

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Tinjauan Umum Tanah

Tanah menduduki peran yang sangat vital dalam sebuah konstruksi bangunan. Tanah berguna sebagai bahan bangunan dalam berbagai macam pekerjaan teknik sipil. Fungsi paling utama dari tanah adalah sebagai pendukung pondasi dari sebuah bangunan. Fungsi tanah sebagai pendukung pondasi dari bangunan memerlukan kondisi tanah yang stabil, sehingga apabila ada sifat tanah yang kurang mampu mendukung bangunan harus diperbaiki terlebih dahulu agar mencapai daya dukung tanah yang diperlukan. Salah satu jenis tanah yang mempunyai daya dukung rendah adalah jenis tanah lunak (Panduan Geoteknik 1, 2001).

Menurut Braja M. Das (1995) dalam pengertian teknik secara umum, tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari agregat (butiran) mineral-mineral padat yang tidak tersementasi (terikat secara kimia) satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk (yang berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut.

Untuk keperluan-keperluan teknis, tanah dianggap merupakan suatu lapisan sedimen lepas seperti kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), lempung (*clay*) atau suatu campuran dari bahan-bahan tersebut. Hendaknya jangan dikacaukan dengan definisi tanah secara geologis, yang merupakan bahan organik pada permukaan yang terpengaruh cuaca, atau tanah lapisan-atas (*top soil*). Tanah lapisan atas pada umumnya dibongkar sebelum suatu proyek teknis dikerjakan

Sedangkan menurut Bowles (1984), tanah adalah campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau seluruh jenis berikut:

- a. Berangkal (*boulders*) adalah potongan batuan yang besar, biasanya lebih besar dari 250 sampai 300 mm dan untuk ukuran 150 sampai 250 mm, fragmen batuan ini disebut kerakal (*cobbles/pebbles*).
- b. Kerikil (*gravel*) adalah partikel batuan yang berukuran 5 mm sampai 150 mm

- c. Pasir (*sand*) adalah partikel batuan yang berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, yang berkisar dari kasar dengan ukuran 3 mm sampai 5 mm sampai bahan halus yang berukuran < 1 mm.
- d. Lanau (*silt*) adalah partikel batuan yang berukuran dari 0,002 mm sampai 0,0074 mm.
- e. Lempung (*clay*) adalah partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm yang merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
- f. Koloid (*colloids*) adalah partikel mineral yang diam dan berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

Catatan mengenai jenis-jenis tanah berikut ini mencakup nama-nama yang biasa dipakai oleh insinyur praktis serta mandor berpengalaman, untuk klasifikasi tanah di lapangan.

Pasir dan Kerikil merupakan agregat tak berkohesi yang tersusun dari fragmen-fragmen sub-angular atau angular, agaknya berasal dari batuan atau mineral yang belum mengalami perubahan. Partikel berukuran sampai 1/8 inci dinamakan pasir, dan yang berukuran 1/8 sampai 6 atau 8 inci disebut kerikil. Fragmen-fragmen bergaris-tengah lebih besar dari 8 inci dikenal sebagai bongkah (*boulders*).

*Hardpan* merupakan tanah yang tahanannya terhadap penetrasi alat pemboran besar sekali. Sebagian besar "hardpan" dijumpai dalam keadaan bergradasi baik. luar biasa padat, dan merupakan agregat partikel mineral yang kohesif.

Lanau anorganik (*anorganic silt*) merupakan tanah berbutir halus dengan plastisitas kecil atau samasekali tak ada. Jenis yang plastisitasnya paling kecil biasanya mengandung butiran kuarsa sedimen, yang kadang-kadang disebut: tepurig batuan (*rock flour*), sedangkan yang sangat plastis mengandung partikel berwujud serpihan dan dikenal sebagai lanau plastis. Karena teksturnya halus, lanau anorganik sering dianggap sebagai lempung, tetapi sebenarnya dapat dibedakan tanpa pengujian laboratorium. Jika diguncang dalam telapak tangan, selapis lanau anorganik jenuh akan mengeluarkan air sehingga permukaannya akan nampak berkilat. Selanjutnya bila ditekukkan di antara jari tangan, permukaannya kembali pudar tak berkilat. Prosedur ini dikenal sebagai uji

guncangan. Setelah kering, lapisan menjadi rapuh, dan debu dapat dikelupas dengan menggosokkan jari tangan. lanau relatif bersifat kedap air. namun dalam keadaan lepas lanau bisa naik ke lubang pengeborana atau lubang galian seperti layaknya suatu cairan kental. Tanah paling tidak stabil. menurut kategori ini, dikenal secara setempat dengan nama berbeda-beda, misalnya: hati sapi (*hull's liver*).

Lanau organik merupakan tanah agak plastis, berbutir halus dengan campuran partikel-partikel bahan organik terpisah secara halus. Mungkin pula dijumpai adanya kulit-kulit dan fragmen tumbuhan yang meluruh sebagian. Warna tanah bervariasi dari abu-abu terang ke abu-abu sangat gelap, di samping itu mungkin mengandung  $H_2S$ ,  $CO_2$ , serta berbagai gas lain hasil peluruhan tumbuhan yang akan memberikan bau khas kepada tanah. Permeabilitas lanau organik sangat rendah sedang kompresibilitasnya sangat tinggi.

Lempung merupakan agregat partikel-partikel berukuran mikroskopik dan submikroskopik yang berasal dari pembusukan kimiawi unsur-unsur penyusun batuan. dan bersifat plastis dalam selang kadar air sedang sampai luas. Dalam keadaan kering sangat keras, dan tak mudah terkelupas hanya dengan jari tangan. Permeabilitas lempung sangat rendah. Istilah "gumbo" digunakan, khususnya di Amerika bagian barat, untuk lempung yang keadaan plastisnya ditandai dengan wujudnya yang bersabun atau seperti terbuat dari lilin, serta amat keras. Pada kadar air yang lebih tinggi (basah) lempung tersebut bersifat lengket.

Lempung organik adalah lempung yang sebagian sifat-sifat fisis pentingnya dipengaruhi oleh adanya bahan organik yang terpisah. Dalam keadaan jenuh lempung organik cenderung bersifat sangat kompresibel, tapi pada keadaan kering kekuatannya (*strength*) sangat tinggi. Warnanya biasanya abu-abu tua atau hitam, di samping itu mungkin berbau menyolok.

Gambut (*peat*) adalah agregat agak berserat yang berasal dari serpihan makroskopik dan mikroskopik tumbuh-tumbuhan. Warnanya bervariasi antara coklat terang dan hitam. Gambut juga kompresibel, sehingga hampir selalu tak mungkin menopang pondasi. Berbagai macam teknik telah dicoba pengembangannya dalam rangka mendirikan tanggul tanah di atas lapisan gambut tanpa risiko runtuh, namun penurunan (*settlement*) tanggul semacam ini tetap

cenderung besar serta berlanjut dengan laju yang makin berkurang selama bertahun-tahun.

Seandainya suatu tanah tersusun dari dua jenis tanah yang berbeda, maka campuran yang terbanyak (dominan) dinyatakan sebagai kata benda, sedang yang lebih sedikit atau kurang menonjol dinyatakan sebagai kata sifat. Misalnya: pasir lanauan, menyatakan tanah yang mengandung banyak pasir, sedangkan lanau hanya berjumlah sedikit saja. Lempung pasiran adalah tanah yang memperlihatkan sifat-sifat sebuah lempung tetapi mengandung sedikit pasir. (Karl Terzaghi dan Ralph B. Peck, 1987:5). Untuk menerangkan tentang tanah berdasarkan ukuran-ukuran partikelnya, terdapat jenis-jenis tanah yang di pisahkan (*soil separated soil limits*) pada tabel 2.1 Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah.

**Tabel 2. 1** Batasan-Batasan Ukuran Golongan Tanah

Nama Golongan	Ukuran Butiran (mm)			
	Kerikil	Pasir	Lanau	Lempung
<i>Massachusetts Institute of Technology (MIT)</i>	> 2	2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002
<i>U.S Department of Agriculture (USDA)</i>	> 2	2 - 0,05	0,05 - 0,002	< 0,002
<i>American Association of State Highway Transportation Officials (ASSHTO)</i>	76,2 – 2	2 - 0,075	0,075 - 0,002	< 0,002
<i>Unified Soil Classification System (U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation)</i>	76,2 - 4,75	4,75 - 0,075	Halus (yaitu lanau dan lempung) < 0,075	

(Sumber: Das, 1995)

Kerikil, pasir, lanau, dan lempung adalah istilah-istilah umum dipakai untuk menyatakan tanah. Kerikil dan pasir dikenal sebagai tanah berbutir kasar, sedangkan lanau dan lempung dikenal sebagai tanah halus. Material butir kasar adalah fragmen mineral yang dapat diidentifikasi terutama berdasarkan ukuran partikel. Apabila diameter partikelnya melebihi 5 mm diklasifikasikan sebagai kerikil. Apabila butiran tanah dapat dilihat dengan mata telanjang diameter

partikelnya kurang 5 mm diklasifikasikan sebagai pasir. Nama ini biasanya dimodifikasi lebih lanjut sebagai kasar, sedang, dan halus.

