

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Gambaran Umum

Dinding tanah yang distabilisasi secara mekanik atau dinding MSE pada dasarnya terdiri dari perkuatan di dalam timbunan tanah berbutir kasar yang membantu menahan tekanan tanah lateral. Jika dibandingkan dengan dinding penahan tanah konvensional, maka dinding MSE umumnya mempunyai beberapa keunggulan. Dinding MSE lebih fleksibel dibandingkan dengan dinding penahan tanah biasa seperti dinding kantilever beton atau dinding penahan tanah tipe gravitasi. Oleh karena itu, dinding MSE lebih sesuai untuk daerah dengan tanah dasar fondasi yang buruk dan daerah seismik aktif. Perkuatan pada dinding MSE pada umumnya menggunakan geosintetik.

Geosintetik di Indonesia telah digunakan sejak tahun 1980an, karena kemudahan pemasangan dan kinerjanya telah terbukti sesuai dengan yang direncanakan. Penggunaan geosintetik akan semakin meningkat, karena rencana pembangunan jalan yang sangat pesat di mana, membutuhkan suatu teknologi untuk menyelesaikan permasalahan geoteknik. Teknologi perbaikan tanah akan semakin efektif, jika teknologi tersebut bersifat meningkatkan kekuatan tanah setempat dan bukan mengganti tanah setempat. Salah satu teknologi tersebut adalah dengan memberikan perkuatan geosintetik pada tanah. Keuntungan penggunaan geosintetik yaitu, karakteristik massa per unit luas yang rendah, sehingga mudah dipasang di lapangan, sedangkan kekuatan dan kekakuannya cukup baik.

Pedoman perkuatan tanah dengan geosintetik di Indonesia (DPU, 2009) yang merupakan adopsi dari pedoman FHWA (2001) atau AASHTO menyarankan penggunaan bahan berbutir kasar bersama dengan geosintetik. Untuk dinding tanah

yang distabilisasi secara mekanis (*mechanically stabilized earth walls, MSE*) menggunakan bahan berbutir kasar antara kerikil dan pasir dengan kandungan tanah berbutir halus yang lolos saringan No. 200 kurang dari 15% dengan indeks plastisitas maksimum 6%. Keunggulan dari penggunaan bahan berbutir kasar dengan geosintetik adalah tahanan friksi yang lebih tinggi, sifat teknis yang stabil dalam jangka panjang dan tidak berpengaruh terhadap perubahan kadar air, serta menghasilkan timbunan yang bersifat lolos air (Abu-Farsakh dkk, 2006).

Belum tersedianya data mengenai penggunaan geosintetik di Indonesia, sedikit sulit untuk mengetahui kekurangan dan kelebihanannya. Walaupun seperti itu, menurut Zornberg dan Kang (dalam Pathak dan Alfaro, 2010) melaporkan bahwa penggunaan bahan berbutir kasar merupakan komponen yang paling mahal dari sistem perkuatan tanah dengan geosintetik, yaitu sekitar 40% dari total biaya konstruksi. Sebagai akibatnya, keuntungan ekonomis dari timbunan atau lereng yang diperkuat dengan geosintetik menjadi sangat tergantung pada ketersediaan bahan timbunan berbutir kasar di sekitar lokasi konstruksi yang akan dibangun.

Di Amerika Serikat, bahan timbunan dengan kadar halus lolos saringan No 200 melebihi persyaratan dari AASHTO telah banyak digunakan. Sebagai contoh, spesifikasi *National Concrete Masonry Association (NCMA)* memperbolehkan kadar bahan halus lolos saringan No 200 sampai dengan 35% dengan Indeks Plastisitas (IP) maksimum 20% (Christopher dan Stulgis, 2005). Christopher dan Stulgis (2005) juga menyimpulkan bahwa bahan timbunan dengan kandungan material halus yang lebih tinggi dapat digunakan secara aman, asalkan sifat-sifat bahan timbunan yang akan digunakan telah dipahami dan pengendalian pekerjaan di lapangan diterapkan dengan ketat untuk mengatasi isu-isu yang teridentifikasi saat pelaksanaan, sehingga faktor penting yang dijumpai dapat dipertimbangkan dalam perancangan dinding tanah.

Oleh karena itu penggunaan bahan lokal tanah kohesif berbutir halus berupa lempung atau lanau dapat meningkatkan efisiensi biaya pelaksanaan konstruksi dinding

tanah. Christopher dan Stulgis (2005) setelah melakukan survei pada agensi pemerintah dan swasta di Amerika Utara menyimpulkan bahwa penghematan biaya konstruksi dengan menggunakan tanah kohesif berbutir halus mencapai 20% sampai 30% jika dibandingkan dengan bahan berbutir kasar. Pada kasus lain, penggunaan lempung *swelling* dengan indeks plastisitas 20 - 40% sebagai bahan timbunan yang diperkuat dengan geogrid sepanjang 244 m dan tinggi 24 m mampu mereduksi biaya sebesar USD \$ 1.1 juta jika dibandingkan dengan penggunaan bahan berbutir kasar yang didatangkan ke lokasi proyek konstruksi dinding tanah (Hayden dkk dalam Pathak dan Alfaro, 2010).

Walaupun pada beberapa kasus penggunaan material kohesif berbutir halus dapat menghemat biaya, tetapi hasil survei terhadap 75 dinding tanah yang diperkuat dengan geosintetik, mencatat bahwa 23 dari 75 dinding tanah menunjukkan bahwa perilaku dan kinerja dinding tanah tidak memenuhi syarat, karena terjadinya keruntuhan atau deformasi berlebih pada dinding tanah (Stulgis, 2005). Secara umum sebagian besar bahan timbunan yang digunakan adalah lempung, sehingga faktor penyebab keruntuhan diduga oleh tingginya tekanan air pori tanah merupakan faktor dominan yang berkontribusi terhadap terjadinya deformasi berlebih, sehingga menimbulkan keruntuhan dinding tanah. Stulgis menyimpulkan bahwa hal ini disebabkan karena pengaruh penggunaan lempung pada dinding tanah, sedangkan kombinasi penggunaan lempung yang diperkuat dengan geosintetik belum dipahami secara menyeluruh.

Christopher dan Stulgis (NCMA, 2005), menyimpulkan faktor-faktor yang mengakibatkan buruknya perilaku dan kinerja dinding tanah dengan tanah kohesif yang diperkuat geosintetik sebagai berikut:

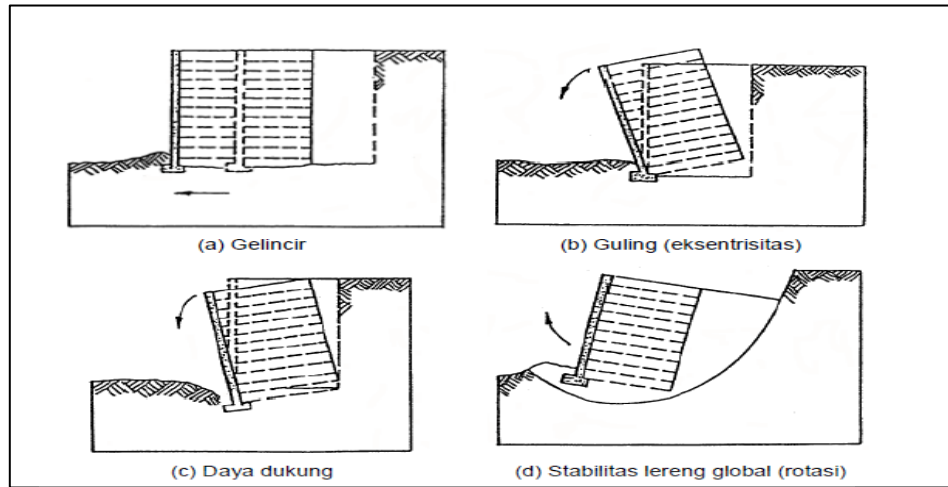
1. Tanah timbunan dengan kandungan butir halus lebih dari 50% lolos saringan no. 200;

2. Kurangnya pengendalian air permukaan maupun bawah permukaan yang menyebabkan peningkatan tekanan air pori eksese yang belum dipertimbangkan dalam desain;
3. Kurang padatnya timbunan;
4. Penempatan perkuatan yang salah; dan
5. Kurangnya pengendalian kadar air saat pemadatan.

Faktor-faktor di atas dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan, akibat deformasi yang terjadi pada dinding MSE secara berlebihan, khususnya penurunan vertikal yang terjadi pada timbunan tanah merah yang diperkuat dengan geogrid. Gejala keruntuhan diawali dengan adanya deformasi vertikal yang menimbulkan retakan pada dinding MSE, sehingga menimbulkan gangguan masalah estetika pada penutup muka dinding MSE.

Ada 4 (Empat) mekanisme keruntuhan eksternal potensial yang harus dipertimbangkan dalam menentukan perilaku dan kinerja dinding MSE sebagaimana ditunjukkan dalam **Gambar 2.1**. Keempat mekanisme keruntuhan tersebut adalah sebagai berikut:

- a) Geseran pada fondasi;
- b) Guling pada titik resultan seluruh gaya;
- c) Daya dukung; dan
- d) Stabilitas keseluruhan.



Gambar 2.1 Mekanisme Keruntuhan Eksternal untuk Dinding tanah MSE

(Sumber: Elias dkk,2001)

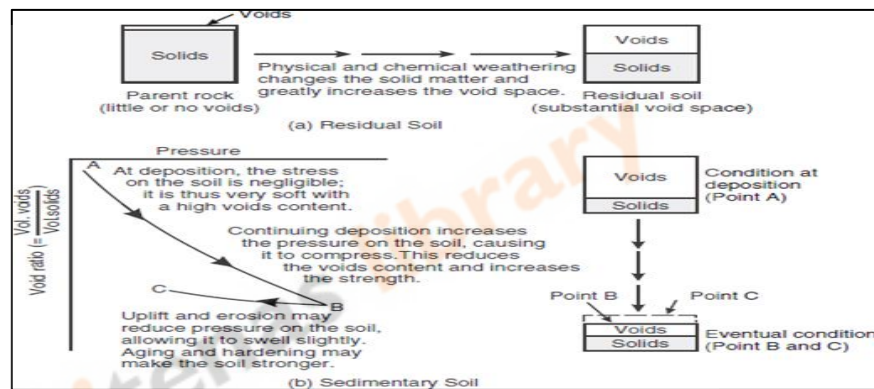
2.2 Tanah Residual

Merupakan tanah yang dibentuk melalui proses pelapukan fisik dan kimiawi batuan di bawahnya. Perbedaan antara tanah residual dan tanah sedimen dapat dilihat pada **Gambar 2.2**. Perbedaan utama antara tanah residual dan tanah sedimen ditinjau dari proses pembentukannya dapat diuraikan sebagai berikut:

- a) Tanah sedimen mengalami proses pemilahan yang sistematis selama proses erosi, transportasi dan pengendapan. Partikel halus dipisahkan dari partikel kasar dan diendapkan pada beberapa lokasi yang berbeda atau dalam beberapa lapisan. Oleh karena itu tanah sedimen cenderung homogen. Tanah residual tidak mengalami proses tersebut, dan bersifat lebih heterogen daripada tanah sedimen.
- b) Konsep historis tegangan, konsolidasi normal, dan konsolidasi berlebih (*over consolidation*) tidak relevan untuk tanah residual. Garis konsolidasi asli (*virgin*) tidak ada pada tanah residual. Kondisi asli (*virgin*) tanah residual adalah batuan

dasar pembentuknya, bukan sedimen lunak pada dasar laut atau danau seperti tanah endapan lainnya.

Tanah residual mempunyai mineral yang sangat berbeda dengan mineral lempung lainnya. Mineral tersebut adalah *allophane* dan *imogilite*, dan *halloysite*. Mineral-mineral tersebut, terutama *allophane*, mempunyai sifat yang jauh berbeda dengan lempung lainnya.



