

2 LANDASAN TEORI

2.1 *Basement*

Basement merupakan solusi penambahan lantai kembali pada bagian paling bawah sebuah gedung, yang terletak di bawah permukaan tanah dari desain bangunan gedung yang memiliki tingkat penyediaan ruang yang tinggi namun tidak memiliki cukup lahan kosong baik di sekitar gedung maupun menambah lantai lagi di atas gedung tersebut.

Basement adalah sebuah tingkat atau beberapa tingkat dari bangunan yang keseluruhan atau sebagian terletak di bawah tanah. Adanya *basement* tentunya akan ada penggalian tanah. *Basement* merupakan langkah awal berdirinya sebuah gedung tinggi. Kendala yang dihadapi pada pekerjaan *basement* adalah faktor keamanan serta deformasi yang akan terjadi pada dinding penahan tanah *basement*.

2.2 Tanah

Tanah merupakan kumpulan mineral, bahan organik dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*) terletak di atas lapisan batuan dasar (*bedrock*) yang terbentuk dari batuan yang mengalami pelapukan secara fisik maupun kimia. Pelapukan secara fisik umumnya terjadi akibat faktor erosi, angin, es dan aktivitas manusia, sementara pelapukan kimia disebabkan oleh pengaruh oksigen, karbon dioksida, air (yang bersifat asam atau alkali) serta reaksi kimia lainnya. jika hasil pelapukan tetap berada pada lokasi asalnya, tanah ini dapat disebut dengan tanah residual (*residual soil*) dan jika tanah mengalami perpindahan dapat disebut sebagai tanah terangkut (*transported soil*) (Hardiyatmo, 2018).

Tanah merupakan elemen yang tidak dapat dipisahkan dalam perencanaan konstruksi teknik sipil. Tanah memiliki karakteristik yang sangat beragam untuk setiap jenis tanah yang berbeda, sehingga membutuhkan metode penanganan yang berbeda, baik melalui proses mekanis maupun kimia (Landangkasiang dkk., 2020). Sebagai dasar bagi suatu konstruksi, tanah harus mampu menahan beban yang diberikan karena tanah berperan sebagai penopang utama dalam mendistribusikan dan menahan beban tersebut (Carolyn dkk., 2021).

2.3 Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah dirancang untuk menilai kesesuaian tanah yang digunakan serta menyampaikan informasi mengenai kondisi tanah dari suatu wilayah ke wilayah lainnya dalam bentuk berupa tanah dasar. Selain itu, klasifikasi tanah juga bermanfaat bagi studi yang lebih terperinci mengenai karakteristik tanah serta menentukan kebutuhan pengujian guna memahami sifat teknis tanah, seperti tingkat pemadatan, kekuatan, berat isi, dan parameter tanah lainnya (Bowles dalam Carolin dkk., 2021).

Umumnya kebanyakan jenis tanah terdiri dari beberapa campuran tanah atau lebih dari satu macam ukuran partikel tanah. Tanah lempung tidak selalu hanya terdiri dari partikel lempung, tetapi dapat mengandung campuran butiran berukuran lanau atau pasir serta kemungkinan adanya bahan organik (Hardiyatmo, 2018). Batas-batas interval ukuran partikel butiran tanah ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Klasifikasi Butiran Tanah Menurut USCS, MIT, AASHTO, USDA dan ASTM

| Klasifikasi Tanah Menurut | Ukuran Butiran (mm) | | | |
|--|---------------------|--------------|-----------------------|---------------|
| | Kerikil | Pasir | Lanau | Lempung |
| USCS (<i>Unified Soil Classification System</i>) | 75 – 4,75 | 4,75 – 0,075 | Butiran halus < 0,075 | |
| MIT (<i>Massachusetts Institute of Technology</i>) | 60 – 2 | 2 – 0,06 | 0,06 – 0,002 | < 0,002 |
| AASHTO (<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>) | 75 – 2 | 2 – 0,075 | 0,075 – 0,005 | 0,005 – 0,001 |
| USDA (<i>United State Departement of Agriculture</i>) | 75 – 2 | 2 – 0,05 | 0,05 – 0,002 | < 0,002 |
| ASTM (<i>American Society for Testing and Materials</i>) | 75 – 4,75 | 4,75 – 0,075 | 0,075 – 0,005 | 0,005 – 0,001 |

Sumber: (Hardiyatmo, 2018)

Umumnya pada praktik, klasifikasi tanah yang sering atau lebih banyak digunakan yaitu klasifikasi tanah USCS (*Unified Soil Classification System*) dan AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*).

2.3.1 Klasifikasi Tanah Menurut USCS

Klasifikasi tanah USCS pertama kali diajukan oleh Casagrande tahun 1984 kemudian selanjutnya dikembangkan oleh USBR (*United State Bureau of Reclamation*) dan USACE (*United State Army Corps of Engineer*). Sistem USCS mengklasifikasikan tanah menjadi dua jenis. Klasifikasi tanah berdasarkan USCS dapat dilihat pada Gambar 2.1.

1. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained soils*), yang terdiri atas kerikil (*gravel*) dan pasir (*sand*) yang mana $< 50\%$ tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} < 50$). Simbol kelompok ini adalah G untuk kerikil atau tanah berkerikil dan S untuk pasir atau tanah berpasir.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained soil*), yang terdiri dari $> 50\%$ tanah yang lolos saringan No. 200 ($F_{200} > 50$). Simbol kelompok ini adalah M untuk lanau inorganik, O untuk lanau dan lempung organik serta Pt untuk gambut dan tanah dengan kandungan organik tinggi.

| COARSE-GRAINED SOILS (more than 50% of material is larger than No. 200 sieve size.) | | | FINE-GRAINED SOILS (50% or more of material is smaller than No. 200 sieve size.) | | |
|--|---|---|---|---|--|
| GRAVELS More than 50% of coarse fraction larger than No. 4 sieve size | Clean Gravels (Less than 5% fines) | | SILTS AND CLAYS Liquid limit less than 50% | ML | Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty of clayey fine sands or clayey silts with slight plasticity |
| | GW | Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines | | CL | Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays |
| | GP | Poorly-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines | | OL | Organic silts and organic silty clays of low plasticity |
| | Gravels with fines (More than 12% fines) | | | | |
| | GM | Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures | SILTS AND CLAYS Liquid limit 50% or greater | MH | Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts |
| GC | Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures | CH | | Inorganic clays of high plasticity, fat clays | |
| SANDS 50% or more of coarse fraction smaller than No. 4 sieve size | Clean Sands (Less than 5% fines) | | | OH | Organic clays of medium to high plasticity, organic silts |
| | SW | Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines | | HIGHLY ORGANIC SOILS | PT |
| | SP | Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines | | | |
| | Sands with fines (More than 12% fines) | | | | |
| | SM | Silty sands, sand-silt mixtures | | | |
| SC | Clayey sands, sand-clay mixtures | | | | |

Gambar 2.1 Klasifikasi Tanah Berdasarkan USCS

Simbol huruf yang tertera pada Gambar 2.1 merupakan pengklasifikasian tanah yang dapat didefinisikan sebagai berikut.