## 2.2 Tanah Timbunan

### 2.3.1 Timbunan Biasa

Timbunan biasa adalah timbunan yang digunakan untuk pencapaian elevasi akhir *subgrade* yang disyaratkan dalam gambar perencanaan tanpa maksud khusus lainnya. Timbunan biasa ini

juga digunakan untuk penggantian material eksisting *subgrade* yang tidak memenuhi syarat. Bahan urugan biasa harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

- a. Timbunan yang diklasifikasikan sebagai timbunan biasa harus terdiri dari tanah yang disetujui oleh Pengawas yang memenuhi syarat untuk digunakan dalam pekerjaan permanen.
- b. Bahan yang dipilih sebaiknya tidak termasuk tanah yang berplastisitas tinggi, yang diklasifikasikan sebagai A-7-6 menurut SNI-03-6797-2002 (AASHTO M145-91(2012)) 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 plastis seperti itu sama sekali tidak boleh digunakan pada 30 cm lapisan langsung dibawah bagian dasar perkerasan atau bahu jalan atau tanah dasar bahu jalan. Sebagai tambahan, timbunan untuk lapisan ini bila diuji dengan SNI 1744:2012, harus memiliki CBR tidak kurang dari 6% (CBR setelah perendaman 4 hari bila dipadatkan 100% kepadatan kering maksimum (MDD) seperti yang ditentukan oleh SNI 1742:2008)
- c. Tanah sangat ekspansif yang memiliki nilai aktif lebih besar dari 1,25 atau derajat pengembangannya yang diklasifikasikan oleh AASHTO T258-81 (2013) sebagai “*very high*” atau “*extra high*” tidak boleh digunakan sebagai bahan timbunan. Nilai aktif adalah perbandingan antara Indeks Plastisitas / PI – (SNI 1966:2008) dan persentase kadar lempung (SNI 3423:2008)

### 2.3.2 Timbunan Pilihan

Timbunan pilihan adalah timbunan yang digunakan untuk pencapaian elevasi akhir *subgrade* yang disyaratkan dalam gambar perencanaan dengan maksud khusus lainnya, misalnya untuk mengurangi tebal lapisan fondasi bawah, untuk memperkecil gaya lateral tekanan tanah dibelakang dinding penahan tanah badan jalan. Bahan timbunan pilihan harus memenuhi persyaratan-persyaratan sebagai berikut:

- a. Timbunan hanya boleh diklasifikasikan sebagai “Timbunan Pilihan” bila digunakan pada lokasi atau untuk maksud yang telah ditentukan atau disetujui secara tertulis oleh Pengawas.
- b. Timbunan yang diklasifikasikan sebagai timbunan pilihan harus terdiri dari bahan tanah atau batu yang memenuhi semua ketentuan di atas untuk timbunan biasa dan sebagai tambahan harus memiliki sifat-sifat tertentu yang tergantung dari maksud penggunaannya. Dalam segala hal, seluruh timbunan pilihan harus memenuhi, bila diuji dengan SNI 1644:2012, memiliki CBR paling sedikit 10% dari 4 hari perendaman bila dipadatkan sampai 100% kepadatan kering maksimum sesuai dengan SNI 1743:2008.

### 2.3 Hidrasi

Partikel mineral lempung biasanya bermuatan negatif sehingga partikel lempung hampir selalu mengalami hidrasi, yaitu dikelilingi oleh lapisan-lapisan molekul air dalam jumlah yang besar. Partikel mineral selalu mengalami hidrasi, hal ini dikarenakan lempung biasanya bermuatan negatif, yaitu partikel dikelilingi oleh lapisan-lapisan molekul air yang disebut sebagai air teradsorpsi. Lapisan ini umumnya memiliki tebal dua molekul. Lapisan ini sering mempunyai tebal dua molekul dan disebut lapisan difusi, lapisan difusi ganda atau lapisan ganda adalah lapisan yang dapat menarik molekul air atau kation yang disekitarnya. Lapisan ini akan hilang pada temperatur yang lebih tinggi dari 60° sampai 100° C dan akan mengurangi plastisitas alamiah, tetapi sebagian air juga dapat menghilang cukup dengan pengeringan udara saja.

Tanah harus bebas dari bahan organik yang dapat mengganggu proses hidrasi dari semen *portland*. Bilamana diuji sesuai prosedur SNI 19-6426-2000, nilai pH nya setelah berselang satu jam harus lebih besar dari 12,2. Pengujian ini

hanya dilakukan bilamana pengerasan berjalan lambat atau kekuatan campuran untuk stabilisasi tanah dasar atau lapis fondasi jalan yang diperoleh rendah.

#### **2.4 Pengaruh Air**

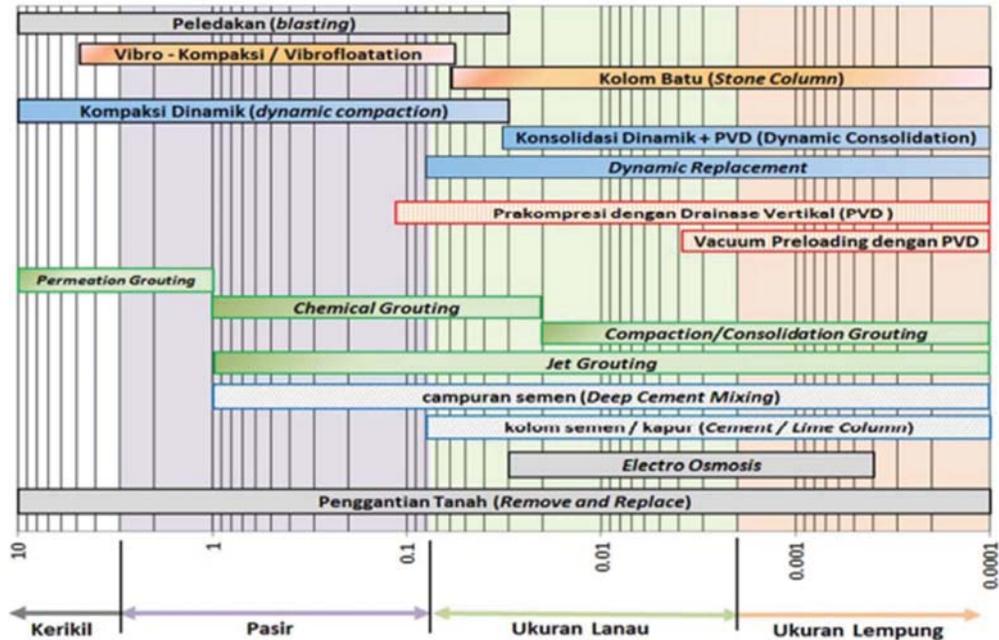
Fase air yang berada di dalam struktur tanah lempung adalah air yang tidak murni secara kimiawi. Pada pengujian di laboratorium untuk batas-batas *Atterberg*, ASTM menentukan bahwa air suling ditambahkan sesuai dengan keperluan. Air berfungsi sebagai penentu sifat plastisitas dari lempung. Satu molekul air memiliki muatan positif dan muatan negatif pada ujung yang berbeda (dipolar). Air yang digunakan haruslah air tawar, dan bebas dari endapan maupun larutan atau bahan suspensi yang mungkin dapat merusak, dan harus memenuhi ketentuan yang disyaratkan dalam SNI 7974:2016.

#### **2.5 Stabilisasi Tanah**

Stabilisasi tanah merupakan suatu usaha untuk memperbaiki sifat tanah secara teknis dengan menggunakan bahan-bahan tertentu. Pekerjaan ini umumnya dilakukan dengan mencampur tanah dengan jenis tanah lain sehingga gradasi yang diinginkan bisa didapatkan. Selain itu, pencampuran tanah juga dapat dilakukan dengan menggunakan bahan-bahan buatan pabrik agar sifat-sifat teknis dari tanah bisa lebih baik.

Dalam buku ajar stabilisasi tanah oleh Darwis (2001), stabilisasi tanah adalah suatu metode yang digunakan untuk meningkatkan kemampuan daya dukung suatu lapisan tanah dengan cara memberikan perlakuan (*treatment*) khusus terhadap lapisan tanah tersebut. Dengan demikian dapat diketahui bahwa tujuan dari stabilisasi tanah adalah minimal memenuhi satu dari empat sasaran berikut ini:

1. Untuk memperbaiki (meningkatkan) daya dukung tanah.
2. Untuk memperbaiki (memperkecil) penurunan lapisan tanah.
3. Untuk memperbaiki (menurunkan) permeabilitas dan *swelling* potensial tanah.
4. Untuk menjaga (mempertahankan) potensi tanah yang ada (*existing strength*).



**Gambar 2. 1**Metode Perbaikan Tanah

(Sumber: SNI 8460:2017 Perancangan Geoteknik, Halaman: 67)

Dari keempat sasaran dari suatu proses stabilisasi yang diuraikan di atas, sangat jarang dapat dicapai secara bersamaan. Akan tetapi harus selalu diupayakan agar dapat tercapai perbaikan parameter yang diinginkan, tanpa mengakibatkan pengrusakan parameter lainnya. Menurut *Bowles* (1986), beberapa tindakan yang dilakukan untuk menstabilisasikan tanah adalah sebagai berikut:

1. Meningkatkan kerapatan tanah.
2. Menambah material yang tidak aktif sehingga meningkatkan kohesi dan/atau tahanan gesek yang timbul.
3. Menambah bahan untuk menyebabkan perubahan-perubahan kimiawi dan/atau fisis pada tanah.
4. Menurunkan muka air tanah (drainase tanah).
5. Mengganti tanah yang buruk.

