

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

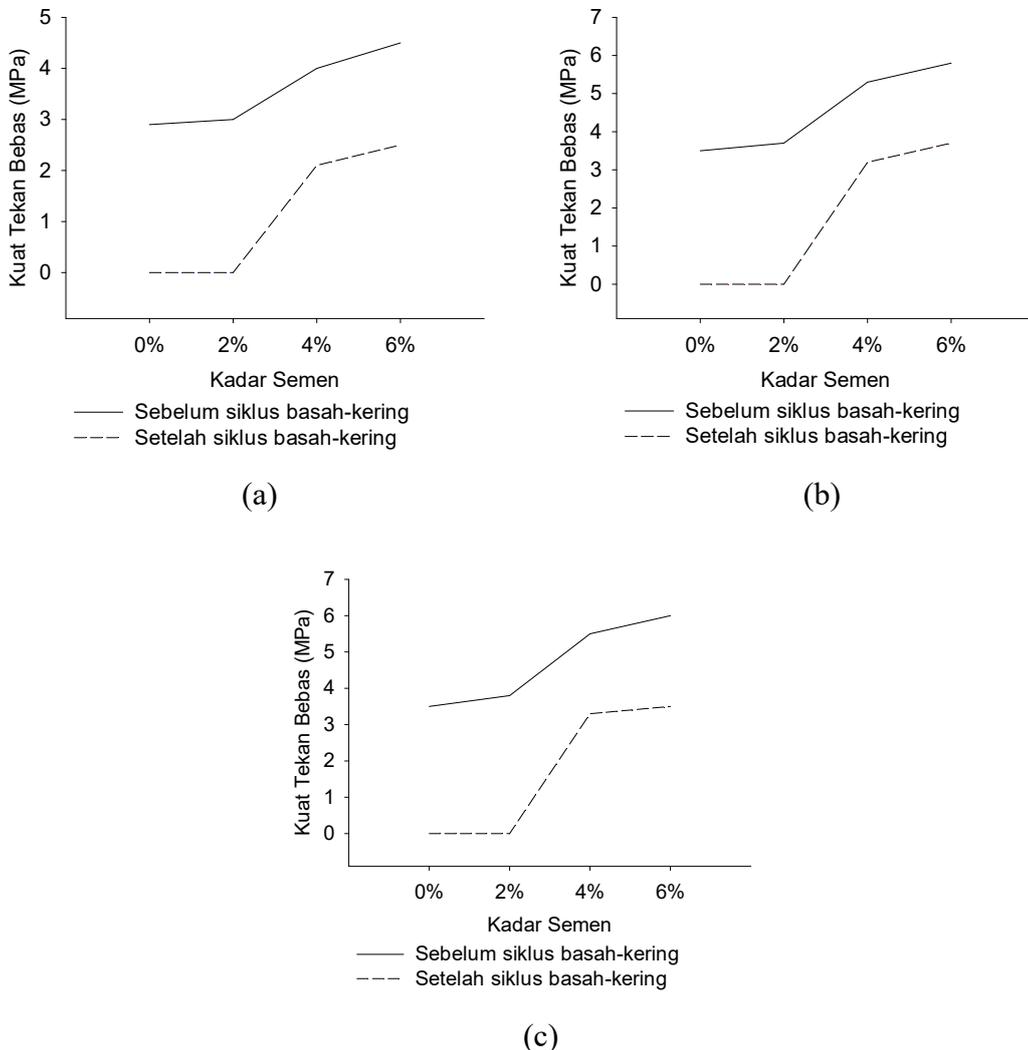
Mudrock didefinisikan sebagai batuan sedimen atau sedimen silisiklastik yang memiliki butiran halus hingga sangat halus. Lebih dari 35% bagiannya terdiri dari butiran yang berukuran kecil dari 60 μm . *Mudrock* memiliki lebih dari 65% kandungan silika dan 50% atau lebih karsida dan mineral lempung (Grainger, 1984). Sadisun dkk. (2005) menjelaskan bahwa *mudrock* sangat mudah mengalami pelapukan apabila mengalami siklus basah kering. Selain itu kekuatannya juga akan menurun drastis apabila berada pada kondisi basah.