- G = Kerikil (*Gravel*)
 S = Pasir (*Sand*)
 C = Lempung (*Clay*)
 M = Lanau (*Silt*)

- O = Lanau atau lempung organik
 Pt = Tanah gambut dan tanah organik
 W = Tanah dengan gradasi baik
 P = Tanah dengan gradasi buruk
 H = Tanah dengan plastisitas tinggi
 L = Tanah dengan plastisitas rendah

2.3.2 Klasifikasi Tanah Menurut AASHTO

Sistem AASHTO membagi klasifikasi tanah menjadi tujuh kelompok. Tujuh kelompok tanah pada sistem AASHTO yaitu A-1 hingga A-7. Tanah A-1, A-2 dan A-3 merupakan tanah berbutir yang bersifat kepasiran tetapi masih mengandung lanau dan lempung dengan < 35% butiran lolos saringan No. 200. Sedangkan tanah A-4, A-5, A-6 dan A-7 merupakan tanah lempung dan lanau yang mana > 35% butirannya lolos saringan No. 200. Klasifikasi AASHTO didasari oleh ukuran butiran tanah serta batas plastisitasnya (Das, 1995).

Klasifikasi tanah berdasarkan AASHTO dari A-1 hingga A-7 dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sistem Klasifikasi Tanah Berdasarkan AASHTO

| General Classification | Granular Materials (35 % or less passing 0,075 mm sieve) | | | | | | | Silty-Clay Materials (>35% passing 0,075 sieve) | | | |
|----------------------------|--|--------|------------|---------------------------------|--------|--------|--------|---|--------|-------------|--------|
| Group Classification | A-1 | | A3 | A-2 | | | | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 |
| | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 | | | | A-7-5 |
| | | | | | | | | | | | A-7-6 |
| Leve analysis, % passing: | | | | | | | | | | | |
| 2 mm | 50 max | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 0,0425 mm | 30 max | 50 max | 51 max | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 0,075 mm | 10 max | 25 max | 10 max | 35 max | 35 max | 35 max | 35 max | 36 min | 36 min | 36 min | 36 min |
| Fraction passing 0,425 mm: | | | | | | | | | | | |
| Liquid Limit | - | | No Plastic | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min |
| Plasticity Index | 6 max | | | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min |
| Usual types of significant | Stine fragments, gravel, sand | | Fine sand | Silty or clayey gravel and sand | | | | Silty Soil | | Clayey Soil | |

| General Classification | Granular Materials (35 % or less passing 0,075 mm sieve) | | | Silty-Clay Materials (>35% passing 0,075 sieve) | |
|-------------------------------------|---|--|--|---|--|
| <i>constituents</i> | | | | | |
| <i>General rating as a subgrade</i> | <i>Excellent to good</i> | | | <i>Fair to poor</i> | |

* Plasticity index of A-7-5 subgroup is equal to or less than liquid limit – 30.

* Plasticity index of A-7-6 subgroup is greater than liquid limit – 30.

Sumber: (Hardiyatmo, 2018)

2.4 Parameter Tanah

Parameter tanah adalah ukuran atau acuan untuk mengetahui atau menilai hasil suatu proses perubahan yang terjadi dalam tanah baik dari sifat fisik dan jenis tanah. Karena sifat-sifat tersebut maka penting dilakukan penyelidikan tanah (*soil investigation*). Dari uji lapangan yang didapatkan parameter-parameter tanah yang dapat digunakan untuk analisis maupun desain. Data yang didapat dari uji lapangan harus dievaluasi terlebih dahulu untuk memperoleh hasil interpretasi yang baik.

2.4.1 Kohesi (C_u) dan Sudut Geser (ϕ)

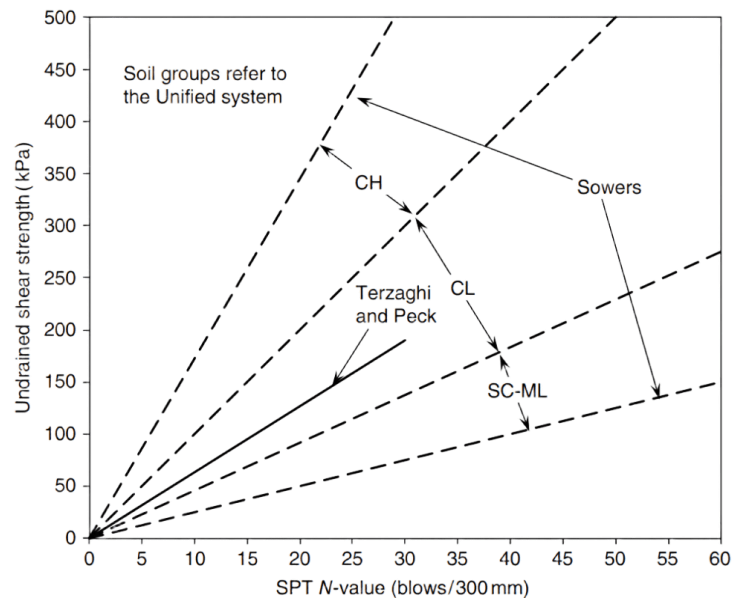
Kohesi (C_u) adalah gaya tarik antar partikel tanah. Kohesi merupakan parameter kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah dalam hal ini berupa gerakan lateral tanah. Korelasi kohesi berdasarkan tabel dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Nilai Korelasi Kohesi (C_u)

| Consistency | N | C_u (kN/m²) |
|--------------------|----------|--|
| <i>Very soft</i> | 0 – 2 | <12 |
| <i>Soft</i> | 2 – 4 | 12 – 25 |
| <i>Medium</i> | 4 – 8 | 25 – 50 |
| <i>Stiff</i> | 8 – 15 | 50 – 100 |
| <i>Very Stiff</i> | 15 – 30 | 100 – 200 |
| <i>Hard</i> | >30 | >200 |

Sumber: (Terzaghi dkk., 1996)

Adapun melalui grafik pendekatan Terzaghi & Peck, 1996 (Bowles, 1988) nilai C_u laboratorium dengan nilai N-SPT. Nilai C_u nantinya didapatkan dari nilai rentang 5N – 6,5 N untuk grafik Terzaghi. Grafik pendekatan C_u laboratorium dengan N-SPT dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik Korelasi Nilai C_u dengan N-SPT