Untuk mencapai tujuan tersebut, proses stabilisasi ini dapat dilakukan dengan cara paling sederhana seperti pemadatan, hingga menggunakan teknik yang lebih efektif dan juga memerlukan dana yang cukup besar, yakni dengan mencampur tanah dengan pasir atau semen, *grouting* atau injeksi semen, abu

terbang, pemanasan dan lain sebagainya. Terdapat empat cara umum yang bisa dilakukan untuk menstabilkan tanah, antara lain:

- Stabilisasi secara Mekanis  
Cara ini dilakukan dengan mencampur dua atau lebih macam tanah dengan gradasi berbeda sehingga materialnya menjadi lebih baik, kuat dan memenuhi syarat. Cara ini juga bisa dilakukan dengan membongkar tanah di lokasi, kemudian menggantinya dengan material yang lebih memenuhi syarat.
- Stabilisasi secara Kimiawi  
Cara ini digunakan dengan menambahkan bahan stabilisasi yang dapat mengubah sifat-sifat kurang menguntungkan dari tanah. Biasanya digunakan pada tanah yang berbutir halus. Bahan yang digunakan untuk stabilisasi tanah disebut *stabilizing agent*.
- Stabilisasi secara Hidrolis  
Cara ini dilakukan dengan memanfaatkan lembaran plastik sebagai drainase vertikal yang panjang dan mempunyai kantung yang merupakan kombinasi antara *polypropylene* dan lapisan pembungkus dari bahan geotekstil atau yang umumnya dinamai *Prefabricated Vertical Drain (PVD)*. PVD merupakan metode umum yang digunakan untuk memampatkan lapisan tanah lunak dengan kapasitas daya dukung dasar yang rendah. PVD mampu meningkatkan kekuatan tanah yang diperoleh dari pemadatan tanah halus, dimana stabilitas adalah faktor yang harus diperhatikan. Jika dilihat dari sudut pandang yang berbeda, dibandingkan dengan *sand drain*, PVD lebih ekonomis dan mengurangi gangguan yang dapat mengurangi stabilitas tanah serta pemasangan yang lebih mudah.
- Stabilisasi dengan Bahan Tambahan  
Cara ini dilakukan dengan menambahkan bahan tertentu pada tanah agar dapat memenuhi syarat. Bahan yang ditambahkan biasanya dari pabrik dan zat kimia dicampurkan dengan perbandingan tepat sehingga meningkatkan sifat tanah dan membuatnya lebih kuat serta memenuhi syarat.

Ukuran Partikel	Lebih dari 25% lolos 0.425 mm			Kurang dari 25% lolos 0.425 mm		
Plastisitas	PI ≤ 10	10 ≤ PI ≤ 20	PI ≥ 20	PI ≤ 6, WPI < 60	PI ≤ 10	PI > 10
<b>Tipe Pengikat</b>						
Semen dan semen campuran*						
Kapur						
Bitumen						
Campuran aspal/ semen						
Berbutir						
Polimer						
Bahan Kimia Lain**						
<b>Keterangan:</b>	umumnya sesuai 		diragukan atau memerlukan bahan pengikat 		umumnya tidak sesuai 	

\* Penggunaan beberapa pengikat bahan kimia sebagai bahan tambahan dapat memperpanjang efektivitas pengikat bersemen (cementitious). Bahan kimia adalah bahan tambahan semen atau *additive* sesuai buku petunjuk beton.

\*\* Hanya diambil sebagai panduan. Rujuk literatur lain untuk informasi lainnya pada tanah berbutir halus atau plastisitas lebih tinggi.

**Gambar 2. 2** Pemilihan Metode Stabilisasi

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan, Halaman: 8-4)

## 2.6 Semen

Semen memiliki kandungan beberapa senyawa kimia yang mempengaruhi kualitas semen itu tersendiri. Secara umum, semen adalah bubuk abu-abu gelap yang terbuat dari kapur (CaO), silika (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), iron oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnesium oksida (MgO), sulfur trioksida (SO<sub>3</sub>), dan alkali (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O). Ada tiga jenis semen yang umum digunakan di Indonesia yaitu OPC (*Ordinary Portland Cement*), PCC (*Portland Composite Cement*) dan PPC (*Portland Pozzolan Cement*). Adapun pengertian masing-masing semen adalah sebagai berikut.

### 1. *Ordinary Portland Cement* (OPC)

Semen Portland terdiri atas lima tipe dengan perbedaan manfaat sebagai berikut:

- a. Semen Portland Tipe I adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen Portland utamanya yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain.

- b. Semen Portland Tipe II adalah semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
- c. Semen Portland Tipe III adalah semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- d. Semen Portland Tipe IV adalah semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.
- e. Semen Portland Tipe V adalah semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

2. *Portland Pozzolan Cement (PPC)*

Semen Portland pozolan adalah suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen Portland dengan pozolan halus. Semen ini diproduksi dengan menggiling klinker bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen Portland dengan bubuk pozolan. Bisa pula gabungan antara menggiling dan mencampur, di mana kadar pozolan 6 % sampai dengan 40 % massa semen Portland pozolan.

3. *Portland Composite Cement (PCC)*

Semen Portland komposit adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen Portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen Portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6%-35% dari massa semen Portland komposit.

Semen yang digunakan untuk stabilisasi lapis fondasi tanah semen adalah semen Portland tipe 1 yang memenuhi ketentuan SNI 2049:2015 atau *Portland Composite Cement (PCC)* yang memenuhi SNI 7064:2014 atau *Portland Pozzolan Cement (PPC)* yang memenuhi ketentuan SNI 0302:2014. Kadar semen yang digunakan untuk stabilisasi tanah-semen harus dalam rentang 3% sampai dengan 8% dari berat tanah asli dalam keadaan kering

oven sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan.

## 2.7 *Spent Bleaching Earth*

*Spent Bleaching Earth* merupakan limbah padat dari industri pemurnian minyak nabati, yaitu sisa proses pemucatan *Crude Palm Oil* (CPO) yang terbentuk dari campuran antara *Bleaching Earth* (BE) dan senyawa organik yang berasal dari CPO. SBE merupakan limbah yang mengandung mineral Montmorillonite (pembangunan dari struktur Bentonite) dari lapisan ke-18 dengan rumus kimia  $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$  sekitar 85% dan fragmen sisanya terdiri dari campuran mineral kuarsa, gypsum, kaolinite, dan lain-lain (Supeno, 2008).

Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No 22 Tahun 2021 Tentang Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, dalam Lampiran XIV pada PP tersebut, SBE dikategorikan sebagai limbah non-B3 dengan kode N108 dengan penjelasan yaitu “Proses industri *oleochemical* dan/atau pengolahan minyak hewani atau nabati yang menghasilkan SBE hasil ekstraksi (SBE Ekstraksi) dengan kandungan minyak kurang dari atau sama dengan 3 persen“. Poin penjelasan tersebut juga merujuk jika kandungan minyak pada SBE lebih dari 3 persen, maka SBE tersebut masuk kedalam daftar limbah B3 dari Sumber Spesifik Khusus dengan kode B413. Regulasi terkait perubahan status SBE menjadi limbah non B3 tersebut berubah dari Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014. Dalam PP tersebut, SBE dikategorikan sebagai limbah B3 dari Sumber Spesifik Khusus dengan kode B413 Kategori 2, artinya limbah tersebut yang memiliki efek tunda (*delayed effect*) dan berdampak tidak langsung terhadap manusia dan lingkungan hidup.

Adapun kebijakan Kementerian PUPR dalam pemanfaatan material sebagai bahan konstruksi jalan, mengacu pada spesifikasi umum bidang jalan dan jembatan. Secara umum apabila material limbah B3 akan digunakan sebagai material jalan harus memenuhi spesifikasi yang ditentukan dalam buku spesifikasi umum bidang jalan Tahun 2018. Untuk menjadikan material limbah B3 sebagai material jalan, perlu dilakukan pengujian-pengujian mutu material limbah B3. Semuanya harus sesuai spesifikasi, apakah untuk material pilihan atau timbunan,

material pengganti *subgrade*, material *sub-base*, *base* dan lapisan perkerasan baik perkerasan aspal atau beton semen.



**Gambar 2.3** Flow Chart Konsep Kebijakan Dalam Pemanfaatan Limbah B3 Dalam Bidang Jalan

(Sumber: Buletin Bina Marga Berkarya, Vol. 1 Edisi Oktober 2020)

Hasil kajian penelitian yang dilakukan oleh Puslitbang Jalan dan Jembatan sampai dengan 2019, menunjukkan bahwa material Limbah B3 berpotensi untuk digunakan sebagai material konstruksi jalan. Limbah B3 yang dimaksud adalah *fly-ash*, *bottom ash*, slag baja, slag nikel, tailing serta limbah sawit De-OBE (*De Oiled Bleaching earth*). Adapun potensi pemanfaatan material limbah B3 adalah sebagai material pilihan atau material timbunan, material lapis fondasi tanah (*sub-grade*), material lapis fondasi bawah/atas (*sub-base/base*), sebagai material agregat lapis perkerasan aspal dan beton semen, serta material agregat bangunan pelengkap jalan.