2.2. Penelitian Terdahulu tentang Stabilisasi Tanah Menggunakan Semen

Stabilisasi tanah dengan menggunakan semen telah dilakukan pada berbagai pekerjaan konstruksi sejak lama. Penelitian terkait penggunaan semen pada berbagai jenis tanah telah banyak dilakukan untuk mengkaji efektifitas penggunaan dan pengaruhnya terhadap sifat mekanis tanah. Pengaruh penambahan semen terhadap perubahan komposisi unsur-unsur penyusunnya juga telah umum diteliti. Djelloul dkk. (2018) melakukan penelitian pada tanah lempung yang diambil dari daerah Mers El Kebir (Algeria). Lempung tersebut kemudian distabilisasi dengan menggunakan semen. Penggunaan semen akan menjadi efektif apabila persentase penambahannya dapat menaikkan pH tanah sampai di atas 12,4. Hal ini dimaksudkan agar reaksi pozzolanik dapat berlangsung selama proses pemeraman. Untuk mencapai tingkat pH tersebut diperlukan kadar semen di atas 4% dari berat kering tanah lempung.

Hasil dari penelitian yang dilakukan Djelloul dkk. (2018) menunjukkan bahwa penambahan semen dapat menurunkan indeks plastisitas tanah. Klasifikasi tanah juga berubah dari tanah berplastisitas sedang menjadi tanah berplastisitas rendah. Hal ini disebabkan oleh proses flokulasi dan aglomerasi yang terjadi ketika semen ditambahkan. Kuat tekan dan durabilitas tanah juga meningkat seiring dengan penambahan persentase kadar semen pada tanah. Pengujian tersebut membandingkan nilai kuat tekan bebas antara spesimen yang diberikan siklus basah-kering dan spesimen tanpa mengalami siklus basah-kering. Gambar 2.1

menunjukkan spesimen yang mengalami siklus basah-kering memiliki kuat tekan yang lebih rendah dikarenakan durabilitas tanah asli yang rendah.



Gambar 2.1 Nilai Kuat Tekan Bebas pada Spesimen Sebelum dan Sesudah Siklus Basah-Kering a) Waktu Pemeraman 7, b) Waktu Pemeraman 28, dan c) Waktu Pemeraman 90 hari (Djelloul dkk., 2018)

Pakbaz dan Alipour (2012) meneliti tentang pengaruh pencampuran semen pada tanah lempung yang berasal dari sekitar pelabuhan Imam Khomeini, Iran pada kedalaman 20 meter. Kuat tekan dan sifat-sifat geoteknik tanah tersebut diuji untuk menganalisis perilaku tanah apabila dilakukan *deep mixing* pada tanah tersebut. Sampel yang diuji dipersiapkan dengan kadar semen sebanyak 4%, 6%, 8%, dan 10%. Selain itu kadar air juga divariasikan menjadi 30%, 48%, dan 70%. Sebelum dilakukan uji tekan, benda uji diperam dengan durasi 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa seiring dengan penambahan kadar semen

maka kuat tekan dari tanah akan meningkat pula. Kuat tekan yang lebih tinggi ditunjukkan oleh spesimen dengan kadar air yang lebih rendah. Penambahan kadar semen tidak terlalu mempengaruhi indeks plastisitas dari tanah. Namun penambahan semen dapat meningkatkan batas cair tanah. Hubungan antara batas plastis dan kadar semen hanya dapat dilihat kecenderungan kenaikannya pada spesimen dengan kadar air di atas 70%. Menurut Chew dkk. (2004) hal ini kemungkinan diakibatkan oleh pembesaran ukuran dari partikel tanah pada proses flokulasi. Pembesaran ukuran partikel menyebabkan bertambahnya rongga udara pada tanah sehingga jumlah air yang terperangkap di dalam tanah akan meningkat. Rongga-rongga ini juga menyebabkan kenaikan pada permeabilitas tanah.

Selain pada tanah lempung, stabilisasi dengan semen juga pernah dikaji pada tanah yang berasal dari Aberdeen, Everett, dan Palouse (Washington) oleh Sariosseiri dan Muhunthan (2009). Menurut *Unified Soil Classification System* (USCS) tanah tersebut termasuk pada tanah jenis ML (pasir halus berlanau atau lempung), SP-SM (pasir bergradasi buruk atau pasir berlanau), ML-CL (lanau berlempung berpasir halus atau kerikil) secara berurutan. Penambahan semen pada jenis tanah ini terbukti dapat meningkatkan kuat tekan bebas tanah dan dapat menurunkan kadar air. Pengurangan kadar air akibat penambahan semen ini berlangsung pada kecepatan yang sama hingga 30 menit awal pencampuran. Akibat hal tersebut, pemadatan harus segera dilakukan pada menit-menit awal untuk menghindari kehilangan air dalam jumlah besar (Sariosseiri dan Muhunthan, 2009).