Sudut geser dalam yang tinggi biasanya diperoleh dari pasir padat, tetapi secara umum makin halus butiran dan makin padat susunan butirannya akan meningkatkan sudut geser dalam. Sedangkan kohesi memiliki dimensi yang sama dengan tegangan. Nilai sudut geser dapat diketahui berdasarkan tabel yang dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai Korelasi Sudut Geser

| <i>State of Packing</i> | N-SPT | ϕ (degrees) |
|-------------------------|--------------|------------------------------------|
| <i>Very Loose</i> | <4 | <30 ° |
| <i>Loose</i> | 4 – 10 | 30 – 35 ° |
| <i>Medium Dense</i> | 10 – 30 | 35 – 40 ° |
| <i>Dense</i> | 30 – 50 | 40 – 45 ° |
| <i>Very Dense</i> | >50 | > 45 ° |

Sumber: (Meyerhof, 1956)

2.4.2 Berat Isi Tanah Normal (γ) dan Berat Isi Tanah Tersaturasi (γ_{sat})

Berat isi tanah merupakan perbandingan antara berat tanah dengan volume tanah. Tujuan dari pengujian berat isi tanah adalah untuk mengetahui kepadatan suatu tanah baik dalam kondisi normal maupun tersaturasi. Berat isi tanah dapat diketahui berdasarkan hasil uji laboratorium atau menggunakan korelasi berdasarkan tabel. Korelasi berat isi tanah dengan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Berat Isi Tanah (γ) dan Berat Isi Tanah Tersaturasi (γ_{sat})

| | | Bulk unit weight (kN/m^3) | | Saturated unit weight (kN/m^3) | |
|----------------------|-----------------------------------|---|--------------|--|--------------|
| | | Loose | Dense | Loose | Dense |
| <i>Granular soil</i> | <i>Gravel</i> | 16.0 | 18.0 | 20.0 | 21.0 |
| | <i>Well grade sand and gravel</i> | 19.0 | 21.0 | 21.5 | 23.0 |
| | <i>Coarse and medium sand</i> | 16.5 | 18.5 | 20.0 | 21.5 |
| | <i>Well graded sand</i> | 18.0 | 21.0 | 20.5 | 22.5 |
| | <i>Fine or silty sand</i> | 17.0 | 19.0 | 20.0 | 21.5 |
| | <i>Rock fill</i> | 15.0 | 17.5 | 19.5 | 21.5 |
| | <i>Brick hardcore</i> | 13.0 | 17.5 | 16.5 | 19.0 |
| | <i>Slag fill</i> | 12.0 | 15.0 | 18.0 | 20.0 |
| | <i>Ash fill</i> | 6.5 | 10.0 | 13.0 | 15.0 |
| <i>Cohesive Soil</i> | <i>Peat (high variability)</i> | 12.0 | | 12.0 | |
| | <i>Organic clay</i> | 15.0 | | 15.0 | |
| | <i>Soft clay</i> | 17.0 | | 17.0 | |
| | <i>Firm clay</i> | 18.0 | | 18.0 | |
| | <i>Stiff clay</i> | 19.0 | | 19.0 | |
| | <i>Hard clay</i> | 20.0 | | 20.0 | |
| | <i>Stiff or hard glacial clay</i> | 21.0 | | 21.0 | |

Sumber: (Ameratunga dkk., t.t.)

2.4.3 Kohesi Efektif (c') dan Sudut Geser Efektif (ϕ')

Kohesi efektif (c') merupakan parameter yang mengukur kekuatan tanah dari efek tekanan air dalam tanah. Sedangkan sudut geser efektif (ϕ') adalah sudut kemiringan bidang geser maksimum pada saat tekanan air di dalam tanah diambil

ke dalam pertimbangan. Sudut geser efektif bergantung pada kohesi efektif dan kekuatan geser efektif antar partikel tanah. Nilai kohesi efektif dan sudut geser efektif bisa didapat dari korelasi berdasarkan tabel yang dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Nilai Kohesi Efektif (c') dan Sudut Geser Efektif (ϕ')

| Soil group | Typical soils in group | Soil Parameters | |
|-------------------|--|----------------------------------|---|
| | | c' (kPa) | ϕ' (degrees) |
| <i>Poor</i> | <i>Soft and firm clay of medium to high plasticity; silty clays; loose variable clayey fills; loose sandy silt</i> | 0 – 5 | 17 – 25 |
| <i>Average</i> | <i>Stiff sandy clays; gravelly clays; compact clayey sands and sandy silt; compacted clay fills</i> | 0 – 10 | 26 – 32 |
| <i>Good</i> | <i>Gravelly sands, compacted sands, controlled crushed sandstone and graveled fills, dense well graded sands</i> | 0 – 5 | 32 – 37 |
| <i>Very good</i> | <i>Weak weathered rock, controlled fills of road base, gravel and recycled concrete</i> | 0 – 25 | 36 – 43 |

Sumber: (Ameratunga dkk., t.t.)

2.4.4 Sudut Dilatansi (ψ)

Sudut dilatansi (ψ) adalah sudut yang dibentuk bidang horizontal dengan arah pengembangan butiran pada saat butiran menerima tegangan deviatorik. Tanah lempung normal konsolidasi tidak memiliki sudut dilatasi, tetapi pada tanah pasir, besar sudut ini tergantung pada kepadatan (D_r) dan sudut geser dalamnya yang dinyatakan dengan persamaan $\psi = \phi - 30^\circ$.

2.4.5 Poisson Ratio (μ)

Poisson's ratio adalah perbandingan regangan lateral dengan regangan aksial yang berguna untuk menghubungkan besar modulus elastisitas (E) dengan modulus geser (G_0) dengan persamaan $E = 2(1-\nu)G$. Nilai *poisson's ratio* berkisar antara 0,3 sampai dengan 0,5 dan penggunaan angka *poisson* pada program aplikasi berbasis elemen hingga disarankan 0,35. Korelasi angka poisson dengan jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.7.

