

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan pembangunan infrastruktur seperti menara transmisi, dermaga, struktur bawah tanah, dan sistem penahan tanah menuntut perencanaan geoteknik yang mampu menjamin stabilitas struktur terhadap gaya tarik vertikal. Gaya tarik vertikal dapat timbul akibat beban angkat, tekanan air tanah, gaya apung, maupun pengaruh lingkungan lainnya. Menurut Das dan Sobhan (2018), kegagalan dalam memperhitungkan gaya tarik vertikal pada struktur fondasi dapat menyebabkan ketidakstabilan dan keruntuhan struktur secara keseluruhan maka dari itu angkur tanah merupakan salah satu elemen penting dalam rekayasa geoteknik yang berfungsi untuk menahan gaya tarik maupun gaya lateral pada berbagai struktur seperti dinding penahan tanah, turap, serta struktur lepas pantai. Prinsip kerja angkur adalah menyalurkan gaya tarik dari struktur ke lapisan tanah yang stabil melalui elemen pengikat yang tertanam di dalam tanah dan diperkuat dengan grouting atau plat penahan. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan pembangunan infrastruktur di area dengan kondisi tanah yang beragam, penelitian terhadap kinerja dan efisiensi angkur tanah terus berkembang (Chen et al., 2024).

Angkur tanah lipat (*folding type*) adalah jenis angkur yang tidak memerlukan grouting dan dipasang dengan cara ditekan langsung ke dalam tanah. Saat diberi beban tarik, kepala angkur akan terbuka di dalam tanah sehingga dapat menahan gaya tarik. Penelitian oleh Maming et al. (2022) menunjukkan bahwa angkur tipe ini dapat digunakan sebagai sistem penahan gaya tarik pada tanah lunak. Pada tanah pasir yang bersifat non-koheusif, kekuatan tanah ditentukan oleh gesekan dan saling mengunci antarbutir. Semakin padat susunan butir pasir, semakin besar kuat geser dan kekakuannya. Penelitian (Fakher dan Fakhruddin, 2021) juga menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan pasir dapat meningkatkan kapasitas dukung dan mengurangi deformasi tanah akibat beban.

Kerapatan relatif (*relative density*) adalah parameter yang digunakan untuk menyatakan tingkat kepadatan tanah pasir dengan membandingkan angka pori tanah pada kondisi tertentu terhadap angka pori maksimum (kondisi paling lepas) dan angka pori minimum (kondisi paling padat). Parameter ini khusus digunakan untuk tanah berbutir kasar seperti pasir dan kerikil, karena tanah jenis ini tidak memiliki kohesi yang signifikan sehingga perilakunya sangat dipengaruhi oleh susunan dan kerapatan butirannya. Sebaliknya, pasir dengan kerapatan relatif rendah memiliki struktur yang lebih longgar dan mudah mengalami deformasi, sehingga kapasitas kuat tarik angkur menjadi lebih kecil (Budhu, 2015). Mengingat pentingnya pengaruh kerapatan relatif dan kedalaman penanaman, maka diperlukan penelitian yang lebih mendalam untuk memahami interaksi kedua faktor tersebut. Penelitian mengenai perilaku angkur tanah pada tanah berpasir dalam kondisi

unsaturated masih relatif terbatas, Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji secara eksperimental pengaruh kedua parameter tersebut, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode pengujian tanah serta mendukung perencanaan sistem angkur yang lebih aman dan efisien.

1.1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kerapatan relatif tanah pasir homogen terhadap kuat tarik vertikal angkur tanah lipat tipe ganda?
2. Bagaimana pengaruh kedalaman penanaman terhadap kuat tarik vertikal angkur tanah lipat tipe ganda pada pasir homogen?
3. Bagaimana hubungan antara kerapatan relatif tanah pasir homogen dan kedalaman penanaman angkur tanah lipat tipe ganda terhadap kapasitas kuat tarik vertikal angkur?

1.1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Berdasarkan rumusan masalah yang di ambil, tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis pengaruh kerapatan relatif tanah pasir homogen terhadap kuat tarik vertikal angkur tanah lipat tipe ganda.
2. Untuk menganalisis pengaruh kedalaman penanaman terhadap kuat tarik vertikal angkur tanah lipat tipe ganda pada pasir homogen.
3. Untuk menganalisis hubungan antara kerapatan relatif tanah pasir homogen dan kedalaman penanaman angkur tanah lipat tipe ganda terhadap kapasitas kuat tarik vertikal angkur.

1.1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diharapkan penelitian ini dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman mengenai pengaruh variasi kerapatan relatif pasir homogen terhadap kapasitas tarik vertikal angkur tanah lipat tipe ganda.
2. Memberikan gambaran mengenai pengaruh kedalaman penanaman angkur tanah lipat tipe ganda terhadap kapasitas tarik vertikal angkur pada stratigrafi tanah pasir homogen.
3. Mengidentifikasi hubungan antara kerapatan relatif pasir homogen dan kedalaman penanaman angkur tanah lipat tipe ganda terhadap kapasitas tarik vertikal angkur, sehingga dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam perencanaan dan analisis sistem angkur tanah.

1.1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan media tanah berupa pasir homogen.
2. Material tanah yang digunakan adalah pasir homogen dengan karakteristik gradasi seragam.
3. Pengujian kapasitas tarik vertikal angkur dilakukan menggunakan alat uji tarik hidrolik (*pull-out test*) yang dirancang dan dimodifikasi khusus untuk keperluan penelitian laboratorium.
4. Objek pengujian berupa angkur tanah lipat tipe ganda yang ditanam pada media pasir homogen dengan variasi kerapatan relatif sebesar 15% (sangat lepas), 35% (lepas), dan 50% (kepadatan sedang), serta variasi kedalaman penanaman yaitu 60 cm, 90 cm, dan 120 cm, pada kondisi tanah *unsaturated*.
5. Analisis penelitian difokuskan pada kapasitas tarik vertikal angkur tanah lipat tipe ganda terhadap variasi kerapatan relatif tanah pasir, variasi kedalaman penanaman angkur, serta hubungan antara kerapatan relatif dan kedalaman penanaman terhadap kapasitas tarik vertikal angkur.

1.2 Teori

1.2.1 Sejarah dan Perkembangan Angkur Tanah

Konsep angkur tanah telah dikenal sejak awal perkembangan konstruksi, ketika elemen struktur ditanam ke dalam tanah untuk meningkatkan kestabilan terhadap gaya tarik dan gaya lateral. Bowles (1996) menjelaskan bahwa penerapan prinsip tersebut pada awalnya masih bersifat empiris dan belum didukung oleh pendekatan analitis dalam mekanika tanah.

Perkembangan angkur tanah secara ilmiah mulai terdokumentasi pada awal abad ke-20, khususnya pada pembangunan menara transmisi dan struktur ringan yang mengalami beban angkat akibat gaya angin. Salah satu kajian fundamental mengenai mekanisme perlawanan tanah terhadap gaya tarik dikemukakan oleh Balla (1961) melalui penelitian pada pondasi berbentuk jamur (*mushroom foundation*). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas tahanan tarik ditentukan oleh berat tanah dalam zona keruntuhan serta tahanan geser yang berkembang pada bidang runtuh di sekitar elemen tertanam.

Pada tahap awal, sistem angkur tanah masih bersifat pasif dan mengandalkan interaksi alami antara tanah dan elemen angkur. Seiring dengan meningkatnya tuntutan efisiensi dan keamanan struktur, dikembangkan sistem angkur aktif dengan penerapan gaya prategang. Menurut FHWA (1999), penerapan prategang merupakan tonggak penting dalam pengembangan angkur tanah karena mampu mengendalikan deformasi struktur sejak tahap awal pembebanan.

Selanjutnya, kemajuan teknologi material, metode pengeboran, dan teknik grouting pada pertengahan abad ke-20 mendorong penggunaan angkur tanah secara lebih luas dalam stabilisasi lereng, dinding penahan tanah, dan konstruksi galian dalam. Konsep-konsep dasar yang dikembangkan oleh para peneliti terdahulu tersebut menjadi landasan bagi pengembangan teori dan aplikasi angkur tanah modern.

1.2.2 Definisi angkur tanah

Berdasarkan SNI 8460:2017 yang diterbitkan oleh Badan Standardisasi Indonesia (BSI), angkur tanah merupakan elemen perkuatan yang dipasang di dalam tanah atau batuan untuk menahan gaya tarik dengan memanfaatkan interaksi antara angkur dan media di sekitarnya. Gaya tarik yang bekerja pada angkur disalurkan ke massa tanah atau batuan melalui mekanisme ikatan dan gesekan, sehingga berfungsi meningkatkan kestabilan struktur geoteknik.

Angkur adalah anggota struktur rangka ringan yang digunakan untuk mendukung struktur seperti menara transmisi, penahan bulkheads, jaringan pipa yang terendam, lepas pantai anjungan terapung terhadap gaya angkat (Ilamparuthi et al., 2002). Menurut (Das, 1990) angkur umumnya digunakan dalam konstruksi pondasi untuk meningkatkan daya dukung tanah dan dinding penahan tanah. Tujuan utama dari penggunaan angkur tanah dalam konstruksi adalah untuk menyalurkan beban pada struktur kedalam lapisan tanah yang paling dalam dan jauh dari struktur di atasnya.

Teori tahanan gaya angkat tanah dapat diterapkan untuk menganalisis berbagai permasalahan geoteknik, khususnya pada struktur yang tidak memperoleh tahanan gaya angkat melalui penambahan pelat tanah. Struktur seperti jaringan pipa terendam atau fondasi yang tertanam di dalam tanah, meskipun tidak dilengkapi pelat, dapat dimodelkan secara efektif sebagai pelat tanah ekuivalen dalam analisis gaya angkat (Merifield et al., 2006).

