rifa'i, 2002).

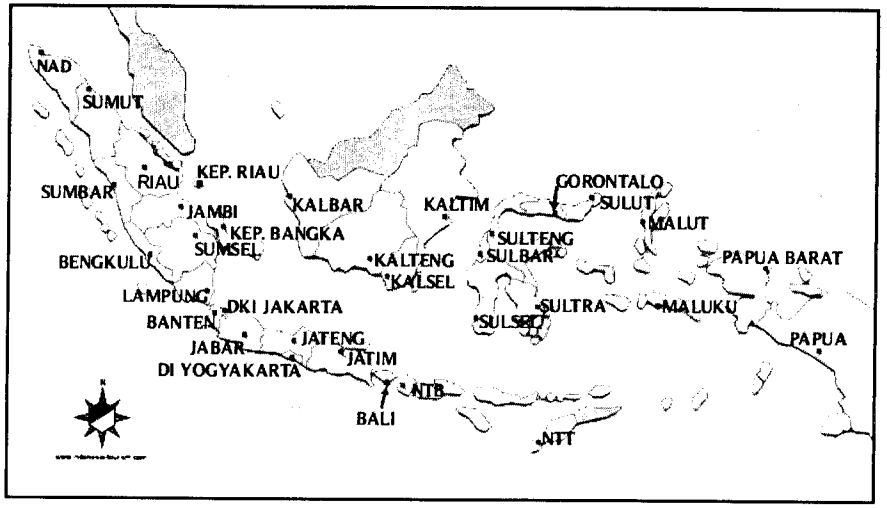
1.2 PENYEBARAN TANAH EKSPANSIF

Penyebaran tanah ekspansif, terdapat hampir di seluruh daratan di dunia. Tanah lempung ekspansif dapat ditemukan di banyak tempat seperti yang disampaikan oleh Chen (1975) dan Sudjianto (2012), yaitu Argentina, Arab Saudi, Afrika Selatan, Amerika Serikat, Australia, Cina, Ethiopia, Ghana, India, Indonesia, Iran, Israel, Kanada, Kenya, Kuba, Meksiko, Maroko, Myanmar, Namibia, Oman, Yordania, Portugal, Rhodesia, Singapore, Sudan, Spanyol, Timor Leste, Turki, Venezuela, Zambia dan Zimbawie. Sebaran tanah ekspansif tersebut seperti pada Gambar 1.1.

Di Indonesia, ditinjau dari kejadian tanahnya, hampir 65% tanah yang ada di Indonesia merupakan tanah laterit, tanah ini merupakan tanah ekspansif yang mempunyai kembang susut yang besar (Tuti dan Sularno, 1985). Mochtar (2000) dan Sudjianto (2007) menyatakan, tanah lempung ekspansif hampir terdapat di seluruh Indonesia, mulai dari Nangroeh Aceh Darusalam (NAD) sampai ke Papua. Sebaran tanah lempung ekspansif tersebut seperti pada Gambar 1.2.



Gambar 1.1 *Sebaran Tanah Ekspansif di Dunia (Chen, 1975 Dan Sudjianto, 2012).*

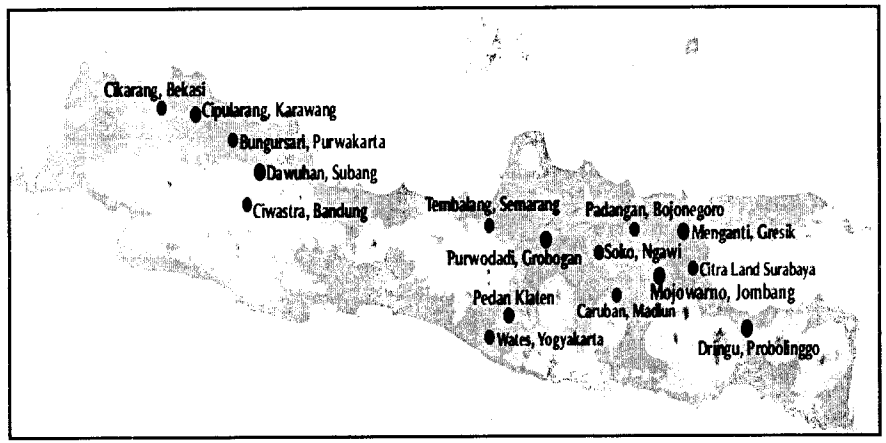


Gambar 1.2 *Sebaran Tanah Lempung Ekspansif di Indonesia (Sudjianto, 2012).*

Tanah lempung ekspansif juga banyak dijumpai di daerah gunung berapi karena merupakan jenis tanah residu, misalnya di Cikarang, Karawang, Plered, Surabaya barat dan lain-lain, juga ditemukan pada daerah yang memiliki curah hujan dibawah normal, dimana evaporasi jauh leboh besar dibandingkan dengan presipitasinya, seperti di Maluku dan Nusa Tenggara. Pada daerah-daerah tertentu seperti di Padalarang (Bandung), Bongas (Cirebon), Pegunungan Kapur Utara juga sebagian besar tanahnya adalah ekspansif (Rahrdjo dan Santosa, 2002).

Hardiyati dan Wardani (2004) menyatakan, Tanah lempung ekspansif di Indonesia terdapat di Nusa Tenggara Timur, Pulau Batam dan Pula jawa. Khusus di Pulau Jawa, tanah lempung ekspansif terdapat di beberapa daerah seperti di Jawa tengah (Semarang, Purwodadi, Kudus dan Cepu), Jawa Barat (Cikampek, Cikarang, Serang dan Bandung), Jawa Tengah bagian selatan (Ngawi, Caruban, Solo, Sragen, Wates dan Jogjakarta).

Sudjianto (2007) melakukan identifikasi tanah lempung ekspansif yang ada di Pulau Jawa, lokasi identifikasi mulai dari wilayah Jawa Timur sampai Jawa Barat seperti pada Gambar 1.3 dengan hasil identifikasi tersebut seperti pada Tabel 1.1.



Gambar 1.3 *Lokasi Tanah Lempung Ekspansif di Pulau Jawa (Sudjianto, 2007).*

Tabel 1.1 *Potensi Kembang Tanah Lempung Ekspansif di Pulau Jawa*

No	Lokasi Sampel	Batas Konsistensi Tanah				Potensi kembang
		LL (%)	PL (%)	SL (%)	IP (%)	
1.	Citra Land, Surabaya	1 0 4 , 56	46, 78	37, 90	57, 78	Tinggi
2	Menganti, Gresik	55, 00	19, 20	11, 56	35, 80	Sedang
3.	Dringu, Probolinggo	66, 75	35, 25	16, 15	31, 50	Sedang
4	Mojowarno, Jombang	79, 24	41, 65	12, 30	37, 59	Sedang
5.	Caruban, Madiun	72, 00	24, 00	15, 50	48, 00	Tinggi
6.	Saradan, Nganjuk	87, 37	29, 39	16, 20	57, 98	Tinggi
7.	Padangan, Bojonegoro	85, 00	30, 00	9, 06	55, 00	Tinggi
8.	Soko, Ngawi	1 0 1 , 00	29, 77	10, 70	71, 23	Sangat Tinggi
9.	Tembalang, Semarang	87, 50	21, 55	15, 15	59, 95	Timggi
10.	Purwodadi, Grobogan	89, 17	37, 16	15, 10	51, 15	Tinggi
11.	Pedan, Klaten	91, 30	29, 55	14, 10	61, 75	Sangat Tinggi
12	Wates, Jogjakarta	81, 10	28, 10	10, 46	53, 00	Tinggi
13.	Bungursari, Purwakarta	96, 20	22, 35	25, 90	73, 85	Sangat Tinggi
14.	Dawuhan, Subang	1 0 5 , 25	28, 75	42, 50	76, 50	Sangat Tinggi
15.	Cikampek, Karawang	63, 17	27, 52	15, 10	35, 65	Tinggi
16.	Ciwastra, Bandung	99, 10	31, 65	18, 55	67, 45	Tinggi

1.3 KERUGIAN AKIBAT TANAH EKSPANSIF

Kembang susut merupakan permasalahan yang sering terjadi pada jenis tanah lempung ekspansif. Fenomena kembang - susut yang tinggi pada tanah ekspansif dapat menimbulkan kerusakan pada bangunan ringan dan jalan raya (Hardiyatmo, 2006). Jones & Holtz (1973) melaporkan, di Amerika Serikat, kerugian yang diakibatkan oleh masalah tanah ekspansif ternyata melebihi bencana alam lainya, termasuk kerugian yang diakibatkan oleh gempa bumi dan angin tornado, kerugiannya diperkirakan sekitar $ 9 juta.

Hal yang sama juga dilaporkan oleh Chen (1975), jumlah kerugian yang disebabkan oleh kembang susut tanah ekspansif seperti pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 *Perkiraan Kerugian Akibat Tanah Ekspansif (Chen, 1975)*

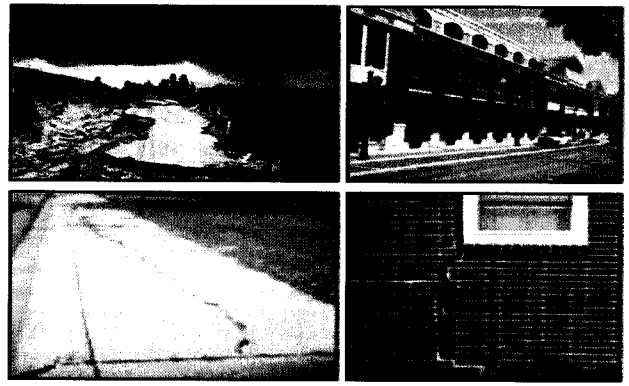
Kategori Kontruksi	Perkiraan kerugiam rata-rata per tahun, (dalam juta dolar Amerika, $)
Rumah tinggal	300
Gedung komersial	360
Gedung bertingkat	80
Areal parker	110
Jalan raya	1.140
Bangunan bawah tanah	100
Bandara	40
Daerah hunian	25
Lainya	100
	2.225

Menurut data dari *Federal Emergency Agency* (FEMA) pada tahun 1982, kerugian akibat tanah ekspansif pada tahun 1970 di USA mencapai $ 798.100.000 (Nelson dan Miller, 1992). Gourley, dkk. (1993) menyatakan, setiap tahun kerusakan gedung, struktur bangunan dan jalan yang diakibatkan oleh tanah ekspansif diprediksi sekitar $150.000.000 di UK, sekitar $100.000.000 di USA, dan bahkan mencapai milyaran Dollar di seluruh dunia.

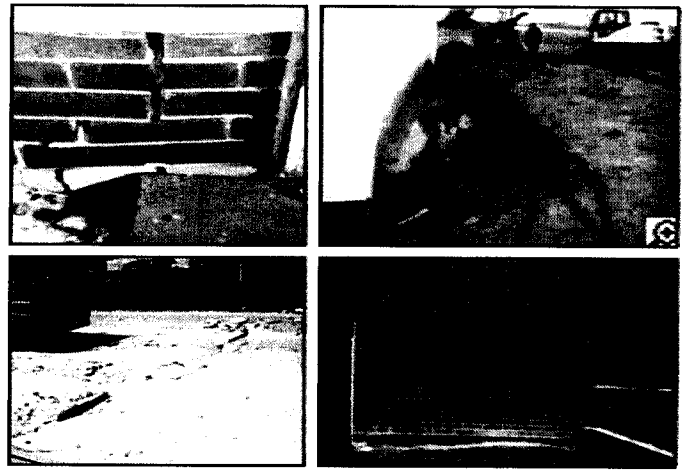
Contoh kerusakkan akibat tanah ekspansif di negara Canada, Amerika Serikat dan Meksiko seperti pada Gambar 1.4 – Gambar 1.6. Hampir semua kerusakkan yang terjadi di dominasi oleh bangunan rumah tinggal, jalan raya dan draenase perkotaan.

Di Indonesia, jumlah kerugiannya belum dilaporkan secara rinci, namun dari penelitian dan survei yang telah lakukan oleh pihak Bina Marga dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan Departemen Pekerjaaan Umum tahun 1992, banyak kerusakan yang terjadi pada beberapa ruas jalan di Pulau Jawa disebabkan oleh masalah tanah lempung ekspansif (Mochtar, 2000); misalnya seperti pada ruas jalan Soko, Kabupaten Ngawi, Propinsi Jawa Timur, eperti pada Gambar 1.7 yang merupakan jalur

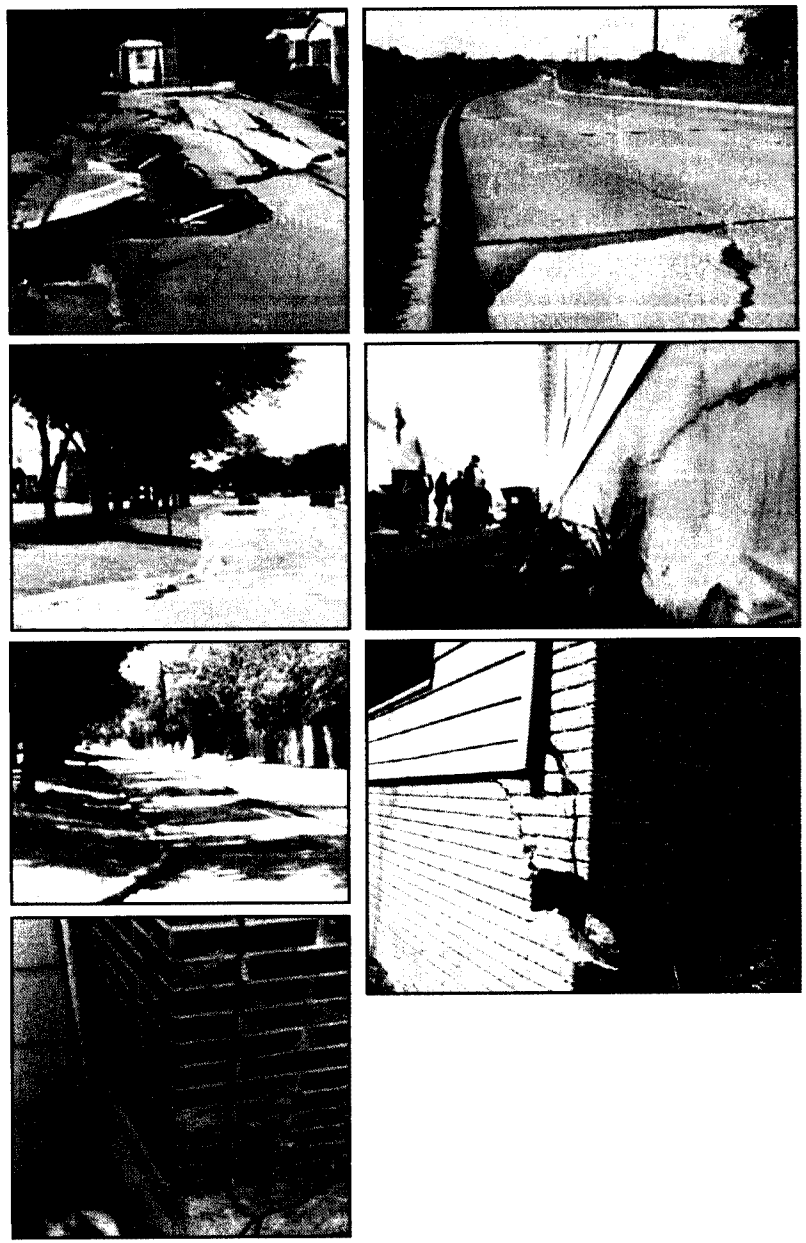
utama menghubungkan wilayah Jawa Timur dan Jawa Tengah. Kerusakan jalan pada ruas Soko, Ngawi tersebut paling dominan akibat terjadinya kembang – susut pada tanah dasarnya yang mengandung tanah lempung ekspansif dengan potensi kembang yang sangat tinggi (Sudjianto, 2007). Kerusakan juga terjadi pada rumah tinggal di daerah Soko (Ngawi) dengan retaknya dinding dan lantai, serta retaknya dinding pangkal jembatan pada ruas jalan tersebut.



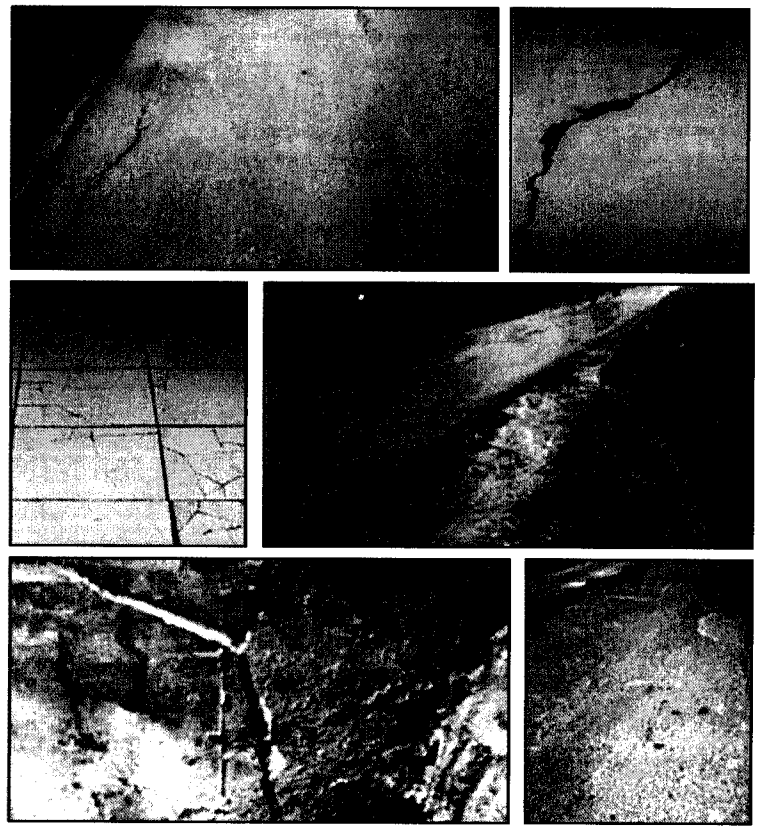
Gambar 1.4 *Kerusakan Bangunan Akibat Tanah Ekspansif di Canada.*



Gambar 1.5 *Kerusakan Bangunan Akibat Tanah Ekspansif di Texas Amerika Serikat.*



Gambar 1.6 *Kerusakan Bangunan Akibat Tanah Ekspansif di Meksico.*



Gambar 1.7 *Kerusakan Jalan dan Bangunan Rumah Tinggal di Soko, Kabupaten Ngawi (Sudjianto, 2007).*

-oo0oo-

BAB II

KARAKTERISTIK TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

2.1 MINERAL DAN STRUKTUR KRISTAL TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

Lempung merupakan partikel *crystalline* yang kecil yang tergabung dalam kelompok kecil mineral. Mineral lempung merupakan salah satu dari jenis mineral yang ada di alam. Di alam ada sekitar 24 jenis mineral utama dan masing-masing mineral utama terbagi dalam sub mineral yang berjumlah 517 mineral (Perera, 1997). Thomas (1998) membuat komposisi kimia dan muatan lapisan mineral lempung seperti terlihat pada Tabel 2.1.

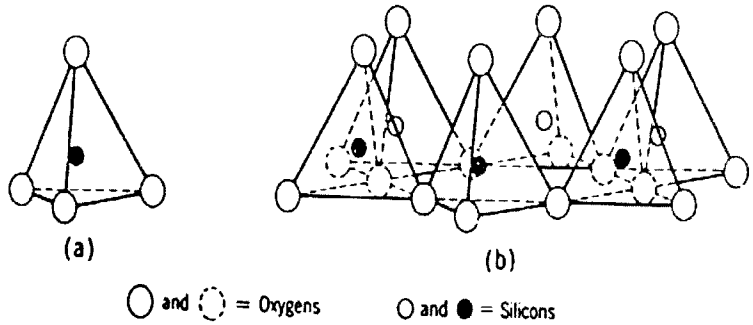
Tabel 2.1 *Susunan Kimia dan Muatan Lapisan Mineral Lempung*

Mineral	Formula Kimia	Muatan per unit sel		Muatan lapisan
		Tetraherdal	*Octahedral*	
		Equivalent mole^{-1}		
Kaolinite	$Si_4Al_4O_{10}(OH)_8$	0	0	0
Montmorillonite	$Ca_{0,66}Si_8(Al_{3,34}Mg_{0,66})_{20}(OH)_4$	0	-0,66	-0,66
Vermiculite	$Ca_{1,48}(Si_{7,12}Al_{0,88})(Al_{2,8}Mg_{0,6}Fe_{0,6})O_{20}(OH)_4$	-0,88	-0,60	-1,48
Muscovite	$K_2(Si_6Al_2)Al_4O_{20}(OH)_4$	-2,0	0	-2,0
Chlorite	$Mg_{0,6}Al_{3,8}(Si_{7,8}Al_{0,2})(Al_3, Mg_{0,4})O_{20}(OH)_4$	-0,2	-0,4	-0,6

Mineral lempung tersebut terdiri dari silikon, almunium atau magnesium, oksigen dan hidrogen. Bebarapa tanah lempung juga memiliki sodium potasium atau kalsium. Komposisi kimia tersebut sangat rumit, tetapi semua itu dapat dirangkum ke dalam *hydrous aluminosilicates*.

Ikatan kimia dalam mineral lempung juga sangat rumit, kebanyakan pengikatnya adalah tingkat kovalen dan ion yang mengikat antara silikon dan oksigen, almunium dan oksigen, magnesium dan oksigen, hidrogen dan oksigen. Sejumlah kation (sodium, potassium, dan kalsium) terikat ke oksigen oleh ikatan ion. Ikatan hidrogen dan ikatan *van der Waal's* harus diperhatikan dalam mengamati suatu struktur kristal mineral lempung.

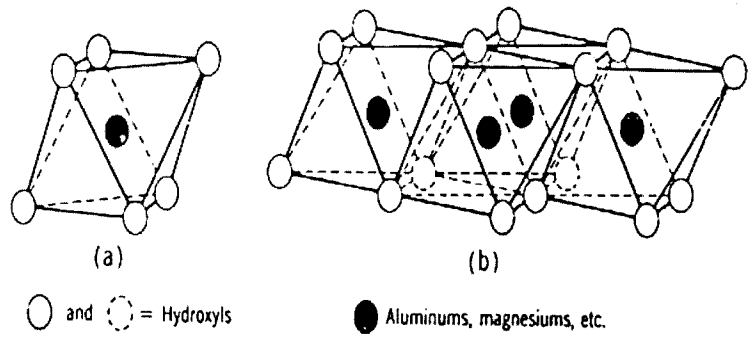
Dasar struktur kristal mineral lempung terdiri beberapa lapisan. Masing-masing lapisan terdiri dari lembaran yang menyelip satu sama lain. Salah satu disebut lembaran tetrahedral dan terdiri atas silikon dioksida. Lembaran lainnya disebut lembar oktahedral terdiri atas almunium hidroksida atau magnesium hidroksida. Lembaran tersebut menyelip bersama-sama, yaitu satu atau dua lembar tetrahedral dengan satu lembar oktahedral. Penggolongan mineral lempung didasarkan pada struktur dari lapisan ini, apakah terdiri dari dua atau tiga lembar dan apakah lembar oktahedral terdiri atas almunium oksida atau magnesium oksida.



Gambar 2.1 *Struktur dari Silika Tetrahedral. (a) Tetrahedral Tunggal, dan (b) Susunan Lembaran Tetrahedral pada Jaringan Heksagonal (Mitchell, 1992).*

Pada lembar silika, unit dasarnya adalah silika tetrahedron, seperti pada Gambar 2.1. Gambar ini disebut tetrahedron sebab mempunyai empat sisi. Di dalam unit ini atom silikon terikat pada 4 atom oksigen. Masing-masing tetrahedron terbagi 3 dengan 4 oksigen untuk membentuk suatu lembaran struktur heksagonal.

Pada lembar almunium atau magnesium, unit dasarnya adalah oktahedron (terdiri dari 8 sisi) seperti pada Gambar 2.2. Unit ini terbentuk oleh atom almunium atau atom magnesium dan ion hidroksil (OH^-). Atom almunium terikat pada 6 ion hidroksil.

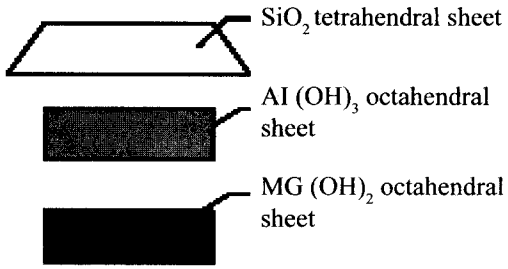


Gambar 2.2 *Struktur dari Almunium atau Magnesium Oktahedral. Oktahedron Tunggal, dan (b) Susunan Lembar Oktahedral pada Jaringan Heksagonal (Mitchell, 1992).*

Semua lembaran di atas dapat disajikan secara skematik pada Gambar 2.3. Lembaran ini merupakan kombinasi dari berbagai variasi pembentukan struktur lempung. Lembar ini membagi atom oksigen untuk membentuk suatu lapisan ikatan kimia. Beberapa lempung memiliki lapisan yang terdiri dari 2 lembar (satu tetrahedral dan satu oktahedral), masing-masing lapisan terdiri dari 3 lembar (satu oktahedral yang menyisip antara dua lapisan tetrahedral).

Pada kondisi tertentu terjadi substitusi di dalam lembaran. Sebagai contoh Al^{+3} dapat disubstitusikan oleh Si^{+4} dalam lembar tetrahedral, dan Mg^{+2} dapat disubstitusikan oleh Al^{+3} dalam lembaran oktahedral. Subsitusi

ini biasanya menghasilkan lapisan bermuatan negatif dan muatan negatif ini harus seimbang. Keseimbangan ini dibentuk oleh penyerapan kation membentuk ikatan kimia antar lapisan yang sering disebut *interlayer* kation, bila tidak terjadi subsitusi, lapisan hanya akan netral dan menjadi satu kesatuan oleh *van der Waals bond*, bila terjadi subsitusi lapisan akan menjadi kesatuan yang kuat oleh ikatan kimia (Mitchel, 1992).

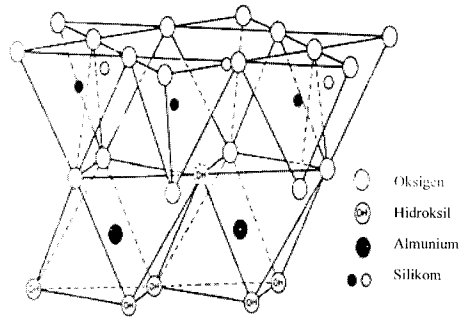


Gambar 2.3 *Bentuk Skematis Lembaran (Mitchell, 1992).*

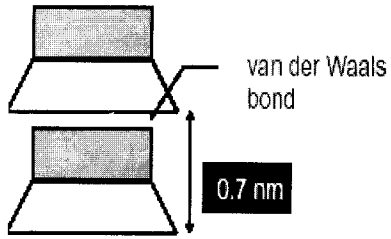
Distribusi muatan dan jenis kation menentukan potensi pengembangan pada mineral tanah lempung. Mineral lempung memiliki jaring muatan negatif permanen hasil subsitusi bagian padat dari kation pada lapisan tetrahedral dan oktahedral, seperti pada Tabel 2.1.

Kaolinite merupakan mineral lempung yang sederhana, dengan struktur 1:1 *phyllosilicate*, karena memiliki 2 lembar setiap lapisnya yaitu lembar silika tetrahedral dan lembar alumina okthahedral. Lembaran dan hasil struktur ini seperti pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5. Pada gambar ini tidak terjadi subsitusi dalam tiap lembarnya. Oleh karena itu, lapisan tidak mengalami pertukaran dan penyerapan kation, sehingga *kaolinite* merupakan mineral non ekspansif.

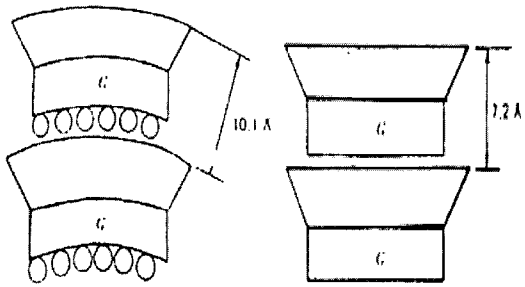
Ada dua jenis mineral *halloysite* yaitu *halloysite* (10 Å) atau *hydrated* dengan komposisi kimia $(OH)_8\ Si_4\ Al_4\ O_{10.4}H_2O$ yang mempunyai ketebalan 10,1 Å. Susunan mineral jenis ini dipisahkan oleh 1 lapisan molekul air (Gambar 2.6.a). Jenis yang kedua yaitu *halloysite* 7 Å atau *non hydrated*, mempunyai struktur dengan ketebalan 7,2 Å dan komposisi kimia $((OH)_8\ Si_4\ Al_4\ O_{10})$ sama dengan *kaolinite* (Gambar 2.6.b). Perubahan *halloysite* 10 Å menjadi *halloysite* 7 Å dapat terjadi, karena proses dehidrasi bahkan pada suhu rendah. Proses dehidrasi ini merupakan proses yang tidak dapat kembali seperti semula (Mitchell, 1992).



Gambar 2.4 *Struktur Lapisan Kaolinite (Mitchell, 1992).*



Gambar 2.5 *Bentuk Skematis Struktur Kaolinite (Mitchell, 1992).*

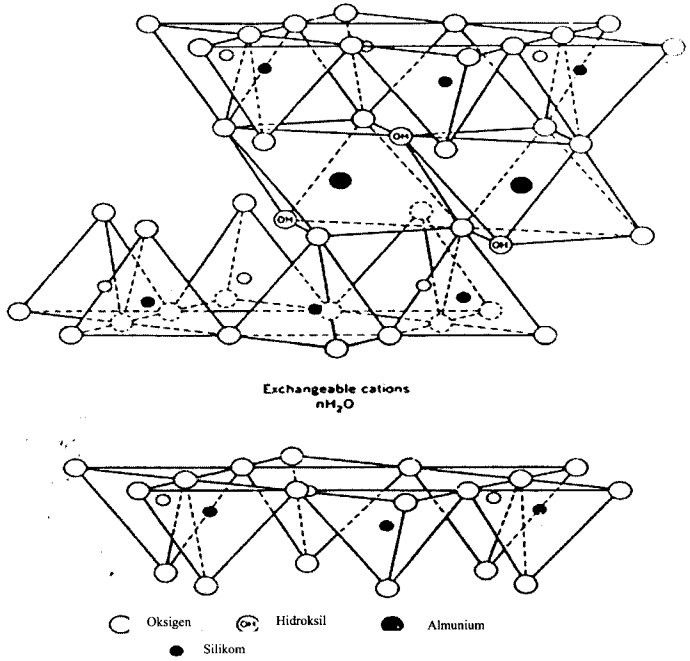


(a) (b)

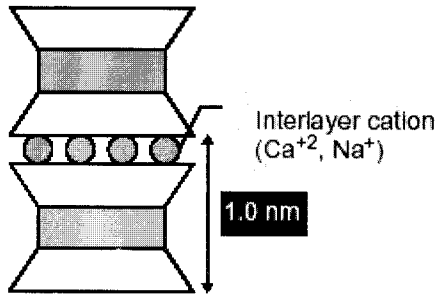
Gambar 2.6 *Bentuk Skematik Struktur Halloysite (a) Halloysite (10 Å), Halloysite 7 Å (Mitchell, 1992).*

Menurut Lambe dan Whitman (1969) tanah yang mengandung mineral *halloysite* mempunyai kemampuan untuk menyerap air di antara lembaran-lembaran penyusunnya, sehingga kadar airnya tinggi dan mempunyai kepadatan yang rendah.

Montmorrillonite memiliki struktur yang lebih rumit, karena memiliki 3 lembar setiap lapisannya yaitu 1 lembar alumina oktahedral berhimpit antara 2 lembar silika tetrahedral seperti terlihat pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8. Dalam lembar oktahedral terjadi banyak subsitusi Mg^{+2} untuk Al^{+3}. Muatan negatif terbentuk oleh subsitusi ini menjadi seimbang dengan penyerapan *catioon* seperti Ca^{+2} dan Na^{+}. Sehingga di alam *montmorrillonite* ada 2 jenis yaitu: Ca- *Montmorrillonite* dan Na- *Montmorrillonite*. Ca-*Montmorrillonite* banyak dijumpai pada tanah lempung ekspansif yang ada di Pulau Jawa, sedangkan Na- *Montmorrillonite* dapat kita temukan di pasaran dalam bentuk lempung buatan yaitu Na-*bentonite*.

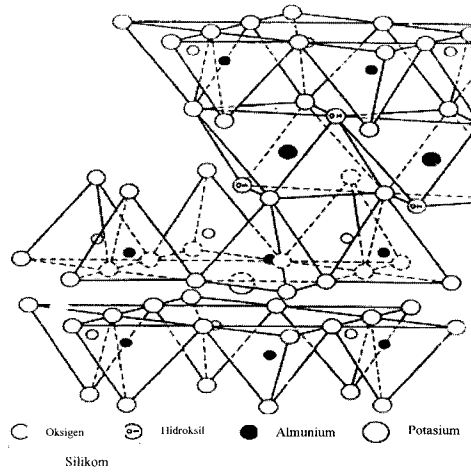


Gambar 2.7 *Struktur Lapisan Montmorillonite (Mitchell, 1992).*



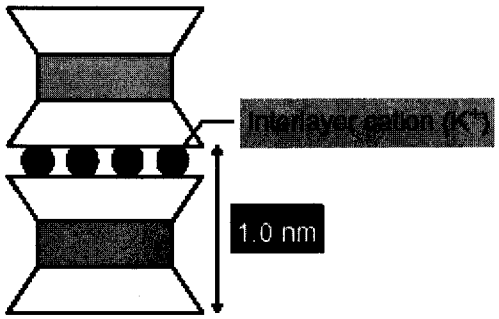
Gambar 2.8 *Bentuk Skematis Struktur Montmorillonite (Mitchell, 1992).*

Illite mempunyai atruktur ikatan 2:1 yaitu memiliki 3 lembar setiap lapisan, satu lembar *octahedral* berhimpit antara dua lembar tetrahedral. Struktur lapisan illite sperti pada Gambar 2.9 dan bentuk skematisnya seperti pada Gambar 2.10. *Ilite* ini kadang-kadang disebut mika lempung. Lembar ini juga terjadi subsitusi Mg^{+2} atau Fe^{+3} dalam lapisan oktahedral dengan *interlayer* kation biasanya adalah K^{+}. Pada struktur mika, ditemukan mineral kuarsa dalam granit dan batuan lainnya, yang merupakan mineral utama seperti halnya struktur *illite* pada mineral lempung, kecuali pada mika terjadi lebih sedikit subsitusi dalam lapisan oktahedral.



MILIK
Badan Perpustakaan
dan Kearsipan
Propinsi Jawa Timur

Gambar 2.9 *Struktur Lapisan Illite (Mitchell, 1992).*



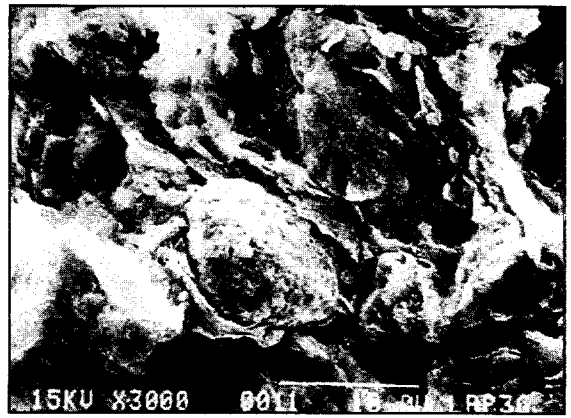
Gambar 2.10 *Bentuk Skematis Struktur Illite (Mitchell, 1992).*

2.2 MIKRO STRUKTUR TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

Partikel lempung ekspansif sangat kecil, besarnya kurang dari 1 μm. Ukuran aktual tergantung pada komposisi spesifik dan mikrostruktur. Partikel *kaolinite* kira kira mempunyai diamter 1 μm dan tebal 0,1 μm. *Kaolinite* sering kali berbentuk *hexagonal*. Seperti terlihat pada Gambar 2.11, mikrostruktur tanah lempung *kaolinite* yang dilakukan dengan *scanning electron micriscope* (SEM) dengan skala 1u oleh Mineralogy Society America. Secara rinci parameter mikrostruktur partikel *kaolinite* akan mempengaruhi karakteristik fisis dan mekanis. Secara rinci parameter fisis dan mekanis seperti pada Tabel 2.2.

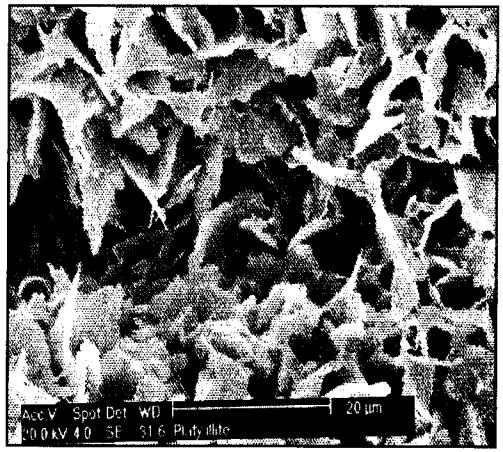
Tabel 2.2 *Karakteristik Fisis dan Mekanis Kaolinit (Wahyudi, 2001)*

No	Karaekteristik Fisis dan Mekanis	Kisaran
1	Bentuk dan φ ekivalen	Lempengan < 2 μm
2	Tebal layer	7 Angstrom
3	Permukaan khusus	20 m2/g
4	Gravitas khusus	2, 60
5	Kapasitas pertukaran kation	3 – 15, rerata 10
6	Indeks plastisitas	1 – 40 (kecil – sedang), rerata 15%
7	Pengembangan	Tidak mengembang
8	Tiksotropi	Lemah



Gambar 2.11 *Mikrostruktur Kaolinite (Mineralogy Society America).*

Partikel *Illite* juga sangat kecil dengan karakter mikrostrukturnya seperti pada Gambar 2.12, dengan ketebalan sekitar 10 nm. Mikrostruktur partikel *illite* akan mempengaruhi karakteristik fisis dan mekanis. Secara rinci parameter fisis dan mekanis partikel *illite* tersebut seperti pada Tabel 2.3.



Gambar 2.12 *Mikrostruktur Illite (Mineralogy Society America)*

Tabel 2.3 *Karakteristik Fisis dan Mekanis Illite (Wahyudi, 2001)*

No	Karaekteristik Fisis dan Mekanis	Kisaran
1	Bentuk dan φ ekivalen	Lempengan < 2 μm
2	Tebal layer	10 - 12 Angstrom
3	Permukaan khusus	115 m2/g
4	Gravitas khusus	2, 80
5	Kapasitas pertukaran kation	10 – 40, rerata 30
6	Indeks plastisitas	20 – 50 (sedang)
7	Pengembangan	Tidak atau sedang
8	Tiksotropi	Tidak atau sedang

Partikel *montmorilonite* sangat kecil berbentuk *sodium* yang memiliki ukuran sangat kecil seperti pada Gambar 2.13, lapisan tipis kristal tunggal dengan ketebalan sekitar 1 nm (1 nm =10 Å). Selain itu, partikel *montmorilonite* memilikki bentuk *calcium* yang besar yaitu berkisar 8 – 10 lapisan kristal atau dengan ketebalan 20 – 30 nm. Mikrostruktur partikel *montmorilonite* akan mempengaruhi karakteristik fisis dan mekanis. Secara rinci parameter fisis dan mekanis partikel *montmorilonite* tersebut seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 *Karakteristik Fisis dan Mekanis Montmorillonite (Wahyudi, 2001)*

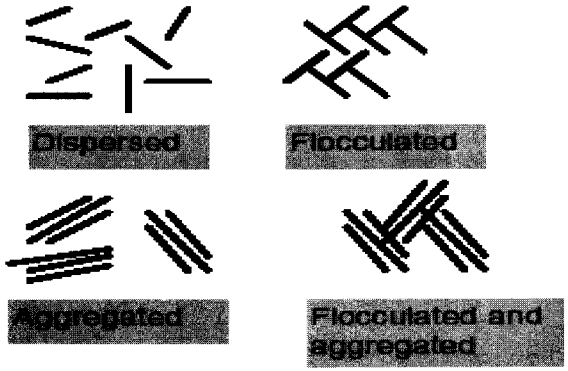
No	Karaekteristik Fisis dan Mekanis	Kisaran
1	Bentuk dan φ ekivalen	Lem pengan < 0,5 μm
2	Tebal layer	11 – 15 Angstrom
3	Permukaan khusus	80 m2/g
4	Gravitasi khusus	2,65 – 2,80
5	Kapasitas pertukaran kation	80 – 200, rerata 100
6	Indeks plastisitas	300 – 600 (sangat besar)
7	Pengembangan	Sangat mengembang
8	Tiksotropi	Sangat kuat

Gambar 2.13 *Mikrostruktur Montmorilonite (Mineralogy Society America)*

Ukuran rata-rata yang kecil tersebut, maka *surface force* merupakan hal yang sangat penting sekali dan tidak mengherankan bahwa partikel lempung sering kali terflokulasi (hubungan tepi partikel dengan permukaan partikel yang lain). Keadaan mikrostruktur pada suspensi air-lempung dapat dilihat pada Gambar 2.14. Pada beberapa literatur tanah kondisi ini umumnya digunakan istilah flokulasi (*flocculation*), untuk menggambarkan partikel dengan hubungan tepi ke tepi atau permukaan ke tepi partikel dan istilah *aggregation,* untuk menggambarkan partikel dengan hubungan permukaan ke permukaan. Flokulasi dapat menghasilkan tegangan runtuh yang cepat, membuat tanah sangat kaku dan sangat sulit bekerja. Mikrostruktur juga mempengaruhi permeabilitas, mengurangi pergerakan cairan melalui tanah. Partikel dengan susunan terdispersi (*dispersed*) memberikan cairan untuk dapat bergerak realtif mudah, sedangkan agregasi memiliki perilaku yang kecil terhadap permeabilitas.

Dispersed menggambarkan hubungan permukaan partikel yang satu dengan permukaan lainnya. Orientasi dari partikel ini, mempengaruhi terjadinya kembang susut (*swell – shrink*) dan juga *shear failure* dari tanah lempung ekspansif.

Mikrostruktur dari *clay/water system* sangat berpengaruh untuk mengontrol *swelling properties*. Pada lempung *kaolinite*, tidak terdapat air dalam ruang inter layernya. Sebaliknya, pada lempung *montmorilonite* air dapat menekan, hingga ke ruang pori *inter layer* di dalam sebuah partikel, sehingga perubahan volume pada lempung *montmorilonite* sangat besar.



Gambar 2.14 *Permukaan Partikel Lempung (Mitchell, 1992).*

Mikrostruktur dari *clay/water system* sangat berpengaruh untuk mengontrol *swelling properties*. Pada lempung *kaolinite*, tidak terdapat air dalam ruang inter layernya. Sebaliknya, pada lempung *montmorilonite* air dapat menekan, hingga ke ruang pori *inter layer* di dalam sebuah partikel, sehingga perubahan volume pada lempung *montmorilonite* sangat besar.

Penelitian yang telah dilakukan oleh Tessier (1984), membuktikan bahwa kadar air (*humiditas*) berpengaruh hingga ke skala *inter layer*. Makin kering kadar airnya, maka makin kecil jarak *inter layer* dan makin besar jumlah *layer* dalam sebuah partikel. Selain itu, bentuk partikel lempung ekspansif juga berperan sangat besar terhadap *swelling potential* (potensi pengembangan) Lempung *Montmorillonite* dengan bentuk partikel seperti daun atau bunga, mempunyai tendensi lebih fleksibel atau *swelling potential* yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan partikel lempung *kaolinite* yang berbentuk seperti butiran solid (*ellips*).

2.3 PENGARUH AIR PADA TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

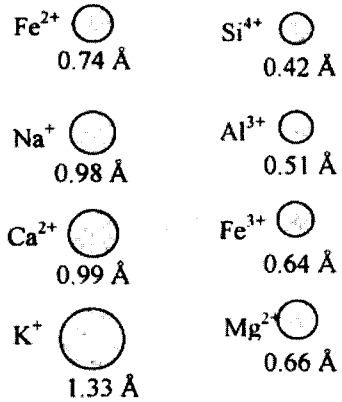
Air biasanya tidak banyak mempengaruhi kelakuan tanah berbutir kasar. Sebagai contoh, kuat geser tanah pasir mendekati sama pada kondisi kering ataupun jenuh air. Jika air berada pada tanah berbutir halus khususnya tanah lempung, air sangat mempengaruhi perilaku tanah lempung. Luas permukaan spesifik tanah lempung akan menjadi besar jika ada air, dan variasi kadar air akan mempengaruhi plastisitas tanah lempung. Distribusi ukuran butir tanah berbutir halus bukan faktor yang mempengaruhi perilakunya. Identifikasi jenis tanah ini dilakukan dengan melakukan uji batas-batas konsistensi tanah.

