

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tantangan penelitian geoteknik akan meningkat secara signifikan seiring dengan berkembangnya sektor energi dunia yang terus berekspansi ke area baru (Bradshaw et al., 2016). Pemanfaatan anjungan terapung untuk mendukung turbin angin lepas pantai adalah konsep yang relatif baru, namun sumber energi seperti itu akan membutuhkan sistem penahan yang saat ini telah dioptimalkan untuk struktur terapung (Musial et al., 2004; Schneider & Senders, 2010). Angkur tanah merupakan salah satu bagian dari aplikasi rekayasa geoteknik sebagai struktur penahan gaya angkat, beban angin dan beban hidrodinamika dalam implementasinya seperti menara transmisi, dinding penahan tanah, jembatan, dan anjungan lepas pantai. Angkur tanah pada umumnya dianalisis adalah bentuk yang bersudut seperti pelat persegi, lingkaran dan angkur strip yang mengalami beban statis maupun seismik (Hanna et al., 2007; J. Liu, 2012; Sahoo & Ganesh, 2018; Srinivasan et al., 2020; Zhuang & Yu, 2018). Dalam mengembangkan model analitis untuk jenis pondasi sangat bergantung pada identifikasi mekanisme kegagalan dari tanah di sekitarnya (Hanna et al., 2007). Angkur *flip-type* yang ditanam pada tanah pasir menghasilkan tahanan tarik yang lebih besar (Hu et al., 2020). Berbeda dengan angkur pelat di tanah kohesif, kapasitas angkur di tanah pasir lebih dipengaruhi oleh orientasi pelat, sudut pembebanan, dan tingkat tegangan. Terdapat kebutuhan yang jelas untuk membuat basis data yang komprehensif baik secara eksperimental maupun numerik untuk menetapkan kondisi kegagalan yang tepat (Chow et al., 2018). Kapasitas tarik merupakan kombinasi antara berat efektif dari pelat, berat efektif tanah, dan komponen geser tanah di sepanjang bidang longsor (Vesić, 1971). Beberapa metode yang dikembangkan dalam menentukan kapasitas tarik maksimum dari angkur salah satunya dengan metode grafis menggunakan metode garis singgung dalam menentukan kapasitas batas tarik maksimum (P_u) (Bhardwaj & S. K. Singh, 2014). Pada tanah pasir lepas, garis geser dimulai dari tepi angkur dan menyatu membentuk lonceng di atas angkur sedangkan pada pasir padat garis geser memanjang keluar permukaan tanah membentuk kemiringan $1/2$ hingga $1/3$ dari sudut geser tanah (M. Liu et al., 2010). Pengembangan model dari angkur pelat salah satunya dilakukan pada angkur pelat lingkaran dengan mereduksi luas penampang sehingga membentuk seperti bintang (Djamaluddin et al., 2020). Angkur model lipat telah dikembangkan kemampuan *pull-up* di tanah kohesif. Model ini terdiri dari empat daun dan menunjukkan peningkatan beban *pull-up* dengan bertambahnya luas dan kedalaman pelat (Maming et al., 2022).

Penelitian diperlukan tidak hanya untuk memaksimalkan efisiensi kerja angkur dalam kondisi yang lebih ekstrim, tetapi juga untuk mengembangkan ide kemampuan kerja angkur yang lebih ramah lingkungan (Gerkus et al., 2016).

Meskipun sistem pondasi biasanya dirancang dengan menganalisis dengan baik beban kompresi, beberapa sistem pondasi harus didesain dengan mempertimbangkan beban pengangkatan yang dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu sifat tanah, kondisi pembebanan, rasio penanaman, dan konfigurasi kelompok angkur akan mempengaruhi penggunaan sistem angkur pada struktur yang mengalami gaya angkat (Emirler et al., 2016). Angkur tanah merupakan salah satu rekayasa teknik di bidang geoteknik untuk memecahkan beberapa permasalahan yang berkaitan dengan gaya angkat. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan jenis angkur seperti angkur pelat persegi dan lingkaran serta beberapa jenis angkur pelat lainnya yang mempunyai kemudahan dalam pemasangan seperti angkur flip (Yoshida et al., 2020). Salah satu kegunaan dari angkur tanah adalah pada pembangunan pada lokasi lepas pantai, pembangunan menara transmisi serta struktur yang membutuhkan tahanan lateral seperti dinding penahan tanah. Oleh karena penggunaan angkur sudah meluas dan pada bangunan yang rumit dan kompleks maka diperlukan pemahaman terhadap perilaku angkur yang baik untuk memprediksi besar kuat tarik angkur dan pola keruntuhan disekitar angkur (Ganesh & Sahoo, 2019). Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan beberapa penelitian terkait angkur pelat yang telah dimodifikasi seperti dalam penelitian Yoshida et.al., tentang *flip-anchor* (Yoshida et al., 2021). Penelitian di Amerika telah memperkenalkan berbagai jenis angkur tanah yang mempunyai bentuk dan mekanisme yang masing-masing berbeda seperti *penetrators*, *arrowheads*, dan *bullets* (American Earth Anchor.inc, 2017). Angkur tipe lipat yang diaplikasikan pada tanah lunak juga telah diteliti oleh (Maming et al., 2022). Berbeda dari produk atau penelitian sebelumnya, **kebaruan** dari penelitian yang diusulkan adalah terletak pada desain angkur yang lebih praktis dalam mengontrol pengembangan sayap pada saat dilakukan uji tarik dimana hal tersebut dapat diketahui pada saat pengujian penarikan perbedaan tinggi rod dalam dan rod luar mencapai 30 mm. Selain hal tersebut salah satu kebaruan dari penelitian yang dilakukan adalah pengujian penarikan angkur yang divariasikan berdasarkan kerapatan relatif tanah pasir sehingga akan diperoleh nilai korelatif antara kuat tarik angkur berdasarkan kerapatan relatif.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh kerapatan relatif tanah pasir terhadap kuat tarik angkur
2. Bagaimana pengaruh rasio penanaman terhadap kuat tarik angkur
3. Bagaimana pengaruh muka air tanah terhadap kuat tarik angkur

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Menganalisa kapasitas kuat tarik angkur berdasarkan kerapatan relatif tanah pasir.

2. Menganalisa kapasitas kuat tarik angkur berdasarkan kedalaman penanaman.
3. Menganalisa kapasitas tarik angkur berdasarkan pola keruntuhan yang terjadi disekitar angkur.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini membatasi cakupan penelitian yang lebih luas agar penelitian dapat berjalan lebih spesifik, serta dapat mencapai sasaran yang diinginkan. Penelitian ini hanya mencakup pengujian eksperimental yang dilakukan di Laboratorium. Ruang lingkup penelitian ini mencakup batasan masalah yang meliputi material, waktu dan lokasi penelitian. Ruang lingkup dari penelitian yang dilakukan diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Material tanah yang digunakan adalah material tanah yang diambil dari pantai Lakotong, Takalar.
2. Pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geoteknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Alat tekan dan uji tarik menggunakan peralatan hidrolik.

1.5 Manfaat Penelitian

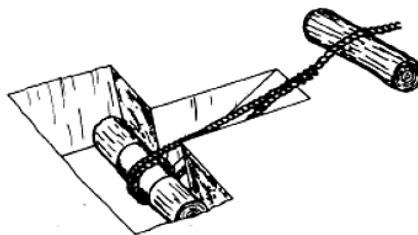
Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Mengetahui pengaruh kerapatan relatif terhadap kuat tarik angkur.
2. Mengetahui pengaruh rasio kedalaman penanaman dan kondisi muka air tanah terhadap besar kuat tarik angkur pada tanah pasir.

1.6 Teori

1.6.1 Sejarah dan Perkembangan Angkur Tanah

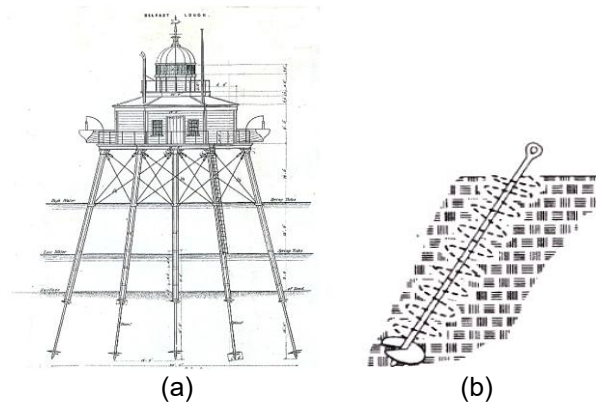
Pada awalnya angkur telah dikenal sejak zaman dulu, dimana penggunaan patok kayu, pohon hidup, maupun pohon yang telah ditebang yang digunakan untuk mengikat hewan ternak, menambatkan perahu atau penggunaan sejenis untuk menahan beban tarik. Berikut ini Gambar 1 yang menunjukkan penggunaan pohon sebagai angkur.



Gambar 1. Angkur pohon untuk menahan beban tarik (Balla, 1961)

Seiring dengan berkembangnya waktu, seorang ilmuwan tuna netra dari Irlandia yang bernama Alexander Mitchell (1780-1868) mengembangkan angkur sekrup pada tahun 1883, Pondasi sekrup Mitchell digunakan dalam pembangunan mercusuar dan suar di seluruh dunia pada saat itu (Gambar 2). Dia dikenal sebagai penemu mercusuar tiang pancang. Alexander Mitchell awalnya

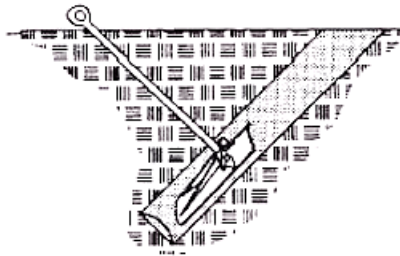
bekerja di bidang pembuatan batu bata di Belfast, dia menciptakan mesin yang digunakan dalam perdagangan tersebut, sebelum mematenkan angkur sekrup pada tahun 1833, yang kemudian membuatnya terkenal. Pada tahun 1848, ia terpilih sebagai anggota *Institution of Civil Engineers* dan menerima Medali Telford pada tahun berikutnya untuk makalah tentang penemuannya.



Gambar 2. (a) Angkur helix sebagai pondasi pada mercusuar (b) Angkur helix (Alexander Mitchel, 1848)

Meskipun ini adalah angkur sekrup yang paling awal dibuat, penahan sekrup baru diterima dengan baik pada akhir tahun 1950-an ketika *Chance* memperkenalkan angkur sekrup yang dipasang dengan menggunakan mesin penggerak.