Gambar 2.2 Tanah Residual dan Tanah Sedimen

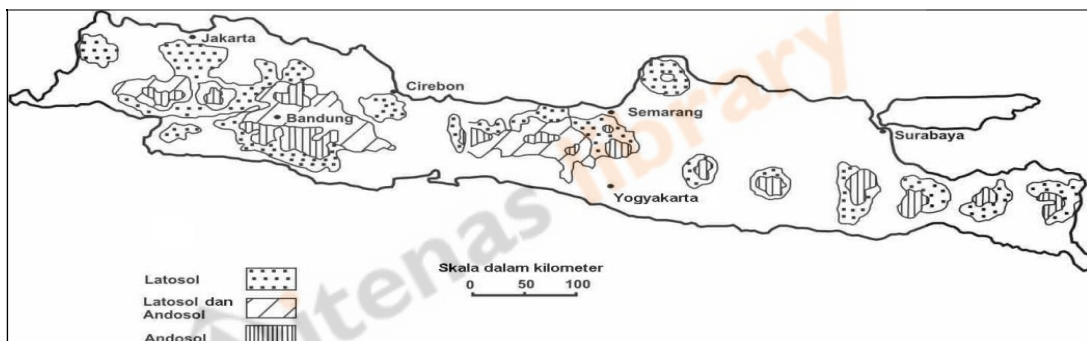
(Sumber: Wesley, 2010)

Wesley (2010) menyebutkan bahwa tanah residual dengan partikel lempung yang sangat halus mempunyai kuat geser yang lebih tinggi dibandingkan dengan lempung “normal” dengan ukuran partikel yang sama.

Wesley (2010) menyebutkan bahwa topografi sangat berpengaruh terhadap proses pelapukan yang kemudian mempengaruhi jenis mineral lempung yang terbentuk. Di daerah perbukitan dan pegunungan, tanah bersifat mudah terdrainase dan aliran *seepage* ke arah bawah sangat kuat. Hal ini menyebabkan terbentuknya mineral lempung dengan aktifitas rendah, khususnya *kaolinite*. Di daerah vulkanik, mineral *allophane* dan *halloysite* dapat terbentuk sebelum berakhir menjadi *kaolinite*.

Tanah dengan mineral-mineral tersebut umumnya mempunyai sifat teknis yang baik. **Gambar 2.3** memperlihatkan distribusi tanah *halloysite* (latosol) dan *allophane* (andosol) di Pulau Jawa.

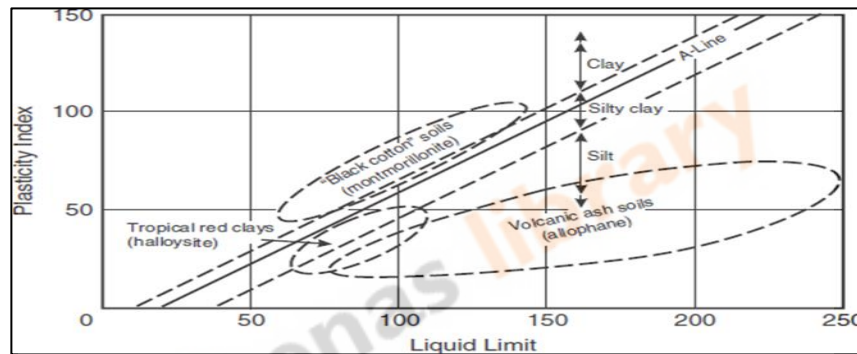
Karakterisasi tanah residual dapat dilakukan dengan pengujian laboratorium walaupun Wesley (2010) menyebutkan perlunya perlakuan khusus selama pelaksanaan pengujian. Saat melakukan pengujian batas-batas Atterberg, Wesley (2010) menyarankan agar contoh tanah dikeringkan udara dan tidak dikeringkan dalam oven. Pengujian hidrometer untuk menentukan ukuran butir untuk lempung dengan kadar *allophane* yang tinggi juga perlu lebih berhati-hati karena cenderung menggumpal.



Gambar 2.3 Distribusi Tanah Lempung Merah/Latosol (*Halloysite*) dan Debu Vulkanik/Andosol (*Allophane*) di Jawa (Sumber: Wesley, 2010)

Batas-batas Atterberg merupakan alat yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dan mengkarakterisasi tanah residual. Akan tetapi, batas plastis, batas cair atau indeks plastisitas tidak bisa digunakan secara terpisah. Indikator yang berguna adalah posisinya pada kurva plastisitas. Kurva plastisitas pada **Gambar 2.4** oleh karena itu sebaiknya digunakan sebagai alat untuk mengevaluasi sifat-sifat tanah residual dan bukan sebagai metoda untuk mengklasifikasi tanah residual. Tanah yang berada di bawah garis A umumnya mempunyai sifat teknis yang baik, sedangkan sebaliknya tanah yang berada di atas garis A mempunyai sifat tanah yang buruk.

Kurva plastisitas tidak sesuai digunakan untuk tanah residual, terutama lempung yang berasal dari material vulkanik dengan mineral *halloysite* atau *allophane*. Tanah tersebut cenderung berada di bawah garis A, khususnya *allophane*. Akan tetapi, tanah tersebut tidak sepenuhnya berperilaku sebagai lanau. Selain itu tanah residual tersebut tidak berperilaku sebagai material berplastisitas tinggi, sehingga sulit membedakan apakah tanah residual tersebut diklasifikasikan sebagai lempung atau lanau. Lempung kelanauan mungkin istilah yang terbaik untuk tanah *allophane*. Pada **Tabel 2.1** dapat dilihat nilai sifat-sifat indeks dan mekanis tanah.



Gambar 2.4 Tanah Residual pada Kurva Plastisitas (Sumber: Wesley, 2010)

Tabel 2.1 Nilai Sifat- Sifat Indeks dan Mekanis Tanah

(Sumber: Departemen Pekerjaan Umum, 2009)

Jenis Tanah	Indeks Plastisitas	Berat Isi (kN/m ³)	Berat Isi Kering Max (kN/m ³)	c` (kPa)	φ` (°)
Pasir Halus sampai Kasar	-	19-20	19	-	35-40
Pasir Sedikit Kelanauan, Kelempungan	-	18-19	18	-	27-32,5
Tanah Merah	30-50	16-17,5	12,5*	10-25	20-40
Keterangan*: pada kadar air optimum 40%					

2.3 Perilaku Tanah Residual (Kohesif) sebagai Bahan Timbunan yang Diperkuat Geosintetik

Stulgis (2005) menyimpulkan bahwa jika tanah dengan kandungan butir halus yang tinggi (seperti tanah merah pada penelitian ini) akan digunakan sebagai bahan timbunan maka harus diperkuat dengan geosintetik. Faktor yang paling berpengaruh terhadap perilaku dan kinerja dinding MSE yang diperkuat geosintetik adalah sifat hidraulik, sifat mekanik (kuat geser), sifat deformasi, dan pengaruh lingkungan sekitarnya.

A. Sifat Hidraulik

Permeabilitas pada timbunan yang diperkuat geosintetik menjadi sifat yang penting pasca konstruksi. Dengan bertambahnya persentase kandungan halus dalam timbunan yang diperkuat geosintetik, nilai permeabilitasnya akan menurun. Hal ini akan menyebabkan meningkatnya tekanan air pori dalam zona timbunan yang diperkuat. Drainase air permukaan dan bawah permukaan juga harus diperhatikan karena dapat meningkatkan tekanan air pori di belakang atau di dalam zona timbunan yang diperkuat.

B. Sifat Mekanik (Kuat Geser)

Abu-Farsakh dkk (2007) menyampaikan bahwa salah satu sifat penting untuk timbunan kohesif yang diperkuat geosintetik adalah sifat kuat geser antarmuka (*interface*) antara tanah dengan geosintetik. Kuat geser antarmuka terkait dengan dua moda keruntuhan, yaitu keruntuhan gelincir timbunan di atas geosintetik dan keruntuhan cabut. Sifat kuat geser pada antarmuka tanah dengan geosintetik dapat diperoleh dengan uji geser langsung kotak besar atau dengan uji cabut.

C. Sifat Deformasi

Salah satu faktor timbunan kohesif berbutir halus yang diperkuat dengan geosintetik adalah peningkatan deformasi vertikal dan horizontal, baik selama dan setelah konstruksi (Stulgis, 2005). Selama masa konstruksi, modulus elastisitas dari dinding tanah yang diperkuat geosintetik merupakan parameter penting. Tanah berbutir halus memiliki kecenderungan untuk mengalami deformasi dibandingkan dengan tanah berbutir kasar, dimana deformasi tersebut tergantung waktu (*time dependent*). Oleh karena itu disarankan untuk meneliti perilaku dan kinerja, khususnya karakteristik dinding tanah. Hal ini tergantung dari sifat struktur dinding tanah. Peningkatan deformasi harus mempertimbangkan faktor-faktor dalam perancangan sebagai berikut:

1. Mempertahankan alinyemen dinding tanah selama dan setelah masa konstruksi;
2. Potensi terjadinya deformasi pada struktur atau bangunan utilitas di sekitar dinding tanah;
3. Terjadinya gaya tarikan ke bawah (*downdrag force*) pada penutup muka dinding tanah bagian belakang dan pada koneksi antarmuka dinding tanah; serta
4. Kemungkinan meningkatnya potensi retak tarik (*tension cracks*).

D. Pengaruh Lingkungan

Pathak and Alfaro (2010) telah melakukan pengujian laboratorium skala besar untuk mensimulasikan interaksi antara geogrid dan lempung kembang (*swelling clay*) akibat proses pembasahan dan pengeringan. Pada penelitian ini disimpulkan bahwa proses pembasahan dan pengeringan menimbulkan tambahan regangan pada geogrid.

Farrag dan Morvant dalam Abu-Farsakh dkk (2007) menyimpulkan bahwa peningkatan kadar air dalam timbunan yang diperkuat akan menurunkan tahanan cabut

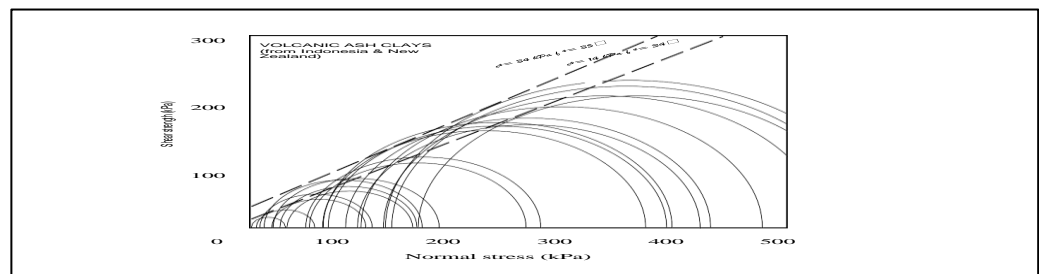
geosintetik. Pada penelitian lebih lanjut dilakukan oleh Abu-Farsakh dkk (2007) mengenai pengaruh kadar air dan kepadatan tanah terhadap efisiensi geosintetik dalam memperkuat tanah kohesif secara lebih kuantitatif, namun penelitiannya masih terbatas dengan alat uji geser langsung. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa terjadi pengurangan tahanan geser pada antarmuka tanah terhadap geosintetik yang disebabkan peningkatan kadar air.