Chummuneerat dkk. (2014) melakukan penelitian terkait perilaku batu pecah yang distabilisasi dengan semen hidrasi atau *Hydrated Cement Treated Crushed Rock Base* (HCTCRB). *Crushed Rock Base* (CRB) adalah material yang umum digunakan sebagai lapisan bawah perkerasan di Australia bagian Barat. Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa *resilient Modulus* pada HCTCRB dipengaruhi oleh lama waktu hidrasi, proses pemadatan, dan proses pengeringan. Namun faktor yang paling berpengaruh adalah kadar air dari spesimen yang diuji. Digunakan tiga cara penambahan air pada saat pemadatan; tanpa penambahan air, penambahan air hingga OMC pada campuran batu pecah dengan semen, dan penambahan air hingga OMC pada saat proses hidrasi. Spesimen yang ditambahkan air pada saat pemadatan akan menghasilkan *resilient modulus* yang

lebih besar dibandingkan dengan spesimen yang tidak ditambahkan air. Spesimen dengan tambahan air akan meningkat kekuatannya tergantung pada proses pengeringan kembali. Pengeringan dilakukan dalam tiga tingkatan; tanpa pengeringan, pengeringan hingga 80% OMC, dan pengeringan hingga 60% OMC.

Pakbaz dan Farzi (2015) membandingkan hasil stabilisasi tanah dengan menggunakan metode *spray mixing* dan *dry mixing* pada tanah yang mengandung 60% bentonit dan 40% pasir. Bentonit adalah salah satu jenis tanah lempung plastis. Penambahan pasir dimaksudkan untuk mempercepat proses konsolidasi primer pada pengujian di laboratorium. Bahan stabilisasi yang digunakan adalah semen dan kapur. Semen yang digunakan adalah semen tipe II. Kapur yang digunakan adalah *non-hydrated lime* atau kapur tohor. Spesimen diperam selama 7, 14, dan 28 hari sebelum dilakukan uji tekan bebas dan uji konsolidasi. Hasil pengujian menunjukkan metode *spray mixing* menggunakan semen menghasilkan kuat tekan yang lebih besar 10% dibandingkan *dry mixing* pada pemeraman 28 hari. Stabilisasi dengan penggunaan kapur justru menunjukkan hasil yang berlawanan. Metode *dry mixing* memiliki nilai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan *spray mixing*. Spesimen dengan bahan stabilisasi semen dan kapur hanya menghasilkan perbedaan kuat tekan yang kecil antara metode *dry* dan *spray mixing*. Secara umum metode *dry mixing* memiliki hasil yang lebih tinggi. Peningkatan kekuatan spesimen terhadap waktu pemeraman pada metode *dry mixing* lebih tinggi dibandingkan *spray mixing*. Modulus elastis yang lebih besar ditunjukkan oleh spesimen yang distabilisasi dengan menggunakan *dry mixing*.

Selain kuat tekan bebas dan modulus elastisitas, parameter lain yang perlu diperhatikan dalam pengujian kuat tekan bebas adalah *brittleness index* atau indeks kegetasan. *Brittleness index* digunakan untuk menentukan sifat mekanik spesimen. Menurut Nygård dkk. (2006), sifat daktail ditunjukkan dengan bentuk deformasi kontraktif atau spesimen mengalami perubahan bentuk dan ukuran serta proses deformasi yang terjadi secara bertahap hingga mengalami keruntuhan. Sifat getas ditunjukkan dengan bentuk deformasi dilatif atau spesimen berbentuk sama namun ukurannya berubah serta keruntuhan terjadi secara tiba-tiba setelah beban puncak, diikuti dengan regangan yang berubah perlahan pada saat mencapai tegangan residu. Sifat getas dapat ditunjukkan dengan bentuk kegagalan geser yang terlihat

pada permukaan. Sifat daktail biasanya menghasilkan deformasi yang lebih menyebar, ditandai dengan pengembangan lateral pada spesimen berbentuk silinder dan kegagalan geser yang tidak terlalu terlihat pada permukaan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Sariosseiri dan Muhunthan (2009) dan Eskisar dkk. (2014), stabilisasi menggunakan semen akan merubah perilaku spesimen yang pada kadar semen 0% bersifat daktail menjadi sangat getas pada kadar 10%. Perilaku spesimen untuk mengalami keruntuhan yang bersifat daktail, semi-getas, dan getas bergantung pada kadar air dan jumlah semen yang digunakan. Semakin rendah kadar air dan semakin tinggi kadar semen, maka spesimen akan bersifat semakin getas (Eskisar, 2015).

