

BAB II

LANDASAN TEORI

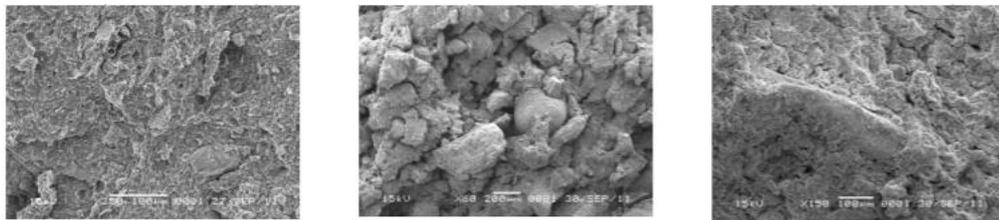
2.1. Tanah

Tanah bisa didefinisikan dengan kumpulan partikel mineral yang lemah ikatan antar partikelnya, dan terbentuk dari hasil proses pelapukan batuan. (Craig, 1989). Tanah merupakan material yang tersusun atas butiran mineral padat yang saling terikat secara kimia antara satu dengan lainnya dan terbentuk dari proses pelapukan bahan organik berpartikel padat disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang kosong di antara partikel padat tersebut (Braja M. Das, 1995). Tanah merupakan himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif *loose* (lepas), terletak di atas *bedrock* (batuan dasar) (Hardiyatmo, 2002). Secara luas, tanah diartikan sebagai bahan padat yang berada di atas permukaan bumi dan terus mengalami perubahan. Tanah dapat dikatakan dengan kerikil, pasir, lanau, atau lempung, tergantung dari ukuran partikel mana yang paling banyak terkandung dalam tanah tersebut. Tanah terbuat atas 3 zat, yakni air, udara, dan bahan padat. Partikel udara berpengaruh kecil terhadap sifat tanah, sebaliknya partikel air sangat berpengaruh bagi sifat tanah. Ruang di antara butiran-butiran dapat terisi oleh air atau udara. Bila rongga tersebut terisi air seluruhnya maka tanah disebut dalam kondisi jenuh, namun bila rongga tanah terisi oleh air dan udara maka tanah bisa disebut sebagai kondisi jenuh sebagian (*partially saturated*).

Tanah dalam teknik sipil bisa diartikan sebagai bagian yang dihasilkan dari pelapukan batuan yang dapat digali tanpa menggunakan bahan peledakan dapat ditembus dengan peralatan pengambilan contoh pada saat pemboran (Hendarsin, 2000). Bowles mengatakan, tanah ialah campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau semua jenis berikut :

1. Berangkal, merupakan potongan batu besar, dengan ukuran lebih besar dari 250 mm sampai 300 mm. Untuk kisaran antara 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan ini disebut kerakal.
2. Kerikil, partikel batuan yang ukurannya 5 mm sampai 150 mm.

3. Pasir, partikel batuan yang ukurannya 0,074 mm sampai 5 mm, berkisar dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm).
 4. Lanau, partikel batuan yang ukurannya dari 0,002 mm sampai 0,074 mm. Lanau dan lempung dalam jumlah banyak ditemukan dalam deposit yang disedimentasikan kedalam danau atau di dekat garis pantai pada muara sungai.
 5. Lempung, partikel mineral yang ukurannya lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel ini merupakan bagian utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
 6. Koloid, partikel mineral yang “diam”, ukurannya lebih kecil dari 0,001 mm.
- Berikut ini merupakan gambaran bentuk tanah lempung yang diambil dari foto mikroskop SEM dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 2. 1. Bentuk Partikel Fotomikrograf SEM Sampel Tanah lempung
 Sumber: Anita Yuliyanti, D. S. E. S, 2012

2.2. Tanah Dasar

Tanah dasar (*sub grade*) adalah lapisan dasar paling bawah suatu jenis pekerjaan konstruksi yang berfungsi sebagai tempat perletakan lapis perkerasan dan mendukung konstruksi perkerasan jalan di atasnya. Tanah dasar dapat berupa tanah asli yang dipadatkan jika tanah aslinya baik atau tanah urugan yang didatangkan dari tempat lain atau tanah yang distabilisasi (dengan semen, kapur, *fly ash* dan sebagainya). Ditinjau dari muka tanah asli, maka tanah dasar dibedakan atas:

1. Tanah dasar, tanah galian.

Tanah dasar tanah galian merupakan tanah dasar yang dihasilkan dari proses galian tanah disekitarnya. Proses penggalian dimaksudkan agar mendapatkan kontur sesuai dengan yang diinginkan

2. Tanah dasar, tanah urugan.

Tanah dasar tanah urugan merupakan proses menimbun tanah dari suatu tempat ke tempat lain yang akan diurug. Dengan proses ini, diharapkan tempat yang diurug tersebut mendapatkan kontur sesuai dengan yang diinginkan. Tanah dasar urugan sendiri dapat berasal dari galian tanah disekitarnya.

3. Tanah dasar, tanah asli.

Tanah dasar, tanah asli merupakan tanah yang digunakan tanpa proses galian maupun urugan karena telah memiliki kontur sesuai dengan yang diinginkan.