ASTM C-618 mendefinisikan bahan yang bersifat pozzolan sebagai *a siliceous or siliceous and aluminous material which, in itself, possesses little or no cementitious value but which will, in finely divided form in the presence of moisture, react chemically with calcium hydroxide at ordinary temperature to form compounds possessing cementitious properties*. Dengan demikian pengertian *Spent Bleaching Earth* sebagai bahan *pozzolanic*, adalah:

- Bahan yang mengandung senyawa silika atau silika + alumina.
- Secara independen sangat sedikit atau tidak mempunyai kemampuan mengikat (*non-cementitious*).

- Dalam bentuk yang sangat halus dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (dengan kelembaban yang cukup dan dalam suhu ruangan) untuk membentuk suatu bahan yang mempunyai sifat mengikat (*cementitious*).

*Spent Bleaching Earth* telah diuji menggunakan metode ED-XRF Panalytical Epsilon 3 XLE oleh Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) di Lampung dengan hasil pengujian pada Tabel 2.3.

**Tabel 2. 2** Hasil Pengujian XRF *Spent Bleaching Earth*

<i>Element</i>			<i>Oxide</i>		
<i>Compound</i>	<i>Concentrate</i>	<i>Unit</i>	<i>Compound</i>	<i>Concentrate</i>	<i>Unit</i>
Mg	0,65	%	MgO	0,72	%
Al	8,29	%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,92	%
Si	46,71	%	SiO <sub>2</sub>	58,61	%
P	5,79	%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,72	%
Si	1,25	%	SO <sub>3</sub>	1,54	%
K	4,38	%	K <sub>2</sub> O	2,52	%
Ca	9,29	%	CaO	5,98	%
Ti	2,24	%	TiO	1,62	%
V	506,1	ppm	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	377,3	ppm
Cr	193,3	ppm	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	122	ppm
Mn	0,38	%	MnO	0,21	%
Fe	20,13	%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,71	%
Cu	252,9	ppm	CuO	116,4	ppm
Zn	821,5	ppm	ZnO	376,2	ppm
Ga	110,3	ppm	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54,5	ppm
Rb	566,2	ppm	Rb <sub>2</sub> O	225,2	ppm
Sr	0,209	ppm	SrO	898,2	ppm
Y	177,9	%	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	82	%
Zr	0,141	ppm	ZrO <sub>3</sub>	691,4	ppm

(Sumber: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia di Lampung, 2019)

## 2.8 Stabilisasi Tanah Semen

Stabilisasi tanah dengan semen diartikan sebagai pencampuran antara tanah yang telah dihancurkan, semen dan air, yang kemudian dipadatkan sehingga menghasilkan suatu material baru disebut Tanah – Semen dimana kekuatan, karakteristik deformasi, daya tahan terhadap air, cuaca dan sebagainya dapat disesuaikan dengan kebutuhan untuk perkerasan jalan, pondasi bangunan dan jalan, aliran sungai dan lain-lain (Kezdi, 1979).

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Andriyani et al, 2012 daya dukung tanah pada pemeraman 3 hari secara signifikan. Reaksi sementasi yang terjadi pada campuran tanah semen membentuk butiran baru yang lebih keras sehingga lebih kuat menahan beban yang diberikan. Fenomena tersebut menunjukkan terjadinya pertukaran ion-ion  $K^+$  (potassium) dan  $Na^+$  (sodium) yang terkandung dalam tanah lempung oleh ion-ion  $Ca^{++}$  dan  $Mg^{++}$  yang terkandung didalam semen. Pertukaran kation pada partikel-partikel lempung membuat ukuran partikel menjadi bertambah besar dan mengurangi indeks plastisitas tanah yang kemudian diikuti oleh penurunan potensi pengembangan tanah. Penambahan semen juga akan meningkatkan derajat keasaman (pH) tanah yang berakibat pada peningkatan kapasitas pertukaran ion-ion positif (kation).

Adapun tahapan proses kimia pada stabilisasi tanah menggunakan semen adalah sebagai berikut:

- a. Absorpsi air dan reaksi pertukaran ion;

Bila Semen Portland ditambahkan pada tanah, ion kalsium  $Ca^{++}$  dilepaskan melalui proses hidrolisis dan pertukaran ion berlanjut pada permukaan partikel-partikel lempung. Dengan reaksi ini partikel-partikel lempung menggumpal sehingga mengakibatkan konsistensi tanah menjadi lebih baik.

- b. Reaksi pembentukan kalsium silikat dan kalsium aluminat;

Contoh-contoh umum hidrasi adalah sebagai berikut:



Dari reaksi-reaksi kimia tersebut di atas, maka reaksi utama yang berkaitan dengan kekuatan ialah hidrasi dari A-lit ( $3CaO. SiO_2$ ) dan B-lit ( $2CaO. SiO_2$ ), sehingga membentuk kalsium silikat dan kalsium aluminat yang mengakibatkan kekuatan tanah meningkat.

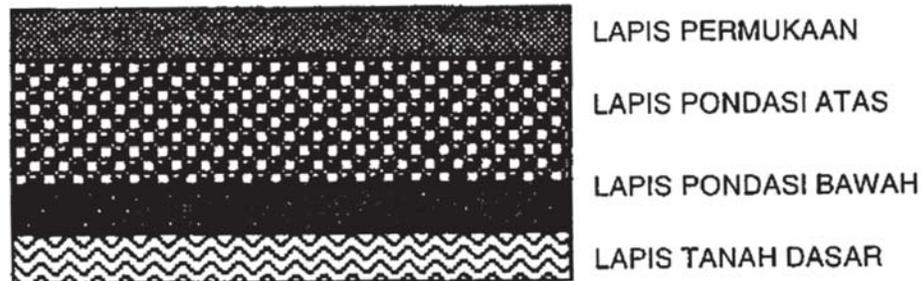
- c. Reaksi pozzolan

Reaksi antara silika ( $SiO_2$ ) dan alumina ( $Al_2O_3$ ) halus yang terkandung dalam tanah lempung dengan kandungan mineral reaktif, sehingga dapat bereaksi dengan semen dan air. Hasil reaksi adalah terbentuknya kalsium silikat hidrat seperti: tobermorit, kalsium aluminat hidrat  $4CaO.Al_2O_3.12H_2O$  dan gehlenit hidrat  $2CaO. Al_2O_3. SiO_2.6 H_2O$  yang tidak larut dalam air.

Pembentukan senyawa-senyawa ini berlangsung lambat dan menyebabkan tanah menjadi lebih keras, lebih padat dan lebih stabil.

## 2.9 Lapis Perkerasan Jalan Raya

Lapisan perkerasan umumnya terdiri dari empat lapis material konstruksi jalan diatas lapisan tanah dasar. Keempat lapisan dari struktur lapis perkerasan jalan dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2. 4** Struktur Lapisan Perkerasan Jalan

(Sumber: Tenriajeng,1999)

1. Lapisan tanah dasar
 

Lapisan tanah dasar adalah lapisan tanah yang berfungsi sebagai perkerasan yang mendukung konstruksi perkerasan jalan diatasnya. Menurut spesifikasinya, tanah dasar adalah lapisan atas timbunan jalan dengan ketebalan 30 cm yang memiliki persyaratan tertentu sesuai fungsinya.
2. Lapisan fondasi bawah (*Sub-base course*)
 

Lapisan pondasi bawah adalah lapisan perkerasan yang terletak diantara lapisan tanah dasar dan lapisan pondasi atas. Lapisan fondasi bawah memiliki fungsi antara lain:

  - a. Bagian dari konstruksi perkerasan untuk menyebarkan beban roda ke tanah dasar.
  - b. Lapisan peresapan agar air tidak berkumpul di fondasi.
  - c. Lapisan ini mencegah partikel-partikel halus dari tanah dasar naik ke lapisan fondasi atas.
3. Lapisan fondasi atas (*Base course*)
 

Lapisan fondasi atas adalah lapisan perkerasan yang terletak diantara lapis fondasi bawah dan lapis permukaan. Lapisan ini mempunyai fungsi sebagai berikut:

- a. Perkerasan yang dapat menahan gaya lintang dari beban roda dan menyebarkan beban ke lapisan di bawahnya.
  - b. Sebagai bantalan terhadap lapisan permukaan.
4. Lapisan permukaan (*Surface course*)
- Lapisan permukaan adalah lapisan yang bersentuhan langsung dengan beban roda kendaraan. Lapisan ini terletak di atas lapisan fondasi atas. Lapisan permukaan memiliki fungsi sebagai berikut:
- a. Lapisan yang langsung menahan beban akibat roda kendaraan
  - b. Lapisan yang langsung menahan gesekan akibat rem kendaraan (lapis aus)
  - c. Lapisan yang mencegah air hujan agar tidak meresap ke lapisan bawahnya yang dapat melemahkan lapisan tersebut
  - d. Lapisan yang menyebarkan beban ke lapisan bawah, sehingga dapat dipikul oleh lapisan di bawahnya.