Partikel-partikel lempung pada umumnya mempunyai muatan negatif pada permukaanya. Hal ini karena keberadaan gugus OH pada tepi kristal, hidrogen dan hidroksil tersebut terurai dan permukaan lempung menjadi bermuatan negatif yang berasal dari ion oksigen. Untuk mengimbagi muatan negatif tersebut, partikel lempung akan menarik ion muatan positif, melalui pertukaran kation. Kation-kation dapat disusun dalam urutan kekuatan daya tarik menariknya, sebagai berikut ini.

$Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH^{4+} > K^{+} > H^{+} > Na^{+} > Li^{+}$.

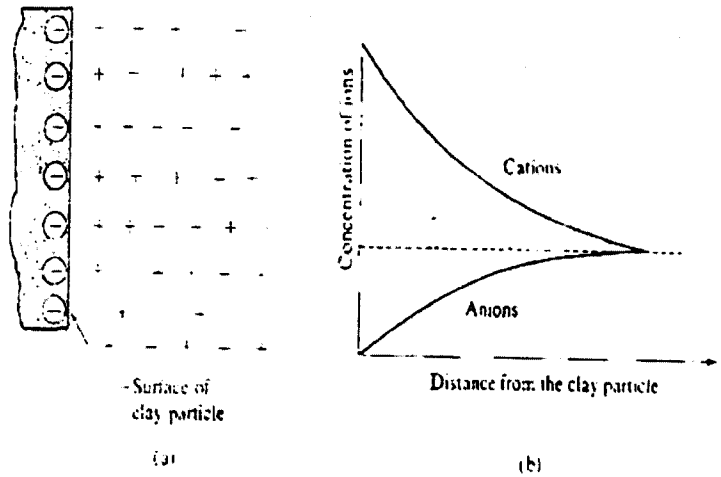
Paton (1978) menyatakan *Interlayer cations* sebagian tanah lempung dapat terjadi pertukaran *cation*. Partikel-partikel lempung pada umumnya mempunyai muatan negatif pada permukaanya. Hal ini disebabkan keberadaan gugus OH pada tepi kristal, *hydrogen* dan hidroksil tersebut terurai dan permukaan lempung menjadi bermuatan negatif yang berasal dari ion oksigen. Untuk mengimbagi muatan negatif tersebut, partikel lempung akan menarik ion muatan positif, melalui pertukaran kation. Proses ini hanya terjadi antara ion-ion yang berukuran sebanding. Ion-ion *divalent* umumnya diikat lebih kuat daripada ion-ion *monovalen*, sehingga lebih sulit untuk dipertukarkan. Perbedaan dalam dimensi ion-ion yang saling berganti pada partikel mineral lempung tidak lebih dari 15% dan valensi ion-ion yang saling berganti seharusnya tidak berbeda dari satu-satuan.

Gambar 2.15 memperlihatkan tentang dimensi nisbi dari bebarapa ion. Terlihat bahwa Na^{2+} dan Ca^{2+} mempunyai ukuran yang hampir sama, sehingga saling dapat menggantikan satu sama lainya, walaupun valensi Ca^{2+} lebih tinggi. Sebaliknya Kalium tidak dapat menggantikan Na^{2+} maupun Ca^{2+}, karena ukurannya 1, 4 kali lebih besar dari kedua ion tersebut. Alumunium berukuran antara Si^{4+} dan Mg^{2+} atau Fe^{3+} dapat mengantikan ion-ion tersebut dengan tingkat kemudahan yang berbeda-beda (Paton, 1978).



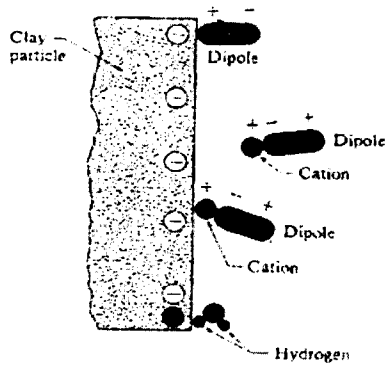
Gambar 2.15 *Dimensi Nisbi dari Beberapa Kation Lempung (Paton, 1978).*

Das (2008) menyatakan bahwa muatan negatif pada tanah lempung sering diimbangi dengan kation bermuatan positif seperti Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, dan Ka^{+}, dengan gaya tarik-menarik elektrostatik. Jika air masuk kedalam partikel lempung, maka kation-kation dan sejumlah kecil anion akan berenang di antara partikel-partikel tersebut, seolah-olah membentuk suatu lapisan ganda terdifusi (*difffuse double layer*) seperti terlihat pada Gambar 2.16a. Konsentrasi kation akan berkurang, jika jaraknya dari permukaan partikel makin jauh, seperti terlihat pada Gambar 2.16b.



Gambar 2.16 *Lapisan Ganda Terdifusi (Das, 2008).*

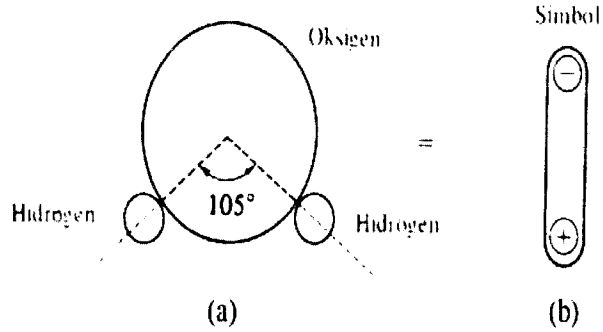
Molekul air yang merupakan molekul dipolar, tertarik oleh permukaan partikel lempung yang bermuatan negatif dan oleh adanya kation-kation dalam lapisan ganda. Kation-kation tersebut menempel di permukaan partikel yang bermuatan negatif seperti pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 *Molekul air Dipolar pada Lapisan Ganda (Das, 2008).*

Air yang tertarik secara elektrik, yang berada di sekitar partikel lempung, disebut air lapisan ganda (*double layer water*). Sifat plastis tanah lempung adalah akibat eksistensi dari lapisan ganda.

Molekul air (H_2O) membentuk kutub-kutub (polar). Hal ini karena atom-atom hidrogen pada molekul air tidak tersusun secara simetris di sekeliling atom oksigen, melainkan membentuk sudut 105° seperti pada Gambar 2.18a. Akibatnya molekul-molekul air berkelakuan seperti batang-batang kecil yang mempunyai muatan positif di satu sisi dan muatan negatif di sisi lain, sehingga molekul air menjadi dipolar (berkutub dua) seperti pada Gambar 2.18b (Das, 2008).



Gambar 2.18 *Sifat Dipolar Air (Das, 2008).*

-oo0oo-

BAB III

IDENTIFIKASI TANAH EKSPANSIF

3.1 UMUM

Identifikasi tanah lempung ekspansif dapat dilakukan dengan uji kembang di laboratorium, analisis kimia dan mineralogi, korelasi dengan klasifikasi dan sifat indeks tanah. Thomas (1998) menyatakan, untuk identifikasi kembang - susut tanah lempung ekspansif dapat dilakukan dengan dua cara yaitu: identifikasi tidak langsung dan identifikasi langsung. Noormalasari dan Susanto (2000) menyatakan, ada tiga metode untuk identifikasi kembang susut tanah lempung ekspansif, yaitu: metode pengukuran tidak langsung, metode pengukuran langsung dan identifikasi mineral. Metode pengukuran tidak langsung melibatkan klasifikasi dan sifat fisis tanah untuk memperediksi kembang susut. Metode pengukuran langsung dengan mengadakan uji sebenarnya terhadap kembang, termasuk di dalamnya identifikasi secara mineralogi. Metode pengukuran langsung maupun tidak langsung dapat digabungkan menjadi suatu metode kombinasi (Snethen, dkk., 1975).

3.2 METODE TIDAK LANGSUNG

Metode tidak langsung biasa disebut juga metode hubungan empiris. Metode ini didasarkan pada pengalaman dan identifikasi dari *Atterberg*

limit, kadar lempung, kadar air awal, berat volume kering dan batas susut (Sapaz, 2004).

Beberapa hubungan empiris yang sering digunakan dalam metode ini seperti berikut ini.

Bandyopadhyay (1981) mengadakan penelitian dengan jumlah sampel 259 buah untuk tanah *disturb* dan diperoleh beberapa hubungan dengan tolok ukur indeks plastisitas (IP) seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 *Persamaan Potensi Kembang Bandyopadhyay (1981)*

Persamaan	Rentang IP
$(3{,}28 \times 10^{-5})\,(A^{2{,}259})\,(C^{3{,}44})$	Untuk PI ≤ 20%
$(2{,}40 \times 10^{-5})\,(A^{2{,}573})\,(C^{3{,}44})$	Untuk 20% < PI ≤ 30 %
$(1{,}14 \times 10^{-5})\,(A^{2{,}559})\,(C^{3{,}44}$	Untuk 30% < PI ≤ 40 %
$(0{,}72 \times 10^{-5})\,(A^{2{,}669})\,(C^{3{,}44})$	Untuk 40% < PI ≤ 60 %

Sapaz (2004) telah merangkum hubungan empiris metode tidak langsung untuk memprediksi potensi pengembangan tanah lempung ekspansif seperti pada Tabel 3.2.

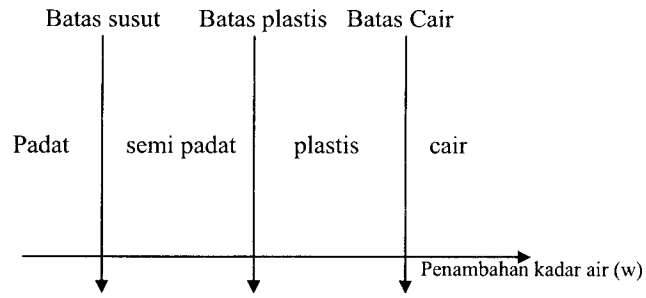
Tabel 3.2 *Beberapa Hubungan Empiris Metode Tidak Langsung (Sapaz, 2004)*

No	Referensi	Diskripsi
1	Seed, dkk. (1)	$S = 0.00216\,PI^{2.44}$
2	Seed, dkk. (2)	$(3{,}6 \times 10^{-5})\,.\,A^{2{,}44}\,.\,C^{3{,}44}$
3	van der Merve	$\Delta H = Fe^{0.377d}\,(e^{-0.377h} - 1)$
4	Vijayvergia, dkk.	$\log S = (0.44LL - \omega_0 + 5.5)/12$
5	Nayak, dkk.	$S = (0.00229PI)\,(1.45C)/\omega_0 + 6.38$
6	Schnider, dkk.	$Log\,S = 0.9(PI/\omega_0 - 1.19$
7	Weston	$S = 0.00411\,(LL_\omega)^{4.17}\,\sigma_v^{-0.0}$
8	Jhonson	$S = 23.82 + 0.7346PI - 0.1458H - 1.7\omega_0 + 0.00225P + 0{:}00225PI\omega_0 - 0.0088PIH$
9	Komornik, dkk.	$\log Pa = -2.132 + 0.0208LL + 0.000665 - 0.00269\omega_0$ Note: γ_d *in kg/m*^{3}

dengan

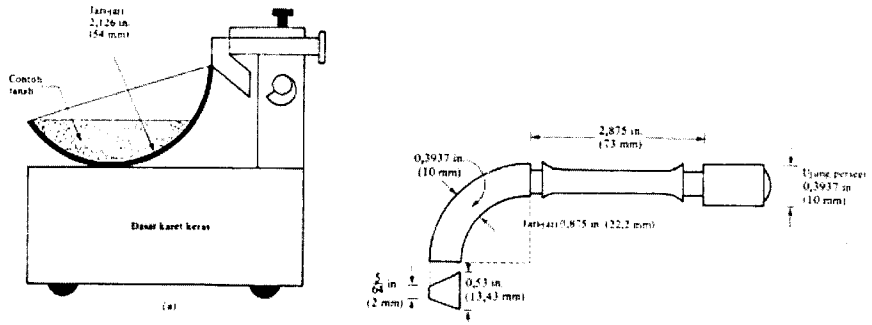
S : persen kembang (%),
PI : indeks plastisitas (%),
ΔH : *total Heave* (%),
F : Faktor koreksi derajat kembang,
D : tebal lapisan non ekspansif (m),
H : tebal lapisan eksansif (m),
LL : Batas cair (%),
ω_0 : kadar air awal (%),
γ_d : berat volume kering (kg/m^3),
C : kadar lempung (%),
σ_v : beban tambahan (kN/m^2),
LL_ω : berat batas cair (kN/m^2).

Batas-batas Atterberg atau batas konsistensi tanah merupakan parameter yang utama dalam mengidentifikasi tanah ekpsnaif secara tidak langsung. Konsistensi tergantung pada gaya tarik antara partikel mineral lempung-nya. Sembarang pengurangan kadar air menghasilkan berkurangnya tebal lapisan kation dan terjadi penambahan gaya tarik antarpartikelnya. Bila tanah dalam kedudukan plastis, besarnya jaringan gaya antar partikel akan sedemikian hingga partikelnya bebas untuk relatif menggelincir antara satu dengan yang lainnya, dengan kohesi antaranya tetap terpelihara. Pengu-rangan kadar air juga menghasilkan pengurangan volume tanah. Diagram batas-batas Atterberg seperti pada Gambar 3.1.



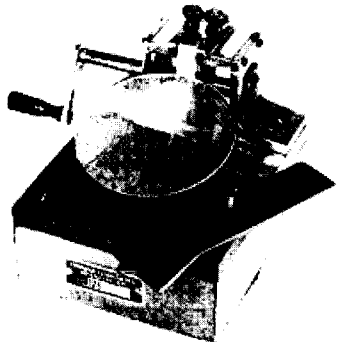
Gambar 3.1 *Batas-batas Atterberg.*

Pengaruh kadar air yang banyak akan menyebabkan butiran tanah menjadi cair. Batas Aterberg pada kondisi batas cair (*liquid limit*), didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair ditentukan dari pengujian Casagrande (1948). Gambar skematis alat pengukur batas cair dan alat penggores seperti pada Gambar 3.2.

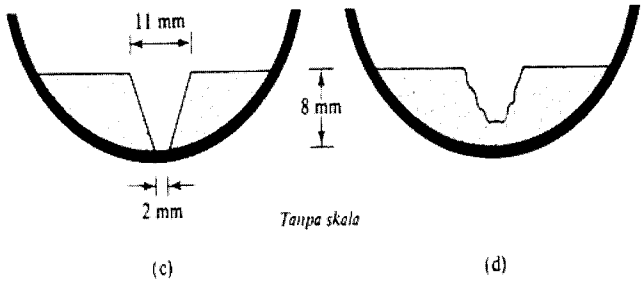


Gambar 3.2 *Skema Alat Uji Batas Cair dan Alat Penggores.*

Uji batas cair dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM D 4318 – 00, dengan alat Cassagrande seperti pada Gambar 3.3. Contoh tanah dimasukkan dalam cawan. Tinggi contoh tanah dalam cawan kira-kira 8 mm (Gambar 3.4.a). Alat penggores (*grooving tool*) digoreskan tepat di tengah-tengah cawan hingga menyentuh dasarnya. Kemudian, dengan alat penggetar, cawan diketuk-ketukkan pada landasannya dengan tinggi jatuh 1 cm. Persentase kadar air yang dibutuhkan untuk menutup celah sepanjang 12,7 mm pada dasar cawan, sesudah 25 kali pukulan, didefinisikan sebagai batas cair tanah tersebut (Gambar 3.4.b).

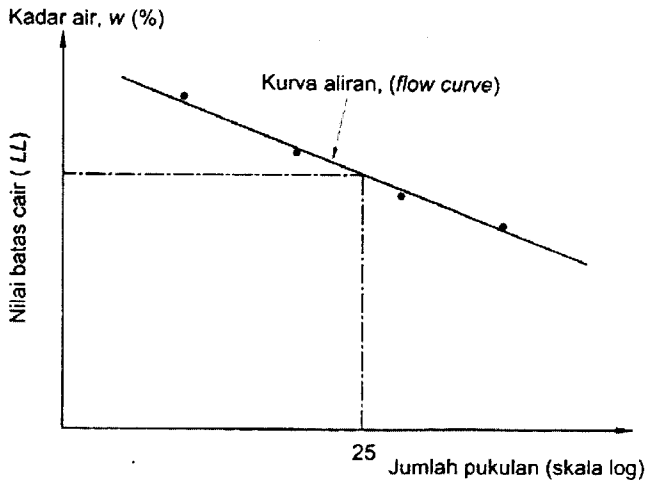


Gambar 3.3 *Alat Uji Batas Cair.*



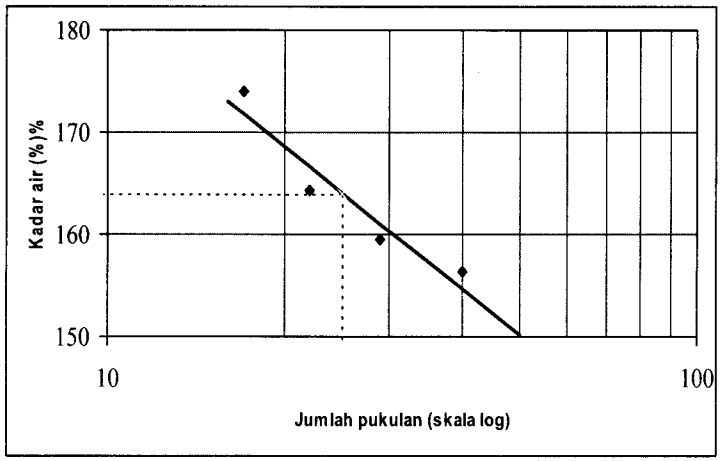
Gambar 3.4 *(a) Contoh Tanah Sebelum Diuji (b) Contoh Tanah Setelah Diuji.*

Karena sulitnya mengatur kadar air pada waktu celah menutup pada 25 kali pukulan, maka biasanya percobaan dilakukan beberapa kali, yaitu dengan kadar air yang berbeda dan dengan jumlah pukulan yang berkisar antara 15 sampai 35 pukulan. Hasil uji batas cair tersebut, kemudian dibuat hubungan antara kadar air (w) dan jumlah pukulan (N), digambarkan dalam grafik semi logaritmis untuk menentukan kadar air pada 25 kali pukulan, seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Kurva untuk Menentukan Batas Cair Tanah Lempung.*

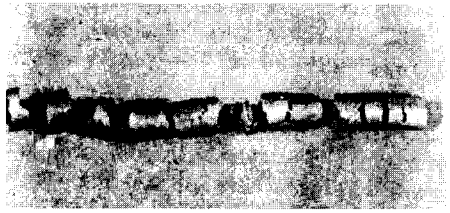
Hasil uji batas cair dan penggunaan kurva pada Gambar 3.4 seperti uji batas cair yang dilakukan oleh Sudjianto (2012) pada tanah lempung ekspansif dari Karangjati (Ngawi). Hasil uji tersebut seperti pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 *batas Cair Tanah Lempung Karangjati (Ngawi).*

Saat kadar air tanah agak kering maka butiran tanah akan menjadi plastis. Batas Aterberg pada kondisi batas plastis (*plastic limit*), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air di mana tanah dengan diameter silinder 3,2 mm mulai retak-retak ketika digulung. Uji batas plastis dilakukan mengacu pada standar ASTM D 4318-00. Pelaksanaan uji batas plastis seperti pada Gambar 3.7 dan hasil gulungan tanah seperti pada Gambar 3.8.

Gambar 3.7 *Contoh Tanah Sedang Digulung (Das, 1985).*



Gambar 3.8 *Gulungan Tanah yang Retak-retak (Das, 1985).*

Hubungan antara batas cair (*liquid limit*) dengan batas plastis (*plastic limit*) adalah indeks plastisitas (*plasticity index*). Indeks plastisitas (PI) adalah selisih antara batas cair (*liquid limit*) dan batas plastis (*plastic limit*) dinyatakan dengan persamaan :

$$PI = LL - PL \tag{3.1}$$

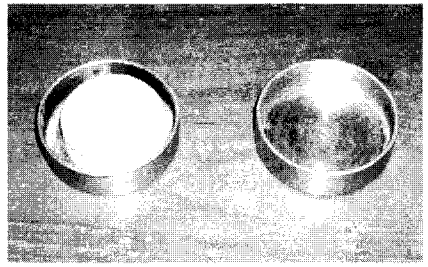
Indeks plastis merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plastis. Karena itu, indeks plastisitas menunjukkan sifat keplasti-

san tanah. Jika tanah mempunyai indeks plastisitas (PI) tinggi, maka tanah mengandung banyak butiran lempung. Jika indeks plastisitas (PI) rendah, seperti tanah lanau, sedikit pengurangan kadar air berakibat tanah menjadi kering. Batasan mengenai indeks plastisitas (PI), sifat plastisitas, jenis tanah dan kohesi di berikan oleh Atterberg, seperti pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 *Nilai PI dan Jenis Tanah (Jumikis, 1962)*

PI	Sifat	Jenis tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Non kohesif
<7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Kondisi kadar air kering pada saat pengeringan maka butiran tanah akan menyusut, pada batas Atterberg kondisi ini akan didapatkan kondisi batas susut. Batas susut (*shrinkitgake limit*), didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air di mana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanahnya. Percobaan batas susut dilaksanakan di laboratorium dengan mengacu pada standar ASTM D 427-98. Percobaan dilakukan dengan cawan susut diameter 44,4 mm dengan tinggi 12,7 mm, seperti pada Gambar 3.9. Cawan susut bisa juga dari porselin atau monel. Bagian dalam cawan susut dilapisi dengan pelumas dan diisi dengan tanah jenuh sempurna. Kemudian dikeringkan dengan oven. Volume ditentukan dengan mencelupkannya dalam air raksa.



Gambar 3.9 *Cawan Susut.*

Uji aatas susut atau *shrinkage limit* yang dilakukan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan atau formula batas susut, apabila gravitasi khusus tanah (G_s) diketahui, maka batas susut tanah dapat dihitung dengan Persamaan 3.2:

$$S_L = \left(\frac{V_o}{M_o} - \frac{1}{G}\right) x\,100\% \text{ (dalam persen)} \qquad (3.2)$$

dengan

S_L : batas susut tanah,
M_o : massa benda uji setelah kering,
V_o : volume benda uji setelah kering,
G : gravitasi khusus tanah.

Apabila gravitasi tanah tanah tidak diketahui, maka batas susut S_L dapat dihitung dari data yang diperoleh dari percobaan dengan persamaan 3.3.

$$S_L = \left\{w - \left(\frac{V - V_o}{M_o}\right)\right\} x\,100\% \text{ (dalam persen)} \qquad (3.3)$$

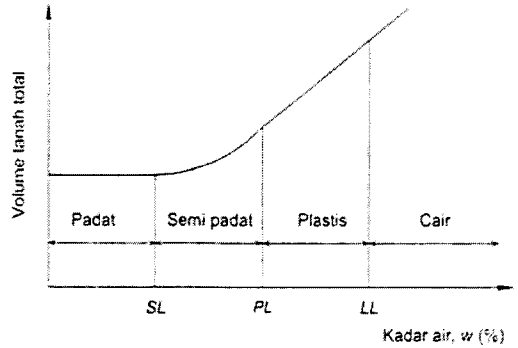
dengan

w : kadar air tanah basah yang diisikan pada cawan,

$$= \frac{M - M_o}{M_o} x100\% \text{ (dalam persen)} \qquad (3.4)$$

M : massa benda uji basah,
M_o : massa benda uji setelah kering,
V : volume benda uji basah = volume cawan,
V_o : volume benda uji setelah dikeringkan.

Hubungan komprehensif batas-batas Atterberg akibat variasi kadar air dari kering hingga basah seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Variasi Volume dan Kadar Air Pada Kedudukan Batas Cair, Batas Plastis dan Batas Susut.*

Gambar 3.10, memperlihatkan hubungan variasi kadar air dan volume total tanah pada kondisi batas susut, batas plastis dan batas cair. Batas-batas Atterberg atau batas-batas konsistensi tanah dapat digunakan untuk identifikasi dan klasifikasi tanah yang salah satunya adalah tanah ekspansif yang ada di lapangan.

Batas-batas Atterberg atau batas-batas konsistensi untuk beberapa mineral lempung telah dipublikasikan oleh Mitchell (1976), seperti pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 *Nilai Batas-batas Atterberg untuk Mineral Lempung (Mitchell, 1976)*

Mineral	Batas cair	Batas plastis	Batas Susut
Montmorillonite	100-900	50-100	8,5-15
Nontronite	37-72	19-27	
Illite	60-120	35-60	15-17
Kaolinite	30-110	25-40	25-29
Halloysite terhidrasi	50-70	47-60	
Halloysite	35-55	30-45	
Attapulgite	160-230	100-120	
Chlorite	44-47	36-40	
Allophane	200-250	130-140	

3.3 METODE LANGSUNG

Metode langsung termasuk semua metode dengan menaksir secara kuantitatif karakteristik perubahan volume tanah ekspansif, dilakukan di laboratorium. Metode pengukuran langsung biasanya menggunakan peralatan dan standar tertentu untuk mengukur kembang dari tanah ekspansif (Chen, 1975).

Beberapa percobaan laboratorium telah dikembangkan untuk mengukur kembang tanah lempung ekspansif akibat perubahan kadar air, diantaranya adalah kembang bebas, *expansion index*, *California bearing ratio* (CBR), *potential volume change* (PVC) dan *coefficient of linear extensibility* (COLE).

Satu prosedur pengukuran kembang tanah lempung ekspansif yang sangat sederhana adalah uji kembang bebas (Holts dan Gibbs, 1956). Pengujian dilakukan dengan cara mencampur perlahan-lahan 10 cm^3 tanah kering dengan butiran lolos saringan No. 40 ke dalam silinder yang diisi dengan air dengan volume 100 cm^3, dan diamati volume saat keseimbangan telah terjadi. Pengembangan bebas didefinisikan sebagai :

$$\text{Pengembangan bebas} = \frac{(volume\ awal - volume\ akhir)}{volume\ awal} \times 100\% \qquad (3.5)$$

Expansion Index (EI) digunakan di California untuk evaluasi bangunan gedung di atas tanah ekspansif (Nelson dan Miller, 1992). Tanah yang lolos saringan No. 4, kemudian dipadatkan dan dimasukan dalam ring oedometer dengan beban awal 6,9 kPa. Perubahan volume diukur selama lebih dari 24 jam, dengan hubungan :

$$EI = 1000\ hF \qquad (3.6)$$

dengan

h: ekspansi contoh tanah (in),

F: persentase berat butiran tanah yang lolos saringan No. 4 (%).

Nilai EI < 51 dianggap potensi pengembangan rendah, sedangkan untuk nilai EI > 90 mempunyai potensi pengembangan yang tinggi.

California Bearing Ratio (CBR) digunakan untuk perencanaan jalan raya (Nelson dan Miller, 1992). Pengembangan vertikal diukur dari tekanan penetrasi. Tanah yang dimasukan dalam silinder CBR dan dipadatkan, selanjutnya direndam air selama beberapa hari. Sampel tanah dalam kondisi *drained* kemudian di penetrasi.

Potential Volume Change (PVC) dikembangkan oleh Lambe (1981) dan digunakan oleh *Federal Housing Administration*. Suatu tanah *remolded* yang dipadatkan dalam *ring* oedometer dengan beban 2600 kJ m^3. Air ditambahkan pada sampel agar terjadi pengembangan, pengukuran tekanan dilakukan dengan *proving ring* selama beberapa jam. Metode PVC ini sederhana dan waktunya cepat, sehingga tidak dapat digunakan untuk perencanaan fondasi bangunan.

Coefficient of linear extensibility (COLE) digunakan secara rutin oleh *National Soil Survey Laboratory* untuk melihat karakter potensi kembang-susut tanah (*Soil Survey Staff*, 1996). Sampel tanah tidak terusik dibungkus dengan resin. Sampel dibawa dari lapangan dengan prinsip Archimedes. Sampel di *oven* dengan mengukur kepadatan. Perhitungan perubahan volume dari metode COLE adalah

$$\text{COLE: } (DB_D/DB_M)^{0.33}-1 \quad \text{.....(3.7)}$$

dengan

DB_D: *Bulk density* dari sampel kering oven (kg/m^3),
DB_M: *Bulk density* dari lapangan (kg/m^3).

Snethen (1975) merangkum metode identifikasi secara langsung tanah ekspansif, seperti pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 *Metode Identifikasi Langsung Tanah Ekspansif*

Metoda	Deskripsi
Navy Method	Pengujian oedometer pada sampel remolded atau undisturbed menentukan deformasi dengan variasi beban tambahan diukur hingga berkembang pada kurva penambahan beban vs persen pengembangan. Kurva penambahan beban vs persen pengembangan terkait dengankurvakedalam lempung vs kurva persen pengembangan dari besarnya perubahan volume yang merupakan kurva kalkulasi didaerah tersebut.
Potential Vertical Rice (PVR)	Kolerasi pengukur *volumetric swell* pada sampel triaxial (semua sisi dengan tekanan 1 psi) dengan klasifikasi data pengujian (gabungan LL, PI, SR, dan persen tanah) untuk menentukan nomor kelompok (kolerasi penentuan awal) untuk tanah. Tekana vertical pada titik tengah dari strata dikalkulasi dan digunakan sebagai penghubung dengan kurva family untuk mendapatkan persen volumetric pengembangan pada kondisi beban aktual pada setiap strata. Pengembangan linier diambil sepertiga dari pengembangan volumetrik yang merupakan jumlah komulatif untuk mengkalkulasi potensi kenaikan vertical.
Noble method	Uji oedometer pada sampel yang didapatkan secara statis (totalnya 4,2 sampel kadar air awal pada 2 tekanan beban tambahan) untuk mengukur deformasi. Mengulang korelasi data untuk menentukan besar perubahan volume dengan pertukaran beban dan kondisi kadar dari awal.
Double oedometer	Uji oedometer dengan perlakuian 2 sampel undisturbed bersebelahan yang berbeda kondisi pembebananya. Satu sampel dibanjiri dan dibiarkan mengembang hingga seimbang, kemudian diuji konsolidasi mengikuti prosedur biasa. Sampel kedua diuji konsolidasi sesuai prosedur biasa pada kadar air natural (NMC). Porsi virgi dari kurva NMC disesuaikan bersama waktu dengan kurva swell-consolidation, dan hubungan dari teori konsolidasi digunakan untuk memperkirakan perubahan volume.

Tabel 3.5 *Metode identifikasi Langsung Tanah Ekspansif (Lanjutan)*

Metoda	Deskripsi
Simple oedometer	Uji oedometer dengan menggunakan satu sampel undisturbed yang dibebani tekanan overburden lapangan, kemudian di unloaded hingga kedudukan beban, dibanjiri dan dibiarkan mengembang hingga seimbang, setelah itu dikonsolidasi sesuai prosedur. Prosedur analisa sama dengan metoda double oedometer.
Sampson, Schuster, dan Budge	Uji oedometer dengan 2 sampel undisturbed atau remoulded dengan kondisi pembebanan yang berbeda. Satu sampel dibebani pada testing machine capacity (32tsf), dikonsolidasi hingga seimbang, dibanjiri, unloaded hingga 0,1 tsf dan dibiarkan menggembang hingga kondisi seimbang. Sampel kedua dibebani pada tekanan overburden, dibanjiri, unloaded hingga beban rencana struktur dan dibiarkan mengembang hingga seimbang. Indeks pengembangan dan perubahan angka pori dan teori konsolidasi digunakan untuk menentukan jumlah perubahan volume.
Lambe dan Whitman	Uji oedometer dengan sampel undisturbed atau remoulded diuji konsolidasi sesuai prosedur biasa termasuk rebound. Tegangan efektif dikalkulasi sebelum dan sesudah pengujian, dan penghubungan perubahan angka pori dihitung dari $\Delta e/1+eo$ atau $\Delta H/H^*$ vs kedalaman kurva diplotkan. Besarnya perubahan volume adalah sama dengan area pada kurva.
Sullivan dan McClelland (constant volume swell)	Uji oedometer dengan sampel undisturbed dibebani pada tekanan overburden lapangan, sibanjiri dan pengukuran tekanan pengembangan dengan menjaga volumenya constant, kemudian di unloaded hingga beban rendah dan pengembangan diukur. Perubahan angka pori diperoleh dari awal hingga akhir kondisi tegangan efektif dari tanah lapangan. Teori konsolidasi digunakan untuk memperkirakan perubahan volume.
Komornik, wiseman, dan Ben Yaacob	Uji oedometer pada sampel undisturbed dengan pengembangan yang diukur pada hubungan tekanan overburden untuk menghasilkan kurva kedalam vs persen swell.Besarnya perubahan volume sama dengan area kurva

Tabel 3.5 *Metode identifikasi Langsung Tanah Ekspansif (Lanjutan)*

Metoda	Deskripsi
Wong dan Yong	Sama dengan prosedur sebelumnya kecuali terdapat tambahan yaitu dimasukkan beban tambahan sama dengan pore water suction pada kondisi hydrostatic. Prosedur analisa sama juga
Expansion Index (Orange Conty)	Uji oedometer pada sampel yang didapatkan untuk mengukur perubahan volume pada beban tambahan 1 psi
Third cycle expansion pressure test	Digunakan hubungan standar uji R-value. Tekanan pengembangan diukur pada akhir pertiga cycle dari pengembangan perubahan volume (seperti tekanan pengembangan yang dikembangkan dan dibebaskan dua kali, kemudian diukur setelah mengembang hingga 3 kali

3.4 METODE KOMBINASI

Snethen (1975) menyatakan, dari kedua metode terdahulu, maka dapat dilakukan metode kombinasi untuk identifikasi tanah lempung ekspansif. Metode kombinasi melibatkan korelasi dari metode langsung dan tidak langsung untuk memberikan grup klasifikasi yang lebih baik dengan anggapan untuk penyederhanaan perubahan volume dan menghasilkan teknik perkiraan kuantitatif untuk batas perubahan volume akhir. Biasanya digunakan korelasi parameter termasuk batas *Atterberg*, kadar kolodial, aktivitas, kembang atau tekanan kembang dari jenis uji dengan alat oedometer pada variasi kondisi pembebanan. Secara umum, hasil ini merupakan penggolongan yang sederhana dari perubahan volume. Dalam beberapa kasus diperlukan perbandingan pengukuran sifat fisis untuk penyamaan prediksi. Beberapa teknik yang telah dipublikasikan dengan deskripsi mengenai aplikasi yang dipakai dalam metoda ini antara lain sebagai berikut ini.

3.4.1 *Bureau of Reclamation Method* (metode USBR, 1998)

Metode USBR dikembangkan oleh Holtz dan Gibbs yang melibatkan korelasi langsung dari pengamatan perubahan volume kadar kolodial, indeks

plastisitas, dan batas susut. Pengukuran perubahan volume diperoleh dari uji kembang oedometer menggunakan tekanan beban tambahan 6,9 kPa dari kering udara hingga kondisi jenuh. Derajat kembang dan batas dari hubungan sifat fisis seperti pada Tabel 3.6.

Pengalaman USBR memberikan korelasi metode ini cukup layak dengan perilaku yang diharapkan dan menyediakan indikator yang baik dari potensi perubahan volume.

Tabel 3.6 *Hubungan Sifat Fisis, Derajat Kembang dan Batas-batas Konsitensi Menurut USBR (Hotlz, 1959 dalam Snethen, dkk., 1975)*

Data dari uji indeks			Kemungkinan kembang (%)	Derajat kembang
Kadar koloid % - 1 μm)	PI %	SL %		
<15	<18	>15	<20	Rendah
13-23	15-28	10-16	10-20	Sedang
20-31	25-41	7-12	20-30	Tinggi
>28	>35	<11	>30	Sangat tinggi

3.4.2 Metode Almeyer (1955)

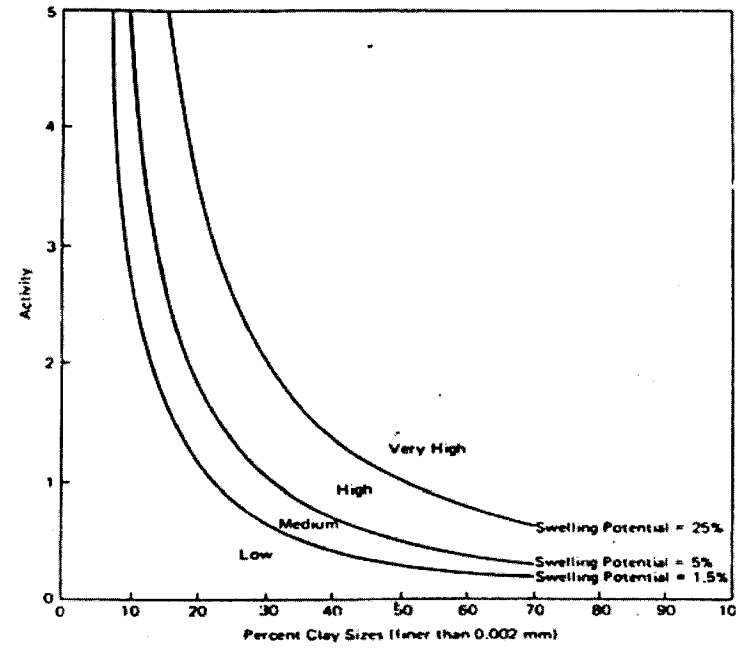
Metode Almeyer merupakan suatu metode yang didasarkan pada hubungan antara persen kembang, batas susut, dan susut linier (*linier shrinkage)*. Persen kembang diperoleh dari uji dengan alat *oedometer* pada sampel yang dipadatkan (*density)* 90% menurut standar AASHTO T-99 pada beban tambahan 31,12 kPa. Hasil ini direkomendasikan dalam Tabel 3.7.

Tabel 3.7 *Hubungan Linier Shrinkage, Shrinkage Limit, dan Kemungkinan Kembang Menurut Altmeyer (Altmeyer, 1955)*

Susut linier	Batas susut %	Derajat kembang
<5	>12	Tidak kritis
5 - 8	10 - 12	Sedang
>8	< 10	Kritis

3.4.3 Metode Seed, Woodward, dan Lundgren (1962)

Potensi kembang dari tanah ekspansif menurut Seed, Woodward dan Lundgren didapat dari hubungan persen kembang (dari uji oedometer) dengan sampel yang dipadatkan (dengan berat volume kering dan kadar air optimum berdasarkan AASHTO T-99) pada beban tambahan 6,9 kPa. Hasil statistik memberikan potensi kembang dan perubahan volume berkaitan dengan kadar lempung dan aktivitas, sesuai dengan diagram antara aktivitas dengan persen fraksi lempung seperti pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 *Diagram Klasifikasi Potensi Kembang (Seed, dkk., 1962).*

3.4.4 Metode PVC (Federal Housing Administration)

Metode *Potential volume change* (PVC) didasarkan pada alat uji (PVC meter), yang dikembangkan oleh *Federal Housing Administration* (FHA) dengan indeks kembang (tekanan kembang pada beban tambahan 9,574 kPa hingga 2 jam). Metode ini memberikan suatu usulan dari hubungan

pengujian dengan menggunakan PVC meter sebagai PVC *rating* dengan derajat ekspansi suatu tanah lempung seperti pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 *Hubungan PVC Rating dengan Derajat Kembang (Lambe, 1960)*

PVC rating	Derajat kembang
0 – 2	Tidak kritis
2 – 4	Sedang
4 – 6	Kritis
>6	Sangat kritis

3.4.5 Metode Ladd dan Lambe (1961)

Metode ini merupakan pengembangan dari penggunaan metode PVC dengan menambahkan hubungan persen kembang pada beban tambahan 9,574 kPa, indeks plastisitas, kadar air pada kelembaban 100%, perubahan volume yang terjadi dan batas susut tanah ekspansif. Penggunaan parameter ini dikombinasi dengan PVC *rating* dan menghasilkan kategori derajat kembang seperti pada Tabel 3.9.

Tabel 3.9 *Kombinasi Metoda PVC dengan Derajat Kembang (Ladd dan Lambe, 1961)*

PVC (kombinasi)	Derajat kembang
<2	Tidak kritis
2 – 4	Sedang
3 – 6	Kritis
>6	Sangat kritis

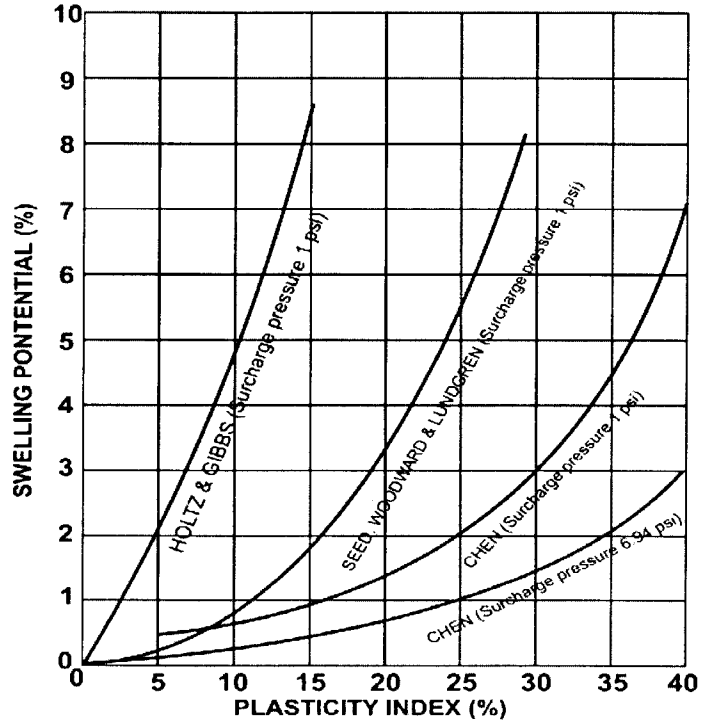
Satu kekurangan yang nyata pada metode ini adalah benda uji harus dilakukan dengan alat PVC meter. Oleh karena itu, parameter tambahan ini tidak menguntungkan. Fakta menunjukkan metode ini sedikit banyak bermasalah karena memerlukan data ekstra.

3.4.6 Metode Chen (1975)

Metode Chen (1975) merupakan usaha penyederhanaan dari metode USBR (yaitu menghilangkan analisa *hydrometer*) dengan menggunakan beberapa

ukuran sampel kepadatan tanah ekspansif, persen fraksi lolos saringan No. 200, batas cair (LL), standar perlawanan penetrasi dan hubungan antara data kembang dari uji kembang dengan alat Oedometer (sampel *undisturbed* pada beban tambahan 49,05 kPa). Hasil dari klasifikasi ini serta derajat kembang seperti pada Tabel 3.10.

Chen (1975) juga memberikan suatu hubungan antara indeks plastisitas (PI) tanah ekspansif dan potensi kembang (*swelling potential*) tanah ekspansif yang telah diteliti dari berbagai peneliti sebelumnya seperti pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 *Grafik Hubungan antara Potensi Kembang dan Indek Plastisitas (Chen, 1975).*

MILIK
Perpustakaan

Tabel 3.10 *Klasifikasi Data Lapangan dan Laboratorium terhadap Derajat Kembang (Chen, 1965)*

Data lapangan dan laboratorium			Kemungkinan kembang, % (persen total perubahan volume)	Derajat kembang
Lolos<#200 (%)	Batas Cair (%)	Std Penetrasi (Blows/m)		
<30	<30	<10	<1	Kecil
30 – 60	30 – 40	10 – 20	1 – 5	Sedang
60 -95	40 -60	20 – 30	3 - 10	Tinggi
>95	>60	>30	>10	Sangat tinggi

3.4.7 Metode Sorochan (1970)

Metode Sorochan merupakan metode dengan korelasi yang melibatkan hubungan antara indeks kembang (rasio regangan yang terjadi dengan regangan awal) dengan indeks plastisitas (PI) tanah ekspansif. Korelasi parameter-parameter tanah ekspansif tersebut menghasilkan derajat kembang seperti pada Tabel 3.11.