2.3.1 Kuat Geser Efektif Tanah Residual

Wesley (2010) menyimpulkan bahwa kuat geser efektif pada tanah residual (kecuali tanah residual dari pelapukan batuan sedimen) disebabkan oleh:

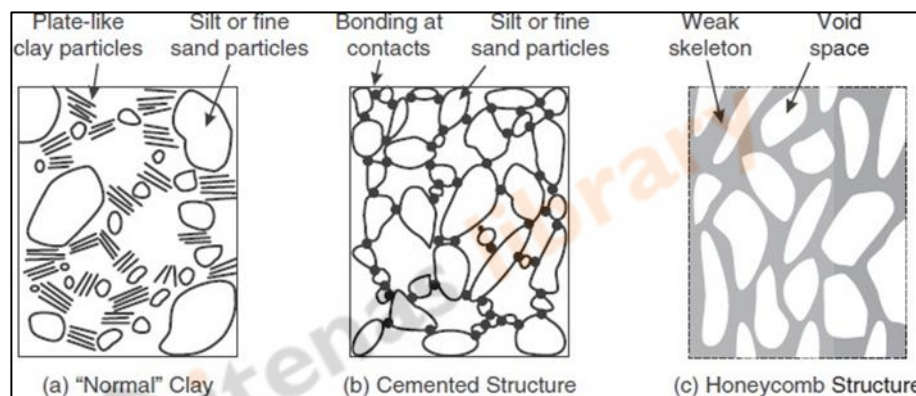
- Tanah residual mempunyai mineral lempung yang cenderung mempunyai sifat friksi yang bagus;
- Sebagian besar tanah residual mempunyai efek mikrostruktur yang signifikan, sehingga berkontribusi pada tingginya kuat geser; dan
- Mikrostruktur umumnya juga berkontribusi pada tingginya komponen kohesi pada kuat geser tanah residual. Sudut geser dalam umumnya pada rentang 25°-35°, walaupun pada lempung *allophane* dan *halloysite* bisa mencapai 40°.

Gambar 2.5 memperlihatkan pengujian triaksial dari tanah lempung abu vulkanik dari Indonesia dan Selandia Baru.



Gambar 2.5 Hasil Pengujian Triaksial Lempung dari Abu Vulkanik di Indonesia dan Selandia Baru (Sumber: Wesley, 2010)

Istilah mikrostruktur tersebut di atas menurut Wesley (2010) adalah susunan partikel tanah yang membentuk rangka tanah tersebut. Tanah yang sangat terstruktur adalah tanah dengan partikel yang membentuk atau bahkan terikat bersama sedemikian rupa, sehingga rangka tanah mempunyai karakteristik yang jauh berbeda dibandingkan dengan gabungan sederhana dari partikel-partikel individual. Struktur seperti ini tidak dapat terlihat dengan mata telanjang seperti halnya *bedding planes*, *joints* atau *faults* yang biasa disebut makrostruktur. Hampir seluruh tanah residual sangat terstruktur secara mikro. **Gambar 2.6** memperlihatkan konsep mikrostruktur tersebut.



Gambar 2.6 Konsep Mikrostruktur (Sumber: Wesley, 2010)

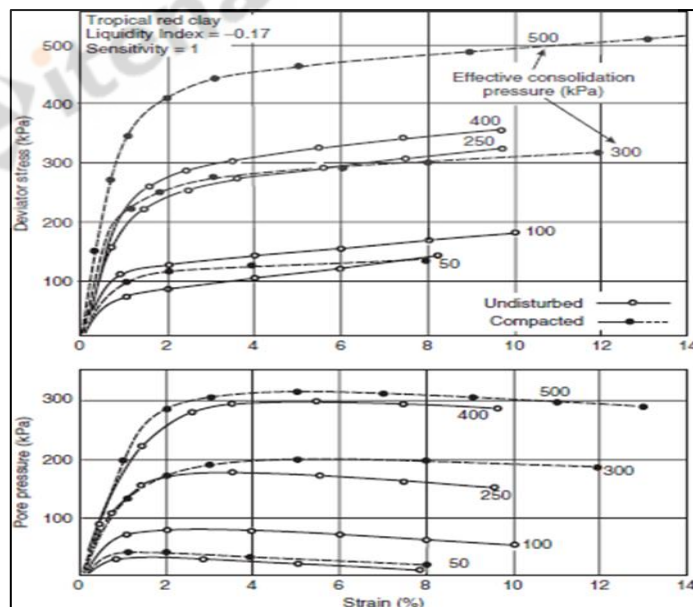
Gambar 2.6a merupakan konsep untuk tanah lempung normal tak terganggu yang memperlihatkan susunan partikel lempung berbentuk seperti plat yang memenuhi pori antara partikel yang lebih besar (partikel lanau atau pasir halus). Tanah dengan susunan seperti itu biasanya dapat bersifat tidak sensitif (pengaruh struktur tidak tinggi) atau dapat bersifat sangat sensitif yang mengindikasikan tanah tersebut sangat terstruktur.

Gambar 2.6b memperlihatkan konsep umum tanah yang struktur tanah yang tersementasi atau *bonded*, khususnya tanah residual. Akan tetapi, interpretasi terhadap gambar ini harus dilakukan secara hati-hati. Proses pelapukan, setidaknya pada batuan beku dan batuan keras lainnya, biasanya berupa pelemahan batuan dengan penghancuran batuan tersebut dan perubahan mineral batuan menjadi mineral

lempung, bukan proses yang menyatukan (menyemenkan) partikel-partikel keras *existing*. Oleh karena itu, **Gambar 2.6a** dapat berlaku untuk sebagian tanah residual seperti halnya **Gambar 2.6b**. Beberapa proses pelapukan masih dapat menghasilkan struktur tersemenkan seperti **Gambar 2.6b**.

Gambar 2.6c memperlihatkan struktur sarang tawon, yang terdiri dari suatu rangka yang berupa material yang relatif lemah dengan pori yang sangat besar. Material sarang tawon dapat berupa material tunggal atau dapat berupa konsentrasi atau agregasi partikel-partikel. Struktur sarang tawon ini sesuai untuk menggambarkan tanah vulkanik yang sensitif atau sangat sensitif.

Gambar 2.7 memperlihatkan hasil pengujian triaksial CU pada tanah lempung merah tropik (Wesley, 2010). Wesley menyimpulkan bahwa lempung merah mempunyai perilaku yang sama pada kondisi tak terganggu dan kondisi terganggu (*remolded*).



Gambar 2.7 Hasil Uji Triaksial CU pada Tanah Merah Tropik

(Sumber: Wesley, 2010)

2.4 Geosintetik

Geosintetik adalah istilah umum untuk produk berbentuk lembaran yang terbuat dari bahan polimer lentur, digunakan dengan tanah, batuan, atau material geoteknik lainnya, sebagai suatu kesatuan pekerjaan buatan manusia, struktur, maupun sistem (ASTM D 4439).

Pada dasarnya, geosintetik terbagi menjadi dua jenis yaitu tekstil dan jaring (*web*). Geosintetik jenis tekstil yaitu geotekstil dan geomembran, sedangkan geosintetik jenis jaring yaitu jaring (*nets*) dan geogrid. Sebagian besar geosintetik terbuat dari polimer sintetik seperti polipropilena (PP), poliester (PET) atau polietilena (PE). Material polimer tersebut sangat tahan terhadap degradasi biologis dan kimiawi. Jenis lain yang jarang digunakan adalah poliamida (PA) atau nilon dan serat kaca. Bahan alami (seperti serat kapas, rami) juga dapat digunakan.

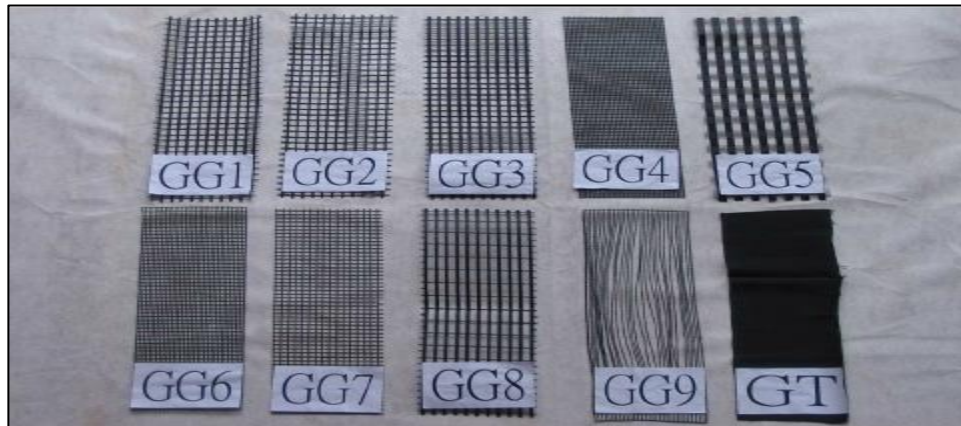
Geosintetik memiliki fungsi primer dan fungsi sekunder yang biasanya lebih dari satu fungsi. Kedua fungsi tersebut menjadikan geosintetik dapat berkontribusi secara total pada saat penerapannya. Dengan demikian, kedua fungsi ini perlu dipertimbangkan pada saat perhitungan dan pembuatan spesifikasi perencanaan. Geosintetik memiliki enam fungsi sebagai berikut:

- a) Filtrasi: bahan geosintetik digunakan untuk mengalirkan air ke dalam sistem drainase dan mencegah terjadinya migrasi partikel tanah melalui filter. Contoh penggunaan geosintetik sebagai filter adalah pada sistem drainase porous;
- b) Drainase: bahan geosintetik digunakan untuk mengalirkan air dari dalam tanah. Bahan ini contohnya digunakan sebagai drainase di belakang abutmen atau dinding penahan tanah;
- c) Separator: bahan geosintetik digunakan di antara dua material tanah yang tidak sejenis untuk mencegah terjadi pencampuran material. Sebagai contoh, bahan ini digunakan untuk mencegah bercampurnya lapis pondasi jalan dengan tanah

dasar yang lunak, sehingga integritas dan tebal rencana struktur jalan dapat dipertahankan;

- d) Perkuatan: sifat tarik bahan geosintetik dimanfaatkan untuk menahan tegangan atau deformasi pada struktur tanah;
- e) Penghalang: bahan geosintetik digunakan untuk mencegah perpindahan zat cair atau gas. Fungsi geosintetik ini contohnya adalah geomembran untuk menjaga fluktuasi kadar air pada tanah ekspansif atau digunakan pada penampungan sampah; dan
- f) Proteksi: bahan geosintetik digunakan sebagai lapisan yang memperkecil tegangan lokal untuk mencegah atau mengurangi kerusakan pada permukaan atau lapisan tersebut. Sebagai contoh, tikar geotekstil digunakan untuk mencegah erosi tanah akibat hujan dan aliran air. Contoh lainnya, geotekstil tak-teranyam digunakan untuk mencegah tertusuknya geomembran oleh tanah atau batu di sekelilingnya pada saat pemasangan.

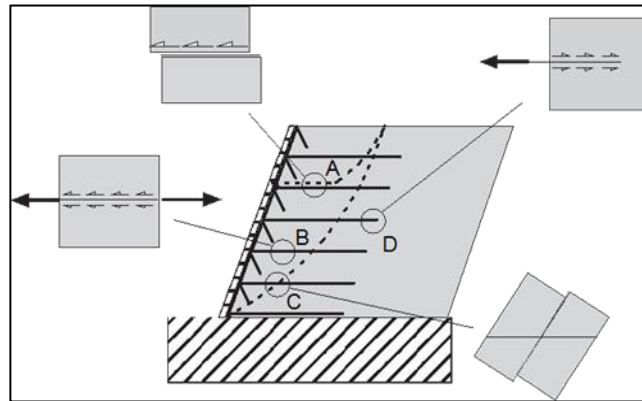
Pada penelitian ini geosintetik yang digunakan adalah geogrid. Geogrid merupakan suatu contoh dari jenis geosintetik yang berbentuk jaring (*web*). Fungsi geogrid yang utama adalah sebagai perkuatan. Geogrid dibentuk oleh suatu jaring teratur dengan elemen-elemen tarik dan mempunyai bukaan berukuran tertentu, sehingga saling mengunci (*interlock*) dengan bahan pengisi di sekelilingnya. Jenis geogrid yang umum digunakan nampak seperti **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 Jenis Geogrid (*Sumber: Jorge G.Zornberg*)

2.5 Interaksi Tanah dengan Geogrid dalam Moda Keruntuhan Geser

Pengujian interaksi tanah dan geosintetik dikembangkan untuk mensimulasikan mekanisme keruntuhan dan deformasi dinding tanah seperti diperlihatkan pada **Gambar 2.9** (Palmeira, 2009). Pada daerah A, gelincir massa tanah pada permukaan perkuatan dapat terjadi, sehingga uji geser langsung dapat digunakan. Pada daerah B, tanah dan pekuatan dapat berdeformasi dalam arah lateral, sehingga suatu uji regangan bidang yang mirip dengan uji tarik dalam tanah (*in - soil tensile test*) dapat digunakan. Daerah C menunjukkan situasi dimana tanah dan perkuatan digeser, sehingga uji geser langsung dengan perkuatan miring dapat digunakan. Pada daerah D perkuatan ditarik, sehingga uji cabut dapat digunakan. Akan tetapi, Palmeira (2009) menyebutkan bahwa semua jenis uji tersebut memiliki keterbatasan dalam memodelkan kondisi aktual yang terjadi pada struktur perkuatan tanah.