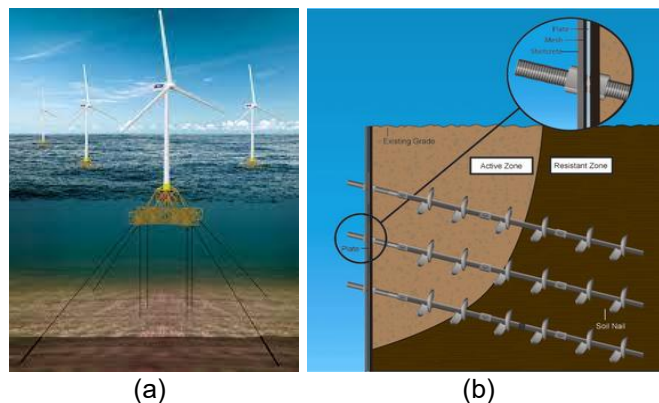
Albert Bishop Chance (1873 – 1949), Menemukan sistem angkur yang relatif lebih praktis dari sebelumnya pada tahun 1912. Badai es yang dahsyat menghantam sistem telepon di Centralia, Missouri yang dikelola oleh *Chance*. Tiang-tiang baru harus dipasang, kabel baru dirangkai dan hampir semua tiang harus diluruskan atau diangkur ulang. Tidak ada waktu untuk pemasangan angkur mati. Elemen-elemen tersebut menjadi ibu dari penemuan saat Mr. Chance menemukan angkur yang kemudian dikenal sebagai "*Never-Creep*" (Gambar 3). Angkur mengambil langkah pertama untuk menjadi sebuah ilmu pengetahuan dengan *Never-Creep*. Awalnya, angkur ini terdiri dari setengah tiang sepanjang dua kaki dengan lubang di tengah-tengah batang. Batang tersebut memiliki mata yang ditempa dan dilas oleh seorang pandai besi. Tiang tersebut dilengkapi dengan ujung berulir dan mur - tanpa galvanis. Dalam praktiknya, batang tersebut digerakkan untuk menabrak lubang angkur yang telah dibor sebelumnya. Angkur kayu dipegang di dalam lubang oleh satu orang yang berbaring di tanah sementara orang kedua mendorong batang hingga masuk ke dalam lubang. Mur dipegang oleh perangkat kawat di ujung gagang sapu sementara batang diputar untuk memasukkan ulir.



Gambar 3. Angkur Never-Creep oleh Chance 1945

Chance telah lama mempertimbangkan dan diminta oleh perusahaan listrik untuk mengembangkan angkur yang dapat dipasang oleh peralatan listrik dengan pengeluaran tenaga manusia yang lebih sedikit, hasil yang lebih seragam, dan biaya pemasangan yang lebih rendah. Hasilnya adalah angkur sekrup yang dipasang dengan alat pemutar. *Chance* mengembangkan manual penahan pertama pada tahun 1945. Manual ini menjelaskan sejumlah kelas tanah yang menghasilkan kapasitas penahan yang berbeda. Bagan klasifikasi tanah *Chance* masih menyisakan kesenjangan dalam komunikasi antara lapangan dan pabrik. Penggalian harus dilakukan sebelum tanah dapat diklasifikasikan dengan benar.

Masalah ini menghasilkan pengembangan alat *earth probe* pada tahun 1963. Dengan menggunakan alat uji tanah, data numerik dapat diperoleh mengenai ketahanan tanah di bawah permukaan tanpa mengganggu tanah. Saat ini, angkur tanah digunakan secara luas dalam berbagai proyek teknik sipil dan konstruksi untuk mendukung turbin angin lepas pantai, dinding penahan, dan menstabilkan lereng seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4 sehingga bahan yang lebih kuat dan teknik instalasi yang lebih efisien terus dikembangkan.



Gambar 4. Pengembangan angkur masa kini (a) penggunaan angkur pada turbin angin di laut (Pham, et al.,2019) (b) Angkur tanah pada dinding penahan tanah (Banks, S.,2023)

1.6.2 Defenisi Angkur Tanah

Sistem pengankuran adalah suatu sistem yang berfungsi untuk menyalurkan gaya tarik yang bekerja ke suatu lapisan tanah/batuan. Sistem pengankuran tersebut dapat menggunakan angkur tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

Angkur tanah biasanya digunakan sebagai perkuatan dalam bidang geoteknik seperti dinding penahan tanah, basement, dan stabilitas lereng. Perkuatan dengan ground anchor dapat bekerja secara maksimal, maka harus melalui beberapa pengujian terlebih dahulu sehingga fungsi dari ankur tanah dapat digunakan sebagai suatu perkuatan dalam tanah.

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) ankur umumnya digunakan dalam konstruksi pondasi untuk meningkatkan daya dukung tanah dan dinding penahan tanah. Tujuan utama dari penggunaan ankur tanah dalam konstruksi adalah untuk menyalurkan beban pada struktur kedalam lapisan tanah yang paling dalam dan jauh dari struktur diatasnya.

Saat ini berbagai macam sistem pelat termasuk pelat mekanis (pelat persegi/lingkaran, pelat heliks, *ground anchor*, pelat tiang pancang, dan pelat tarik), pelat grouted dan kombinasinya telah digunakan dan dikembangkan (Das and Shukla, 2013; Sabatini et al., 1999) Salah satu ankur pelat yang paling banyak digunakan untuk menahan gaya uplift pada struktur ringan adalah pelat pelat mekanis

Teori tahanan gaya angkat tanah juga dapat digunakan untuk memecahkan sejumlah masalah geoteknik di mana tahanan gaya angkat utama suatu struktur tidak disediakan oleh penambahan pelat tanah. Sebagai contoh, struktur seperti jaringan pipa yang terendam atau fondasi yang terkubur, meskipun tidak didukung oleh pelat, dapat dimodelkan secara efektif sebagai pelat tanah (Merifield et al., 2006).

1.6.3 Tanah Pasir

a) Distribusi ukuran tanah pasir

Sifat tanah sangat dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran butirannya. Besarnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanahnya. Oleh karena itu analisis butiran merupakan pengujian yang sangat sering dilakukan. Analisis ukuran butiran tanah merupakan penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan dengan ukuran dan diameter tertentu.

Distribusi ukuran butiran tanah ditentukan dengan cara menyaringnya. Sampel tanah disaring lewat satu unit saringan, berat tanah yang tertinggal pada masing-masing saringan ditimbang dan persentase terhadap berat kumulatif pada tiap saringan dihitung.

Berdasarkan hasil dan analisis saringan selanjutnya digambarkan dalam bentuk grafik, yaitu merupakan grafik lengkung gradasi (*grading curve*) atau disebut juga grafik lengkung pembagian butir (*particle size distribution*). Pada umumnya suatu macam tanah tertentu terdiri dari butir-butir yang termasuk beberapa golongan, misalnya kerikil sering mengandung pasir dan pasir sering mengandung lanau atau lempung.

Kurva distribusi ukuran butiran dapat digunakan untuk membandingkan beberapa jenis tanah yang berbeda. Ada tiga parameter dasar yang dapat ditentukan

dari kurva tersebut yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan tanah berbutir kasar. Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

- ukuran efektif (*effective size*),
- koefisien keseragaman (*uniformity coefficient*),
- koefisien gradasi (*coefficient of gradation*).

Ukuran efektif dinotasikan dengan D_{10} , didefinisikan sebagai 10% dari berat butiran total yang mempunyai diameter butiran lebih kecil dari ukuran butiran tertentu. Perbedaan antara tanah *uniform* dan bergradasi baik dapat ditentukan secara numerik dengan koefisien keseragaman dan koefisien gradasi yang diberikan dengan hubungan :

Perhitungan nilai koefisien keseragaman :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Perhitungan nilai koefisien gradasi :

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

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

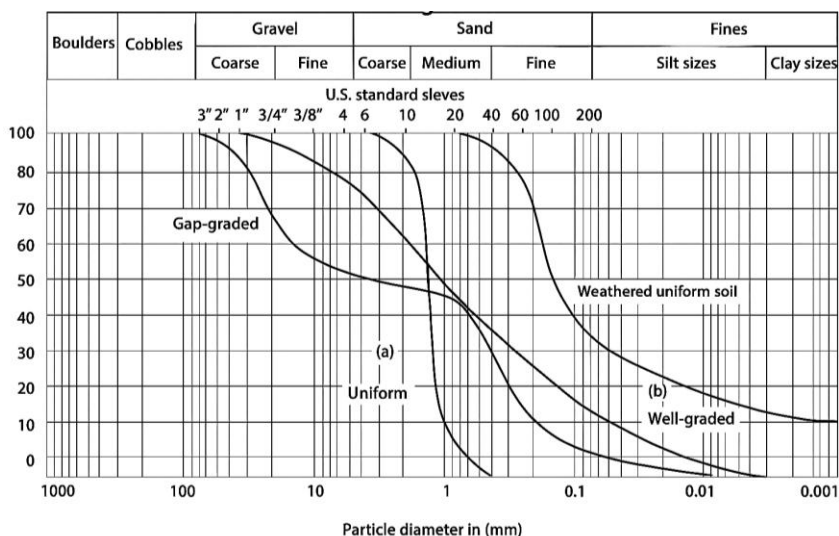
D_{60} = Diameter butiran yang sesuai dengan 60% lolos

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 1 memberikan penjelasan secara kualitatif mengenai kurva distribusi ukuran butiran.

Tabel 1. 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 5 ini diperlihatkan berbagai macam tipe kurva distribusi ukuran butiran.



Gambar 5. 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.

b) Kerapatan relatif tanah pasir

Istilah kerapatan relatif (*relative density*) dipakai untuk menyatakan tingkat kerapatan dari tanah berbutir kasar, yaitu pasir dan kerikil. Untuk pasir dan kerikil, kerapatan relatif merupakan salah satu sifat yang sangat penting. Kekuatan geser serta compressibility sangat tergantung pada kerapatan relatifnya.

Nilai kerapatan relatif bervariasi dari nilai terendah = 0 untuk tanah yang sangat lepas, sampai nilai yang tertinggi = 1 untuk tanah yang sangat padat. Para ahli secara kualitatif menjelaskan tentang tanah berbutir kasar atas kerapatan relatifnya seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai kerapatan relatif pada tanah pasir

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

Kerapatan relatif tanah pasir dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$Dr = \frac{e_{maks} - e}{e_{maks} - e_{min}} \quad (3)$$

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.