Tabel 3.11 *Hubungan Indeks Kembang dengan Indeks Plastisitas (PI) Terhadap Derajat Kembang (Sorochan, 1970)*

Indeks kembang, e/e_0					Derajat kembang
15<PI<20	20<PI<25	25<PI<30	30<PI<35	35<PI<40	
<1,12	<1,11	<1,09	<1,08	<1,07	Non swelling
1,12 – 1,23	1,11– 1,21	1,09-1,19	1,08-1,17	1,07-1,15	Kecil
1,23-1,39	1,21-1,30	1,19-1,28	1,17-1,25	1,15-1,22	Sedang
>1,39	>1,30	>1,28	>1,25	>1,22	Tinggi

3.4.8 Metoda Vijayvergia dan Ghazzaly (1973)

Metode ini menggambarkan hubungan antara indeks plastisitas (PI) tanah ekspansif khususnya lempung sebagai rasio kadar air alami atau batas cair (LL) tanah ekspansif terhadap korelasi kembang dengan menggunakan alat Oedometer dengan memberikan beban tambahan (*surcharge*) sebesar 9,81 kPa dan data tekanan kembang tanah ekspansif. Selain itu, derajat kembang spesifik, batas kemungkinan kembang dan tekanan kembang dapat digambarkan pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 *Hubungan Derajat Kembang Spesifik Kemungkinan Tekanan Kembang dan Kemungkinan Kembang (Vijayvergia dan Ghazzaly, 1973)*

Rasio kadar air alami (kadar air alami/batas cair)	Kemungkinan tekanan kembang (kPa)	Kemungkinan kembang, % (persen total perubahan volume)
>0,5	<0,3	<1
0,37-0,5	0,3-1,25	1-4
0,25-0,37	1,25-3,0	4 – 10
<0,25	>3,0	>10

Metode ini didasarkan kepada kumpulan data sampel dari variasi yang luas dengan penggunaan yang sangat sederhana dalam hal ini adalah kadar air alami dan batas cair, tetapi pengalaman yang baik untuk aplikasi metoda ini relatif terbatas.

3.5 METODE MINERALOGI

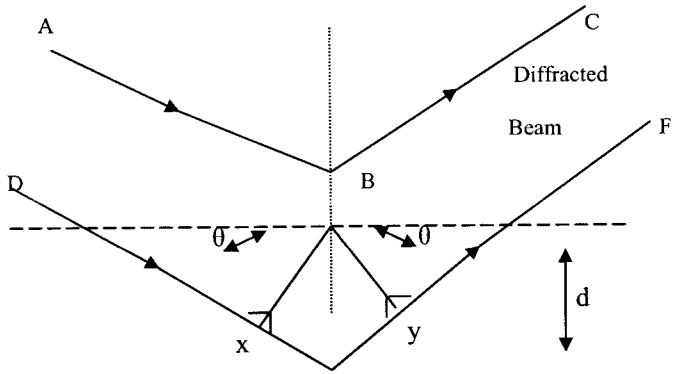
Untuk melakukan identifikasi tanah lempung ekspansif, selain dua metode yang dikemukakan oleh Thomas (1998) yaitu secara langsung dan tidak langsung dan metode kombinasi dari Snethen, dkk. (1975), ada satu metode lagi yaitu identifikasi mineralogi (Noormalasari dan Susanto, 2000). Identifikasi mineralogi didasarkan atas susunan mineralnya khususnya mineral *montmorillonite*.

Untuk mengetahui susunan mineral dan komposisi mineral dapat ditentukan dengan empat cara yaitu: difraksi sinar-X, mikroskop elektron dan analisa kimia.

3.5.1 Difraksi Siar-X (X-*ray difraction*)

Difraksi sinar-X (XRD) dapat dipergunakan sebagai salah satu cara untuk mengidentifikasi mineral lempung. Secara mineralogi cara ini dilakukan dengan menyinari mineral lempung (diamater < 0,002 mm) menggunakan sinar-X yang monokrom (Tovey, 1986). Skematik penyinaran tanah lempung yang berupa bubuk seperti terlihat pada Gambar 3.13. Berkas sinar-X yang ditembakan ke mineral lempung akan dibelokkan pada saat mengenai

mineral lempung, dengan berkas sinar ABC dan berkas DEF mempunyai perbedaan jarak maupun waktu tempuh.



Gambar 3.13 *Difraksi Sinar-X dalam Identifikasi Mineral (Tovey, 1986).*

Mekanisme difraksi sinar-X seperti terlihat pada Gambar 3.9, dapat ditentukan hubungan jarak atom dalam contoh tanah sebagai berikut ini.

$$d = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta} \tag{3.8}$$

dengan

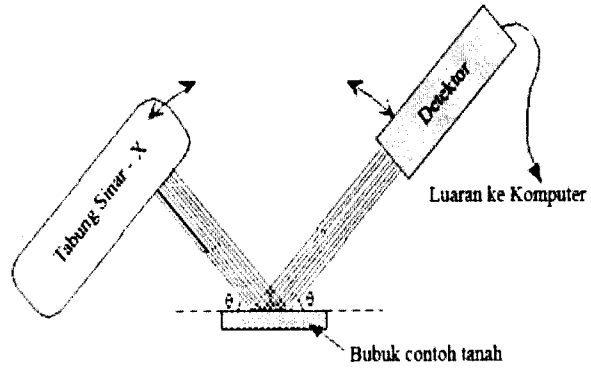
d : jarak atom dalam mineral lempung (Angstrom),
λ : panjang gelombang sinar-x (1,789 untuk Cobalt),
θ : sudut pantul sinar-x (3° s/d 10°),
n : jumlah bayangan (1, 2 ...).

Apabila panjang gelombang (λ) tetap, dan sudut pantul (θ) bervariasi, maka untuk (n) yang berbeda akan diperoleh suatu puncak dari pembelokan sinar-X. Bila dianggap setiap mineral mempunyai jarak atom (d) yang spesifik, maka identitas mineral lempung dapat diketahui dari sudut pembelokan (θ) yang maksimum (*peak*).

O'Neill dan Poormoayed (1980) menyatakan bahwa pengujian yang lebih terinci seperti difraksi sinar-X dan uji daya pertukaran kation sangat berguna untuk menentukan jenis mineral yang dominan pada suatu jenis

tanah. Pengujian difraksi sinar-X diperlukan untuk mempelajari struktur atom pada mineral tanahnya, sehingga dapat ditentukan bentuk dan unsur struktur kristalnya (Holts dan Kovacs, 1981).

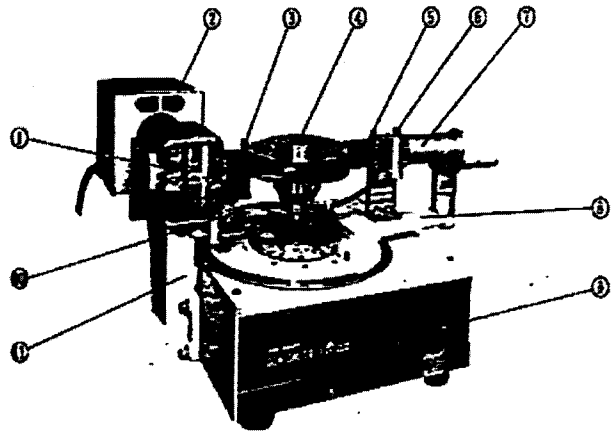
Jika seberkas sinar-X di jatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal itu akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sama dengan jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Proses difraksi sinar-X (XRD) seperti pada Gambar 3.14. Sinar-X dibiaskan dan ditangkap oleh detektor kemudian diterjemahkan sebagai sebuah puncak difraksi. Semakin banyak bidang kristal yang terdapat dalam sampel, semakin kuat intensitas pembiasan yang dihasilkan. Tiap puncak yang muncul pada pola difraktogram mewakili satu bidang kristal yang memiliki orientasi tertentu dalam sumbu tiga dimensi. Puncak-puncak yang didapatkan dari data pengukuran ini kemudian dicocokkan dengan standar difraksi sinar-X untuk semua jenis material (Nelson, 2010).



Gambar 3.14 *Proses Analisa Difraksi Sinar X (Nelson, 2010)*

Skematik alat analisa difraksi sinar-X (XRD) seperti pada Gambar 3.14, yang terdiri terdiri tiga bagian utama yaitu: tabung sinar X, tempat sampel tanah dan detektor. Tabung sinar X berfungsi untuk menghasilkan sinar X. Detektor terletak bersebelahan dengan tabung sinar X dan dapat digerakkan dengan arah ? dari nilai 0-90°. Detektor terhubung dengan PC untuk menyimpan hasil analisa XRD. Tabung sampel terletak diantara tabung sinar-X dan detektor. Sampel tanah lempung ekspansif yang di-

sinari sinar-X dalam bentuk bubuk (diamater < 0,002 mm). Gambar alat analisa difraksi sinar-X (XRD) seperti pada Gambar 3.15.

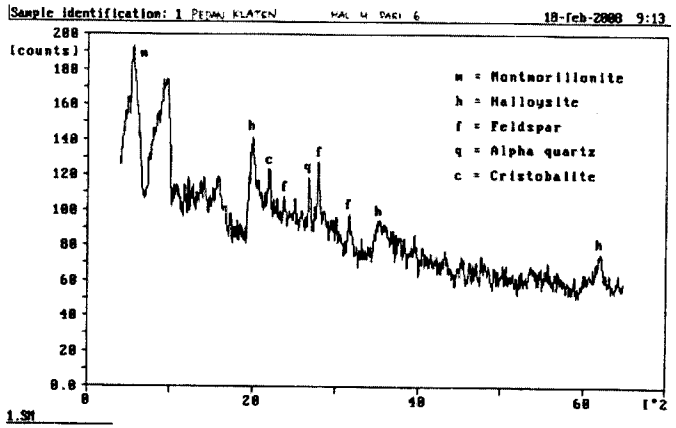


Gambar 5.15 *Rincian Alat XRD terdiri dari (1) Tabung Sinar-X; (2) Penunjuk Iiradiasi Sinar-X; (3) Celah Divergensi; (4) Tempat Sampel; (5) Celah Pengaman Hamburan Udara; (6) Celah Pendeteksi; (7) Detektor Sintilasi; (8) Penegang Detektor; (9) Knop Scanning; (10) Detektor Program; (11) Prringan Program.*

(a) (b)

Gambar 3.16 *Alat Sinar-X (a) Tampak Luar; (b) Bagian dalam Alat Sinar-X*

Hasil uji difraksi sinar-X tanah lempung ekspansif dari Pedan, Klaten (Jawa Tengah) yang dilakukan di Balai Besar Keramik Bandung seperti pada Gambar 3.16. Hasil tersebut memperlihatkan ada 5 mineral yang terkandung dalam tanah lempung tersebut. Mineral tersebut adalah; Montmorillonite (m), Halloysite (h), Feldspar (f), alpha quartz (q) dan Cristabollite (c) dan kandungan dengan komposisi terbesar adalah Montmorillonite (m) sesuai dengan puncak (*peak*) yang tertinggi.



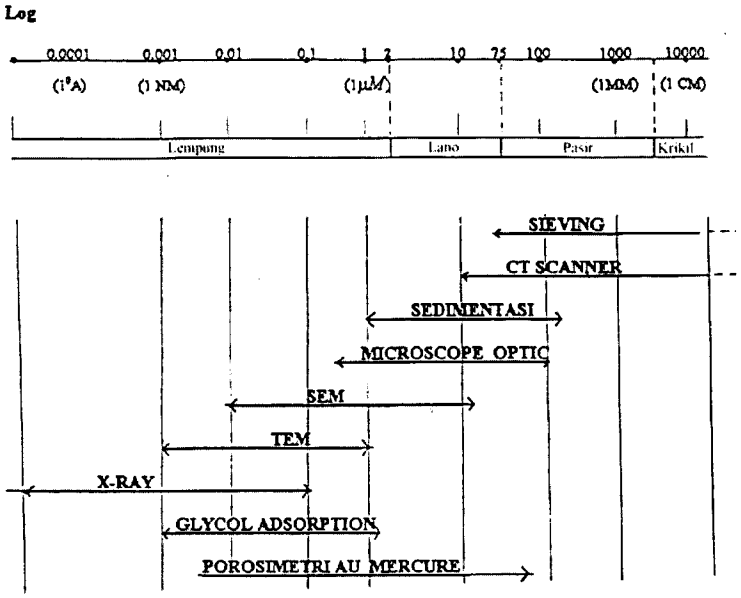
Gambar 3.17 *Difraksi Sinar-X Tanah Lempung Pedan (Klaten).*

3.5.2 Mikroskop Elektron

Mikroskop elektron merupakan alat yang sangat berharga untuk studi tanah, sebab dengan mikroskop elektron moderen, adalah dimungkinkan untuk mengungkapkan jarak < 100 Angstrom, sehingga alat ini dapat digunakan untuk studi partikel lempung (Wahyudi, 1998).

Jenis misrokop elektron moderen ada 3 jenis yaitu: *Scanning Elektron Miscroscope* (SEM), *Transmission Electron Miscroscope* (TEM) dan *Computed Tomography Scanner* (CT-*Scanner*). Tetapi yang dapat digunakan untuk studi partikel lempung hanya ada 2 yaitu: SEM dan TEM, seperti pada Gambar 3.18. Pada Gambar 3.18 tersebut memeperlihatkan, *Computed Tomography Scanner* (CT-*Scanner*) hanya dapat digunakan untuk mempelajari partikel tanah kerikil, pasir dan lanau. Sedangkan *Scan-*

ning Elektron Miscroscope (SEM) dan *Transmission Electron Miscroscope* (TEM) dapat digunakan untuk mempelajari partikel lempung. Sehingga untuk menganalisis *surface area* tanah lempung ekspansif digunakan alat *Scanning Elektron Miscroscope* (SEM) dan *Transmission Electron Miscroscope* (TEM).

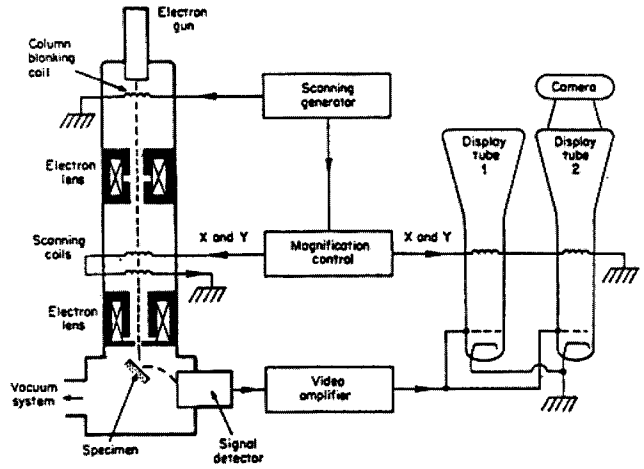


Gambar 3.18 *Analisis Dimensi Partikel Tanah.*

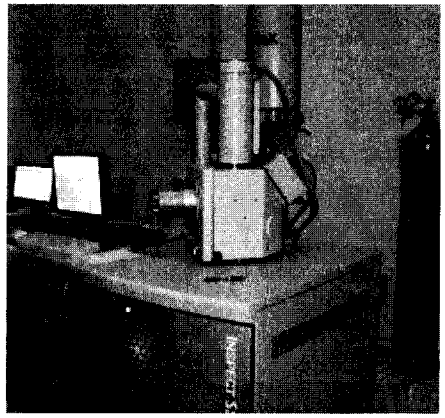
3.5.2.1 *Scanning Elektron Miscroscope* (SEM)

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) adalah peralatan untuk menguji/ melihat struktur permukaan sampel dengan perbesaran sampai dengan 1.000.000 kali. Peralatan ini memiliki 2 modus operasional, *low vacum* yang digunakan untuk sampel non-konduktif dan *high vacum* yang digunakan untuk sampel konduktif. Alat ini dilengkapi EDAX yaitu alat yang dapat digunakan untuk menguji kandungan unsur pada bahan yang dilihat struktur permukaannya. Kandungan unsur yang dapat diuji mulai dari Berilium s/d Uranium. Sebaran unsur didalam bahan juga dapat dideteksi berupa *surface area*, *line* dan *mapping*.

Skematik alat SEM seperti pada Gambar 3.20, sedangkan contoh alat SEM **merk FEI, type: Inspect-S50 yang dimilikki Laboratorium Sentral Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Negeri Malang** seperti pada Gambar 3.21 dan Gambar 3.22 merupakan contoh hasil uji SEM yang dilakukan mehmet (2013) pada tanah campuran kaolinit 85% dan bentonit 15%..



Gambar 3.19 *Skematik Scanning Elektron Miscroscope (SEM).*



Gambar 3.20 *SEM Merk FEI, Type Inspect-S50 (FMIPA UM, 2013).*

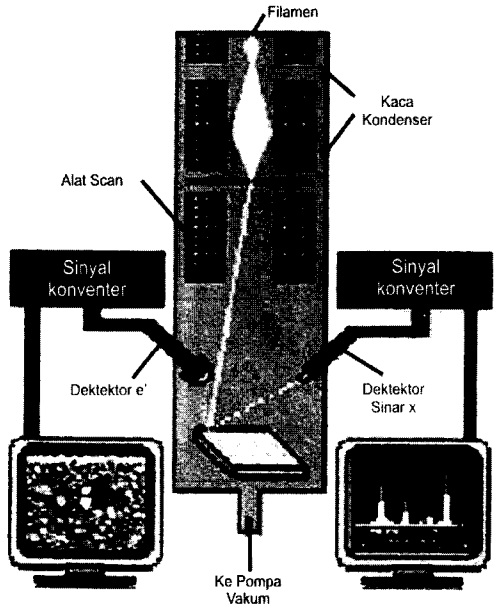
Gambar 3.21 *SEM Kaolinit 85% + Bentonit 15% (Mehmet, 2013).*

3.5.2.2 Transmission Electron Miscroscope (TEM)

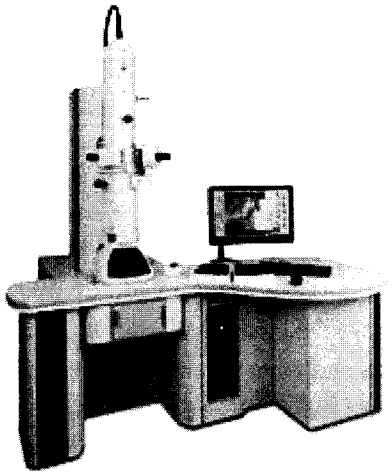
TEM adalah mikroskop yang mampu untuk melakukan pembesaran obyek sampai 2 juta kali, yang menggunakan elektro statik dan elektro magnetik untuk mengontrol pencahayaan dan tampilan gambar serta memiliki kemampuan pembesaran objek serta resolusi yang jauh lebih bagus dari pada mikroskop cahaya. Mikroskop elektron ini menggunakan jauh lebih banyak energi dan radiasi elektromagnetik yang lebih pendek dibandingkan mikroskop cahaya

TEM memiliki fungsi untuk analisis morfologi, struktur Kristal, dan komposisi spesimen. TEM menyediakan resolusi lebih tinggi dibandingkan SEM, dan dapat memudahkan analisis ukuran atom (dalam jangkauan nanometer) menggunakan energi berkas electron sekitar 60 sampai 350 keV. TEM cocok untuk menjadi teknik pencitraan material padat pada resolusi atomik. Informasi struktural diperoleh dengan pencitraan resolusi tinggi dan difraksi elektron.

Skematik alat TEM seperti pada Gambar 3.22, sedangkan contoh alat TEM **merk JEOL tipe JEM-1400 Plus buatan JEOL USA Inc** seperti pada Gambar 3.23.

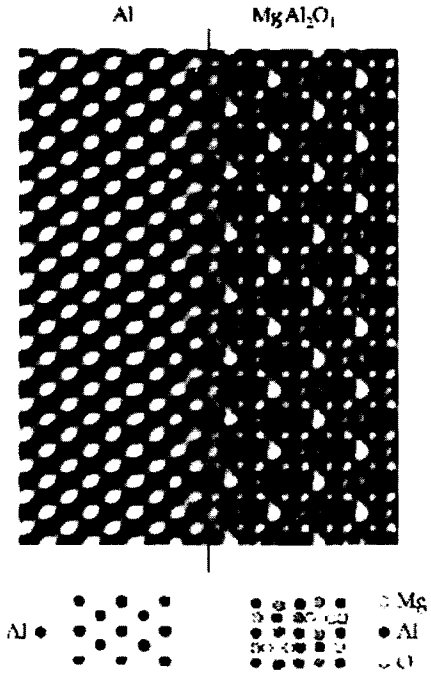


Gambar 3.22 *Skematik Alat TEM (Miroslav, 2001).*



Gambar 3.23 *Alat TEM Merk JEOL Tipe JEM-1400 Plus (JEOL USA Inc).*

Contoh hasil uji TEM yang dilakukan mehmet (2013) pada tanah campuran kaolinit 85% dan bentonit 15% seperti pada gambar 3.24.

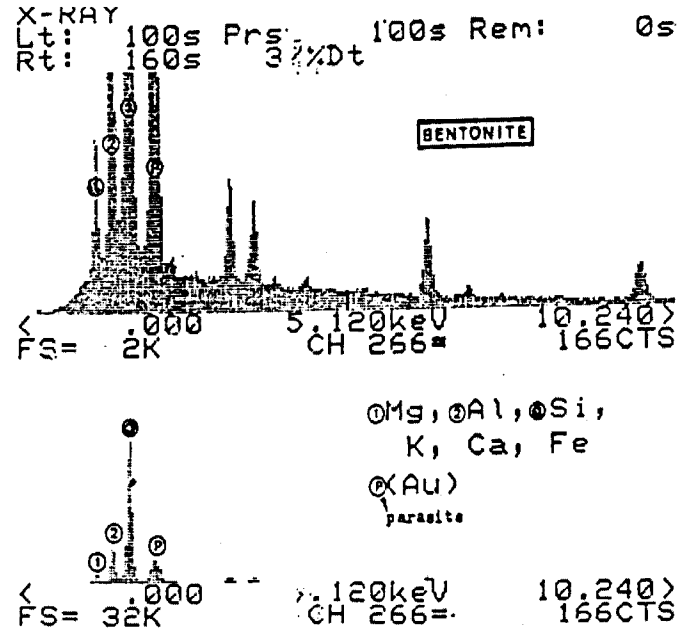


Gambar 3.24 *Contoh Hasil Uji TEM dengan Unsur Kimia (Miroslav, 2001).*

3.5.3 Analisa Kimia

Untuk mempelajari jenis-jenis atom atau molekul tanah lempung, dapat digunakan analisa kimia. Analisa kimia dapat dilakukan bersamaan dengan pengamatan pada SEM tau TEM. Jadi pada peralatan SEM dan TEM tersebut ditambahakan suatu peralatan yang berfungsi untuk menganalisa secara kimiawi suatu material. Seperti pada alat SEM atau TEM yang dilengkapi dengan alat EDAX yang dapat digunakan untuk mengetahui kandungan unsur mulai dari unsur berilium hingga unsur uranium. Untuk tanah lempung ekspansif ada 2 unsur penting yang terkandung dalam

mineral *montmorillonit* yaitu Natrium (Na) dan Calsium (Ca), sehingga di alam ada 2 *montmorillonit* yaiu: Na- *montmorillonit* dan Ca- *montmorillonit*. Contoh hasil uji unsur kimia dari alat SEM pada tanah bentonit, seperti pada Gambar 3.25.



Gambar 3.25 *Hasil Uji Unsur Kimia dari Alat SEM (Miroslav, 2001).*

Uji unsur kimia pada tanah lempung ekspansif dapat dilakukan dengan beberapa metode seperti yang dilakukan oleh Laboratorium Kimia Analitik Jurusan Kimia FMIPA UGM Jogjakarta. Metode yang digunakan diantaranya: *Atomic Absorption Spectrum* (AAS) dan *Ultra Violet Vision Spectrum* (UVVS). Hasil uji kedua metode tersebut seperti pada Gambar 3.26. Uji AAS dan UVVS dilakukan pada sampel tanah bentonit dan tanah campuran antara bentonit dengan tanah lempung ekspansif dari Soko (Ngawi).

LABORATORIUM KIMIA ANALITIK

JURUSAN KIMIA FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS GADJAH MADA

HASIL ANALISIS UNSUR KIMIA

No : 3410/HA-KA/03/11
Pengirim : **AGUS TUGAS SUDJIANTO**
Alamat : Jurusan Teknik Sipil & Lingkungan UGM, Jl. Grafika no. 2, Yogya
Jumlah Sampel : 4 bh
Penentuan : *Major Element* dalam sampel Bentonit dan Tanah Lempung
Tgl. Analisis : 17 Maret 2011

NO	KODE SAMPEL	PARAMETER	HASIL PENGUKURAN (%)			METODE
			I	II	III	
1	Bentonit	Al_2O_3	13,8110	13,6629	13,5641	Atomic Absorption Spect.
2		CaO	0,9984	1,0398	0,9984	"
3		Fe_2O_3	7,2352	7,6353	7,2352	"
4		MgO	0,6944	0,6648	0,6648	"
5		K_2O	0,2244	0,2139	0,2139	"
6		Na_2O	2,8702	2,8702	2,8353	"
7		SiO_2	53,3969	54,7080	54,0488	"
8		TiO_2	0,2111	0,2000	0,2022	UV-Vis. Spect.
9		Hilang pijar	20,5584	19,0051	20,2373	Atomic Absorption Spect
10	Lempung 90% + Bentonit 10%	Al_2O_3	17,9295	18,4159	17,7350	Atomic Absorption Spect.
11		CaO	0,9949	0,9832	1,0182	"
12		Fe_2O_3	8,0117	8,0117	8,1102	"
13		MgO	1,3133	1,2900	1,3250	"
14		K_2O	0,2589	0,2555	0,2555	"
15		Na_2O	0,9090	0,8572	0,9263	"
16		SiO_2	47,4492	48,7333	49,3753	"
17		TiO_2	0,2000	0,2000	0,2000	UV-Vis. Spect.
18		Hilang pijar	22,9335	21,2532	21,0545	Atomic Absorption Spect
19	Lempung 80% + Bentonit 20%	Al_2O_3	18,2892	18,1424	18,3382	Atomic Absorption Spect.
20		CaO	1,0130	1,0071	1,0306	"
21		Fe_2O_3	7,8648	7,8648	7,7657	"
22		MgO	1,3218	1,3042	1,3159	"
23		K_2O	0,2710	0,2675	0,2571	"
24		Na_2O	1,1555	1,1572	1,1263	"
25		SiO_2	49,6920	50,3381	50,9843	"
26		TiO_2	0,2000	0,2000	0,2000	UV-Vis. Spect.
27		Hilang pijar	20,1927	19,7187	18,9819	Atomic Absorption Spect
28	Lempung 70% + Bentonit 30%	Al_2O_3	17,9154	18,3073	18,6993	Atomic Absorption Spect.
29		CaO	1,0551	1,0845	1,1021	"
30		Fe_2O_3	7,6742	7,4757	7,5749	"
31		MgO	1,4816	1,5051	1,4699	"
32		K_2O	0,2643	0,2643	0,2608	"
33		Na_2O	1,3424	1,3597	1,2905	"
34		SiO_2	49,7410	49,7410	51,0346	"
35		TiO_2	0,2000	0,2000	0,2000	UV-Vis. Spect.
36		Hilang pijar	20,326	20,0624	18,3679	Atomic Absorption Spect

Gambar 3.26 *Contoh Hasil Uji Kimia di Laboratorium Kimia Analiti Jurusan Kimia FMIPA UGM Jogjakarta.*

Dari ke empat metode identifikasi tanah lempung ekspansif tersebut, metode kombinasi merupakan metode yang dapat memberikan grup klasifikasi yang paling baik. Metode kombinasi telah merangkum metode langsung, metode tidak langsung dan metode mineralogis, sehingga dalam penelitian ini, untuk identifikasi tanah lempung ekspansif digunakan metode kombinasi.

Sudjianto (2012) merangkum metode identifikasi tanah lempung ekspansif menjadi 3 bagian yaitu: metode klasifikasi tanah ekspansif, metode uji kembang tanah ekspansif dan metode formulasisasi perilaku kembang tanah lempung ekspansif. Rangkuman metode identifikssi tersebut seperti pada Tabel 3.13.

Tabel 3.13 *Rangkuman Metode Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif (Sudjianto, 2012)*

No	Topik	Sub Topik	Referensi
1	Metode klasifikasi tanah ekspansif	Metode tidak langsung: dengan parameter LL, IP, fraksi lempung dan surcharge	Erol (1987)
		Metode langsung: pengukuran dengan alat Oedometer	Holtz dan Gibbs (1956), Seed dkk (1962), Merwe (1964), Sorochan (1991), Sahu (2000), All Rawas dan Ghooesen (2006)
		Metode mineralogi: dengan difraksi sinar - X	Holtz dan Kovacs (1981), O'Neill dan Poormoayed (1980), Normalasari dan Susanto (2000), Syawal (2004), Sudjianto (2007, 2012)
		Metode kombinsi: kombinasi antara uji di laboratorium dan perhitungan empiris	Almeyer (1955), Ladd dan Lambe (1961), Vijayvergia dan Ghazally (1973), Chen (1975), Sapaz (2004), Sudjianto (2012)

Tabel 3.13 *Rangkuman Metode Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif (Sudjianto, 2012) (Lanjutan)*

No	Topik	Sub Topik	Referensi
2	Metode uji kembang tanah ekspansif	Kembang vertikal tanpa beban dengan alat Oedometer	Sudjianto (2007), Wibawa dan Raharjo (2000), Raharjo dan Santoso (2002), Iswan (2003), Sudjianto (2012)
		Kembang vertikal dengan beban dengan alat Oedometer	Erol dan Ergun (1994), Mawire dan Senneset (1998), Sabagh (2000), Syawal (2004), Sudjianto (2007, 2012)
		Kembang vertikal dengan beban dengan alat Geonor	Supriyono (1993)
		Kembang vertikal dan horisontal tanpa beban dengan Oedometer	Ofer (1980), Sorochan (1991). Sudjianto (2012)
		Kembang vertikal dan horisontal dengan variasi beban dengan LSP	Sapaz (2004)
		Kembang volumetrik tanpa beban dengan kerosene	Taboada (2003), Myers (2005)
		Kembang volumetrik tanpa beban dan penambahan beban dengan oedometer modifikasi	Sudjianto (2012)
		Kembang volumetrik tanpa beban dengan jangka sorong manual	Hange (2009)
		Kembang volumetrik tanpa beban dengan jangka sorong digital	Sudjianto (2012)
3.	Formulasisasi perilaku kembang	Kembang bebas tanah ekspansif *undisturbed* εvertikal = f (PI)	Chen (1975), Nayak (1980)

Tabel 3.13 *Rangkuman Metode Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif (Sudjianto, 2012) (Lanjutan)*

No	Topik	Sub Topik	Referensi
		Kembang vertikal tanah ekspansif *disturbed* 259 sampel; εvertikal = f (PI)	Bandypadhyay (1981)
		Kembang vertikal dan horisontal tanah ekspansif *undisturbed* dan *disturbed* εvh = f (w)	Sorochan (1991)
		Kembang vertikal tanah ekspansif *disturbed* εvertikal = f (PI, A, C dan w)	Sapaz (2004)
		Kembang volumetrik tanah ekspansif *disturbed* εvolumetrik = f (IP, A, S_r dan σ'_v)	Sudjianto (2012)

-oo0oo-

BAB IV

KLASIFIKASI TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

4.1 UMUM

Di lapangan, jika terdapat keretakan dan atau celah permukaan pada deposit lempung akibat proses pengeringan merupakan suatu indikasi potensi ekspansif. Dari pengalaman tampak bahwa masalah perilaku ekspansif di permukaan tanah dicirikan tingginya plastisitas, kekakuan dan terdapatnya retakan lempung *overconsolidated.* Untuk identifikasi tanah ekspansif di laboratorium, telah dikembangkan beberapa metode klasifikasi. Umumnya, tanah dengan indeks plastisitas (PI) kurang dari 15% tidak akan memperlihatkan perilaku ekspansif.

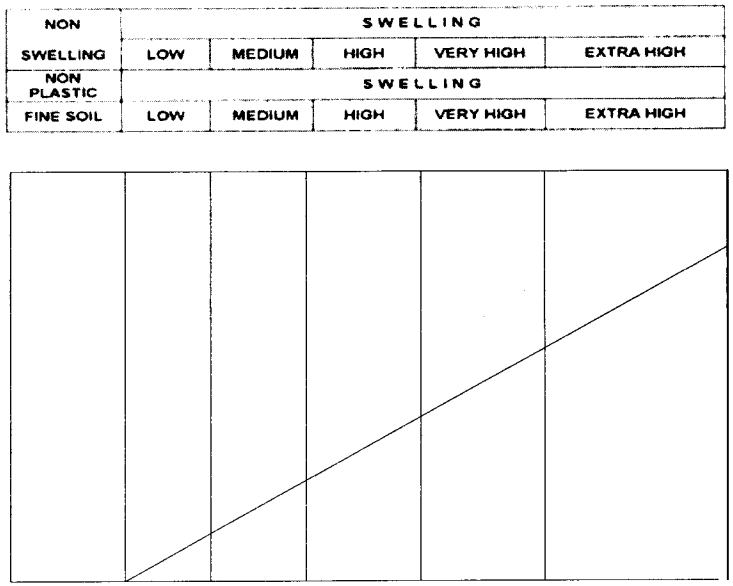
Klasifikasi yang didasarkan atas indeks *properties* tanah seperti kandungan lempung dan plastisitas adalah umum dilaksanakan dalam praktek untuk identifikasi tanah lempung ekspansif. Indeks Plastisitas (IP) adalah parameter yang paling sering digunakan sebagai indikator awal, karena karakteristik plastisitas dan sifat perubahan volume tanah saling terkait erat dan dipengaruhi oleh partikel berukuran koloid. Batas *Atterberg* dan kandungan butir lempung digunakan oleh Skempton (1953) untuk identifikasi tanah lempung ekspansif.

Ada beberapa metode klasifikasi tanah lempung ekspansif yang selama ini digunakan untuk identifikasi awal tingkat ekspansif, antara lain:

klasifikasi tanah sistem *Cassagrande*, klasifikasi tanah sistem Merwe, klasifikasi tanah berdasarkan aktivitas (A) tanah dan Klasifikasi tanah sistem Holtz dan Gibbs.

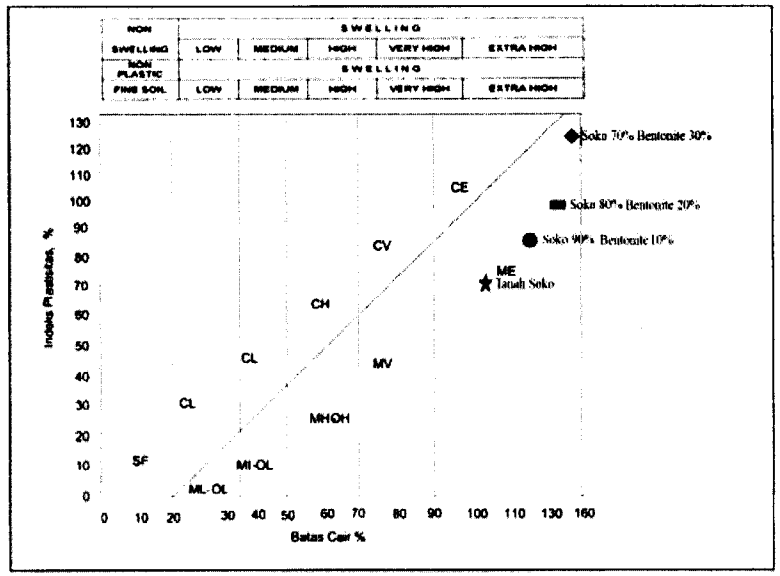
4.2 KLASIFIKASI TANAH SISTEM *CASSAGRANDE*

Sistem klasifikasi tanah lempung ekspansif dapat dilakukan menggunakan grafik *Cassagrande* yang sering digunakan di Inggris (*British Standard Classification System*). Hasil uji dari batas *Atterberg* digambarkan dalam grafik hubungan antara batas cair (LL) dengan indeks plastisitas (IP). Dari penggambaran tersebut dapat dikelompokkan menjadi 6 kelompok yaitu tidak mengembang, rendah, sedang, tinggi, sangat tinggi dan ekstra tinggi seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Klasifikasi Tanah Cassagrande yang Telah Dimodifikasi (Sahu, 2000).*

Sudjianto (2011) pada pelaksanaan identifikasi awal tanah lempung ekspansif di Soko (Ngawi) dan tanah campuran (tanah Soko + Na-bentonit) menggunakan klasifikasi tanah sistem *Cassagrande*, hasil klasifikasi seperti pada Gambar 4.2.

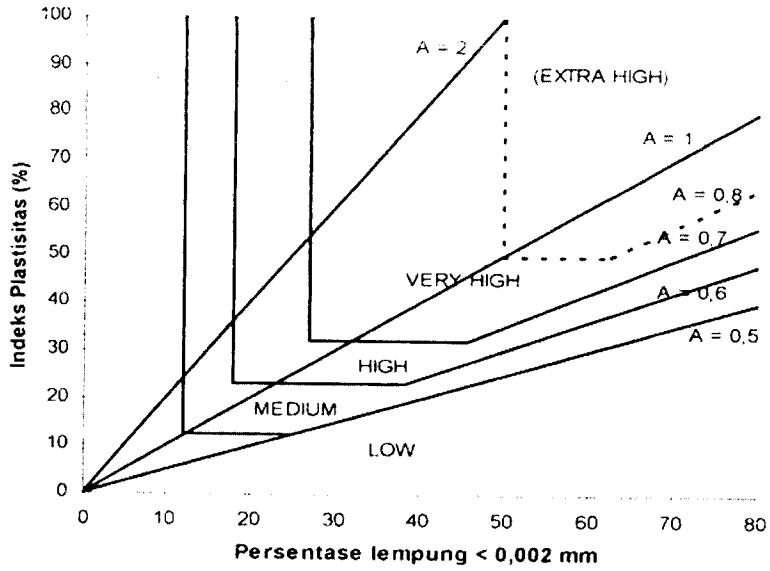


Gambar 4.2 *Klasifikasi Tanah Sistim Cassagrande Modifikasi (Sudjianto, 2011).*

Tanah Soko (Ngawi) dengan nilai batas cair (LL) 101,09 % dan indeks plastisitas (IP) 71,32 % mempunyai tingkat kembang *extra high* (sangat tinggi) dengan notasi ME. Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 90 % + Na-bentonit 10 % dengan nilai batas cair (LL) 119,75 % dan indeks plastisitas (IP) 87,83 % mempunyai tingkat kembang *extra high* (sangat tinggi) dengan notasi ME. Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 80 % + Na-bentonite 20 % dengan nilai batas cair (LL) 136,66 % dan indeks plastisitas (IP) 100,44 % mempunyai tingkat kembang *extra high* (sangat tinggi) dengan notasi CE, demikian pula untuk tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 70 % + bentonite 30 % dengan nilai batas cair (LL) 164,03 % dan indeks plastisitas (IP) 122,80 % mempunyai tingkat kembang *extra high* (sangat tinggi) dengan notasi CE.

4.3 KLASIFIKASI TANAH SISTEM MERWE

Klasifikasi tanah sistem Merwe (1964) ini didasarkan pada kandungan lempung dan indeks plastisitas yang digambarkan dalam suatu grafik. Hasil penggambaran ini memperlihatkan kelompok potensi kembang yaitu kecil, sedang, tinggi, sangat tinggi dan ekstra tinggi seperti pada Gambar 4.3.

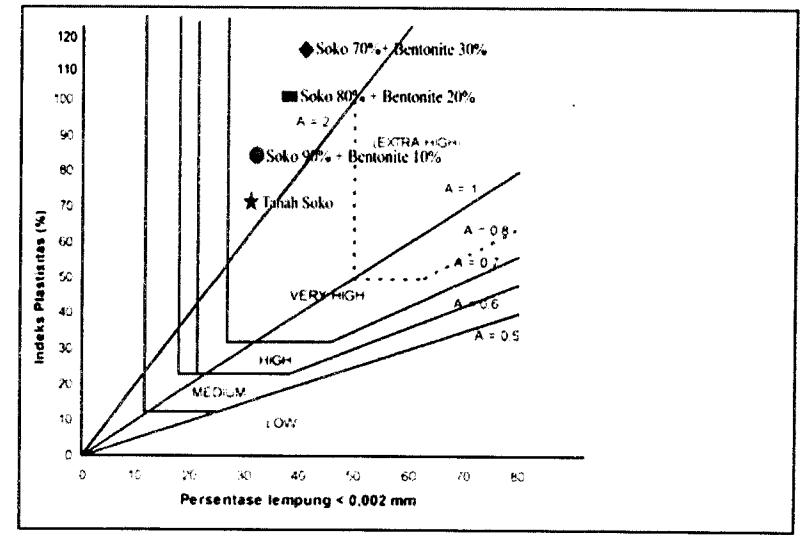


Gambar 4.3 *Klasifikasi Tanah Metoda Merwe (1964).*

Klasifikasi tanah metoda Merwe (1964) digunakan Sudjianto (2011) untuk identifikasi awal tanah lempung ekspansif dari Soko (Ngawi) dan tanah campuran (tanah Soko + Na-bentonit), hasil klasifikasi seperti pada Gambar 4.4.

Klasifikasi tanah sistim Merwe yang didasarkan pada grafik hubungan antara persentase lempung < 0,002 mm dan indeks plastisitas (IP) tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran seperti pada Gambar 4.4. Tanah Soko (Ngawi) dengan nilai persentase lempung < 0,002 mm sebesar 30,00 % dan indeks plastisitas (IP) 71,32 % mempunyai tingkat kembang *very high*

(sangat tinggi) dengan notasi A = 2. Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 90 % + Na-bentonit 10 % dengan nilai persentase lempung < 0,0002 mm sebesar 32,12 % dan indeks plastisitas (IP) 87,83 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi) dengan notasi A = 2. Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 80 % + Na-bentonit 20 % dengan nilai persentase lempung < 0,002 mm sebesar 36,38 % dan indeks plastisitas (IP) 100,44 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi) dengan notasi A = 2, demikian pula untuk tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 70 % + Na-bentonit 30 % dengan nilai nilai persentase lempung < 0,002 mm sebesar 40,93 % dan indeks plastisitas (IP) 122,80 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi) dengan notasi A = 2.



Gambar 4.4 *Klasifikasi Tanah Sistim Merwe (Sudjianto, 2012).*

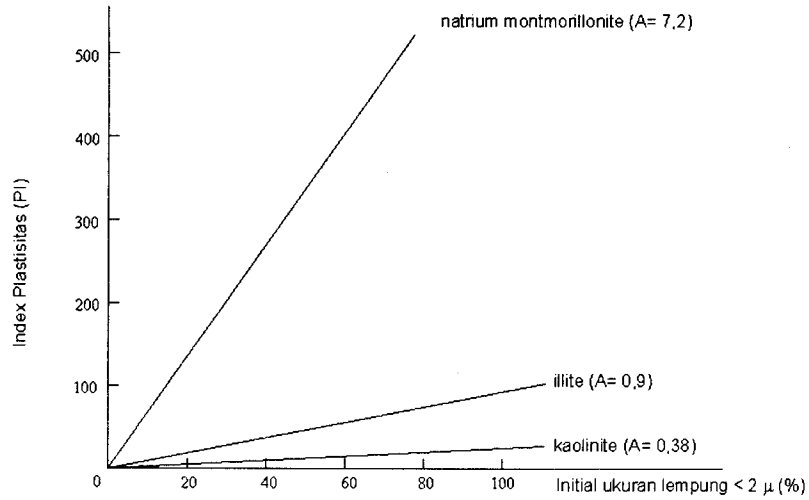
4.4 KLASIFIKASI TANAH BERDASARKAN AKTIVITAS (A) TANAH

Sifat plastis tanah disebabkan oleh air yang terserap di sekeliling permukaan partikel lempung, maka diharapkan tipe dan jumlah mineral lempung

yang dikandung di dalam suatu tanah akan mempengaruhi batas plastis dan batas cair tanah. Hardiyatmo (2006) mendefinisikan aktivitas (A) sebagai perbandingan antara indeks plastisitas (IP) dengan persen fraksi lempung atau dinyatakan dalam hubungan :

$$\text{Aktivitas (A)} = \frac{IP}{C} \qquad (4.1)$$

dengan C adalah fraksi lempung (persen partikel dengan diameter < 0, 002 mm) dari hidrometer menurut ASTM D-422. Variasi indeks plastisitas (IP) dengan persentase fraksi lempung (C) untuk berbagai macam lempung seperti pada Gambar 4.5.