2.3. Dasar Teori

2.3.1. *Mudrock*

Mudrock adalah batuan yang terbentuk dari sedimentasi tanah berbutir halus atau lempung. Jumlah *mudrock* diperkirakan mencapai dua pertiga dari seluruh batuan sedimen yang ada di dunia (Ilgen dkk., 2017). *Siltstone* adalah jenis sedimen yang lebih dari sebagian kandungannya terdiri dari lanau dengan ukuran partikel kurang dari 1/16 mm dan lebih besar dari 1/256 mm (Tucker, 2003). *Claystone* terbentuk dari lempung (ukuran partikel kecil dari 1/256 mm) yang tersedimentasi. Apabila lempung tersebut memiliki susunan sedimen berbentuk lembaran dan memiliki bentuk pecahan pipih, maka disebut dengan *shales*. Batuan ini memiliki tingkat kekerasan yang tinggi namun sangat mudah terdegradasi dan kehilangan kekuatannya apabila terpapar atmosfer dan hidrosfer. Menurut Alatas dkk. (2016) *clayshale* yang mengalami siklus basah kering memiliki rasio disintegasi yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan *clayshale* yang mengalami siklus pengeringan secara alami.

Karakteristik dari *mudrock* yang mencolok dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis *mudrock* di lapangan. Beberapa yang paling mudah diamati adalah warna, *degree of fissility*, struktur sedimen dan kandungan mineral, organik, atau fosil yang terdapat di dalamnya. Tabel 2.1 menjabarkan tentang hal-hal apa saja yang harus diperhatikan ketika mengidentifikasi dan mengklasifikasikan suatu jenis *mudrock*.

Tabel 2.1 Hal Yang Harus Diperhatikan dalam Pengamatan *Mudrock* dan Pendeskripsiannya (Tucker, 2003)

Sifat <i>mudrock</i>	Pendeskripsian
Warna	Abu-abu, merah, hitam, hijau, beragam, memiliki bercak-bercak, menyerupai marmer.
Tipe pecahan	Pipih (<i>shale</i>), tidak pipih (<i>mudstone</i>), bongkahan, seperti tanah, tipis, terbelah.
Struktur sedimen	Berlapis, berlapis tipis, terbioturbasi, berakar, masif (tidak berstruktur).
Kandungan mineral selain lempung	Kuarsit, muskovit, kapur, gipsum, pirit, siderit, dll.
Kandungan organik	Kandungan organik tinggi, mengandung bitumen, berkarbon, kandungan organik rendah.
Fosil pada sedimen	Mengandung fosil, mengandung graptolit, mengandung ostracoda, dll.

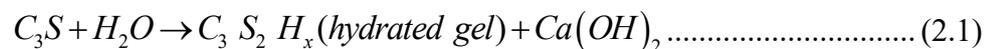
2.3.2. Stabilisasi Tanah dengan Semen

Menurut ASTM (2013a) dalam standar C219-13a, semen *Portland* merupakan hasil penghancuran *clinker* yang terbuat dari pengkristalan kalsium silikat. Semen *Portland* mengandung air, kalsium sulfat, lebih dari 5% batu kapur, dan bahan tambahan lain. Semen tipe I digunakan pada pekerjaan yang tidak membutuhkan spesifikasi khusus tertentu.