1.2.3 Klasifikasi tanah berpasir

Tanah berpasir merupakan jenis tanah berbutir kasar (*coarse-grained soil*) yang didominasi oleh fraksi pasir dengan ukuran butiran berkisar antara 0,075 mm hingga 4,75 mm. Tanah ini bersifat nonkohesif, sehingga tidak memiliki daya ikat antarpartikel seperti pada tanah berbutir halus. Perilaku mekanik tanah berpasir terutama dikendalikan oleh gaya gesek antar butiran serta mekanisme penguncian (*interlocking*) partikel tanah (Bowles, 1996). Mengacu pada SNI 03-6371-2000, tanah pasir didefinisikan sebagai material tanah yang butirannya lolos saringan nomor 4 (4,75 mm) dan tertahan pada saringan nomor 200 (0,075 mm). Karakteristik ukuran butiran tersebut menyebabkan tanah berpasir memiliki permeabilitas yang relatif tinggi serta kemampuan drainase yang baik.

A. Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)

Sistem klasifikasi tanah AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) merupakan sistem klasifikasi tanah yang digunakan untuk menilai kualitas tanah berdasarkan kemampuannya sebagai lapisan tanah dasar (*subgrade*) dan lapisan pondasi bawah (*subbase*) pada konstruksi jalan. Sistem ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1929 dan dirancang agar mudah diterapkan melalui pengujian lapangan maupun laboratorium dasar (Das, 2010). Klasifikasi AASHTO mempertimbangkan parameter tanah yang sensitif terhadap perubahan kadar air, seperti persentase lolos saringan Nomor 200, batas *Atterberg* (LL dan PI), serta distribusi ukuran butiran. Semakin besar kandungan butiran halus dan tingkat plastisitas tanah, maka semakin rendah kinerja tanah tersebut sebagai material lapisan tanah dasar. Dalam sistem ini, tanah dikelompokkan ke dalam tujuh kelompok utama, yaitu A-1 hingga A-7, dengan beberapa subkelompok tertentu. Selain itu, digunakan *Group Index* (GI) sebagai parameter tambahan untuk membedakan kualitas tanah dalam kelompok yang sama, di mana nilai GI yang lebih kecil menunjukkan kinerja tanah yang lebih baik sebagai *subgrade*.

Tabel 1. Klasifikasi tanah sistem AASHTO (tanah berbutir kasar)

Klasifikasi Umum	Material kerikil (35% atau kurang dari total sample yang melewati saringan No. 200)						
Klasifikasi Kelompok	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Analisa Saringan (persentase lolos)							
No.10	50 max						
No. 40	30 max	50 max	51 min				
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max
Karakteristik fraksi yang lolos Saringan No. 40							
Batas Cair				40 max	41 min	40 max	41 min
Indeks Plastisitas	6 max		NP	10 max	10 max	11 min	11 min
Jenis bahan penyusun secara umum	Batu, kerikil, dan pasir		Pasir halus		Kerikil kelanauan atau kelepungan dan pasir		
Penilaian Subgrade secara umum				<i>Excellent to good</i>			

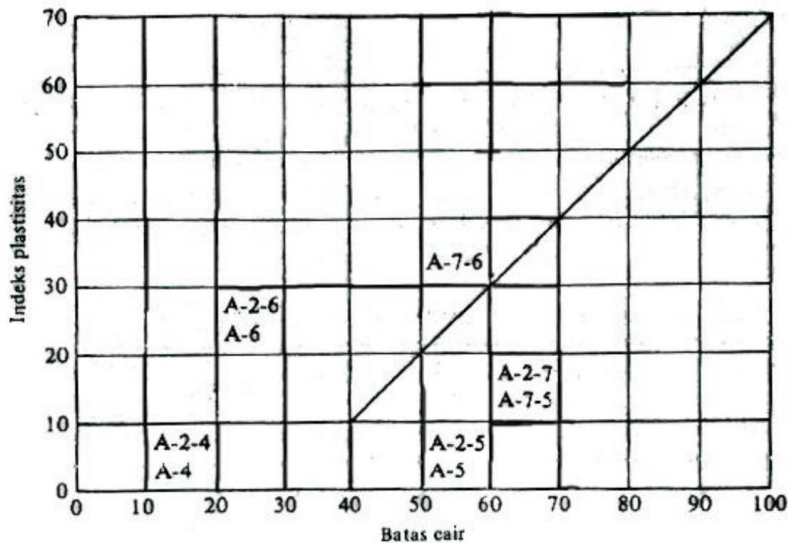
Klasifikasi Umum	Material Lanau-Lempung (lebih dari 35% dari total sampel yang melewati saringan No. 200)			
Klasifikasi Kelompok	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Analisa Saringan (persentase lolos)				
No. 10				
No. 40				
No. 200	36 min	36 min	36 min	36 min
Karakteristik fraksi yang lolos Saringan No. 40				
Batas Cair	40 max	41 min	40 max	41 min
Indeks Plastisitas	10 max	10 max	11 min	11 min
Jenis bahan penyusun secara umum	Tanah kelanauan		Tanah kelempungan	
Penilaian Subgrade secara umum	Fair to poor			

^a Untuk A-7-5, $PI \leq LL - 30$

^b Untuk A-7-6, $PI > LL - 30$

Sumber: (AASHTO, 1986)

Dalam sistem klasifikasi AASHTO, tanah dengan nomor kelompok yang lebih kecil menunjukkan kualitas yang lebih baik sebagai material tanah dasar jalan, sedangkan nomor kelompok yang lebih besar mencerminkan penurunan mutu *subgrade*. Kelompok A-1 hingga A-3 tergolong tanah granular yang umumnya memiliki kinerja *subgrade* yang baik, sementara kelompok A-4 hingga A-7 termasuk tanah berbutir halus berupa lanau dan lempung dengan kualitas *subgrade* yang relatif rendah. Namun, tanah kelompok A-3 pada kondisi tertentu dapat menunjukkan kinerja *subgrade* yang lebih baik dibandingkan beberapa jenis tanah dalam kelompok A-2 (Darwis, 2018). Untuk tanah berbutir halus, yaitu tanah dengan persentase lolos saringan Nomor 200 lebih dari 35%, sistem AASHTO mengklasifikasikannya ke dalam empat kelompok utama, yaitu A-4, A-5, A-6, dan A-7.



Gambar 1. Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7
Sumber: (AASHTO,1986)

Pengujian analisis saringan dan uji batas-batas *Atterberg* merupakan pengujian yang diperlukan dalam klasifikasi ini. Selanjutnya dihitung indeks kelompok (*group index-GI*), yang digunakan untuk mengevaluasi pengelompokan tanah. Untuk mengevaluasi mutu dari suatu tanah sebagai bahan lapisan tanah dasar (*subgrade*) dari suatu jalan raya, suatu angka yang dinamakan indeks grup (*group index-GI*) juga diperlukan selain kelompok dan subkelompok dari tanah yang bersangkutan. Harga GI ini dituliskan di dalam kurung setelah nama kelompok dan subkelompok dari tanah yang bersangkutan. Indeks grup dapat dihitung dengan memakai persamaan seperti di bawah ini:

$$GI = (F - 35)[0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15)(PI - 10) \quad (1)$$

dimana:

F = Persentase butiran yang lolos ayakan No.200

LL = Batas cair (*liquid limit*)

PI = Indeks plastisitas.

Suku pertama persamaan di atas, yaitu $(F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)]$, adalah bagian dari indeks grup yang ditentukan dari batas cair (LL). Suku yang kedua, yaitu $0,01 (F - 15) (PI - 10)$, adalah bagian dari indeks grup yang ditentukan dari indeks plastisitas (PI). Berikut ini adalah aturan untuk menentukan harga dari indeks grup:

- a. Apabila Persamaan (1) menghasilkan nilai GI yang negatif, maka harga GI dianggap nol.

- b. Indeks grup yang dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) dibulatkan ke angka yang paling dekat (sebagai contoh: $GI = 3,4$ dibulatkan menjadi 3,0; $GI = 3,5$ di bulatkan menjadi 4,0).
- c. Tidak ada batas atas untuk indeks grup.
- d. Indeks grup untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-I a, AI b, A-2-4, A-2-5, dan A-3 selalu sama dengan nol.
- e. Untuk tanah yang masuk kelompok A-2-6 dan A-2-7, hanya bagian dari indeks grup untuk PI saja yang digunakan, yaitu:

$$GI = 0.01 (F - 1,5)(PI - 10) \quad (2)$$

Pada umumnya, kualitas tanah yang digunakan untuk bahan tanah dasar dapat dinyatakan sebagai kebalikan dari harga indeks grup. Apabila nilai indeks kelompok semakin tinggi, maka semakin berkurang ketepatan dalam pemilihan penggunaan tanah tersebut (gradasi jelek). Tanah granular diklasifikasikan dalam A1 sampai A3. Sedangkan tanah berbutir halus diklasifikasikan dalam A4 sampai A7. Tanah klasifikasi A1, adalah tanah *granular* bergradasi “baik”, dan tanah klasifikasi A3, merupakan pasir bersih yang bergradasi “buruk”. Sedangkan klasifikasi A2 adalah tanah granular (kurang dari 35% lolos saringan No. 200), tapi masih mengandung lanau dan lempung (Panguriseng, 2018).

B. Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

Sistem klasifikasi tanah *Unified Soil Classification System* (USCS) pertama kali diperkenalkan oleh *Casagrande* dan selanjutnya dikembangkan oleh *United States Bureau of Reclamation* (USBR) serta *United States Army Corps of Engineers* (USACE). Sistem ini kemudian diadopsi oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) sebagai metode standar dalam pengklasifikasian tanah. USCS dirancang untuk mengelompokkan tanah berdasarkan sifat fisik dan perilaku teknisnya, sehingga sistem ini banyak digunakan dalam bidang rekayasa geoteknik, khususnya pada perencanaan pondasi, stabilitas lereng, dan struktur tanah lainnya. Dalam USCS, suatu tanah diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama yaitu:

- a. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$). Simbol kelompok diawali dengan G untuk kerikil (gravel) atau tanah berkerikil (*gravelly soil*) atau S untuk pasir (sand) atau tanah berpasir (*sandy soil*).
- b. Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No. 200 ($F_{200} \geq 50$).