Ketahanan konstruksi perkerasan jalan bergantung dari sifat dan daya dukung tanah dasar. Adapun beberapa masalah yang sering ditemukan mengenai tanah dasar seperti perubahan bentuk jenis tanah tertentu karena adanya beban lalu lintas. Perubahan bentuk yang signifikan seperti melendut atau bergelombang dapat menyebabkan jalan yang dilalui mengalami kerusakan. Lapisan tanah yang berada di bawah tanah dasar harus diperhatikan kekuatannya. Terdapat beberapa cara dan saran mengenai masalah-masalah yang sering ditemukan pada tanah dasar agar dapat mengurangi persentase masalah tersebut seperti:

1. Tidak meratanya kondisi daya dukung tanah dasar dengan jenis tanah yang berbeda. Pengecekan kondisi tanah persegmen jalan dapat mengetahui nilai daya dukung tanah dasar. Sehingga perencanaan tebal perkerasan dapat didesain sesuai dengan kondisi segmen dan sifat tanah yang telah dikelompokkan menjadi satu.
2. Perbedaan penurunan (*differential settlement*) tanah karena adanya sifat-sifat lapisan tanah lunak yang berbeda di bawah tanah dasar dapat menyebabkan terjadinya perubahan bentuk yang tetap. Hal tersebut dapat ditanggulangi dengan melakukan pengecekan tanah persegmen jalan. Penyelidikan menggunakan alat bor dapat menggambarkan tentang lapisan tanah di bawah lapisan tanah dasar.
3. Sifat kembang dan susut tanah sangat dipengaruhi oleh perubahan kadar air. Hal tersebut bisa ditanggulangi dengan cara melakukan pemadatan tanah pada kadar air optimum sehingga tanah bisa mencapai kepadatan maximum dan perubahan volume yang mungkin terjadi bisa dikurangi. Sistem aliran drainase juga dapat mempengaruhi perubahan kadar air pada lapisan tanah.
4. Daya dukung tanah yang kurang merata yang disebabkan oleh pelaksanaan yang belum maksimal. Hal tersebut bisa di atasi dengan melakukan pengawasan ketat baik pada saat proses pelaksanaan pekerjaan tanah dasar. Selain hal tersebut kondisi geologis lokasi jalan yang akan dibangun harus diperhatikan dan dipelajari dengan teliti.

Terdapat beberapa metode yang sering digunakan dalam menentukan nilai daya dukung tanah dasar, seperti pemeriksaan pengujian CBR (*California Bearing Ratio*), UCS (*Unconfined Compression Strength Test*), DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), dan k (modulus reaksi tanah dasar). Di Indonesia sendiri nilai daya dukung tanah dasar untuk kebutuhan perencanaan tebal perkerasan jalan ditentukan dengan cara melakukan pemeriksaan CBR. Untuk membangun sebuah jalan tentunya dibutuhkan tanah lain yang digunakan untuk menimbun jalan agar sesuai dengan ketentuan yang direncanakan. Berikut ini merupakan spesifikasi bahan timbunan biasa:

1. Timbunan yang dikategorikan timbunan biasa harus berasal dari tanah yang disepakati Pengawas pekerjaan.
2. Tanah yang digunakan tidak masuk kedalam tanah yang berplastisitas tinggi, dimana dikategorikan sebagai A-7-6 dari persyaratan AASHTO M 145 atau jenis CH dalam persyaratan klasifikasi "USCS atau *Casagrande*". Tanah harus memiliki nilai CBR yang tidak kurang dari nilai 6 %, bila diuji menggunakan spesifikasi AASHTO T 193.
3. Tanah jika mempunyai sifat pengembangan yang tinggi yang mempunyai nilai $\geq 1,25$ bila diuji menggunakan spesifikasi AASHTO T 258, tidak bisa dipakai sebagai timbunan. Nilai aktif didapatkan dari perbandingan antara Indeks Plastisitas – (AASHTO T 90) dan persentase ukuran lempung (AASHTO T 88).

2.3. Karakteristik *Fly Ash*

Hasil pengolahan batu bara di PLTU menyisakan limbah padat dan limbah cair. *Bottom ash* dan *fly ash* adalah limbah padat hasil pembakaran batu bara. Untuk limbah cair yang dihasilkan yaitu (*oily drain, aux drain, boiler cleaning, ash disposal area, coal pile storage area, boiler blowdown, FGD blow down*). Berdasarkan SNI 2460-2014 *Fly Ash* dibedakan menjadi tiga kelas yakni *Fly Ash* kelas N, kelas F dan kelas C. Perbedaan diantara ketiga *Fly Ash* terdapat pada banyaknya jumlah unsur kalsium, silika, aluminium, dan kadar besi yang terdapat pada *fly ash*.

- a. *Fly Ash* kelas N adalah pozzolan alam mentah atau telah dikalsinasi yang memenuhi spesifikasi kelas ini, seperti contoh tanah hasil lapukan, batu rijang

oplan, serpih, *tufa*, abu vulkanik atau batu apung, dikalnisasi atau tidak, dan berbagai bahan yang memerlukan kalnisasi untuk mendapatkan sifat yang dikehendaki.

- b. *Fly Ash* kelas F adalah *fly ash* yang dihasilkan dari hasil pembakaran batu bara antrachite/bituminous, yang memiliki sifat pozolanik untuk mendapatkan sifat *cementitious* harus diberi tambahan zat *quick lime, hydrated lime*, atau semen. *Fly Ash* kelas F mempunyai kadar kapur yang rendah yakni $\text{CaO} < 10\%$.
- c. *Fly Ash* kelas C adalah *fly ash* yang dihasilkan dari hasil pembakaran batu bara *lignite/subbituminous* yang memiliki sifat pozolanik dan *self cementing*. *Fly Ash* kelas ini mempunyai kadar kapur $\text{CaO} > 10\%$.