Tabel 2.7 Angka *Poisson* (μ)

| Material | Angka <i>Poisson</i> (μ) |
|------------------------------------|--------------------------------|
| Lempung jenuh (<i>undrained</i>) | 0.5 |
| Lempung jenuh (<i>drained</i>) | 0.2 – 0.4 |
| Pasir rapat | 0.3 – 0.4 |
| Pasir lepas | 0.1 – 0.3 |
| Loess | 0.1 – 0.3 |
| Es | 0.36 |
| Alumunium | 0.35 |
| Baja | 0.29 |
| Beton | 0.15 |

Sumber: (Ameratunga dkk., 2016)

2.4.6 Angka Pori (e)

Angka pori (e) merupakan perbandingan volume rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s) dan biasanya dinyatakan dalam bilangan desimal. Nilai angka pori dapat diperoleh dari hasil uji laboratorium atau dapat diperoleh dari korelasi berdasarkan tabel yang dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Nilai Angka Pori (e)

| Type of Soil | Void Ratio (e) | Natural Moisture Content in a saturated state (%) | Dry Uniy Weight (γ_{dry}) |
|---|----------------|---|------------------------------------|
| | | | kN/m ³ |
| <i>Loose uniform sand</i> | 0.8 | 30 | 14.5 |
| <i>Danse uniform sand</i> | 0.45 | 16 | 18 |
| <i>Loose angular – grained silty sand</i> | 0.65 | 25 | 16 |
| <i>Dense angular – grained silty sand</i> | 0.4 | 15 | 19 |
| <i>Stiff clay</i> | 0.6 | 21 | 17 |
| <i>Soft clay</i> | 0.9 – 1.4 | 30 – 50 | 11.5 – 14.5 |
| <i>Loess</i> | 0.9 | 25 | 13.5 |
| <i>Soft organic clay</i> | 2.5 – 3.2 | 90 – 120 | 6 – 8 |
| <i>Glacial till</i> | 0.3 | 10 | 21 |

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

2.4.7 Overconsolidation Ratio (OCR)

Overconsolidation Ratio (OCR) merupakan parameter tanah yang berkaitan dengan riwayat tegangan tanah lempung. OCR dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan efektif vertikal maksimum yang pernah dialami

tanah (*preconsolidation pressure*) dengan tegangan efektif vertikal tanah saat ini (Terzaghi dkk., 1996). Secara sistematis, nilai OCR dapat dituliskan sebagai rumus berikut.

$$OCR = \frac{\text{maximum past effective pressure}}{\text{current effective vertical stress}} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} \quad (2.1)$$

Nilai tegangan efektif vertikal maksimum yang pernah dialami tanah (σ'_p) didapat dari data hasil uji laboratorium. Sedangkan untuk nilai tegangan efektif vertikal tanah saat ini (σ'_v) dapat dihitung menggunakan rumus berdasarkan tahap berikut.

1. Tekanan Total Vertikal Saat Ini (σ_{v0}).

$$\sigma_{v0} = z \times \gamma \quad (2.2)$$

dimana,

z = kedalaman titik tinjau (m)

γ = berat isi tanah pada lapisan titik tinjau (kN/m^3)

2. Tekanan Air Pori (u).

$$u = \gamma_w \times h \quad (2.3)$$

dimana,

γ_w = berat jenis air = $9,807 \text{ kN/m}^3$

h = kedalaman MAT ke titik tinjau (m)

3. Tegangan Vertikal Efektif Saat Ini (σ'_v).

$$\sigma'_v = \sigma_{v0} - u \quad (2.4)$$

dimana,

σ_{v0} = tekanan total vertikal saat ini (kPa)

u = tekanan air pori (kPa)

Nilai OCR yang dihasilkan dapat memberikan gambaran mengenai konsolidasi tanah atau riwayat tegangan (*stress history*) pada tanah (Meyerhof, 1956) dengan ketentuan:

1. Jika $OCR = 1$, maka tanah berada dalam kondisi *normally consolidated* (NC), artinya tegangan sekarang sama dengan tegangan terbesar yang pernah terjadi atau dialami.
2. Jika $OCR > 1$, maka tanah dalam kondisi *overconsolidated* (OC), tanah pernah mengalami beban yang lebih besar di masa lalu dibanding kondisi sekarang.
3. Jika $OCR < 1$, maka tanah berada dalam kondisi *underconsolidation* (UC), biasanya akibat tanah masih dalam proses konsolidasi.

Nilai OCR memiliki pengaruh besar terhadap perilaku tanah, khususnya sifat kompresibilitas, kekuatan geser, dan modulus elastisitas. Tanah yang *overconsolidated* umumnya lebih kaku, mengalami deformasi yang lebih kecil, serta memiliki kekuatan geser yang lebih tinggi dibandingkan tanah dengan kondisi *normally consolidated* (Das, 1995).

2.4.8 Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas sebagai modulus kekakuan dasar dalam model elastis dan model Mohr-Coulomb. Nilai dari parameter kekakuan yang digunakan dalam suatu perhitungan memerlukan perhatian khusus karena kebanyakan material tanah menunjukkan perilaku yang non-linier dari awal pembebanan. Korelasi nilai modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 2.9.

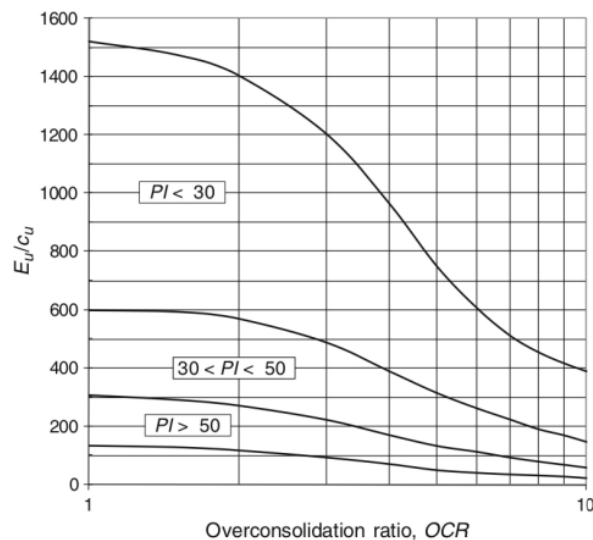
Tabel 2.9 Modulus Elastisitas Tanah (E)

| <i>Type</i> | <i>Strength of soil</i> | <i>Elastic Modulus (Mpa)</i> | |
|------------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------|
| | | <i>Short Term</i> | <i>Long term</i> |
| <i>Gravel</i> | <i>Loose</i> | 25 – 50 | |
| | <i>Medium</i> | 50 – 100 | |
| | <i>Dense</i> | 100 – 200 | |
| <i>Medium to coarse sand</i> | <i>Very loose</i> | <5 | |
| | <i>Loose</i> | 3 – 10 | |
| | <i>Medium dense</i> | 8 – 30 | |
| | <i>Dense</i> | 25 – 50 | |
| | <i>Very dense</i> | 40 – 100 | |
| <i>Fine sand</i> | <i>Loose</i> | 5 – 10 | |
| | <i>Medium</i> | 10 – 25 | |
| | <i>Dense</i> | 25 – 50 | |
| <i>Silt</i> | <i>Soft</i> | <10 | <8 |
| | <i>Stiff</i> | 10 – 20 | 8 – 15 |
| | <i>Hard</i> | >20 | >15 |

| <i>Type</i> | <i>Strength of soil</i> | <i>Elastic Modulus (Mpa)</i> | |
|-------------|-------------------------|------------------------------|------------------|
| | | <i>Short Term</i> | <i>Long term</i> |
| <i>Clay</i> | <i>Very soft</i> | <3 | <2 |
| | <i>Soft</i> | 2 – 7 | 1 – 5 |
| | <i>Firm</i> | 5 – 12 | 4 – 8 |
| | <i>Stiff</i> | 10 – 25 | 7 – 20 |
| | <i>Very stiff</i> | 20 – 50 | 15 – 35 |
| | <i>Hard</i> | 40 – 80 | 30 – 60 |