1.6.4 Faktor-Faktor yang mempengaruhi kuat tarik angkur pada tanah pasir

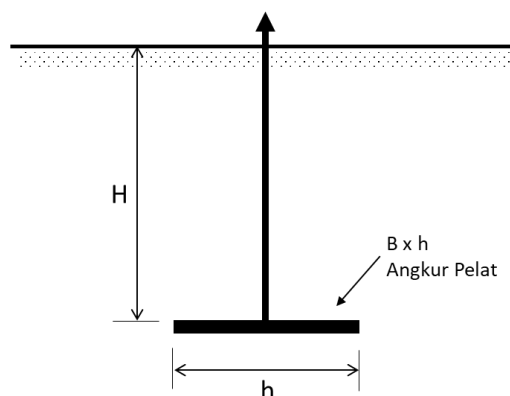
Pada penelitian (Ren et al., 2022), tentang karakteristik deformasi tanah disekitar angkur pelat terhadap gaya lateral memberikan kesimpulan bahwa ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kuat tarik angkur seperti jenis butiran tanah serta kerapatan relatif tanah. Dalam penelitian tersebut di jelaskan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

1.6.5 Jenis-Jenis Angkur Tanah

a) Jenis angkur tanah berdasarkan bentuknya

- Angkur pelat

Angkur pelat (Gambar 6) dapat berbentuk persegi, lingkaran atau persegi panjang pada umumnya digunakan sebagai sistem fondasi untuk struktur yang membutuhkan ketahanan terhadap pengangkatan, seperti menara transmisi, atau untuk struktur yang membutuhkan ketahanan lateral, seperti dinding penahan tanah. Angkur pelat telah digunakan untuk menyediakan sistem tambat yang sederhana dan ekonomis untuk fasilitas minyak dan gas terapung lepas pantai. Seiring dengan meluasnya penggunaan angkur pelat untuk mendukung struktur yang lebih rumit dan jauh lebih besar maka diperlukan pemahaman yang lebih baik mengenai perilaku angkur (Merifield et al., 2006).

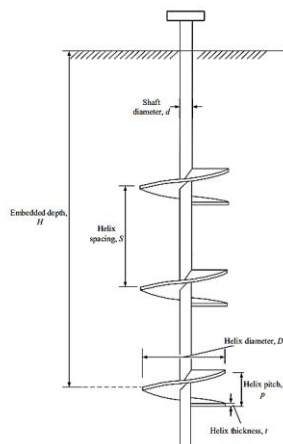


Gambar 6. Angkur pelat (Das and Shukla, 2013)

Angkur pelat dapat terbuat dari baja, beton pracetak, beton yang dicor ditempat, kayu dan lain sebagainya. Angkur pelat dapat di tempatkan secara vertikal ataupun horizontal untuk menahan beban aksial dan lateral.

- Angkur heliks (*Helical Anchor*)

Angkur heliks tipikal terdiri dari poros baja pusat dan beberapa pelat baja heliks yang dilas ke poros, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Dalam mendesain struktur terapung, kita perlu memprediksi secara akurat kapasitas tarik monotonik dari angkur heliks, yang dipengaruhi oleh kerapatan relatif tanah, rasio penanaman heliks, sudut geser tanah, sudut pelebaran, jumlah heliks, efek pemasangan, dan banyak faktor lainnya sehingga kapasitas tarik tunggal angkur heliks sulit untuk diprediksi.

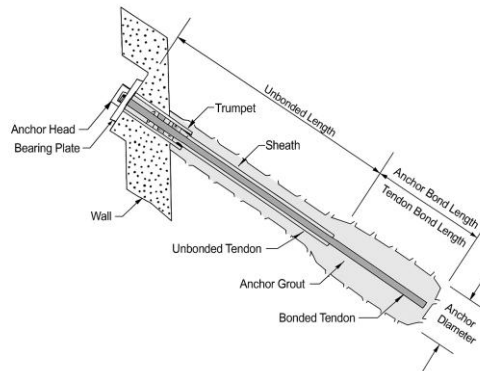


Gambar 7. Angkur Heliks (Wang et al., 2022)

Berbeda dengan pondasi tiang pancang konvensional, pondasi angkur heliks memiliki keunggulan dalam hal pemasangan yang cepat dan mudah, tidak menimbulkan kebisingan saat konstruksi, penggunaan yang cepat setelah pemasangan, dan dapat digunakan kembali beberapa kali (Ghaly & Hanna, 1994 ;Hsu & Liao, 1998). Angkur heliks digunakan sebagai fondasi pada banyak struktur seperti dermaga pantai, pembangkit listrik tenaga angin, saluran transmisi, dan anjungan gas alam.

- Angkur Grouting

Angkur grouting memiliki bagian penting yang meneruskan gaya tarik (*tensile force*) dari struktur utama ke tanah di sekitarnya. Kekuatan geser dari tanah digunakan untuk melawan gaya tarik tersebut serta untuk mengikat struktur angkur grouting pada tanah. Struktur angkur grouting biasanya terdiri dari baja tendon dengan kekuatan tinggi yang dipasang pada sudut kemiringan (inklinasi) tertentu dan pada kedalaman yang diperlukan untuk melawan beban yang ada seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Angkur grouting dan bagian-bagiannya (Hakki O. Ozhan dan Erol Guler, 2017)

Komponen angkur grouting pada Gambar di atas meliputi *unbonded length anchor* dan *bond length anchor*. *Bond length anchor* berfungsi sebagai pembungkus material tanah untuk memindahkan beban serta gaya tarik (*tensile force*) dari struktur ke tanah di sekitar angkur. Sedangkan *unbonded length anchor* adalah bagian dari tendon yang tidak terikat dan bebas bergerak di dalam tanah serta terletak pada bagian atas *bond length anchor* dimana tidak ada gaya tarik yang dipindahkan ke tanah. Selain itu komponen angkur grouting juga terdiri dari tendon, yaitu bagian yang terbuat dari baja berkekuatan tinggi (bar, wire atau strand) yang dikelilingi cement grout (material semen untuk grouting).

b) Jenis angkur tanah berdasarkan durasi penggunaannya

Angkur tanah (*ground anchor*) adalah elemen yang digunakan dalam teknik sipil dan geoteknik untuk memberikan penahan gaya aksial dan gaya lateral pada struktur tanah atau bangunan. Angkur tanah dapat bersifat sementara atau permanen, tergantung pada tujuan dan durasi penggunaannya (Tan Chin Shu, 2011). Berikut adalah penjelasan lebih rinci mengenai kedua jenis angkur tanah ini:

- Angkur sementara

Angkur tanah sementara dirancang untuk aplikasi jangka pendek, biasanya kurang dari dua tahun. Mereka sering digunakan dalam proyek konstruksi untuk menstabilkan lokasi penggalian, mendukung dinding penahan, dan mengontrol gaya angkat tanah selama fase konstruksi. Setelah proyek selesai, angkur ini biasanya dilepas atau dibiarkan di tempat jika tidak mengganggu konstruksi di masa depan. Contoh penggunaan tipe angkur ini yaitu pada dinding penahan sementara untuk mencegah longsor pada masa konstruksi. Kelebihan dari angkur sementara ini terletak pada biaya yang lebih rendah, fleksibel dan dapat digunakan kembali apabila tidak mengalami kerusakan.

- Angkur Permanen

Angkur tanah permanen dirancang untuk aplikasi jangka panjang dan dirancang untuk tetap berada di tempat selama bertahun-tahun, seringkali sepanjang umur struktur yang mereka dukung. Angkur ini memerlukan

perlindungan korosi yang kuat dan biasanya digunakan dalam proyek teknik sipil di mana stabilitas jangka panjang sangat penting, seperti dalam konstruksi bendungan, jembatan, dan dinding penahan. Penggunaan angkur permanen ini biasanya digunakan pada dinding penahan tanah, transmisi listrik, stabilitas lereng, fondasi bangunan seperti reservoir air.

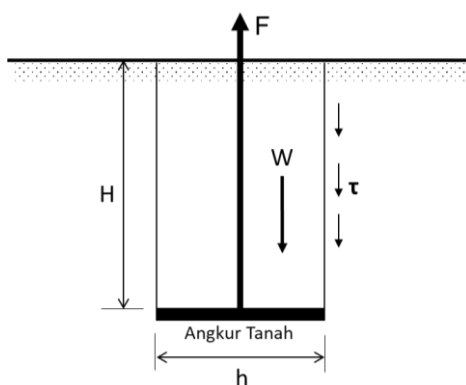
1.6.6 Analisa Mekanisme Keruntuhan Tanah disekitar Angkur

Kapasitas penarikan angkur pelat biasanya mencakup berat tanah di dalam zona kegagalan serta tahanan geser dan/atau kohesif di sepanjang permukaan kegagalan yang dipertimbangkan. Untuk memahami perilaku angkur pelat dan memperkirakan kapasitas penarikannya, diperlukan pemahaman tentang mekanisme kegagalan tanah di sekitar angkur pelat yang terangkat. Berbagai macam permukaan kegagalan telah diusulkan oleh banyak peneliti seperti metode silinder geser (Majer, 1995), kerucut terpotong dengan sudut puncak yang berbeda (Mors, 1959), permukaan kegagalan melingkar (Balla A, 1961), dan bentuk piramida terpotong (Meyerhof dan Adams, 1968).

Pengamatan pola kegagalan tanah selama eksperimen *pull-out* pada angkur pelat yang tertanam di pasir telah mengarah pada pengembangan pendekatan teoritis untuk memperkirakan resistensi *pull-out* angkur. Pendekatan-pendekatan ini bertujuan untuk memprediksi gaya yang diperlukan untuk menarik angkur, dengan mempertimbangkan interaksi antara angkur dan pasir di sekitarnya. Salah satu hal yang perlu diperlu di analisa adalah pola keruntuhan pasir di sekitar area angkur pada saat dilakukan uji tarik. Berikut ini adalah beberapa penelitian terdahulu yang mengemukakan pola keruntuhan tanah pasir di sekitar angkur.

a. Metode Silinder Gesekan

Majer (1995) mengusulkan model silinder gesekan (Gambar 9). Model ini mengasumsikan bahwa tanah mengalami kegagalan dalam bentuk silinder dengan pelat angkur di bagian bawah. Resistensi *pull-out* dihitung dari jumlah berat tanah silindris di atas pelat anchor dan resistensi gesekan dari permukaan perifer silinder tanah.