Bahan-bahan untuk lapis fondasi umumnya harus cukup kuat dan awet sehingga dapat menahan beban-beban roda. Sebelum menentukan suatu bahan untuk digunakan sebagai bahan pondasi, hendaknya dilakukan pengujian untuk mengetahui daya dukung bahan tersebut sesuai spesifikasi yang berlaku. Berbagai macam bahan alam / bahan setempat ( $CBR > 50\%$ ,  $PI < 4\%$ ) dapat digunakan sebagai bahan lapis fondasi, antara lain : batu pecah, kerikil pecah dan stabilisasi tanah dengan semen atau kapur.

**Tabel 2. 3** Sifat-sifat Yang Disyaratkan untuk Stabilisasi Tanah Dasar dan Lapis Fondasi Tanah Semen

PENGUJIAN	BATAS-BATAS SIFAT (Setelah Perawatan 7 Hari)			METODE PENGUJIAN
	Minimum	Target	Maksimum	
<b>Stabilisasi Tanah Dasar (<i>Sub-grade Improvement</i>)</b>				
<i>California Bearing Ratio</i> (CBR) %	12	15	-	SNI 1744:2012
<b>Lapis Fondasi Tanah Semen (<i>Soil Cement Base</i>)</b>				
Kuat Tekan Bebas ( <i>Unconfined Compressive Strength, UCS</i> ) kg/cm <sup>2</sup>	20	24	35	SNI 03-6887-2002
Uji Basah dan Kering:				SNI 13-6427-2000
(i) % Kehilangan Berat	-	-	7	
(ii) % Perubahan Volume	-	-	2	

(Sumber: Spesifikasi Umum Untuk Jalan dan Jembatan 2018, Revisi 2)

**Tabel 2. 4** Sifat-sifat Lapis Fondasi Agregat dan Lapis Drainase

Sifat – sifat	Lapis Fondasi Agregat			Lapis Drainase
	Kelas A	Kelas B	Kelas S	
Abrasi dari Agregat Kasar (SNI 2417:2008)	0 - 40 %	0 - 40 %	0 - 40 %	0 - 40 %
Butiran pecah, tertahan ayakan No.4 (SNI 7619:2012)	95/90 <sup>1)</sup>	55/50 <sup>2)</sup>	55/50 <sup>2)</sup>	80/75 <sup>3)</sup>
Batas Cair (SNI 1967:2008)	0 - 25	0 - 35	0 - 35	-
Indek Plastisitas (SNI 1966:2008)	0 - 6	4 - 10	4 - 15	-
Hasil kali Indek Plastisitas dengan % Lolos Ayakan No.200	maks.25	-	-	-
Gumpalan Lempung dan Butiran-butiran Mudah Pecah (SNI 4141:2015)	0 - 5 %	0 - 5 %	0 - 5 %	0 - 5 %
CBR rendaman (SNI 1744:2012)	min.90 %	min.60 %	min.50 %	-
Perbandingan Persen Lolos Ayakan No.200 dan No.40	maks.2/3	maks.2/3	-	-
Koefisien Keseragaman : $C_v = D_{60}/D_{10}$	-	-	-	> 3,5

Catatan :

- 1) 95/90 menunjukkan bahwa 95% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.
- 2) 55/50 menunjukkan bahwa 55% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 50% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.
- 3) 80/75 menunjukkan bahwa 80% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 75% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.

(Sumber: Spesifikasi Umum Untuk Jalan dan Jembatan 2018, Revisi 2)

## 2.10 Pengujian Sifat Mekanis

### 2.11.1 Pemadatan Tanah

Pemadatan tanah merupakan suatu proses mekanis dimana udara dalam pori tanah dikeluarkan. Proses tersebut dilakukan pada tanah yang digunakan sebagai bahan timbunan dengan tujuan sebagai berikut ini.

- a. Mempertinggi kekuatan tanah
- b. Memperkecil pengaruh air pada tanah
- c. Memperkecil *compressibility* dan daya rembes airnya
- d. Kepadatan tanah itu mulai dari berat isi kering tanah (*dry density*) dan tergantung pada kadar air tanahnya (*water content*). Pada derajat
- e. Kepadatan tinggi
- f. Berat isi maksimum
- g. Kadar air tanah (w) optimum
- h. Angka pori (e) minimum

Tujuan tersebut dapat tercapai dengan pemilihan tanah bahan timbunan, cara pemadatan, pemilihan mesin pemadat dan jumlah lintasan yang sesuai. Tingkat kepadatan tanah diukur dari nilai berat volume keringnya ( $\gamma_d$ ).

Tanah granuler dipandang paling mudah penanganannya untuk pekerjaan lapangan. Material ini mampu memberikan kuat geser yang tinggi dengan sedikit perubahan volume sesudah dipadatkan. Permeabilitas tanah granuler yang tinggi dapat menguntungkan maupun merugikan.

Tanah lanau yang dipadatkan umumnya akan stabil dan mampu memberikan kuat geser yang cukup dan sedikit kecenderungan perubahan volume. Tapi, tanah lanau sangat sulit dipadatkan bila keadaan basah karena permeabilitas rendah.

Tanah lempung yang dipadatkan dengan cara yang benar akan dapat memberikan kuat geser tinggi. Stabilitas terhadap sifat kembang-susut tergantung dari jenis kandungan mineralnya. Sebagai contoh, lempung montmorillonite akan mempunyai kecenderungan yang lebih besar terhadap perubahan volume disbanding dengan lempung kaolinite. Lempung padat mempunyai permeabilitas yang rendah dan tanah ini tidak dapat dipadatkan dengan baik pada waktu sangat basah (jenuh). Bekerja dengan tanah lempung yang sangat basah akan mengalami banyak kesulitan.

Peristiwa bertambahnya berat volume kering oleh beban dinamis disebut pemadatan. Oleh akibat beban dinamis, butir-butir tanah merapat satu sama lain sebagai akibat berkurangnya rongga udara. Ada perbedaan yang mendasar antara peristiwa pemadatan dan peristiwa konsolidasi tanah. Konsolidasi adalah pengurangan pelan-pelan volume pori yang berakibat bertambahnya berat volume kering akibat beban statis yang bekerja dalam periode tertentu. Sebagai contoh, pengurangan volume pori tanah jenuh air akibat berat tanah timbunan atau karena beban struktur di atasnya. Dalam tanah kohesif yang jenuh, proses konsolidasi akan diikuti oleh pengurangan volume tanahnya. Pada pemadatan dengan dinamis, proses bertambahnya berat volume kering tanah sebagai akibat pemadatan partikel yang diikuti oleh pengurangan volume udara dengan volume air tetap tidak berubah. Saat air ditambahkan pada pemadatan, air ini melunakkan partikel-partikel tanah. Partikel-partikel tanah mnggelincir satu sama lain dan bergerak pada posisi yang lebih rapat.

Pada awal pemadatan berat volume kering bertambah ketika kadar air bertambah. Pada kadar air nol ( $w = 0$ ), berat volume tanah basah ( $\gamma_b$ ) sama dengan berat volume tanah kering ( $\gamma_d$ ), atau

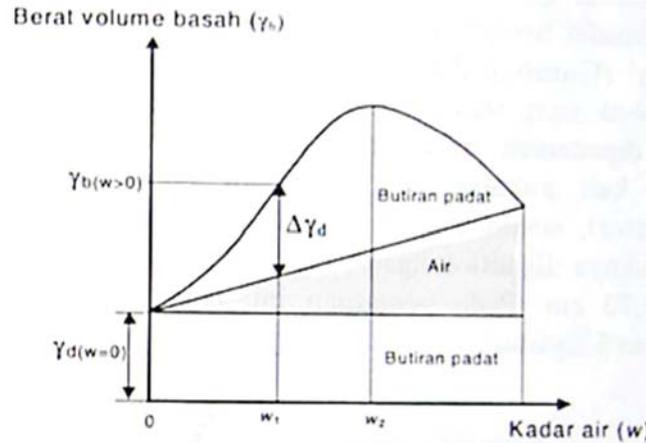
$$\gamma_b (w = 0) = \gamma_d = \gamma_1 \quad (2.7)$$

Ketika kadar air berangsur-angsur ditambah dan usaha pemadatan yang sama digunakan pada saat pemadatan, berat butiran tanah per volume satuan juga bertambah. Misalnya, pada saat kadar air sama dengan  $w_1$ , maka berat volume basah ( $\gamma_b$ ) menjadi:

$$\gamma_b = \gamma_2 \quad (2.8)$$

Berat volume kering ( $\gamma_d$ ) pada kadar air tersebut:

$$\gamma_d (w = w_1) = \gamma_d(w = 0) + \Delta\gamma_d \quad (2.9)$$



**Gambar 2. 5** Prinsip-prinsip pemadatan

(Sumber: Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*, 2002)

Pada kadar air lebih besar dari kadar air tertentu, yaitu  $w = w_2$  (saat kadar air optimum) kenaikan kadar air justru mengurangi berat volume keringnya. Hal ini karena, air mengisi rongga pori yang sebelumnya diisi oleh butiran padat. Kadar air saat berat volume kering mencapai maksimum ( $\gamma_{dmak}$ ) disebut kadar air optimum ( $w_{opt}$ ).