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

Selain menggunakan tabel korelasi, nilai modulus elastisitas untuk tanah kohesif dapat diperoleh menggunakan grafik korelasi pendekatan rasio modulus E_u/C_u dengan nilai OCR. Semakin besar nilai OCR, maka modulus tanah juga semakin meningkat. Grafik ini umumnya digunakan dalam pemodelan numerik seperti menggunakan aplikasi berbasis elemen hingga, dengan acuan Duncan dan Buchigani (1976) dan U.S. Army (1994). Hasil nilai rasio yang diperoleh dikalikan dengan nilai C_u , kemudian menghasilkan nilai E (Warman, 2019). Grafik pendekatan antara E_u/C_u dengan (OCR) dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Grafik Hubungan Antara E_u/C_u – PI – OCR untuk Lempung
Sumber: (Warman, 2019)

2.4.9 Modulus Elastisitas Efektif (E'), Modulus *Secant* di 50% Q_{max} (E_{50}) dan Modulus *Unloading/Reloading* (E_{ur})

Nilai modulus elastisitas efektif (E') digunakan dalam analisis deformasi untuk memperkirakan penurunan atau pergerakan tanah akibat beban luar. Nilai

modulus elastisitas efektif dapat diambil sekitar 0,5 – 0,7 kali nilai modulus elastisitas dan nilai yang umum digunakan sebagai pendekatan empiris yaitu 0,6 E (Das & Sobhan, 2014).

Nilai modulus *secant* pada 50% q_{max} (E_{50}) merupakan modulus elastisitas *secant* yang ditentukan pada 50% dari kurva tegangan-regangan hasil uji *triaxial drained*. Parameter ini banyak digunakan dalam model *hardening soil* untuk menggambarkan kekakuan tanah dalam kondisi *loading primer*. Modulus *secant* pada 50% q_{max} (E_{50}) dapat dipersamakan dengan modulus elastisitas efektif (E') karena keduanya merepresentasikan kekakuan tanah pada tahap pembebanan awal (Hardiyatmo, 2003). Oleh karena itu, dalam banyak literatur dan aplikasi praktis, digunakan pendekatan $E_{50} = E'$.

Modulus *unloading/reloading* (E_{ur}) yaitu modulus elastisitas yang menggambarkan perilaku tanah ketika mengalami siklus pembebanan (*unloading*) dan pembebanan kembali (*reloading*). Nilai E_{ur} umumnya lebih besar dibandingkan nilai E_{50} , karena tanah yang sudah terkonsolidasi cenderung lebih kaku saat mengalami pembebanan ulang (Hardiyatmo, 2003). Hubungan empiris yang sering digunakan adalah $E_{ur} \approx (2 \text{ sampai } 10) E_{50}$, tergantung pada nilai OCR (SNI 8460, 2017).

2.4.10 Indeks Kompresi (C_c) dan Indeks *Swelling* (C_s)

Indeks kompresi (C_c) merupakan parameter tanah yang digunakan untuk memprediksi besarnya penurunan (*settlement*) tanah yang mengalami pemampatan akibat beban yang terjadi di atasnya pada daerah normal. Indeks kompresi diperoleh dari hasil uji laboratorium atau dari tabel korelasi yang dapat dilihat pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Indeks Kompresi (C_c)

| <i>Type of clay</i> | <i>Descriptive term</i> | <i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m^2/MN)</i> | <i>Compression index (C_c)</i> |
|--|---------------------------------|--|---|
| <i>Hard, heavily overconsolidated Glacial Till (Boulder Clay), stiff weathered</i> | <i>Very low compressibility</i> | <0,05 | 0,025 |

| <i>Type of clay</i> | <i>Descriptive term</i> | <i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m^2/MN)</i> | <i>Compression index (C_c)</i> |
|--|----------------------------------|--|---|
| <i>rock (e.g. completely weathered mudstone) and hard clays</i> | | | |
| <i>Stiff Glacial Till (Boulder Clay), marls, very stiff tropical residual clays</i> | <i>Low compressibility</i> | 0,05 – 0,1 | 0,025 – 0,05 |
| <i>Firm clays, glacial outwash clays, consolidated lake deposits, weathered, arls, firm glacial till, normally consolidated clays at depth, firm tropical residual clays</i> | <i>Medium compressibility</i> | 0,1 – 0,3 | 0,05 – 0,15 |
| <i>Poorly consolidated alluvial clays such as estuarine deposits, and sensitive clays</i> | <i>High compressibility</i> | 0,3 – 1,5 | 0,15 – 0,75 |
| <i>Highly organic alluvial clays and peats</i> | <i>Very high compressibility</i> | >1,5 | 0,75 – 5+ |

Sumber: (Bentley & Carter, 2016)

Sedangkan nilai indeks rekonsolidasi atau *swelling* (C_s) merupakan sifat tanah kohesif ketika mengalami *unloading* (pembebasan beban) atau *reloading* (pembebanan ulang). Parameter ini menunjukkan tingkat perubahan volume tanah pada kondisi tegangan yang lebih kecil daripada tegangan terbesar yang pernah dialami tanah (*preconsolidation pressure*). Nilai C_s jauh lebih kecil dibandingkan C_c karena tanah yang sudah pernah terkonsolidasi akan menunjukkan deformasi tambahan yang relatif kecil saat dibebani kembali. Hardiyatmo (2003) menyebutkan bahwa nilai C_s biasanya skitar sepersepuluh hingga seperlima dari C_c tergantung pada jenis tanah lempung dan riwayat konsolidasinya. Lebih jelasnya dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$C_s \approx \left(\frac{1}{5} \text{ hingga } \frac{1}{10} \right) C_c \quad (2.5)$$

2.4.11 Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal (C_v)

Koefisien konsolidasi arah vertikal (C_v) menentukan kecepatan pengaliran air pada arah vertikal dalam tanah. Nilai C_v dipakai untuk menentukan lamanya waktu yang dibutuhkan tanah untuk mencapai derajat konsolidasi tertentu akibat beban luar (Terzaghi dkk., 1996). C_v merupakan parameter (dalam teori konsolidasi) yang menyatakan laju perpindahan air pori keluar dari tanah berbutir halus (umumnya tanah kohesif) ketika terjadi konsolidasi akibat pembebanan. Nilai C_v diperoleh dari hasil uji laboratorium konsolidasi oedometer atau berdasarkan tabel korelasi yang dapat dilihat pada Tabel 2.11.