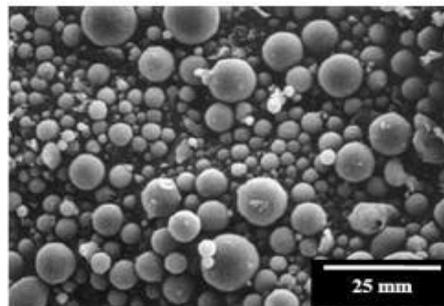
SNI 03-6414-2002 mengartikan *fly ash* adalah limbah dari hasil pembakaran batu bara pada tungku PLTU yang mempunyai bentuk halus, bundar dan bersifat pozolanik. Pemakaian abu terbang sebagai bahan tambahan pada adukan beton dan campuran pembuatan semen sudah dimulai dari tahun 1930-an. Pada tugas akhir ini akan memanfaatkan abu terbang sebagai tambahan campuran tanah dan dilihat dari nilai CBR tanpa rendaman dan nilai kuat tekan bebas yang dihasilkan. Kandungan abu terbang terdiri dari senyawa *silicate glass* yang mengandung silika (Si), alumina (Al), ferrum (Fe), dan kalsium (Ca). Kandungan kecil senyawa lain yang terdapat pada *fly ash* ialah magnesium (Mg), sulfur (S), sodium (Na), potassium (P), dan karbon (C). Bahan yang berbahaya yang terdapat pada abu terbang yaitu *arsenic*, berilium, boron, *cadmium, chromium, cobalt, lead*, mangan, merkuri, selenium, strontium, thallium, vanadium dan juga mengandung dioksin dan senyawa PAH (*polycyclic aromatic hydrocarbon*). Ukuran partikel *fly ash* bervariasi dari $<1 \mu\text{m}$ (micrometer) sampai $>100 \mu\text{m}$ (terdapat literatur yang mengatakan bahwa ukurannya $0,5 \mu\text{m} - 300 \mu\text{m}$), dengan sebagian besar partikel berukuran $<20 \mu\text{m}$. Umumnya hanya sekitar 10% sampai 30% ukuran partikel $>50 \mu\text{m}$. Luas permukaan *fly ash* umumnya berukuran antara $300 \text{ m}^2/\text{kg} - 500 \text{ m}^2/\text{kg}$ *fly ash*, batas bawah $200 \text{ m}^2/\text{kg}$ dan batas atas $700 \text{ m}^2/\text{kg}$. Gs *fly ash* juga bervariasi, ada yang menyebutkan rentang nilai Gs dari institusi-institusi yakni berkisar 1,6-1,3. Umumnya Gs material *fly ash* berkisar 1,9 - 2,55.

Tabel 2.1. Klasifikasi *Fly Ash*

Propertis	Kelas <i>Fly Ash</i>	
	F	C
Kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , min %	70	50
Kandungan <i>sulfur trioxide</i> (SO_3), max %	5	5
CaO_2 %	<10	>10
<i>Loss on ignition</i> , %	6	6

Sumber: ASTM 618-94a, 1994

Penggunaan batubara sebagai bahan bakar PLTU sampai tahun 2015 mencapai ±80 juta ton/tahun. Oleh karena itu potensi timbulan limbah *Bottom Ash* dengan tipe pembakaran *dry bottom boiler* akan mencapai lebih kurang 4 – 5 juta ton/tahun (Mekar Ageng Kinasti, Djoko Nugroho 2017). Cara yang mungkin dapat diterapkan untuk penanganan lingkungan adalah memanfaatkan limbah *fly ash* untuk keperluan bangunan teknik sipil. Pada penelitian ini *fly ash* akan menjadi campuran tanah sebagai tanah timbunan untuk melihat hasil peningkatan dari nilai CBR dan UCT. Berikut ini merupakan bentuk partikel *fly ash* yang diambil dari foto mikrograf SEM hasil penelitian-penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 2. 2. Bentuk Partikel Fotomikrograf SEM Sampel *Fly Ash*

Sumber: Agus Suprihanto, B. S., 2006.

2.4. Pematatan Tanah

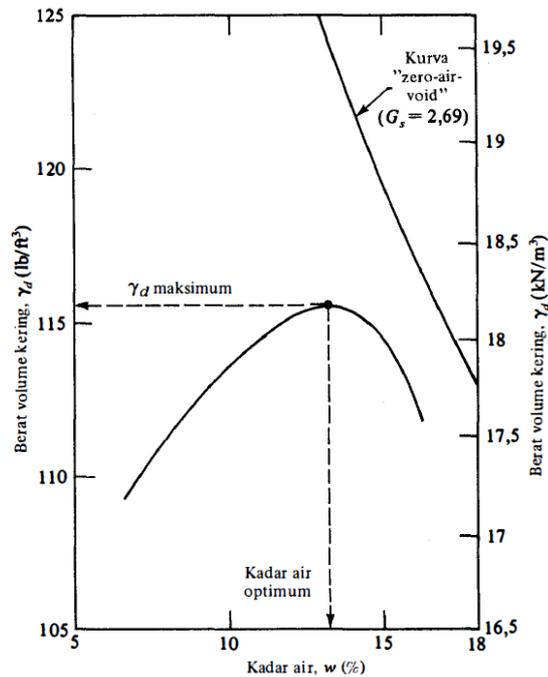
Proses pembuatan timbunan tanah untuk jalan raya, dam tanah dan banyak struktur lainnya harus terlebih dahulu dipadatkan untuk menaikkan berat volumenya. Pematatan tanah berguna untuk menaikkan kekuatan daya dukung tanah di atasnya. Pematatan tanah bisa mengurangi penurunan tanah yang tidak dikehendaki dan meningkatkan kemantapan lereng timbunan (*embankments*). Alat-alat yang sering

digunakan untuk proses pemadatan tanah yaitu *smooth-wheel rollers*, *vibratory rollers* dan *vibroflot*.