Selanjutnya tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan sub-kelompok. Digunakan simbol-simbol dalam sistem USCS sebagai berikut:

G = *gravel* (kerikil)

S = *sand* (pasir)

C = *anorganic clay* (lempung)

M = *anorganic silt* (lanau)

O = lanau atau lempung organik

Pt = *peat* (tanah gambut atau tanah organik tinggi)

W = *well-graded* (gradasi baik)

P = *poorly-graded* (gradasi buruk)

H = *high-plasticity* (plastisitas tinggi)

L = *low-plasticity* (plastisitas rendah)

Prosedur penentuan klasifikasi tanah dengan sistem *Unified* sebagai berikut:

1. Tentukan tanah apakah berbutir “halus” atau “kasar” (secara visual atau saringan No. 200).
2. Untuk tanah berbutir kasar, maka lakukan;
 - a. Saringan tanah tersebut dan gambarkan grafik distribusi butiran.
 - b. Hitung persen lolos saringan No. 4; bila persentase lolos < 50% klasifikasikan tanah sebagai “kerikil”; bila persentase lolos > 50% klasifikasikan tanah sebagai “pasir”.
 - c. Hitung persen lolos saringan No. 200; bila persentase lolos < 5% maka hitung Cu dan Cc; bila termasuk bergradasi baik, klasifikasikan sebagai GW (bila kerikil) dan klasifikasikan sebagai SW (bila pasir); bila termasuk bergradasi buruk, klasifikasikan sebagai GP (bila kerikil) dan klasifikasikan sebagai SP (bila pasir).
 - d. Apabila persentase butiran yang lolos saringan No. 200 diantara 5% sampai 12%, maka tanah akan memiliki symbol ganda dan mempunyai sifat plastisitas (GW-GM atau SW-SM, dan lain-lain).
 - e. Apabila persentase butiran yang lolos saringan No. 200 > 12%, maka harus dilakukan uji batas Atterberg dengan menyingkirkan butiran tanah yang tinggal pada saringan No. 40. Kemudian dengan menggunakan diagram plastisitas, tentukan klasifikasinya (GM, GC, SM, SC, GMGC atau SM-SC).
3. Untuk tanah berbutir halus, maka:
 - a. Lakukan uji batas-batas Atterberg dengan menyingkirkan butiran yang tinggal di atas saringan No. 40. Bila batas cair (LL) > 50, klasifikasikan tanah tersebut sebagai H (plastisitas tinggi); bila LL < 50 klasifikasikan tanah sebagai L (plastisitas rendah).
 - b. Untuk tanah H, bila batas-batas Atterberg diplot pada grafik plastisitas dan berada di bawah garis A, tentukanlah apakah masuk kategori OH (organik) atau MH (anorganik). Dan bila plottingnya jatuh di atas garis A, klasifikasikan sebagai tanah CH (organik plastisitas tinggi).
 - c. Untuk tanah L, bila batas-batas Atterberg diplot pada grafik plastisitas dan berada di bawah garis A dan area yang diarsir, tentukanlah apakah masuk kategori OL (organik) atau ML (anorganik) berdasarkan warna, bau atau perubahan batas cair dan batas plastisnya dengan mengeringkannya di dalam oven.
 - d. Bila batas-batas Atterberg diplot pada grafik plastisitas dan berada pada area yang diarsir, dekat dengan garis A, atau nilai LL sekitar 50, maka gunakan simbol ganda.

Rincian sistem klasifikasi Unified (USCS) ini diberikan dalam Tabel 2 dan Tabel 3 berikut.

Tabel 2. Sistem klasifikasi *Unified* (USCS)

Divisi Utama			Simbol Kelompok	Nama umum
Tanah berbutir kasar lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200'	Pasir Lebih dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No.4	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW	Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
			GP	Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
		Kerikil dengan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lanau
	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan pada ayakan No.4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
			SP	Pasir bergradasi-buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
		Pasir dengan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir lanau
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir lempung
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200'	Lanau dengan lempung Batas cair 5% atau kurang	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	
		CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (lean clay)	
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
	Lanau dan lempung Batas Cair lebih dari 50%	MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanai diatomae,lanau yang elastis	
		CH	Lempung anorganik, dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (fat clays)	
		OH	Lempung anorganik, dengan plastisitas sedang sampai degan tinggi	
	Tanah tanah dengan kandungan organik sangat tinggi			PT

Sumber: (ASTM International, 2006)

Tabel 3. Sistem klasifikasi *Unified* (USCS) (Lanjutan)

	Kriteria Klasifikasi	
Klasifikasi berdasarkan persentase butir halus kurang dari 5% lolos ayakan No. 200 GW, GP, SW, SP Lebih dari 12% lolos ayakan No. 200 GM, GC, SM, SC5% sampai 12% lolos ayakan No. 200 klasifikasi pembatasan yang memerlukan penggunaan dua simbol	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ lebih besar dari 4	
	$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 sampai 3	
	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
	Batas batas atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	Batas batas atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda
	Batas batas atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	
	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ lebih besar dari 6	
	$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 sampai 3	
	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
	Batas batas atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	Batas batas atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda
	Batas batas atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	

bagian plastisitas

Untuk klasifikasi tanah berbutir halus dan fraksi halus dari tanah berbutir kasar. Batas ~~batas atterberg~~ yang digambarkan dibawah yang diarsir merupakan klasifikasi ~~batas~~ yang ~~memerlukan~~ simbol ganda persamaan garis A= 0.73 (LL-30).

Indeks Plastisitas

Batas Cair

manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat dalam
ASTM Designation D-2488

Sumber: (ASTM International,2006)

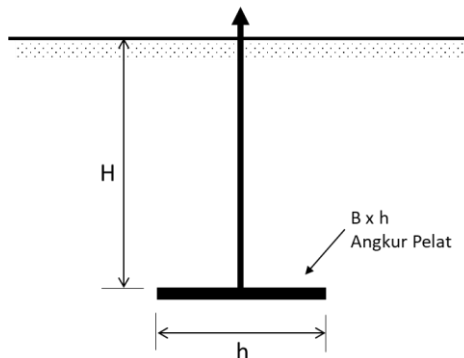
1.2.4. Faktor-Faktor yang mempengaruhi kuat tarik angkur pada tanah pasir

Pada penelitian (Ren et al., 2022), tentang karakteristik deformasi tanah disekitar angkur pelat terhadap gaya lateral memberikan kesimpulan bahwa ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kuat tarik angkur seperti jenis butiran tanah serta kerapatan relatif tanah. Dalam penelitian tersebut di jelaskan bahwa semakin tinggi kerapatan relatif maka akan semakin besar nilai kuat tarik angkur.

1.2.5. Jenis-Jenis Angkur Tanah

A. Angkur pelat

Angkur pelat merupakan salah satu jenis angkur mekanis yang paling umum digunakan. Angkur ini berbentuk pelat yang dapat berupa persegi, lingkaran, atau persegi panjang, dan umumnya digunakan sebagai sistem fondasi atau sistem tambat pada struktur yang membutuhkan ketahanan terhadap gaya angkat maupun gaya lateral. Aplikasi angkur pelat banyak dijumpai pada menara transmisi, dinding penahan tanah, serta struktur terapung lepas pantai seperti fasilitas minyak dan gas (Merifield et al., 2006). Seiring dengan meningkatnya penggunaan angkur pelat pada struktur yang semakin kompleks dan berskala besar, pemahaman yang lebih mendalam mengenai perilaku tarik dan mekanisme kegagalan angkur pelat menjadi sangat diperlukan. Angkur pelat dapat dibuat dari berbagai material, seperti baja, beton pracetak, beton cor di tempat, maupun kayu, serta dapat dipasang secara vertikal maupun horizontal untuk menahan beban aksial dan lateral (Das & Shukla, 2013).



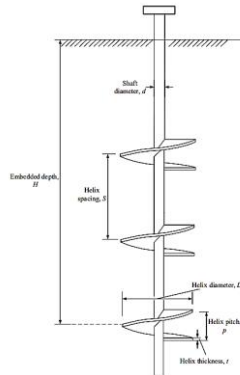
Gambar 2. Angkur pelat (Das and Shukla, 2013)

B. Angkur heliks (*Helical Anchor*)

Angkur heliks terdiri dari poros baja pusat yang dilengkapi dengan satu atau lebih pelat baja berbentuk heliks yang dilas pada poros tersebut. Angkur ini bekerja dengan cara diputar masuk ke dalam tanah hingga mencapai kedalaman yang direncanakan. Kapasitas tarik angkur heliks dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kerapatan relatif tanah, sudut geser tanah, rasio

kedalaman penanaman, jumlah heliks, serta efek pemasangan, sehingga prediksi kapasitas tariknya relatif kompleks (Wang et al., 2022).

Dibandingkan dengan pondasi tiang pancang konvensional, angkur heliks memiliki beberapa keunggulan, seperti proses pemasangan yang cepat dan mudah, minim kebisingan saat konstruksi, dapat langsung digunakan setelah pemasangan, serta memungkinkan untuk digunakan kembali. Oleh karena itu, angkur heliks banyak digunakan sebagai fondasi pada dermaga pantai, pembangkit listrik tenaga angin, saluran transmisi, dan anjungan gas alam (Ghaly & Hanna, 1994; Hsu & Liao, 1998).