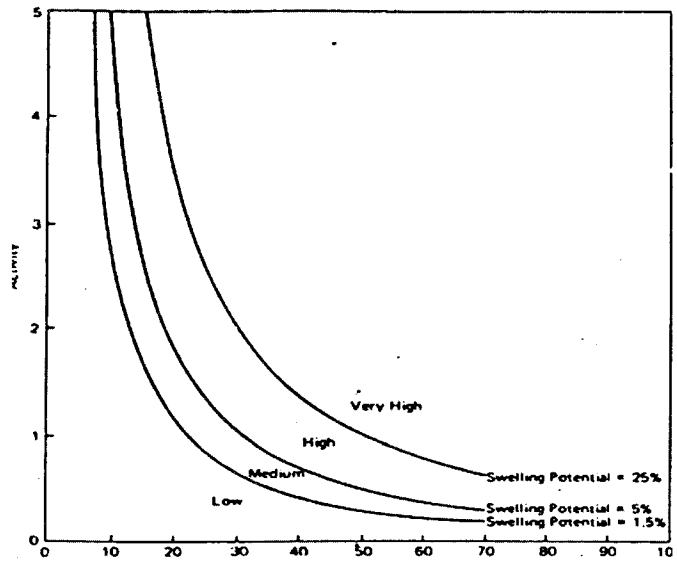
Gambar 4.5 *Variasi Indeks Plastisitas dengan Persentase Fraksi Lempung (Skempton, 1956).*

Gambar 4.5 memperlihatkan, bahwa aktivitas (A) tanah merupakan fungsi dari jenis mineral lempung yang dikandungnya. Aktivitas (A) digunakan untuk mengidentifikasikan kemampuan pengembangan tanah lempung ekspansif. Nilai dari aktivitas (A) untuk berbagai mineral lempung diberikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 *Aktivitas Mineral Lempung (Hardiyatmo, 2006)*

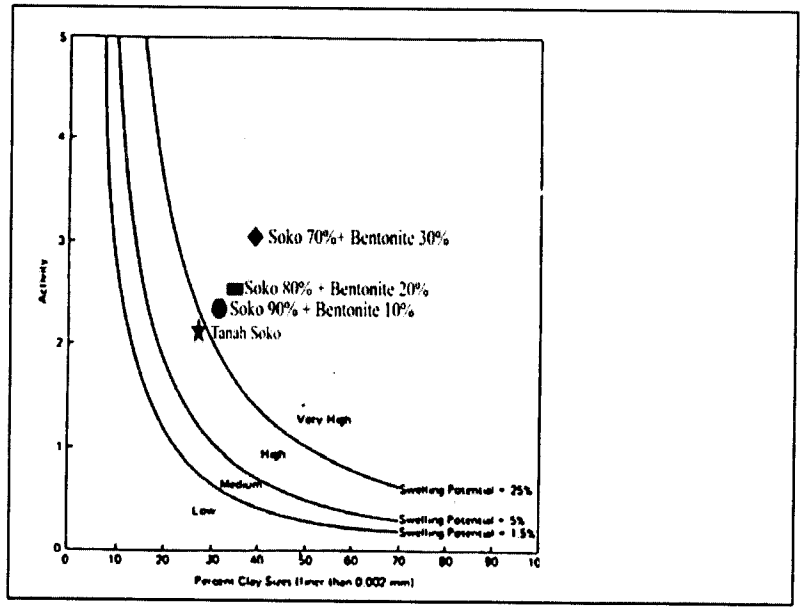
Mineral	Aktivitas (A)
Na montmorillonite	4 – 7
Ca montmorillonite	1,5
Illite	0,5 – 1,3
Kaolinite	0,3 – 0,5
Halloysite (dehydrated)	0,5
Halloysite (hydrated)	0,1
Attapulgite	0,5 – 1,2
Allophane	0,5 – 1,2
Mica (muscovite)	0,2
Calcite	0,2
Quartz	0

Hubungan antara aktivitas (A) dengan persen fraksi lempung (C) digunakan grafik yang dibuat oleh Seed, dkk. (1962), seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 *Diagram Klasifikasi Potensi Kembang (Seed, dkk., 1962).*

Penggunaan klasifikasi tanah metode Seed, dkk (1962) digunakan Sudjianto (2011) untuk membuat klasifikasi tanah lempung ekspansif dari Soko (Ngawi) dan tanah campuran (tanah Soko + Na-bentonit), hasil klasifikasi seperti pada Gambar 4.7.

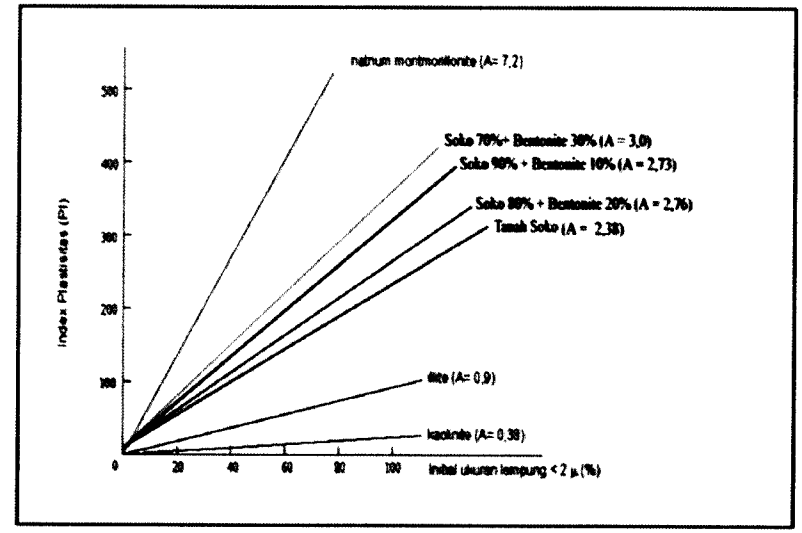


Gambar 4.7 *Klasifikasi Potensi Kembang Metode Seed (Sudjianto, 2012).*

Tanah Soko (Ngawi) dengan nilai persentase lempung < 0,002 mm sebesar 30,00 % dan aktivitas (A) 2,38 % mempunyai tingkat kembang *high* (tinggi) dengan potensi kembang < 25 %. Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 90 % + Na-*bentonite* 10 % dengan nilai persentase lempung < 0,002 mm sebesar 32, 12 % dan aktivitas (A) 2,73 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi) dengan potensi kembang > 25 %. Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 80 % + Na-*bentonite* 20 % dengan nilai persentase lempung < 0,002 mm sebesar 36,38 % dan aktifitas (A) 2,76 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi) dengan potensi kembang > 25 %, demikian pula

untuk tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 70 % + Na-*bentonite* 30 % dengan nilai nilai persentase lempung < 0,0002 mm sebesar 40,93 % dan aktivitas (A) 3,00 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi) dengan potensi kembang > 25 %.

Potensi kembang tanah ekspansif dapat dianalisa dari hubungan aktivitas tanah (A) dengan indeks plastisitas (IP). Aktivitas (A) tanah merupakan fungsi dari jenis mineral lempung yang dikandungnya terutama *montmorillonite*. Tanah Soko (Ngawi) dengan kandungan *montmorillonite* sebesar 49,74 %, maka tanah ini memiliki potensi kembang yang tinggi. Hasil tersebut seperti pada Gambar 4.8, terlihat tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran didominasi kandungan mineral *montmorillonite* yang memiliki nilai aktivitas (A) 4 – 7 (Skempton, 1953 dan Mitchell, 1976).

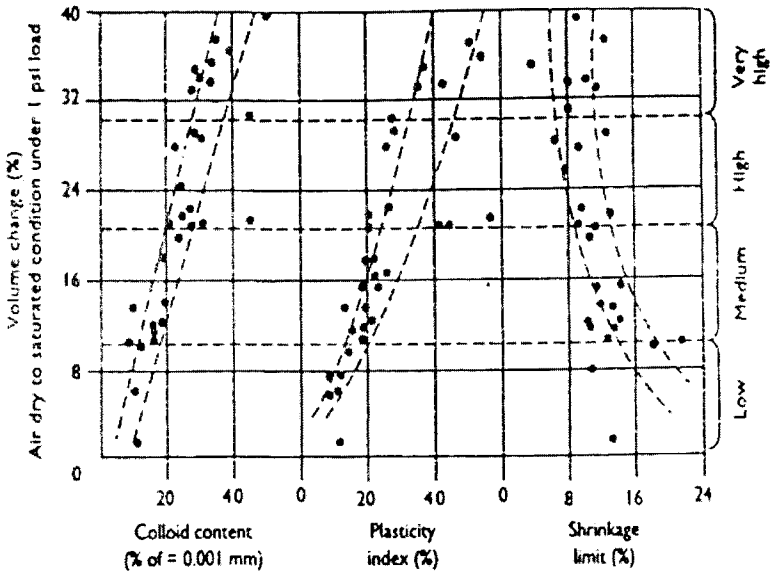


Gambar 4.8 *Hubungan Indeks Plastisitas dengan Persentase Fraksi Lempung (Sudjianto, 2012).*

4.5 KLASIFIKASI TANAH SISTEM HOLTZ DAN GIBBS

Klasifikasi tanah sistem Holtz dan Gibbs (1956) didasarkan pada kandungan tanah lempung ekspansif (C) yaitu fraksi yang berukuran 0,001

mm, indeks plastisitas (IP), batas susut (SL) dan perubahan volume kering udara pada kondisi jenuh di bawah tekanan 6,9 kPa yang digambarkan dalam suatu grafik hubungan antara batas-batas Atterberg (SL), indeks plastisitas (PI) dan persen lempung (C) dengan perubahan volume (%). Dari grafik tersebut dapat diketahui kelompok potensi kembang tanah ekspansif dengan kategori rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi. Grafik hubungan tersebut seperti pada Gambar 4.9.

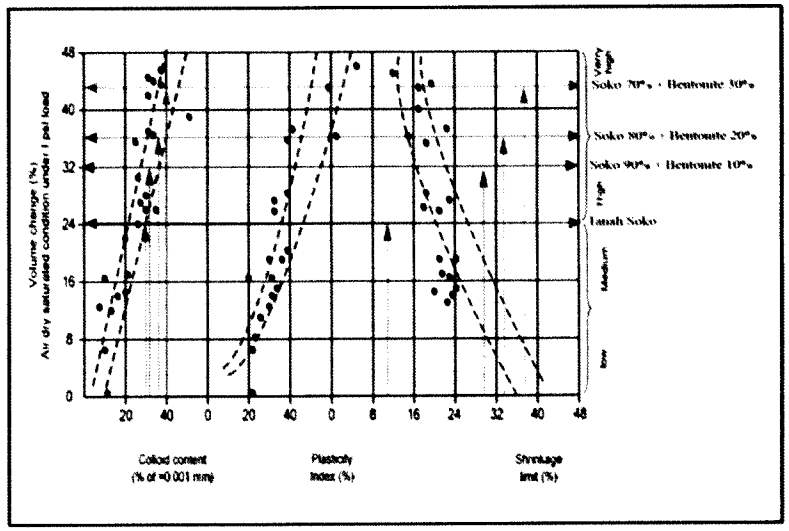


Gambar 4.9 *Klasifikasi Tanah Sistem Holtz dan Gibbs (1956).*

Penggunaan klasifikasi tanah metode Holtz dan Gibbs (1956) digunakan Sudjianto (2012) untuk membuat klasifikasi tanah lempung ekspansif dari Soko (Ngawi) dan tanah campuran (tanah Soko + Na-bentonit), hasil klasifikasi seperti pada Gambar 4.10.

Klasifikasi sistim Holtz dan Gibss (1956) tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran seperti pada Gambar 4.10. Tanah Soko (Ngawi) berdasarkan perubahan volume di bawah tekanan 6,9 kPa sebesar 24,87 %, kandungan fraksi lempung (C) sebesar 30,00 %, indeks plastisitas (IP) 71,32 % dan batas susut (SL) 10,74 % mempunyai tingkat kembang *high* (tinggi).

Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 90 % + Na-*bentonite* 10 % perubahan volume dibawah tekanan 6,9 kPa sebesar 32,02 %, kandungan fraksi lempung (C) sebesar 32,12 %, indeks plastisitas (IP) 87, 83 % dan batas susut (SL) 30,70 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi). Tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 80 % + Na-*bentonite* 20 % dengan perubahan volume dibawah tekanan 6, 9 kPa sebesar 37,94 %, kandungan fraksi lempung (C) sebesar 36,38 %, indeks plastisitas (IP) 100,44 % dan batas susut (SL) 33,69 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi), demikian pula untuk tanah campuran dengan komposisi campuran tanah Soko 70 % + Na-*bentonite* 30 % dengan perubahan volume di bawah tekanan 6, 9 kPa sebesar 43,82 %, kandungan fraksi lempung (C) sebesar 40,93 %, indeks plastisitas (IP) 122, 80 % dan batas susut (SL) 37,62 % mempunyai tingkat kembang *very high* (sangat tinggi).



Gambar 4.10 *Klasifikasi Potensi Kembang Metode Seed Holtz dan Gibss (Sudjianto, 2012).*

Klasifikasi potensi kembang lempung ekspansif dari beberapa peneliti berbeda-beda ditinjau dari penelitiannya dan parameter yang dipakai

untuk menentukan tingkat kembang lempung ekspansif, seperti pada Tabel 3.10.

Tabel 4.2 *Klasifikasi Tingkat Ekspansi (All-Rawas dan Goosen, 2006)*

Pontnsi Pengembangan	Chen (1983)	Sedd dkk (1962)	Daksanamurthy dan Raman (1973)	USBR (Holtz dan Gibbs) (1956)
Sangat tinggi	LL > 60	PI > 35	LL > 70	C > 28
Tinggi	40 < LL ≤ 60	20 < PI ≤ 35	50 < LL ≤ 70	20 < C ≤ 31
Sedang	30 ≤ LL ≤ 40	10 ≤ PI ≤ 20	35 < LL ≤ 50	13 ≤ C ≤ 23
Rendah	LL < 30	< 10	20 ≤ LL ≤ 35	C < 13

Hasil analisa klasifikasi potensi kembang tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran dari 4 metode dirangkum dalam Tabel 4.3. Perbedaan klasifikasi potensi kembang diakibatkan oleh parameter penentu dari masing – masing sistem klasifikasi yang berbeda. Dari hasil klasifikasi tersebut dapat disimpulkan tanah Soko (Ngawi) merupakan tanah lempung ekspansif dengan potensi kembang tinggi, sedangkan tanah campuran (tanah Soko + Na – Na-*Bentonite*) mempunyai tingkat potensi kembang sangat tinggi, hal ini disebabkan adanya tambahan mineral *montmorillonite* dari Na-*bentonite* yang dicampurkan pada tanah Soko (Ngawi).

Tabel 4.3 *Hasil Analisa Potensi Kembang Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012)*

No.	Jenis Tanah	Potensi kembang			
		Cassagrande	Merwe	Seed dkk	Holz dan Gibbs
1	Soko (Ngawi)	*Extra high*	*Very high*	*High*	*High*
2	Soko 90% + Bentonite 10%	*Extra high*	*Very high*	*Very high*	*Very high*
3	Soko 80% + Bentonite 20%	*Extra high*	*Very high*	*Very high*	*Very high*
4	Soko 70% + Bentonite30 %	*Extra high*	Very high	Very high	Very high

-oo0oo-

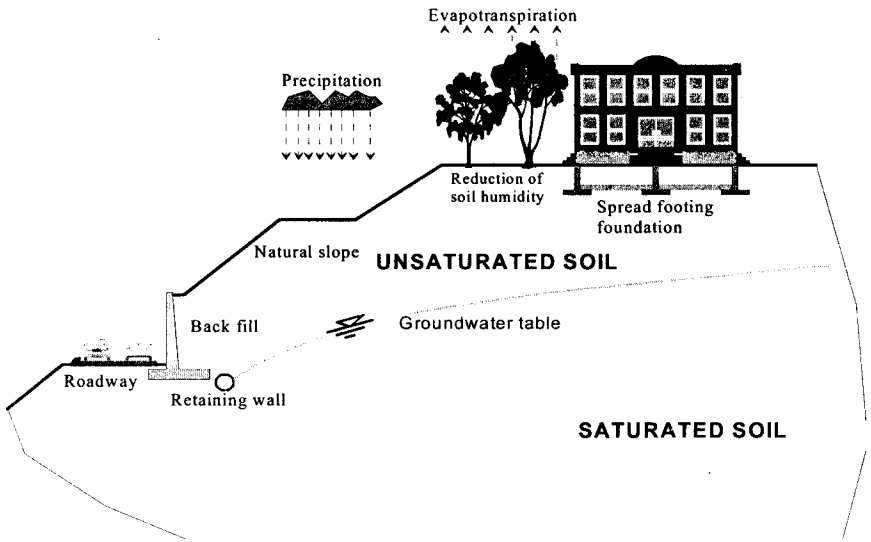
BAB V

PERUBAHAN VOLUME TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

5.1 UMUM

Tanah lempung ekspansif yang terdapat diseluruh dunia, pada umumnya berada pada kondisi tidak jenuh selama musim kering, sedangkan kandungan mineral lempung yang tinggi mengakibatkan perubahan volume yang besar, jika tanah mengalami pembasahan. Banyak bangunan yang didirikan di atas tanah lempung ekspansif mengalami kerusakan akibat perubahan volume. Beberapa contoh masalah praktis geoteknik akibat pengaruh kondisi *unsaturated* seperti pada Gambar 5.1. Sebagai contoh, struktur badan jalan raya, fondasi bangunan dan stabilitas lereng yang dibangun di atas muka air tanah akan terjadi perubahan volume akibat kembang tanah lempung ekspansif ketika hujan terjadi.

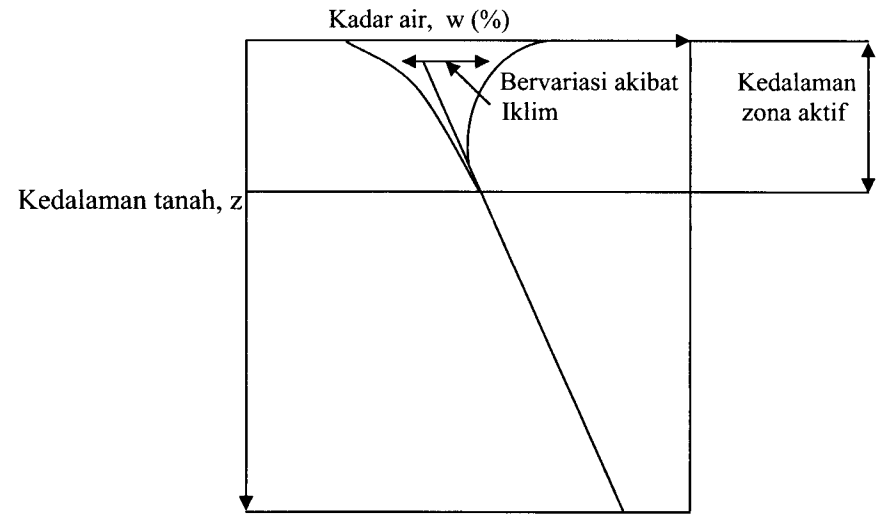
Penambahan kadar air pada tanah lempung ekspansif akan menambah jumlah sistem muatan listrik dalam satu satuan tanah, tergantung dari kapasitas muatan listrik struktur mineral pembentuknya. Mineral lempung ekspansif mempunyai kapasitas pertukaran muatan yang jauh lebih besar dibanding mineral pembentuk tanah non ekspansif. Kapasitas pertukaran muatan listrik yang besar, mengakibatkan tanah ekspansif mempunyai potensi kembang -susut yang tinggi (Hardiyatmo, 2006).



Gambar 5.1 *Contoh Masalah Praktis Geoteknik Pengaruh Kondisi Jenuh Sebagian (Rifa'i, 2002).*

Kandungan air tanah asli sangat berpengaruh terhadap perilaku tanah khususnya proses pengembangannya. Tanah lempung ekspansif dengan kadar air rendah memiliki kemungkinan pengembangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan lempung berkadar air lebih tinggi. Hal ini karena lempung dengan kadar air alami rendah lebih berpotensi untuk menyerap air.

Victorine, dkk. (1997) menyatakan bahwa jarang terjadi perubahan volume pada bagian terdalam tanah ekspansif. Perubahan volume yang umum terjadi berada beberapa meter di bagian atas deposit tanah. Beberapa meter di bagian atas ini lebih mungkin terpengaruh oleh perubahan kadar air akibat perubahan iklim (Gambar 5.2). Zona yang mungkin terjadi perubahan volume didefinisikan sebagai zona aktif. Zona aktif dapat dievaluasi dengan merencanakan kadar air terhadap kedalaman dengan mengambil sampel sepanjang musim kemarau. Tanah pada kedalaman yang menggambarkan kadar air mendekati konstan merupakan batas kedalaman zona aktif. Zona aktif menjadi pertimbangan dalam desain fondasi bangunan.



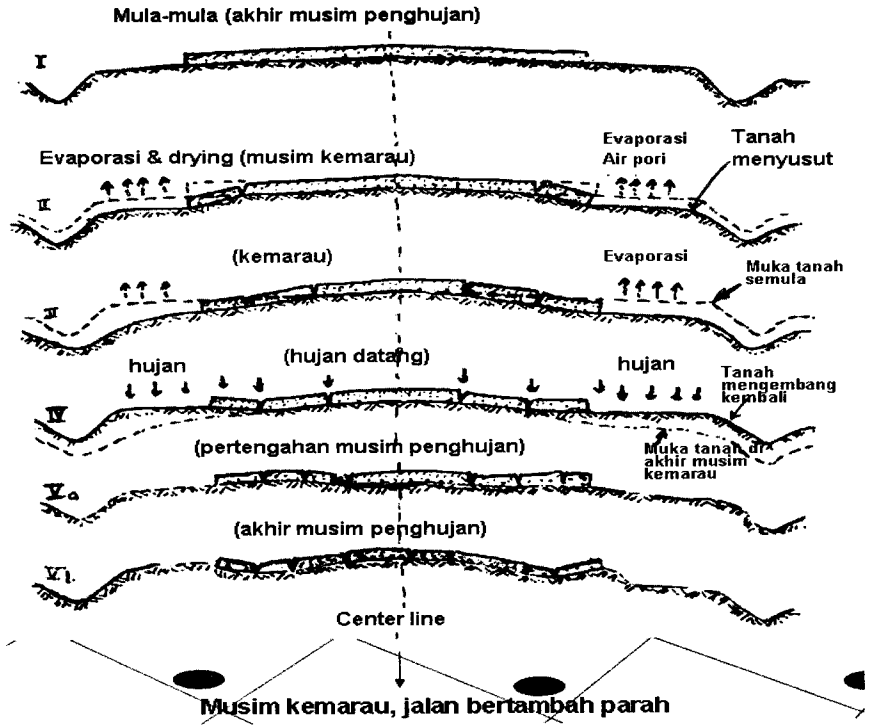
Gambar 5.2 *Kedalaman Zona Aktif (Victorine, dkk., 1997).*

Beberapa riset menghasilkan, bahwa konsistensi tanah lempung ekspansif sangat dipengaruhi oleh kadar air tanah. Menurut Holtz dan Gibbs (1956), indeks plastisitas (IP) dan batas cair (LL) dapat digunakan untuk menentukan karakteristik kembang tanah lempung ekspansif pada umumnya. Seed, dkk. (1962) menyatakan bahwa hanya indeks plastisitas (IP) sajalah yang dapat digunakan untuk memperkirakan karakteristik kembang tanah lempung ekspansif pada umumnya. Menurut Dakhshanamurthy dan Raman (1973), Chen (1975), Mitchell (1992) dan Das (2008), makin tinggi indeks plastisitas (IP) suatu mineral tanah lempung ekspansif, makin tinggi pula potensi pengembangannya.

5.2 KEMBANG SUSUT TANAH LEMPUNG EKSPANSIF

Mekanisme kembang susut tanah lempung ekspansif di lapangan dapat dijelaskan dengan menggunakan Gambar 5.3, badan jalan menjadi rusak akibat kembang – susut yang terjadi pada tanah dasar. Penyusutan terjadi

pada musim kemarau dengan terjadinya evaporasi air pori, kemudian pada musim penghujan tanah mengembang. Kembang - susut tersebut terjadi berulang akibat siklus musim kemarau ke musim penghujan, sehingga kerusakan badan jalan menjadi semakin parah.



Gambar 5.3 *Mekanisme Kerusakan Jalan Akibat Kembang Susut Tanah Dasar (Myers, 2005).*

Berkurangnya kadar air dalam tanah umumnya terjadi karena proses pengeringan. Jadi dapat dikatakan bahwa penyusutan pada tanah terutama pada tanah lempung, yaitu pengurangan volume tanah akibat berkurangnya kadar air umumnya terjadi pada musim kemarau (Yong dan Warkentin, 1975). Perilaku pengembangan pada tanah ekspansif merupakan kebalikan dari peristiwa kapiler. Bila kadar air dalam tanah naik dan tanah menjadi

jenuh, maka tegangan kapiler berkurang dan tegangan air pori dengan sendirinya akan menurun dan dapat sama dengan tegangan hidrostatis. Menurunnya tegangan air pori ini mengakibatkan tanah lempung ekspansif cenderung mengembang kembali pada posisi semula (Mochtar 2000).

Kembang tanah lempung ekspansif adalah proses bertambahnya volume tanah lempung ekspansif akibat interaksi dengan air (Sorochan, 1991). Hardiyatmo (2006) menyatakan kembang tanah lempung ekspansif adalah hasil dari bertambahnya tebal lapisan ion *diffuse* ketika ada air. Ion-ion *monovalent exchangeable* sodium akan menyebabkan pengembangan lebih besar dari pada ion-ion kalsium *divalen*.

Permasalahan kembang-susut tanah lempung ekspansif di Indonesia menjadi semakin rumit, karena iklim Indonesia berada di daerah tropis, akan menyebabkan panas di musim kemarau dan basah pada musim penghujan. Hal ini akan menyebabkan perubahan kadar air pada tanah lempung ekspansif. Akibat perubahan parameter tersebut, struktur tanah lempung ekspansif akan mengalami perubahan dari kondisi jenuh sebagian menjadi kondisi jenuh air, sehingga perilaku tegangan, regangan dan deformasi tanah lempung ekspansif akan mengalami perubahan (Rifa'i, 2002).

5.3 FAKTOR – FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEMBANG – SUSUT TANAH

Perilaku kembang – susut tanah lempung ekspansif sangat kompleks dan dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor – faktor yang mempengaruhi perilaku kembang – susut tanah lempung ekspansif dapat dibagi menjadi 2 kategori, yaitu: pengaruh sifat tanah lempung ekspansif dan pengaruh kondisi lingkungan terhadap sifat tanah lempung ekspansif (Nelson dan miller, 1992). Kedua faktor yang mempengaruhi kembang susut tanah lempung ekspansif seperti pada Tabel 5.1 dan Tabel 5.2.

Tabel 5.1 *Sifat Tanah yang Mempengaruhi Perilaku Kembang – Susut Tanah Ekspansif (Nelson dan Miller, 1992)*

Faktor-faktor	*Keterangan*
Mineral lempung	Mineral lempung yang menyebabkan perubahan volume adalah *montmorillonite* dan *vermicullite. Illite* dan *kaolinite* kurang mengembang, tapi bisa menyebabkan perubahan volume jika ukuran partikel sangat halus (< 0, 001 mm).
Kimia air tanah	Pengembangan tanah lempung ekspansif disebabkan oleh penambahan konsentrasi kation dan penambahan valensi kation, contohnya kation Mg^{2+} dalam air tanah akan menghasilkan pengembangan tanah lempung ekspansif yang lebih kecil dari kation Na^{+}.
Soil suction	*Soil suction* adalah variabel tegangan efektif bebas, diwakili oleh tekanan air pori negatif pada tanah lempung ekspansif tak jenuh. *Soil suction* dipengaruhi kejenuhan, berat jenis, ukuran pori, dan karakteristik kimia dan elektrikal dari partikel tanah lempung ekspansif dan air.
Plastisitas	Tanah yang secara umum memperlihatkan sifat plastis dengan batasan daerah kadar air dan mempunyai batas cair tinggi akan sangat berpotensi mengalami kembang-susut. Plastisitas adalah indikator dari potensi pengembangan tanah lempung ekspansif.
Susunan dan struktur tanah	Lempung terdispersi cenderung lebih ekspansif dari lempung terflokulasi. Pengikatan partikel pada tanah lempung ekspansif akan menyebabkan pengembangan menjadi lebih kecil.
Berat volume kering/ kepadatan tanah	Tanah lempung ekspansif yang lebih padat biasanya mengindikasikan jarak antar partikel yang rapat, berarti gaya tolak menolak akan menjadi lebih besar antar partikel dan potensi pengembangan tanah lempung ekspansif menjadi kecil.

Tabel 5.2 *Kondisi Lingkungan yang Mempengaruhi Potensi Kembang-Susut (Nelson dan Miller, 1992)*

Faktor-faktor	**Keterangan**
Kadar air awal	Tanah lempung ekspansif dengan kadar air awal rendah (kondisi kering) akan memiliki potensi pengembangan yang lebih besar dibandingkan dengan lempung ekspansif yang sama dan memiliki kadar air awal tinggi. Pada lempung ekspansif kering ketika terjadi pembasahan, maka proses penyerapan air tinggi sehingga menyebabkan terjadinya pengembangan yang lebih tinggi.
Variasi kadar air	Perubahan kadar air pada zona aktif dekat permukaan tanah lempung ekspansf menentukan gaya dorong tanah (*heave*). Pada lapisan ini terjadi perbedaan kadar air yang cukup signifikan dan perubahan volume akan terjadi.
Iklim	Jumlah dan variasi presipitasi dan evapotranspirasi sangat mempengaruhi tersedianya kadar air dan fluktuasi kadar air.
Air tanah	Muka air tanah dangkal memberikan sumber kadar air dan fluktuasi muka air tanah berkontribusi pada kadar air.
Drainase	Drainase permukaan akan membantu pengarahan air menuju ke pembuangan / tampungan, sehingga menjaga kadar air di daerah sekitar.
Tumbuhan	Pohon, semak dan rumput menyerap kadar air tanah selama proses transpirasi sehingga menyebabkan terjadi perbedaan kadar air tanah disekitar area tumbuhan ini menjadi lebih tinggi (basah).
Permeabilitas	Tanah dengan permeabilitas tinggi, terutama terjadi retakan pada tanah, akan menyebabkan migrasi air secara cepat dan menaikan kecepatan pengembangan tanah.
Temperatur	Penambahan temperatur menyebabkan kadar air berkurang, karena terjadinya penguapan.
Kondisi tegangan / sejarah tegangan	Tanah lempung yang terkonsolidasi berlebih (*overconsolidated clay*) memilki sifat ekspansif yang lebih kecil dari pada tanah lempung yang terkonsolidasi normal (*normally consolidated*).

Tabel 5.2 *Kondisi Lingkungan yang Mempengaruhi Potensi Kembang-Susut (Nelson dan Miller, 1992) (Lanjutan)*

Faktor-faktor	Keterangan
Beban	Besar beban tambahan ditentukan dari besarnya perubahan volume yang terjadi saat pengujian pada penambahan kadar air dan tergantung pada kepadatan tanah, yakni beban yang mampu menekan pengembangan atau membuat volume tetap.
Profil tanah	Ketebalan dan lokasi lapisan tanah yang mempunyai potensi ekspasif dalam profil sangat mempengaruhi potensi pergerakan tanah. Gerakan besar akan terjadi pada profil yang mempunyai kedalaman zona aktif besar, begitu pula sebaliknya.

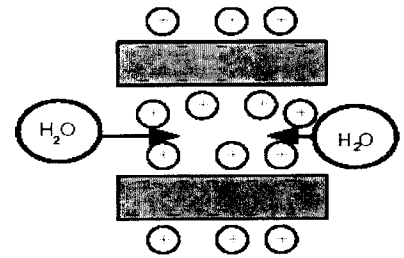
5.4 PENGEMBANGAN

Proses pengembangan (*swelling*) merupakan proses yang lebih komplek dibandingkan dengan penyusutan (Yong dan Warketin, 1975). Sapaz (2004) menyatakan, untuk memahami kembang tanah ekspansif ada dua parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas pengembangan dari tanah ekspansif, yaitu: potensi pengembangan dan tekanan pengembangan. Besar dan nilai tekanan pengembangan tergantung pada banyaknya mineral *montmorillonite* dan kadar air awal tanah.

Perubahan volume pada tanah lempung ekspansif terjadi akibat perubahan kadar air yang terkandung dalam massa tanah lempung ekspansif. Air yang terkandung didalam suatu massa tanah terdiri dari dua bagian, yaitu: air yang bersifat higroskopis dan selaput air. Air higroskopis mengisi rongga-rongga antar butir dan dapat keluar dengan proses pemanasan atau konsolidasi. Selaput air menyelimuti butiran-butiran tanah berupa lapisan yang sangat tipis. Selaput air dapat menimbulkan gaya tarik-menarik antar butir, yang disebut *andhered moisture film* (Gambar 5.4).

Selaput air tersebut tidak hanya menyelimuti butiran tanah, tetapi juga menyelimuti butiran mineral pembentuk butiran tanah dan membentuk suatu sistem. Tebal selimut air yang menyelimuti butiran mineral ekspansif bervariasi antara 0,0002 micron sampai dengan 0,0045 micron.

Selimut air ini sulit untuk dikeluarkan dari sistem butiran tanah, walaupun dengan proses pengeringan pada suhu 110°C. Tanah lempung ekspansif yang sudah dikeringkan pada suhu 110°C sesuai dengan metode uji kadar air, pada hakekatnya tidak kering sempurna masih mengandung sejumlah air.



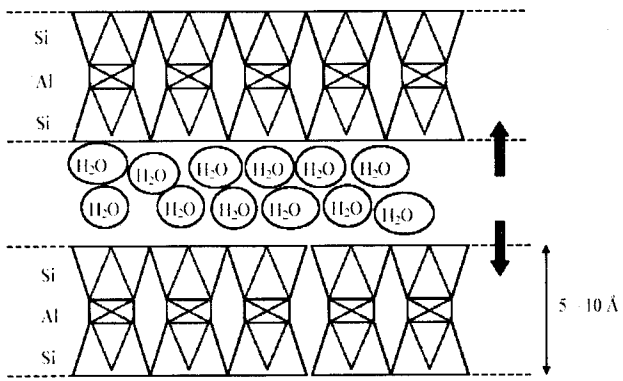
Gambar 5.4 *Osmosis pada Doublr Layer Tanah Lempung Ekspansif (Mitchell, 1993).*

Air higroskopis yang mengisi rongga-rongga antar butir tanah terdiri dari molekul-molekul yang mempunyai struktur polar, membentuk sistem muatan listrik non simetris dalam atom-atomnya. Pada kondisi tertentu sistem muatan listrik positip yang berlebihan. Pada kondisi lainya justru mempunyai muatan negatip. Kondisi yang mempengaruhi jumlah muatan listrik adalah derajat keasaman air dan jenis mineral tanah. Butiran-butiran mineral penyusun lempung ekspansif juga memiliki sistem muatan listrik tertentu sehingga setiap butiran lempung ekspansif membentuk satu muatan listrik tertentu pula. Dalam kondisi kadar air tertentu, sistem muatan listrik dalam air higroskopis dan butiran tanah dalam keadaan stabil, artinya tidak terjadi pertukaran ion-ion.

Pada saat terjadi perubahan kadar air higroskopis, sistem muatan listrik akan berubah, karena terjadi penambahan muatan positip dan negatip. Penambahan muatan listrik dalam air higroskopis dapat menyebabkan terjadinya pertukaran ion-ion negatip dari mineral ekspansif dan ion-ion dari higroskopis, sehingga menyebabkan terlepasnya butiran mineral dari ikatanya.

Penambahan kadar air pada tanah lempung ekspansif akan menambah jumlah sistem muatan listrik dalam satu satuan tanah, tergantung dari kapasitas muatan listrik struktur mineral pembentuknya. Mineral lempung ekspansif mempunyai kapasitas pertukaran muatan listrik yang jauh lebih besar dibanding mineral pembentuk tanah non ekspansif. Kapasitas pertukaran muatan listrik yang besar tersebut mempunyai potensi pengembangan yang besar (Hardiyatmo, 2006).

Proses pengembangan yang disebabkan oleh pergerakan air ke daerah *interlayer* pada tanah lempung ekspansif, seperti pada Gambar 5.5

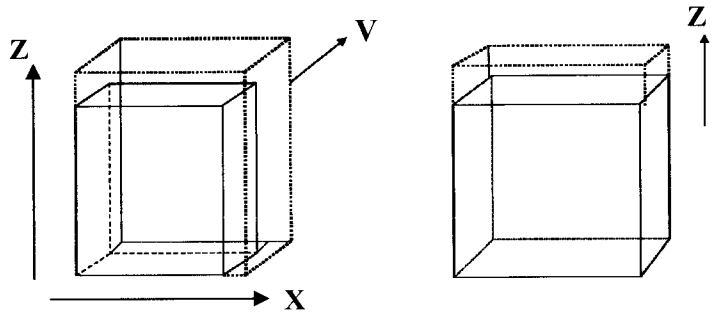


Gambar 5.5 *Diagram Pergerakan Air ke Interlayer Tanah Lempung Ekspansif (Parker dkk, 1982).*

Gambar 5.5 memperlihatkan mekanisme pengembangan pada mineral *montmorillonite*, pada saat pembasahan maka air (H_2O) akan masuk ke mikrostruktur *montmorillonie*, akibatnya unsur almunium (Al) mengecil sedangkan 2 unsur silikon (Si) akan mengembang (Parker dkk, 1982).

Mekanisme kembang pada tanah ekspansif di lapangan terjadi pada tiga dimensi atau yang dikenal dengan kembang volumetrik. Taboada (2003) menyatakan ketika tanah dalam keadaan kering menjadi basah, tanah akan mengalami kembang volumetrik (Gambar 5.6a). Pada tahap selanjutnya, akibat pembasahan atau meningkatnya kadar air dalam tanah

lempung, maka kembang volumetrik tanah lempung hanya satu dimensi, menyebabkan naiknya permukaan tanah lempung (Gambar 5.6b).



Gambar 5.6 *Skema Diagram Kembang Tanah (a) 3 – D, (b) 1 – D (Taboada, 2003).*

Kembang satu dimensi (*fully constrain*) biasanya digunakan untuk mengukur kembang pada permukaan tanah ekspansif yang datar, sedangkan kembang tiga dimensi (*fully unconstrain*) sangat cocok untuk mengukur kembang pada permukaan tanah ekspansif yang miring, terdapat bangunan dinding penahan tanah dan terowongan (Coduto, 1994).

5.5 PARAMETER PENGEMBANGAN

Sapaz (2004) menyatakan, untuk memahami pengemmbangan tanah ekspansif ada dua parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas pengembangan dari tanah ekspansif, yaitu: potensi pengembangan dan tekanan pengembangan. Besar dan nilai tekanan pengembangan tergantung pada banyaknya mineral *montmorillonite* dan kadar air awal tanah.

5.5.1 Potensi Pengembangan

Seed, dkk. (1962) mendefinisikan potensi pengembangan sebagai persentase pengembangan sampel tanah ke arah lateral yang direndam (dijenuhkan) dengan tekanan < 6,9 kPa, untuk tanah yang dipadatkan hingga mencapai kepadatan maksimum pada kadar air optimumnya dengan menggunakan standar pemadatan AASTHO. Hubungan untuk mendapatkan

nilai potensi pengembangan suatu tanah yang didasarkan pada kembang bebas dengan sampel terusik, adalah sebagai berikut.

$$S_p = 2{,}16 \times 10^{-3}.(PI)^{2,44}... \quad (5.1)$$

dengan

S_p : potensi pengembangan (%),
PI : indeks plastisitas (%).

Untuk menghitung potensi pengembangan yang dikaitkan dengan persentase fraksi lempung (berat butiran < 2 μm) digunakan hubungan yang diturunkan berdasarkan pada kembang bebas dan sampel terusik

$$S_p = (2{,}2 \times 10^{-5}).\ A^{2.44}.\ C^{3.44} \quad (5.2)$$

dengan

S_p : potensi pengembangan (%),
A : aktivitas (%),
C : fraksi lempung < 2 μm (%).

Hubungan antara indeks plastisitas (PI) dengan potensi kembang (%) dengan total kembang (%) seperti pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 *Hubungan antara PI, potensi kembang dan total kembang (Seed, dkk., 1962)*

Indeks Plastisitas (%)	Potensi Kembang (%)	Total Kembang (%)
10	0,4 - 1,5	4,5 - 10
20	2,2 - 3,8	13,5 - 18,7
30	5,7 - 12,2	21,4 - 18,0
40	11,8 - 25,0	28,0 - 35,0
50	20,1 - 42,6	33,0 - 40,0

Seed, dkk. (1962) juga mendapatkan hubungan yang dikaitkan dengan persen fraksi lempung (<2mm) yang diturunkan berdasarkan pada kembang bebas dan sampel *disturb.*

$$S_p = 3{,}6 \times 10^{-5} \times A^{2,44} \times C^{3,44}... \quad (5.3)$$

dengan

S_p : Pontensi Kembang (%),
A : Ativitas (%),
C : Fraksi lempung <2 μm (%).

Chen (1975) memberikan klasifikasi potensi kembang menurut nilai indeks plastisitasnya dan didasarkan untuk tanah *undisturb* dan kembang bebas. Adapun hubungan yang digunakan untuk menghitung potensi kembang seperti di bawah ini.

$$S_p = B\ .\ e^{AxPI}... \quad (5.4)$$

dengan

S_p : potensi kembang (%),
B : konstanta dengan nilai = 0, 0383,
e : 2,7182818,
A : konstanta, dengan nilai = 0, 2558,
PI : Indes plastisitas (%).

5.5.2 Tekanan Pengembangan

Chen (1988) mendefinisikan ekanan pengembangan sebagai tekanan yang dibutukan untuk mencegah tanah mengembang pada berat volume kering di tempat. Untuk tanah dibentuk kembali pada 100% kepadatan relatif, tekanan pengembangan adalah tekanan yang dibutuhkan untuk menjaga berat volume kering tersebut.

Supriyono (1993) mendefinisikan tekanan pengembangan adalah besarnya tekanan yang diperlukan untuk menahan pengembangan tanah ekspansif akibat air (H_2O), atau tekanan yang diperlukan untuk memampatkan tanah ekspansif yang mengalami pengembangan hingga kembali pada kadar air awal.

Pengerasan jalan atau pembangunan gedung, umumnya dilaksanakan pada musim kemarau.

5.6 FAKTOR - FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PENGEMBANGAN

Pengembangan tanah lempung ekspansif sangat kompleks dan sangat dipengaruhi oleh banyak faktor (sapaz, 2004). Sudjianto (2012) dalam hasil penelitianya menghasilkan ada 10 faktor yang mempengaruhi perilaku pengembangan tanah lempung ekspansif diantaranya: jenis unsur kimia dan mineral ekspansif, kadar lempung (C), kadar air awal (w_i), kepadatan awal (γ_{do}), perubahan kadar air (Δ_w), derajat kejenuhan (S_r), indeks plastisitas (IP), aktivitas (A), *suction* (s) dan *surcharge* (σ'_v).

5.6.1 jenis Mineral dan Unsur Kimia Lempung

Komposisi mineral dan unsur kimia lempung merupakan pengaruh utama terhadap perilaku pengembangan tanah lempung ekspansif. Perbedaan jenis mineral lempung akan menyebabkan potensi pengembangan yang berbeda, karena masing-masing mineral lempung mempunyai pertukaran ion yang berbeda-beda dan luas permukaan mikrostruktur yang berbeda pula. Ada 3 jenis kelompok mineral lempung yang dapat menggambarkan potensi pengembangan tanah lempung ekspansif, yaitu :

- kelompok *kaolinite*, umumnya tidak mempunyai sifat ekspansif,
- kelompok *mica* termasuk didalamnya *illite* dan *vermicullite*, mempunyai potensi ekspansif namun tidak terlalu membahayakan,
- kelompok *smectite* termasuk didalamnya *montmorillonite*, mempunyai potensi ekspansif yang tinggi dan sangat membahayakan.

Tabel 5.4 *Properties Mineral Lempung Ekspansif (Lambe dan Whitman, 1969)*

	Specific	Batas Atterberg			Aktivitas
	Surface	LL	PL	SL	(PL/%
Mineral Group	(m^2/g)	(%)	(%)	(%)	Clay)
Kaolinities	10-20	30-100	25-40	25-29	0,38
Ilites	65-100	60-120	35-60	15-17	0,9
Montmorillonites	700-840	100-900	50-100	8,5-15	7,2

Sudjianto (2012) menyatakan potensi kembang tanah ekspansif dapat diprediksi dari unsur kimia dan komposisi mineral tanah lempung ekspansif. Hasil uji kimia pada Tabel 5.4, tanah Soko (Ngawi) mengandung unsur kimia yang menyebabkan terjadinya kembang tanah ekspansif yaitu unusur Na_2O sebesar 0, 88%. Pada saat tanah Soko (Ngawi) ditambahkan Na-*bentonite*, maka nilai unsur Na_2O menjadi semakin besar seperti pada Tabel 5.5. Pada penambahan Na-*bentonite* sebesar 10%, maka nilai unsur Na_2O menjadi 0, 90%. Penambahan Na-*bentonite* 20%, nilai unsur Na_2O menjadi 1, 15% dan penambahan Na-*bentonite* 30%, nilai unsur Na_2O menjadi 1, 33%. Hal ini memperlihatkan bahwa semakin besar penambahan Na-*bentonite* akan menyebabkan potensi kembang tanah lempung ekspansif semakin besar. Unsur Natrium pada material *bentonite* yang ditambahkan pada tanah lempung ekspansif akan menyebabkan potensi kembang yang lebih besar dibanding dengan unsur kimia lain, bila bergabung dengan air (Das, 2008).