Air sangat berpengaruh penting dalam proses ini. Air berfungsi sebagai unsur pembasah pada partikel tanah. Dengan adanya air, partikel tersebut lebih mudah bergerak dan bergeseran satu dengan lainnya sehingga terbentuk keadaan tanah yang lebih padat. Berat volume kering dari tanah akan meningkat apabila kadar air dalam tanah pada saat dipadatkan meningkat. Kadar air yang ditingkatkan secara bertahap maka berat dari jumlah bahan padat dalam tanah persatuan volume juga akan meningkat secara bertahap juga. Selain kadar air, faktor yang mempengaruhi pemadatan ialah jenis tanah dan usaha pemadatan. Adapun tujuan dari pengujian pemadatan tanah adalah :

1. Meningkatkan mutu tanah
2. Menaikkan nilai kuat geser tanah
3. Memperbaiki daya dukung tanah
4. Mengurangi kompresibilitas atau penurunan tanah
5. Memperkecil permeabilitas tanah
6. Mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air

Gambar 2.3. menunjukkan grafik hubungan antara kadar air dan berat isi tanah dimana pada pengujian *standard proctor* akan memberikan nilai OMC dan nilai MDD suatu jenis tanah. Didalam grafik diperlihatkan pula garis *Zero air void line* (ZAVL) yang merupakan garis yang menggambarkan hubungan antara berat isi kering dengan kadar air dalam kondisi tanah tidak mengandung udara sama sekali dan S_r 100 %. Pada keadaan apapun, kurva pemadatan tidak akan memotong atau melebihi garis ZAVL.



Gambar 2.3. Hubungan Antara Kadar Air dan Berat Isi Volume Kering Tanah
Sumber: Braja M. Das 1995

2.4.1. Uji *Standard Proctor*

Pengujian didalam laboratorium yang digunakan untuk mendapatkan berat volume kering maksimum dan kadar air optimum ialah uji *standard proctor*. Pemadatan yang dilakukan pada pengujian ini adalah pemadatan tanah standar. Dengan syarat dan ketentuan pemadatan tertera pada ASTM D698 dengan ketentuan sebagai berikut :

Tabel 2.2. Syarat dan Ketentuan *Standard Proctor*

	Tes <i>Proctor Standart</i>
Berat <i>Hammer</i>	24.5 N (5.5 lb)
Tinggi Jatuh <i>Hammer</i>	305 mm (12 in)
Banyaknya <i>Layer</i>	3
Banyaknya Pukulan	25
Energi Kompaksi (CE)	12400 lb.ft/ft ³
Tanah	(-) Saringan No. 4

Sumber: ASTM 618-94a, 1994

Hubungan berat dan volume ialah kadar air, porositas, angka pori, berat volume, berat jenis, derajat kejenuhan dan lainnya. Kadar air diartikan sebagai perbandingan

antara berat air (W_w) dengan berat butiran (W_s) dalam tanah dinyatakan dalam (%). Cara untuk mendapatkan kadar air bisa dengan cara mengambil tanah basah lalu dikeringkan di oven. Perhitungan kadar air dapat dilihat pada rumus berikut:

$$w = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$\bar{w} = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3} \quad (2)$$

Keterangan :

w = kadar air (%)

W_1 = berat kontainer (gr)

W_2 = berat kontainer + berat tanah basah (gr)

W_3 = berat kontainer + berat tanah kering (gr)

Perhitungan berat volume basah dapat dilihat pada rumus berikut:

$$\gamma_{wet} = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Keterangan:

V = volume (cm^3)

M = berat tanah (kg)

γ_{wet} = berat volume basah tanah (KN/m^3)

Perhitungan rumus volume *mould* sebagai berikut :

$$V = 0,25 \times 3,14 \times D^2 \times t \quad (4)$$

Keterangan:

V = volume (cm^3)

D = Diameter *Mould* (cm)

T = Tinggi *Mould* (cm)

Setelah itu menghitung nilai kepadatan kering, perhitungan nilai kepadatan kering dapat dilihat pada rumus berikut:

$$\gamma_{dry} = \frac{\gamma_{wet}}{1 + w} \quad (5)$$

Keterangan :

w = kadar air (%)

γ_{wet} = berat volume basah tanah (kN/m³)

γ_{dry} = berat volume kering tanah (kN/m³)

Zero air void line (ZAVL) merupakan garis yang menggambarkan hubungan antara berat isi kering dengan kadar air dalam kondisi tanah tidak mengandung udara sama sekali dan S_r 100 %. Perhitungan garis ZAVL dapat dilihat pada rumus berikut:

$$\gamma_{dry\ ZAVL} = \frac{G_s \times 10}{1 + G_s \times w} \quad (6)$$

Keterangan :

w = kadar air (%)

G_s = berat jenis tanah

ZAVL = *zero air void line*

Pada pengujian pemadatan standar, tanah dicampur dengan menggunakan air pada kadar yang berbeda. Penentuan penambahan kadar air dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta w = M \frac{(w_r - w_0)}{(1 + w_0)} \quad (7)$$

$$W_{opt} \approx 0,894 PL \quad (8)$$

Keterangan :

Δw = penambahan kadar air

M = berat tanah (2000 g)

w_r = kadar air rencana

w_0 = kadar air awal (kondisi SSD)