Tabel 2.11 Koefisien Konsolidasi Arah Vertikal (C_v)

| <i>Soil type (Unified Classification)</i> | <i>C_v</i> | |
|---|--|---|
| | <i>cm^2/s</i> | <i>m^2/a</i> |
| <i>Low plasticity clays (CL)</i> | 0,001 – 0,006 | 3 – 19 |
| <i>Low plasticity glacial lake clays (CL)</i> | 0,0006 – 0,0009 | 2 – 3 |
| <i>Low plasticity mud (CL)</i> | 0,0002 – 0,0004 | 0,6 – 1,2 |
| <i>Medium plasticity clays (CL – CH)</i> | <0,0001 – 0,00015 | <0,3 – 0,9 |
| <i>Volcanic silt (MH)</i> | 0,0001 – 0,00015 | 0,3 – 0,5 |
| <i>Organic silt (OL)</i> | 0,0002 – 0,001 | 0,6 – 0,3 |

Sumber: (Bentley & Carter, 2016)

2.4.12 Permeabilitas Tanah Arah Vertikal (k_y) dan Horizontal (k_x)

Nilai permeabilitas tanah merupakan kemampuan tanah untuk meloloskan air melalui pori-porinya. Tanah memiliki sifat permeabilitas anisotropis (tidak sama ke segala arah) karena tanah tersusun dari butiran dengan bentuk, ukuran dan orientasi berbeda. Dua arah yang diperhitungkan yaitu arah vertikal (k_y) dan arah horizontal (k_x).

Permeabilitas tanah arah vertikal (k_y) merupakan kemampuan tanah untuk memungkinkan aliran air melewati pori-porinya secara vertikal, baik dari atas ke bawah maupun sebaliknya. Nilai k_y sangat dipengaruhi oleh lapisan tanah (stratifikasi), kepadatan serta hubungan antar butir di arah vertikal. Nilai permeabilitas arah vertikal dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$k_y = C_v \times \frac{1}{E} \times 10 \times 86400 \quad (2.6)$$

dimana,

C_v = koefisien konsolidasi arah vertikal (cm^2/s)

E = modulus elastisitas (kPa)

Sedangkan permeabilitas tanah arah horizontal (k_x) merupakan kemampuan tanah untuk mengalirkan air melalui pori-porinya dalam arah horizontal. Nilai k_x menggambarkan kecepatan dan volume aliran air yang terjadi secara sejajar dengan permukaan tanah atau lapisan di bawah pengaruh gradien hidrolik. Nilai k_x biasanya lebih besar daripada k_y terutama pada tanah berlapis, karena air lebih mudah mengalir sejajar dengan bidang lapisan. Nilai permeabilitas vertikal dan horizontal untuk tanah pasir atau tanah granular ditentukan melalui rentang yang dapat dilihat pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12 Permeabilitas untuk Tanah *Saturated*

| Soil Type | k |
|---------------------|-----------------|
| | cm/sec |
| <i>Clean Gravel</i> | 100 – 1,0 |
| <i>Coarse Sand</i> | 1,0 – 0,01 |
| <i>Fine Sand</i> | 0,01 – 0,001 |
| <i>Silty Sand</i> | 0,001 – 0,00001 |
| <i>Clay</i> | <0,000001 |

Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

2.5 Tekanan Tanah Lateral

Tekanan tanah lateral merupakan suatu gaya tekanan secara horizontal yang diakibatkan dorongan tanah terhadap struktur penahan tanah. Tekanan tanah lateral merupakan tegangan tanah pada arah horizontal dan fungsi dari tegangan vertikal. Tekanan tanah lateral ini akan berpengaruh terhadap perilaku konsolidasi dan kekuatan tanah (Panguriseng, 2018). Dinding penahan tanah maupun konstruksi-konstruksi lain yang ada di bawah tanah, semuanya ini memerlukan perkiraan tekanan lateral secara kuantitatif pada pekerjaan konstruksi, baik untuk analisa perencanaan maupun untuk analisa stabilitas (Bowles, 1988).

Menurut Das *et al* dalam (Nugroho & Zayadi, 2023), tekanan tanah lateral dibagi menjadi tiga kategori keadaan berdasarkan dari pergerakan pada dinding penahan tanah sebagai berikut:

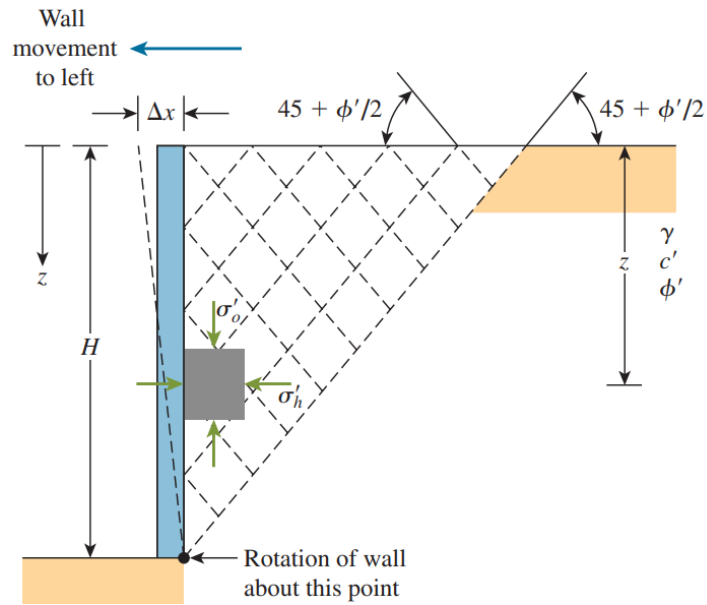
1. Tekanan tanah diam, yaitu saat dinding tidak bergerak (K_0).
2. Tekanan tanah aktif, yaitu saat dinding bergerak menjauhi tanah yang ditahan sehingga nilai K mencapai nilai minimum (K_a).
3. Tekanan tanah pasif, yaitu saat dinding bergerak mendekati tanah yang ditahan sehingga koefisien K mencapai nilai maksimum (K_p).

Tekanan lateral tanah dapat dihitung menggunakan teori yang diberikan oleh Coulomb (1776) dan Rankine (1857). Teori Rankine berasumsi bahwa:

1. Tidak ada adhesi atau friksi antara dinding dengan tanah (friksi sangat kecil sehingga diabaikan).
2. Tekanan lateral terbatas hanya untuk dinding vertikal 90° .
3. Kelongsoran (pada urugan) terjadi sebagai akibat dari pergeseran tanah yang ditentukan oleh sudut geser tanah (ϕ').
4. Tekanan lateral bervariasi linier terhadap kedalaman dan resultan tekanan yang berada pada sepertiga tinggi dinding, diukur dari dasar dinding.
5. Resultan gaya bersifat paralel terhadap permukaan urugan.