Gambar 9. Model keruntuhan yang diusulkan oleh Majer J. (1995) pada angkur pelat dangkal

Pada berbagai penelitian sebelumnya, metode silinder geser sering digunakan untuk memperkirakan kapasitas angkat pelat angkur berbentuk melingkar pada

kondisi dangkal. Dalam pendekatan ini, diasumsikan bahwa permukaan geser tanah membentuk bidang kegagalan berbentuk silindris, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9. Untuk kondisi tanah tanpa kohesi, beban ultimit ditentukan sebagai hasil penjumlahan antara berat massa tanah yang berada di dalam silinder kegagalan dan tahanan geser yang termobilisasi sepanjang bidang kegagalan tersebut. Dengan demikian, persamaan kapasitas angkat dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Qu &= \left(\frac{\pi h^2}{4}\right) (H)(\gamma) + \int_0^H (\sigma'_0 \tan \phi) dz \\
 Qu &= \frac{\pi H h^2 \gamma}{4} + \int_0^H (\pi h)(\gamma z \tan \phi) dz \\
 &= \frac{\pi H h^2 \gamma}{4} + \left(\frac{\pi h H^2 \gamma}{4}\right) \tan \phi
 \end{aligned} \tag{4}$$

Dimana :

σ'_0 = Tekanan efektif overburden pada kedalaman z

ϕ = Sudut geser dalam

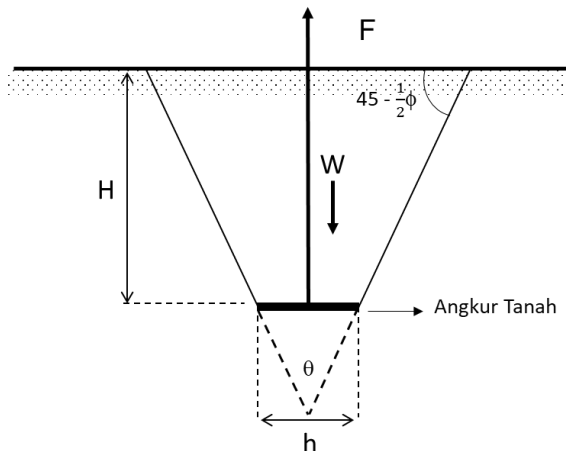
γ = Berat isi tanah pasir

h = Lebar angkur

H = Kedalaman Angkur

b. Metode Kerucut Tanah

Mors, (1959) mengusulkan model kerucut (Gambar 10) Model ini mengasumsikan bahwa massa tanah berbentuk kerucut terpancung terdiri dari garis-garis keruntuhan yang memanjang ke permukaan tanah dengan sudut $90^\circ + \phi/2$ (ϕ : sudut geser dalam) dari kedua tepi pelat angkur. Pola bidang keruntuhan yang dikemukakan oleh teori Mors H diperlihatkan pada gambar di bawah ini .



Gambar 10. Model keruntuhan yang diusulkan oleh Mors H. (1959) pada angkur pelat dangkal

Persamaan empiris yang dikemukakan oleh Mors H, memberikan persamaan empiris dimana kapasitas tarik angkur ditentukan oleh berat tanah yang berada pada zona bidang keruntuhan, pada persamaan ini gaya geser pada bidang keruntuhan diabaikan. Persamaan yang diajukan oleh teori Mors H, adalah sebagai berikut.

$$Qu = \gamma V \quad (5)$$

Dimana:

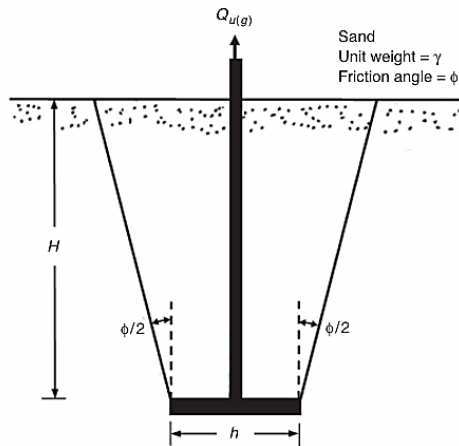
V = Volume tanah yang berada pada bidang keruntuhan yang berbentuk kerucut terpancung

γ = Berat isi tanah pasir

Volume tanah pasir pada bidang keruntuhan sama dengan volume dari bentuk volume kerucut terpancung yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$V = \frac{\pi H}{12} \left[3h^2 + 4H^2 \cot^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{4} \right) + 6Hh \cot \left(45^\circ - \frac{\phi}{4} \right) \right] \quad (6)$$

Teori Veesaert dan Clemence (1977) mengemukakan bahwa pada angkur pelat lingkaran dangkal, bentuk bidang keruntuhan pada kondisi beban maksimum dapat dimodelkan sebagai kerucut terpotong dengan sudut puncak tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Model keruntuhan yang diusulkan oleh Veeseert dan Clemence (1977) pada angkur pelat dangkal

Kapasitas tarik angkur yang dikemukakan oleh teori Veeseert dan Clemence memperhitungkan dua komponen yang mempengaruhi kapasitas tarik angkur yaitu berat tanah yang ada pada zona bidang keruntuhan dan besarnya tegangan geser yang terjadi disepanjang bidang geser akibat tekanan lateral dari tanah itu sendiri. Dengan menggunakan pendekatan bentuk bidang keruntuhan tersebut, kapasitas tarik angkur dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$Qu = \gamma V + \pi \gamma K (\tan \phi) \left(\cos^2 \frac{\phi}{2} \right) \left[\frac{hH^2}{2} + \frac{H^3 \tan(\frac{\phi}{2})}{3} \right] \quad (7)$$

$$V = \frac{\pi H}{12} \left[3h^2 + 4H^2 \tan^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) + 6Hh \tan \left(\frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (8)$$

Diamana :

V = Volume tanah pada bidang keruntuhan

h = Lebar angkur

H = Kedalaman Angkur

ϕ = Sudut geser dalam tanah pasir

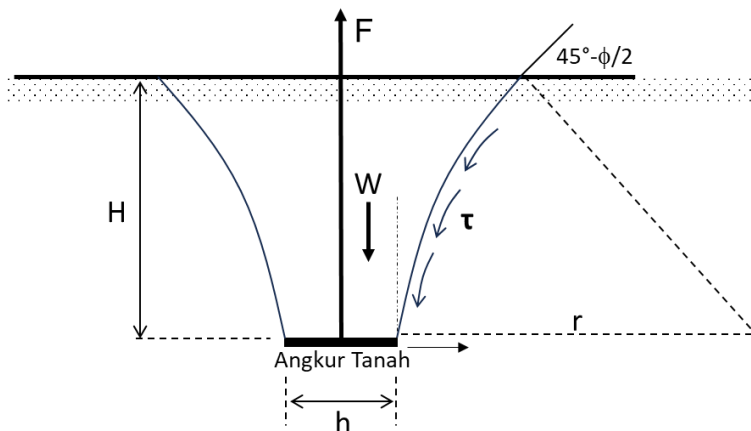
K = Koefisien tanah lateral

Menurut Veesaert dan Clemence (1977), nilai koefisien tekanan tanah diam (K_0) dapat berkisar antara 0,6 hingga 1,5, dengan rata-rata nilai mendekati 1.

c. Analisis Permukaan Kegagalan Melengkung

Beberapa peneliti sebelumnya memberikan gambaran tentang bentuk keruntuhan yang terjadi pada tanah pasir disekitar angkur dan menunjukkan bahwa bentuk garis kegagalan pada tanah pasir berbentuk garis lengkungan berbeda dari metode kerucut tanah yang berbentuk garis lurus.

Balla (1961) melaksanakan serangkaian pengujian model semi-spasial dengan penggunaan lapisan pasir berwarna untuk memvisualisasikan bentuk bidang kegagalan. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, diperoleh bukti bahwa terbentuk satu bidang slip dominan yang melengkung keluar dari tepi angkur menuju permukaan tanah. Temuan serupa juga diamati pada serangkaian pengujian spasial yang dilakukan pada kondisi pasir basah. Selanjutnya, Balla memodelkan penampang dari bidang geser sebagai busur melingkar yang melengkung keluar dari garis singgung vertikal pada tepi pelat angkur hingga berpotongan dengan permukaan tanah pada sudut $(45^\circ - \phi/2)$ seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Model keruntuhan yang diusulkan oleh Balla A. (1961) pada angkur pelat dangkal

Balla menunjukkan bahwa garis lengkung keruntuhan akan memiliki radius (r) yang sangat bergantung pada kedalaman penanaman angkur beserta sudut geser dalam tanah pasir seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini

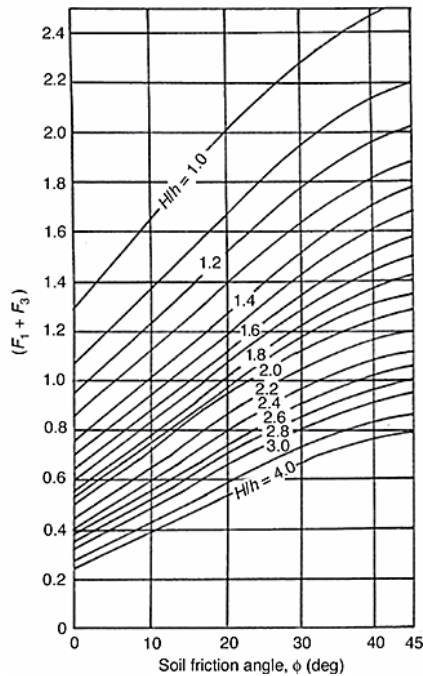
$$r = \frac{H}{\sin\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (9)$$

Balla memberikan persamaan empiris untuk memprediksi besarnya kuat tarik angkur yang terdiri dari dua komponen yaitu komponen berat tanah pada zona

bidang kegagalan dan komponen tegangan geser yang terjadi disepanjang permukaan bidang kegagalan seperti ditunjukkan pada persamaan dibawah ini.

$$Q_u = H^3 \gamma \left[F_1 \left(\phi, \frac{H}{h} \right) + F_3 \left(\phi, \frac{H}{h} \right) \right] \quad (10)$$

Jumlah dari fungsi $F_1(\phi, H/h)$ dan $F_3(\phi, H/h)$ yang dikembangkan oleh Balla (1961) ditampilkan pada Gambar 13, dengan variasi nilai sudut geser dalam (ϕ) dan rasio kedalaman penanaman (H/h).