PL = batas plastis

2.5. Uji *California Bearing Ratio* (CBR)

Didalam penentuan perencanaan tebal perkerasan jalan dibutuhkan nilai CBR sebagai acuan dalam mendesain jalan. Uji CBR dikembangkan oleh *California State Highway Departement*. Istilah CBR menunjukkan perbandingan rasio antara beban yang diperlukan untuk menekan piston logam ke dalam tanah agar

mendapatkan penetrasi tertentu dengan beban yang diperlukan pada penekanan piston terhadap material batu pecah di California dengan penetrasi yang sama (Canonica, 1991). CBR pertama kali diperkenalkan oleh *California Division of Highways* pada tahun 1928. Metode CBR dipopulerkan oleh O. J. Porter. CBR merupakan penentuan nilai cbr contoh material tanah, campuran tanah yang dipadatkan di laboratorium pada kadar air sesuai ketentuan (SNI 1744, 2012). Nilai CBR yang diperoleh digunakan untuk menghitung tebal lapisan perkerasan jalan di atas tanah dasar.

2.5.1. Jenis-jenis Pengujian CBR

Pengujian CBR dibagi atas beberapa jenis yaitu :

1. CBR Lapangan

Pengujian CBR lapangan disebut sebagai *CBR inplace* atau *field inplace* dengan kegunaan seperti berikut ini :

- a. Mendapatkan nilai CBR asli di lapangan sesuai keadaan cuaca dan kondisi tanah pada saat itu. *CBR inplace* digunakan untuk merencanakan tebal lapis perkerasan yang tanahnya tidak mengalami pemadatan lagi.
- b. Untuk menentukan kapasitas rata-rata yang dapat dipikul oleh suatu lapisan tanah.

2. Uji DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) di lapangan

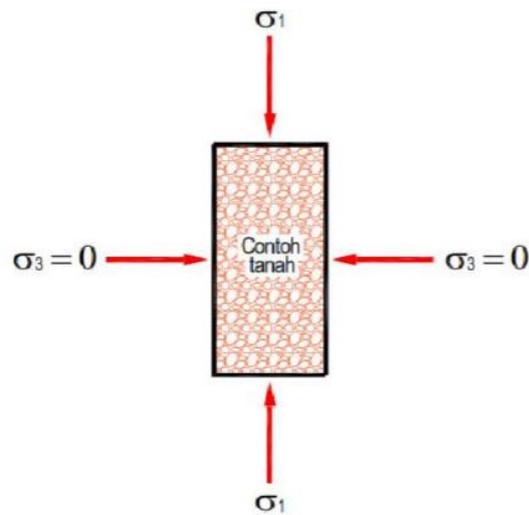
Pengujian ini dikembangkan oleh TRL (*Transport and Road Research Laboratory*), Crowthorne, Inggris. Pengujian DCP diperkenalkan di Indonesia pada tahun 1985/1986. Pengujian ini digunakan untuk menentukan nilai CBR tanah dasar, timbunan, atau suatu sistem perkerasan. Pengujian ini menghasilkan data kekuatan tanah sampai kedalaman ± 70 cm di bawah permukaan tanah dasar. Uji DCP dilaksanakan dengan mencatat jumlah pukulan dan penetrasi dari konus yang tertanam pada tanah karena pengaruh penumbuk kemudian dengan menggunakan grafik dan rumus, pembacaan DCP diubah menjadi pembacaan yang setara dengan nilai CBR. Pengujian ini merupakan salah satu alternatif jika pengujian CBR lapangan tidak dapat dilakukan. Cara pengujian DCP berdasarkan ASTM D 6951.

3. CBR Laboratorium

Pengujian CBR laboratorium yang dimaksud adalah penentuan nilai CBR contoh material tanah yang dilakukan di laboratorium sesuai dengan jumlah kadar air yang ditentukan. CBR laboratorium umumnya digunakan untuk perencanaan pembangunan jalan baru dan lapangan terbang. CBR Laboratorium dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu CBR *unsoaked* dan CBR *soaked*. CBR *soaked* merupakan CBR yang dilakukan dengan cara perendaman selama 4 hari. Dilakukannya perendaman adalah untuk menggambarkan sebagai kondisi lapangan dimana tanah telah terendam oleh air selama 4 hari akibat hujan secara terus menerus ataupun air yang menggenang karena kondisi air yang tidak teraliri dengan baik. Untuk pelaksanaan pengujian CBR rendaman membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan CBR tanpa rendaman dikarenakan kondisi yang harus direndam selama 4 hari terlebih dahulu, ditiriskan selama 1 hari dan baru dapat dilakukan pengujian.

2.6. Pengujian Kuat Tekan Bebas Tanah (*Unconfined Compressive Strength*)

Uji kuat tekan bebas tanah digunakan untuk menentukan kuat tekan bebas tanah yang mempunyai kohesi, baik tanah *undisturbed*, (*remolded*) ataupun tanah *compacted*. Pengujian UCS memiliki beberapa kelebihan yaitu pelaksanaannya yang simpel dan sampel yang dibutuhkan tidak banyak. Nilai q_u merupakan nilai tegangan aksial maksimum yang dapat ditahan benda uji silindris sebelum mengalami keruntuhan geser. Setiap material apabila dikenai beban akan mengalami perubahan bentuk. Gaya per satuan luas disebut *stress* (σ) selain (σ) sampel juga mengalami perubahan panjang (Δl) saat panjang semula (l) disebut *strain* (ϵ). *Stress* yang dibutuhkan untuk menyebabkan patahan disebut dengan *uniaxial compressive strength*, (C_u). Standar pengujian *Unconfined Compressive Strength* terdapat pada SNI 3638:2012. Berikut merupakan gambaran skema pengujian UCS.