2.5.1 Tekanan Tanah Aktif (K_a)

Dapat terbilang tekanan aktif jika tekanan yang bekerja mengakibatkan dinding menjauhi tanah yang ditahan, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Keruntuhan tanah mengikuti prinsip lingkaran Mohr (Mohr-Coulomb). Jika pergerakan dinding membuat Δx semakin besar maka pada akhirnya, lingkaran Mohr akan menyentuh garis keruntuhan (Menurut Rankine, sudut keruntuhan adalah sebesar $45 + \frac{\phi'}{2}$) sehingga keruntuhan akan terjadi.



Gambar 2.4 Tekanan Tanah Aktif Rankine

Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

Tahanan geser tanah mengikuti persamaan:

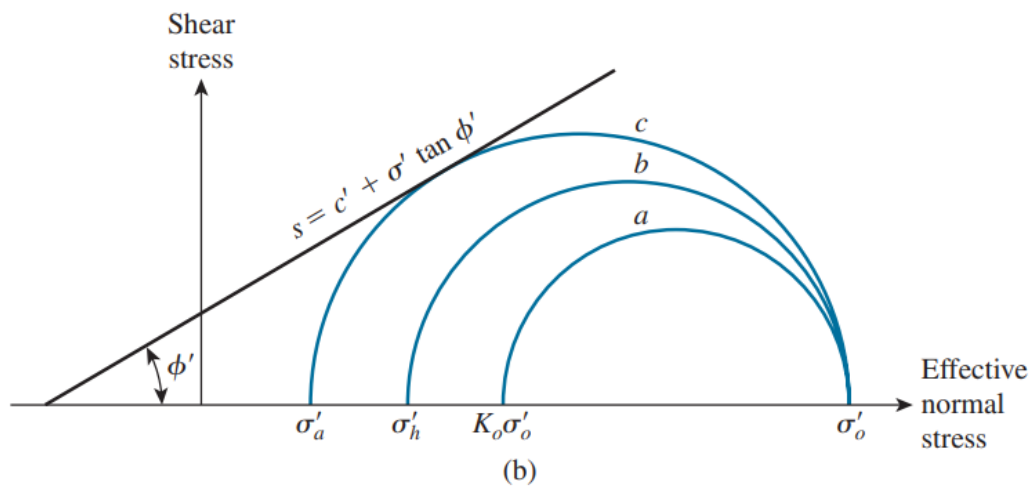
$$T_f = c' + \sigma'_v \tan \phi' \quad (2.7)$$

dimana,

σ'_v = tekanan efektif tanah (kN/m)

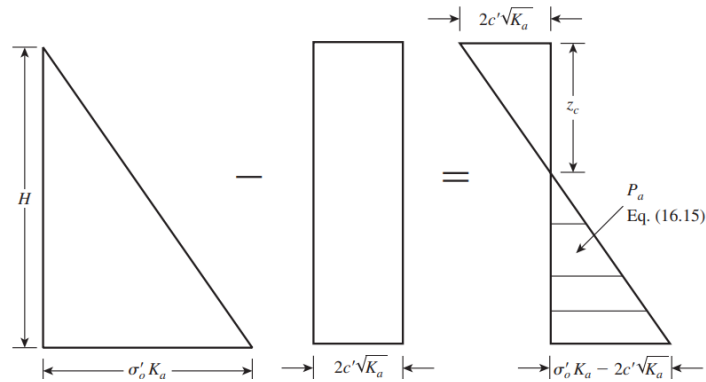
c' = kohesi tanah (kN/m²)

ϕ' = sudut geser tanah (°)



Gambar 2.5 Lingkaran Mohr Tekanan Tanah Aktif

Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)



Gambar 2.6 Resultan Tekanan Tanah Aktif
Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

Resultan tekanan aktif akibat beban luar dan pengaruh air dideskripsikan pada Gambar 2.6. Total tekanan tanah yang bekerja dirumuskan:

$$P_a = 0,5 \sigma'_v H K_a - 2c' \sqrt{K_a} H \quad (2.8)$$

dimana,

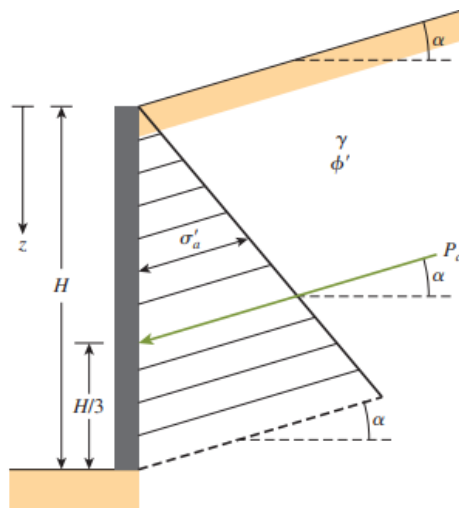
σ'_v = tekanan efektif tanah (kN/m)

c' = kohesi tanah (kN/m²)

H = tinggi dinding penahan tanah (m)

K_a = koefisien tekanan tanah aktif, $K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$

Jika permukaan tanah yang ditahan permukaan atas elevasinya meningkat seperti Gambar 2.7, maka:



Gambar 2.7 Dinding Penahan Tanah Permukaan Atas Meningkatkan Elevasinya
Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

$$K_a = \cos \alpha \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}}{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}} \quad (2.9)$$

dimana,

ϕ' = sudut geser tanah ($^\circ$)

α = sudut elevasi tanah di atas permukaan dinding

K_a = koefisien tekanan tanah aktif, $K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$

Serta total tekanan yang bekerja dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_a = 0,5 \gamma H^2 K_a \quad (2.10)$$

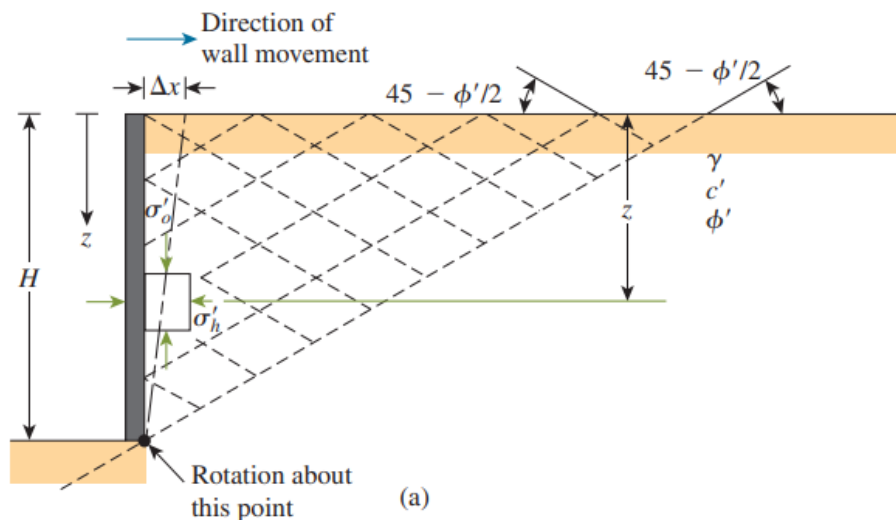
dimana,

H = tinggi dinding penahan tanah (m)