Gambar 13. Variasi $F_1 + F_3$ berdasarkan teori Balla (1961)

Meyerhof & Adams (1968) mengusulkan hubungan semi teoritis untuk estimasi kapasitas tarik angkur strip, persegi panjang dan lingkaran. Prinsip dari teori ini ditunjukkan pada Gambar 14. Berdasarkan rasio antara kedalaman dan lebar angkur teori Meyerhof dan Adams membagi 2 jenis model keruntuhan yang terjadi, model keruntuhan tersebut dapat dilihat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14, mekanisme kegagalan tanah dapat diklasifikasikan menjadi dua model, yaitu model angkur dangkal dan model angkur dalam, yang ditentukan berdasarkan rasio penanaman H/h . Pada kondisi ini, H merupakan kedalaman penanaman kepala angkur, sedangkan h adalah panjang pelat angkur. Klasifikasi ini diperlukan karena garis-garis bidang slip yang berkembang dari tepi pelat angkur tidak mencapai permukaan tanah apabila angkur ditanam pada kedalaman yang melebihi rasio penanaman kritis $(H/h)_{cr}$. Apabila nilai H/h lebih kecil daripada $(H/h)_{cr}$, maka pola kegagalan tanah mengikuti model angkur dangkal. Sebaliknya apabila H/h sama

Dimana :

F_q = Faktor break out angkur dangkal

F_q^* = Faktor break out angkur dalam

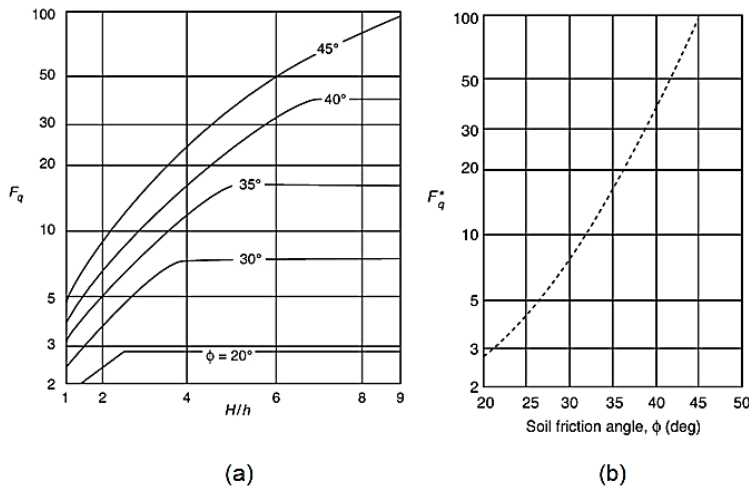
W_a = Berat angkur

p = Keliling angkur

γ = Berat isi tanah

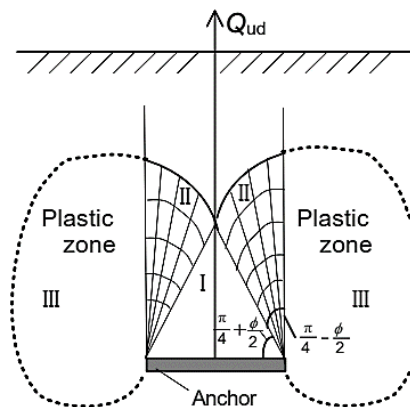
ϕ = Sudut geser dalam tanah

Besar nilai Faktor break out (F_q^*) pada angkur dalam dan (F_q) angkur dangkal diperlihatkan pada gambar grafik berikut ini.



Gambar 15. Variasi nilai faktor break out (F_q) oleh teori Meyerhof dan Adams
(a) F_q Angkur Dangkal (b) F_q^* Angkur Dalam

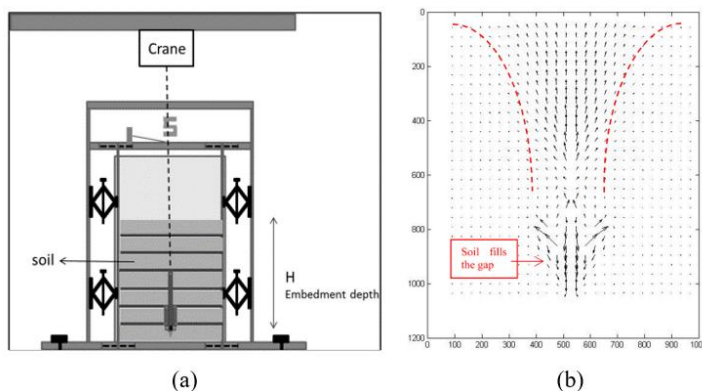
Tagaya et.al.,(1988) juga mengemukakan pola keruntuhan pada kasus angkur dalam, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16. Pada kasus angkur dalam, terjadi pola kegagalan tanah yang berbeda. Baji yang sangat terkompresi (wedge I) yang terbentuk di atas *anchor* mendorong zona geser radial (zona II) ke samping ke dalam zona plastik (zona III).



Gambar 16. Model keruntuhan yang diusulkan oleh Tagaya et.al.,(1988)

Beberapa penelitian sbelumnya juga berfokus pada mekanisme keruntuhan tanah pasir di sekitar angkur yang dilakukan di laboratorium dengan berbagai metode untuk memperoleh mekanisme keruntuhan angkur di sekitar angkur pada saat diberikan gaya tarik. Berikut ini adalah beberapa penelitian terkait dengan mekanisme keruntuhan tanah pasir di sekitar angkur.

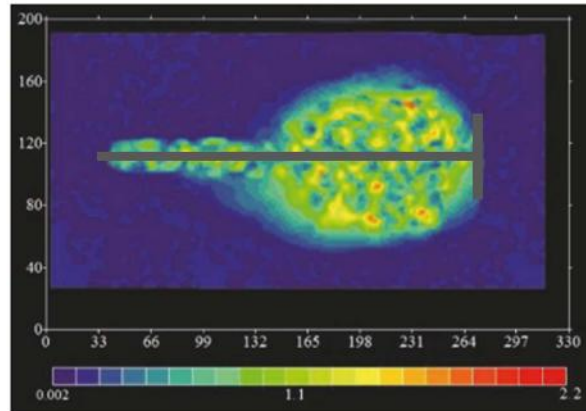
- (Sabermahani & Nasirabadi, 2020) mempresentasikan hasil investigasi eksperimental mengenai deformasi tanah di sekitar angkur plat yang baru diamati selama proses *uplift* pada pasir. Penelitian ini menggunakan teknik *Particle Image Velocimetry* (PIV) untuk memvisualisasikan pola perpindahan tanah di sekitar angkur (Gambar 17). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas tarik angkur dan zona deformasi pasir sangat dipengaruhi oleh kedalaman penanaman angkur. Pada angkur dangkal, zona deformasi pasir berbentuk kurva dan melintasi permukaan tanah, sedangkan pada angkur dalam, zona deformasi pasir berbentuk bulat dan membentang dari angkur hingga sekitar dua kali diameter angkur di atasnya. Pembatasan permukaan tanah meningkatkan kapasitas tarik angkur pada angkur dangkal hingga 37%, tetapi pada angkur dalam, perbedaan tersebut tidak signifikan.



Gambar 17. (a) Model pengujian kuat tarik angkur (b) Hasil analisa PIV pergeseran tanah di sekitar angkur oleh Sabermahani & Nasirabadi, (2020)

- Dalam penelitian (Ren et al., 2022) memperlihatkan hasil investigasi eksperimental mengenai deformasi tanah di sekitar angkur plat selama proses lateral loading pada pasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas tarik angkur dan zona deformasi pasir sangat dipengaruhi oleh kedalaman penanaman angkur. Pada angkur dangkal, zona deformasi pasir berbentuk kurva dan melintasi permukaan tanah, sedangkan pada angkur dalam, zona deformasi pasir berbentuk bulat dan membentang dari angkur hingga sekitar dua kali diameter angkur di atasnya. Perubahan kondisi permukaan tanah mempengaruhi perilaku angkur dangkal, tetapi tidak memiliki pengaruh yang signifikan pada angkur dalam.
- Dalam Penelitian yang dilakukan oleh (Zhang et al., 2022) memperlihatkan hasil investigasi eksperimental mengenai deformasi tanah di sekitar angkur

plat yang ditemukan selama proses lateral loading pada pasir. Penelitian ini menggunakan teknik *Particle Image Velocimetry* (PIV) (Gambar 18) untuk memvisualisasikan pola perpindahan tanah di sekitar angkur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas tarik angkur dan zona deformasi pasir sangat dipengaruhi oleh kedalaman penanaman angkur. Pada angkur dangkal, zona deformasi pasir berbentuk kurva dan melintasi permukaan tanah, sedangkan pada angkur dalam, zona deformasi pasir berbentuk bulat dan membentang dari angkur hingga sekitar dua kali diameter angkur di atasnya.



Gambar 18. Hasil analisa PIV pergeseran tanah di sekitar angkur pelat uji tarik horizontal, Zhang et al., (2022)

1.6.7 Trend dan Penelitian Terbaru Terkait Angkur Tanah

Beberapa penelitian terbaru mengenai angkur tanah baik yang membahas mengenai kuat tarik nagkur tanah, serta perilaku tanah pada saat beban tarik diberikan kepada angkur. Penelitian tersebut dilakukan dengan berbagai jenis angkur dan metode baik secara experimental, pendekatan elemen hingga, naupun model uji laboratorium dan lapangan. Berikut ini adalah beberapa penelitan terbaru yang terkait dengan penelitan yang sedang dilakukan.

Penelitian berjudul “*Experimental Study Of Pullout Capacity Of Start Plate Anchor*” oleh (Djamaluddin et al., 2020) bertujuan untuk menganalisis kapasitas cabut dari model angkur bentuk bintang yang merupakan modifikasi dari angkur pelat bentuk lingkaran masif. Penelitian ini dilakukan melalui serangkaian uji model di laboratorium dengan variasi jumlah daun dan kedalaman penanaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas cabut dipengaruhi oleh bentuk angkur, reduksi luasan, dan rasio kedalaman penanaman.

Penelitian berjudul “*Field Pull-Out Experiments Of Flip-Type Ground Anchors Driven In Ground Of Clay And Sand Layers*” oleh (Yoshida et al., 2021) bertujuan untuk menyelidiki mekanisme tarik dari angkur plat berbentuk flip yang sebenarnya, yang ditanam di tanah yang terdiri dari lapisan pasir di atas dan lapisan lempung di bawahnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa angkur di pasir memiliki gaya tarik yang lebih besar daripada angkur yang sesuai di lapisan lempung. Tekanan yang

bekerja pada angkur meningkat dengan berkurangnya area proyeksi plat angkur di lapisan pasir. Namun, di lapisan lempung, tekanan tetap sama tanpa memperhatikan area proyeksi plat angkur.

Penelitian berjudul "*Design of plate and screw anchors in dense sand: failure mechanism, capacity and deformation*" oleh Benjamin Cerfontaine, Jonathan Knappett, Michael Brown, dan Aaron Bradshaw (2021) membahas perilaku angkur plat dan angkur sekrup dalam pasir yang padat. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi mekanisme kegagalan, distribusi tegangan, dan kapasitas angkur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme kegagalan berbentuk kerucut dangkal dengan sudut kemiringan yang sama dengan sudut dilatasi pasir. Distribusi tegangan bervariasi secara non-linear dengan kedalaman karena deformabilitas tanah dan kegagalan progresif. Penelitian ini memberikan dasar untuk pengembangan kriteria desain baru dalam menentukan kapasitas angkur pada kondisi batas ultimat.