Gambar 2.4. Skema Pengujian UCS

Tegangan aksial yang diberikan di atas sampel perlahan-lahan ditambah sampai dengan sampel mengalami keruntuhan. Pada saat keruntuhannya, karena $\sigma_3 = 0$, maka:

$$\tau_f = \frac{\sigma_1}{2} = \frac{q_u}{2} = c_u \quad (9)$$

Dimana:

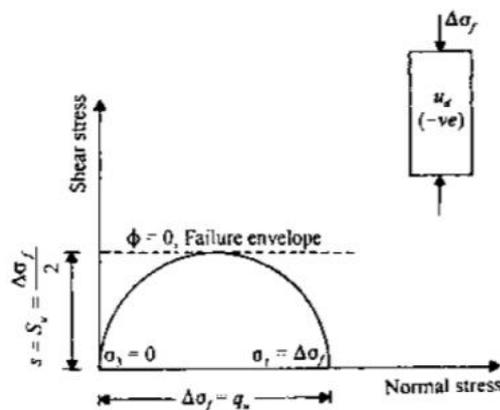
τ_f = kuat geser (kg/cm^2)

σ_1 = tegangan utama (kg/cm^2)

q_u = kuat tekan bebas tanah (kg/cm^2)

c_u = kohesi (kg/cm^2)

Gambar 2.5. di bawah ini menunjukkan nilai lingkaran Mohr untuk pengujian UCS.



Gambar 2.5. Keruntuhan Geser Kondisi Air Termampatkan q_u di Atas Sebagai Kekuatan Tanah Kondisi Tak Tersekap

Sumber: Das 2008

Untuk menghitung tegangan dalam pengujian UCS dapat diketahui berdasarkan rumus berikut ini.

$$\tau = P/A \quad (10)$$

Dimana:

τ = Tegangan

P = Beban

A = Luas

Keruntuhan terjadi akibat adanya keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Hubungan tegangan geser dan tegangan normal dinyatakan dengan :

$$\tau = f(\sigma) \quad (11)$$

Dimana :

τ = Tegangan Geser

σ = Tegangan Normal

Nilai UCS dihasilkan dari proses pembacaan proving ring dial maksimum.

$$q_u = \frac{k \times R}{A} \quad (12)$$

Dimana :

q_u : Kuat Tekan Bebas

k : Kalibrasi proving ring

R : Pembacaan maksimum

A : Luas penampang contoh tanah pada saat pembacaan R

$$C_u = \frac{q_u}{2} \quad (13)$$

Dimana :

q_u : Kuat Tekan Bebas

Pengujian UCS adalah pengujian di dalam laboratorium untuk menghitung kekuatan geser tanah. Uji ini mengukur seberapa kuat tanah menerima kuat tekan yang diberikan sampai tanah tersebut terpisah dari butiran-butirannya juga mengukur regangan tanah akibat tekanan tersebut. Pada tabel 2.3. dapat diketahui pengelompokkan nilai q_u berdasarkan konsistensi jenis tanah.

Tabel 2.3. Hubungan Nilai q_u Tanah Lempung Dengan Konsistensinya

Konsistensi	q_u (kg/cm ²)
Lempung keras	> 4
Lempung sangat kaku	2 – 4
Lempung kaku	1 – 2
Lempung sedang	0,5 – 1
Lempung lunak	0,25 – 0,5
Lempung sangat lunak	< 0,25

Sumber: Hardiyatmo, 2002

2.7. Pengujian Kekuatan dengan CBR

Penentuan nilai CBR yang biasa digunakan untuk menghitung kekuatan pondasi jalan yaitu saat penetrasi “0,1” dan penetrasi “0,2” untuk pengujian di laboratorium.

Rumus perhitungan nilai CBR yaitu sebagai berikut :

$$\text{Nilai CBR pada penetrsai “0,1”} = \frac{x}{3000 \text{ lbs}} \times 100\%$$

$$\text{Nilai CBR pada penetrsai “0,2”} = \frac{y}{4500 \text{ lbs}} \times 100\%$$

Dimana :

x = pembacaan dial saat penetrasi “0,1”

y = pembacaan dial saat penetrasi “0,2”

Nilai CBR yang dipakai biasanya menggunakan penetrasi 2,54 mm (0,1 inci). Jika CBR pada penetrasi 5,08 mm (0,2 inci) lebih besar dari CBR pada penetrasi 2,54 mm (0,1 inci), pengujian CBR harus diulang kembali. Jika setelah dilakukan pengulangan dan tetap memberikan hasil yang sama yaitu penetrasi 5,08 mm (0,2 inci) lebih besar dari CBR pada penetrasi 2,54 mm (0,1 inci) maka nilai CBR penetrasi 5,08 mm (0,2 inci) yang akan digunakan.

2.8. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah merupakan sebuah proses atau cara menambahkan atau mencampur sesuatu pada tanah untuk untuk memperbaiki sifat tanah dengan menambahkan sesuatu pada tanah, agar dapat menaikkan kekuatan tanah dan mempertahankan kekuatan geser (Hardiyatmo, 2002). Bowles (1991) menyatakan bahwa stabilisasi tanah mungkin dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Meningkatkan kepadatan tanah.

2. Menambahkan bahan-bahan untuk meningkatkan kohesi dan atau kekuatan geser dari tanah.
3. Menambahkan bahan-bahan yang mampu membuat perubahan secara kimiawi maupun fisik dari tanah.
4. Merendahkan permukaan air tanah.
5. Memindahkan atau mengganti tanah yang bersifat kurang bagus tersebut.