Tabel 5.5 *Komposisi Kimia Tanah Lempung Soko (Ngawi) dan Tanah Campuran*

No	Komposisi Kimia	Tanah Soko (Ngawi)	Soko 90% + Bentonite 10%	Soko 80% + Bentonite 20%	Soko 70% + Bentonite 30%
1.	SiO_2	54,59	48,52	50, 34	50.45
2.	Al_2O_3	17,37	18,03	18, 26	18.31
3.	Fe_2O_3	4,53	8,04	7, 83	7.57
4	TiO_2	0,20	0,20	0, 20	0,20
5.	CaO	2,98	0,99	1, 02	1.08
6.	MgO	3,00	1,31	1, 33	1.48
7.	Na_2O	0,88	0,90	1, 15	1.33
8.	K_2O	0,45	0,26	0, 26	0.26
9.	Hilang Pijar	16,00	21,75	19, 61	19,32

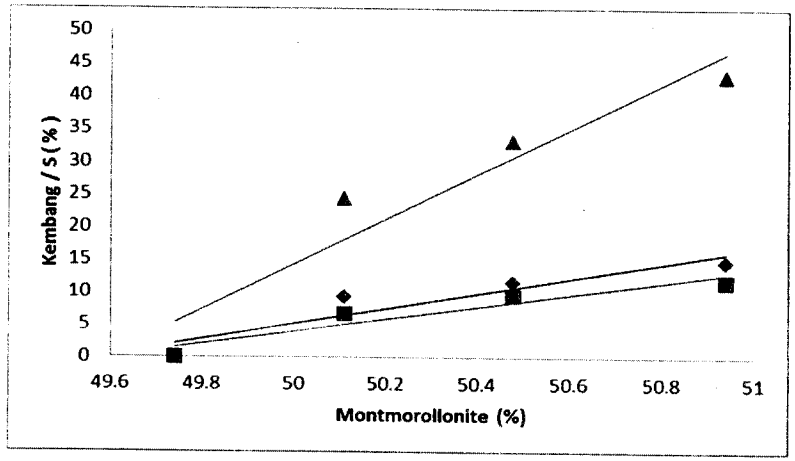
Hasil uji mineral tanah Soko (Ngawi) seperti pada Tabel 5.5 memperlihatkan mineral *montmorillonite* yang merupakan mineral utama penyebab kembang tanah ekspansif mempunyai kandungan yang besar yaitu

49,74% dibanding dengan mineral lain. Pada saat tanah Soko (Ngawi) ditambahkan Na-*bentonite*, maka kandungan *montmorillonite* menjadi semakin besar seperti pada Tabel 5.6. Pada penambahan Na-*bentonite* sebesar 10%, maka kandungan *montmorillonite* menjadi 50,11%, penambahan Na-*bentonite* 20% kandungan *montmorillonite* menjadi 50,48% dan penambahan Na-*bentonite* 30% kandungan *montmorillonite* menjadi 50,94%. Dengan kandungan mineral *montmorillonite* yang besar, maka tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran merupakan tanah lempung ekspansif dengan potensi kembang yang sangat tinggi. Kategori kembang ini seperti yang dinyatakan oleh Holts and Gibbs (1956), Seed, et al. (1962), Dakssanamurty dan Raman (1975) dan Chen (1988) yang menyatakan tanah ekspansif memiliki potensi kembang dengan kategori sangat tinggi, bila persentase kandungan mineral *montmorillonite* > 35%.

Tabel 5.6 *Komposisi Mineral Tanah Lempung Soko (Ngawi) dan Tanah Campuran*

No	Komposisi Mineral	Tanah Soko (Ngawi)	Soko 90% + Bentonite 10%	Soko 80% + Bentonite 20%	Soko 70% + Bentonite 30%
1.	Montmorilonite	49,74	50,11	50,48	50,94
2.	Halloysite	45,10	16,03	16,67	17,90
3.	Feldspar	4,63	6,80	6,63	6,47
4.	Alpha Quartz	0,27	13,03	12,89	12,10
5.	Cristobalite	0,26	14,03	13,33	12,59

Hasil uji kimia dan mineral tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran memperlihatkan bahwa tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran mempunyai potensi kembang yang tinggi dan memperkuat prediksi dari uji sifat fisis tanah yang telah dilakukan. Hasil uji kembang volumetrik yang dilakukan Sudjianto (2012) seperti terlihat pada Gambar 5.7. Gambar tersebut memperlihatkan semakin besar kandungan montmorillonite dalam tanah lempuing ekspansif maka semakin besar kembang vertikal, kembang horisontal dan kembang volumetrik yang terjadi..



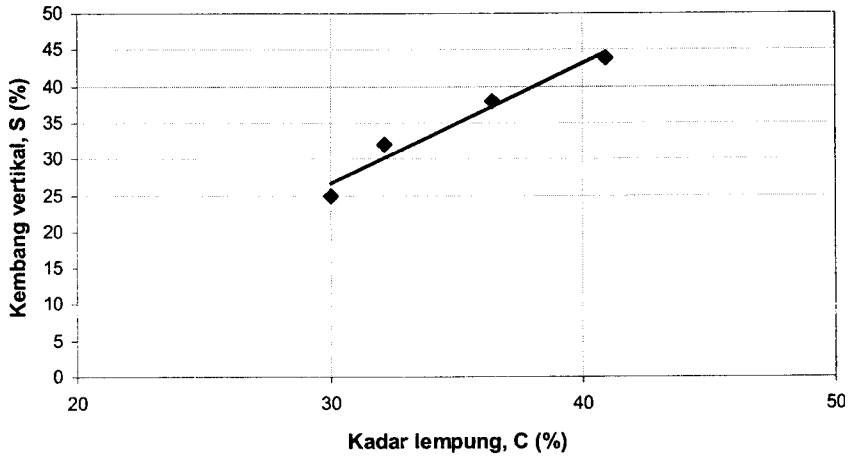
Gambar 5.7 *Hubungan Mineral Motmorillonite dengan Kembang (S) Tanah Soko (Ngawi) dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*

5.6.2 Kadar Lempung (C)

Kadar lempung pada tanah lempung ekspansif sangat mempengaruhi perilaku pengembangan tanah lempung ekspansif. Sudjianto (2012) melakukan penelitian perilaku pengembangan tanah lempung ekspansif dari Soko (Ngawi) dan tanah campuran (tanah Soko + Na-bentonit) dengan alat oedometer (konsolidometer) dengan metode ASTM D4546-96 (*Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Setttlement Potential of Cohesive Soils*).. Sampel yang digunakan uji kembang vertikal dengan berat volume kering awal (γ_{d0}) adalah 12, 60 kN/m^3 dan kadar air awal (w_i) sebesar 32, 00 %. Hasil penelitian uji pengembangan tanah lempung Soko (Ngawi) seperti pada Tabel 5.7 dan Gambar 5.8.

Tabel 5.7 *Hubungan Kadar Lempung dengan Kembang Vertikal*

No	Jenis Tanah	Kadar Lempung (%)	Kembang Vertikal (%)
1.	Soko (Ngawi)	30,00	24,87
2.	Soko 90% + Na-bentonit 10%	32,12	32,02
3.	Soko 80% + Na-bentonit 20%	36,38	37,94
4.	Soko 70% + Na-bentonit 30%	40,93	43,82

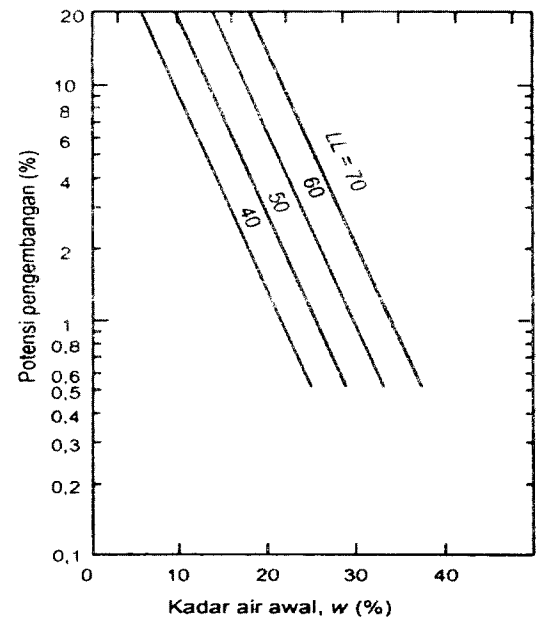


Gambar 5.8 *Hubungan Kadar Lempung (C) dengan Kembang Vertikal (S) Tanah Soko (Ngawi) dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012)*

Gambar 5.8 memperlihatkan semakin besar kadar lempun (C) dalam tanah lempung ekspansif, mengakibatkan kembang vertikal tanah lempung ekspansif semakin besar. Hal ini sesuai yang dinyatakan oleh Hardiyatmo (2006) dan Das (2008), semakin besar kadar lempung (C) dalam tanah lempung ekspansif maka semakin besar kandungan *montmorillonite* dalam tanah lempung ekspansif, hal ini mengakibatkan potensi kembang tanah lempung ekspansif menjadi semakin besar.

5.6.3 Kadar Air Awal (w_i)

Kadar air awal (w_i) sangat mempengaruhi potensi pengembangan tanah lempung ekspansif. Vijayvergiya dan Ghazally (1973) dalam penelitianya menghasilkan hubungan kadar air awal (w_i) dengan potensi pengembangan tanah lempung ekspansif seperti pada Gambar 5.9. Pada Gambar tersebut memperlihatkan semakin besar kadar air awal tanah maka semakin kecil potensi pengembangan tanah lempung ekspansif, demikian pula sebaliknya semakin kecil kadar air awal maka semakin besar potensi pengembangan tanah lempung ekspansif.

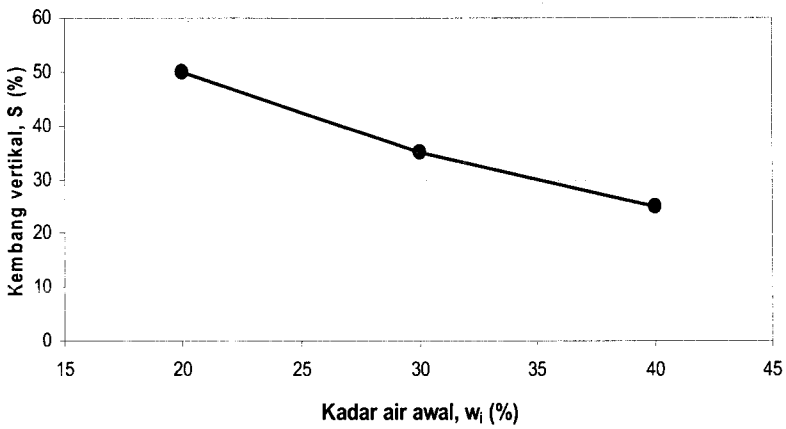


Gambar 5.9 *Hubungan Kadar Air Awal (w_i) dengan Kembang Vertikal (Vijayvergiya dan Ghazally, 1973).*

Sudjianto (2006) melakukan penelitian kembang vertikal dengan alat Oedometer (konsolidometer konvensional) pada tanah lempung ekspansif dari Kecamatan Padangan, kabupaten Bojonegoro (Jawa Timur). Uji pengembangan dilakukan dengan variasi kadar air awal 20%, 30% dan 40% dengan tekanan awal 6,9 kPa. Hasil uji pengembangan (*swelling test*) menghasilkan nilai kembang vertikal seperti pada Tabel 5.8 dan Gambar 5.10.

Tabel 5.8 *Hubungan Kadar Air Awal dengan Kembang Vertikal*

No	Jenis Tanah	Kadar Air Awal, w_i (%)	Kembang Vertikal, S (%)
1.	Padangan (Bojonegoro)	20,09	50,87
2.	Padangan (Bojonegoro)	30,12	35,02
3.	Padangan (Bojonegoro)	40,38	25,94



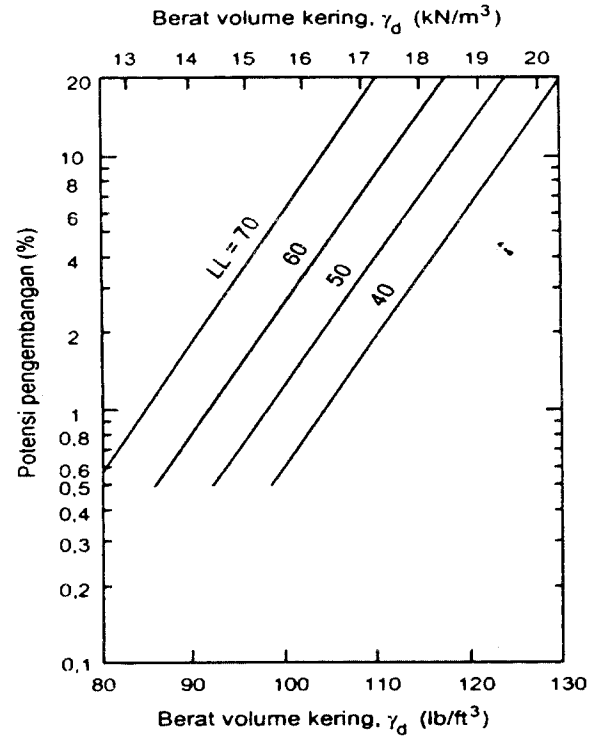
Gambar 5.10 *Hubungan Kadar Air Awal (w_i dengan Kembang Vertikal (S) Tanah Padangan, Bojonegoro (Sudjianto, 2006).*

Hubungan antara kadar air awal (w_i) dengan kembang vertikal (S) tanah lempung Padangan (Bojonegoro) pada Gambar 5.10 memperlihatkan semakin besar kadar air awal tanah lempung ekspansif maka semakin kecil kembang vertikal yang terjadi. Hal ini mengindikasikan tanah lempung ekspansif dengan kadar air awal yang rendah (kering) ketika terjadi pembasahan maka proses penyerapan air sangat tinggi, sehingga perubahan volume dalam hal ini pengembangan yang terjadi juga sangat tinggi (Nelson dan Miller, 1992; Sapaz, 2004).

5.6.4 Kepadatan Awal (γ_{do})

Kepadatan awal *(γ_{do})* sangat berhubungan dengan desain kadar air awal pada saat pembuatan benda uji pengembangan (*swelling test*) tanah lempung ekspansif. Dengan alat Proctor dapat didesain kepadatan awal suatu tanah lempung ekspansif. Vijayvergiya dan Ghazally (1973) memberikan hubungan antara berat volume kering *(γ_{do})* dengan potensi pengembangan tanah ekspansif seperti pada gambar 5.11. Pada hubungan tersebut, tanah ekspansif yang digunakan untuk memvariasikan kadar air awal berdasarkan batas cair (LL) tanah ekspansif yang berbeda-beda, mulai dari nilai

LL yang terkecil adalah 40% sampai dengan nilai LL yang terbesar adalah 70%.

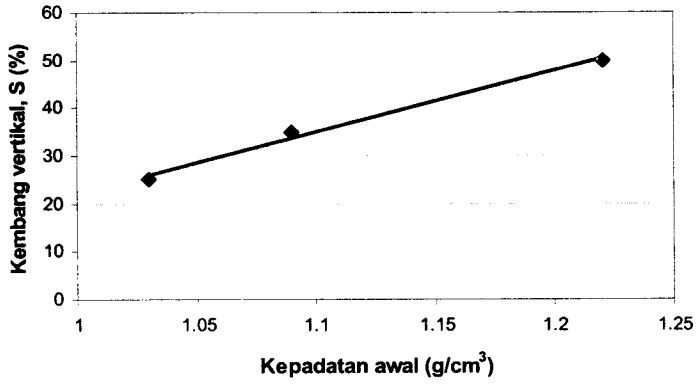


Gambar 5.11 *Hubungan Berat Volume Kering (γ_d) dengan Kembang Vertikal (Vijayvergiya dan Ghazally, 1973).*

Sudjianto (2006) pada penelitian kembang vertikal dengan alat Oedometer (konsolidometer konvensional) pada tanah lempung ekspansif dari Kecamatan Padangan, Kabupaten Bojonegoro (Jawa Timur) dengan variasi kadar air awal 20%, 30% dan 40% maka kepadatan awal yang harus didesain adalah: 1,22 g/cm^3, 1,09 g/cm^3 dan 1,22 g/cm^3. Hasil uji kembang vertikal (*swelling test*) dengan 3 variasi kepadatan awal tersebut seperti pada Tabel 5.9 dan Gambar 5.12.

Tabel 5.9 *Hubungan Kadar Air Awal dengan Kembang Vertikal*

No	Jenis Tanah	Kepadatan Awal, (γ_{do}) (g/cm^3)	Kembang Vertikal, S (%)
1.	Padangan (Bojonegoro)	1,22	50,87
2.	Padangan (Bojonegoro)	1,09	35,02
3.	Padangan (Bojonegoro)	1,03	25,94



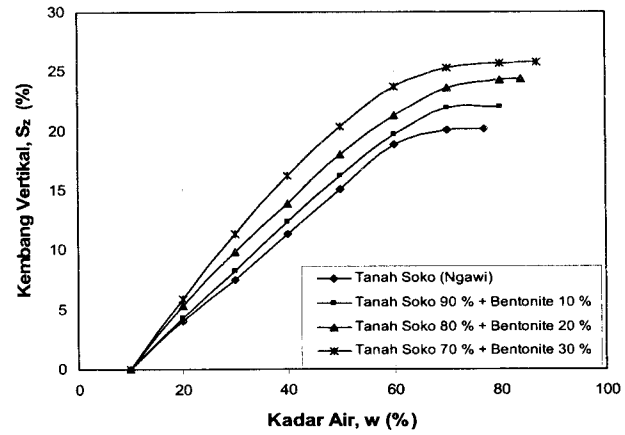
Gambar 5.12 *Hubungan Kadar Air Awal (w_i dengan Kembang Vertikal (S) Tanah Padangan, Bojonegoro (Sudjianto, 2006).*

Hubungan kepadatan awal (γ_{do}) dengan kembang vertikal (S) tanah lempung Padangan (Bojonegoro) pada Gambar 5.9 memperlihatkan semakin besar kepadatan awal (γ_{do}) tanah lempung ekspansif maka semakin besar kembang vertikal yang terjadi. Hal ini mengindikasikan tanah lempung ekspansif dengan kepadatan awal (γ_{do}) yang besar (kering) ketika terjadi pembasahan maka proses penyerapan air sangat tinggi, sehingga perubahan volume dalam hal ini pengembangan yang terjadi juga tinggi (Nelson dan Miller, 1992: Sapaz, 2004).

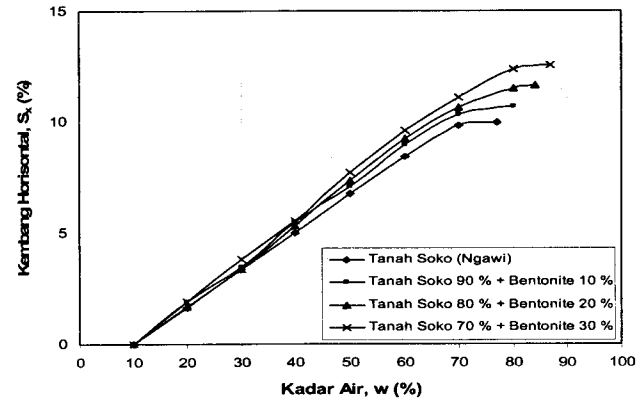
5.6.5 Pengaruh perubahan kadar air (Δ_w) terhadap perilaku kembang

Fenomena kembang pada tanah lempung ekspansif sangat berhubungan dengan perubahan kadar air. Sudjianto (2012) melaksanakan

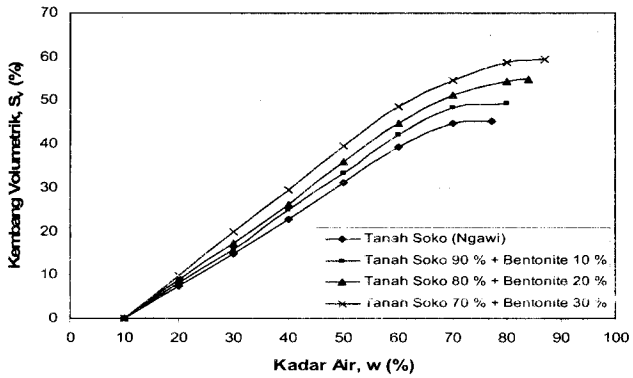
uji kembang vertikal – horisontal (VH) dengan alat oedometer modifikasi pada tanah lempung ekspansif dari Soko (Ngawi) dan tanah campuran. Kondisi sampel dengan berat volume kering γ_d = 12, 60 kN/m^3 dan kadar air awal (w_i) 10 %, memperlihatkan semakin besar perubahan kadar air tanah lempung ekspansif, maka semakin besar kembang yang terjadi seperti terlihat pada Gambar 5.13 – Gambar 5.15.



Gambar 5.13 *Hubungan Kadar Air dengan Kembang Vertikal Tanah Soko dan Tanah Campuran.*



Gambar 5.14 *Hubungan Kadar Air dengan Kembang Horisontal Tanah Soko dan Tanah Campuran.*



Gambar 5.15 *Hubungan Kadar Air dengan Kembang Volumetrik Tanah Soko dan Tanah Campuran.*

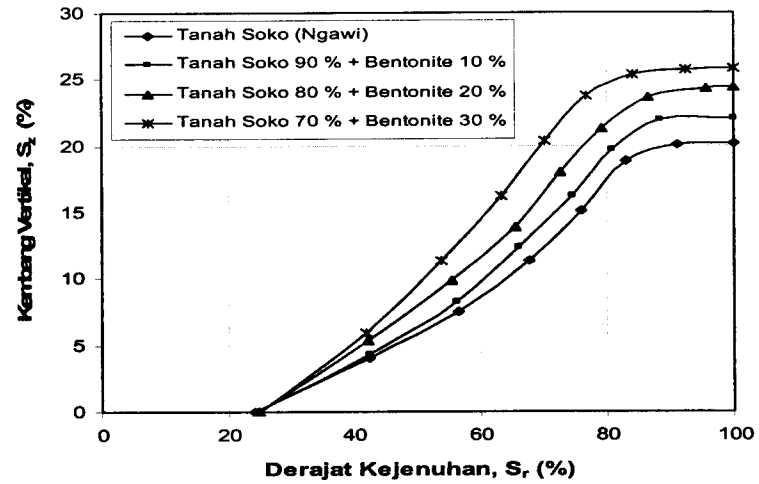
Gambar tersebut memperlihatkan hubungan antara perubahan kadar air (Δ_W) dengan kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) tanah Soko dan tanah campuran. Kembang yang terjadi semakin besar dengan naiknya kadar air dan berhenti mengembang pada kadar air antara 77 % sampai dengan 86 %.

5.6.6 Pengaruh derajat kejenuhan terhadap perilaku kembang

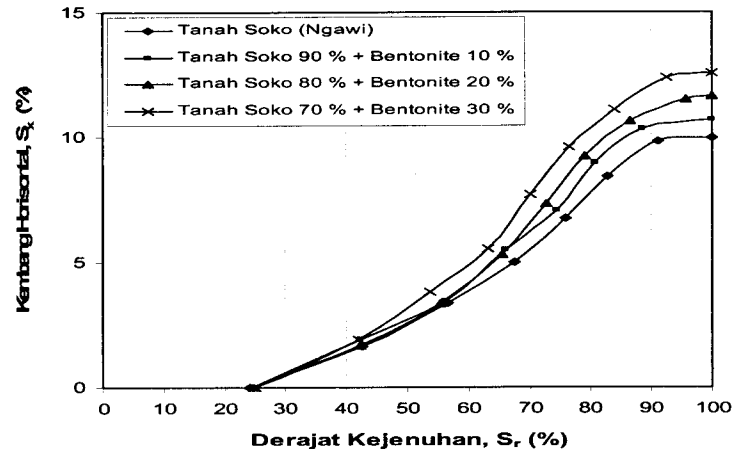
Hubungan antara derajat kejenuhan tanah terhadap perilaku kembang tanah lempung ekpansif dari Soko (Ngawi) dan tanah campuran dengan kadar air awal (W_i): 10 % dan berat volume kering awal (γ_{do}) 12, 60 kN/m^3 seperti pada Gambar 5.16 – Gambar 5.18. Hasil uji kembang vertikal – horisontal tersebut memperlihatkan bahwa semakin besar derajat kejenuhan (S_r) tanah lempung, maka semakin besar kembang yang terjadi.

Hasil uji kembang vertikal – horisontal dan kembang volumetrik tersebut memperlihatkan bahwa semakin besar derajat kejenuhan (S_r) tanah lempung ekspansif, maka semakin besar kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) yang terjadi dan tanah lempung ekspansif berhenti mengembang pada derajat kejenuhan 100 % atau S_r = 1. Hal ini mengindikasikan tanah lempung ekspansif dengan derajat kejenuhan awal yang rendah masih sangat mudah untuk

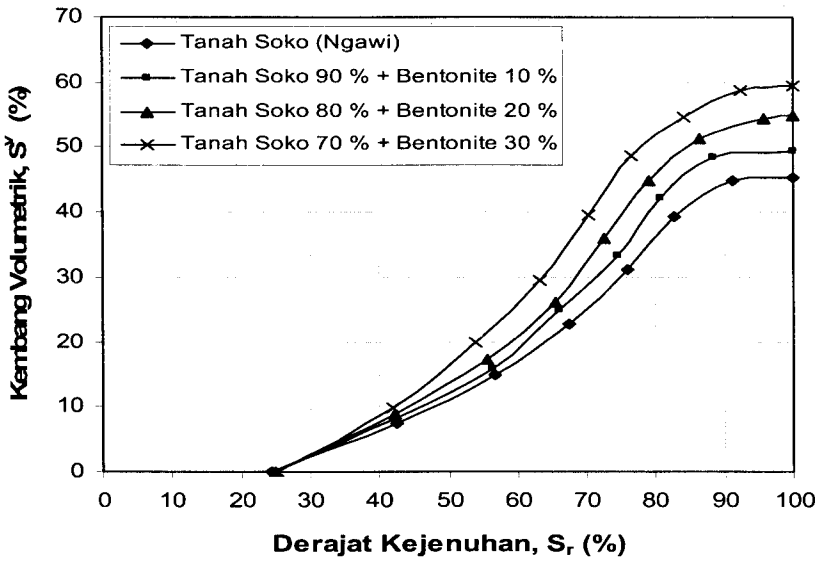
menyerap air yang menyebabkan terjadinya perubahan volume dalam hal ini kembang tanah lempung ekspansif (Das, 2008).



Gambar 5.16 *Hubungan Derajat Kejenuhan dengan Regangan Vertikal Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



Gambar 5.17 *Hubungan Derajat Kejenuhan dengan Remangan Horisontal Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



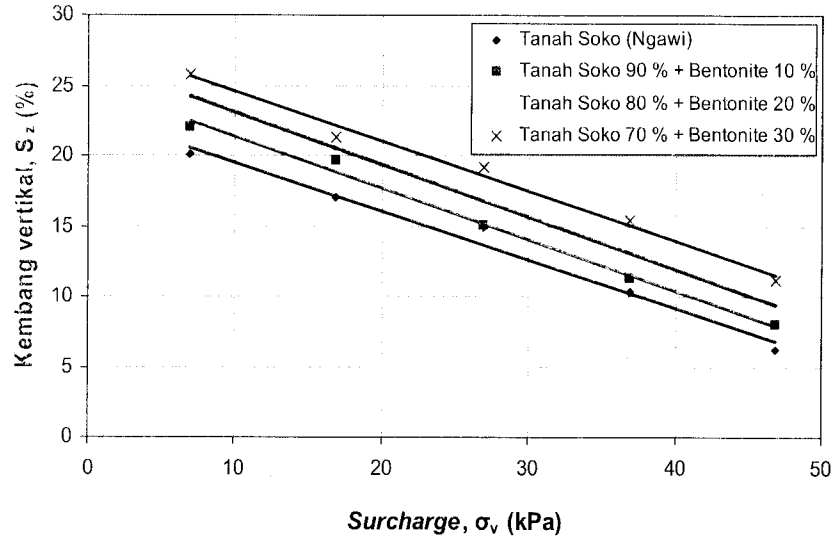
Gambar 5.18 *Hubungan Derajat Kejenuhan dengan Remangan Volumetrik Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*

5.6.7 Pengaruh variasi penambahan beban beban terhadap perilaku kembang

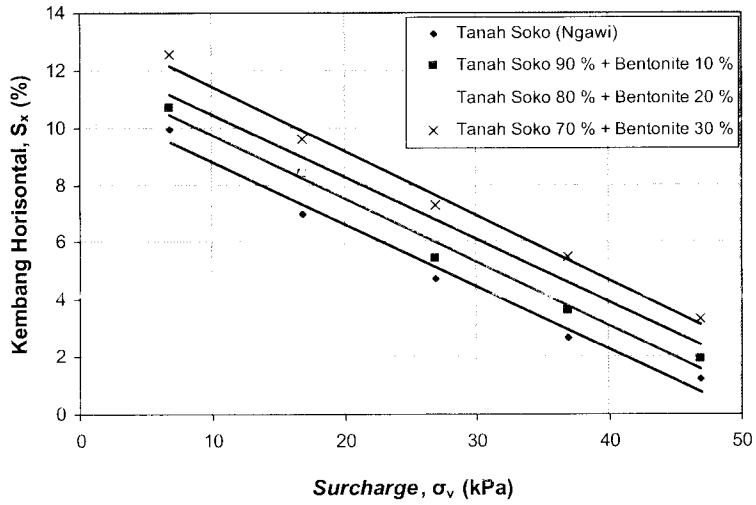
Pengaruh variasi penambahan beban (*sucharge*) terhadap kembang venikal (S_z) dan horisontal (S_x) serta kembang volumetrik (S_v) tanah lempung Soko (Ngawi) dengan kadar air awal (W_i): 10 % dan berat volume kering awal (γ_{do}): 12, 60 kN/m^3 pada benda uji terganggu (*disturbed*). Variasi *surcharge* yang diterapkan adalah 6, 9 kPa, 16, 9 kPa, 29, 6 kPa, 36, 9 kPa dan 46, 9 kPa. Untuk tanah campuran Soko 90 % + Na-*bentonite* 10 %, tanah campuran Soko 80 % + Na-*bentonite* 20 % dan tanah campuran Soko 70 % + Na-*bentonite* 30 %.

Hasil uji kembang vertikal – horisontal dan kembang volumetrik direkap dalam satu hubungan surcharge dengan kembang vertikal,

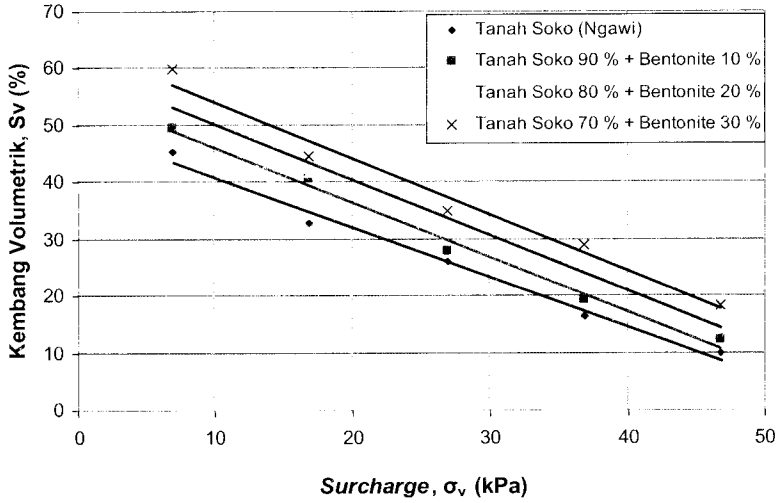
kembang horisontal dan kembang volumetrik seperti pada Gambar 5.19 – Gambar 5.21. Ketiga gambar tersebut memperlihatkan kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) semakin kecil dengan bertambahnya beban *sucharge* dan berhenti mengembang pada beban *sucharge* 46, 9 kPa. Fenomena tersebut memperlihatkan bahwa, beban *sucharge* yang besar sebagai tekanan dari luar tanah ekspansif akan melawan tekanan kembang pada saat tanah ekspansif mengalami kembang, akibatnya kembang tanah ekspansif menjadi kecil atau tidak akan mengembang bila beban yang diberikan sama dengan tekanan kembang yang terjadi atau lebih besar dari tekanan kembang tanah lempung Soko (Sudjianto, 2012).



Gambar 5.19 *Hubungan Penambahan Beban dengan Kembang Vertikal. Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012)*



Gambar 5.20 *Hubungan Penambahan Beban dengan Kembang Horisontal Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



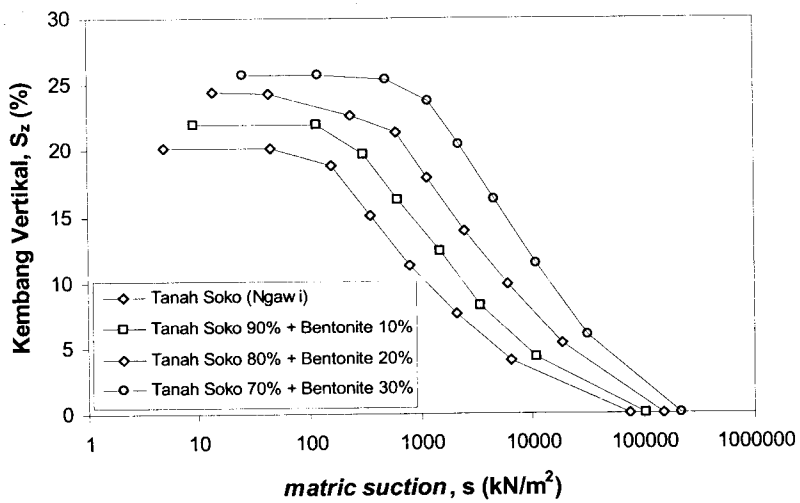
Gambar 5.21 *Hubungan Penambahan Beban dengan Kembang Volumetrik Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012)*

5.6.8 Pengaruh suction terhadap perilaku kembang

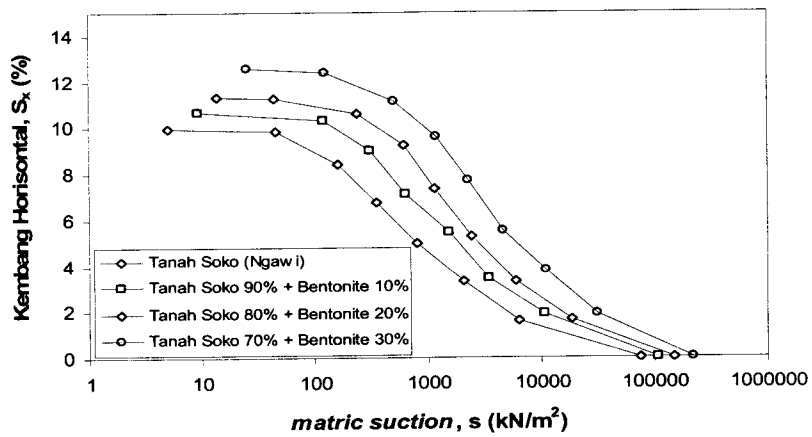
Perilaku *matric suction* menggunakan *filter paper* sangat dipengaruhi kadar air yang dikandung oleh tanah lempung ekspansif. Semakin meningkat kadar airnya, maka semakin rendah *matric suction.* Hal ini disebabkan besarnya *matric suction* merupakan fungsi dari besamya kadar air *filter paper.*

Gambar 5.22 – Gambar 5.24, memperlihatkan hubungan antara variasi *matric suction* dengan kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) tanah Soko (Ngawi) dan tanah campuran pada uji kembang secara terkekang lateral tipis. Kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) tanah lempung Soko (Ngawi) dan tanah campuran semakin kecil dengan bertambahnya *matric suction* ((u_a - u_w)) dan berhenti mengembang pada *matric suction* 5, 1420 kN/m^2 untuk tanah Soko (Ngawi), 9, 2311 kN/m^2 untuk tanah Soko 90 % + bentonit 10 %,, 13, 8793 kN/m^2 untuk tanah Soko 80 % + bentonit 20 % dan 25, 8793 kN/m^2 untuk tanah Soko 70 % + bentonit 30 %.

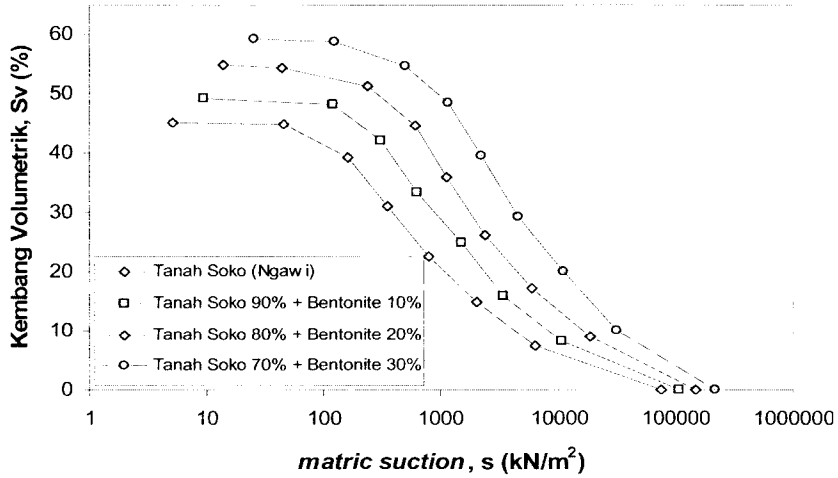
Pengaruh variasi *matric suction* ((u_a - u_w)) terhadap perilaku kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) pada tanah lempung Soko (Ngawi) dan tanah campuran merupakan perilaku yang berlawanan dengan pengaruh dari variasi kadar air dan variasi derajat kejenuhan. Nilai kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) pada tanah lempung Soko (Ngawi) dan tanah campuran akan bertambah besar dengan semakin besarnya nilai kadar air (w) dan derajat kejenuhan (S_r), tetapi nilai kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) pada tanah lempung Soko (Ngawi) dan tanah campuran akan bertambah besar dengan mengecilnya nilai *matric suction.* Kesimpulan perilaku *matric suction* (u_a - u_w) berbanding terbalik dengan kadar air (w) dan derajat kejenuhan (S_r) pada perilaku kembang vertikal (S_z), kembang horisontal (S_x) dan kembang volumetrik (S_v) tanah lempung ekspansif.



Gambar 5.22 *Hubungan Matric Suction dengan Kembang Vertikal Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



Gambar 5.23 *Hubungan Matric Suction dengan Kembang Horisontal Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



Gambar 5.24 *Hubungan Matric Suction dengan Kembang Volumetrik Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*

5.6.9 Pengaruh variasi indeks plastisitas (IP) terhadap perilaku kembang

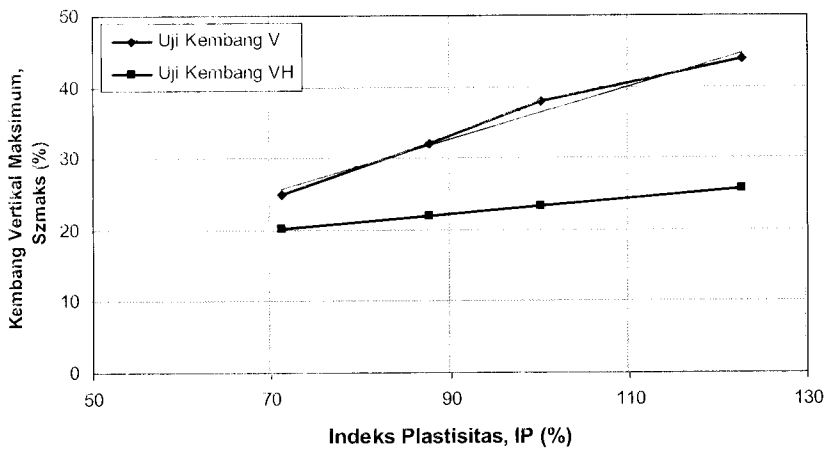
Pengaruh variasi indeks plastisitas (IP) terhadap kembang vertikal maksimum (S_{Zmaks}) terkekang arah lateral (V) dan kembang vertikal maksimum dan kembang horisontal maksimum (S_{Zmaks} dan S_{Xmaks}) serta kembang volumetrik maksimum (S_{Vmaks}) tanah lempung Soko (Ngawi) dan tanah campuran dengan kadar air awal (w_i) 10 % dan berat volume kering awal (γ_{do}) 12, 60 kN/m³ pada dengan kondisi terkekang arah lateral secara tipis (VH) seperti pada Tabel 5.10. Hubungan antara nilai indeks plastisitas (IP) dan kembang vertikal maksimum dan kembang horisontal maksimum (S_{Zmaks} dan S_{Xmaks}) serta kembang volumetrik maksimum (S_{Vmaks}) seperti pada Gambar 5.25 – Gambar 5.27.

Tabel 5.10 memperlihatkan semakin besar kadar Na-*bentonite* dalam tanah lempung Soko (Ngawi), semakin besar nilai indeks pals-tisitas (IP). Gambar 5.22 – Gambar 5.24 memperlihatkan, semakin besar nilai indeks plastisitas (IP), semakin besar kembang yang terjadi baik

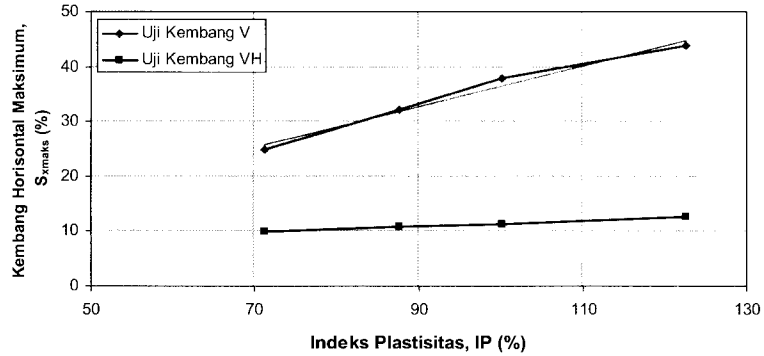
kondisi terkekang (V) maupun tidak terkekang arah lateral (VH). Hal ini mengindikasikan bahawa semakin besar fraksi lempung, maka luas permukaan lempung menjadi semakin besar dan kemampuan untuk menyerap air menjadi semakin tinggi, sehingga menyebabkan perubahan volume yang besar, dalam hal ini kembang yang terjadi juga semakin besar.

Tabel 5.10 *Nilai Indeks Plastisitas (IP) dan Kembang Maksimum (S_{maks}) Tanah Soko dan Tanah Campuran*

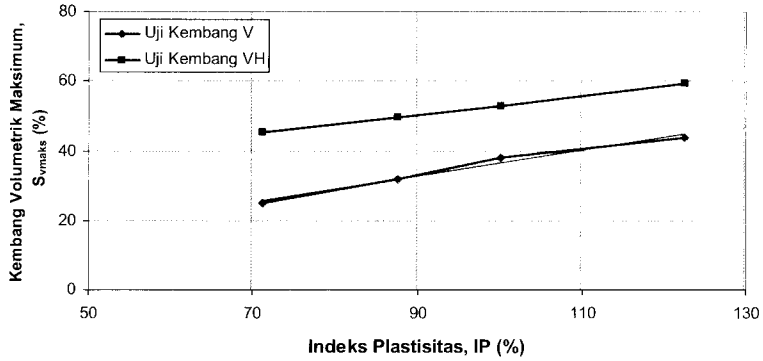
Jenis Tanah	Indeks plastisitas, IP (%)	Kembang Vertikal, V (%)	Kembang Vertikal – Horisontal (VH)		
			S_z (%)	S_x (%)	S_y (%)
Soko (Ngawi)	71, 32	24, 87	20, 12	9, 95	45, 22
Soko 90 % + *Bentonite* 10 %	87, 83	32, 02	21, 99	10, 68	49, 43
Soko 80 % + *Bentonite* 20 %	100, 44	37, 94	23, 38	11, 34	53, 01
Soko 70 % + *Bentonite* 30 %	122, 80	43, 82	25, 77	12, 56	59, 34



Gambar 5.25 *Hubungan Indeks Plastisitas dan Kembang Vertikal Maksimum Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



Gambar 5.26 *Hubungan Indeks Plastisitas dan Kembang Horisontal Maksimum Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



Gambar 5.27 *Hubungan Indeks Plastisitas dan Kembang Volumetrik Maksimum Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*

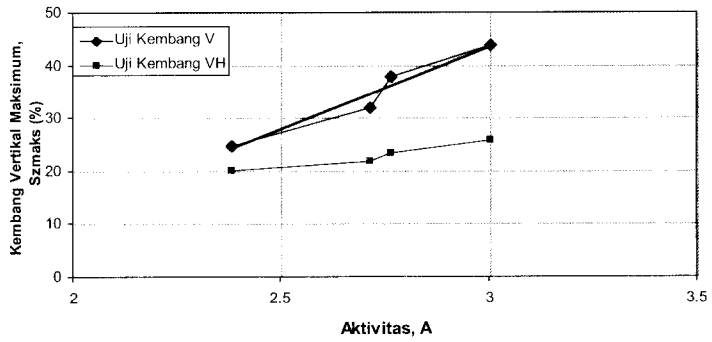
Kembang vertikal maksimum kondisi terkekang (V) lebih besar dari kembang vertikal maksimum dan kembang horisontal maksimum tidak terkekang arah lateral (VH) (Gambar 5.66 dan Gambar 5.67), tetapi kembang volumetrik maksimum tidak terkekang arah lateral (VH) lebih besar dari kembang vertikal maksimum terkekang arah lateral (V) (Gambar 5.68). Hal ini sesuai yang disampaikan oleh Taboada (2003) bahwa kembang volumetrik dengan kondisi tidak terkekang arah lateral (VH) lebih besar dari kembang vertikal terkekang arah lateral (V).