Gambar 2.9 Mekanisme Interaksi dalam Dinding tanah yang Diperkuat Geogrid

(Sumber:Palmeira, 2009)

Pada kegiatan litbang ini dilakukan pengujian laboratorium untuk moda keruntuhan geser langsung antara tanah dengan geosintetik pada daerah A dalam **Gambar 2.9**. Kegiatan pengujian ini merupakan pengayaan basis data untuk meneliti perilaku interaksi tanah merah dengan berbagai macam geosintetik.

Untuk mengevaluasi interaksi tanah dengan geosintetik dalam kajian ini digunakan parameter C_i (koefisien interaksi atau efisiensi antarmuka) menurut Talisoz et al dalam Coronel (2006). Jika C_i kurang dari 0.5, berarti terjadinya lekatan yang lemah antara tanah-geosintetik, sedangkan jika C_i lebih dari 1, berarti terjadi lekatan yang kuat. C_i dihitung dengan **Rumus 2.1**:

$$C_i = \frac{c_a + \sigma_n \tan \delta_a}{c + \sigma_n \tan \phi} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

C_i = Koefisien interaksi atau efisiensi antarmuka;

ϕ = Sudut geser tanah (derajat);

c = Kohesi tanah (kN/m^2);

C_a = Kohesi interface dari uji pull out (kN/m^2);

δ_a = Sudut geser interface dari uji pull out (derajat); dan

σ_n = Tegangan normal (kN/m^2).

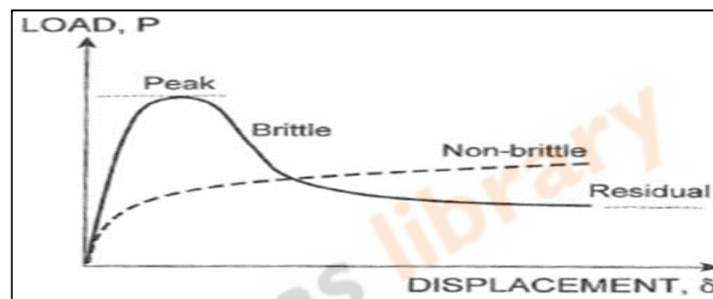
Untuk evaluasi perilaku tegangan-regangan pada uji geser langsung tanah-geosintetik yang merupakan hasil pengujian laboratorium maka digunakan ASTM D7702-11 (ASTM,2011). ASTM D7702-11 menyarankan dilakukannya evaluasi terhadap kurva perpindahan-tegangan geser dari hasil uji geser langsung tanah-geosintetik. Evaluasi tersebut perlu dilakukan untuk memahami moda keruntuhan yang terjadi dan untuk menilai kualitas pengujian.

ASTM (2011) menyatakan bahwa pada antarmuka tanah-geosintetik dapat terjadi dua jenis perilaku tegangan-regangan yaitu getas (*brittle*) dan daktil (*ductile*), lihat **Gambar 2.10**:

- a) Material dengan perilaku tegangan-regangan *brittle* akan menunjukkan kuat geser puncak yang jelas pada perpindahan yang kecil, kemudian akan mengalami penurunan tahanan geser pada perpindahan yang lebih besar sampai kuat geser residual tercapai. Perilaku *brittle* (juga dikenal dengan perilaku *strain-softening* atau pengurangan kuat geser pasca puncak) merupakan karakteristik dari lempung kaku (*stiff*), pasir padat dan lempung yang dipadatkan dengan kadar air yang lebih kecil dari kadar air optimumnya. Mekanisme lain yang terjadi setelah puncak disebabkan karena reorientasi partikel lempung pada bidang keruntuhan dan dilatasi tanah.
- b) Material dengan perilaku *ductile*, atau *non-brittle*, akan mempunyai perilaku tegangan- regangan dengan penurunan kuat geser yang kecil ketika perpindahan bertambah besar. Perilaku *ductile* merupakan ciri dari hampir semua lempung, pasir lepas, dan lempung yang dipadatkan dengan kadar

air lebih besar dari kadar air optimum. Antarmuka dengan perilaku *ductile* terjadi pada:

- 1) Geomembran halus dengan geosintetik lainnya atau dengan tanah;
- 2) Geotekstil tak-teranyam dengan geotekstil lainnya, dengan *geosynthetic clay liner* (GCL), atau dengan geokomposit drainase; dan
- 3) Geosintetik dengan lempung lunak atau pasir lepas, ketika bidang keruntuhan dipaksa menjadi lapisan tanah *ductile* (termasuk uji tak-drainase pada tanah kelempungan).

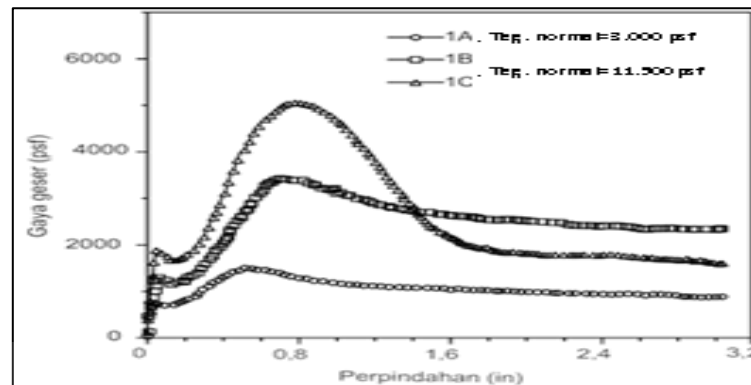


Gambar 2.10 Keruntuhan *Brittle* dan *Non-Brittle* (Sumber: ASTM, 2011)

Gambar 2.11 memperlihatkan ilustrasi keruntuhan *brittle* dan *ductile* dari hasil uji kuat geser GCL-tanah. Dalam gambar tersebut, kurva 1A dan 1B memperlihatkan keruntuhan *ductile* yang mengindikasikan terjadinya gelincir antara geotekstil teranyam dari GCL dan tanah. Kurva 1C memperlihatkan keruntuhan *ductile* dengan ciri adanya puncak yang jelas diikuti penurunan kuat geser yang tajam yang diakibatkan keruntuhan internal pada GCL. Adanya jendulan kecil pada perpindahan kurang dari 0.1 mm pada **Gambar 2.11** umum terjadi pada uji geser langsung tanah-geosintetik, dan dipercaya diakibatkan oleh adanya gelincir pada lapisan teratas/terbawah saat dimulainya penggeseran.

Moda keruntuhan lain yang nyata pada kurva tegangan geser-perpindahan adalah terjadinya *rolling* dari pasir atau kerikil lepas pada antarmuka yang menyebabkan tidak adanya puncak atau perilaku residual yang jelas. Jika terjadi

pembenaman geosintetik pada tanah sekelilingnya, kurva yang terjadi tidak akan menampilkan puncak jelas tapi tidak seragamnya perilaku residual.



Gambar 2.11 Hasil Uji Geser Langsung GCL-Tanah (Sumber: ASTM, 2011)

Hubungan antara tegangan geser-perpindahan yang baik harus menunjukkan kurva yang mulus, transisi yang menerus dari saat dimulainya penggeseran sampai puncak kuat geser dan kemudian sampai perpindahan yang lebih besar (ASTM, 2011). Adanya puncak ganda, ketidakterusan, dan jendulan yang besar mengindikasikan adanya masalah selama penggeseran, sehingga pengujian harus diulangi.

2.6 Interaksi Tanah dan Geogrid dalam Moda Keruntuhan Cabut

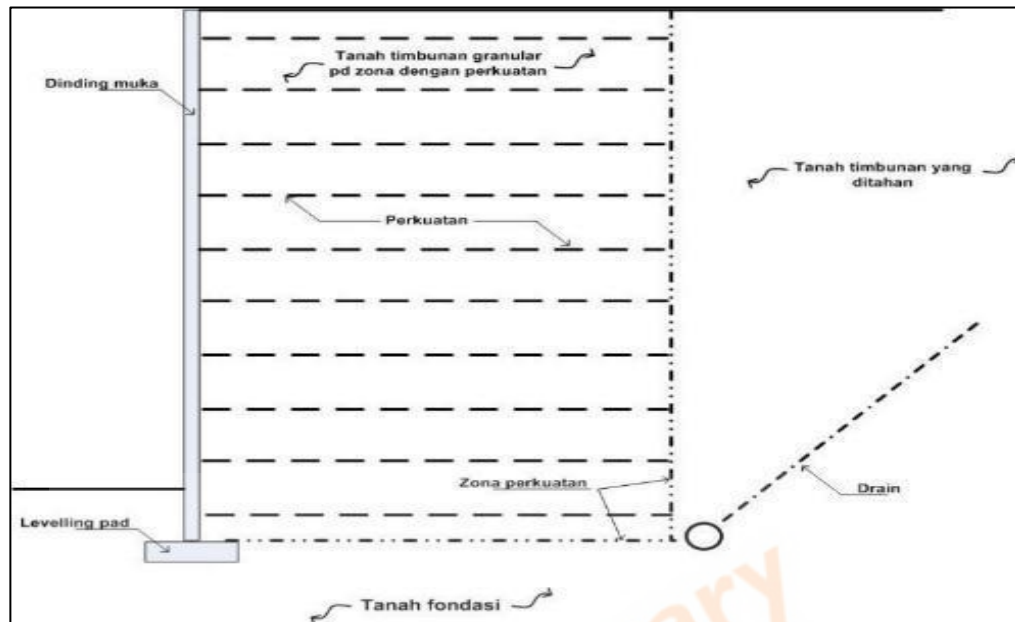
Ketahanan terhadap keruntuhan cabut merupakan salah satu syarat stabilitas internal dinding MSE. Tahanan cabut tersebut menentukan kebutuhan panjang pembenaman geogrid di luar bidang keruntuhan potensial akibat penurunan.

Menurut Teixeira dkk (2007), perilaku dinding tanah penahan tanah yang diperkuat geogrid sangat dipengaruhi oleh mekanisme interaksi yang timbul antara perkuatan dan timbunan tanah. Perkuatan tersebut berfungsi untuk mendistribusi tegangan dalam tanah untuk meningkatkan stabilitas internal dari struktur tanah yang diperkuat geogrid. Geogrid akan mengalami regangan tarik ketika mentrasfer beban dari zona yang tidak stabil ke zona yang stabil.

Redistribusi tegangan dan respon deformasi dalam massa tanah yang diperkuat geosintetik tidak hanya tergantung pada kuat geser tanah akan tetapi juga tergantung pada sifat tarik perkuatan, serta mekanisme transfer tegangan antara tanah dan perkuatan. Uji cabut telah umum digunakan untuk mengarakterisasi mekanisme transfer tegangan tersebut. Pengujian cabut tersebut dilakukan dengan berbagai variasi jenis geogrid dan variasi tegangan normal. Selain itu, mekanisme transfer beban juga diselidiki melalui pemodelan numerik dengan metode elemen hingga.

2.7 Dinding MSE (*Mechanically Stabilized Earth*)

Dinding MSE terdiri atas dinding muka/penutup muka dan bahan perkuatan yang diikatkan pada dinding muka/penutup muka dan dipasang secara berlapis di dalam timbunan tanah berbutir kasar yang mudah mengalirkan air (*free draining material*). Kombinasi perkuatan dan timbunan tanah berbutir menghasilkan struktur komposit yang secara internal stabil. Potongan tipikal dinding MSE nampak seperti **Gambar 2.12**. Dinding MSE menggunakan beberapa jenis bahan perkuatan diantaranya baja lunak (*mild steel*) yang digalvanis atau dilapis epoksi dan geosintetik. Dalam penelitian tugas akhir ini yang dibahas hanyalah dinding MSE yang diperkuat dengan perkuatan geosintetik berupa geogrid.