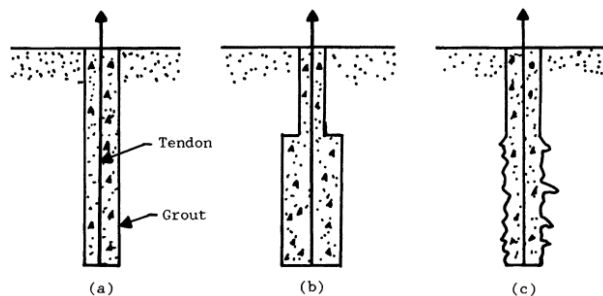
Gambar 3. Angkur Heliks (Wang et al., 2022)

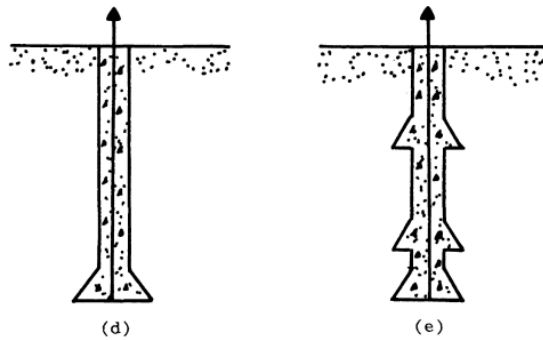
C. Angkur dengan Sistem Grout

Angkur dengan sistem grout adalah jenis angkur tanah yang memanfaatkan campuran grout (biasanya terdiri dari semen, air, dan bahan tambahan) untuk mengisi ruang antara angkur dan tanah di sekitarnya. Angkur ini berfungsi dengan menyalurkan beban tarik dari struktur ke dalam tanah melalui campuran grout yang mengeras.

Pemasangan angkur dengan sistem grout dilakukan dengan mengebor lubang ke dalam tanah, memasukkan batang angkur, dan kemudian mengisi lubang tersebut dengan campuran grout. Setelah grout mengeras, ia membentuk ikatan kuat antara batang angkur dan tanah di sekitarnya, sehingga angkur dapat menahan beban tarik yang signifikan.

Terdapat beberapa tipe angkur dengan sistem grout, yang dapat dilihat pada Gambar 4.



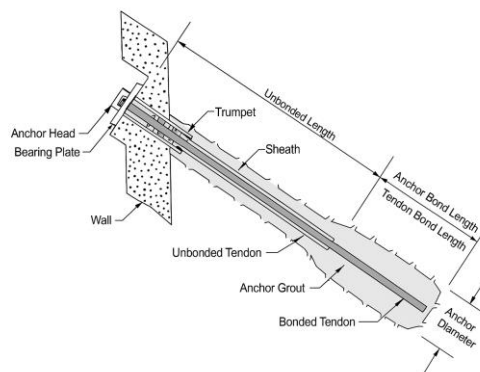


Gambar 4. Grouted anchor: (a) Gravity: (b) low pressure: (3) hight pressure: (d) single ell: (e) multiple bell (Das, 1990).

D. Angkur Grouting

Angkur grouting merupakan jenis angkur yang bekerja berdasarkan mekanisme ikatan geser antara material grout dan tanah di sekitarnya. Angkur ini berfungsi untuk meneruskan gaya tarik dari struktur utama ke tanah melalui kuat geser tanah dan ikatan antara grout dan massa tanah. Struktur angkur grouting umumnya terdiri dari tendon baja berkekuatan tinggi yang dipasang dengan sudut kemiringan tertentu dan ditanam hingga kedalaman yang mampu menahan beban yang bekerja (Ozhan & Guler, 2017).

Komponen utama angkur grouting meliputi *bond length anchor* dan *unbonded length anchor*. *Bond length anchor* berfungsi sebagai bagian yang mentransfer beban tarik ke tanah, sedangkan *unbonded length anchor* merupakan bagian tendon yang bebas bergerak dan tidak mentransfer gaya ke tanah. Selain itu, angkur grouting juga terdiri dari tendon baja yang dikelilingi oleh material semen grout sebagai media ikatan (Ozhan & Guler, 2017).



Gambar 5. Angkur grouting dan bagian-bagiannya (Hakki O. Ozhan dan Erol Guler, 2017)

E. Angkur Tanah Tipe Lipat

Angkur tanah tipe lipat (*folding type ground anchor*) adalah angkur mekanis yang memiliki elemen penahan yang dapat terlipat saat pemasangan dan terbuka setelah mencapai kedalaman tertentu di dalam tanah. Desain ini bertujuan untuk memperbesar bidang tahanan tanah sehingga kapasitas tarik angkur dapat meningkat tanpa memerlukan galian besar (Budhu, 2015). Angkur tanah tipe lipat bekerja dengan memobilisasi tekanan pasif tanah dan gaya gesek antara elemen angkur yang terbuka dengan tanah di sekitarnya. Peningkatan luas bidang tahanan akibat terbukanya elemen lipat berpengaruh langsung terhadap kapasitas tarik angkur, khususnya pada tanah berbutir seperti pasir (Das & Sobhan, 2018).

Pada tanah pasir, kapasitas tarik angkur tanah tipe lipat sangat dipengaruhi oleh kerapatan relatif tanah. Pasir dengan kerapatan relatif tinggi memiliki interlocking antarbutir yang lebih baik sehingga mampu meningkatkan tekanan pasif tanah dan kuat tarik angkur (Chen et al., 2024).

F. Angkur Permanen

Angkur tanah permanen dirancang untuk penggunaan jangka panjang dan umumnya dipertahankan selama umur layanan struktur yang ditopangnya. Angkur ini memerlukan sistem perlindungan korosi yang baik karena berada di dalam tanah dalam waktu yang lama. Angkur permanen banyak digunakan pada struktur yang membutuhkan stabilitas jangka panjang, seperti bendungan, jembatan, dinding penahan tanah permanen, transmisi listrik, stabilitas lereng, serta fondasi bangunan seperti reservoir air (Tan Chin Shu, 2011).

1.2.6 Prinsip kerja angkur

Angkur tanah (*ground anchor*) berfungsi untuk menyalurkan beban tarik atau tekan dari suatu struktur ke lapisan tanah atau batuan yang lebih dalam dan lebih stabil. Beban yang bekerja pada struktur diteruskan melalui elemen angkur dan kemudian disebarkan ke tanah di sekitarnya melalui mekanisme ikatan dan gesekan, sehingga mampu meningkatkan stabilitas struktur (Das, 2011).

Kapasitas tarik angkur tanah dipengaruhi oleh karakteristik tanah dan mekanisme keruntuhan yang terjadi. Vesić (1971) menyatakan bahwa kapasitas tarik angkur merupakan hasil kontribusi berat efektif angkur, berat efektif tanah dalam zona runtuh, serta tahanan geser tanah sepanjang bidang keruntuhan. Oleh karena itu, sifat fisik dan mekanik tanah, serta metode pemasangan angkur, sangat menentukan kinerja angkur tanah dalam menahan beban.

1.2.7 Pengujian Sifat Fisis Tanah

a. Kadar air

Kadar air (*water content*) adalah perbandingan antara berat air (W_w) yang terkandung di dalam tanah dengan berat tanah kering (W_s).

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (3)$$

dimana:

w = kadar air (%)

W_w = berat air (gr)

W_s = berat tanah kering (gr)

b. Berat Isi Air

Berat isi air (γ_w) adalah berat air per satuan volume dan digunakan sebagai parameter acuan dalam hubungan fase tanah.

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad (4)$$

dimana:

γ_w = berat isi air (gram/cm³)

W_w = berat air (gram)

V_w = volume air (cm³)

c. Berat Jenis Tanah

Berat jenis butiran tanah (G_s) adalah perbandingan antara berat isi butiran tanah dengan berat isi air pada volume yang sama.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (5)$$

dimana:

G_s = berat jenis

γ_s = berat volume *solid* (gram/cm³)

γ_w = berat volume air (gram/cm³)

Tabel 4. Tabel berat jenis partikel tanah

Macam tanah	Berat Jenis (Gs)
Kerikil	2.65 – 2.68
Pasir	2.65 – 2.68
Lanau organic	2.62 – 2.68
Lempung organic	2.58 – 2.65
Lempung anorganik	2.68 – 2.75
Humus	1.37
Gambut	1.25 – 1.80

Sumber: (Oleh & Darwis, 2018)

d. Angka Pori

Angka pori (e) adalah perbandingan antara volume pori dengan volume butiran padat tanah.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (6)$$

dimana:

- e = angka pori
 V_v = volume pori (cm³)
 V_s = volume butir padat (cm³)

e. Porositas

Porositas (n) merupakan perbandingan antara volume pori dengan volume total tanah.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (7)$$

dimana:

- n = porositas
 V_v = volume pori (cm³)
 V = volume total tanah (cm³)

f. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan (S_r) adalah perbandingan antara volume air yang mengisi pori tanah dengan volume total pori tanah.

$$S_r = \left(\frac{V_w}{V_v} \right) \times 100\% \quad (8)$$

dimana:

- S_r = derajat kejenuhan (%)
 V_w = volume air (cm³)
 V_v = volume pori (cm³)

g. Berat Volume Tanah Kering

Berat volume tanah kering (γ_d) adalah berat tanah kering per satuan volume total tanah.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} \quad (9)$$

dimana:

- γ_d = berat volume kering (gram/cm³)
 W_s = berat tanah kering (gram)
 V_t = volume total tanah (cm³)

h. Analisa Saringan

Pengujian analisa saringan merupakan pengujian mekanis tanah yang bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran butiran tanah berdasarkan persentase berat partikel yang tertahan atau lolos pada serangkaian ayakan dengan ukuran tertentu.

Perhitungan nilai koefisien keseragaman :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (10)$$

Perhitungan nilai koefisien gradasi :

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (11)$$

Dimana:

C_u = Koefisien keseragaman

C_c = Koefisien gradasi

D_{10} = Diameter butiran yang sesuai dengan 10% lolos

D_{30} = Diameter butiran yang sesuai dengan 30% lolos

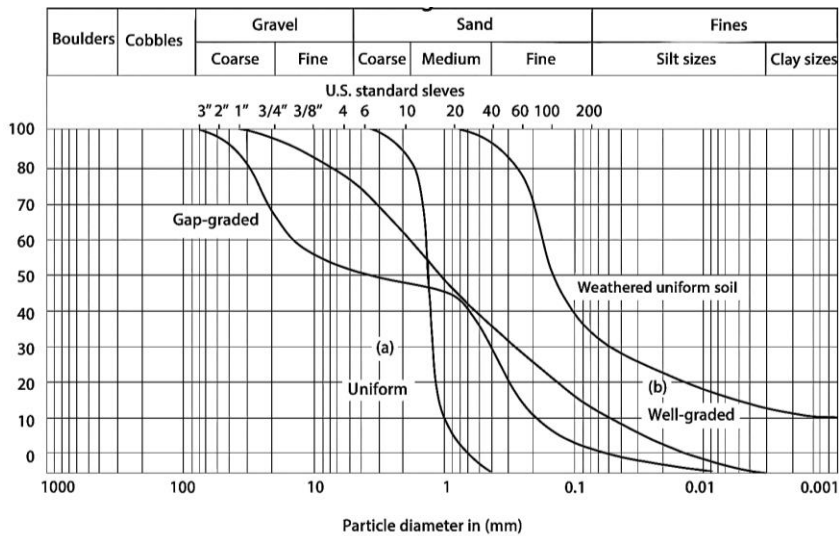
D_{60} = Diameter butiran yang sesuai dengan 60% lolos

Kurva distribusi ukuran butiran tidak hanya menunjukkan rentang (range) dari ukuran butir yang dikandung dalam tanah, tetapi juga menunjukkan tipe dan kurva distribusi ukuran butir tersebut. Tabel 5 memberikan penjelasan secara kualitatif mengenai kurva distribusi ukuran butiran.