5.6.10 Pengaruh variasi aktivitas tanah (A) terhadap perilaku kembang

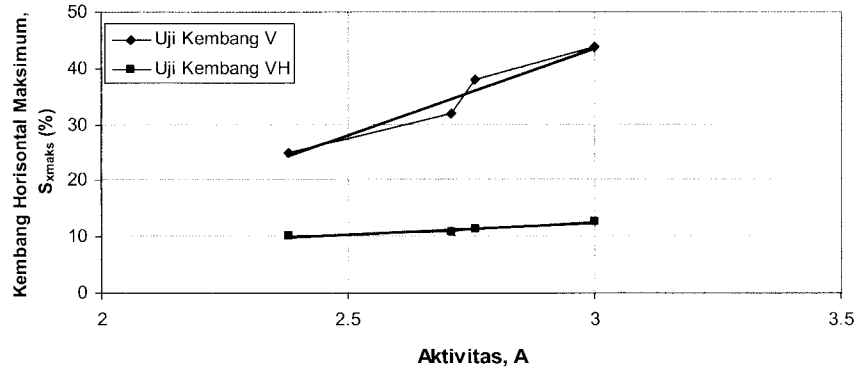
Selain indeks plastisitas (IP), aktivitas (A) tanah dapat digunakan untuk mengetahui potensi kembang tanah ekspansif (Seed, dkk., 1962; Chen, 1975). Pengaruh variasi aktivitas tanah (A) terhadap kembang vertikal maksimum (S_{Zmaks}) terkekang arah lateral dan kembang vertikal - horisontal maksimum (S_{Zmaks} dan S_{Xmaks}) terkekang tipis serta kembang volumetrik maksimum (S_{Vmaks}) tanah Soko dan tanah campuran dengan kadar air awal (w_i) 10 % dan berat volume kering awal (γ_{do}) 12, 60 kN/m^3 dengan kondisi tidak terkekang lateral (VH) seperti pada Tabel 5.11 dan Gambar 5.28 – Gambar 5.30.

Tabel 5.11 *Nilai aktivitas (A) dan Kembang Maksimum (S_{maks}) Tanah Soko dan Tanah Campuran*

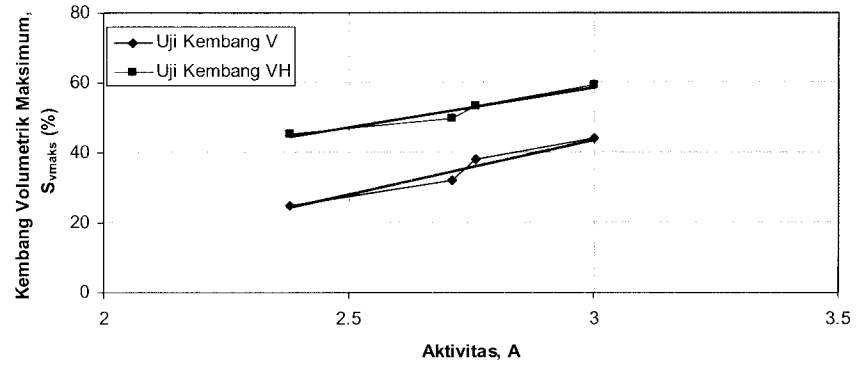
Jenis Tanah	Indeks plastisitas, IP (%)	Kembang Vertikal, 1D (%)	Kembang Vertikal – Horisontal (2D)		
			S_z (%)	S_x (%)	S_v (%)
Soko (Ngawi)	2, 38	24, 87	20, 12	9, 95	45, 22
Soko 90 % + *Bentonite* 10 %	2, 73	32, 02	21, 99	10, 68	49, 43
Soko 80 % + *Bentonite* 20 %	2, 76	37, 94	23, 38	11, 34	53, 01
Soko 70 % + *Bentonite* 30 %	3, 00	43, 82	25, 77	12, 56	59, 34



Gambar 5.28 *Hubungan Aktivitas (A) dan Kembang Vertikal Maksimum Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



Gambar 5.29 *Hubungan Aktivitas (A) dan Kembang Horisontal Maksimum Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*



Gambar 5.30 *Hubungan Aktivitas (A) dan Kembang Volumetrik Maksimum Tanah Soko dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*

Pengaruh aktivitas (A) tanah lempung Soko (Ngawi) dan tanah campuran hampir sama dengan pengaruh indeks plastisitas (IP) tanah, kadar Na-*bentonite* menjadi faktor dalam meningkatkan nilai aktivitas (A), semakin besar kadar Na-*bentonite* dalam tanah lempung Soko (Ngawi), semakin besar nilai aktivitas (A) tanah. Variasi nilai aktivitas (A) tanah tersebut juga mempunyai pengaruh yang linear dengan indeks plastisitas (IP) terhadap perilaku kembang.

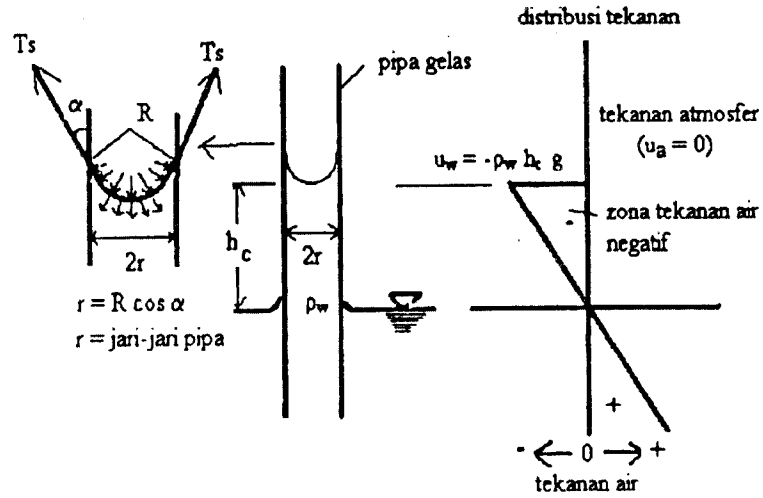
Gambar 5.25 – Gambar 5.27 memperlihatkan hubungan antara kembang vertikal, horisontal dan volumetrik dengan aktivitas (A) tanah, semakin besar nilai aktivitas (A) tanah lempung ekspansif, semakin besar kembang vertikal, kembang horisontal dan kembang volumetrik yang terjadi. Hal ini mengindikasikan bahawa indeks plastisitas (IP) dan fraksi lempung (C) mempunyai hubungan yang linear terhadap potensi kembang. Kedua parameter tersebut berhubungan dengan kemampuan untuk menyerap air, sehingga menyebabkan perubahan volume, dalam hal ini kembang yang terjadi.

5.7 PENYUSUTAN

Tanah berbutir halus khususnya lempung akan mengalami penyusutan ketika kadar air berkurang karena terjadi pengeringan. Pengeringan pada butiran tanah disebabkan oleh penguapan permukan saat musim panas, penurunan muka air tanah, dan isapan akar tumbuh-tumbuhan.

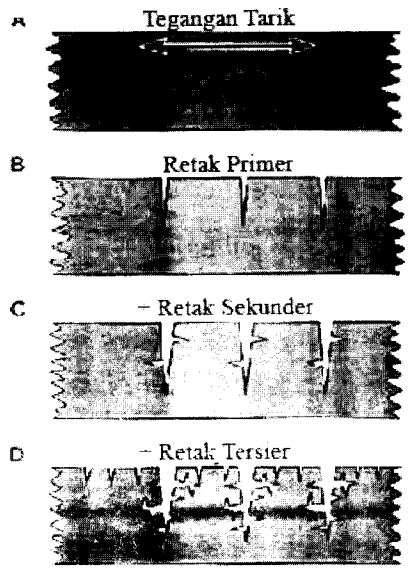
Akibat pengeringan, tanah akan mengalami kondisi tidak jenuh *(unsaturated)*. Pada peristiwa ini tegangan efektif antara butiran tanah ($\sigma' = \sigma - u$) akan lebih besar dari pada tegangan efektif mula-mula. Hal ini disebabkan harga tegangan air pori (u) pada peristiwa kapiler adalah negatif seperti pada Gambar 5.28. Massa tanah seakan-akan tertekan dan volumenya cenderung menyusut (*shrinking*). Penyusutan ini terjadi dalam tiga arah (3 dimensi). Semakin kecil kadar air tanah makin besar tegangan kapiler. Hal ini mengakibatkan pula tegangan efektif yang timbul semakin besar.

Berkurangnya kadar air dalam tanah umumnya terjadi karena proses pengeringan (*drying*). Jadi dapat dikatakan bahwa penyusutan (*shringking*) pada tanah terutama pada tanah lempung, yaitu pengurangan volume tanah akibat berkurangnya kadar air umumnya terjadi pada musim kemarau (Yong dan Warkentin, 1975).



Gambar 5.31 *Fenomena Tegangan Permukaan Air pada Pipa I (Fredlund dan Rahardjo, 1993).*

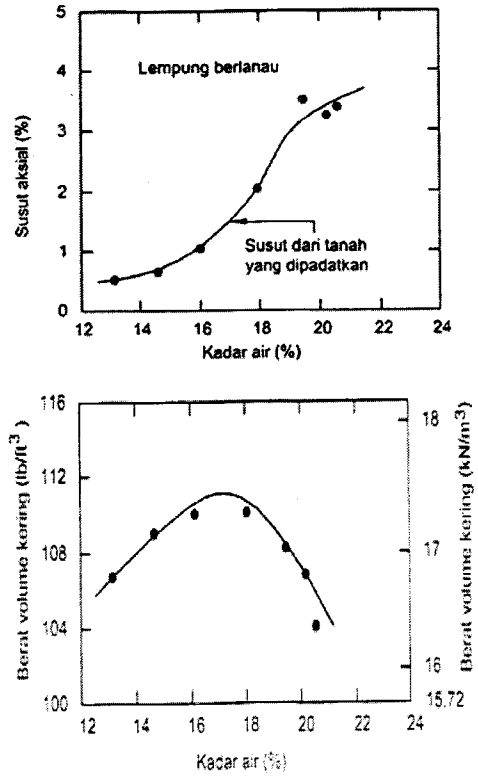
Pengaruh penyusutan pada tanah berbutir halus menjadi masalah penting dalam permasalahan geoteknik. Retak akibat penyusutan tanah ekspansif dapat muncul secara lokal, jika tekanan kapiler melampaui kohesi atau kuat tarik tanah. Retak-retak ini, bagian dari makrostruktur lempung dan merupakan zona-zona lemah yang secara signifikan mereduksi kekuatan massa tanah secara keseluruhan, sehingga dapat mempengaruhi stabilitas lereng lempung dan kapasitas dukung fondasi. Dexter (1988) membagi model keretakan akibat pengeringan menjadi 3 jenis yaitu: retak primer, retak sekunder dan retak tersier, seperti pada Gambar 5.29. Ketika terjadi pengeringan maka kadar air akan berkurang, sehingga tanah akan mengalami retak yang diakibatkan oleh tegangan tarik ketika penyusutan. Penyusutan awal akan menyebabkan keretakan primer, selanjutnya penyusutan makin besar yang menyebabkan retak sekunder. Dengan makin kering kadar air dalam tanah pada saat retak sekunder mengakibatkan penyusutan makin tinggi sehingga retak yang terjadi pada saat kadar air kering adalah susut tersier dan merupakan susut yang terparah pada tanah ekspansif.



Gambar 5.32 *Retak Primer, Sekunder dan Tersier pada Tanah Ekspansif Akibat Penyusutan (Dexter, 1988).*

Retak akibat penyusutan butiran tanah pada fenomena pengeringan permukaan yang sering dijumpai pada tanah lempung ekspansif dapat berpengaruh jelek, misalnya, pada struktur perkerasan jalan yang di bangun diatasnya maupun bangunan ringan seperti rumah tinggal, saluran air dan gorong-gorong atau draenase perkotaan.

Chen (1959) memberikan hubungan antara kadar air dengan susut aksial pada tanah lempung berlanau seperti pada Gambar 5.73, sedangkan Chen dan Raman (1967) memberikan hubungan antara indeks plastisitas (IP) tdengan indeks susut (SI) dan tingkat pengembangan tanah ekspansif seperti pada Tabel 5.12.



Gambar 5.33. *Susut Aksial pada Lempung Berlanau (Chen, 1959).*

Tabel 5. 12 *Hubungan PI, Indeks Susut dengan Pengembangan (Chen dan Raman, 1967)*

Indeks plastisitas, IP (%)	Indeks Susut, SI (%)	Tingkat Pengembangan
<12	<15	Rendah
2 - 23	13 - 30	Sedang
23 - 30	30 - 40	Tinggi
>30	>40	Sangat tinggi

-oo0oo-

BAB VI

MENGUKUR PERUBAHAN VOLUME

6.1 UMUM

Mengukur perubahan volume tanah lempung ekspansif merupakan salah satu metode identifikasi tanah lempung ekspansif, yaitu metode identifikasi secara langsung (Thomas, 1998). Metode langsung termasuk semua metode dengan menaksir secara kuantitatif karakteristik perubahan volume tanah ekspansif, dilakukan di laboratorium. Metode pengukuran langsung biasanya menggunakan peralatan dan standar tertentu untuk mengukur perubahan volume tanah ekspansif (Chen, 1975).

Perubahan volume tanah lempung ekspansif akibat perubahan kadar air dikelompokan menjadi 3 perilaku, yaitu: pengembangan, tekanan pengembangan dan penyusutan. Beberapa alat percobaan laboratorium telah dikembangkan untuk mengukur perubahan volume tanah lempung ekspansif, diantaranya adalah oedometer, PVC meter, geonor, triaksial, indeks pengembangan, alat CBR dan alat uji *suction*. Sedangkan metode untuk mengukur perubahan volume telah dibuat metode pengukuranya diantaranya: kembang bebas, *expansion index*, *California bearing ratio*

(CBR), *potential volume change* (PVC) dan *coefficient of linear extensibility* (COLE).

6.2 UJI PENGEMBANGAN (*SWELLING TEST*)

Cara untuk menggambarkan sifat tanah ekspansif adalah potensi pengembangan yang umumnya diuji dengan uji pengembangan. Sayangnya, terdapat pada definisi–definisi yang berbeda dari potensi pengembangan dan terdapat beberapa cara pengujian yang berbeda pula (hardiyatmo, 2006).

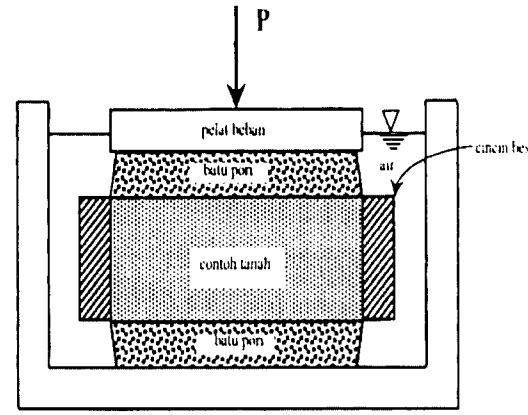
Uji pengembangan umumnya dilakukan pada cincin besi berbentuk silinder (contoh tanah terkekang secara lateral). Awalnya, contoh tanah kering dibebani dengan tekanan terbagi rata, dan kemudian direndam air. Contoh tanah mengembang secara vertikal dan perubahan tinggi dibagi tinggi awal adalah potensi pengembangannya (dinyatakan dalam persen). Pengujian dapat dilakukan pada alat uji konsolidasi konversional (oedometer/konsolidometer), alat indeks pengembangan, PVC meter dan alat CBR. Tetapi, akibat belum adanya prosedur standar pengujian, spesifikasi dari pengujian bervariasi dan hasil pengujian menjadi berbeda dan tidak selalu dapat dibandingkan. Kisaran tipikal criteria pengujian adalah sebagai berikut:

Diameter contoh tanah, umumnya sekitar 50-112 mm dan tinggi 12-37 mm. Jika diameter contoh tanah lebih besar, maka akan berpengaruh pada pengurangan gesekan dinding, sehingga contoh akan cenderung mengembang lebih besar. Contoh tanah, dapat berupa contoh asli maupun dibentuk. Jika dibentuk, maka harus diperhatikan kepadatan, kadar air dan bagaimana pemeraman contoh tanahnya. Kadar air awal dapat berupa kadar air ditempat, kadar air optimum atau kering udara. Beban terbagi rata ditentukan besarnya. Umumnya, bekisar antara 2, 9-71, 8 kPa. Kadang-kadang beban dibuat sama dengan tekanan ditempat (in-situ) atau sama dengan tekanan overburden yang diperkirakan sebelumnya. Lama waktu pengujian dipertimbangkan terhadap waktu yang dibutuhkan air untuk masuk kedalam contoh tanah, karena tanah-tanah ekspansif tidak

segera mengembang ketika ditambahkan air. Beberapa peneliti melakukan pengujian selama 24 jam, atau yang lain, menuggu sampai kecepatan mengembang telah mencapai kecepatan tertentu, misalnya 0, 001"/jam, sehingga memerlukan beberapa hari (Coduto, 1994).

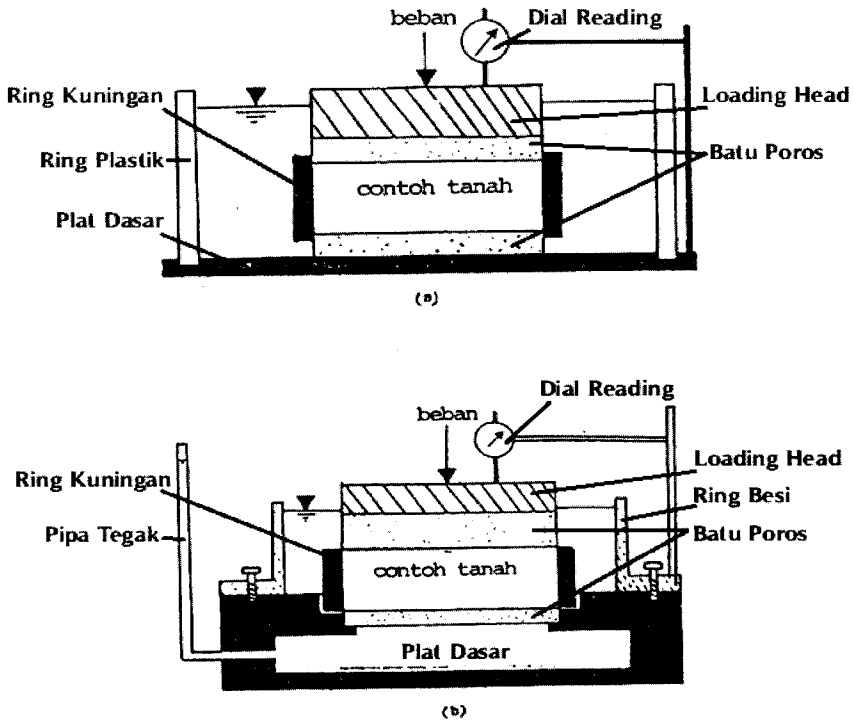
6.2.1 Oedometer (konsolidometer konvensional)

Uji pengembangan arah vertikal di laboratorium dapat dilakukan dengan alat oedometer (konsolidometer). Alat oedometer pada dasarnya merupakan alat konsolidasi konvensional untuk tanah berbutir halus khususnya tanah lempung. Selain itu, akibat perilaku pengembangan pada tanah lempung ekspansif, maka alat ini dapat digunakan untuk mengukur pengmbangan vertikal dengan metode uji standar yang dibuat oleh ASTM. Untuk uji pengmbangan vertikal mengacu pada standar ASTM D4546-96 (*Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Setttlement Potential of Cohesive Soils*). Skema alat Oedometer seperti pada Gambar 6.1.



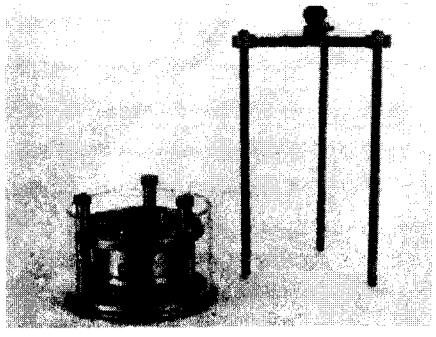
Gambar 6.1 *Skema Alat Oedometer.*

Alat Oedometer yang digunakan untuk uji konsolidasi ada 2 jenis yaitu: *Fixed consolidation* dan *floating consolidattion*. Skema alat *Fixed consolidation* dan *floating consolidattion* seperti pada Gambar 6.2. Namun untuk mengukur pengembangan arah vertikal digunakan tipe *fixed floating*, agar sampel tanah lempung ekspansif terkekang rah lateral secara kaku.

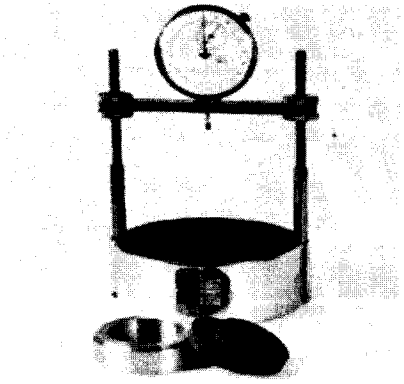


Gambar 6.2 *Skema Tipe alat Oedometer (a) Fixed (b) floating.*

Gambar 6.3 merupakan alat Fixed consolidation, sedangkan Gambar 6.4 merupakan jenis alat floating consolidattion buatan ELE Internasional.



Gambar 6.3 *Alat Uji Konsolidasi Tipe Fixed*



Gambar 6.4 *alat uji konsolidasi tipe Flooting*

Alat oedometer yang umum digunakan untuk uji kembang vertikal adalah buatan ELE Internasional, dengan spesifikasi alat seperti terlihat pada Tabel 6.1 dan Tabel 6.2.

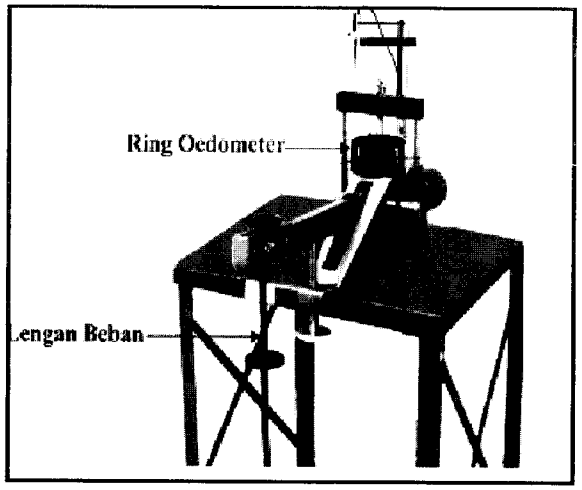
Tabel 6.1 *Spesifikasi Alat Oedometer (ELE International)*

	Spesifikasi
Kapasitas beban	48 ton/ft^2 (5.148 kPa) untuk diam sampel 6, 35 mm
Lengan beban	Aluminium cetak, penyeimbang, rasio 1:9, 1:10 dan 1:11
Frame	Aluminium cetak, *Integral beam support jact*, plat baja dan platform
Dimensi	8" 1x28" t(203 x 711 x 508 mm) tidak termasuk beratnya
Berat	Berat net 30 lbs (13, 6 kg); berat total 40 lbs (18, 1 kg)

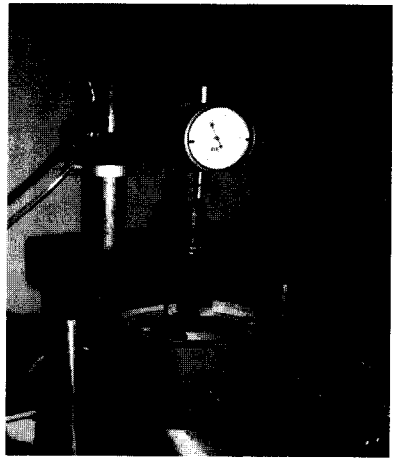
Tabel 6.2 *Spesifikasi Assembled Cell (ELE International)*

	Spesifikasi
No. model	E125-0479
Aplikasi	ASTM
Diameter spesimen	2,5"
Luas spesimen	4,909 in^2
Rasio lengan	1:10
Batu porus	2,15/32" diam x ½" tebal (6, 27 x 12, 7 mm)

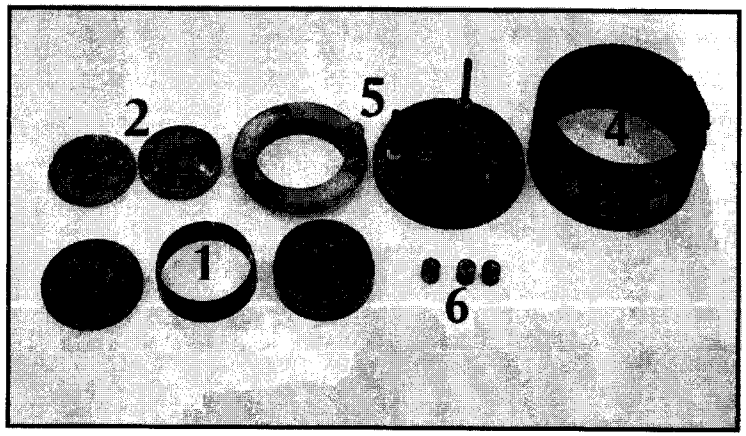
Gambar alat oedometer buatan ELE Internasional seperti pada Gambar 6.5 dan bagian atasnya seperti pada Gambar 6.6. Bagian atas alat oedometer terdapat ring oedometer, rincian ring oedometer seperti pada Gambar 6.7.



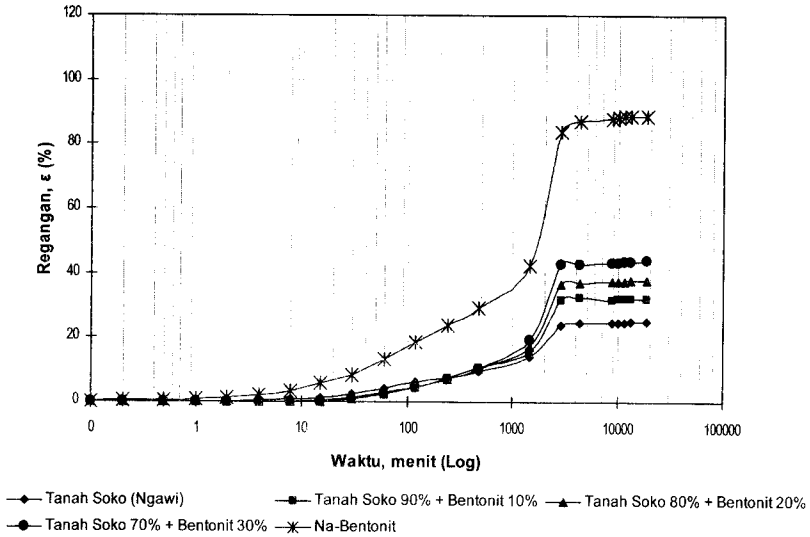
Gambar 6.5 *Alat Oedometer (Konsolidasi Konvensional).*



Gambar 6.6 *Bagian atas Alat Oedometer dengan dial gauge.*



Gambar 6.7 *Rincian Ring Oedometer Terdiri dari (1) Ring Spesimen; (2) Blok Tekanan dan Batu Porus Atas; (3) Batu Porus Bawah; (4) Integral Water Reservoir; (5) Ring Pengunci (Fixed Ring); Baut Pengunci (6).*

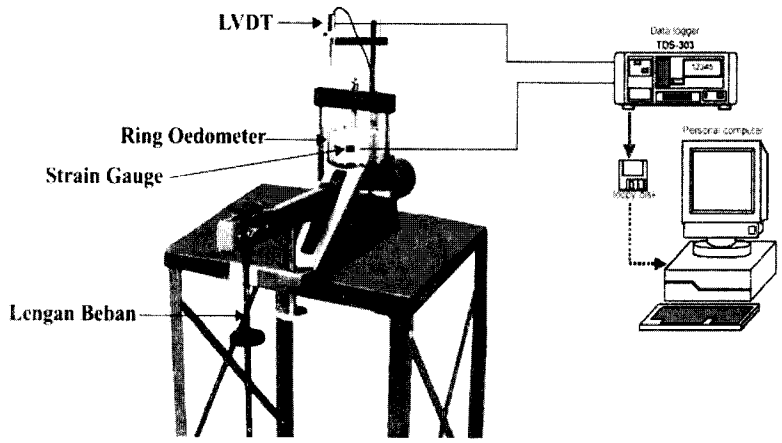


Gambar 6.8 *Hubungan antara Waktu terhadap Regangan Na-Bentonite Tanah Soko (Ngawi) dan Tanah Campuran (Sudjianto, 2012).*

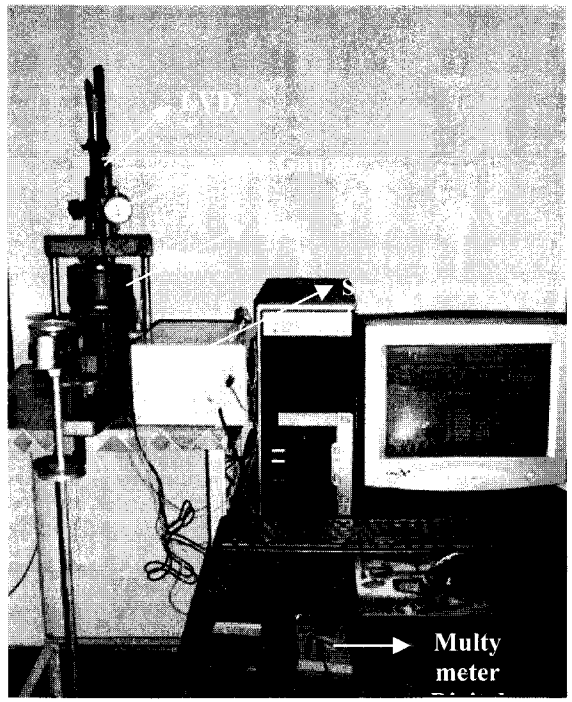
Hasil uji pengembangan vertikal dengan Oedometer seperti yang dilakukan oleh Sudjianto (2012) pada sampel Na-*bentonite*, tanah lempung Soko (Ngawi) dan tanah campuran (Tanah Soko (Ngawi) + Na-bentonite) seperti pada Gambar 6.8. Hasil uji pengembangan dengan oedometer ini, menghasilkan hubungan antara waktu (pembasahan sampel) dengan regangan yang terjadi pada saat tanah lempung ekspansif mengembang.

6.2.2 *Oedometer Modifikasi (Swelling VH)*

Pengembangan tanah lempung ekspansif di lapangan terjadi ke arah 3 dimensi atau volumetrik (Taboada, 2003). Guna mengakomodir tersebut, Sudjianto (2012) telah merancang alat Oedometer modifikasi yang dapat digunakan untuk mengukur pengembangan arah verikal dan horisontal (VH). Desain alat seperti pada Gambar 6.9 dan Oedometer modifikasi yang sudah dibuat untuk mengukur kembang vertikal-horisontal (VH) seperti pada Gambar 6.10.



Gambar 6.9 *(a) Skematik Alat Uji Swelling Vertikal Tanah Lempung Ekspansif, (b) Detail Pemasangan Strain Gauge.*

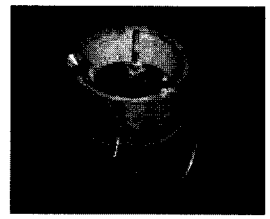
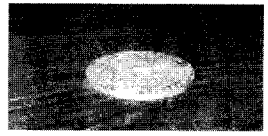


Gambar 6.10 *Oedometer Modifikasi (Sudjianto, 2012).*

Ring Oedometer yang telah ada dirancang untuk mengukur kembang hanya ke arah vertikal. *Ring* sampel berbentuk cincin yang keras menyebabkan sampel terkekang arah lateral, sehingga kembang yang terjadi hanya pada arah vertikal. Untuk dapat mengukur kembang arah horisontal, maka *ring* oedometer harus dimodifikasi, sehingga dapat digunakan untuk mengukur kembang horisontal.

Modifikasi *ring* Oedometer terdiri dari komponen-komponen lain yang berada di dalam *ring* Oedometer, diantaranya: *ring* sampel, blok tekanan dan batu pori atas. Komponen-komponen yang dimodifikasi tersebut seperti pada Tabel 6.3.

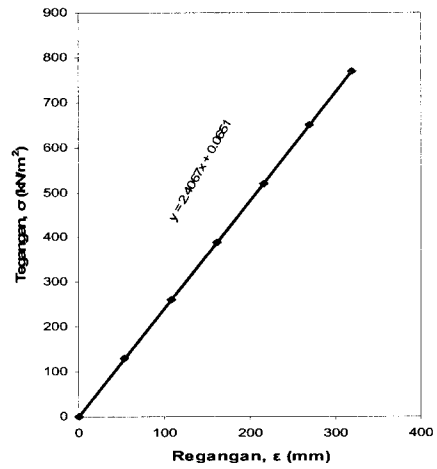
Tabel 6.3 *Spesifikasi, Bentuk, Dimensi, dan Berat Bagian-bagian Ring Oedometer Modifikasi*

Jenis dan bahan alat	Bentuk	Dimensi, mm	Berat, gr
Ring oedometer modifikasi, almunium *cor* diameter dalam diameter luar tinggi		105, 5 121, 5 67, 0	8723
Ring sampel, *membran lateks* diameter dalam diameter luar tinggi		63, 5 69, 5 17, 0	4, 82
Blok tekanan, almunium *cor* diameter tinggi		60, 0 12, 0	80, 0
Batu pori atas, almunium *cor* diameter tinggi		62, 18 5, 64	39, 50

Ring Oedometer modifikasi dibuat dari almunium *cor* dengan bentuk, dimensi dan berat seperti pada Tabel 6.3. *Ring* Oedometer dilengkapi dengan corong untuk menambahkan air melalui samping bawah *ring* oedometer, yang berfungsi untuk penjenuhan sampel tanah.

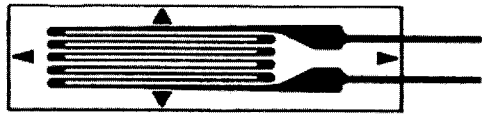
Proses penjenuhan sampel pada *ring* Oedometer modifikasi berbeda dengan *ring* oedometer biasa. Pada Oedometer biasa penjenuhan dengan cara menambahkan air melalui permukaan atas *ring* Oedometer, sedangkan penjenuhan sampel pada *ring* oedometer modifikasi dari corong yang disambung dengan selang di bawah *ring* Oedometer ke atas permukaan. Sistim penjenuhan ini dilakukan agar sampel tanah tidak rusak dan *gypsum block* yang berada di dalam sampel tanah dapat menyerap air secara merata, sehingga pembacaan perubahan kadar air pada multi meter dapat terbaca secara stabil dan sampel tanah dapat mengembang secara merata.

Ring sampel modifikasi dibuat dari membran lateks dengan bentuk, dimensi dan berat seperti pada Tabel 6.3. Bahan *ring* sampel dari lateks ini digunakan untuk mengurangi kekangan sampel tanah dari arah lateral, sehingga tanah ekspansif dapat mengembang pada arah horisontal. Membran lateks dibuat dengan cetakan berbentuk silinder dengan diameter 6, 25 cm dan tinggi 1, 70 cm. Kalibrasi modulus elastisitas membran lateks dilakukan dengan uji modulus di Laboratorium Struktur Mekanika Bahan Pusat Studi Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada Jogjakarta, seperti pada Gambar 6.11.



Gambar 6.11 *Hasil Kalibrasi Ring Membran.*

Besarnya modulus elastisitas (E) ring membran pada Gambar 5.11 adalah 2, 41 kN/m^2. Nilai E ring membran sangat kecil, sehingga ring ini mempunyai kekangan arah lateral yang kecil. Untuk dapat mengukur kembang arah horisontal pada ring membran oedometer modifikasi dilekatkan *strain gauge* dengan tipe FLA 6 – 11. Jenis *strain gauge* FLA-6-11 seperti pada Gambar 6.12.



Gambar 6.12 *Strain Gauge Tipe FLA-6-11.*

Strain gauge FLA-6-11 merupakan kode *strain gauge* yang digunakan, dengan :

F : jenis *gauge* yaitu: *general purpose*,
LA : pola konfigurasi yaitu: tunggal,
6 : panjang *gauge* yaitu: 6 mm,
11 : bahan kompensasi yaitu: *mild steel* (feritik).

Besarnya modulus elastisitas (E) *strain gauge* FLA-6-11 adalah 210 GPa atau setara dengan 210×10^9 kN/m^2 (Suhendro, 2000), dengan kemampuan mengukur regangan tanah ekspansif saat runtuh adalah maksimal 3%, sesuai dengan regangan runtuh tanah Soko (Ngawi) sebesar 3%. Pemilihan *strain gauge* ini seperti yang dilakukan oleh Sapaz (2004) dalam uji kembang vertikal – horisontal (VH). Rasio modulus elastisitas (E) antara ring sampel dari membran dengan *strain gauge* FLA-6-11 adalah 1: $8{,}7 \times 10^8$. Rasio ini memperlihatkan bahwa ring sampel dari membran mempunyai kekangan arah lateral yang sangat kecil.

Blok tekanan dibuat dari alumunium cor dengan bentuk, dimensi dan berat seperti pada Tabel 5.10. Blok tekanan pada Oedometer modifikasi dilubangi di tengahnya, lubang ini berfungsi untuk mengeluarkan kabel *gypsum block* modifikasi yang berada di tengah sampel tanah untuk dihubungan ke multimeter. Lubang ini berdiameter 3 mm dan dapat dilewati 2 kabel *gypsum block.*

Batu pori atas Oedometer modifikasi dibuat dari almunium cor dengan bentuk, dimensi dan berat seperti pada Tabel 6.3. Seperti pada blok tekanan, pada batu pori atas Oedometer modifikasi dilubangi di tengahnya, lubang ini berfungsi untuk mengeluarkan kabel *gypsum block* modifikasi yang berada di tengah sampel tanah untuk dihubungan ke multi meter.

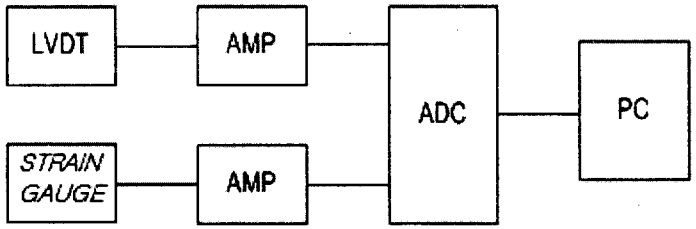
Lubang yang dibuat pada batu pori atas sama dengan lubang pada blok tekanan dengan diameter 3 mm.

Untuk melakukan akuisisi data perlu disusun sistem pengukuran yang terdiri dari beberapa peralatan yang terintegrasi. Gambar 6.13 memperlihatkan blok diagram sistem pengukuran yang dipakai dalam percobaan. Sistem pengukuran terlihat pada Gambar 6.14. Dalam percobaan ini ada 4 komponen, mulai dari sensor, penguat arus, pemroses data dan *output.*

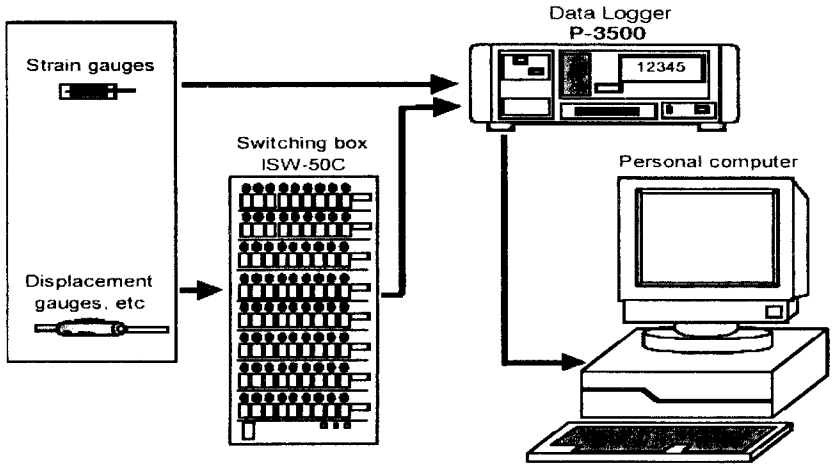
Komponen pertama adalah sensor yaitu menggunakan *strain gauge* dan LVDT. *Strain gauge* merupakan sensor regangan juga merupakan resistor yang mentransmisi regangan ke resistansi dan jembatan *wheatstone* ke voltase yang proporsional terhadap regangan. LVDT (*Linier Variable Differential Transformer*) merupakan sensor perpindahan, apabila terjadi perpindahan akan menggeser inti magnetik yang terdapat di tengah kumparan dan terjadi perubahan fluk magnetik yang menghasilkan voltase induktansi yang proporsional terhadap perpindahan.

Komponen kedua adalah penguat berupa penguat arus regangan (*amplifier*). Alat ini berfungsi sebagai pemberi sumber daya ke jembatan *wheatstone* dan transduser perpindahan, kemudian memperkuat voltase yang dihasilkan sensor-sensor tersebut. Untuk melakukan pengukuran, *strain gauge* harus dipasang pada lengan jembatan *wheatstone.*

Komponen ketiga adalah pemroses, bagian-bagian penting dari pemroses adalah *Analog Digital conferter* (ADC), *Central Processing Unit* (CPU), dan perangkat lunak akuisisi data. *Analog Digital Converter* (ADC) berfungsi mengkonversi sinyal analog ke sinyal digital. Alat ini diperlukan, karena komputer memakai sistem digital yaitu adanya aliran listrik hidup dan mati (*on-off*). Sebelum sinyal masuk ke ADC lebih dulu masuk ke *wiring* terminal sebagai pusat penyambungan. Seluruh bagian komputer dikendalikan oleh CPU. ADC tidak dikendalikan secara langsung oleh CPU, tetapi dikendalikan oleh perangkat lunak akuisisi data yang diambil dari ADC, kemudian dikirim ke CPU untuk diproses. Sistim pembacaan pada monitor PC dirancang dengan bahasa pemograman *Basic.*

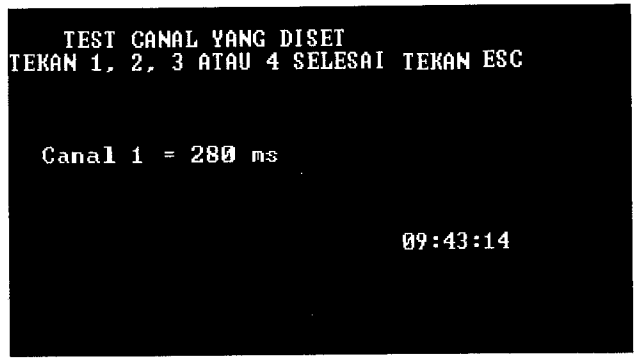


Gambar 6.13 *Blok Diagram Digital Strain Indicator P-3500 M.*

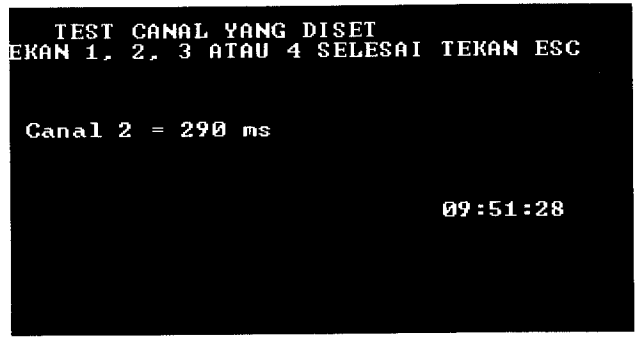


Gambar 6.14 *Sistem Akuisisi Data.*

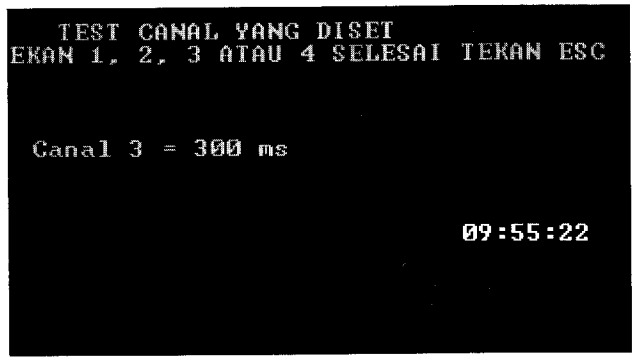
Komponen keempat adalah keluaran (*out-put*) yang berupa tampilan di monitor PC atau pada kotak pembacaan di strain meter P-3500. Tampilan di monitor PC terkoneksi dengan LVDT dan *strain gauge* dengan menggunakan program *Turbo Basic*. Tampilan pembacaan kembang horisontal pada layar monitor seperti pada Gambar 6.15 – Gambar 6.17, *canal* 1 pada *strain* meter P-3500 akan tampak di monitor PC setelah kita menekan angka 1 pada *keyboard* PC. Chanel 1 ini merupakan pembacaan besarnya kembang horisontal pada *Strain gauge* 1. *Canal* 2 merupakan pembacaan besarnya kembang horisontal pada *Strain gauge* 2 dan *Canal* 3 merupakan pembacaan besarnya kembang horisontal pada *Strain gauge* 3.