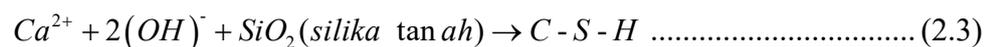
Penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi hampir dapat digunakan pada semua jenis tanah. Namun, tanah dengan kandungan organik yang tinggi dan pH rendah tidak cocok distabilisasi menggunakan semen. Menurut Robbins dan Mueller (dalam ACI, 2009) tanah dengan kadar organik lebih dari 2% dan memiliki pH kurang dari 5,3 tidak akan bereaksi dengan baik apabila dicampurkan dengan semen. Stabilisasi dengan menggunakan semen merupakan salah satu metode stabilisasi tanah secara kimiawi. Stabilisasi kimiawi dilakukan dengan cara mencampurkan bahan-bahan kimia dengan tanah agar terjadi reaksi antara keduanya (Muntohar, 2014b). Reaksi yang terjadi diantaranya pertukaran kation, flokulasi, aglomerasi, hidrasi semen, dan reaksi pozzolanik. Pertukaran kation terjadi ketika unsur kalsium yang berasal dari semen menggantikan natrium dan kalium yang berada pada *diffuse double layer*. Lapisan ini terbentuk di antara partikel-partikel lempung yang bermuatan negatif. Jika lapisan ini semakin tebal maka tanah akan bersifat lebih plastis. Penggantian pengisi lapisan dengan unsur kalsium ini dapat memperkecil ketebalan dari *diffuse double layer*. Ketika ketebalan

diffuse double layer menipis maka tanah akan berperilaku lebih getas. Proses pertukaran kation selanjutnya diikuti oleh proses flokulasi dan aglomerasi. Flokulasi dan aglomerasi menyebabkan partikel-partikel lempung saling mengikat dan membentuk butiran yang lebih besar. Pembesaran ukuran partikel ini dapat meningkatkan sudut gesek internal dari tanah yang distabilisasi.

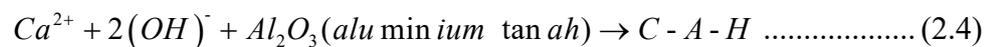
Stabilisasi dengan menggunakan semen memerlukan reaksi hidrasi. Hidrasi terjadi apabila semen direaksikan dengan air. Hidrasi pada semen akan menghasilkan produk semen yang akan mengisi pori-pori akibat proses flokulasi dan aglomerasi. Menurut Solanki dan Zaman (2002) dan Yoobanpot dkk. (2017), produk semen yang dihasilkan dapat berupa kalsium-silikat-hidrat (C-S-H), kalsium-alumina-hidrat (C-A-H), dan kalsium-alumina-silikat-hidrat (C-A-S-H). Hal yang sama juga terjadi selama reaksi pozzolanik. Reaksi ini berlangsung dalam jangka waktu yang lama dan membutuhkan pH yang tinggi agar berjalan dengan baik. Menurut Wardani dan Muntohar (2018) terbentuknya produk semen tersebut merupakan hasil dari reaksi kimia antara kalsium hidroksida dan silika tanah sesuai pada Persamaan 2.1 sampai dengan Persamaan 2.4.



(Produk utama bahan semen)



(Produk sekunder bahan semen)



(Produk sekunder bahan semen)

2.3.3. Metode Pencampuran *Dry Mixing* dan *Spray mixing*

Pengujian-pengujian terdahulu yang pernah dilakukan sebagian besar menggunakan metode pencampuran antara semen dan tanah dalam keadaan kering atau metode *dry mixing*. Bell (1976) dan Athanasopoulou (2016) menggunakan metode *dry mixing* dalam mempersiapkan spesimen yang digunakan untuk pengujian kuat tekan bebas. Spesimen dicetak pada kondisi kadar air optimum dan berat volume kering maksimum. Tanah dihaluskan dan kemudian campurkan dengan semen dan air hingga mencapai tingkat homogenitas yang tinggi. Campuran

tanah-semen kemudian dipadatkan dengan energi yang konstan dan disimpan pada ruangan dengan suhu berkisar antara 21°C dan 25°C.

Penggunaan metode *wet mixing* dalam mencetak spesimen diterapkan oleh Eskisar (2015) dalam penelitiannya. Tanah yang digunakan terlebih dahulu dikeringkan dan dihaluskan sebelum dicampurkan dengan pasta semen. Pembuatan pasta semen menggunakan faktor air semen sebesar 0,6. Tanah dicampurkan terlebih dahulu dengan air hingga homogen, setelah itu pasta semen dimasukkan kedalam campuran. Proses pencetakan spesimen diusahakan tidak lebih dari 10 menit agar campuran tidak terlebih dahulu mengeras. Pencetakan benda uji dilakukan dengan memadatkan spesimen secara bertahap sebanyak tiga lapisan. Pada penelitian yang dilakukan Kang (2017) rasio perbandingan air semen yang digunakan adalah 1:1 dengan pengadukan pasta semen selama 2 menit dan pengadukan seluruh campuran selama 30 menit. Namun penelitian ini menggunakan temperatur rendah pada saat pencampuran sehingga laju reaksi hidrasi bisa dihambat.