Gambar 2.12 Potongan Tipikal Dinding MSE (Sumber: FHWA NHI-10-024)

2.7.1 Panjang Perkuatan dan Jarak Antar-perkuatan

Persyaratan panjang perkuatan dan jarak antar-perkuatan menurut SNI 8460:2017 sebagai berikut:

- Panjang perkuatan yang disyaratkan adalah $L \geq 0,7 H_e$, dengan H_e adalah tinggi efektif dinding MSE dihitung dari permukaan atas alas perata (levelling pad). Berapapun tinggi H_e , L harus $\geq 2,5$ m) (lihat **Gambar 2.13** untuk ilustrasi L dan H_e).
- Panjang perkuatan harus sama untuk keseluruhan tinggi dinding. Pengecualian dapat dilakukan antara lain untuk hal-hal berikut:
- Penambahan panjang perkuatan baris bawah hingga $> 0,7H_e$ untuk memenuhi persyaratan stabilitas global;
- Pengurangan panjang perkuatan baris bawah hingga $< 0,7H_e$ karena dinding MSE duduk di lapisan batu atau tanah keras dengan $N_{SPT} > 50$.
- Panjang minimum perkuatan bertambah dengan bekerjanya beban-beban luar.

- f) Panjang minimum perkuatan juga bertambah dengan semakin lunaknya tanah fondasi.
- g) Spasi tipikal untuk pita metalik, diberikan sebagai berikut:
- 1) spasi vertikal, S_v : 0,2 m – 1,25 m;
 - 2) spasi horizontal, S_h : 0,8 m – 1,5 m.

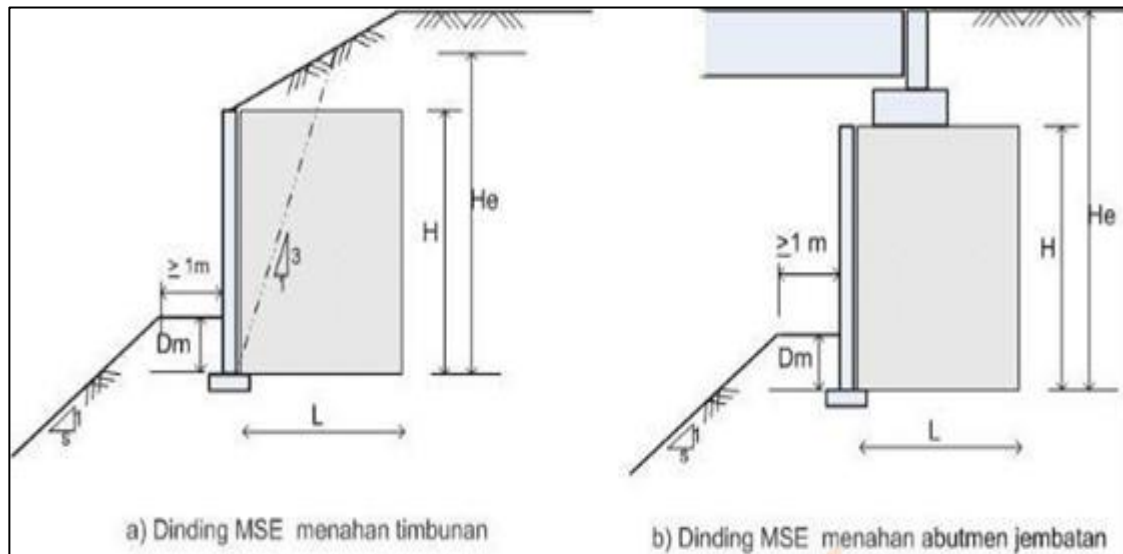
Spasi vertikal dapat berubah seiring dengan kedalaman.

2.7.2 Minimum Terbenamnya Penutup Muka

Terbenamnya penutup muka harus memenuhi persyaratan SNI 8460:2017 mengacu pada FHWA 2009 seperti yang dirangkumkan pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Persyaratan Terbenamnya Penutup Muka (*Sumber FHWA, 2009*)

No	Kemiringan lereng dimuka dinding MSE	Aplikasi	Minimum terbenamnya penutup muka (Dm)
1	Horizontal	Dinding menahan timbunan	$H_e/20 > 0.35$ m
2	Horizontal	Dinding menahan <i>abutment</i> jembatan	$H_e/10 > 0.7$ m dibawah permukaan tanah akibat penggerusan, jika ada
3	Miring 3H :1V (s = 3)	Dinding menahan timbunan	$H_e/10 > 0.7$ m
4	Miring 2H :1V (s = 2)	Dinding menahan timbunan	$H_e/7 > 0.7$ m
5	Miring 1.5H :1V (s = 1.5)	Dinding menahan timbunan	$H_e/5 > 0.7$ m



Gambar 2.13 Ilustrasi Persyaratan Terbenamnya Penutup Muka

(Sumber: GEO Hongkong, 2002)

2.7.3 Tipe Penutup Muka

Penutup muka dapat dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu penutup muka kaku dan penutup muka lentur. Berbagai tipe penutup muka utama dijelaskan sebagai berikut (SNI 8460:2017):

- a) Panel beton pracetak segmental memiliki berbagai bentuk dan ukuran, dengan ukuran tipikal tinggi 150 cm lebar 150 cm – 300 cm, serta ketebalan minimum 140 cm. Bentuk yang umum dijumpai adalah bujur sangkar, persegi empat, persegi lima, persegi enam, dan tanda tambah;
- b) Unit dinding blok modular cetak kering berukuran relatif kecil dengan berat per unit 15 kg – 50 kg. Tinggi per unit 10 cm – 20 cm, lebar 20 cm – 40 cm, dan tebal 20 cm – 60 cm. Unit dinding blok modular dipasang tanpa mortar, dimana unit-unit yang berdekatan dihubungkan dengan paku geser. Penutup muka tipe ini biasanya dipasangkan dengan perkuatan geosintetik, sebagian besar menggunakan geogrid;

- c) Penutup muka terbuat dari baja berbentuk setengah silinder. Ringan, sehingga cocok untuk daerah yang sulit pencapaiannya
- d) Beronjong dapat digunakan sebagai penutup muka dimana sebagai perkuatan umumnya digunakan anyaman kawat yang dilas (*welded wire mesh*), rangka baja yang dilas, geogrid, dan geotekstil.
- e) Penutup muka geosintetik dipasang dengan cara menekuk geosintetik 180° dan mengembalikannya ke arah belakang hingga membentuk permukaan lereng. Cara pemasangan yang sama juga digunakan untuk penutup muka menggunakan anyaman kawat yang dilas, geogrid, dan lainnya. Sebagai pelindung dari sinar ultraviolet, dapat digunakan beton semprot, atau penanaman vegetasi. Dalam hal digunakan secara permanen maka durabilitas atau ketahanan geotekstil untuk konstruksi dinding MSE harus diperhitungkan.

2.7.4 Perkuatan

Perkuatan dinding MSE menurut SNI 8460:2017 dibagi menjadi 3 (tiga) bagian sebagai berikut:

- a) Geometri perkuatan diberikan persyaratan yaitu:
 - 1) Linear satu arah: contohnya pita baja polos maupun berulir, pita geosintetik.
 - 2) Komposit satu arah: contohnya anyaman kawat.
 - 3) Bidang datar dua arah: contohnya geosintetik lembaran menerus (geotekstil atau geogrid).
- b) Material perkuatan diberikan persyaratan yaitu:
 - 1) Perkuatan metalik: baja lunak yang digalvanis.
 - 2) Perkuatan nonmetalik: bahan geosintetik
- c) Kemampuan memanjang perkuatan diberikan persyaratan yaitu:

- 1) Perkuatan yang tidak dapat memanjang (*inextensible*): Deformasi perkuatan saat keruntuhan jauh lebih kecil dari deformasi tanah. Contohnya pita baja.
- 2) Perkuatan yang dapat memanjang (*extensible*): Deformasi perkuatan saat keruntuhan sama atau lebih besar dari deformasi tanah. Contoh: geogrid, geotekstil, anyaman kawat yang dilas.

2.7.5 Stabilitas Internal

Kegagalan internal dinding MSE diwakili oleh nilai faktor keamanan (FK) dapat terjadi dalam dua moda kegagalan yang berbeda, tetapi keduanya menyebabkan pergerakan yang besar pada struktur dinding MSE, hingga terjadinya keruntuhan pada struktur dinding. Kedua moda kegagalan internal tersebut adalah sebagai berikut:

- a) kegagalan pada material perkuatan, yaitu perpanjangan yang berlebihan atau putusannya perkuatan, karena tingginya gaya tarik pada perkuatan.
- b) kegagalan karena tercabutnya perkuatan dari massa tanah timbunan karena tingginya gaya tarik pada perkuatan.

Adapun faktor keamanan minimum (FK_{min}) untuk stabilitas internal dinding MSE adalah sebagai berikut (SNI 8460:2017):

- a) FK_{min} untuk kegagalan tercabutnya perkuatan adalah 1,5.
- b) Tegangan izin untuk mencegah perpanjangan yang berlebihan atau putusannya perkuatan adalah 0,55 dikalikan dengan tegangan leleh.

Tahapan proses desain internal dijelaskan sebagai berikut.

- a) Pilih tipe perkuatan (yang dapat memanjang atau tidak dapat memanjang);
- b) Tentukan lokasi bidang gelincir kritis;
- c) Tentukan spasi perkuatan yang sesuai dengan penutup muka terpilih;
- d) Hitung gaya tarik maksimum pada setiap level perkuatan;

- e) Hitung kapasitas *pullout* pada setiap level perkuatan;
- f) Bandingkan gaya tarik maksimum dengan kapasitas cabut; dan
- g) Bandingkan tegangan tarik maksimum dengan tegangan izin.

2.8 Timbunan Biasa

Timbunan biasa adalah timbunan atau urugan yang digunakan untuk timbunan sampai elevasi *top subgrade* yang disyaratkan sesuai gambar perencanaan, contohnya digunakan untuk penggantian material *existing subgrade* di lapangan yang tidak memenuhi syarat.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 3 - 2010, bahan yang dipilih sebaiknya tidak termasuk tanah yang berplastisitas tinggi, yaitu diklasifikasikan sebagai A-7-6 menurut SNI-03-6797-2002 (AASHTO M145) atau sebagai CH menurut "*Unified atau Casagrande Soil Classification System*". Bila penggunaan tanah yang berplastisitas tinggi tidak dapat dihindarkan, bahan tersebut harus digunakan hanya pada bagian dasar dari timbunan atau pada penimbunan kembali yang tidak memerlukan daya dukung atau kekuatan geser yang tinggi. Tanah dengan plastisitas tinggi sama sekali tidak boleh digunakan sebagai lapisan langsung di bawah dasar perkerasan atau bahu jalan ataupun tanah dasar bahu jalan.

Bahan untuk timbunan biasa tidak boleh berasal dari bahan galian tanah yang mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

- a) Tanah yang mengandung organik seperti jenis tanah OL, OH dan Pt dalam sistem USCS serta tanah yang mengandung daun-daunan, rumput-rumputan, akar, dan sampah.
- b) Tanah dengan kadar air alamiah sangat tinggi yang sulit dikeringkan untuk memenuhi toleransi kadar air pada pemadatan (melampaui Kadar Air Optimum + 1%).

- c) Tanah yang mempunyai sifat kembang susut tinggi dan sangat tinggi dalam klasifikasi Van Der Merwe dengan ciri-ciri adanya retak memanjang sejajar tepi perkerasan jalan

2.9 Timbunan Pilihan

Timbunan pilihan adalah timbunan atau urugan yang digunakan untuk timbunan sampai elevasi *top subgrade* yang disyaratkan sesuai gambar perencanaan, contohnya untuk mengurangi tebal lapisan fondasi bawah.