Gambar 6.15 *Tampilan Uji Kembang Horisontal pada Strain Gauge 1.*



Gambar 6.16 *Tampilan Uji Kembang Horisontal pada Strain Gauge 2.*



Gambar 6.17 *Tampilan Uji Kembang Horisontal pada Strain Gauge 3.*

Tampilan pembacaan kembang vertikal pada layar monitor seperti pada Gambar 6.18, *Canal* 4 pada strain meter P-3500 akan tampak di monitor PC setelah ditekan angka 4 pada *keyboard* PC. *Canal* 4 ini merupakan pembacaan besarnya kembang vertikal pada LVDT.

Gambar 6.18 *Tampilan Uji Kembang Vertikal pada LVDT.*

Selain tampil di monitor PC besarnya nilai kembang vertikal – horisontal mulai *Canal* 1 sampai *Canal* 4, besarnya nilai kembang tersebut dapat juga di lihat pada kotak *dial strain* meter P-3500.

Strain indikator P – 3500 modifikasi digunakan untuk mengukur regangan vertikal dengan LVDT dan regangan horisontal dengan *strain gauge*.

Pembacaan LVDT (*linear vertical displacement tranducer*) pada PC dilakukan berdasarkan referensi kalibrasi LVDT ELE – 1617 seperti pada Lampiran I – 2. Referensi tersebut berdasarkan hasil uji kembang tanah ekspansif, regangan vertikal maksimum dibuat sebesar 2 cm. Alat ini dibuat dengan hitungan: 1 volt = 1 cm atau pembacaan regangan vertikal sesuai dengan besarnya regangan benda uji, ketika mengalami kembang arah vertikal.

Ketelitian alat ini sesuai dengan *Analog Digital Converter* (ADC) yang digunakan sebesar 12 bit atau setara dengan 4095.

$$\frac{Voltase}{Bit} = \frac{20}{4095} = 0{,}004884\ volt = 0{,}005\ volt = 5\ mv,$$

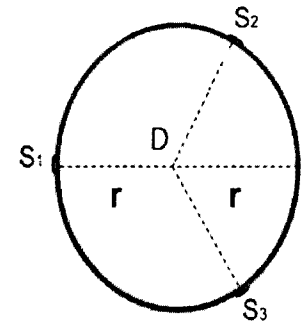
sehingga toleransi pembacaan LVDT sebesar ±0, 003 % dari penambahan ±2.

Pembacaan *strain gauge* FLA 6 – 11 pada PC dilakukan berdasarkan referensi alat digital *strain indicator* P-3500, dengan 1 volt = 1 milli strain.

$$\frac{Voltase}{Bit} = \frac{2}{4095} = 0{,}0004884\ volt = 0{,}0005\ volt = 0{,}5\ mv,$$

sehingga toleransi pembacaan *strain gauge* ±0, 03 % dari penambahan ±2.

Regangan horisontal akibat benda uji pada saat mengalami kembang dihitung dengan hubungan yang diturunkan dari Gambar 6.19.



Gambar 6.19 *Skematik Pemasangan Strain Gauge.*

Dari Gambar 6.19 dihasilkan hubungan untuk menghitung regangan sampel dari *strain gauge* adalah :

$$L_0 = 2\pi\, r = \pi\, D \tag{6.1}$$

$$\Delta L = L_0 \,.\, C \,.\, \varepsilon_{strain\ gauge} \tag{6.2}$$

$$C = \frac{L_0}{L_{Strain\ gauge}} \tag{6.3}$$

dengan

L_0 : panjang sampel awal (mm),
r : jari-jari sampel (mm),
D : diameter sampel (mm),

ΔL : perubahan panjang sampel (mm),
ε : regangan *strain gauge* (μ_s),
C : konstanta.

Dari hubungan 6.3, maka konstanta (C) pada sampel penelitian ini dapat ditentukan, dengan panjang sampel awal = 63,5 mm dan panjang *strain gauge* FLA-6-11= 6 mm, maka :

$L_0 = \pi D = 3{,}14 \times 63{,}5$ mm = 199,39 mm,

$L_{Strain\ gauge} = 6$ mm,

C = 199,39 mm: 6 mm = 33,23, dan konstanta pengukuran kembang horisontal pada penelitian ini adalah sebesar 33,23.

Penggunaan ring membran pada sampel uji kembang vertikal dan horisontal, walaupun dari material yang tipis, ring sampel ini mempunyai kekangan lateral terhadap sampel uji kembang vertikal dan horisontal. Besarnya kekangan lateral terhadap sampel dapat dihitung dengan menggunakan Hubungan.

$$\sigma = E\,\varepsilon \qquad (5.4)$$

dengan,

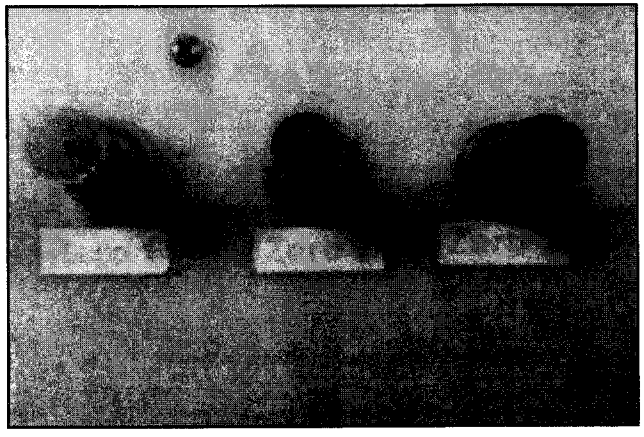
σ : *confining pressure* (kN/m^2)
E : modulus elastisitas ring membran (kN/m^2)
ε : regangan pada *strain gauge* (μs).

Hasil perhitungan tegangan kekang ring sampel dari material membran, seperti pada Tabel 6.11.

Nilai *confining pressure* pada ring sampel dari membran lateks sangat kecil, sehingga nilai *confining pressure* tersebut dapat diabaikan (Suhendro, 2000). Pada saat uji kembang vertikal dan horisontal nilai *confining pressure ring* sampel dari membran lateks dapat di-nolkan dengan tombol *zero* yang ada pada *Analog Digital Converter* (ADC) seperti pada Gambar 6.20, tombol merah untuk *strain gauge* 1, tombol hijau untuk *strain gauge* 2 dan tombol kuning untuk *strain gauge* 3. Sehingga pembacaan regangan kembang horisontal dapat dimulai dari nilai 0 (nol).

Tabel 6.11 *Nilai Confining Pressure Ring Sampel dari Material Membran*

No.	Sucharge (kN/m^2)	Strain Gauge				Con ning Pressure (kN/m^2)
		S_1 (μs)	S_2 (μs)	S_3 (μs)	S_{Rerata} (μs)	
1	6,9	7	5	6	6	14,46
2	16,9	10	8	9	9	21,69
3	26,9	12	10	11	11	26,51
4	36,9	14	12	13	13	31,33
5	46,9	16	14	15	15	36,15



Gambar 6.20 *Tombol Zero pada ADC.*

Sebanyak 20 uji awal dilakukan untuk mengetahui perilaku alat uji swelling vertikal – horisontal (VH) dan keandalan sistem akuisi data. Uji kembang vertikal dan horisontal dilakukan pada tanah Soko (Ngawi) yang dipadatkan dengan berat volume kering γ_d = 12,60 kN/m^3 dan kadar air awal (w_i) 10 %. Uji kembang vertikal dan horisontal diberikan variasi penambahan beban (*surcharge*) sebesar 6,9 kPa, 16,9 kPa, 26,9 kPa, 36, 9 kPa dan 46,9 kPa.

Resume hasil uji kembang vertikal dan horisontal dengan alat swelling VH seperti pada Tabel 6.12.

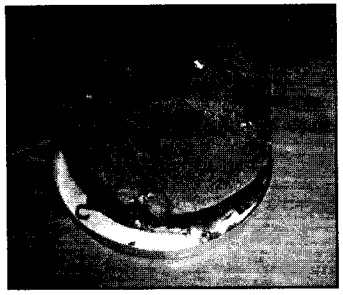
Tabel 6.12 *Resume Hasil Uji Kembang Tanah Soko (Ngawi) pada Variasi Penambahan Beban (Sucharge)*

No	Variasi uji	Suchrage (kPa)	Regangan Vertikal ε_z (%)	Regangan horisontal ε_x (%)
1	Uji 1	6,9	20,12	9,95
2	Uji 2	16,9	17,06	8,98
3	Uji 3	26,9	14,90	4,71
4	Uji 4	36,9	9,69	2,67
5	Uji 5	46,9	6,24	1,22

Pola retakan benda uji setelah mengalami kembang vertikal dan horisontal adalah volumetrik. Gambar 6.21 sampai Gambar 6.25 merupakan pola retakan hasil uji awal kembang vertikal dan horisontal.

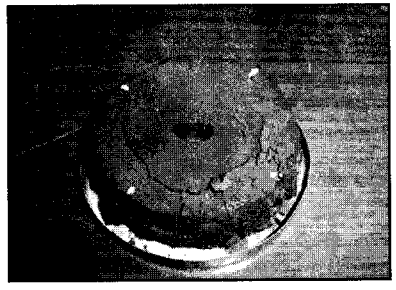
Gambar 6.21 *Pola Benda Uji Setelah Uji Kembang Vertikal dan Horisontal dengan Surchrage 6,9 kPa.*

Gambar 6.22 *Pola Benda Uji Setelah Uji Kembang Vertikal dan Horisontal dengan Surchrage 16,9 kPa.*



Gambar 6.23 *Pola Benda Uji Setelah Uji Kembang Vertikal dan Horisontal dengan Surchrage 26,9 kPa.*

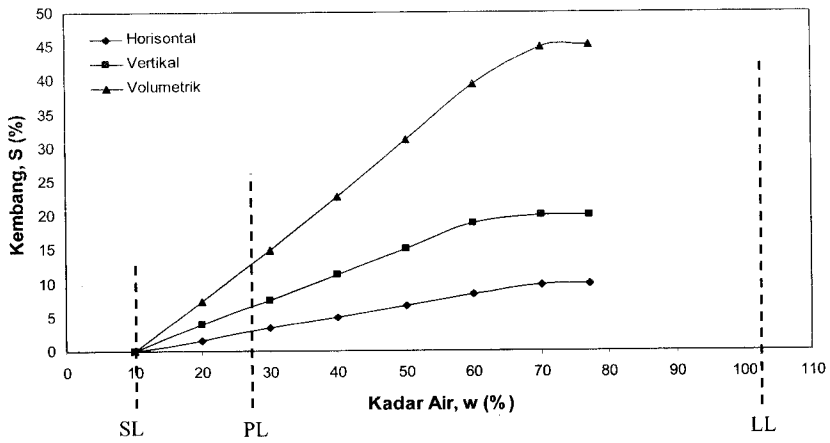
Gambar 6.24 *Pola Benda Uji Setelah Uji Kembang Vertikal dan Horisontal dengan Surchrage 36,9 kPa.*



Gambar 6.25 *Pola benda Uji Setelah Uji Kembang Vertikal dan Horisontal dengan Surchrage 46, 9 kPa.*

Dari Gambar 6.21 sampai Gambar 6.25 memperlihatkan bahwa semakin besar kembang yang terjadi maka pola keretakan pada benda uji juga semakin besar, dan semakin besar penambahan beban yang diterapkan, maka semakin kecil keretakan yang terjadi pada benda uji atau besarnya kembang yang terjadi semakin kecil.

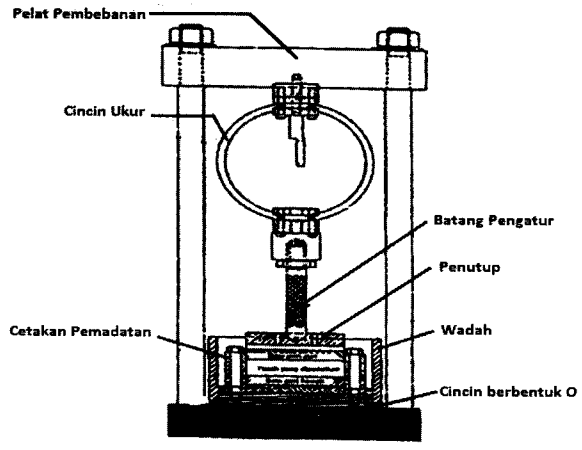
Alat Oedometer modifikasi telah digunakan untuk mengukur *swelling* vertikal – horisontal (VH) tanah lempung Soko (Ngawi). Uji kembang dilaksanakan pada sampel tanah lempung Soko (Ngawi) yang dipadatkan dengan berat volume kering $\gamma_d = 1,26$ gram/cm^3 dan kadar air awal (W_i) 10 %. Hasil uji tersebut seperti pada Gambar 6.26.



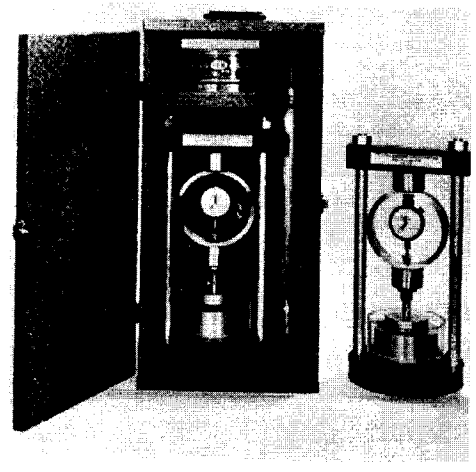
Gambar 6.26 *Hubungan Kadar Air dengan Kembang Vertikal, Horisontal dan Volumetrik Tanah Soko (Ngawi) (Sudjianto, 2012).*

6.2.3 Potensi Perubahan Volume (PVC)

Potensi perubahan volume atau disebut juga potential volume change (PVC) diukur dengan menggunakan PVC meter. Skema alat PVC meter seperti pada Gambar 6.27, sedangkan bentuk alat PVC meter seperti pada Gambar 6.28. Pengujian ini dilakukan dengan cara menempatkan contoh tananh terganggu pada cetakan pemadatan. Selanjutnya contoh tanah dipadatkan dengan usaha pemadatan dengan metode modified Proctor sebesar kadar air alami lapangan. Contoh tanah dijenuhkan dan dibiarkan mengembang hingga menekan cincin ukur. Besarnya tekanan pada cincin ukur dinyatakan sebagai indeks pengembangan dan nilainya dikorelasikan dengan nilai perubahan volume potensial dengan menggunakan grafik Gambar 6.29.

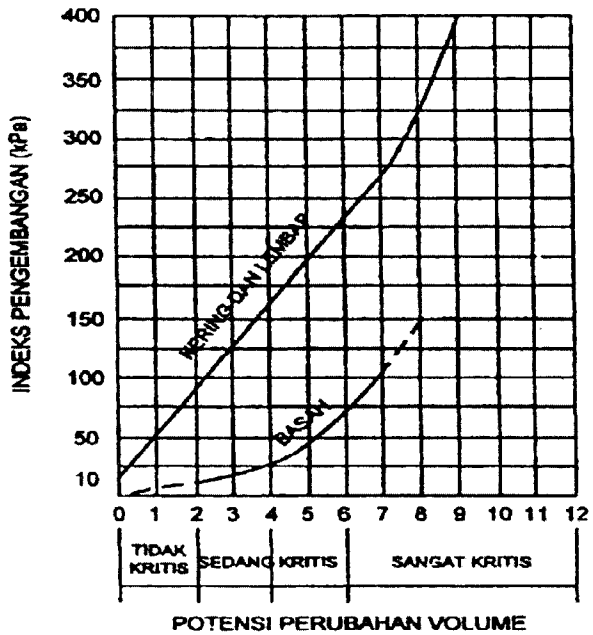


Gambar 6.27 *Alat Uji PVC (Nelson dan Miller, 1992).*



Gambar 6.28 *Alat PVC Meter.*

Pengujian ini memberikan keuntungan karena sederhana dan telah distandardisasikan. Meskipun demikian, pegujian ini menggunakan contoh tanah terganggu sehingga nilai perubahan volume potensial dan indeks pengembangan ini lebih sesuai jika digunakan dalam identifikasi dan bukan sebagai parameter desain.



Gambar 6.29 *Indeks Pengembangan terhadap Potensi Perubahan Volume (Lambe, 1960).*

6.2.4 Indeks Pengembangan

Uji indeks pengembangan (Expansion Index test) ini juga telah distandarisasi, menggunakan standar ASTM D-3829 adalah uji beban standar pengembangan tanah. Pada pengujian, contoh tanah dibentuk pada diameter standar 102 mm, tingginya (tinggi cincin besi) 25 mm dan dengan derajat kejenuhan S_r = 50%, gambar alat uji indeks pengembangan seperti pada Gambar 6.30. Pelaksanaan uji ini dengan menerapkan beban terbagi rata 6, 9 kPa, kemudian tanah dijenuhkan dengan dibiarkan mengembang sampai

nilai pengembangan tertentu atau sampai 24 jam (dipilih, mana dulu yang tercapai). Jumlah pengembangan dinyatakan dalam indeks pengembangan, EI (Ekspansion Index), yang didefinisikan oleh persamaan :

$$EI = 1000 \times \Delta H \times F \qquad (6.5)$$

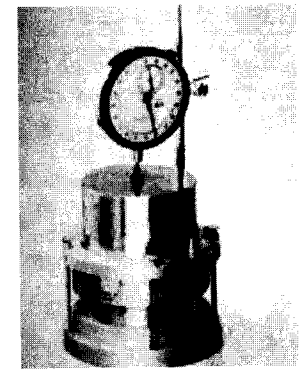
Dengan,

EI = indeks ekspansi,
ΔH = pengembangan contoh tanah (in),
F = persentasi berat butiran tanah yang lolos saringan no.4.

Potensi pengembangan tanah juga telah dikelompokan berdasarkan hasil uji EI yang disarankan oleh Uniform Building Code (1991) seperti pada Tabel 6.13. Nilai indeks pengembangan digunakan untuk menentukan potensi pengembagan tanah ekspansif, dengan kategori potensi pengembangan mulai dari sangat rendah hingga sangat tinggi.

Tabel 6.13 *interpretasi Hasil Uji EI (Uniform Building Code, 1991)*

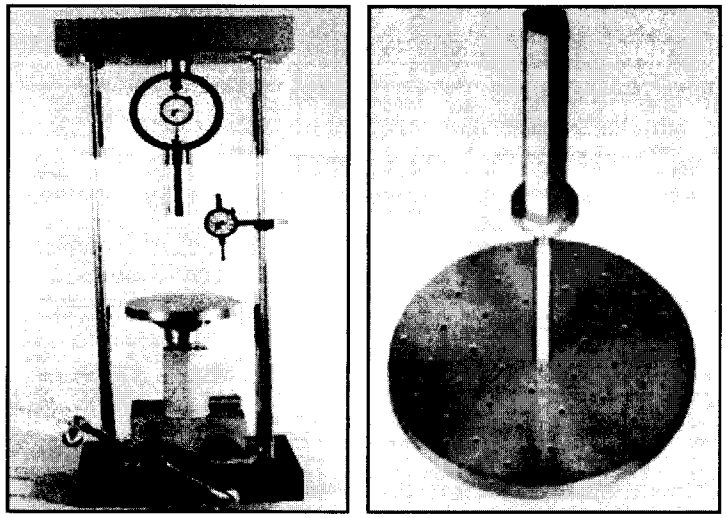
Indeks Pengembangan	Potensi Pengembangan
0-20	Sangat rendah
21-50	Rendah
51-90	Sedang
91-130	Tinggi
130	Sanggat tinggi



Gambar 6.30 *Alat Uji Indeks Pengembangan.*

6.2.4 California Bearing Ratio (CBR)

California Bearing Ratio (CBR) banyak digunakan untuk perencanaan jalan raya seperti yang direkomendasikan oleh Nelson dan Miller(1992). Alat iji California Bearing Ratio(CBR) yang digunakan untuk mengukur pengembangan tanah lempung ekspansif seperti pada Gambar6.31a. Pengembangan vertikal diukur dari tekanan penetrasi (Gambar 6.31b). Contoh tanah dimasukkan dalam silinder CBR dan dipadatkan, selanjutnya contoh tanah tersebut direndam air selama beberapa hari, kemudiansampel tanah dibuat dalam kondisi drained yang selanjutnya di penetrasi.

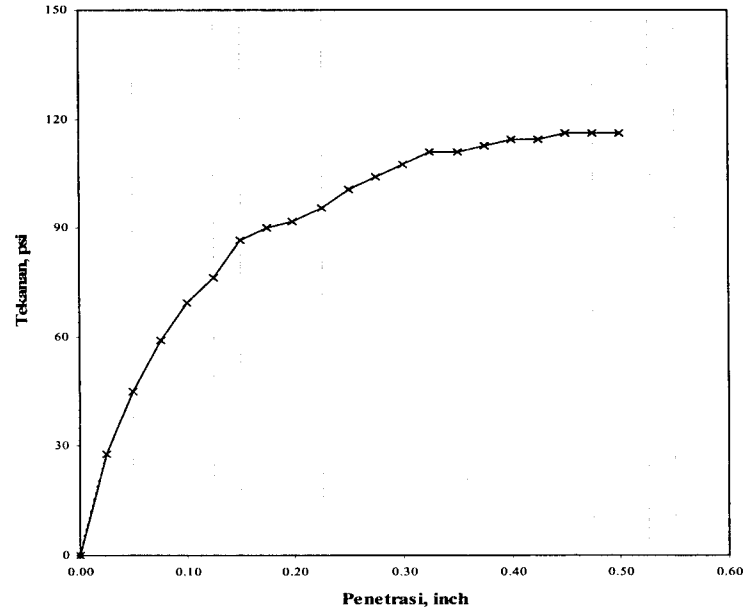


(a) (b)

Gambar 6.31 *(a) Alat CBR (b) Alat Penetrasi Pengembangan.*

Uji pengembangan tanah lempung ekspansif dengan alat CBR menggunakan prosedur ASTM D 1883-99. Pengembangan yang terjadi dinyatakan dalam persen yaitu perbandingan antara jumlah tinggi pengembangan tanah ekspansif dibagi tinggi awal contoh tanah lempung ekspansif dikalikan dengan nilai 100%.

Sudjianto (2007) melakukan uji CBR tanah lempung ekspansif dari perumahan Citra Land Surabaya, hasil uji tersebut seperti pada Gambar 6.32.

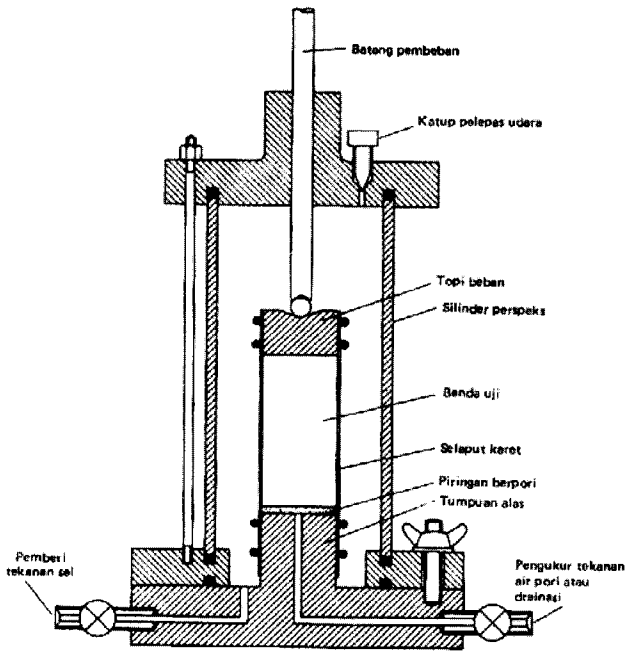


Gambar 6.32 *Hubungan Penetrasi dengan Tekanan Tanah Lempung Ekspansif Citra Land Surabaya (Sudjianto, 2006).*

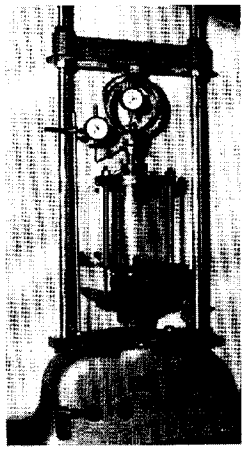
6.2.5 Alat Triaksial

Potensi Pengembangan tanah lempung ekspansif dapat di ukur dengan alat triaksial, skematik alat triaksial seperti pada Gambar 6.33. Bentuk alat lengkap seperti pada Gambar 6.34 dan Gambar 6.35.

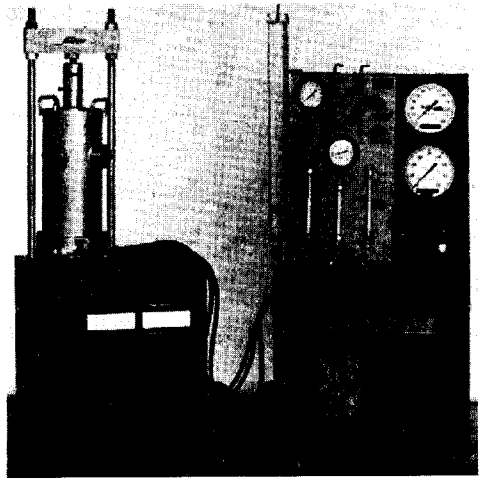
Al-Shamrani dan Mhaidib (2000) melakukan uji kembang vertikal tanah lempung ekspansif dari Al-Ghatt, Riyadh (Saudi Arabia) dengan menggunakan alat triaksial. Hasil uji kembang vertikal tanah ekspansif tersebut seperti pada Gambar 6.36.



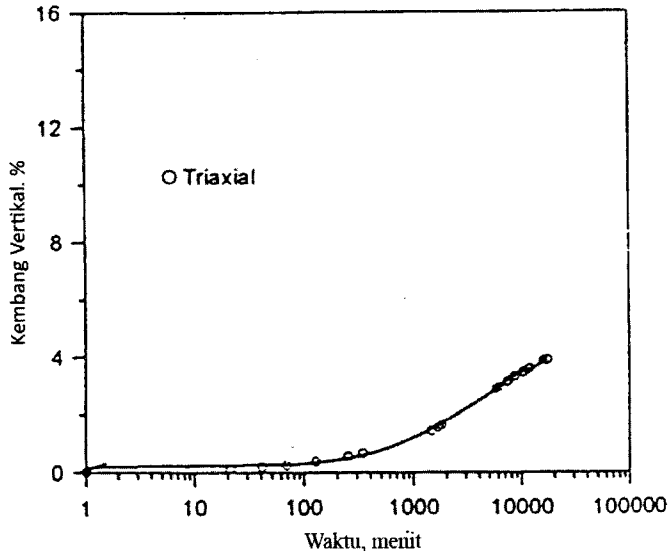
Gambar 6.33 *Skema Alat Triaksial.*



Gambar 6.34 *Alat Triaksial.*



Gambar 6.35 *Alat Triaksial.*



Gambar 6.36 *Hubungan Waktu dengan Kembang Vertikal (Al-shamrani dan Maidib, 2000).*

6.3 UJI KEMBANG BEBAS (FREE SWELLING TEST)

Uji kembang bebas (free swelling test) yang dikenalkan oleh U.S Water and Resources Service (Holtz dan Gibbs, 1956) dilakukan dengan cara menabur tanah lempung ekspansif secara perlahan-lahan sebanyak 10 cm^3 kedalam tabung gelas ukur yang berisi air 100 cm^3, tanah yang ditaburkan tersebut adalah tanah kering dengan ukuran butir lolos saringan 40, dan diamati volume saat keseimbangan telah terjadi.

Dengan semakin banyaknya permasalahan tanah ekspansif di lapangan, maka para peneliti telah mengembangkan alat untuk mengukur kembang bebas tanah ekspansif, diantaranya menggunakan jangka sorong dan alat Oedometer yang dimodifikasi.

6.3.1 Jangka Sorong (galiper)

Hange (2008), Sudjianto (2012), Castro (2013) dan Loca (2014) melakukan uji kembang bebas (free swelling) dengan jangka sorong seperti pada Gambar 6.37. Sehingga pada saat pengukuran swelling dapat dilakukan pada arah vertikal dan horisontal, sedangkan arah volumetrik dihitung dengan Persamaan 6.8. Besarnya swelling bebas untuk masing-masing arah dihitung dengan persamaan berikut ini.

Hasil uji swellingarah vertikal di hitung dengan hubungan :

$$= \frac{tinggi\ akhir - tinggi\ awal}{tinggi\ awal} x100\% = \frac{\Delta H}{H} x100\%. \qquad (6.6)$$

Hasil uji swelling arah horisontal dihitung dengan hubungan :

$$= \frac{diameter\ akhir - diameter\ awal}{diameter\ awal} x100\% = \frac{\Delta D}{D} x100\% \qquad (6.7)$$

Perhitungan swelling arah volumetrik dengan hubungan :

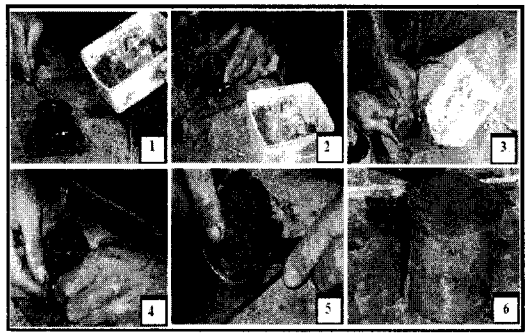
$$= \frac{volume\ akhir - volume\ awal}{volume\ awal} x100\% = \frac{\Delta V}{V} x100\% \qquad (6.8)$$

Gambar 5.37 *Alat Jangka Sorong Digital.*

Faktor penting dalam uji kembang bebas dengan jangka sorong adalah pembuatan benda uji. Benda uji harus ramping agar jangka sorong dapat digunakan untuk mengukur regangan arah vertikal dan horisontal yang terjadi. Benda uji dicetak dengan cetakan sampel seperti pada Gambar 6.38.

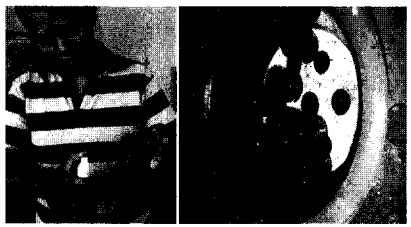
Gambar 5.38 *Cetakan Tanah untuk Uji Kembang Volumetrik.*

Pembuatan sampel tanah untuk pengujian kembang bebas dengan menentukan berat tanah yang akan dipadatkan dalam cetakan dengan mengacu pada data kepadatan Proctor standar (γ_{dmax}) dikali dengan volume cetakan, dan tanah yang sudah ditimbang ditambah dengan air sesuai dengan kadar air rancangan dan dipadatkan dalam cetakan. Proses pembuatan benda uji free swelling seperti pada Gambar 6.39.

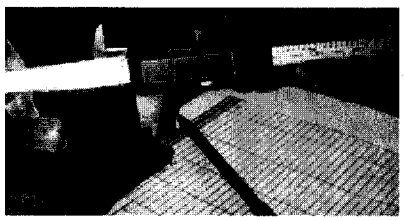


Gambar 6.39 *Pembuatan Benda Uji Kembang Volumetrik.*

Sampel yang sudah dicetak dimasukkan ke dalam desikator dan tiap 24 jam ditambahkan air 5% seperti pada Gambar 6.40, kemudian sampel tanah diukur regangan vertikal dan horisontal dengan jangka sorong digital seperti pada Gambar 6.41 Uji free swelling dihentikan sampai sampel tanah tidak mengembang lagi.



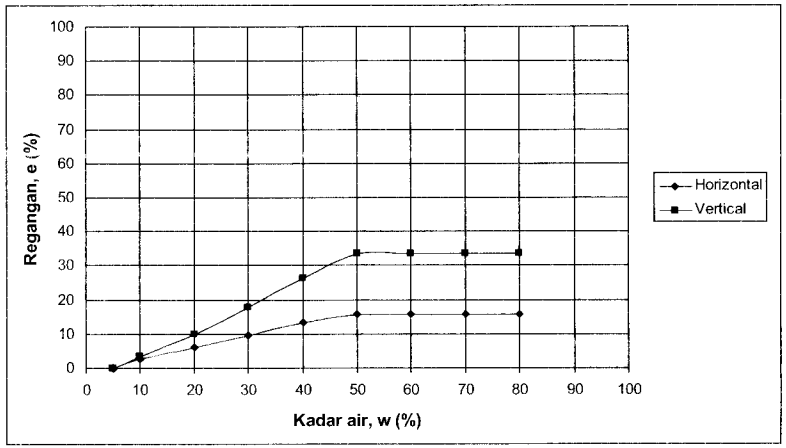
Gambar 6.40 *Penambahan Kadar Air 5% Tiap 24 jam.*



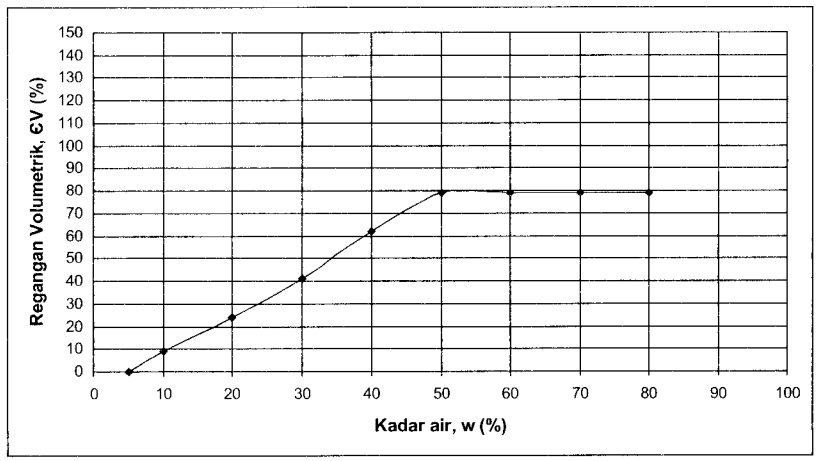
Gambar 6.41 *Proses Pengukuran Kembang Volumetrik.*

Contoh hasil uji kembang bebas (*free swelling*) tanah lempung arah vertikal dan horisontal (VH) tanah lempung Soko (Ngawi) yang dilakukan

dengan jangka sorong digital (Sudjianto, 2012) seperti pada Gambar 6.42. hasil tersebut kemudian dihitung dengan persamaan kembang volumetrik (Persamaan 5.8) seperti pada Gambar 6.43.



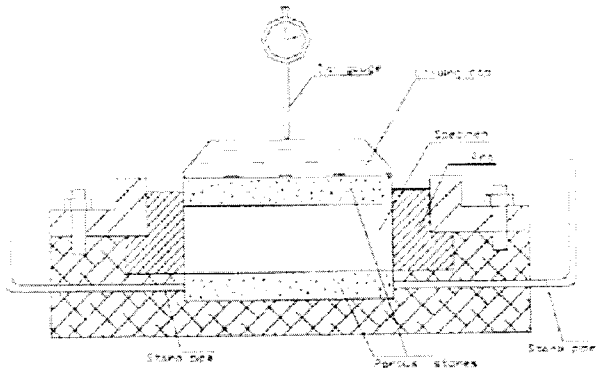
Gambar 6.42 *Hubungan Kadar Air dengan Regangan Vertikal dan Horisontal Tanah Lempung Soko – Ngawi (Sudjianto, 2012).*



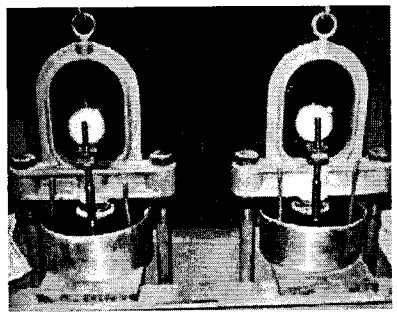
Gambar 6.43 *Hubungan Kadar Air dengan Regangan Volumetrik Tanah Lempung Soko – Ngawi (Sudjianto, 2012).*

6.3.2 Oedometer Modifikasi

Ipek (1998) merancang alat Oedometer yang dimodifikasi untuk mengukur kembang bebas tanah ekspansif. Skematik alat seperti pada Gambar 6.44 dan gambar alat Oedometer modifikasi seperti pada Gambar 6.45.



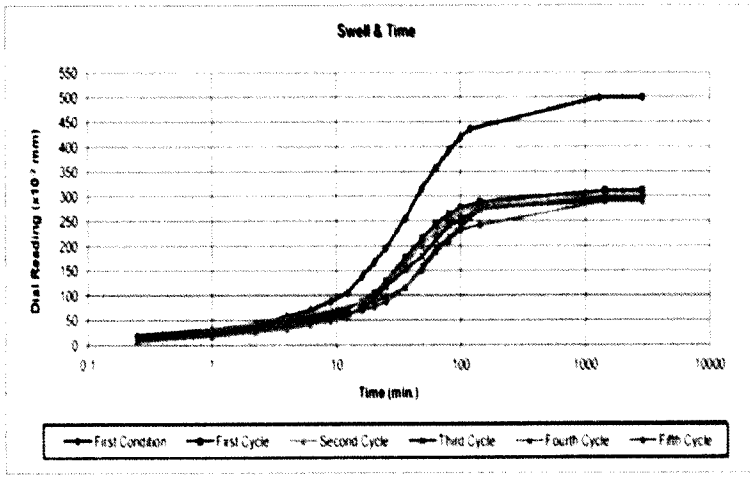
Gambar 6.44 *Skematik Oedometer Modifikasi (Ipek, 1998).*



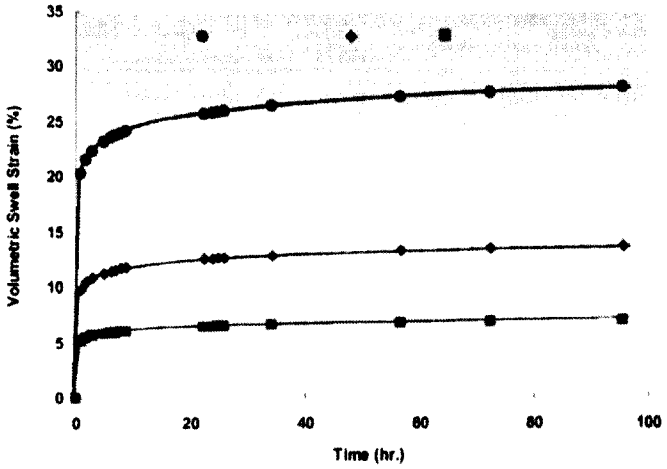
Gambar 6.45 *Oedometer Modifikasi untuk Uji Kembang Bebas (Ipek, 1998).*

Mehmet (2012) menggunakan Oedometer modifikasi untuk mengguji kembang bebas tanah ekspansif. Uji kembang bebas dilakukan dengan mengacu pada ASTM D-4546. Sampel tanah yang diuji adalah lempung kaolinite 85% + bentonite 15%, pengujian kembang bebas dilakukan dengan memberikan siklus pembasahan dan pengeringan sebanyak 5 siklus. Hasil uji kembang bebas seperti pada Gambar 6.46. Sedangkan Chittori (2013)

melakukan uji kembang bebas pada 5 tanah ekspansif dariFortWorth, San Antonio, Paris, Houston dan El paso seperti pada Gambar 6.47.



Gambar 6.46 *Hungan Waktu dengan Kembang Vertikal dan Kembang Volumetrik pada Siklus Pembasahan (Mehmet, 2012)*



Gambar 6.47 *Hubungan Waktu dengan Kembang Volumetrik pada Uji Kembang Bebas (Chittori, 2013)*

6.4 UJI TEKANAN PENGEMBANGAN (SWELLING PRESSURE TEST)

Tekanan yang terjadi ke tanah lempung ekspansif mempengaruhi pengembangan tanah. Tekanan pengembangan yang mencegah tanah mengembang disebut tekanan pengembangan. Bebeapa alat uji tekanan pengembangan didesain dan dibuat metode pengukurannya untuk mengukur tekanan pengembangan tanah lempung ekspansif.

Alat yang digunakan untuk mengukur tekanan pengembangan di laboratorium diantaranya: oedometer, geonor, PVC meter dan alat ukur suction. Sedangkan intuk metode pengukuran tekanan pengembangan, menurut Iyer (1987) dan Sapaz (2004) ada 4 cara, yaitu: uji kembang bebas, uji volume tetap, uji kembang dengan beban dan uji tegangan air pori negatip.

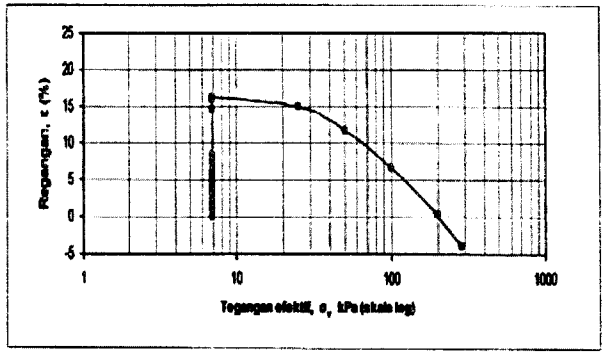
6.4.1 Alat Oedometer

Alat oedometer selain digunakan untuk mengukur pengembangan tanah lempung ekspansif, dapat digunakan untuk mengukur tekanan pengembangan. Ada 3 metode yang dapat diterapkan untuk mengukur tekanan pengembangan, dengan alat oedometer, yaitu: uji kembang bebas, uji volume tetap, uji kembang dengan beban (Sapaz, 2004).

Pengukuran tekanan pengembangan mengacu pada standar ASTM 2435-96 metode B (*Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils*). Uji teknanan pengembangan ini dilakukan setelah uji pengembangan selesai, kemudian dilakukan uji konsolidasi untuk mendapatkan tekanan pengembangan. Penambahan beban dilakukan dengan LIR = 1, dengan penambahan beban 10 kPa, 20 kPa, 40 kpa, 80 kPa, 160 kPa, 320, kPa, 640 kPa dan 1280 kPa (tekanan efektip 6,9 kPa tetap dipertahankan) atau berakhir hingga penurunan kembali pada tinggi awal sampel.

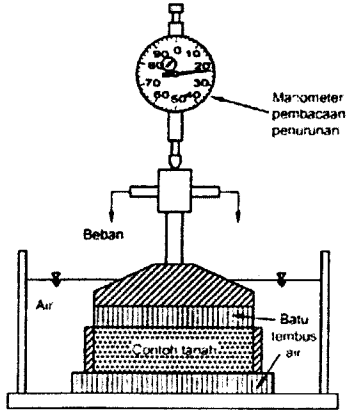
Sudjianto (2012) melakukan uji pengembangan dan konsolidasi dengan alat oedometer pada tanah lempung Soko (Ngawi) dengan kadar air awal 32, 00%, seperti pada Gambar 6.48. Hasil pada Gambar 6.48 tersebut

menghasilkan tekanan pengembangan sebesar 579 kPa dengan perubahan volume sebesar 5, 05 cm^3.