Tabel 5. Nilai koefisien keseragaman(C_u) dan Koefisien gradasi(C_c)

C_u	Penjelasan mengenai kurva distribusi ukuran butiran
<4	Uniform graded
>6	Well graded
C_c	Penjelasan mengenai kurva distribusi ukuran butiran
$1 < C_c < 3$	Gradasi baik

Tanah yang ukuran butirnya berpersentasi rata antara yang kecil sampai yang besar dikatakan bergradasi baik (*well graded*). Bilamana di dalam distribusi ukuran butiran terdapat loncatan ukuran butiran dinamakan tanah bergradasi buruk (*poorly graded soil*). Jika besar semua butiran hampir sama maka dipakai istilah tanah bergradasi seragam (*uniformly graded*). Pada Gambar ini diperlihatkan berbagai macam tipe kurva distribusi ukuran butiran.



Gambar 6. Grafik analisa saringan dan analisa Hydrometer (ASTM D2487–11)

Dari grafik dapat diketahui bahwa semakin besar nilai C_c maka akan semakin seragam suatu butiran tanah begitupun sebaliknya apabila nilai C_c semakin kecil maka semakin seragam ukuran distribusi butiran tanah.

1.2.5 Pengujian Sifat Mekanis Tanah

A. Sudut geser

Sudut geser dalam (*internal friction angle*) merupakan salah satu parameter mekanis utama yang menggambarkan kemampuan tanah dalam menahan gaya geser akibat beban luar. Pada tanah berbutir kasar seperti pasir, kekuatan geser terutama dihasilkan oleh gaya gesek antar butiran dan mekanisme penguncian (*interlocking*) butiran tanah. Oleh karena itu, sudut geser dalam menjadi parameter dominan dalam analisis stabilitas tanah pasir, termasuk dalam perhitungan kapasitas tarik vertikal angkur tanah.

Secara umum, kuat geser tanah dinyatakan menggunakan kriteria kegagalan Mohr–Coulomb, yang menyatakan bahwa kegagalan geser terjadi ketika tegangan geser maksimum yang bekerja pada bidang runtuh melampaui tahanan geser tanah. Untuk tanah pasir yang bersifat non-koheusif, nilai kohesi (c) dianggap mendekati nol, sehingga kekuatan geser sepenuhnya dikendalikan oleh sudut geser dalam. Hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\tau = \sigma' \times \tan \varphi \quad (12)$$

Dimana:

- τ = tegangan geser tanah (kN/m^2)
- σ' = tegangan normal efektif (kN/m^2)
- φ = sudut geser dalam tanah ($^\circ$)

Nilai sudut geser dalam tanah pasir sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kerapatan relatif, gradasi butiran, bentuk dan kekasaran permukaan butiran, serta kondisi tegangan. Tanah pasir dengan kerapatan relatif rendah (kondisi lepas) umumnya memiliki sudut geser dalam yang lebih kecil, sedangkan peningkatan kerapatan relatif akan menyebabkan peningkatan sudut geser dalam akibat bertambahnya kontak dan penguncian antar butiran. Dengan demikian, terdapat hubungan yang erat antara kerapatan relatif dan sudut geser dalam tanah pasir.

Penentuan nilai sudut geser dalam tanah pasir umumnya dilakukan melalui pengujian laboratorium, seperti uji geser langsung (*direct shear test*) atau uji triaxial. Nilai sudut geser dalam yang diperoleh dari hasil pengujian tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter utama dalam analisis daya dukung, stabilitas lereng, serta perhitungan kapasitas tarik vertikal sistem angkur tanah. Dalam penelitian ini, sudut geser dalam digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan kerapatan relatif pasir homogen terhadap kuat tarik vertikal angkur tanah lipat tipe ganda.

B. Pengujian Hand Cone Penetrometer (HCP)

Pengujian Hand Cone Penetrometer (HCP) merupakan metode pengujian penetrasi yang digunakan untuk mengevaluasi sifat mekanis tanah berdasarkan tahanan tanah terhadap penetrasi sebuah kerucut standar. Pengujian ini dilakukan dengan menekan kerucut logam ke dalam tanah secara vertikal dengan kecepatan tertentu, kemudian mencatat besarnya gaya atau tekanan yang diperlukan untuk penetrasi. Nilai tahanan penetrasi yang dihasilkan mencerminkan tingkat kekuatan dan kepadatan tanah di sekitar ujung kerucut. Pengujian HCP banyak digunakan sebagai metode sederhana dan cepat untuk penilaian awal kondisi tanah, baik di lapangan maupun pada pengujian model tanah di laboratorium, terutama untuk tanah pasir dan lanau dengan ukuran butiran relatif seragam (Das & Sobhan, 2018, p. 247).

Pada tanah pasir, hasil pengujian Hand Cone Penetrometer berkaitan erat dengan tingkat kerapatan relatif, di mana semakin padat kondisi tanah maka semakin besar tahanan penetrasi yang terukur. Kerapatan relatif yang tinggi meningkatkan interlocking antarbutiran pasir sehingga memberikan tahanan yang lebih besar terhadap penetrasi kerucut. Oleh karena itu, nilai hasil HCP dapat digunakan sebagai parameter pendukung dalam mengevaluasi variasi kerapatan relatif tanah pasir homogen dan perilaku mekanisnya. Dalam konteks penelitian geoteknik, khususnya yang berkaitan dengan kuat tarik vertikal angkur tanah, nilai tahanan penetrasi dari HCP dapat digunakan untuk memperkuat interpretasi hubungan antara kondisi kepadatan tanah dan kemampuan tanah dalam menahan gaya tarik yang bekerja (Bowles, 1996, p. 186).

$$q_c = \frac{P}{A} \quad (13)$$

dimana:

q_c = tahanan konus (kPa atau kN/m²)

P = gaya penetrasi yang bekerja pada kerucut (N)

A = luas penampang dasar kerucut (m²)

1.2.6 Kerapatan Relatif

Kerapatan relatif (*relative density*, Dr) adalah ukuran yang menunjukkan seberapa padat (*dense*) atau longgarnya (*loose*) tanah. Kerapatan relatif digunakan untuk menggambarkan parameter tingkat kepadatan tanah berbutir kasar seperti pasir dan kerikil di lapangan dibandingkan dengan kondisi paling longgar dan paling padat yang dapat dicapai pada pengujian laboratorium. Parameter ini dinyatakan dalam persentase hubungan angka pori (e) lapangan (*in situ*) dengan angka pori pada kondisi paling longgar (e_{max}), dan angka pori paling padat (e_{min}). Hubungan Dr dan e dirumuskan sebagai berikut:

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100\% \quad (14)$$

Keterangan :

Dr = Kerapatan Relatif (*relative density*, %)

e = Angka pori tanah pada kondisi *in situ*

e_{max} = Angka pori tanah pada kondisi paling longgar

e_{min} = Angka pori tanah pada kondisi paling padat

Nilai Dr dapat bervariasi dari minimum 0% untuk tanah yang sangat longgar hingga maksimum 100% untuk tanah yang sangat padat. Klasifikasi kondisi tanah berbutir berdasar nilai kepadatan relatif dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Klasifikasi Tanah Berbutir Berdasarkan Kepadatan Relatif

Kerapatan relatif	Penjelasan mengenai deposit tanah
0.00-0.15	Sangat lepas
0.15-0.50	Lepas
0.50-0.70	Kepadatan sedang
0.70-0.85	Padat
0.85-1.00	Sangat padat

Sumber: (Principle Geotechnical Engineering, 2018)

Kerapatan relatif tanah pasir dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$Dr = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \quad (15)$$

Dimana:

e_{maks} = Angka pori maksimum

e_{min} = Angka pori minimum

e = Angka pori pada keadaan asli

Angka pori maksimum ditentukan dengan cara menuangkan pasir kering dengan hati-hati (tanpa getaran) ke dalam cetakan (*mould*) yang telah diketahui volumenya. Kemudian berat pasir di dalam cetakan ditimbang, sehingga e_{maks} dapat dihitung. Angka pori minimum ditentukan dengan menggetarkan pasir kering yang diketahui beratnya ke dalam cetakan yang telah diketahui volumenya, selanjutnya e_{min} dapat dihitung.

1. 3 Penelitian Terdahulu.

Penelitian-penelitian terdahulu mengenai Kapasitas Tarik Angkur yang telah dilakukan, seperti dijabarkan pada Tabel 7 dibawah ini.