2.3.4. Uji Berat Jenis, *Atterberg Limit*, dan Gradasi Butiran Tanah

Menurut ASTM (2014) dalam standar D854-14, berat jenis (G_s) adalah perbandingan antara masa dari suatu tanah dengan volume tertentu dengan masa air destilasi bebas udara bervolume sama pada suhu 20°C. Berat jenis juga bisa didefinisikan sebagai perbandingan antara berat volume tanah dan berat volume air. Berat jenis dapat dihitung dengan Persamaan 2.5.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan,

G_s = berat jenis tanah

γ_s = berat volume tanah (g/cm³)

γ_w = berat volume air = 1 g/cm³

Uji *Atterberg limit* atau batas-batas konsistensi tanah adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui batas cair, batas plastis, batas susut, dan indeks plastisitas dari tanah. Muntohar (2014b) menjelaskan tanah dengan kadar air tinggi atau di atas batas cair akan memiliki sifat-sifat cair. Pengurangan kadar air akan

menyebabkan volume tanah berkurang dan berperilaku lebih plastis. Apabila kadar air melewati batas plastis, maka tanah akan menjadi semi padat. Pengurangan kadar air akan mencapai kondisi di mana tidak terjadi lagi perubahan volume pada tanah, kondisi ini disebut dengan batas susut.

Batas cair dan batas plastis adalah parameter penting untuk menentukan sifat dari tanah kohesif. Menurut ASTM (2010) dalam standar D4318-10, indeks plastisitas adalah rentang kadar air di mana tanah berperilaku plasits. Indeks plastisitas juga dapat dikatakan sebagai selisih dari batas cair dan batas plastis. Semakin tinggi nilai indeks plastisitasnya maka semakin plastis pula tanah tersebut.

Distribusi ukuran butir tanah dapat diketahui melalui dua jenis pengujian, yakni: analisis saringan untuk tanah dengan butiran yang tertahan saringan No. 200 atau tanah berbutir kasar, dan analisis pengendapan untuk tanah dengan butiran yang lolos saringan No. 200 atau tanah berbutir halus. Salah satu tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan jenis tanah berdasarkan ukuran partikelnya. Menurut klasifikasi dengan metode *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), butiran dengan ukuran antara 76,2 mm - 2,0 mm adalah kerikil, 2,0 mm - 0,075 mm adalah pasir, 0,075 mm - 0,002 mm adalah lanau, dan butiran dengan ukuran kecil dari 0,002 mm adalah lempung. Muntohar (2014b) menjelaskan bahwa tanah dengan distribusi beragam dari kasar hingga halus disebut sebagai tanah bergradasi baik (*well graded*), sedangkan tanah yang memiliki gradasi cenderung seragam disebut sebagai tanah bergradasi buruk (*poorly graded*).

2.3.5. Uji Pemadatan *Proctor* Standar

Uji pemadatan *Proctor* standar dilakukan untuk menentukan kadar air optimum dari tanah (OMC). Pengujian ini mengacu pada ASTM D698-12. Berbagai nilai kadar air ditambahkan pada tanah untuk selanjutnya dipadatkan pada cetakan silinder berdiameter 101,6 mm dan tinggi 116,4 mm. pemadatan dilakukan dengan menggunakan alat penumbuk seberat 2,5 kg yang dijatuhkan dari ketinggian 305 mm. Proses pemadatan dibagi menjadi tiga lapisan dan diberikan 25 tumbukan pada setiap lapisannya. Selanjutnya, berat volume tanah kering dihitung dengan Persamaan 2.6.