Studi "*Model Test of the Pull-up Capacity of Folding Type Ground Anchors in Cohesive Soil*" (Maming et al., 2022) bertujuan untuk mengembangkan model angkur lipat, yang merupakan modifikasi dari angkur berbentuk bintang, dan untuk menyelidiki kemampuan angkatnya pada tanah kohesif. Pengujian fisik dilakukan di laboratorium dan dalam skala penuh di lapangan, dengan temuan kapasitas angkat dibandingkan. Model anchor terdiri dari empat daun dengan lebar dan kedalaman yang bervariasi. Model ini fleksibel dan dapat dibuka dan ditutup seperti payung terbalik. Area efektif setiap anchor ditentukan dalam percobaan laboratorium dan lapangan. Hasil menunjukkan bahwa area setiap model anchor meningkat pada setiap kedalaman, mengakibatkan peningkatan beban angkat yang signifikan. Perubahan kedalaman tidak menghasilkan peningkatan beban angkat yang substansial. Ini menunjukkan bahwa model anchor tipe lipat tidak memerlukan desain yang rumit dan dapat dipasang di lapangan dengan alat dasar tanpa menggali atau mengebor tanah.

Penelitian "*Study on Pull-Up Behavior of Double Fold Anchor with Field Full Scale Test*" oleh Hendrawan et al., (2024) mengkaji kinerja double-fold anchor untuk meningkatkan kapasitas tarik (*pull-up capacity*) pada tanah kohesif atau lunak. Melalui *Cone Penetration Test* (CPT) dan uji tarik di tiga lokasi (Sungai Kariango, Sungai Maros, dan Sungai Cenranae), diperoleh kedalaman optimal pemasangan anchor masing-masing 3 m, 7 m, dan 3,6 m. Hasil pengujian menyimpulkan bahwa double-fold anchor efektif digunakan pada tanah lunak dengan kedalaman optimal yang ditentukan berdasarkan hasil CPT.

BAB II

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geoteknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sedangkan sampel tanah pasir yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari pantai Lakotong, Takalar (Gambar 19) dengan koordinat geografis ($5^{\circ}31'57.96''\text{S}$, $119^{\circ}26'10.15''\text{E}$). Waktu pelaksanaan penelitian ini direncanakan selama 3 bulan, mulai pada Maret–Juni 2025.

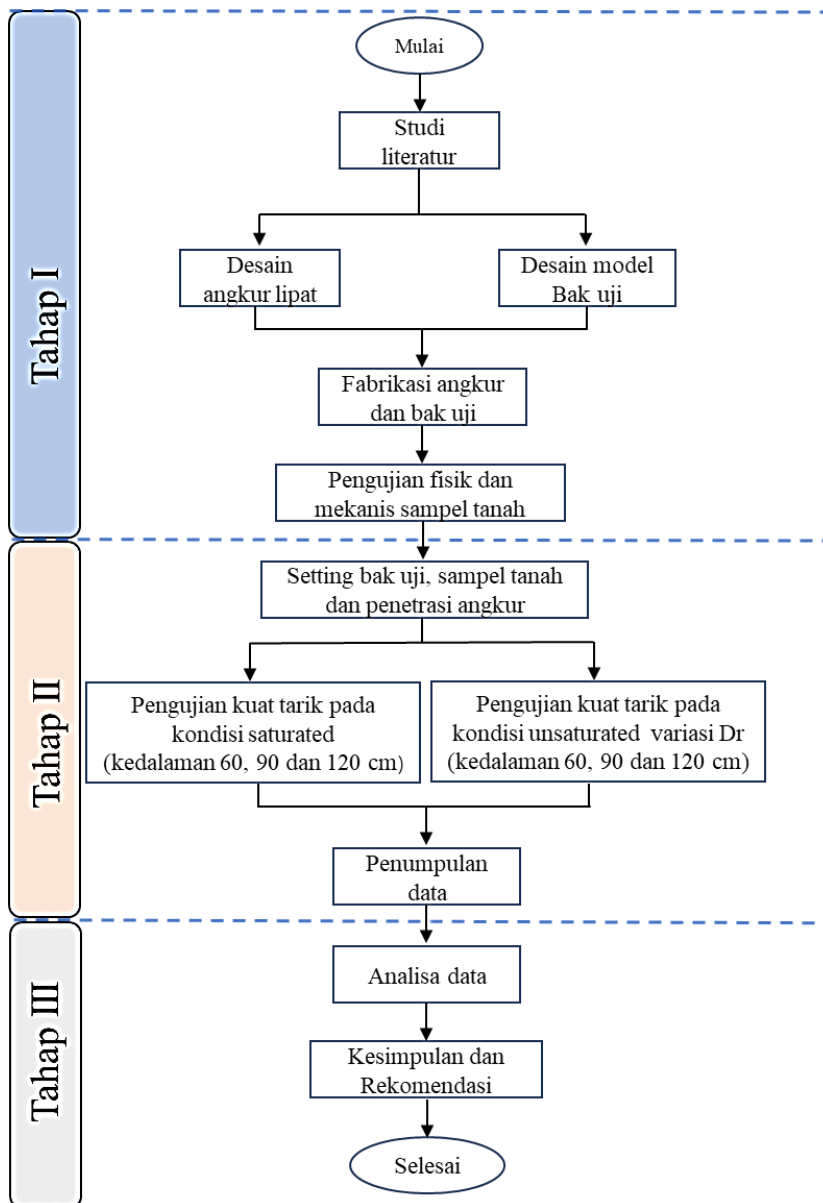


Gambar 19. Lokasi pengambilan sampel tanah pasir

2.2 Rancangan Alur Penelitian

Ada beberapa metode untuk mengevaluasi kekuatan tarik angkur tanah (ground anchor), diantaranya pendekatan teoretis, uji numerik, uji model, dan uji lapangan skala penuh. Dalam penelitian ini akan dilakukan uji lapangan skala laboratorium, untuk mengetahui kapasitas tarik angkur lipat ganda dengan variasi kerapatan relatif. Beberapa tahapan yang akan dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini sehingga dapat berjalan secara sistematis dan sesuai kaidah metode ilmiah.

Penyusunan rancangan penelitian ini dalam bentuk tahapan penelitian yang disusun berdasarkan kaidah penelitian untuk memberikan kesesuaian dan keteraturan dalam jalannya penelitian sehingga memberikan keakuratan data serta pelaksanaan metode yang terarah. Secara garis besar tahapan penelitian akan dibagi ke dalam 3 tahapan. Rancangan penelitian ini kemudian di ilustrasikan dalam bentuk bagan alir seperti pada Gambar 20 untuk mempermudah pemahaman dari proses maupun alur dari penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 20. Diagram alir penelitian

1. Tahap I (tahap persiapan)

- Studi Literatur, dilakukan sebagai landasan teori atau petunjuk untuk mendesain bentuk, model dan dimensi angkur tanah.
- Melakukan desain angkur. Desain angkur ini dilakukan dengan model 2D maupun 3D menggunakan software desain grafis. Penentuan bentuk, model, serta dimensi angkur untuk uji model mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya.

- Merancang model bak pengujian dan alat uji tarik serta alat ukur *displacement*.
 - Melakukan fabrikasi angkur dan bak pengujian beserta kelengkapannya.
 - Melakukan uji indeks properties sampel tanah yang meliputi kadar air, berat isi, analisa saringan dan uji kerapatan relatif serta uji mekanis sampel tanah pasir yang digunakan. Pengujian ini di dasarkan pada SNI dan ASTM.
2. Tahap II (tahap pengujian)
- Perakitan bak pengujian dan peralatannya.
 - Sampel tanah pasir dimasukkan ke dalam bak pengujian sesuai dengan kondisi tanah *unsaturated* dan *saturated* pada kondisi kerapatan yang di rencanakan.
 - Pengujian kuat tarik angkur dilakukan dengan menggunakan alat hidrolik (*pull out test*), pada tahap ini dilakukan pengamatan terhadap besarnya tahanan angkur tanah dan besarnya perpindahan angkur secara vertikal (*displacement*), serta pola pergerakan tanah di sekitar angkur pada saat penarikan.
3. Tahap III (tahap analisis dan pembahasan)
- Analisis dan penyajian data hasil pengujian
 - Kesimpulan dan rekomendasi

2.3 Rancangan Model Penelitian

2.3.1 Rancangan Model Angkur

a) Persiapan Model angkur

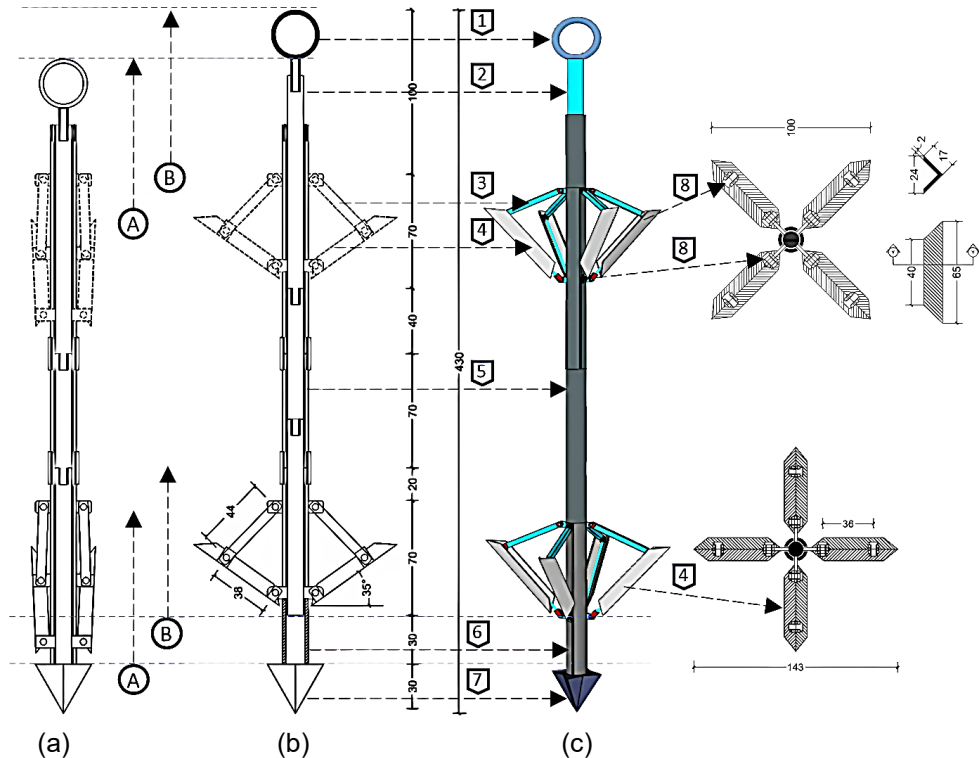
Salah satu tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah mendesain model angkur yang efektif dan efisien terutama pada masalah pengembangan angkur agar mudah mengetahui kinerja dari angkur.

b) Spesifikasi bahan komponen angkur

Proses pembuatan dan perakitan elemen angkur dilakukan dengan pemotongan dan pengelasan berbagai material penyusun angkur. Adapun spesifikasi dari material penyusun angkur sebagai berikut :

- Batang angkur (rod) terbuat dari baja pipa baja diameter 16 mm dengan ketebalan 2 mm, sedangkan rod dalam terbuat dari besi as diameter 12 mm.
- Sayap angkur, engsel dan penopang pada daun terbuat dari baja siku dengan mutu BJ 37 ketebalan 2 mm. Sayap angkur menggunakan baja profil siku pemilihan bentuk tersebut untuk menambah kekakuan pada sayap angkur sehingga tidak mudah bengkok pada saat dilakukan uji tarik
- Konus pada ujung angkur terbuat dari plat baja dengan mutu BJ 37 tebal 2 mm yang di rangkai sedemikian rupa hingga menyerupai ujung busur panah, dengan diameter luar sama dengan diameter luar sayap pada saat tertutup yang bertujuan melindungi sayap angkur dan membuat alur pada saat penetrasi.