Tabel 7. Studi penelitian terdahulu yang relevan

No	Penulis	Judul	Tujuan dan Hasil Penelitian	Sumber
1	Cheng, L., Wang, Q., Han, Y., & Wu, Y. (2024)	<i>Pullout behaviour of strip plate anchors in clay overlying sand.</i>	Tujuan menganalisis perilaku dan kinerja tarik (<i>pullout</i>) angkur pelat tipe strip pada kondisi tanah berlapis, yaitu tanah liat di atas pasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas tarik angkur dipengaruhi oleh kondisi stratigrafi tanah, kerapatan relatif pasir, dan kedalaman penanaman, di mana pasir yang lebih padat memberikan kapasitas tarik yang lebih besar.	(Cheng et al., 2024)
2	Maming, M. I., Djamaluddin, A.R., Harianto, T., & Muhiddin, A. B. (2022).	<i>Model Test of the Pull-up Capacity of Folding Type Ground Anchors in Cohesive Soil</i>	Tujuan Mengetahui pengaruh parameter kedalaman secara spesifik terhadap performa gaya tarik. Hasil Kedalaman penanaman menjadi factor kunci dalam meningkatkan tekanan yang memperbesar	(Maming et al., 2022)

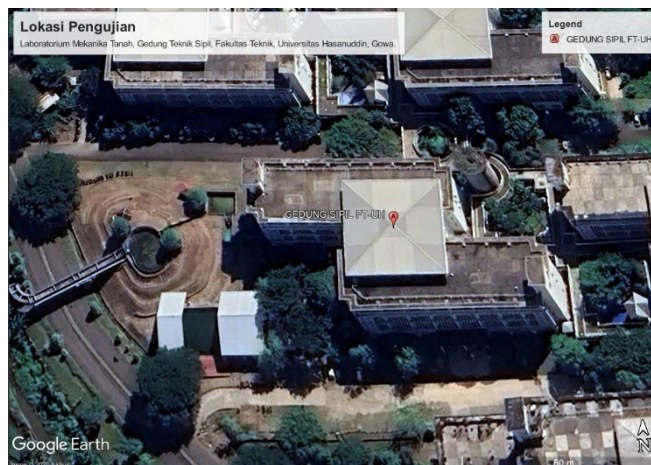
			hambatan cabut angkut.	
3	Yongki Bandaso (2020)	Studi Kapasitas Tarik Angkur Lipat terhadap Kedalaman Tanah	Tujuan penelitian ini adalah menganalisis hubungan antara kedalaman penanaman angkur lipat dan kapasitas tariknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas tarik meningkat dengan kedalaman, dan kedalaman 900 mm memberikan kapasitas paling tinggi.	Yongki Bandaso (2020)
4	Das (2012)	<i>Geotechnical Engineering Handbook – Illustrated Edition</i>	Tujuan penelitian ini adalah merumuskan dasar empiris perhitungan kapasitas tarik jangkar pada tanah non-kohefif dan kohefif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas tarik angkur dipengaruhi oleh bentuk, kedalaman, dan densitas tanah; pasir padat memberikan kapasitas tarik jauh lebih besar dari pasir lepas (<i>loose sand</i>).	Das (2012)

5	Singh & Ramaswamy (2008)	<i>Effect of Shape on Holding Capacity of Plate Anchors Buried in Soft Soil.</i>	Tujuan penelitian ini adalah menilai pengaruh bentuk jangkar terhadap kapasitas tariknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jangkar berbentuk lingkaran dan persegi memiliki <i>breakout factor</i> lebih tinggi dibanding bentuk strip, serta kapasitas tarik meningkat dengan densitas tanah dan kedalaman.	Singh & Ramaswamy (2008)

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah, Gedung Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang berada di Kabupaten Gowa. Dilakukan sejak bulan Maret hingga Juni 2025. Jenis penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium yang dilakukan melalui pengujian kuat tarik angkur lipat tipe ganda pada tanah berpasir dengan variasi kerapatan dan kedalaman penanaman dalam kondisi *unsaturated*.



Gambar 7. Lokasi pengujian
Sumber : Google Earth

2.2 Metode Pengumpulan Data

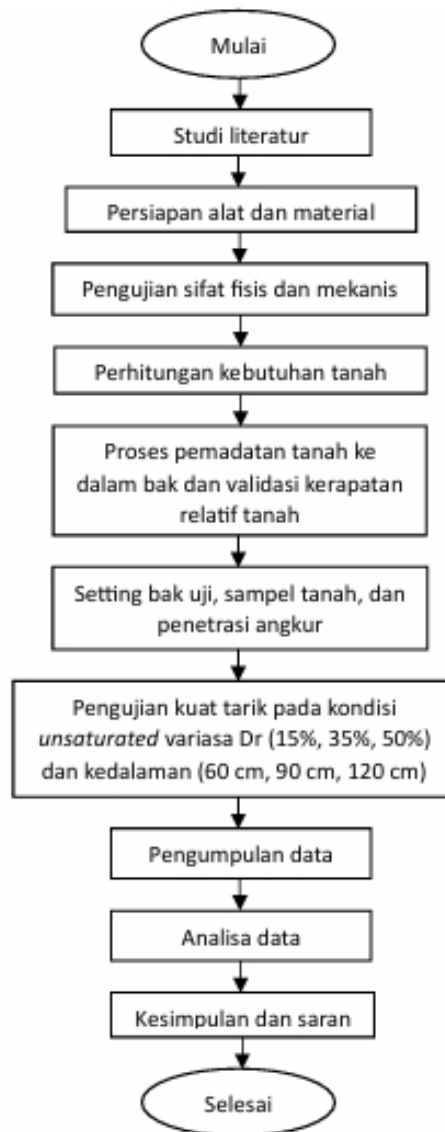
Pengumpulan data diawali dengan tahap persiapan yang mencakup penyediaan alat dan material penelitian. Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap material tanah, yang meliputi pengujian sifat fisis dan sifat mekanis. Pengujian sifat fisis terdiri atas pengujian kadar air, berat jenis, dan analisis saringan, sedangkan pengujian sifat mekanis meliputi pengujian kerapatan relatif dan uji geser langsung. Setelah seluruh pengujian tersebut selesai, dilakukan perhitungan kebutuhan tanah untuk memperoleh kondisi tanah pasir homogen yang sesuai sebagai dasar analisis kapasitas kuat tarik angkur.

Tahap Tahap berikutnya adalah proses pemadatan tanah ke dalam bak uji hingga mencapai nilai kerapatan relatif yang telah ditentukan. Nilai kerapatan relatif tanah kemudian divalidasi menggunakan *Hand Cone Penetrometer* (HCP) guna memastikan kesesuaian kondisi tanah uji. Setelah validasi selesai, dilakukan pemasangan bak uji dan perangkat pengujian. Pengujian kuat tarik angkur dilaksanakan pada kondisi tanah tidak jenuh (*unsaturated*) dengan variasi kerapatan relatif sebesar 15%, 35%, dan 50%, serta variasi kedalaman penanaman angkur 60

cm, 90 cm, dan 120 cm. Variasi parameter tersebut bertujuan untuk menganalisis pengaruh kerapatan relatif tanah pasir dan kedalaman penanaman angkur terhadap kapasitas kuat tarik vertikal angkur tanah. Seluruh data hasil pengujian selanjutnya dicatat dan diolah sebagai dasar analisis dan pembahasan penelitian.

2.3 Bagan Alir Penelitian

Untuk mempermudah memahami alur penelitian maka dibuat dalam alur penelitian seperti pada Gambar 7.



Gambar 8. Diagram alir penelitian

2.4 Material

Adapun material bahan yang digunakan dalam penelitian ini yakni tanah pasir yang lolos saringan No. 20 (0.850 mm).



Gambar 9. Pasir Homogen

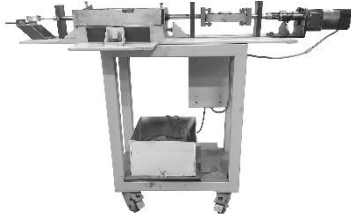
2.5 Peralatan Uji

Peralatan yang digunakan untuk uji sifat fisis tanah, uji sifat mekanis tanah, dan kuat tarik angkur dapat di lihat pada Tabel 8, Tabel 9, dan Tabel 10 berikut:

Tabel 8. Alat-alat yang digunakan untuk pengujian sifat fisis tanah

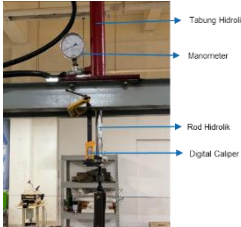
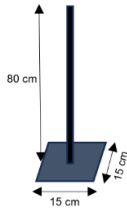
No	Nama Pengujian	Gambar Alat
1	Pengujian kadar air	
2	Pengujian berat jenis	
3	Pengujian Analisa Saringan (Sieve Analysis)	

Tabel 9. Alat-alat yang digunakan untuk pengujian sifat mekanis tanah

No	Nama Alat	Gambar
1	Pengujian geser langsung (Direct Shear)	
2	Pengujian Kerapatan Relatif (Dr)	
3	Pengujian Hand Cone Penetrometer (HCP)	

Tabel 10. Alat-alat yang digunakan untuk kuat tarik angkur

No	Nama Alat Pengujian	Gambar Alat
1	Alat Uji	
2	Angkur Tanah Lipat Tipe Ganda	

3	Baut Pembuka, Ring Penahan, Sambungan Rod	
4	Tabung Hidrolik, Manometer, Rod Hidrolik, Digital Caliper	
5	Alat Pemasak	

2.6. Standar Pengujian

Nilai-nilai karakteristik dasar tanah yang digunakan dalam penelitian ini diuji berdasarkan acuan pada standar-standar yang dikeluarkan oleh ASTM (*American Standard Testing and Material*) dan SNI (Standar Nasional Indonesia). Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 11 mengenai pengujian sifat fisis dan mekanis tanah di bawah ini.