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan,

γ_d = berat volume tanah kering (kN/m³)

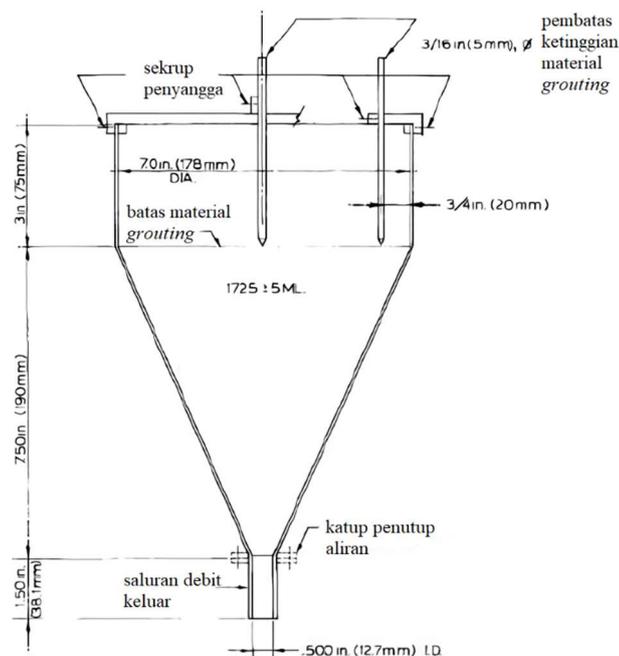
γ = berat volume tanah pemadatan (kN/m³)

ω = kadar air (%)

Pengujian dilakukan hingga data yang dimiliki cukup untuk membuat grafik hubungan antara kadar air dan berat volume tanah kering. Grafik tersebut harus memiliki nilai puncak untuk menentukan nilai OMC dan berat volume tanah kering optimum (MDD).

2.3.6. Flow Cone Test

Pengujian *flow cone* dilakukan untuk mengukur fluiditas atau kemampuan untuk mengalirnya pasta semen yang digunakan. Pasta semen dengan perbandingan air semen sebesar 0,5 sampai dengan 1 diuji dengan menggunakan kerucut berkapasitas 1725 ml. Kontrol waktu pembuatan pasta semen dan suhu dilakukan agar data yang didapatkan akurat. Pengujian ini mengacu pada ASTM C939-97. Pasta semen yang digunakan adalah pasta semen yang memiliki nilai fluiditas yang mendekati air dengan perbandingan air semen terkecil. Skema alat yang digunakan sesuai dengan persyaratan dalam ASTM C939-97 dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Skema Alat Uji *Flow Cone Test* (ASTM, 1997)

Nilai fluiditas ditentukan berdasarkan waktu yang diperlukan pasta semen sebanyak 1725 ml mengalir habis melalui kerucut berdiameter 12,7 mm. Pasta semen harus diuji sesegera mungkin setelah pembuatannya. Waktu yang ditentukan adalah 1 menit. Kerucut yang digunakan harus bisa menghasilkan nilai fluiditas air 8,0 detik untuk memenuhi standar ukuran dan kekesatan bahannya.

2.3.7. Uji Tekan Bebas

Uji kuat tekan bebas dapat dilakukan pada tanah kohesif, baik dengan kondisi tidak terusik ataupun dipadatkan. Tanah yang bisa diuji dengan metode ini hanya tanah kohesif yang tidak akan mengeluarkan air selama proses pembebanan seperti lempung atau tanah-semen. Mengacu pada ASTM (2013b) dalam standar D2166/D2166M-13, pengujian dilakukan pada spesimen berdiameter minimum 30 mm dengan tinggi 2 – 2,5 kali diameternya. Pembebanan yang diberikan harus dapat membuat spesimen mengalami regangan aksial (ε) sebesar 0,5% - 2,5% per menit. Pembebanan harus disesuaikan agar tidak berlangsung lebih dari 15 menit.

Hasil akhir dari pengujian ini adalah nilai kuat geser tanah berdasar pada nilai kuat tekan bebas. Nilai kuat tekan bebas (q_u) didefinisikan sebagai tegangan (σ) maksimum yang dicapai pada saat spesimen mengalami keruntuhan atau telah mengalami regangan aksial sebesar 15%. Nilai kuat tekan bebas dari tanah dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan,

P = beban (N)

A = luas permukaan yang menerima beban (mm^2)

Luasan permukaan ini harus dikoreksi berdasarkan regangan aksial yang terjadi. Regangan dapat menyebabkan perubahan luas pada bidang yang menerima beban, sehingga:

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon_a} \dots\dots\dots (2.8)$$

dengan,

A_0 = luas permukaan awal benda uji (mm^2)

ε_a = regangan aksial (%)