2.9. Studi Literatur

Beberapa penelitian laboratorium dan juga jurnal yang menjadi acuan dalam penelitian ini dikarenakan adanya kemiripan dan kesamaan sampel tanah maupun bahan pencampur yang digunakan dan metode yang digunakan, dimana literatur pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Stabilisasi tanah merauke – papua dengan menggunakan semen. Penelitian ini dilakukan oleh Andrew Tjakrakusuma, Hadian Akbar Maulana, Gogot Setyo Budi, mahasiswa dan staf pengajar Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Petra Surabaya. Hasil dari penelitian ini adalah:
Pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan, tanah Merauke ini mempunyai karakteristik *Liquid Limit* sebesar 51% dan *Plastic Limit* 30% serta memiliki index plastisitas (PI) sebesar 21% dan termasuk bersifat plastisitas sedang – tinggi. Berdasarkan sistem klasifikasi tanah menurut AASTHO M-145, tanah ini termasuk kedalam kelompok kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung dan masuk dalam kategori A-2-7. Penggunaan semen mampu meningkatkan angka CBR (kekokohan) *Unsoaked* sebesar 11% pada campuran 3% semen, 21.5% pada campuran 6% semen, 29% pada campuran 10% semen jika dibandingkan dengan CBR tanah asli. pada angka CBR (kekokohan) *Soaked* memberikan peningkatan kekuatan sebesar 5.5% pada campuran 3% semen, 12% peningkatan pada campuram 6% semen, serta 77% peningkatan pada campuran 10% semen. Peningkatan angka CBR *Soaked* maupun *Unsoaked* yang paling besar terjadi pada campuran 10% semen. Campuran tersebut cenderung lebih stabil karena angka CBR *Soaked* lebih tinggi dibandingkan dengan angka CBR *Unsoaked* sekitar 24%. Peningkatan pada CBR *Unsoaked* kemungkinan

dikarenakan adanya proses hidrasi semen dengan air yang optimal pada campuran semen 10% dengan perendaman 4 hari.

2. Pengaruh Penambahan *Fly Ash* dan *Tras* Pada tanah lempung Terhadap Nilai CBR. Penelitian ini dilakukan oleh Bill Yohanes Walewangko, Oktovian B. A. Sompie, J. E. R. Sumampouw, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Manado, 2020. Adapun hasil dari penelitian adalah sebagai berikut:

Dengan variasi campuran antara *fly ash* 2.5% + *Tras* 2.5% sampai dengan *fly ash* 10% + *tras* 10%, didapatkan nilai berat isi tanah kering maksimum semakin besar, sedangkan kadar air optimum semakin mengecil mengikuti persamaan $y = -0,0081x^2 + 0,0339x + 23,963$ & $y = 0,0003x^2 + 0,0018x + 1,1874$, menyatakan bahwa semakin padat tanah tersebut berarti semakin besar pula daya dukungnya. Lempung yang distabilisasi dengan *fly ash* 2.5% + *Tras* 2.5% sampai dengan *fly ash* 10% + *tras* 10% menunjukkan adanya peningkatan nilai CBR rendaman mengikuti persamaan $y = 0,0037x^2 + 0,0113x + 1,5342$, Kenyataan semakin besar (%) penambahan *Fly Ash* dan *tras* maka semakin besar juga nilai CBRnya.

3. Pemanfaatan *Fly Ash* Batubara Sebagai Bahan Stabilisasi Terhadap Daya Dukung Tanah Lempung. Penelitian ini dilakukan oleh Chairunnisa Van Gobel, Akhmad Marzuko, mahasiswa dan staf pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Hasil dari penelitian ini adalah:

Hasil pengujian CBR tanah asli *unsoaked* yaitu 9,3%, untuk nilai CBR *soaked* sebesar 1,106%. Meningkatnya nilai CBR seiring dengan bertambahnya kadar *fly ash*. Pada pengujian *swelling* didapatkan hasil yaitu semakin bertambahnya kadar *fly ash* dengan variasi 5%, 10%, dan 15% maka potensi pengembangan mengalami penurunan berturut-turut sebesar 81,235%, 88,2%, dan 94,724% terhadap nilai *swelling* tanah asli sebesar 7,509%.

4. Studi Analisis Daya Dukung Tanah Lempung Berplastisitas Tinggi yang Dicampur Zeolit. Penelitian ini dilakukan oleh Rian Alfian, Lusmeilia Afriani, Iswan, mahasiswa dan dosen pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung, 2015. Adapun hasil dari penelitian adalah sebagai berikut:

Penambahan zeolit dengan masa pemeraman dan perendaman dapat meningkatkan nilai CBR. Nilai CBR tertinggi terdapat pada sampel tanah dengan campuran zeolit sebesar 14% yang menggunakan pemadatan modifikasi lama pemeraman 14 hari dan perendaman 4 hari yaitu sebesar 2,78%. Hal tersebut disebabkan oleh kandungan zeolit yang dapat mengikat partikel tanah lempung. Jadi, semakin banyak campuran zeolit maka semakin naik pula daya dukung tanahnya. Nilai CBR pada penelitian ini tidak dapat digunakan sebagai *subgrade* pada konstruksi jalan dikarenakan nilai CBRnya kurang dari 6%.