Tabel 11. Standar pengujian sifat fisis dan mekanis tanah

No	Jenis Pengujian	Jenis Standard	
		ASTM	SNI
1	Analisa Saringan	C-136-06	SNI 03-1968-1990
2	Berat Jenis Tanah (Gs)	D-162	SNI 03-1964-1990
3	Kadar Air (Wc)	D-2216-98	SNI 03-1965-1990
4	Berat Isi Kering (γ_{dry})	D-854-72	SNI 03-1970-2008
5	Angka Pori (e)	D-854-72	SNI 03-2473-1991
6	Porositas (n)	D-7063-11	SNI 13-3604-1994
7	Geser langsung	D5607-02	SNI 2824:2011

8	Kerapatan relatif	D4254-16	-
9	Uji Pull Out	D3689	-
10	Hand Cone Penetrometer	Journal of Earthquak Engineering	

2.7 Pengujian Sifat Fisis Dan Mekanis Sampel

2.7.1 Pengujian Fisis

a. Analisa Saringan

Pengujian analisis saringan bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran butiran tanah sebagai dasar dalam klasifikasi tanah. Pengujian diawali dengan menyiapkan contoh tanah yang lolos saringan No. 4 sebanyak 500 gram dalam kondisi kering oven. Selanjutnya disiapkan satu set saringan yang terdiri atas saringan No. 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200, dan pan. Masing-masing saringan dan pan ditimbang dalam kondisi kosong untuk memperoleh berat awal. Saringan kemudian disusun dari ukuran bukaan terbesar hingga terkecil dari atas ke bawah, dengan pan ditempatkan di bagian paling bawah setelah saringan No. 200. Contoh tanah dimasukkan ke dalam saringan No. 4, kemudian satu set saringan ditutup dan ditempatkan pada mesin pengguncang untuk digetarkan selama 15 menit. Setelah proses pengguncangan selesai, saringan didiamkan selama 5 menit. Apabila tanah mengandung fraksi lanau dan lempung dalam jumlah yang signifikan, maka analisis saringan basah dilakukan terlebih dahulu. Setelah pengguncangan, masing-masing saringan beserta tanah yang tertahan ditimbang dan dicatat. Apabila persentase tanah yang lolos saringan No. 200 melebihi 50%, maka diperlukan pengujian hidrometer untuk menentukan distribusi ukuran partikel halus, khususnya fraksi lanau dan lempung. Namun, untuk tanah pasir yang umumnya memiliki fraksi tertahan pada saringan No. 200 lebih dari 50%, pengujian hidrometer tidak diperlukan. Data hasil pengujian selanjutnya digunakan untuk perhitungan distribusi ukuran butir dan penentuan klasifikasi tanah.

b. Kadar air

Pengujian Kadar air tanah (w) adalah perbandingan antara berat air dalam tanah terhadap berat kering tanah yang dinyatakan dalam persentase. Pengujian dilakukan dengan menimbang tin box kosong, kemudian menimbang tin box berisi sampel tanah basah. Sampel selanjutnya dikeringkan dalam oven selama 24 ± 4 jam, didinginkan hingga suhu ruang, dan ditimbang kembali. Data hasil penimbangan digunakan untuk menghitung nilai kadar air tanah.

c. Berat Jenis

Berat jenis tanah merupakan perbandingan antara massa jenis butiran tanah padat dengan massa jenis air bebas udara pada suhu 20°C. Pengujian dilakukan menggunakan sampel tanah yang lolos saringan No. 4 dalam kondisi kering oven sebanyak 10–25 gram dan piknometer berkapasitas 50–100 ml. Pengujian diawali dengan mengisi piknometer menggunakan air suling hingga batas kalibrasi, kemudian ditimbang dan dicatat suhunya. Sampel tanah dimasukkan ke dalam piknometer, ditambahkan air secukupnya, lalu didiamkan selama 1–2 jam. Selanjutnya piknometer dipanaskan untuk menghilangkan gelembung udara hingga tidak terbentuk gelembung lagi. Setelah didinginkan hingga suhu ruang, air suling ditambahkan kembali sampai batas kalibrasi dan piknometer ditimbang. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis untuk menentukan nilai berat jenis tanah.

2.7.2 Pengujian Mekanis

a. Kerapatan Relatif

Perhitungan dan analisa kerapatan relatif mengacu pada (ASTM D-4254-16, 2000), pada ASTM tersebut memberikan panduan untuk menghitung besarnya berat isi maksimum dan berat isi minimum dengan menggunakan vibrator/meja getar untuk pemadatan tanah dalam sebuah mould. Sampel tanah pasir yang digunakan untuk pengujian kepadatan maksimum dan minimum ini adalah tanah pasir kering oven (kadar air=0%). Untuk menentukan kepadatan minimum dari pasir dilakukan dengan memasukkan pasir kedalam mould menggunakan corong ditungakan perlahan-lahan dengan menjaga ketinggian ujung corong sama setiap pemasukkan tanah pasir kedalam mould. Setelah mould diisi penuh maka langkah selanjutnya adalah memotong tanah yang berlebihan sehingga tanah pasir rata dengan mould. Kepadatan minimum pasir didefinisikan sebagai berat tanah dalam kondisi tidak dipadatkan dibagi dengan volume mould.

Untuk menentukan kepadatan tanah maksimum pasir dilakukan dengan memasukkan tanah pasir kedalam mould seperti pada pemasukkan tanah pasir kondisi minimum kemudian diberikan beban diatasnya kemudian dipasang di atas meja getar. Mould digetar pada selang waktu ± 8 menit pada frekuensi 60 HZ. Setelah dilakukan vibrasi maka pasir dalam mould akan mengalami penurunan, volume dari penurunan tersebut kemudian di isi kembali oleh pasir dan digetarkan pada meja getar setelah pasir tidak mengalami penurunan maka kelebihan pasir pada mult akan di potong hingga rata dengan mould. Berat isi maksimum diperoleh dengan membagi berat tanah dengan volume mould dimana berat tanah pada kondisi maksimum. Perhitungan berat isi maksimum dan minimum menggunakan persamaan di bawah ini

$$\gamma_{dmaks} = \frac{W_{maks}}{V}; \gamma_{dmin} = \frac{W_{min}}{V} \quad (16)$$

Dimana :

γ_{dmaks} = Berat isi maksimum

γ_{dmin} = Berat isi minimum

W_{maks} = Berat tanah setelah dilakukan pemadatan dengan alat getar

W_{min} = Berat tanah dalam mould tanpa dipadatkan

V = Volume mould yang digunakan

Contoh perhitungan berat isi maksimum dan minimum ditunjukkan pada Tabel 12 dibawah ini.

Tabel 12. Contoh perhitungan berat isi minum dan maksimum

Perhitungan Berat isi Minimum dan Maksimum			
Nomor sampel	I	II	III
Berat Mould (gram)	5598.6	5598.6	5598.6
Diameter mould (cm)	15.2	15.2	15.2
Tinggi mould (cm)	17.65	17.65	17.65
Berat mould + tanah pasir (kondisi γ_{min}) (gram)	9786.9	9791.2	9784.5
Berat mould + tanah pasir (kondisi γ_{maks}) (gram)	10322.2	10365.5	10363.5
γ_{dmin} (gram/cm ³)	1.31	1.31	1.31
γ_{dmaks} (gram/cm ³)	1.47	1.49	1.49

Hasil dari perhitungan berat isi minimum dan maksimum akan digunakan dalam menghitung jumlah pasir yang dibutuhkan tiap lapisan untuk memperoleh kerapatan relatif yang direncanakan.

b. Direct Shear

Pengujian *direct shear* bertujuan untuk menentukan parameter kekuatan geser tanah pasir berupa sudut geser dalam (ϕ), yang digunakan dalam perhitungan kapasitas tarik ankur. Pengujian dilakukan dengan memasukkan sampel tanah ke dalam kotak geser berukuran 30 cm × 30 cm × 12 cm sesuai variasi kerapatan relatif sebesar 15%, 35%, dan 50%. Permukaan tanah diratakan agar beban normal dapat terdistribusi secara merata. Pelat beban dipasang di atas sampel, kemudian beban normal diberikan sesuai variasi yang ditentukan. Dial gauge dipasang untuk mengukur pergeseran horizontal dan perubahan vertikal. Selanjutnya alat uji dijalankan dan pembacaan beban geser dicatat setiap 15 detik hingga tercapai kondisi maksimum atau terjadi keruntuhan. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk memperoleh nilai sudut geser dalam tanah.



Gambar 10. Alat geser langsung yang telah di Modifikasi

2.8 Prosedur Pengujian Kuat Tarik Angkur

2.8.1 Perhitungan Kebutuhan Tanah

Salah satu tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh hubungan antara kerapatan relatif tanah pasir dengan kuat tarik angkur sehingga kerapatan relatif tanah pasir harus dilakukan dengan presisi. Perhitungan kerapatan relatif menggunakan persamaan di bawah ini.

$$D_r = \frac{\gamma_{d,maks}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d,min}}{\gamma_{d,maks} - \gamma_{d,min}} \quad (17)$$

Dimana :

- D_r = Kerapatan relatif
- γ_{dmaks} = Berat isi maksimum
- γ_{dmin} = Berat isi minimum
- γ_d = Berat isi aktual/lapangan

Dengan mengetahui D_r , γ_{dmaks} , dan γ_{dmin} maka γ_d dapat kita peroleh. Untuk menghitung berat tanah yang dibutuhkan setiap lapisan (15 cm) maka nilai γ_d harus dikalikan dengan volume tiap lapisan. Dalam penelitian ini kadar air yang di pakai pada rentang 8% hingga 15% hal ini dilakukan dengan tujuan agar pada saat selesai uji tarik tanah disekitar angkur tidak langsung runtuh dikarenakan tanah pasir hampir tidak memiliki daya lekat antar butiran sehingga kita bisa melakukan pengamatan terhadap pola keruntuhan tanah pasir disekitar angkur. Berikut ini adalah contoh tabel perhitungan kebutuhan tanah pasir pada tiap lapisan.

Tabel 13. Contoh perhitungan kebutuhan pasir tiap lapisan

Perhitungan kebutuhan pasir untuk setiap lapisan 15 cm				
γ_{dmin} =	1.308 gram/cm ³			
γ_{dmaks} =	1.484 gram/cm ³			
D_R (%)	γ_{dry} (gram/cm ³)	Kadar Air (%)	γ_{wet} (gram/cm ³)	Berat tanah tiap lapisan 15 cm (kg)
15	1.33		1.49	143.40
35	1.36	12.18	1.53	146.95
50	1.39		1.56	149.72

2.8.2 Pemadatan Tanah

Pemadatan tanah pada bak uji dilakukan secara mekanis di laboratorium. Tanah pasir yang telah ditimbang sesuai dengan kerapatan relatif yang direncanakan dimasukkan ke dalam bak uji, kemudian dipadatkan hingga mencapai batas ketinggian yang telah ditentukan. Pemadatan dilakukan menggunakan pelat besi berukuran 15×15 cm dengan ketebalan 1,5 cm yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu, sehingga tanah pasir mencapai kerapatan relatif yang diinginkan.