Untuk menentukan hubungan kadar air dan berat volume, dan untuk mengevaluasi tanah agar memenuhi persyaratan kepadatan maka umumnya dilakukan uji pemadatan. *Proctor* (1933) telah mengamati bahwa ada hubungan

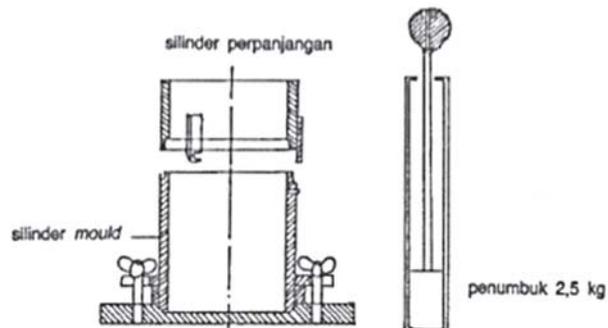
yang pasti antara kadar air dan berat volume kering tanah padat. Untuk berbagai jenis tanah pada umumnya, terdapat satu nilai kadar air optimum tertentu untuk mencapai berat volume kering maksimumnya. Hubungan berat volume kering ( $\gamma_d$ ) dengan berat volume basah ( $\gamma_b$ ) dan kadar air ( $w$ ), dinyatakan dalam persamaan:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1+w} \quad (2.10)$$

Ada dua macam pemadatan laboratorium yang biasa digunakan untuk menentukan kadar air optimum dan berat isi kering maksimum yaitu sebagai berikut:

a. Pemadatan *Standard*

Dalam percobaan ini, tanah dipadatkan dalam *mould* yang volumenya  $1/30 \text{ ft}^3$  dengan memakai alat penumbuk seberat 5,5 lbs atau 2,5 kg yang dijatuhkan setinggi 30,5 cm (1 ft), tanah dipadatkan 3 (tiga) lapisan dengan masing-masing lapisan 25 kali tumbukan



**Gambar 2. 6** Alat Uji Pemadatan *Standard*

(Sumber: Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*, 2002)

**Tabel 2. 5** Spesifikasi Percobaan Pemadatan *Standard*

Deskripsi	Ukuran	ASTM D-698		AASHTO T-99	
		Metoda A	Metoda B	Metoda C	Metoda D
<i>Tabung</i>					
Isi	ft <sup>3</sup>	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33
	cm <sup>3</sup>	943,90	2124,30	943,90	2124,30
Tinggi	In	4,58	4,58	4,58	4,58
	Mm	116,33	116,33	116,33	116,33
Diameter	In	4	6	4	6
	Mm	101,60	152,40	101,60	152,40
Berat palu	Lb	5,5	5,5	5,5	5,5
	Kg	2,5	2,5	2,5	2,5
Tinggi jatuh palu	In	12	12	12	12
	Mm	304,80	304,80	304,80	304,80
Jumlah lapis tanah		3	3	3	3
Jumlah pukulan / lapis		25	56	25	56
Tanah yang dicoba lolos / lewat ayakan		No.4	No.4	3/4 inch	3/4 inch

(Sumber: G. Djatmiko Soedarmo, *Mekanika Tanah 1*, 1993)

b. Pemadatan *Modified*

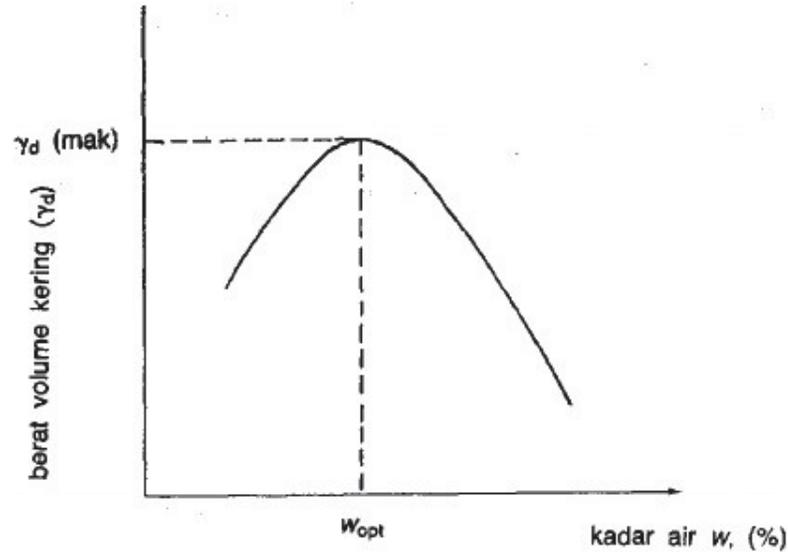
Pada pemadatan *modified*, *mould* yang digunakan masih tetap sama dengan pemadatan *standard*, hanya berat alat penumbuknya yang berbeda yaitu 10 lbs atau 4,5 kg. Pada pengujian ini, tanah di dalam *mould* ditumbuk dalam 5 lapisan.

**Tabel 2. 6** Spesifikasi Percobaan Pemadatan *Modified*

Deskripsi	Ukuran	ASTM D-698		AASHTO T-99	
		Metoda A	Metoda B	Metoda C	Metoda D
Tabung					
Isi	ft <sup>3</sup>	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33
	cm <sup>3</sup>	943,90	2124,30	943,90	2124,30
Tinggi	In	4,58	4,58	4,58	4,58
	mm	116,33	116,33	116,33	116,33
Diameter	In	4	6	4	6
	mm	101,60	152,40	101,60	152,40
Berat palu	lb	5,5	5,5	5,5	5,5
	kg	4,54	4,54	4,54	4,54
Tinggi jatuh palu	In	18	18	18	18
	mm	457,20	457,20	457,20	457,20
Jumlah lapis tanah		5	5	5	5
Jumlah pukulan / lapis		25	56	25	56
Tanah yang dicoba lolos / lewat ayakan		No.4	No.4	3/4 inch	3/4 inch

(Sumber: G. Djatmiko Soedarmo, *Mekanika Tanah 1*, 1993)

Dalam uji kepadatan, percobaan diulang paling sedikit 5 kali dengan kadar air tiap percobaan divariasikan. Kemudian, digambarkan sebuah grafik hubungan kadar air dan berat volume keringnya (lihat gambar 2.5). Kurva yang dihasilkan dari pengujian memperlihatkan nilai kadar air yang terbaik ( $W_{opt}$ ) untuk mencapai berat volume kering terbesar atau kepadatan maksimum. Pada nilai kadar air rendah, untuk kebanyakan tanah, tanah cenderung bersifat kaku dan sulit dipadatkan. Setelah kadar air ditambah, tanah menjadi lebih lunak. Pada kadar air yang tinggi, berat volume kering berkurang. Bila seluruh udara di dalam tanah dapat dipaksa keluar pada waktu pemadatan, tanah akan berada dalam kedudukan jenuh dan nilai berat volume kering akan menjadi maksimum. Akan tetapi dalam praktek, kondisi ini sulit dicapai (Hary C.H, *Mekanika Tanah I*, 2002).



**Gambar 2. 7** Hubungan Kepadatan Kering Maksimum Terhadap Kadar Air

(Sumber: Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*, 2002)

### 2.11.2 California Bearing Ratio (CBR)

Pengujian CBR (*California Bearing Ratio*) adalah percobaan daya dukung tanah yang dikembangkan oleh *California State Highway Departement*. Pada dasarnya pengujian ini adalah pengujian penetrasi dengan menusukkan benda ke dalam benda uji. Dengan cara ini dapat dinilai kekuatan tanah dasar atau bahan lain yang dipergunakan untuk membuat perkerasan.

Kekuatan tanah diuji dengan uji CBR sesuai dengan SNI-1744-2012. Nilai kekuatan tanah tersebut digunakan sebagai acuan perlu tidaknya distabilisasi setelah dibandingkan dengan yang disyaratkan dalam spesifikasinya. Pengujian CBR adalah perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan terhadap bahan standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Nilai CBR dihitung pada penetrasi sebesar 0,1 inch dan penetrasi sebesar 0,2 inch dan selanjutnya hasil kedua perhitungan tersebut dibandingkan sesuai dengan SNI 03-1744-2012 kemudian diambil hasil terbesar.