Jenis tanah yang dapat digunakan sebagai material timbunan pilihan untuk jalan kelas 1 (satu) adalah tanah berbutir sedang hingga kasar seperti ditunjukkan pada **Tabel 2.3**, dengan nilai *modulus secant* seperti pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.3 Klasifikasi Tanah (*Sumber: ASTM D 2487*)

Kelas Tanah	Ukuran Tanah	Jenis Tanah	Simbol (USCS)
I	Kasar	Kerikil bergradasi baik atau kerikil pasiran	GW
		Kerikil bergradasi buruk atau kerikil pasiran	GP
		Pasir bergradasi baik atau kerikil pasiran	SW
		Pasir bergradasi buruk atau kerikil pasiran	SP
II	Sedang	Kerikil lanauan atau kerikil pasiran lanauan	GM
		Kerikil lempungan atau kerikil pasiran lempungan	GC
		Pasir lanauan atau pasir kerikilan lanauan	SM
		Pasir lempungan atau pasir kerikilan lempungan	SC

Tabel 2.4 Modulus *Secant* Tanah
(Sumber: ASTM D 698)

Kelas Jalan	Kepadatan dari Standar Proctor, %**	E_s MPa
I	85	6
	90	12
	95	24
	100	30
II	85	3
	90	6
	95	12
	100	15

Spesifikasi teknis material timbunan pilihan berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Revisi 3 – 2010 antara lain:

- a) Timbunan pilihan harus digunakan untuk meningkatkan kapasitas daya dukung tanah dasar pada lapisan penopang (capping layer) dan jika diperlukan diambil dari daerah galian (borrow pit). Timbunan pilihan dapat juga digunakan untuk stabilisasi lereng atau pekerjaan pelebaran timbunan jika diperlukan lereng yang lebih curam karena keterbatasan ruangan, dan untuk pekerjaan timbunan lainnya.
- b) Timbunan Pilihan Berbutir harus digunakan sebagai lapisan penopang (capping layer) pada tanah lunak yang mempunyai CBR lapangan kurang dari 2% yang tidak dapat ditingkatkan dengan pemadatan atau stabilisasi, antara lain

timbunan di atas tanah rawa, daerah berair dan lokasi-lokasi serupa dimana bahan timbunan pilihan tidak dapat dipadatkan dengan memuaskan.

- c) Timbunan yang diklasifikasikan sebagai timbunan pilihan harus terdiri dari bahan tanah atau batu yang memenuhi semua ketentuan di atas dan memiliki sifat-sifat tertentu yang tergantung dari maksud penggunaannya. Seluruh timbunan pilihan harus memiliki CBR paling sedikit 10 % setelah 4 hari perendaman sesuai dengan SNI 03-1744-1989.
- d) Bahan timbunan pilihan yang digunakan pada lereng, pekerjaan stabilisasi timbunan atau pada situasi lainnya memerlukan kuat geser yang cukup, apabila dilaksanakan dengan pemadatan kering normal, maka timbunan pilihan dapat berupa timbunan batu atau kerikil bergradasi baik atau lempung pasir atau lempung berplastisitas rendah. Jenis bahan yang dipilih tergantung pada kecuraman dari lereng yang akan dibangun atau pada tekanan yang akan dipikul

Tebal timbunan tiap lapis tidak boleh lebih dari 30 cm atau kurang dari 10 cm (SNI 03-1744-1989), ketentuan ini berlaku juga untuk timbunan biasa. Material timbunan pilihan harus memiliki kualitas minimal sama atau lebih bagus dari pada tanah dasar (sub-grade), seperti ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Standar Kualitas Material Timbunan Pilihan (*Sumber: Standar Korea*)

Klasifikasi	A	B
USCS	QW, SW, GP, SP	SM, SP
Lolos saringan #200	Dibawah 10%	Dibawah 25%
Indeks plastis	NP	Dibawah 10%
Kelas/peringkat	Sub-base (SB-1, SB-2)	Sub-grade

Material timbunan kelas A atau yang lebih baik, direkomendasikan untuk digunakan jika lapisan tanah relatif tipis atau kondisi pembebanan tidak menguntungkan, khususnya untuk kondisi sebagai berikut:

- a) Ketebalan lapisan penutup lebih kecil dari ketentuan ketebalan minimum lapisan penutup;
- b) Area yang terdapat rembesan air tanah dan mengalir keluar ke permukaan;
- c) Tanah dasar fondasi di bawah struktur sangat lunak (kecuali jika dilakukan perbaikan tanah (*soil improvement*)); dan
- d) Area yang mempunyai tekanan *aquifer* di dekat permukaan.

Material Timbunan dipadatkan hingga 90% dari kepadatan maksimum yang ditentukan oleh Test Metode D698. Metode uji D1556, D2167, D2922, D2937 (ASTM). digunakan sebagai metode alternatif untuk menentukan kepadatan ditempat

2.10 Instrumentasi Geoteknik

Instrumentasi geoteknik merupakan alat monitoring yang digunakan di lapangan untuk mengukur perubahan atau pergerakan struktur di atas lapisan tanah maupun batuan. Dalam kajian ini instrumentasi yang digunakan sebagai berikut:

- a) *Total Station* (TS)

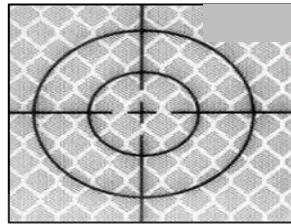
Total Station adalah instrumen optis/elektronik yang digunakan dalam pemetaan dan konstruksi bangunan. *Total station* merupakan teodolit terintegrasi dengan komponen pengukur jarak elektronik (*electronic distance measure* (EDM)) untuk membaca jarak dan kemiringan dari instrumen ke titik tertentu;

- b) *Reflective Tape*

Reflective tape merupakan alat untuk menandai target yang peka terhadap cahaya dan dapat dipantau menggunakan *Total Station*. Pemasangan *reflective tape* pada dinding MSE ini dimaksudkan untuk mengetahui deformasi yang terjadi pada dinding pada arah vertikal maupun horizontal

terhadap titik ikat berupa *Bench Mark* (BM). Bentuk dari *reflective tape* ini diperlihatkan pada **Gambar 2.14**. *Reflective tape* ini dipasang di beberapa titik pada dinding MSE yang akan diamati deformasinya.

Deformasi vertikal dan horizontal dapat dipantau dengan menggunakan bantuan alat *Total Station*;



Gambar 2.14 *Reflective Tape* (Bimo Pakusadewo, 2017)

c) *Global Position Satellite* (GPS) *Geodetic*

GPS *Geodetic* adalah alat ukur GPS dengan menggunakan satelite dimana akurasi yang sangat tinggi serta ketelitian yang dihasilkan sangat akurat, alat ini dapat digunakan dalam pengukuran lahan, seperti hutan, perkebunan, dengan akurasi sampai 5-10mm.

GPS *Geodetic* ini mempunyai kemampuan untuk menangkap signal L1, L2, atau GNSS, merekam Raw data, yang secara umum mempunyai Format RINEX yang sangat mengesankan dari GPS ini yaitu mempunyai ketelitian lebih tinggi dari GPS Navigasi. Ketelitiannya sampai milimeter; dan

d) *Waterpass*

Waterpass adalah alat yang digunakan untuk mengukur atau menentukan sebuah benda atau garis dalam posisi rata baik pengukuran secara vertikal maupun horizontal. Terdapat dua buah alat pengecek kedataran baik untuk vertikal maupun horizontal yang terbuat dari kaca dimana di dalamnya terdapat gelembung cairan, dan pada posisi pinggir alat terdapat garis pembagi yang dapat dipergunakan sebagai alat ukur panjang.

Umumnya alat ukur waterpass ditambah dengan bagian alat lain, seperti:

- 1) Benang stadia, yaitu dua buah benang yang berada di atas dan dibawah serta sejajar dengan jarak yang sama dari benang diafragma mendatar. Dengan adanya benang stadia dan bantuan alat ukur waterpass berupa rambu atau bak ukur alat ini dapat digunakan sebagai alat ukur jarak horizontal atau mendatar. Pengukuran jarak dengan cara seperti ini dikenal dengan jarak optik.
- 2) Lingkaran berskala, yaitu lingkaran pada badan alat yang dilengkapi dengan skala ukuran sudut. Dengan adanya lingkaran berskala ini arah yang dinyatakan dengan bacaan sudut dari bidikan yang ditunjukkan oleh benang diafragma tegak dapat diketahui, sehingga bila dibidikkan ke dua buah titik, sudut antara ke dua titik tersebut dengan alat dapat ditentukan atau dengan kata lain dapat difungsikan sebagai alat pengukur sudut horizontal.

Instrumentasi geoteknik digunakan untuk melakukan observasi mengenai perilaku dan kinerja dinding MSE. Dengan meninjau bahwa nilai deformasi yang diizinkan kurang dari 20 mm seperti tampak pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2.6 Penurunan Timbunan (*Sumber: Pt-T-10-2002-B*)

Kelas Jalan	Penurunan yang Disyaratkan selama Masa Kontruksi, s/S_{tot}	Kecepatan Penurunan setelah Kontruksi (mm/tahun)
I	> 90%	< 20
II	> 85%	< 25
III	> 80%	< 30
IV	> 75%	< 30

2.11 Pengujian Laboratorium

Pengujian di laboratorium mekanika tanah terdiri dari pengujian sifat fisik atau indeks tanah dan pengujian sifat-sifat teknik. Pengujian yang dilakukan di laboratorium untuk menentukan jenis, karakteristik, perilaku di bawah perubahan kondisi. Pengujian laboratorium uji cabut dan uji geser digunakan sebagai tolak ukur hasil monitoring dan evaluasi (monev) instrumentasi geoteknik di lapangan.

2.11.1 Sifat-Sifat Fisik (*Physical Properties*)

a) Berat isi tanah (γ)

Berat isi tanah merupakan berat suatu sample tanah dibagi dengan volume tanah, dimana sample tanah tersebut harus dalam kondisi asli. Berat isi tanah dinyatakan dalam $\text{gr/cm}^3 = \text{ton/m}^3$. Nilai berat isi pada tanah jarang $< 1.2 \text{ kg/cm}^3$ atau $> 2.5 \text{ kg/cm}^3$. Nilai rata-rata berkisar antara 1.6 kg/cm^3 s/d 2.0 kg/cm^3 . Berat isi kering ditentukan dengan satuan yang sama gr/cm^3 berkisar 0.6 kg/cm^3 s/d 2.4 kg/cm^3 .

b) Angka pori (e)

Dinyatakan sebagai bilangan saja. Nilainya berkisar sekitar 0.3 sampai 3.0.

c) Derajat Kejenuhan (S_r)

Derajat kejenuhan dinyatakan dalam persen (%), sehingga nilai terkecil 0% dan terbesar 100%. Tanah yang asli di lapangan luasnya mempunyai derajat kejenuhan lebih tinggi dari 90 %.

d) Batas Plastis Dan Batas Cair

Pengujian ini dilakukan pada tanah kohesif dengan maksud klasifikasi dan estimasi sifat-sifat teknisnya. Grafik plastisitas dari casagrande dapat digunakan untuk memperkirakan kompresibilitas tanah-tanah lempung dan lanau. Dalam menggunakan grafik plastisitas, perlu diketahui apakah tanah berupa tanah organik atau anorganik, yang umumnya dapat diketahui dari warnanya yang gelap dan baunya seperti tanaman yang busuk bila tanahnya

organik. Bila terdapat keragu-raguan mengenai tanah organik ini, uji batas cair dilakukan pada contoh tanah yang telah dipanaskan dalam oven. Jika setelah pengeringan, nilai batas cair tereduksi sampai 30% atau lebih, maka tanah adalah tanah organik.

e) Indeks Plastis (PI)

Indeks plastis adalah selisih antara batas cair dan batas plastis. Jika tanah banyak mengandung pasir maka test batas plastis (*plastic limit*) harus dilaksanakan sebelum penentuan batas cair dilakukan. PI dinyatakan NP (*non plastic*) jika batas plastis sama dengan atau lebih besar dari batas cair dan batas cair atau batas plastis tidak dapat ditentukan.

f) Batas Susut (SL)

Batas susut adalah batas dimana sudah kehilangan kadar air tapi tidak menyebabkan penyusutan tanah lagi. Batas susut akan menyusut apabila air yang dikandung secara perlahan-lahan hilang dalam tanah, dan penambahan kehilangan air tidak akan menyebabkan perubahan volume.

g) Kadar Air (w)

Pemeriksaan kadar air dilakukan pada contoh tanah tak terganggu dan biasanya merupakan bagian dari uji kuat geser tanah. Kadar air sample adalah perbandingan antara berat air yang terkandung didalamnya terhadap sample tanah kering. Kadar air tanah selalu dinyatakan dalam persen (%) dan nilainya 0% s/d 200% atau 300%. Pada tanah dalam keadaan aslinya kadar air biasanya 15% s/d 100%.

h) Berat Jenis (Gs)

Berat jenis tanah dinyatakan sebagai bilangan saja nilainya rata-rata 2.65 dengan variasi yang agak kecil, yaitu jarang di bawah 2.4 atau di atas 2.8.

i) Analisa Saringan

Analisa saringan untuk mengetahui ukuran dan susunan butiran (gradasi) tertahan saringan no. 200 ASTM. Ukuran-ukuran saringan berkisar dari lubang berdiameter 101,6 mm (No. 4) sampai 0,0037 mm (No. 400).