Berikut ini adalah rancangan model angkur yang di usulkan.



Gambar 21. (a) daun angkur dalam posisi tertutup (b) daun angkur dalam posisi terbuka (c) gambar tiga dimensi angkur ganda tipe lipat

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

A : Kondisi sayap tertutup

B : Kondisi sayap terbuka

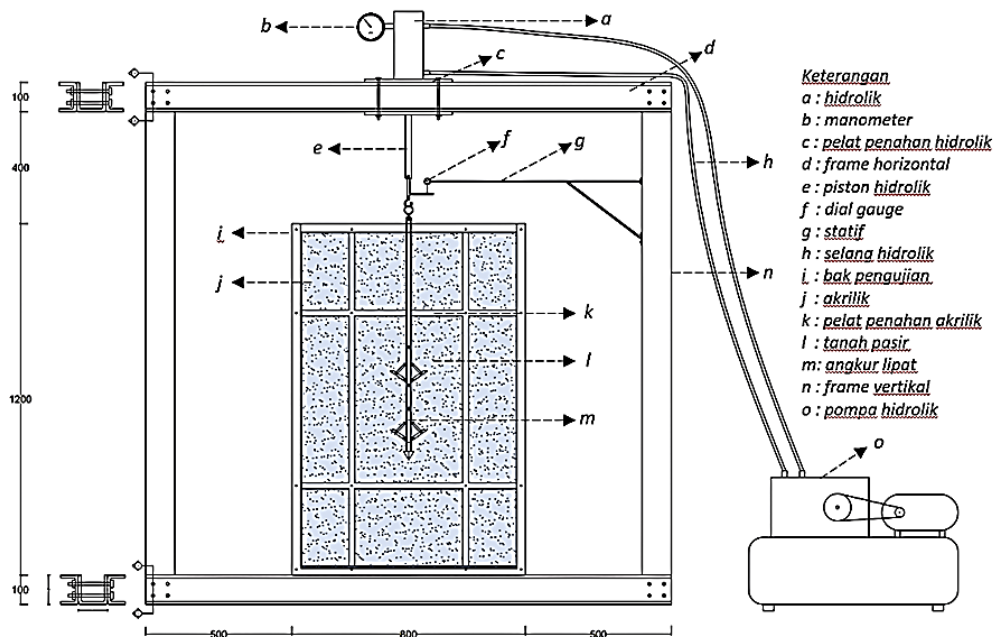
Catatan : satuan panjang adalah mm

Gambar 21(a) menunjukkan kondisi sayap angkur tertutup, Gambar 21(b) menunjukkan sayap angkur terbuka, Gambar 21(c) adalah gambar 3 dimensi angkur. Pada gambar 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.

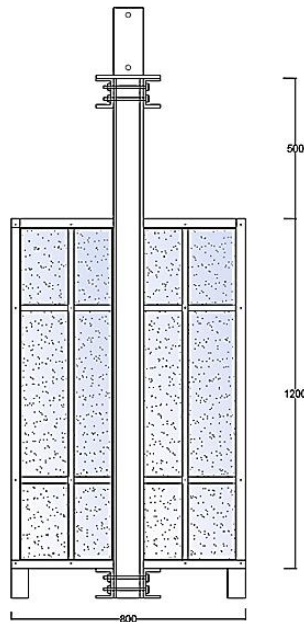
2.3.2 Model Bak dan Peralatan Uji

Pengujian dilakukan dengan memasukkan angkur ke dalam bak yang telah berisi pasir sesuai dengan kondisi yang direncanakan, kemudian dilakukan penetrasi angkur dan uji tarik angkur menggunakan alat hidrolik. Alat ukur uji tarik menggunakan manometer yang dipasang pada alat hidrolik sedangkan untuk mengukur besarnya displacement yang terjadi digunakan dial gauge/jangka sorong digital. Berikut ini adalah Gambar 22 dan Gambar 23 yang menunjukkan gambar tampak depan dan samping dari model pengujian



Gambar 22. Model detail pengujian tampak depan

Bak pengujian dibuat dengan ukuran 80x80x120 cm, dinding bak uji terbuat dari akrilik tebal 5 mm dengan tujuan agar dapat diamati pergerakan tanah pada saat uji tarik angkur. Dinding akrilik ini akan ditahan dengan baja pelat dengan tebal 3 mm agar tidak rusak pada saat tanah pasir dipadatkan. Pelat ini akan disambung menggunakan baut dan las. Frame horizontal dan vertikal sebagai penyangga terbuat dari baja profile U 100*50*5 mm.



Gambar 23. Model detail pengujian tampak samping

Peralatan pengujian yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan 1 set alat pompa hidrolik dan tabung hidrolik sebagai alat pendorong ataupun penarik angkur, dimana besarnya gaya tarik atau di ukur menggunakan manometer sedangkan perpindahan angkur pada saat pengujian tarik menggunakan *dial gauge*/jangka sorong digital. Pengambilan data dibantu dengan menggunakan kamera sebagai alat perekaman selama pengujian tarik angkur, kamera ini juga digunakan untuk mendokumentasikan pola keruntuhan tanah disekitar angkur.

2.3.3 Rancangan Model Pengujian

Sesuai dengan rumusan masalah maka pada penelitian ini akan dinjau 3 variabel yang mempengaruhi kapasitas angkur tanah yaitu rasio kedalaman penanaman, kondisi muka air tanah dan kerapatan relatif. Pada penelitian ini juga akan diamati tipe keruntuhan tanah disekitar angkur pada saat dilakukan uji tarik. Pada penelitian ini variasi kedalaman akan dilakukan pada 3 kedalaman yaitu 30 cm, 60 cm, dan 120 cm. Untuk kondisi kejenuhan tanah akan dilakukan pengujian tarik pada 2 kondisi yaitu pengujian tarik pada kondisi saturated dan kondisi unsaturated. Sedangkan untuk kepadatan relatif maka akan dilakukan 3 variasi yaitu pada saat kerapatan relatif dalam kondisi sangat lepas, lepas, dan kepadatan sedang. Berikut ini adalah Tabel 4 yang menunjukkan rencana dari penelitian yang diajukan.

Tabel 4. Rancangan variasi pengujian dilaboratorium

Kondisi kejenuhan tanah	Kerapatan relatif (Dr)	Kedalaman (cm)	Rasio Kedalaman (H/h)
Unsaturated	15% (sangat lepas)	60	4
		90	6
		120	8
	35% (Lepas)	60	4
		90	6
		120	8
	50% (Kepadatan sedang)	60	4
		90	6
		120	8
Saturated		60	4
		90	6
		120	8

Untuk mengamati tipe keruntuhan tanah di sekitar angkur pada saat pengujian tarik maka tanah pasir yang ada dalam bak pengujian akan diberikan warnah per 15 cm, pergerakan dari pasir berwarna ini dapat mewakili pergeseran pasir disekitar angkur pada saat dilakukan uji tarik.

2.4 Metode Pengujian Kerapatan Relatif Tanah Pasir

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 didefenisikan 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

$$\gamma_{dmaks} = \frac{W_{maks}}{V}; \gamma_{dmin} = \frac{W_{min}}{V} \quad (13)$$

Dimana :

γ_{dmaks} = Berat isi masimum

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 dibawah ini

Tabel 5. 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 selanjutnya akan digunakan untuk menghitung jumlah pasir yang dibuthkan tiap lapisan untuk memperoleh kerapatan relatif yang direncanakan.

2.5 Metode Perhitungan Kerapatan Relatif Dan Kebutuhan Tanah Pasir Berdasarkan Kerapatan Relatif

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

$$D_r = \frac{\gamma_{d,maks}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{d,min}}{\gamma_{d,maks} - \gamma_{d,min}} \quad (14)$$

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 6. 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	12.18	1.49	143.40
35	1.36		1.53	146.95
50	1.39		1.56	149.72

Dengan metode yang sama hal ini juga dilakukan untuk menentukan jumlah tanah berdasarkan kerapatan relatifnya pada *shear box* geser langsung untuk menentukan hubungan antara kerapatan relatif dengan sudut geser dalam. Penggunaan alat direct shear yang standar akan lebih sulit memvariasikan kerapatan relatif tanah pasir dikarenakan volume sampel yang sangat sedikit. Oleh karena itu dibutuhkan alat geser langsung yang telah dimodifikasi. Dalam penelitian ini digunakan alat geser langsung dengan dimensi *shear box* 30*30*12 cm. Dengan mengetahui volume *shear box* maka jumlah tanah untuk setiap kerapatan relatif dapat ditentukan.

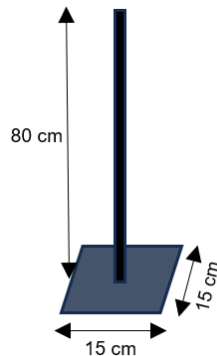


Gambar 24. Alat geser langsung yang telah di Modifikasi

2.6 Metode Pemadatan Tanah

Pemadatan tanah pada bak uji dilakukan dengan pemadatan secara mekanis dimana tanah yang telah ditimbang sesuai dengan kerapatan relatif yang direncanakan dimasukkan kedalam bak uji kemudian dipadatkan sampai pada

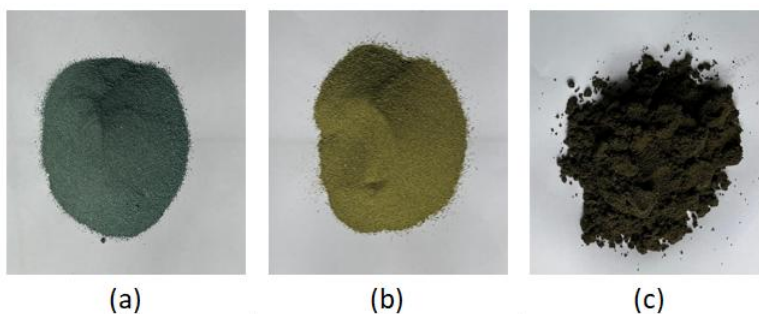
garis/batas yang telah dibuat diawal, pemadatan ini dilakukan dengan menggunakan pelat besi ukuran 15 x 15 cm dengan tebal pelat 1.5 cm (Gambar 25) yang di jatuhkan dari ketinggian tertentu sehingga tanah pasir memadat sampai pada kerapatan relatif yang direncanakan.