Nilai CBR adalah perbandingan (dalam persen) antara tekanan yang diperlukan untuk menembus tanah dengan piston berpenampang bulat seluas 3 *inch*<sup>2</sup> dengan kecepatan 0,05 *inch* per menit terhadap tekanan yang diperlukan untuk menembus bahan *standard* tertentu. Tujuan dilakukan pengujian CBR ini adalah untuk mengetahui nilai CBR pada variasi kadar air pemadatan. Untuk

menentukan kekuatan lapisan tanah dasar dengan cara percobaan CBR diperoleh nilai yang kemudian dipakai untuk menentukan tebal perkerasan yang diperlukan di atas lapisan yang nilai CBR nya tertentu (Wesley,1977). Dalam menguji nilai CBR tanah dapat dilakukan di laboratorium. Tanah dasar (*subgrade*) pada konstruksi jalan baru merupakan tanah asli, tanah timbunan, atau tanah galian yang sudah dipadatkan sampai mencapai kepadatan 95% dari kepadatan maksimum. Dengan demikian daya dukung tanah dasar tersebut merupakan nilai kemampuan lapisan tanah memikul beban setelah tersebut tanah dipadatkan. CBR ini disebut CBR rencana titik dan karena disiapkan di laboratorium, disebut CBR laboratorium. Semakin tinggi nilai CBR tanah (*subgrade*) maka lapisan perkerasan di atasnya akan semakin tipis dan semakin kecil nilai CBR (daya dukung tanah rendah), maka akan semakin tebal lapisan perkerasan di atasnya sesuai beban yang akan dipikulnya. Ada dua macam pengukuran CBR yaitu:

1. Nilai CBR untuk tekanan penetrasi pada 0,254 cm (0,1") terhadap penetrasi *standard* besarnya 70,37 kg/cm<sup>2</sup> (1000 psi).

$$\text{Nilai CBR} = (\text{PI}/70,37) \times 100 \% \text{ (PI, dalam kg / cm}^2\text{)}. \quad (2.11)$$

2. Nilai CBR untuk tekanan penetrasi pada penetrasi 0,508 cm (0,2") terhadap penetrasi *standard* yang besarnya 105,56 kg/cm<sup>2</sup> (1500 psi)

$$\text{Nilai CBR} = (\text{PI}/105,56) \times 100 \% \text{ (PI, dalam kg / cm}^2\text{)}. \quad (2.12)$$

Dari kedua hitungan tersebut digunakan nilai terbesar. CBR laboratorium dapat dibedakan atas dua macam yaitu:

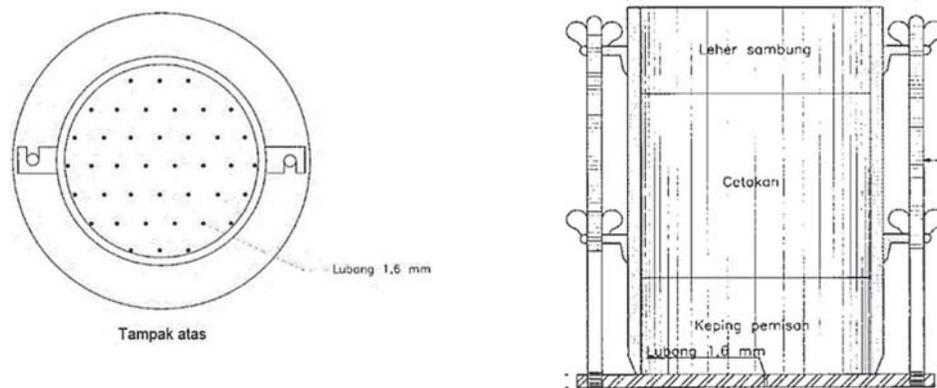
- a. CBR laboratorium rendaman (*soaked design CBR*)
- b. CBR laboratorium tanpa rendaman (*unsoaked design CBR*)

Pada pengujian CBR laboratorium rendaman pelaksanaannya lebih sulit karena membutuhkan waktu dan biaya relatif lebih besar dibandingkan CBR laboratorium tanpa rendaman. Sedangkan dari hasil pengujian CBR laboratorium tanpa rendaman sejauh ini selalu menghasilkan daya dukung tanah lebih besar dibandingkan dengan CBR laboratorium rendaman. Nilai CBR sangat bergantung pada proses pemadatan. Selain digunakan untuk menilai kekuatan tanah dasar atau bahan lain yang hendak dipakai, CBR juga digunakan sebagai dasar untuk menentukan tebal lapisan dari suatu perkerasan serta untuk menilai *subgrade* yang

dipadatkan hingga mencapai kepadatan kering maksimum dan membentuk profil sesuai yang direncanakan.

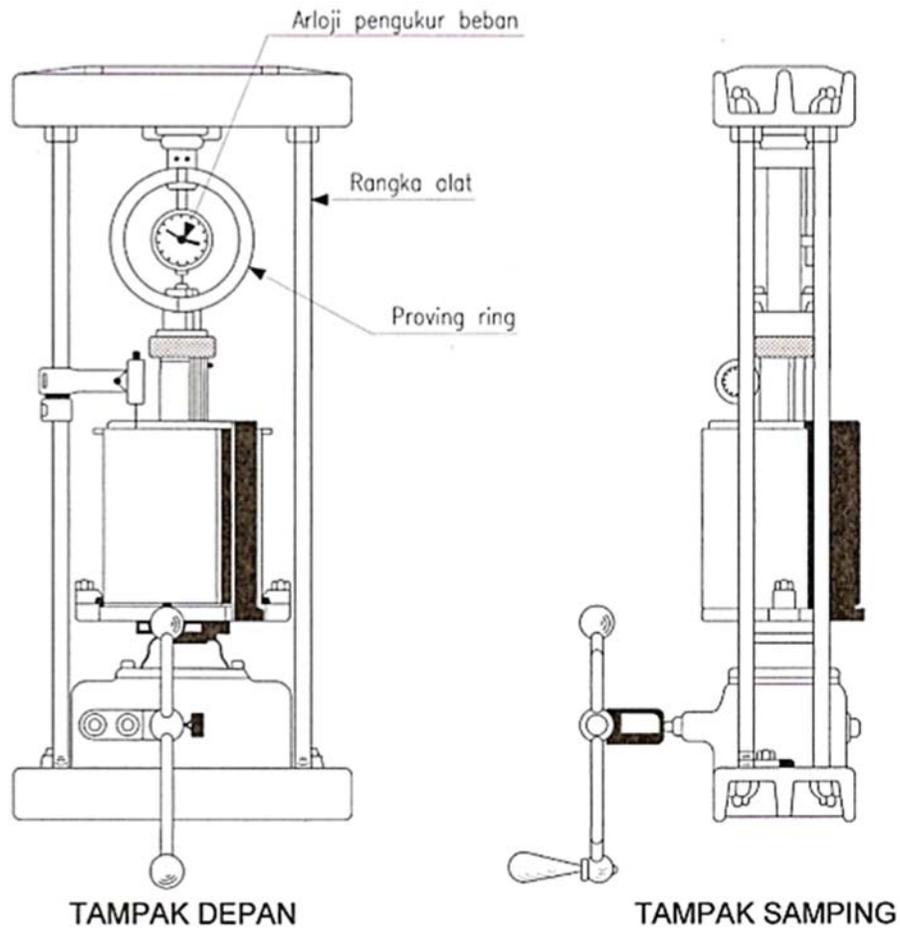
**Tabel 2. 7** Standar Lapisan Perkerasan Jalan Raya

CBR (%)	General Rating	Kegunaan
0-3	<i>Very Poor</i>	<i>Sub-grade</i>
3-7	<i>Poor to Fair</i>	<i>Sub-grade</i>
7-20	<i>Fair</i>	<i>Sub-base</i>
20-50	<i>Good</i>	<i>Base of Sub-base</i>
>50	<i>Excellent</i>	<i>Base</i>



**Gambar 2. 8** Cetakan CBR dengan leher sambung

(Sumber: SNI 1744-2012, Metode Pengujian CBR Laboratorium)

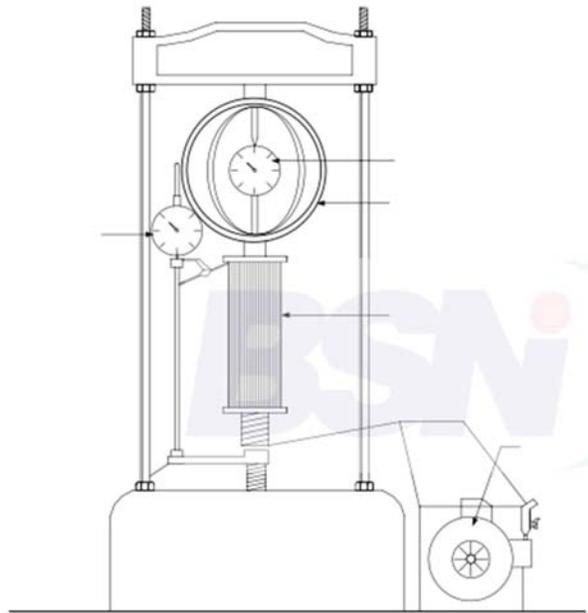


**Gambar 2. 9** Alat Uji Penetrasi CBR Laboratorium

(Sumber: SNI 1744-2012, Metode Pengujian CBR Laboratorium)

### 2.11.3 *Unconfined Compressive Strength*

*Unconfined Compressive Strength* (UCS) adalah metode pengujian yang dimaksudkan untuk menentukan kuat tekan bebas tanah yang memiliki kohesi, baik tanah tidak terganggu (*undisturbed*), dicetak ulang (*remoulded*) maupun contoh tanah yang dipadatkan (*compacted*) selanjutnya dibebani beban aksial. Umumnya uji *Unconfined Compressive Strength* ini dimaksudkan untuk mendapatkan dengan cepat kuat tekan bebas tanah berkohesi sehingga dapat dilakukan pengujian tanpa tahanan keliling.