Proses pemadatan dilakukan secara bertahap dalam beberapa lapisan, dengan ketebalan setiap lapisan sebesar 15 cm. Untuk memperoleh kondisi tanah yang mendekati seragam dan padat, setiap lapisan dipadatkan sebanyak dua kali menggunakan metode yang sama. Pemadatan yang dilakukan secara konsisten pada setiap lapisan bertujuan untuk menghasilkan nilai kerapatan relatif yang merata dan sesuai dengan perencanaan, sehingga kondisi tanah dalam bak uji bersifat terkendali dan representatif terhadap kondisi lapangan.

2.8.3 Validasi Kerapatan Relatif

Sebelum melakukan uji tarik salah satu hal yang perlu dilakukan adalah melakukan pengecekan atau validasi terhadap kerapatan relatif tanah pasir yang telah dipadatkan dalam bak uji salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan alat *hand cone penetrometer*. Hand Cone Penetrometer merupakan alat uji tanah yang digunakan untuk mengukur daya dukung tanah dangkal serta menentukan ketahanan penetrasi lapisan tanah secara langsung di lapangan. Secara umum alat ini terdiri dari tangkai berbentuk T (*T-handle*) berfungsi sebagai tuas penekan untuk memberikan gaya dorong secara vertikal ke dalam tanah. Batang rod dilengkapi ujung berbentuk kerucut (*cone*) yang dirancang untuk menembus lapisan tanah dengan presisi. Sementara itu, dial gauge atau manometer yang terletak pada bagian tengah alat berperan menampilkan nilai tahanan penetrasi secara akurat selama proses pengujian. Alat ini bekerja dengan prinsip memberikan gaya tekan manual melalui pegangan berbentuk T (*T-handle*), sehingga ujung alat dapat menembus tanah pada kedalaman tertentu.

Dari nilai tekanan ujung konus (q_c) yang telah dinormalisasi terhadap tekanan atmosfer (σ_{atm}) merupakan parameter utama yang mengontrol kerapatan relatif pasir, sebagaimana dikemukakan oleh Baldi et al. (1986).

$$D_R = 100 \times \frac{1}{C2} \left[\ln \left(\frac{q_c}{\sigma_{atm}} \right) - C1 \right] \quad (18)$$

yang kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Jamiolkowski et al. (2003), menggunakan persamaan di bawah ini.

$$D_R = 100 \left[0.268 \times \ln \left(\frac{q_t / \sigma_{atm}}{\sqrt{\sigma'_{vo} / \sigma_{atm}}} \right) - 0.675 \right] \quad (19)$$

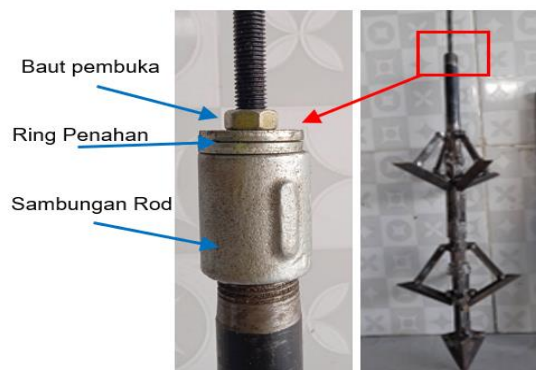
Dari persamaan diatas dapat diuraikan perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 14 dibawah ini.

Tabel 14. Contoh perhitungan validasi kerapatan relatif dengan metode hand cone penetrometer test

Validasi Kerapatan Relatif (D_r) dengan HCP		
Kedalaman	60	cm
Berat volume pasir (γ)	1.48	gram/cm ³
Tekanan over burden efektif (s'_{vo})	88.64	gram/cm ²
Luas konus (A_{conus})	6.45	cm ²
Kalibrasi proving ring	496	gram/div
Pembacaan proving ring	98	div
Tahanan konus (q_t)	7536.124	gram/cm ²
Tekanan atmosfer (σ_{atm})	1033	gram/cm ²
Kerapatan relatif (D_r)	18.66	%

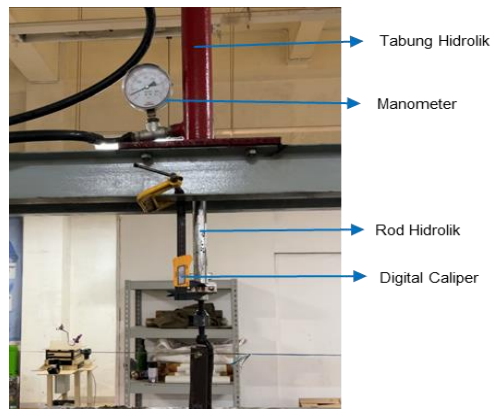
2.8.4 Pelaksanaan Penetrasi Dan Pengujian Kuat Tarik Angkur

Setelah melakukan validasi terhadap kerapatan relatif pasir langkah selanjutnya adalah dengan melakukan penetrasi angkur kedalam tanah. Penetrasi ini dilakukan dengan menekan rod dari angkur kedalam tanah dengan menggunakan mesin hidrolik. Sebelum melakukan penetrasi batang rod harus diberi tanda yang menunjukkan kedalaman penanaman angkur yang direncanakan. Setelah angkur ditanam pada kedalaman tertentu maka langkah selanjutnya adalah membuka sayap angkur dengan cara memutar baut yang telah dipasang pada rod dalam dan ditahan oleh ring baut pada rod luar seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



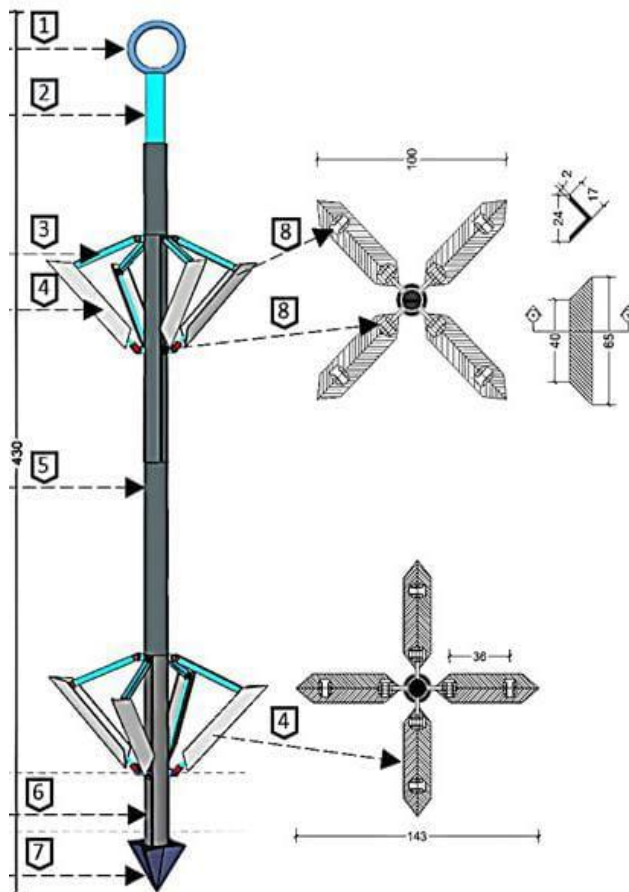
Gambar 11. Mekanisme pembukaan sayap angkur

Indikasi terbukanya sayap angkur secara maksimal yaitu dengan melihat beda tinggi awal dan akhir rod dalam mencapai 4 cm. Pada saat sayap angkur telah terbuka maksimal maka akan dilakukan pengujian tarik, dalam pengujian ini akan dilakukan pencatatan data berupa tekanan hidrolik dan perpindahan angkur. Peralatan yang digunakan untuk mengukur tekanan hidrolik selama uji tarik menggunakan manometer sedangkan alat untuk mengukur perpindahan angkur menggunakan alat *digital caliper*.



Gambar 12. Alat ukur uji tarik ankur

Berikut ini adalah model ankur tanah lipat tipe ganda yang digunakan.



Gambar 13. Gambar dimensi ankur tanah lipat tipe ganda

Keterangan

- 1 : Sambungan ke- penarik Hidrolik
- 2 : Rod dalam
- 3 : Lengan sayap
- 4 : Sayap angkur
- 5 : Batang penyambung sayap atas dan bawah
- 6 : Alur lengan pada rod luar
- 7 : Konus
- 8 : Sambungan baut

Berat Angkur : 1,7 kg

Catatan : satuan panjang adalah mm

Gambar dimensi angkur. Pada gambar 12 detail angkur yang didesain terlihat bahwa rod angkur yang didesain terdiri dari 2 buah yaitu rod dalam dan rod luar. Mekanisme kerja angkur ini adalah membuka sayap angkur dengan menahan rod luar kemudian menarik rod dalam sehingga lengan atau engsel akan bergerak ke arah atas melalui alur yang di buat pada rod luar seperti pada keterangan no. 6. Indikator terbukanya sayap angkur dapat dilihat dari pergerakan rod dalam sebesar 30 mm, hal ini menjadi salah satu pengembangan dari angkur sebelumnya dimana kondisi terbuka atau tidaknya sayap angkur dapat diketahui tanpa menggali tanah dimana angkur ditanam. Angkur yang didesain akan terbuka apabila rod dalam ditarik ke atas dan menahan rod luar cara ini dapat digantikan dengan cara kerja mur baut pada rod dalam apa bila di putar searah jarum jam maka rod dalam akan terdorong keatas dan mur berperan dalam menahannya pada rod luar sehingga tidak kembali pada saat proses pembukaan sayap angkur.