2.11.2 Sifat-Sifat Teknik (*Engineering Properties*)

a) Pengujian Cabut

Kajian terhadap ASTM D6706 *Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil*, untuk melakukan penyusunan formulir pengujian cabut ditekankan pada pasal ‘Perhitungan’. Perhitungan pengujian cabut dalam ASTM D6706 dijelaskan sebagai berikut, yaitu:

1. Tentukan berat isi tanah di atas dan di bawah geosintetik dan kadar airnya jika diperlukan.
2. Tegangan normal total yang diberikan pada benda uji ditentukan dengan menjumlahkan tegangan normal yang diberikan dengan tegangan normal akibat tanah di atas geosintetik sesuai dengan **Rumus 2.2** sebagai berikut:

$$\sigma_N = \sigma_s + \sigma_a \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

σ_N adalah tegangan normal total yang diberikan pada bagian atas benda uji, kPa.

σ_s adalah tegangan normal akibat tanah di atas geosintetik, kPa.

σ_a adalah tegangan normal yang diberikan pada geosintetik, kPa.

3. Hitung tahanan cabut, P_r , geosintetik yaitu sebagai berikut:

untuk geotekstil, geomembran, dan *reinforcing strips*, gunakan **Rumus 2.3** berikut:

$$P_r = \frac{F_p}{W_g} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

P_r adalah tahanan cabut, kN/m.

F_p adalah gaya cabut, kN.

W_g adalah lebar geosintetik, m.

untuk geogrid dan struktur grid lainnya, gunakan **Rumus 2.4** berikut:

$$P_r = \frac{F_p \times n_g}{N_g} \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

P_r adalah tahanan cabut, kN/m.

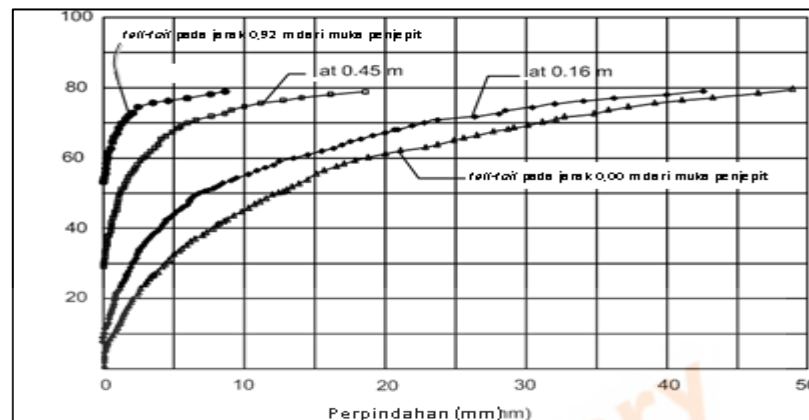
F_p adalah gaya cabut, kN.

n_g adalah jumlah kerangka (*ribs*) per satuan lebar geogrids yang searah dengan gaya cabut.

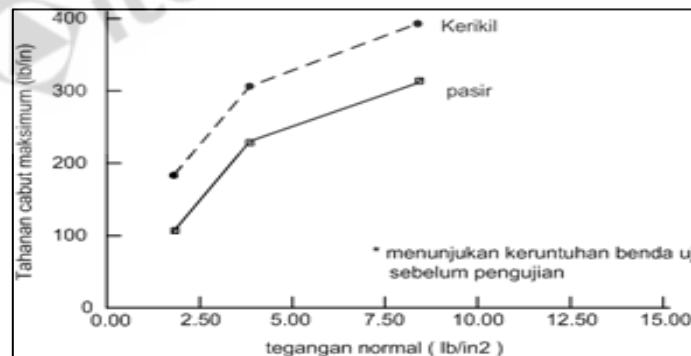
N_g adalah jumlah kerangka (*ribs*) dari geogrids sebagai benda uji yang searah dengan gaya cabut.

4. Gambarkan grafik hubungan data hasil pengujian antara tahanan cabut maksimum terhadap tegangan normal total. Gambarkan grafik tahanan cabut terhadap perpindahan untuk setiap bagian benda uji di dalam kotak uji tahanan cabut. Contoh kedua grafik di atas ditunjukkan pada **Gambar 2.15** dan **Gambar 2.16**.

Semua data terkait dengan perhitungan tahanan cabut di atas telah dimasukkan dalam formulir pengujian cabut yang disusun dan dilengkapi dengan grafik sesuai dengan **Gambar 2.15** dan **Gambar 2.16**.



Gambar 2.15 Grafik tipikal Hubungan Pembebanan Cabut Terhadap Perpindahan pada Bagian Muka Kotak Uji dan Kawat Perpindahan 'Tell-Tail'



Gambar 2.16 Grafik Tipikal Hubungan antara Tahanan Cabut Maksimum dan Tegangan Normal

b) Pengujian Geser langsung (*Direct Shear Test*)

Serupa dengan penyusunan formulir pengujian cabut, pengujian geser langsung mengacu pada standar uji yang digunakan dalam pengujian yaitu

ASTM D5321 *Standard Test Method for Determining the Coefficient of Soil and Geosynthetic or Geosynthetic and Geosynthetic Friction by the Direct Shear Method*. Kajian terhadap standar ini untuk penyusunan formulir pengujian geser langsung ditekankan pada pasal 'Perhitungan'. Perhitungan pengujian geser langsung dalam ASTM D5321 dijelaskan sebagai berikut, yaitu:

1. Untuk pengujian yang menggunakan tanah, hitung kadar air awal dan kadar air akhir, berat isi dan derajat kejenuhan jika diperlukan.
2. Hitung tegangan geser yang diberikan pada benda uji untuk setiap gaya geser yang dicatat **Rumus 2.5** sebagai berikut:

$$T = \frac{F_s - F_{cor}}{A_c} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

T adalah tegangan geser, kPa.

F_s adalah gaya geser.

F_{cor} adalah koreksi gesekan untuk gaya geser, kN.

A_c adalah daerah yang dikoreksi.

Pada pengujian dengan luas daerah kontak benda uji yang berkurang seiring dengan bertambahnya perpindahan, suatu luas daerah kontak yang dikoreksi akibat pengurangan bidang kontak tersebut harus dihitung. Hal ini terjadi pada alat dengan ukuran panjang antara kotak geser yang diam dan kotak geser yang dapat bergerak sama. Pada kasus ini, luas daerah kontak sebenarnya akan berkurang sebagai fungsi dari perpindahan horisontal dari bagian kotak geser yang dapat bergerak. Untuk kotak dengan bentuk bujur sangkar atau persegi panjang, luas daerah yang dikoreksi dihitung untuk setiap bacaan perpindahan menggunakan **Rumus 2.6** berikut:

$$A_c = A_0 - (d \times W) \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

A_c adalah luas yang dikoreksi, m².

A_0 adalah luas daerah kontak awal, m².

d adalah perpindahan horisontal dari kotak geser yang bergerak, m.

W adalah lebar daerah kontak benda uji tegak lurus terhadap gaya geser, m.

Koreksi luas daerah kontak tidak diperlukan untuk pengujian ini jika alat yang digunakan memiliki ukuran kotak geser yang diam lebih besar dari ukuran kotak geser yang dapat bergerak.

Dengan demikian perpindahan horisontal dari kotak geser yang dapat bergerak tidak menyebabkan terjadinya pengurangan luas daerah kontak dari benda uji.

Gambarkan nilai-nilai batas tegangan geser terhadap tegangan normal yang diberikan untuk setiap pengujian yang dilakukan. Umumnya nilai-nilai batas tersebut adalah tegangan geser puncak dan tegangan geser pada akhir pengujian. Nilai-nilai batas lain dapat ditentukan oleh pengguna. Nilai tegangan geser dan tegangan normal harus digambarkan dengan skala yang sama.

Hubungkan titik-titik data dengan suatu garis lurus. Untuk membuat garis lurus tersebut diperlukan pertimbangan dan pengalaman. Sudut yang dibentuk garis lurus tersebut disebut koefisien gesek. Untuk nilai sudut geser ditentukan menggunakan **Rumus 2.7** berikut:

$$\delta_p = \tan^{-1}(\omega_p) \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

δ_p adalah sudut geser yang berhubungan dengan tegangan geser batas, derajat.

ω_p adalah koefisien gesek yang berhubungan dengan tegangan geser batas.

2.12 Plaxis 2D (Berbasis Metode Elemen Hingga)

2.12.1 Umum

Plaxis adalah program elemen hingga untuk aplikasi geoteknik dimana digunakan model-model tanah untuk melakukan simulasi terhadap perilaku dari tanah. Program Plaxis dan model-model tanah didalamnya telah dikembangkan dengan seksama. Pengembangan Plaxis dimulai pada tahun 1987 di Universitas Teknik Delft (*Technical University of Delft*) inisiatif Departemen tenaga Kerja dan Pengelolaan Sumber Daya Air Belanda (*Dutch Departemen of Public Works and Water Management*). Tujuan awal adalah untuk menciptakan sebuah program komputer berdasarkan metode elemen hingga 2D yang mudah digunakan untuk menganalisis tanggul-tanggul yang dibangun di atas tanah lunak di dataran rendah Holland.

Pada tahun berikutnya, Plaxis dikembangkan lebih lanjut mencakup hampir seluruh aspek perencanaan geoteknik lainnya. Karena aktifitas yang terus berkembang, maka sebuah perusahaan bernama Plaxis b.v. kemudian didirikan pada tahun 1993. Pada tahun 1998, dirilis versi pertama Plaxis untuk Windows. Selama rentang waktu itu dikembangkan pula perhitungan untuk 3D.

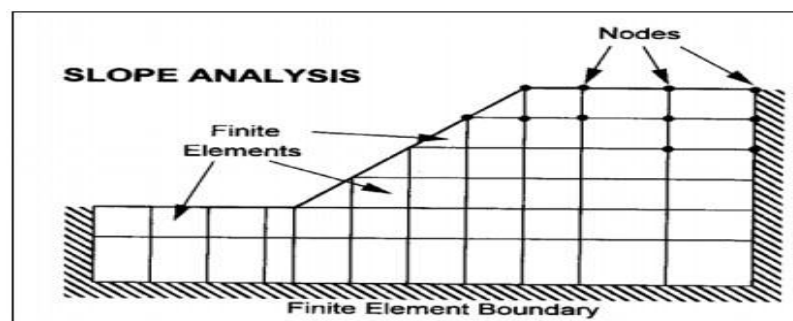
Setelah pengembangan selama beberapa tahun, maka Plaxis 3D untuk terowongan (Plaxis 3D Tunnel) dirilis pada tahun 2001. Plaxis dimaksudkan sebagai suatu alat bantu analisis untuk digunakan oleh ahli geoteknik yang tidak harus menguasai metode numerik.