Nilai kuat geser tak terdrainase tanah (c_u) pada lempung jenuh menurut teori pengujian triaksial UU adalah separuh dari q_u (Muntohar, 2014a). Berdasarkan teori tersebut, kuat geser tanah adalah setengah dari selisih tegangan aksial dan tegangan sel. Dikarenakan pada pengujian tekan bebas tegangan sel tidak diberikan atau nol, maka kuat geser tanah dapat dihitung dengan Persamaan 2.9.

$$c_u = \frac{q_u}{2} \dots\dots\dots (2.9)$$

Selain itu, modulus elastis dari tanah juga dapat ditentukan dari pengujian ini. Modulus elastis tanah didefinisikan dengan *secant modulus* (E_{50}). Menurut Dang dan Khabbaz (2018) dan Kang dkk. (2017) *Secant modulus* adalah nilai kemiringan kurva tegangan-regangan antara titik tegangan pertama dan tegangan pada 50% tegangan maksimum. E_{50} didapat dengan membagi tegangan pada 50% q_u dengan regangannya. *Secant modulus* berdasarkan nilai kuat geser tanah dihitung dengan Persamaan 2.10. *Secant modulus* ditentukan dari hubungan kuat tekan aksial dan regangan dari pengujian kuat tekan bebas (Muntohar, 2009).

$$E_{50} = \frac{q_{50}}{\varepsilon_{50}} \dots\dots\dots (2.10)$$

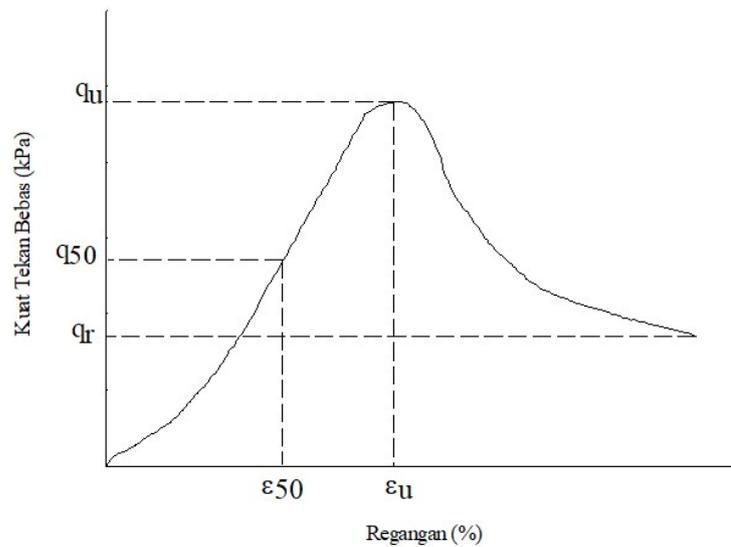
Dengan, q_{50} adalah setengah dari tegangan maksimum dan ε_{50} adalah regangan pada saat setengah tegangan maksimum tersebut terjadi.

Untuk menganalisis perilaku benda uji pada saat mengalami keruntuhan, dapat digunakan *brittleness index* (I_B) sebagai parameternya. Dari nilai tersebut, dapat ditaksir sifat kaku atau daktail dari spesimen. Apabila nilai I_B dari spesimen mendekati nol, maka hal tersebut menunjukkan bahwa spesimen berperilaku daktail (Bagheri dkk., 2014). I_B dapat diperoleh dari grafik hubungan tegangan-regangan dengan menggunakan Persamaan 2.9. Berdasarkan hasil kuat tekan bebas, penentuan nilai regangan dan tegangan untuk secant modulus dan *brittleness index* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

$$I_B = \frac{q_u - q_r}{q_u} \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan,

q_r = tegangan residu (kPa).



Gambar 2. 3 Hubungan Tegangan dan Regangan pada Kuat Tekan Bebas

Pengujian kuat tekan bebas dilakukan setelah benda uji diperam selama tujuh hari. Menurut Horpibulsuk dkk. (2010) pada saat berumur kurang dari tujuh hari, produk semen hasil reaksi hidrasi mengisi pori-pori dengan ukuran kecil dari $0,1 \mu\text{m}$ dan bagian yang tidak terhidrasi menyatu dengan tanah membentuk butiran dengan ukuran butir lebih besar (flokulasi), sehingga menyebabkan volume pori bertambah. Setelah tujuh hari, produk semen mulai mengisi pori-pori berukuran besar tersebut (lebih dari $0,1 \mu\text{m}$) sehingga volume pori akan berkurang.