5. Pemanfaatan Geopolimer Abu Terbang Sebagai Pozzolanik Tanah Lempung Untuk Material Tanah Dasar Perkerasan. Penelitian ini dilakukan oleh Soewignjo A., Nugroho, Puspa, Ningrum, Muhardi Program Sarjana Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau, H R Subarantas KM 12 Pekanbaru dan Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Abdurrab, 2020. Hasil dari penelitian ini adalah:

Hasil penelitian ini pencampuran *fly ash* pada lempung mempunyai efek menjadikan gravitas khusus (*Gs*), indeks plastisitas (*PI*) nilainya cenderung turun. Kepadatan kering tanah maksimum menurun, kadar air optimum meningkat dengan makin tingginya kandungan abu terbang dalam campuran. Bertambahnya kadar abu terbang, maka daya dukung tanah (nilai CBR) akan semakin meningkat. Pencetakan sampel pada kandungan air lebih tinggi dari nilai kadar air optimum, daya dukung CBR sampel menurun dikarenakan berkurangkan kepadatan kering tanah dari nilai maksimum. Pengujian daya dukung sampel dengan uji CBR laboratorium setelah proses pemadatan dalam *mould* CBR metode pertama yaitu setelah mencetak sampel dalam mold kemudian dirawat selama 4 (empat) minggu memiliki nilai CBR lebih tinggi dibandingkan angka CBR pada tanah curing metode kedua yaitu setelah dicetak dengan *mould* CBR lalu dikeluarkan untuk diperam selama 28 hari menggunakan plastik (diperam tidak didalam *mould*)

6. Stabilisasi Tanah Lempung Lunak Menggunakan *Fly Ash* Dan Pengaruhnya Terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas (Studi Kasus Jalan Desa Sudimanik Kec. Cibaliung Kab. Pandeglang). Penelitian ini dilakukan oleh Rama Indera K., Enden Mina, Supandi Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sultan

Ageng Tirtayasa Jl. Jenderal Sudirman Km.3 Kota Cilegon – Banten Indonesia, 2017. Hasil dari penelitian ini adalah:

1. Hasil pengujian sifat fisik tanah menurut sistem klasifikasi USCS tanah termasuk kedalam MH atau OH dengan nilai indeks plastisitas sebesar 22,07%, berjenis tanah lempung non organik. Karena tanah termasuk kedalam kategori lempung dan plastisitas tinggi, maka diperlukannya perbaikan, salah satunya dengan cara stabilisasi tanah menggunakan bahan tambah *fly ash*.
2. Pada pengujian UCS diperoleh hasil sebagai berikut:
 - a. *Fly Ash* dapat meningkatkan nilai UCS tanah, nilai UCS paling optimum berada pada saat presentase 15% *fly ash* dengan lama pemeraman 28 hari yaitu 8,33 kg/cm² yang meningkat dari nilai awal sebesar 2,69 kg/cm² dengan presentase selisih kenaikan sebesar 209,67%.
 - b. Pada penelitian ini *fly ash* tidak dapat mengubah sifat fisik tanah lempung lunak. Setelah tanah dicampur dengan *fly ash* tanah masih mempunyai potensi pengembangan yang besar yang ditandai dengan naiknya nilai indeks plastisitas tanah. Namun tanah dapat digunakan sebagai *subgrade* apabila tanah dalam keadaan kering optimum dan tidak jenuh air.
7. Pemanfaatan *Fly Ash* Untuk Peningkatan Nilai Cbr Tanah Dasar. Penelitian ini dilakukan oleh Yayuk Apriyanti, Roby Hambali, Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Universitas Bangka Belitung, 2014. Hasil dari penelitian ini adalah:
 1. Tanah lempung (kelas A-7-6) dengan persentase *fly ash* yang digunakan sebesar 10%, 13% dan 16% dapat diketahui bahwa nilai CBR semakin meningkat dengan bertambahnya persentase *fly ash*. Nilai CBR maksimum didapat dari persentase *fly ash* 16% .
 2. Tanah lempung (kelas A-7-6) yang distabilisasi dengan *fly ash*, nilai CBR semakin meningkat dengan bertambahnya umur pemeraman. Nilai CBR maksimum didapat dari pemeraman umur 28 hari.
 3. Nilai CBR maksimum didapat sebesar 15,1 % dengan persentase *fly ash* 16% dan umur pemeraman 28 hari sehingga persentase peningkatan nilai CBR didapat sebesar 202 % dibandingkan dari nilai CBR tanah A-7-6 tanpa campuran yang nilai CBR nya sebesar 5%.

8. Stabilisasi Tanah Liat Menggunakan Slag Dan Fly Ash Dengan Mengacu Pada Nilai UCT (Studi Kasus: Jalan Kadusentar, Kabupaten Pandeglang-Banten). Penelitian ini dilakukan oleh W Fathonah, DE Intari, E Mina, RI Kusuma dan Mahfudoh, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon 42435, Indonesia, 2019. Adapun hasil dari penelitian adalah sebagai berikut:

Berdasarkan sistem USCS tanah di lokasi penelitian termasuk dalam kelas MH yaitu lempung an organik, lempung berlanau, pasir halus dengan batas cair 58%, batas plastis 37,525% dan indeks plastisitas 20,475% yang dapat diklasifikasikan sebagai tanah liat kohesif dengan indeks plastisitas tinggi, maka tanah ini perlu mengalami perbaikan. Penambahan *slag* dan *fly ash* di dalam tanah mampu meningkatkan kuat tekan bebas. Hasil dengan 0 hari curing adalah 1,407 kg / cm² Qu tertinggi sebesar 8.393 kg / cm² pada persentase fly ash 20% + 10% slag tergolong *Hard Consistency* dan mampu menurunkan indeks plastisitas hingga <7% yang artinya tanah tergolong plastisitas rendah. Oleh karena itu, tanah sangat layak untuk digunakan sebagai tanah dasar jalan karena sifat tanah yang semakin membaik dengan berkurangnya *swell-shrink of soil*.