**Gambar 2. 10** Alat Uji Penetrasi *Unconfined Compressive Strength*

(Sumber: SNI 3638-2012, Metode Uji Kuat Tekan Bebas Tanah Kohesif)

**Tabel 2. 8** Klasifikasi Tanah Berdasarkan Nilai Kuat Tekan Bebas

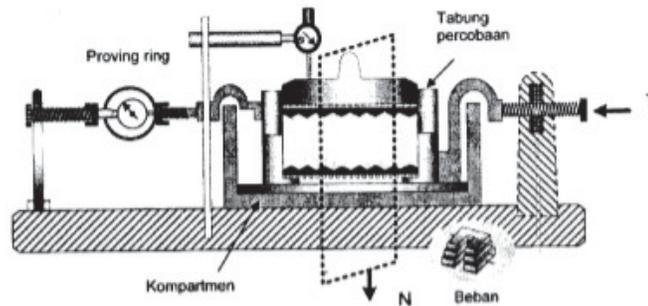
Sifat Tanah	<i>Unconfined Compressive Strength</i> (kg/cm <sup>2</sup> )
<i>Very Soft</i>	< 0,25
<i>Soft</i>	0,25 - 0,50
<i>Firm / Medium</i>	0,50 - 1,00
<i>Stiff</i>	1,00 - 2,00
<i>Very Stiff</i>	2,00 - 4,00
<i>Hard</i>	> 4,00

(Sumber: Das, 1988)

#### 2.11.4 *Direct Shear Strength*

Kekuatan geser suatu tanah tergantung pada tahanan geser antara butir-butir tanah dan kohesi pada permukaan butir tanah. Nilai kekuatan geser tanah ini berubah-ubah sesuai dengan jenis dan kondisi tanah. Nilai ini digunakan untuk menghitung daya dukung tanah (*bearing capacity*), tekanan tanah terhadap dinding penahan (*earth pressure*) dan kestabilan lereng (*slope stability*).

Keruntuhan geser (*shear failure*) disebabkan oleh gaya-gaya yang berkerja antara butirannya, dimana ini akan menyebabkan terjadinya gerak relatif antara butir tanah. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan kohesi tanah ( $c$ ) dan sudut geser tanah ( $\theta$ ). Adapun keterbatasan dalam pengujian geser langsung yaitu tidak dapat mengukur tekanan air pori yang timbul saat penggeseran dan tidak dapat mengontrol tegangan yang terjadi di sekeliling contoh tanah. Di samping itu keterbatasan uji geser langsung yang lain adalah bidang runtuh tanah ditentukan meskipun belum tentu merupakan bidang terlemah.



**Gambar 2. 11** Alat Uji *Direct Shear Strength*

(Sumber: Budi, 2011)

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Bila tanah mengalami pembebanan maka tanah tersebut akan ditahan oleh kohesi tanah yang tergantung pada jenis tanah dan kepadatannya serta gesekan antara butir-butir tanah. Coulomb (1776) menyatakan bahwa kekuatan geser tanah mempunyai hubungan fungsional dengan kohesi tanah dan friksi antar partikel tanah yang dapat dilihat pada garis lurus yang menunjukkan hubungan linier antara tegangan normal dan geser dalam persamaan sebagai berikut:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (2.17)$$

Keterangan:

$\tau$  = kuat geser ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\sigma$  = tegangan normal ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$C$  = kohesi ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\phi$  = sudut geser dalam ( $^\circ$ )

### 2.11.5 Konsolidasi

Tanah merupakan suatu material yang berpori besar sehingga mempunyai kesempatan yang besar untuk terjadi pemampatan dan deformasi elastis maupun plastis. Deformasi elastis adalah pemampatan tanah yang terjadi dimana tanah akan kembali ke bentuk semula apabila beban yang bekerja kepadanya diiadakan. Untuk mencapai deformasi yang tetap (untuk tanah dengan deformasi yang kecil, lempung misalnya) diperlukan waktu yang cukup lama. Gejala yang demikian disebut dengan konsolidasi. Konsolidasi mengakibatkan perubahan isi serta keluarnya air pori (angka pori mengecil) dan juga perubahan susunan butir tanah/susunannya menjadi teratur. Secara keseluruhan konsolidasi terdiri dari dua bagian yaitu:

1. *Primary Consolidation*

Penurunan yang terjadi karena air yang keluar dari dalam pori.

2. *Secondary Consolidation*

Penurunan yang terjadi karena adanya penyesuaian diri antar butiran tanah, dan langsung dalam waktu yang lama serta nilainya kecil. Penurunan ini berjalan terus setelah *Primary Consolidation* selesai.

Lapisan tanah lempung biasanya terjadi dari proses pengendapan. Selama proses pengendapan, lempung mengalami konsolidasi atau penurunan, akibat tekanan tanah di atasnya. Lapisan tanah yang berada di atas ini, suatu ketika bisa menghilang akibat proses alam. Hal ini berarti tanah lapisan bagian bawah pada suatu saat dalam sejarah geologinya pernah mengalami konsolidasi akibat dari tekanan yang bekerja di waktu sekarang. Tanah semacam ini disebut dalam kondisi *over consolidated (OC)* atau terkonsolidasi berlebihan. Kondisi lain, bila tegangan efektif yang bekerja pada suatu titik di dalam tanah pada waktu sekarang merupakan tegangan maksimumnya, maka tanah disebut dalam kondisi *normally consolidated (NC)* atau terkonsolidasi normal.

## 2.11 Penelitian Sebelumnya yang Serupa

1. Sumarno.A. dkk. "Pemanfaatan Limbah *Spent Bleaching Earth* pada Stabilisasi Tanah Lempung dengan *Clean Set Cement*". Proporsi rancangan campuran pada penelitian yang dilakukan yaitu terdiri dari *Spent Bleaching Earth* sebanyak 22,5%, 45%, dan 67,5% serta *Clean Set Cement* sebesar 10%

masing-masing terhadap berat kering tanah lempung. Hasilnya menunjukkan bahwa campuran *Spent Bleaching Earth* dan *Clean Set Cement* mampu meningkatkan nilai CBR terus meningkat dengan nilai CBR berurutan sebesar 3,24%, 5,01%, 5,39%, 8,52%, dan 17,99%.

2. Subdhara, K dkk. "*Influence of Spent Bleaching Earth and Misspend Cement on Shear Strength Behaviour on Unsaturated Clays*". Proporsi rancangan campuran pada penelitian yang dilakukan yaitu terdiri dari *Spent Bleaching Earth* sebanyak 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% serta *Spent Bleaching Earth* sebesar 20% masing-masing terhadap berat kering tanah lempung. Hasilnya menunjukkan bahwa dapat dilihat bahwa penurunan MDD dengan penambahan SBE yang semakin meningkat, sedangkan sisi OMC meningkat. Hasil uji CBR pada tanah ekspansif diperlakukan dengan persentase yang berbeda dari SBE dapat terlihat bahwa dengan peningkatan CBR yang tidak direndam dengan bertambahnya SBE. Itu CBR tanah yang tidak direndam terus meningkat dari 0% menjadi 93,70% dengan menambahkan 20% SBE. Hasil pengujian CBR pada tanah ekspansif yang diberi perlakuan persentase yang berbeda dari SBE dapat dilihat bahwa dengan peningkatan CBR rendam dengan meningkatkan penambahan SBE. Hasil uji UCS pada tanah ekspansif diperlakukan dengan persentase yang berbeda dari SBE dapat terlihat bahwa peningkatan UCS dengan meningkatkan penambahan SBE. UCS tanah terus meningkat dari 0% menjadi 200 selama 28 hari dengan menambahkan 20% SBE. Hasil tes UCS pada tanah ekspansif yang diolah dengan 20% SBE dan persentase yang berbeda dari MC dapat dilihat bahwa peningkatan UCS dengan meningkatnya penambahan MC dan 20% SBE. UCS tanah terus meningkat dari 0% menjadi 397% selama 28 hari ketika SBE ditambahkan pada 8% dan persentase MC yang berbeda.
3. Kusaimi, M. dkk. "*Compressive Strength and Water Absorption of Pavement Derived from Palm Oil Eco Processed Pozzolan (EPP) Material as Partial Cement Replacement*" Studi ini menunjukkan bahwa bahan pozzolan memiliki silika dan sifat alumina, yang cocok untuk penggantian sebagian semen. Namun, komposisi EPP lebih tinggi dari 20% telah mengurangi kekuatan tekan dan meningkatkan penyerapan air. Temuan menunjukkan

bahwa EPP 20% menghasilkan kekuatan tekan hingga 32,4 MPa dan penyerapan air sebesar 4,78%. Persentase 15 – 20% komposisi EPP yang dicampurkan dengan *fly ash* kuat tekan perkerasan naik hingga 36 MPa dan penyerapan air sebesar 2.8%. Penelitian ini merangkum kemampuan EPP untuk digunakan sebagai parsial pengganti semen, tetapi dengan tambahan *fly ash* dalam formulasi untuk meningkatkan kekuatan tekan perkerasan jalan.