2.12.2 Metode Elemen Hingga (FEM)

Umumnya para praktisi menganggap bahwa perhitungan dengan metode elemen hingga yang nonlinear perhitungan yang handal dan baik secara teoritis, yang kemudian dikemas dalam suatu kerangka yang logis dan mudah digunakan. Hasilnya banyak praktisi geoteknik diseluruh dunia yang telah menerima dan menggunakannya untuk keperluan rekayasa teknik.

Metode elemen hingga adalah prosedur perhitungan yang digunakan untuk mendapatkan pendekatan dari permasalahan matematis yang sering muncul pada rekayasa teknik inti dari metode tersebut adalah membuat persamaan matematis dengan berbagai pendekatan dan rangkaian persamaan aljabar yang melibatkan nilai – nilai pada titik – titik diskrit pada bagian yang dievaluasi.

Metode elemen hingga umumnya membagi tanah menjadi unit – unit terpisah yang disebut elemen hingga (*finite elemen*). Hal ini dapat dilihat pada **Gambar 2.17**. Unsur – unsur inisialing berhubungan pada titik simpulnya (*nodes*) dan batas yang sudah ditentukan (*boundary*). Perumusan elemen hingga umumnya digunakan untuk aplikasi geoteknik yang menghasilkan bentuk penurunan, tekanan dan tegangan pada titik simpul. Banyak program komputer yang menganut metode elemen hingga. Salah satu contohnya Program Plaxis



Gambar 2.17 Definisi Hubungan yang digunakan Metode Elemen Hingga (Sumber: Lee W. Abramson, 2002)

Dalam metode elemen hingga domain dari daerah yang dianalisis dibagi kedalam sejumlah zona –zona yang lebih kecil. Zona – zona kecil tersebut dinamakan elemen. Elemen – elemen tersebut dianggap saling berkaitan satu sama lain pada sejumlah titik – titik simpul.

Perpindahan pada setiap titik – titik simpul dihitung terlebih dahulu, kemudian dengan sejumlah fungsi interpolasi yang diasumsikan, perpindahan pada sembarang titik dapat dihitung berdasarkan nilai perpindahan pada titik – titik simpul.

Selanjutnya regangan yang terjadi pada setiap elemen dihitung berdasarkan besarnya perpindahan pada masing-masing titik simpul. Berdasarkan nilai regangan tersebut dapat dihitung tegangan yang bekerja pada setiap elemen terdapat dua pendekatan yang umum digunakan dalam analisis kestabilan lereng dengan menggunakan metode elemen hingga, yaitu:

A. Metode Pengurangan Kekuatan Geser (*Strength Reduction Method*)

Prinsip dari metode ini yaitu, kekuatan geser material nilainya dikurangi secara bertahap sampai terbentuk suatu mekanisme keruntuhan pada lereng. Pengurangan parameter kohesi(C) dan sudut geser (ϕ) dapat dinyatakan dengan **Rumus 2.8** dan **Rumus 2.9** sebagai berikut:

$$C_f = \frac{c}{SRF} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{SRF} \right) \dots \dots \dots (2.9)$$

dimana:

SRF = faktor reduksi kekuatan geser

Faktor keamanan (F) besarnya sama dengan nilai SRF pada saat tepat terjadi keruntuhan.

B. Metode Penambahan Gravitasi (*Gravitation Increase Methode*)

dimana:

FS adalah faktor keamanan

Cu adalah kuat geser tanah dalam kondisi *undrained*

R adalah radius bidang kelongsoran dari pusat lingkaran

W adalah gaya akibat beban tanah ke-n

x adalah jarak horizontal dari pusat lingkaran terhadap titik berat bidang longsor

ϕ adalah sudut geser tanah

Analisis stabilitas metode elemen hingga ini dilakukan dengan menggunakan program Plaxis 2D.

2.12.3 Simulasi Model

Plaxis dimaksudkan sebagai suatu alat bantu analisis untuk digunakan oleh para ahli geoteknik yang tidak harus menguasai metode numerik. Umumnya para praktisi menganggap bahwa perhitungan dengan metode elemen hingga yang non-linear adalah sulit dan menghabiskan banyak waktu. Aplikasi geoteknik umumnya membutuhkan model konstitutif tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku tanah maupun batuan yang non-linear, bergantung pada waktu serta anistropis. Program Plaxis dilengkapi oleh beberapa adalah sulit dan menghabiskan banyak waktu. Tim riset dan pengembangan Plaxis menjawab masalah tersebut dengan merancang prosedur-prosedur fitur untuk menghadapi berbagai aspek struktur dan geoteknik yang kompleks. Ringkasan mengenai fitur-fitur penting dalam plaxis antara lain adalah sebagai berikut:

a. Pembuatan Model Geometri Secara Grafis

Masukan berupa pelapisan tanah, elemen-elemen struktur, tahapan konstruksi, pembebanan serta kondisi-kondisi batas dilakukan dengan menggunakan prosedur

grafis yang mudah dengan bantuan komputer yang memungkinkan pembuatan model geometri berupa penampang melintang yang mendetail. Dari model geometri ini jaring elemen hingga 2D dapat dengan mudah dibentuk.

b. Pembentukan Jaring Elemen Secara Otomatis

Plaxis secara otomatis akan membentuk jaring elemen hingga 2D yang acak dengan pilihan untuk memperhalus jaring elemen secara global maupun lokal.

c. Elemen Ordo Tinggi

Tersedia elemen segitiga kuadratik dengan 6 buah titik nodal dan elemen segitiga ordo keempat dengan 15 buah titik nodal untuk memodelkan deFormasi dan kondisi tegangan dalam tanah.

d. Pelat

Elemen balok khusus dapat digunakan untuk memodelkan lentur dari dinding tanah penahan, lining terowongan, elemen cangkang serta struktur-struktur tipis lainnya. Perilaku dari elemen-elemen ini diatur oleh kekakuan lentur, kekakuan arah normal penampang dan momen lentur batas. Sendi plastis dapat digunakan untuk elemen pelat yang bersifat elastoplastis saat momen batas termobilisasi. Elemen pelat dengan antarmuka dapat digunakan untuk melakukan analisis yang realistis dari struktur- struktur geoteknik.

e. Interface (Antarmuka)

Elemen antar muka atau elemen penghubung dapat digunakan untuk memodelkan interaksi tanah-stuktur. Sebagai contoh, elemen-elemen ini dapat digunakan untuk memodelkan zona tipis diantara lining terowongan dengan tanah di sekelilingnya yang mengalami intensitas geser yang tinggi. Nilai sudut geser dan kohesi dari elemen antarmuka umumnya berbeda dengan nilai sudut geser dan kohesi dari tanah di sekitarnya.

f. Angkur

Elemen pegas elastoplastis digunakan untuk memodelkan pengankuran dan penopang horizontal. Perilaku elemen-elemen ini diatur oleh kekakuan normal penampang dan sebuah gaya maksimum. Sebuah pilihan khusus juga tersedia untuk analisis pada angkur tanah prategang ataupun sistem penopang prategang lainnya pada galian.

g. Geogrid

Geogrid (*geotekstil*) sering digunakan dalam praktek untuk timbunan yang membutuhkan perkuatan atau untuk struktur penahan tanah. Elemen-elemen ini dapat dimodelkan dalam plaxis dengan menggunakan elemen-elemen yang khusus untuk menahan gaya tarik. Elemen ini juga dapat dikombinasikan dengan elemen antarmuka untuk memodelkan interaksi dengan tanah di sekelilingnya.

h. Model Elastisitas Linier

Model ini menyatakan hukum Hooke tentang elastisitas linier isotropis. Model ini meliputi dua buah parameter kekakuan, yaitu modulus Young (E), dan angka Poisson (ν). Model linier elastis sangat terbatas untuk pemodelan perilaku tanah. Model ini terutama digunakan pada struktur-struktur yang kaku dalam tanah.

i. Model Hardening Soil (HS)

Model Hardening Soil merupakan model tingkat lanjut untuk memodelkan perilaku tanah pada model Mohr-Coulomb, kondisi tegangan batas dideskripsikan oleh kohesi (c), sudut geser (ϕ) dan sudut dilatasi (ψ). Namun demikian, kekakuan tanah dideskripsikan lebih akurat dengan menggunakan tiga kekakuan yang berbeda yaitu, kekakuan pembebanan triaksial (E_{50}), kekakuan pengurangan beban (unloading) triaksial (E_{ur}) dan kekakuan pembebanan satu arah (E_{oed}). Untuk nilai tipikal dari berbagai jenis tanah, dapat digunakan $E_{ur} \approx 3E_{50}$ dan

$E_{oed} \approx E_{50}$, tetapi tanah yang sangat lunak dan tanah yang sangat kaku cenderung memberikan rasio E_{oed}/E_{50} yang berbeda.

Berbeda dengan model Mohr-Coulomb, model Hardening Soil mengikutsertakan modulus kekakuan yang bergantung pada tegangan. Hal ini berarti bahwa kekakuan akan semakin meningkat terhadap tegangan. Karena itu, ketiga kekakuan merupakan nilai yang berhubungan dengan sebuah tegangan acuan, yang umumnya diambil sebesar 100 kPa (1 bar). Model ini merupakan model hardening yang tidak mengikutsertakan pelunakan tanah akibat dilatasi dan efek lepasnya ikatan antar butir. Sebagai catatan, penggunaan model Hardening Soil umumnya menghasilkan waktu perhitungan yang lebih lama, karena pembentukan dan dekomposisi matriks kekakuan dari material dilakukan dalam tiap langkah perhitungan.

j. Model Mohr-Coulomb

Model yang sederhana namun handal ini didasarkan pada parameter-parameter tanah yang telah dikenal dengan baik dalam praktek rekayasa teknik sipil. Walaupun demikian tidak semua fitur non-linear tercakup dalam model ini. Model Mohr-Coulomb dapat digunakan untuk menghitung tegangan pendukung yang realistis pada muka terowongan, beban batas pada pondasi dan lain-lain. Model ini juga dapat digunakan untuk menghitung faktor keamanan dengan menggunakan pendekatan 'reduksi ϕ - c '.

k. Tekanan Air Pori Hidrostatik

Distribusi tekanan air pori yang kompleks dapat dihitung berdasarkan elevasi dari grafis freatik atau masukan langsung berupa nilai-nilai tekanan air. Sebagai alternatif, perhitungan aliran air statis dalam tanah dapat dilakukan untuk memperoleh distribusi tekanan air pori pada amasalah-masalah aliran statis atau rembesan.

l. Analisis Konsolidasi

Semakin berkurangnya tekanan air pori berlebih terhadap waktu dapat dihitung dengan menggunakan sebuah analisis konsolidasi. Suatu perhitungan konsolidasi membutuhkan masukan berupa koefisien permeabilitas tanah untuk tiap lapisan tanah. Penggunaan prosedur peningkatan langkah waktu secara otomatis akan membuat analisis menjadi mudah dilakukan namun tetap handal.

m. Tampilan Luaran (*Output*)

Program plaxis memiliki fitur-fitur grafis yang sangat baik untuk menampilkan hasil-hasil dari perhitungan. Nilai-nilai perpindahan, tegangan, regangan dan gaya-gaya dalam dari elemen struktural dapat diperoleh dari tabel keluaran. Keluaran berbentuk grafis maupun tabel dapat langsung dicetak, disimpan ke media penyimpan ataupun langsung ke dalam memori *clipboard* dari windows untuk dapat digunakan dalam perangkat lunak lain.

n. Lintasan Tegangan

Sebuah pilihan khusus tersedia untuk menggambarkan kurva beban terhadap perpindahan, lintasan tegangan atau jalur tegangan, lintasan regangan, kurva tegangan- regangan serta kurva penurunan terhadap waktu. Visualisasi dari lintasan tegangan akan memberikan informasi yang berharga terhadap perilaku tanah secara lokal dan memungkinkan analisis yang mendetail terhadap hasil dari perhitungan dengan menggunakan Plaxis.