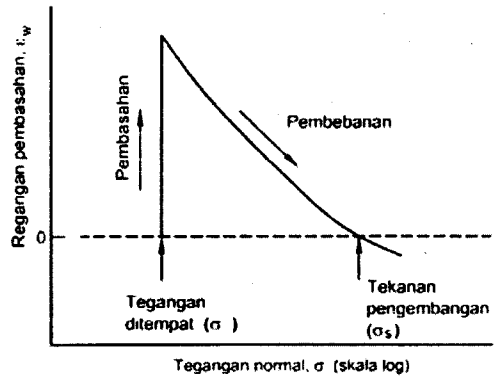


Gambar 6.48 *Hubungan Tekanan Efektif dengan Regangan pada Uji Pengembangan dan Konsolidasi Tanah Soko, Ngawi (Sudjianto, 2012).*

Coduto (1994) merancang alat Oedometer yang digunakan untuk mengukur pengembangan dan tekanan pengembangan, seperti pada Gambar 6.49 Uji beban dilakukan dengan mengukur pengembangan pada akhir pembebanan dari uji pengembangan dengan melepaskan beban secara perlahan-lahan sampai kembali ke volumenya semula. Hasil uji tersebut seperti ditunjukkan dalam Gambar 6.50.

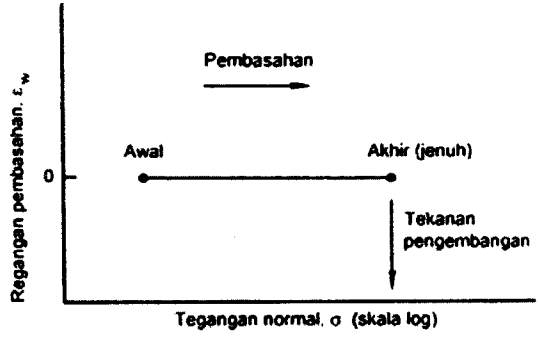


Gambar 6.49 *Alat Oedometer Desain Coduto (1994).*



Gambar 6.50 *Metode Pengukuran Tekanan Pengembangan dengan Pelepasan Beban pada Akhir Pembebenan Uji Pengembangan (Coduto, 1994).*

Metoda yang lain dari Coduto (1994), yaitu dengan menggunakan alat konsolidometer yang mencegah terjadinya regangan vertikal, seperti pada Gambar 6.51. Dari kedua metode tersebut, metoda pertama (Gambar 6.50) cenderung menghasilkan tekanan pengembangan lebih tinggi. Akan tetapi, tidak satupun dari keduanya yang menggambarkan secara persis urutan aktual pembebanan dan pembasahan di lapangan.



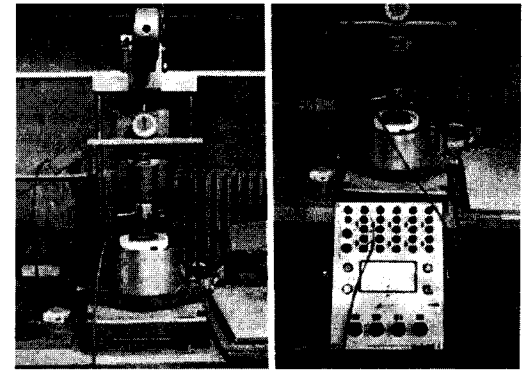
Gambar 6.51 *Metode Pengukuran Tekanan Pengembangan dengan Konsolidometer tanpa Regangan (Coduto, 1994).*

Chen (1988) dan beberapa peneliti berpendapat bahwa tekanan pengembangan tidak bergantung pada kadar air awal, derajat kejenuhan

awal, tingkat ketebalan tanah, dan bervariasi hanya dengan berat volume kering dan oleh karena itu hal ini merupakan fundamental sifat-sifat fisik tanah ekspansif (Chen, 1988). Namun, peneliti yang laintidak setuju dengan evaluasi ini dan mengklaim bahwa hal itu bervariasi.

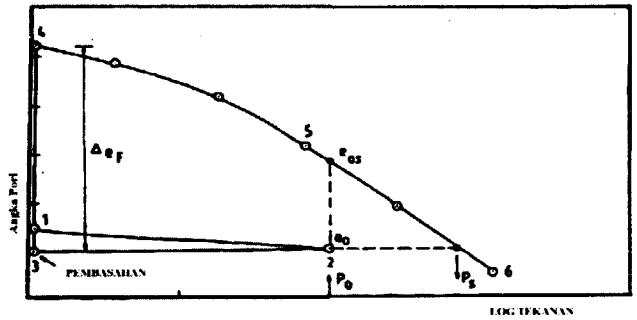
Untuk contoh tanah asli, Chen (1988) mendefinisikan tekanan pengembangan sebagai tekanan yang dibutuhkan untuk mencegah tanah yang mengembang pada berat volume kering ditempat. Untuk tanah dibentuk kembali (remolded) pada 100% kepadatan relatif, tekanan pengembangan adalah tekanan yang dibutuhkan untuk memelihara berat volume kering tersebut.

Sapaz (2004) memodifikasi alat Oedometer yang digunakan untuk mengukur tekanan pengembangan tanah ekspansif. Alat ini dapat digunakan untuk mengukur tekanan pengembangan arah vertikal maupun horisontal. Alat oedometer yang dimodifikasi oleh Sapaz (2004) seperti pada Gambar 6.52.

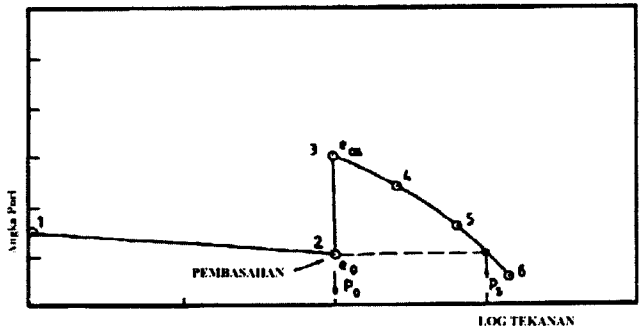


Gambar 6.52 *Alat Oedometer Modifikasi (Sapaz, 2004).*

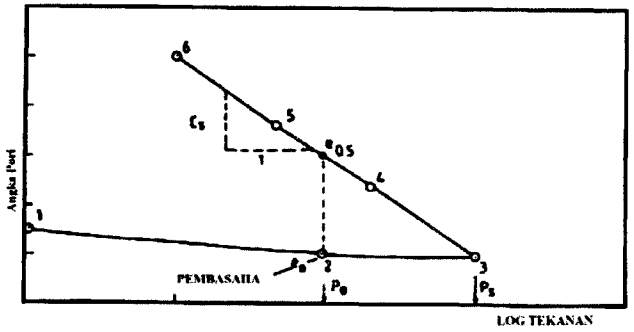
Konsep pengujian tekanan pengembangan didasarkan oleh model tekanan pengembangan yang dilakukan oleh Erol (1987). Ada 3 metode pengukuran tekanan pengembangan yang disarankan, yaitu: kembang bebas (free swelling) dengan konsep seperti pada Gambar 6.53, swell overburden dengan konsep seperti pada Gambar 6.54 dan kembang volume konstan (CVS) dengan konsep seperti pada Gambar 6.55.



Gambar 6.53 *Metode Pengukuran Tekanan Kembang Model Kembang Bebas (Erol, 1987).*

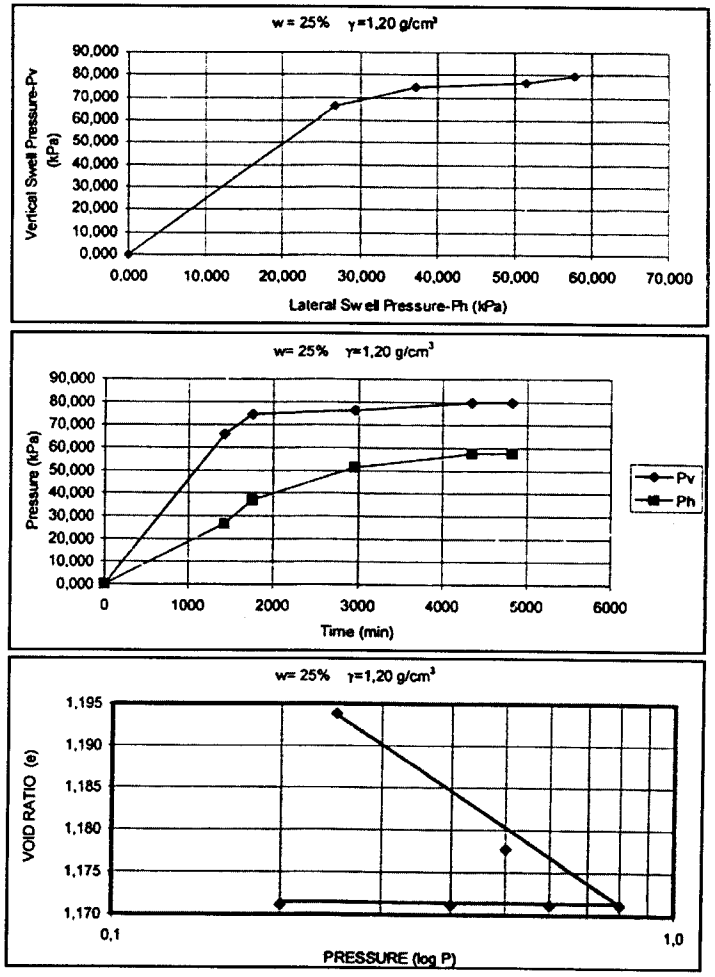


Gambar 6.54 *Metode Pengukuran Tekanan Kembang Model Kembang Overburden (Erol, 1987).*



Gambar 6.55 *Metode Pengukuran Tekanan Kembang Model Kembang Volume Tetap (Erol, 1987).*

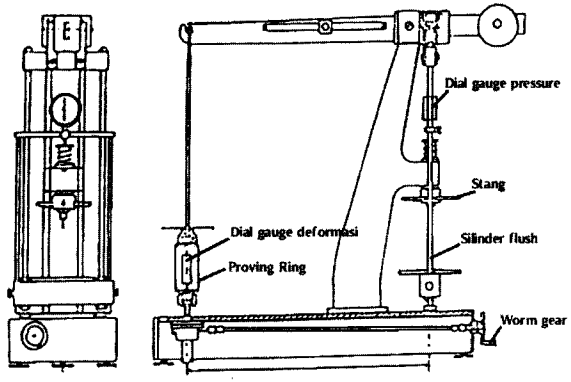
Alat Oedometer modifikasi desain sapaz (2004) digunakan untuk mengukur tekanan kembang (swelling pressure) vertikal dan horisontal tanah lempung ekspansif dari Ankara Metro Line Construction Stasiun D29. Uji dilakukan dengan kadar air awal (w_i) sebesar 25% dan kepadatan (γ_d) sebesar 1,20 gr/cm³. Hasil uji seperti pada Gambar 6.56.



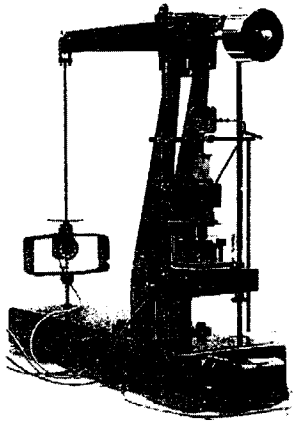
Gambar 5.56 *Hubungan Tekanan Kembang Vertikal dengan Tekanan Kembang Horisontal, Hubungan Tekanan Kembang Vertikal-Horisontal dengan Waktu dan Hubungan Tekanan dengan Angka Pori.*

6.4.2 Alat Geonor

Alat geonor merupakan salah satu alat untuk mengukur tekanan pengembangan dengan metode kembang volume konstan (CVS). Alat ini dapat dioperasikan secara elektrik atau manual. Alat ini terdiri dari rangka yang berlengan dengan perbandingan 1: 10 dan dilengkapi dengan proving ring yang berkapasitas ukur hingga 200 kg yang berbentuk persegi empat, serta dilengkapi 2 buah stop watch. Skematik alat Geonor seperti pada Gambar 6.57 dan bentuk alat lengkap seperti pada Gambar 6.58.

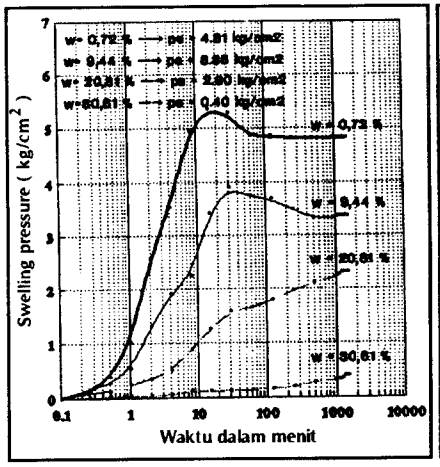


Gambar 6.57 *Skema Alat Geonor.*

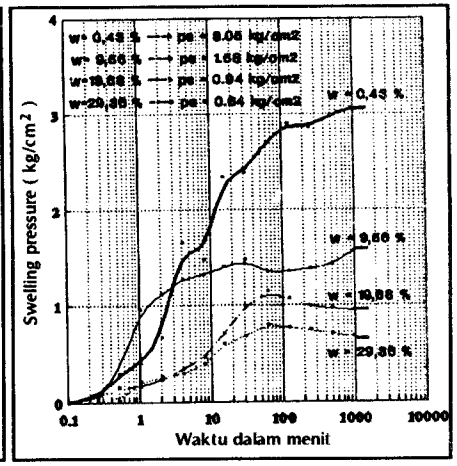


Gambar 6.58 *Alat Geonor.*

Hasil uji tekanan pengembangan menghasilkan hubungan antara waktu terhadap tekanan pengembangan, seperti yang dilakukan oleh Supriyono (1993) terhadap tanah lempung ekspansif dari Balongan (Indramayu) dengan variasi kadar air awal (w) 0,97%, 9, 44%, 20,81 dan 36,81% dan tanah lempung ekspansif dari Kali Bawang (Jogjakarta) dengan variasi kadar air awal (w) 0,97%, 9, 44%, 20,81 dan 36,81%, seperti pada Gambar 6.59 dan Gambar 6.60.



Gambar 6.59 *Hubungan Waktu terhadap Tekanan Pengembangan Tanah Balongan, Indramayu (Supriyono, 1993).*



Gambar 6.60 *Hubungan Waktu Terhadap Tekanan Pengembangan Tanah Kalibawang, Jogjakarta (Supriyono, 1993).*

6.5 UJI PENYUSUTAN

Penyusutan (*shrinkage*) tanah ekspansif akibat perubahan kadar air tidak sekompleks pengembangan (*swelling*) tanah, sehingga uji penyusutan (*shrinkage test*) belum begitu banyak riset dan inovasi yang dikembangkan dibandingkan dengan uji pengembangan (*swelling test*).

Secara umum uji penyusutan yang cukup lengkap adalah uji penyusutan tanah yang direkomendasikan oleh ASTM. Dengan ASTM D427-98, telah dijabarkan uji batas susut dan faktor-faktor susut tanah yang meliputi batas susut, angka susut, susut volumetrik dan susut linier. Untuk pemba-

hasan batas susut, telah dijelaskan di BAB III buku ini dibagian identifikasi tanah ekspansif secara tidak langsung, sehingga dibagian uji penyusutan ini yang dibahas meliputi: angka susut, susut volumetrik dan susut linear.

6.5.1 Angka susut (shrinkage ratio, S_R).

Hasil uji batas susut yang dilakukan dengan standar ASTM D427-98 dengan menggunakan air raksa seperti pada Gambar 6.61, selain didapatkan nilai batas susut (shrinkage limit) dapat ditentukan juga nilai angka susut.

Gambar 6.61 *Uji Batas Susut dengan Air Raksa (Mehmet, 2012)*

Angka susut suatu tanah adalah nilai perbandingan antara persentase perubahan volume tanah terhadap volume kering dengan perubahan kadar air yang terjadi terhadap tanah (dalam persen) dan berlaku pada keadaan di atas batas susut tanah seperti pada Persamaan 6.17

$$S_R = [(\Delta V/V_o)/\Delta w] \quad (6.9)$$

($\Delta V/V_o$ dalam persen dan juga dalam persen).

Besarnya S_R dapat dihitung sebagai berikut,

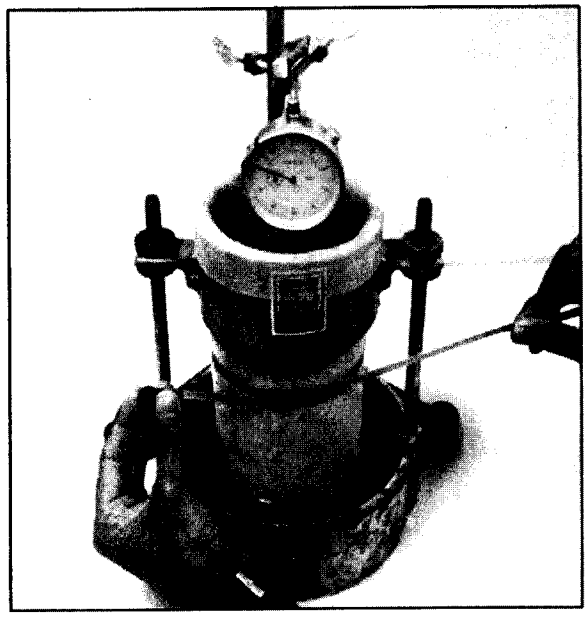
$$S_R = M_o/V_o \quad (6.10)$$

dengan

M_o : massa benda uji setelah kering,
V_o : volume benda uji setelah dikeringkan.

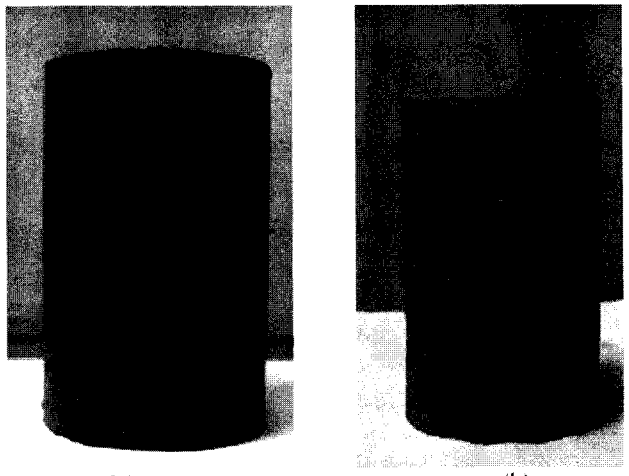
6.5.2 Susut volumetrik (volumetric shrinkage, V_S)

Penyusutan tanah ekspansif yang terjadi secara volumetrik (3D) dapat diukur juga dari uji batas susut. Puppala dkk (2004) mengembangkan alat untuk mengukur penyusutan volumetrik dengan silinder pemadatan, seperti pada Gambar 6.62.



Gambar 6.62 *Alat Uji Penyusutan Volumetrik (Puppala, dkk, 2004).*

Silinder untuk uji penyusutan volumetrik memilikki dimensi dengan tinggi 12,7 cm dan berdiameter 5,7 cm. Sampel tanah yang dimasukkan dalam silinder tersebut kemudian dipanaskan dalam suhu ruangan selama 12 jam kemudian dipindahkan ke dalam oven dengan suhu 105°C. Penambahan susut arah vertikal dan diameter diukur dengan alat digital. Hasil uji susut volumetrik tersebut, akan terlihat terjadi penyusutan tanah sebelum dioven dan setelah dioven seperti pada Gambar 6.63.



(a) (b)

Gambar 6.63 *Sampel Uji Susut Volumetrik (a) sebelum Dioven (b) setelah Dioven (Chittori, 2013).*

Susut volumetrik tanah adalah persentase pengurangan volume tanah terhadap volume kering tanah apabila tanah pada suatu kadar air (dalam persen) tertentu berkurang menjadi pada batas susut tanah.

Dengan rumus

$$V_s = [(V_1 - V_o)/V_o] \times 100 \quad (6.11)$$

Besarnya V_s dapat dihitung sebagai berikut,

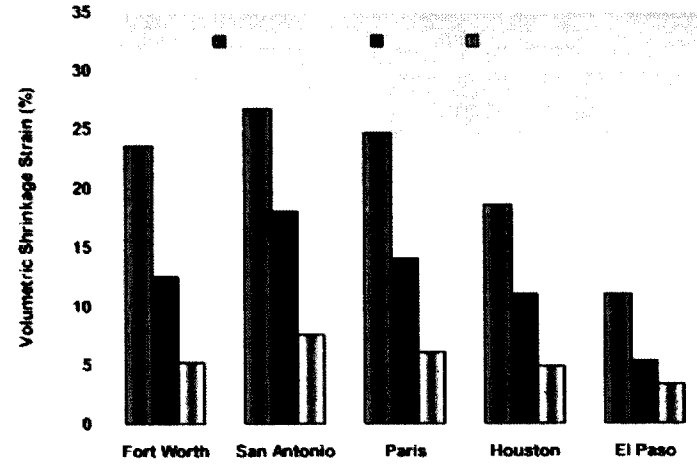
$$V_s = (W_1 - S_L)/S_R \quad (6.12)$$

dengan

w_1 : kadar air tanah pada keadaan tertentu,
S_L : batas susut tanah,
S_R : angka susut.

Chittori (2013) melakukan uji susut volumetrik pada 5 jenis tanah ekspansif yaitu: tanah FortWorth, tanah San Antonio, tanah Paris, tanah Houston dan tanah El paso dengan menggunakan alat uji susut pada kondisi kadar air optimum (OMC), kadar air basah (wetof OMC) dan kondisi

kadar air kering (dry of OMC) seperti pada Gambar 6.62, hasil uji tersebut dibuat dalam grafik batang seperti pada Gambar 6.64.



Gambar 6.64 *Hasil Uji Susut Volumetrik Tanah di 5 Lokasi (Chittori, 2013)*

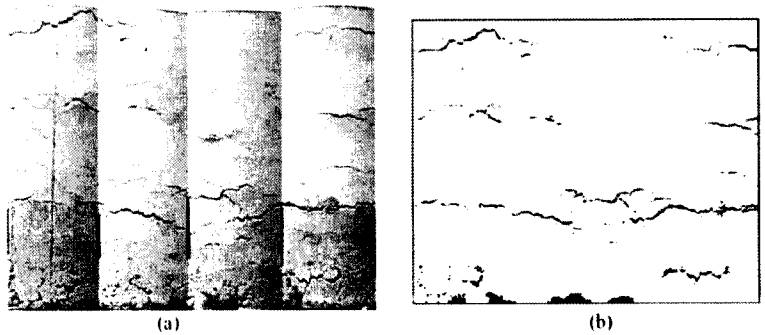
6.5.3 Susut Linier (Linier Shrinkage, L_s)

Uji susut volumetrik yang dilakukan akan mendapatkan data susut pada arah vertikal dan horisontal. Susut pada arah vertikal dan horisontal inilah yang disebut dengan susut linear. Sehingga yang dimaksud dengan susut linear suatu tanah adalah persentase pengurangan satu dimensi (panjang) tanah terhadap ukuran semula apabila kadar air tanah berkurang menjadi pada batas susut tanah.

Hasil uji susut volumetrik yang dilakukan Chittori (2013) difoto dengan kamera digital, hasil foto tersebut seperti pada Gambar 6.65.

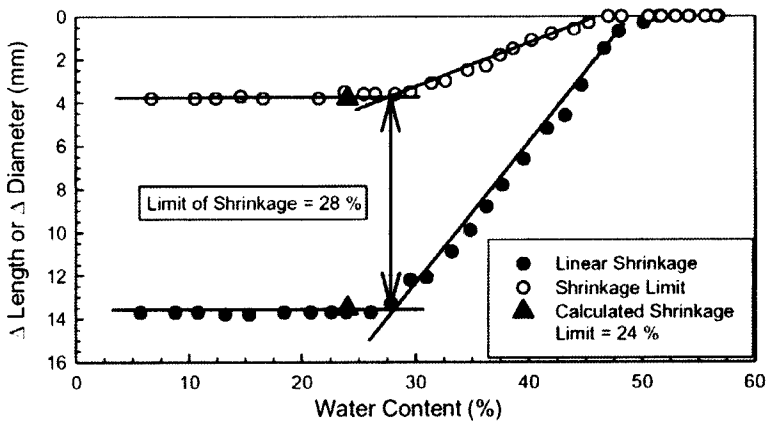
Besarnya susut linier (L_S) dapat dihitung dengan rumus :

$$L_s = 100\left(1 - \sqrt[3]{\frac{100}{V_s + 100}}\right) \quad (6.13)$$



Gambar 6.65 *(a) Surface Area Sampel setelah Uji Susut (b) Surface Area Sampel Setelah Retak*

Cerato dan Lutengger (2011) melakukan uji susut pada kaolinit dengan alat cetakan dari bahan kuningan dengan diameter 25 mm dan tinggi 140 mm dengan menggunakan air raksa. Tanah dictak sebanyak 3 lapis, kemudian dikeringkan dengan oven selama 18 jam dengan suhu 105°C. Perubahan susut yang terjadi diukur dengan jangka sorong digital. Hasil uji seperti pada Gambar 6.66.



Gambar 66 *Grafik Susut Kaolinit dari Susut Linear dan Uji Batas Susut (Cerato dan Lutengger, 2011)*

-oo0oo-

DAFTAR PUSTAKA

All - Rawas, A. A., and Goosen, F. A., 2006, *Expansive Soils (Recent Advances in Caracterization and Treatment)*, Taylor & Francis Group, London, UK.

Al - Shamrani, M.A., and Al-Mhaidib, A.I., 2000, *Vertical Swelling of Expansive Soils Under Fully and Partially Lateral Restraint Condition,* Unsatured Soils for Asia, Rahardjo, Toll & Leong, Balkema, pp 627-632, A.A. Balkema Rotterdam, The Netherlands.

Arif, D.N., 2005, Perilaku Tegangan Deformasi Tanah Jenuh Sebagian Akibat Beban Statis, Tesis S-2 Program Pasca sarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

ASTM, 2003, *Annual Books of ASTM Standards Section 4 Volume 04.08 Soil and Rock (I)*: D420-D4914.

Atterberg, A., 1911, Uber die Physikalase Bodenutersuching und uber plastizitat Tone, Int, Mitt, Boden, Vol 1.

Bowles, J.E. 1984. *Physical and Geotechnical Properties of Soils.* New York: McGraw-Hill, Inc, Second Edition, USA.

Brown, G., 1972, *The X-Ray Identification and Cyrstal Structures of Clay Minerals*, Mineralogy Society (Clay Mineral Group), Jarrold and Sons, Ltd, London, UK.

Cerato, A, B, and Lutenegger, A, J., 2006, Shrinkage of Clays, Department Civil Engineering and enviromental Science, University of Oklahoma, USA..

Chen, F.H., 1975, *Foundation on Expansive Soils*, Developments in Geotechnical Enginering, Elseveier Scientific Publication Company, New York, USA.

Chen, F.H., 1988, *Foundation on Expansive Soils*, 2nd ed Amsterdam, pp 463, Elseveier Scientific Publication Company, New York, USA.

Chittoori, B, C, S and Puppala, A, J., 2011, Quatitative estimation of Clay Mineralogy in Fine-grained soils, Journal of geotechnical and Geoenviromental Engineering, vol 137, No 11, pp 1997 – 1008.

Coduto, D.P., 1994, *Foundation Design Principles and Practices*, Prentice Hall International, Inc, New Jersey, USA.

Dakhshanamurthy, V. and Raman, V., 1975, *Review of Expansive Soils*, Discusion, Journal of Geotechnical Enggineering Division, ASCE, Volume 101,, No. GT 6.

Das, B.M, 2008, *Advanced Soil Mechanic*, Third Edition, Taylor & Francis Group, London, UK.

Dela, 2001, *Measurement of Soil Moisture using Gypsum Block*, Measuretmen Enggineering Australia (MEA), Adelaide, Australia.

Dexter, A, R., 1988, Advances in characterization of soil structure, Soil and Tillage Research, pp 199 – 238.

Djedid, A., and Anissa Mamoune, S.M., 2001, *Identification and Prediction of the swelling Behavoir of Some Soils from the Tlemcen region of Algeria,* Bulletin Des laboratories Des Point Et Chaussees, 233, July-August 2001, Ref. 4375, pp 69-77.

Erol, A.O., 1987, *Expansive Soils and Foundation Methodology,* Short Course on Common Geotechnical Problems in Saudi Arabia, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia.

Erol, A.O., and Ergun, U., 1994, *Lateral Swell Pressure in Expansive Soils*, 8th International Conf. on Soil Mech. And Found, Engrg, New Delhi, India, pp. 1511 – 1514.

Fernando, A.M.M., dan Monica, M.S., 2000, *The Influence of the Compaction Energy on the SWCC of Residual Soil*, Advances in Unsaturated Geotechnics, Proceedings of Sessions of Geo-Denver, pp 125-141, Geotechnical Special Publication, American Society of Civil engineers, Denver, Colorado, USA.

Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1982, *Study Soil Expansive in Monte Vista*, Report and Damage Expansive Soils, Colorado, USA.

Fourie, A.B., 1988, *Laboratory Evaluating of Lateral Swelling*, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.115, No.10, pp 1481 – 1485.

Fredlund, D.G., and Rahardjo, H., 1993, *Soil mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons Inc.

Fredlund, 1999, *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*, Volume, NRC Research Press, Ottawa, Canada.

Goodwin, I., 2000, *Gypsum Blocks for Measuring the Dryness of Soil*, Department of Primary Industries, Victoria, Australia.

Gourly, C.S., Newill, D., and Schreiner, H.D., 1993, *Expansive Soil*, TRL"s Research Strategy, Proc. Ist Inc. Symp. Engineering Characteristics of Arid Soils, London, UK.

Grim, R.E., 1968, *Clay Mineralogy*, Second edition, McGraw-Hill, Inc.

Hange, E.E., 2009, Pengaruh Kadar Air Terhadap Potensi Pengembangan Tanah Lempung Ekspansif, Tesis S2, Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Hardiyatmo, H.C., 2002, Mekanika Tanah I, edisi II, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, Indonesia.

Hardiyatmo, H.C., 2006, Mekanika Tanah I, edisi IV, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, Indonesia.

Head, K.H., 1984, *Manual of Soil Laboratory Testing,* Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests, ELE International Ltd, Pentech Press, London, UK.

Head, K.H., 1982, *Manual of Soil Laboratory Testing,* Volume 2: Soil Classification and Compaction Tests, ELE International Ltd, Pentech Press, London, UK.

Head, K.H., 1986, *Manual of Soil Laboratory Testing,* Volume 3: Soil Classification and Compaction Tests, ELE International Ltd, Pentech Press, London, UK.

Headquarters, Departement of the Army, 1983, *Foindation in Expansive Soils*, Technical Manual, TM 5-818-7, Washington, D.C, USA.

Hideo Komine and Nobuhide Ogata 1996, *Prediction For Swelling Characteristics Of Compacted Bentonite,* Canadian Geotechical Journal, Vol. 33, pp. 11-22.

Hideo Komine & Nobuhide Ogata 1999, "*Experimental Study On Swelling Characteristics Of Sand-Bentonite Mixture For Nuclear Waste Disposal",* Soils and Foundations Vol. 39, No. 2, pp. 83-97, April 1999.

Holtz, R.D., and Gibbs, H.J., 1956, *Prediction on Swelling Potential for Compacted Clay*, Journal of the Soil mechanics and Foundation devision, ASCE, Discussion, Vol 88, No.SM4.

Holtz, R.D., and Kovacs, W.D., 1981, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Indarto, 2001, Aspek-aspek Kelakuan Yang Harus Diperhitungkan Pada Perencanaan Dan Pelaksanaan Pada Tanah Kelempungan Yang Mengalami Siklus Pembasahan Dan Pengeringan, Prosiding Seminar Nasional Geoteknik 2001, Universitas Widyagama Malang, pp 55 – 63, Indonesia.

Ipek, T., 1998, Stabilization of Expansive Soils Using Lime, Cement and Fly Ash, M. S. Thesis, METU, Turkey.

Iswan, 2003, Perbandingan Karakteristik Tanah Gambut Rawaseragi Lampung dengan Tanah Kedungsari Wate, Tesis S-2 Prgram Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Jones, D, E., and Holtz, W, G., 1973, *Expansive Soils – The Hidden Disaster*, Civil Engineering, Vol 4, November 8.

Jumikis, A, R., 1962, Soil mechanics, D Van Nostrand, NJ.

Kaggwa, W.S., and Jaksa, M.B., 2003, *Normalized Shear Strength and Compressibility Characteristicts of Adelaide Expansive Clay.* Internet.

Kassif, G, and Zeitlen, J, G, ., 1962, *Behaviour of Pipes Buried in Expansive Clays*, Proceeding ASCE, New York, Vol 88(SM2), p, 133-148.

Kasiff, G., and Baker, R, . 1969, *Swell Pressure Measured by Uni and Triaxial techniques*, proceeding of the Seventh International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, Vol 1, p, 215-218.

Khan, A., and Nikraz H.R., 2000, *Evaluation of Ground Movement Using A Simple Soil Suction Technique in Western Australia*, Proceedings Unsaturated Soils for Asia, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

Komornik, A, and Zeitlen, J.G., 1965, *An Apparatus for Measuring Lateral Soil Swelling Pressure in Laboratory*, Proc. of 6 th Int. Conf. on Soil Mech and Found Engrg, Vol 1, Canada, pp. 278 – 281.

Kong, L.W., and Tan, L.R., 2000, *Study on Shear Strength and Swelling-Shrinkage Characteristics of compacted expansive soil,* Unsatured Soils for Asia, Rahardjo, Toll & Leong, pp 515-519, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Ladd, C.C., and Lambe, T.W., 1961, *Identification and Behaviour of Expansive Clay*, Proc. 5 th Int. Conf. on SM and FE, 1: 201 – 205, Paris, Perancis.

Lambe, T.W., and Whitman, R.V., 1969, *Soil Mechanics*, John Willeyand Son Inc, New York, USA.

Lambe, 1981, *The Structure of Compacted Clay*, Journal of Soil Mechanics and Foundation Desing, ASCE, 84 (2).

Leong, E.C., He, L., and Rahardjo, H., 2002, *Fctors Affecting the Filter Paper Method for Total and matric Suction Measurements,* Geotechnical Testing Journal, Vol. 25 No. 3, Paper ID GTJ20028198_253, www.astm.org, 2 Nopember 2007

Likos, W.J., and Lu, N., 2003, *Autometic Humidity for Measuring Total Suction Characteristic of Clay*, Geotechnical Testing Journal, Vol 26 No. 2 Paper ID GTJ10456_262, www.astm.org, 2 Nopember 2007

Mawire, K., and Senneset, K, . 1998, *Mobilised Swelling Pressuere of an Expansive Soil*, 12th African regional Conference of the International Sosiety for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Durban, South Africa.

Mehmet AS, 2012, Effect Cyclic-Shrink on Swell Percentage of An Expansive Clay Stabilized by Class Fly Ash, A Thesis submitted to The Graduate School of natural and Apllied sciences of Middle East Technical University.

Merwe, D.H., 1964, *The Prediction of heave from the Plasticity Index and percentage Clay Fraction of Soils*, Civil engineers in south Africa, 6(6):103-107.

Miroslav, K., 2001, Latice imaging in Transmission Electron microscopy, Department of Materials, Faculty of Nuclear Science and Physical Engineering, Czech Technical University in Prague, Trojanova 13, 120 00, Prague 2, Czech Republic.

Mitchell, J.K., 1992, *Fundamentals of Soil Behavior,* Second edition, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Mochtar, I. B., 2000, Teknologi Perbaikan Tanah dan Alternatif Perencanaan pada Tanah Bermasalah, Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS, Surabaya, Indonesia.

Mochtar, I. B., 2002, Rekayasa Penangulangan Masalah Pembangunan pada Tanah-tanah Sulit, Jurusan Teknik Sipil FTSP ITS, Surabaya, Indonesia.

Muhunthan, B., 1991, *Liquid Limit and Surface Area of Clays*, Geotechniques, Vol XLI, No. 1 March 1991.

Myers, D., 2005, *Expansive Clays and Road Subgrade an Analysis*, www.godismyjudgeok, 31 Agustus 2007.

Nayak, N, V., 1980, *Foundation Design Manual for Practising Engineers,* Dhanpat Rai and Sons, New Delhi, India.

Nelson, J.D., and Miller, D.J., 1992, *Expansive Soils; Problem and practice in Foundation and Pavement Engineering,* John Wiley and Sons, New York, USA.

Noormalasari, dan Susanto, D., 2000, Perilaku Tanah Ekspansif dan Metode Perbaikanya di Lippo Cikarang, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Geoteknik – IV INDO – GEO 2000, pp VI – 1 – 9, Indonesian Society for Geotechnical Engineering, Jakarta, Indonesia.

Ofer, Z., 1980, *Instruments for Laboratory and In – Situ Measurements of Lateral Swelling pressure of Expansive Clays*, Proceeding of 4th International Conference on Expansive Soils, pp 45 – 53.

Olsen, W.O., Krosley, L., Nelson, K., Chabrillat, S., Goetz, A.F.H., and Noe, D.C., 2000, *Mineralogy-Swelling Potential Relationship for Expansive Shales*, Advances in Unsaturated Geotechnics, Proceedings of Sessions of Geo-Denver, pp 361-378, Geotechnical Special Publication, American Society of Civil engineer, Denver, Colorado, USA.

O'Neill, M, W., and Poormoayed, N., 1980, *Methodology for Foundation on Expansive Clays*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT12, pp 1245–1367.

Parker, J.C., Amos, D.F., and Zelazny, L.W., 1982, *Water Absorption and Swelling of Clay Minerals in Soil Systems*, Soil Science Society of America Journal, 46, pp 450-456.

Perera, S, A, 1997, Mineral Identification Hand Book, SAGRIC International, Australia.

Puppala, A, J, Manosuthikij, T, and Chittori, B, C, S., 2013, Swell and Shrinkage Characterization of Unsaturated Expansive Clays from Texas, Civil Engineering Faculty Publications and Presentations, Boise State University.

Rahardjo, H., Toll, D.G., and Leong, E.C.,, 2000, *Unsaturated Soils for Asia*, A.A. balkema, Rotherdam, The Netherlands.

Rahardjo, P.P., dan Santosa, T.M., 2002 Karakterisasi Tanah Ekspansif di Daerah Cikarang, Jawa Barat, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Geoteknik VI, HATTI Komda Jawa Timur, Surabaya, Indonesia.

Rifa'i A., 2002, *Mechanical testing and Modelling of an Unsaturated Silt ith engineering Application*, Ph.D Desertation, EPFL, Switzerlandz.

Robert W. Day., Fellow., and Edred T. Marsh., 1995, *Triaxial A-Value versus Swell or Collapse for Compacted Soil*, Journal of Geotechnical Engineering July 1995, pp 566-570.

Sabbagh, A., 2000, *The Lateral Swelling Pressure on the Volumetric Behaviour of natual Expansive Soil Deposits*, Proceedings Unsaturated Soils for Asia, A.a. Balkema, Rotterdam, Brookfield, The Netherlands.

Sahu, B.K., 2000, *Engineering Characteristic of Block Cotton Soils in francistown*, Unsaturated Soils for Asia, Rahardjo, Toli & Leong, A.A Balkema, Rotterdam, pp 715 – 719.

Sapaz, B., 2004, *Lateral Versus Vertical Swell Pressure in Expansive Soils*, etd.lib.metu.edu/upload/1053040/index.

Scinner, A., 1997, *Ressurecting the Gypsum Block for Soil Moisture Measuretment, Measuretmen Enggineering Australia* (MEA), Adelaide, Australia.

Seed, H.B., Woodward R.J., and Lundgren R., 1962, *Prediction of Swelling Potential for Cpmpacted Clays*, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.88. No. SM3. Proc. Paper 3169.

Skempton, A.W, 1953, *The Colloidial Activity of Clays*, Proceeding 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Switzerlandz.

Snethen, D.R., 1975, *A Review of Engineering Experiences with Expansive Soils in Highway Subgrades*, Report No. FHWA-RD-75-48, Federal Highway Administration Offices of Research & Development, Washington, D.C. 20590, USA.

Soemitro, R.A.A., dan Indarto., 2000, *Swelling Characteristic of Compacted Clayed soils Related to TheirWetting Curve,* Unsatured Soils for Asia, Rahardji, Toll & Leong, pp. 727-730, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Soil Survey Staff, 1996, Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Invest. Rpt. No. 42. Ver 3.National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Sorochan, E.A., 1991, *Construction of Buildings on Expansive Soils*, Geotechnica 5, A.A. Balkema, Brookfield, USA.

Sridharan, A., dan Prakash, K., 2000, *Clasification Procedures for Expansive Soils*, Proc. Instn Civ. Emgrs Geotech. Engng, 143, Oct., 235-240.

Sudjianto, A.T., 2007, Kajian Model Perilaku *Swelling* Pada Tanah Lempung Ekspansif Dengan Pola Dua Dimensi, Prosiding Konferensi

Nasional Teknik Sipil I, Universitas Atmajaya, Yogyakarta, Indonesia.

Sudjianto, A.T., Suryolelono, K.B., Rifa'i, A., and Mochtar, I.B., 2008, *Behaviour Vertical and Lateral Swelling on Disturbed Highly Expansive Clay Under Water Content Variation Condition*, Prosiding Seminar Internasional, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia.

Sudjianto, A.T., Suryolelono, K.B., Rifa'i, A., and Mochtar, I.B., 2009, *Behaviour Expansive Clay of Ngawi Region (East Java)*, Paper Juenal Civil Enggineering Dimension (CED), UK Petra Surabaya, Surabaya, Indonesia.

Sudjianto, A.T., 2012, Pemodelan Perilaku Kembang (Swelling) Tiga Dimensi Tanah lempung Ekspansif Menggunakan Oedometer Modifikasi, Disertasi S3, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Program Pasca Sarjana Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Suhendro, B., 2000, Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental, Beta Offset, Yogyakarta, Indonesia.

Suhendro, B., 2000, Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Supriyono, 1993, Studi Tekanan Pengembangan Tanah Lempung dengan Alat Geonor, Tesis, ITB, Bandung, Indonesia.

Syawal, 2004, Identifikasi Potensi dan Tekanan Pengembangan Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Alat Oedometer (studi kasus jalan Cepu – Ngawi), Tesis S2, Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

Taboada, M.A., 2003, *Soil Shrinkage Characteristics in Swelling Soil*, www.ictp.it/~pub_off/lectures/ins018/39taboada1, 9 November 2007.

Tessier, D., 1984, *Etude Experimentale de I'organization des Materiaux argileux*. Hydratation, Gonflement at Structration an Cours de la

Dessication et de la Rehumectation" These de Doctorat d'Etat, University de Paris VII.

Thomas, P.J., 1998, *Quantifying Properties and Variability of Expansive Soils in Selected Map Units,* Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, April 15, Blacksburg, Virginia, USA.

Tovey, N.K., 1986, *Microfabrie, Chemical and Mineralogical Studies of Soils: Technique*. Journal Geotechnical Engineering. SEAGS. Vol.17.No.2. pp 131-166.

USBR, 1959, *Earth Manual Part 1*, U.S. Departement of the Interior Bureau of Reclamation, Earth Science and Research Laboratory Geotechnical Research Technical Service Center Denver, Colorado, USA.

Victorine, T., Zhang, Z., Fowler, D. W., dan Hudson, W.R., 1997, *Basic Concepts, Current Practices, and Avalaible Resources for Forensic Investigation on Pavements,* Report No. FHWA/TX-98/1731-1, Federal Highway Administration Offices of Research & Development, Washington D.C. 20590, USA.

Vijayvergiya, V.N., and Ghazzaly, O.I., 1973, *Prediction of Swelling Potential for Natural Clays*, Proceeding 3rd International Conference on Expansive Soils, Jerusalem, Volume 1.

Wahyudi, H., 2001, Perilaku Mikroskopik Tanah, Jurusan Teknik Sipil, FTSP, ITS, Surabaya, Indonesia.

Wibawa, B., and Rahardjo, H., 2000, *Properties of Swelling Soil in West Java*, Proceedings of The Asian Conference on Unsaturated Soils, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, The Netherlands.

Wiliams, A.A.B., and Donaldson, G.W., 1980, *Building on Expansive Soils in South Africa: 1973-1980*, Proccedings of the Fourth International

Conferences on Expansive Soils, Volume 2, pp.834-844, Published by American Society of Civil Engineers New York, USA.

Yong, R, N., and Warketin, B, P., 1975, *Introduction to Soil Behavior*, The Mac Milan Co, New York, USA.

Zeilten, J, G., and Komorink, A., 1960, *Concrete Structures and Foundation Design as Influenced by expansive clay in a Semi-Arid Climate*, National Symposium on Concrete and reinforced concrete in Hot Co

MILIK
Badan Perpustakaan
dan Kearsipan
Propinsi Jawa Timur