Gambar 25. Alat pemadatan

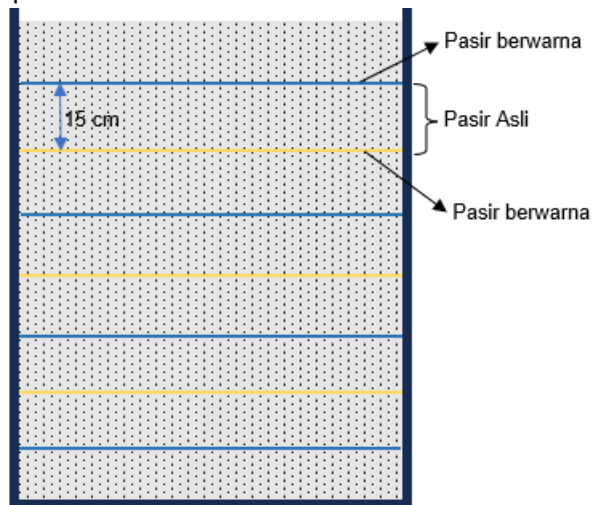
Proses pemadatan tanah pada pengujian ini dilakukan secara bertahap, di mana setiap tahap terdiri atas lapisan tanah dengan ketebalan 15 cm. Untuk mencapai kondisi kerapatan relatif yang mendekati padat, setiap lapisan tanah dipadatkan sebanyak dua kali. Pemadatan dilakukan secara konsisten dengan metode yang sama pada setiap lapisan, sehingga nilai kerapatan relatif yang dihasilkan dapat seragam dan sesuai dengan perencanaan awal. Hal ini penting untuk memastikan kondisi tanah dalam kotak uji berada pada keadaan yang terkendali dan representatif terhadap kondisi lapangan.

Selain itu, pada setiap lapisan diletakkan pasir berwarna dengan ketebalan sekitar $\pm 0,5$ –1 cm. Pemberian lapisan pasir berwarna ini berfungsi sebagai penanda visual yang memudahkan proses analisis pergerakan tanah di sekitar angkur selama tahap pengujian penarikan. Dengan adanya lapisan penanda ini, pola deformasi tanah dapat diamati dengan lebih jelas, sehingga interpretasi perilaku tanah selama proses pembebanan menjadi lebih akurat. Gambar visual dari pasir berwarna dapat dilihat pada Gambar 26.



Gambar 26. (a) Pasir berwarna kebiruan, (b) Pasir berwarna kekuningan (c) Pasir Asli

Pasir berwarna ini merupakan pasir asli dalam kondisi kering kemudian di beri pewarna cat biru dan kuning selanjutnya dikeringkan kembali dan disaring menggunakan saringan No.20. Pasir berwarna ini akan di letakan secara bergantian pada tiap lapisan seperti pada ilustrasi Gambar 27.



Gambar 27. Ilustrasi penempatan pasir berwarna pada tiap lapisan

Sebelum menempatkan pasir berwarna pada setiap lapisan harus memastikan bahwa kondisinya sudah benar-benar rata (tidak bergelombang) sehingga pada saat pergerakan pasir benar-benar akibat dari pengaruh pergerakan angkur pada saat pengujian penarikan.

2.7 Metode Validasi Kerapatan Relatif Tanah Pasir

Sebelum melakukan uji tarik salah satu hal yang perlu dilakukan adalah melakukan pengecekan atau validasi terhadap kerapatan relatif tanah pasir yang telah di padatkan 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. Alat hand cone penetrometer dapat dilihat pada Gambar 28.



Gambar 28. Gambar alat hand cone penetrometer test

Dari nilai resistansi penetrasi kerucut yang diperoleh, Kerapatan relatif endapan pasir pada kedalaman yang berbeda diperkirakan menggunakan persamaan di bawah ini yang diusulkan oleh Jamiolkowski, Lo Presti, dan Manassero (2003).

$$D_R = 100 \left[0.268 \times \ln \left(\frac{q_t / \sigma_{atm}}{\sqrt{\sigma'_{vo} / \sigma_{atm}}} \right) - 0.675 \right] \quad (15)$$

Dari persamaan diatas dapat diuraikan perhitungan seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini

Tabel 7. Contoh perhtiungan 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 conus (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 Metode Pengujian dan Analisa Data

2.8.1 Pengujian Sifat Fisis Dan Mekanis Sampel Tanah

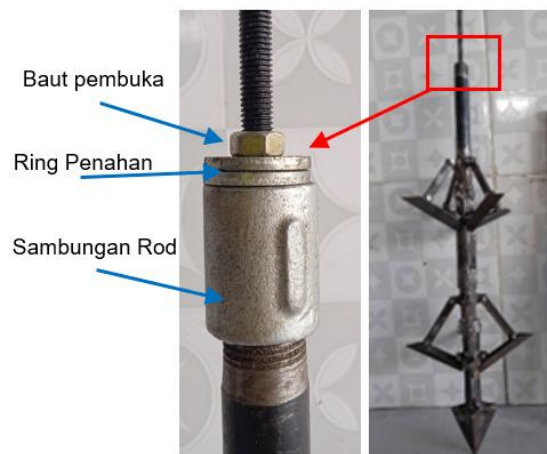
Sampel tanah pasir yang telah dipersiapkan selanjutnya akan dilakukan pengujian terhadap sifat fisis dan sifat mekanis berdasarkan standar yang berlaku. Berikut ini adalah jenis pengujian yang akan dilakukan dan standar pengujian yang akan dipakai seperti yang ditunjukkan pada tabel 8.

Tabel 8. Standar pengujian indeks properties dan mechanical tanah

No	Jenis Pengujian	Jenis Standard	
		STM	SNI
1	Analisa Saringan	C-136-06	SNI 03-1968-1990
2	Berat Jenis Tanah (G_s)	D-162	SNI 03-1964-1990
3	Berat Isi Tanah Jenuh (γ_{sat})	D-2216-98	SNI 03-1743-1989
4	Kadar Air (W_c)	D-2216-98	SNI 03-1965-1990
5	Berat Isi Kering (γ_{dry})	D-854-72	SNI 03-1970-2008
6	Angka Pori (e)	D-854-72	SNI 03-2473-1991
7	Porositas (n)	D-7063-11	SNI 13-3604-1994
9	Geser langsung	D5607-02	SNI 2824:2011
10	Kerapatan relatif	D4254-16	-

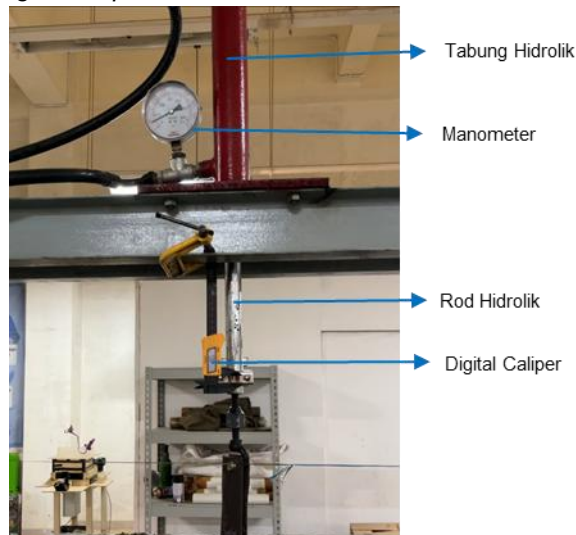
2.8.2 Pelaksanaan Penetrasi dan Pengujian Kuat Tarik Angkur

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 29.** 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

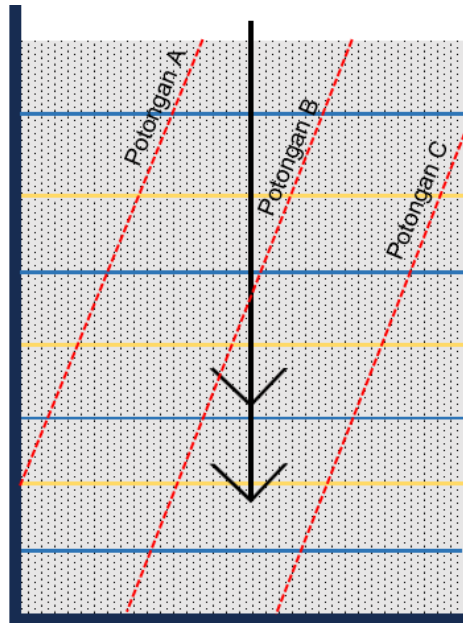
menggunakan manometer sedangkan alat untuk mengukur perpindahan angkur menggunakan alat *digital caliper*.



Gambar 30. Alat ukur uji tarik angkur

2.8.3 Metode Pengamatan Pola Keruntuhan di Sekitar Angkur

Salah satu tujuan penting pada penelitian ini adalah mengamati dan menganalisa model keruntuhan tanah pasir pada saat beban tarik mencapai beban puncak. Beberapa metode telah dikembangkan untuk melihat dan mendeskripsikan pola keruntuhan yang terjadi disekitar angkur. Penelitian ini akan mencoba melihat secara langsung pola keruntuhan disekitar angkur dengan mengamati lapisan pasir berwarna diantara pasir asli kemudian menghubungkannya menjadi 1 garis keruntuhan. Perpindahan pasir berwarna tersebut dapat dilihat secara langsung dengan memotong tanah dalam bak uji menjadi 3 bagian yaitu pada bagian luar, bagian tengah dan bagian belakang angkur, Ilustrasi posisi pemotongan tanah pasir didalam bak dapat dilihat pada Gambar 31. Sebelum pengamatan pola keruntuhan pasir disekitar angkur maka salah satu sisi dari bak uji harus di buka. Pemotongan pasir pada bak uji di potong dengan kemiringan tertentu agar tanah pasir tidak runtuh pada saat pengamatan.



Gambar 31. Ilustrasi posisi pemotongan pasir dalam bak uji

2.9 Analisis Pola Keruntuhan Tanah Pasir Disekitar Angkur

Pola keruntuhan tanah pasir disekitar angkur akan di analisa berdasarkan pola keruntuhan yang telah di kemukakan oleh parah ahli maupun oleh para peneliti sebelumnya. Beberapa teori telah dikemukakan oleh beberapa ahli dan peneliti sebelumnya seperti model keruntuhan berbentuk kerucut, silinder dan membentuk garis lengkung seperti telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Pola keruntuhan tanah pasir disekitar akan dianalisa untuk menentukan kuat tarik ultimit angkur secara teoritis.