K_a = koefisien tekanan tanah aktif, $K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right)$

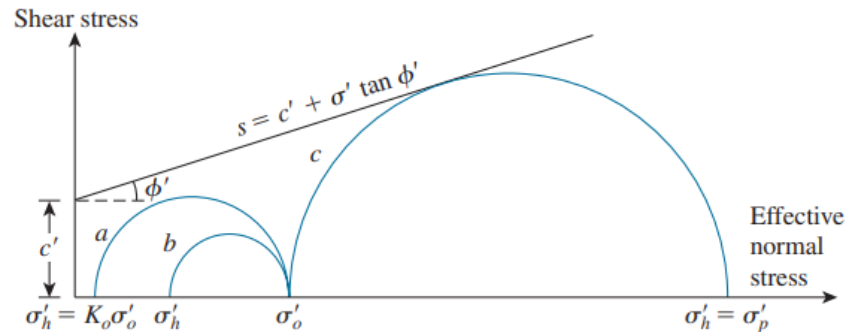
2.5.2 Tekanan Tanah Pasif (K_p)

Tekanan tanah pasif menunjukkan nilai maksimum dari gaya yang dapat dikembangkan oleh tanah pada gerakan struktur penahan terhadap tanah urugannya, yaitu dimana tanah harus menahan gerakan dinding penahan tanah sebelum mengalami keruntuhan. Tekanan tanah pasif dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Tekanan Tanah Pasif
Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

Keruntuhan tanah mengikuti prinsip lingkaran Mohr (Mohr-Coulomb). Jika pergerakan dinding membuat Δx semakin besar, maka pada akhirnya, lingkaran Mohr akan menyentuh garis keruntuhan.



Gambar 2.9 Lingkaran Mohr Tekanan Pasif

Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

Karena $K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$, maka besar tekanan lateral saat terjadi keruntuhan mengikuti persamaan sebagai berikut. Resultan tekanan pasif akibat beban luar dan pengaruh air dapat dideskripsikan dalam gambar Gambar 2.10.

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v K_p + 2c' \sqrt{K_p} \quad (2.11)$$

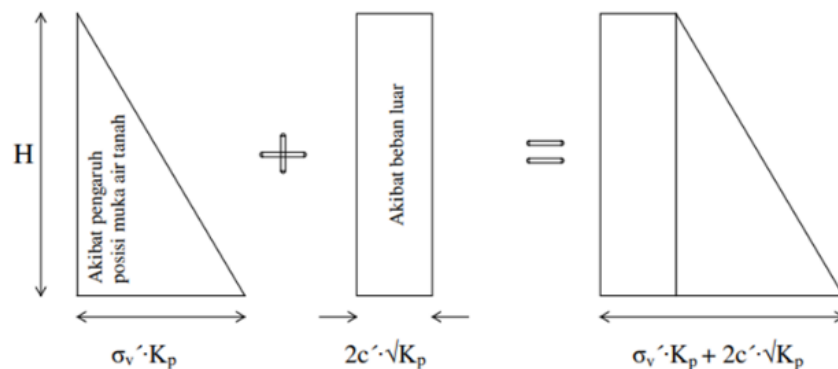
dimana,

σ'_v = tekanan vertikal efektif tanah (kN/m)

c' = kohesi tanah (kN/m²)

ϕ' = sudut geser tanah (°)

K_p = koefisien tekanan tanah pasif, $K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$



Gambar 2.10 Resultan Gaya Tekanan Pasif

Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

Total tekanan tanah yang bekerja dirumuskan sebagai berikut:

$$P_p = 0,5\gamma HK_p + 2c\sqrt{K_p} \quad (2.12)$$

dimana,

γ = berat jenis tanah (kN/m³)

c' = kohesi tanah (kN/m²)

H = tinggi dinding penahan tanah (m)

K_p = koefisien tekanan tanah pasif, $K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$

Jika permukaan tanah yang ditahan pada permukaan atas yang elevasinya meningkat seperti pada Gambar 2.7, maka rumus mencari K_p adalah:

$$K_p = \cos \alpha \frac{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}}{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi'}} \quad (2.13)$$

dimana,

ϕ' = sudut geser tanah (°)

α = sudut elevasi tanah di atas permukaan dinding

K_p = koefisien tekanan tanah pasif, $K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi'}{2} \right)$

Sehingga total tekanan yang bekerja dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_p = 0,5\gamma H^2 K_p \quad (2.14)$$

2.6 Dinding Penahan Tanah

Dinding penahan tanah merupakan salah satu struktur yang berfungsi untuk menjaga kestabilan akibat timbunan ataupun galian pada tanah sehingga tanah tidak bergerak atau longsor. Dinding penahan tanah merupakan suatu bangunan yang digunakan untuk menstabilkan tanah yang mampu menahan beban dari tanah dan pengaruh beban luar akibat beberapa faktor yang menyebabkan kondisi tanah terganggu sehingga menurunnya sifat fisik dan mekanik parameter tanah yang menimbulkan kerusakan struktur (Kalalo dkk., 2017).

Dalam perencanaan dinding penahan tanah sering kali didasari oleh keadaan keruntuhan total tidak akan terjadi. Pergerakan kecil beberapa sentimeter jika masih pada batas aman biasanya tidak dihiraukan. Perencanaan dinding penahan tanah dilakukan dengan cara menganalisis kondisi-kondisi yang akan terjadi pada keadaan runtuh, kemudian memberikan nilai batas faktor aman yang dipertimbangkan terhadap keruntuhan tersebut (Bowles, 1988). Dinding penahan tanah harus terletak pada suatu daerah dimana stabilitas dari kemiringan lerengnya memenuhi suatu angka keamanan tertentu yaitu :

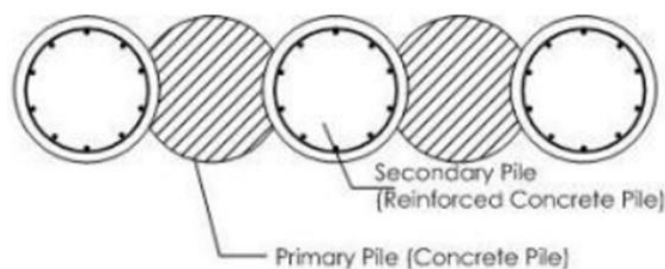
$SF > 1,5$ untuk pembebanan tetap.

$SF > 1,3$ untuk pembebanan sementara termasuk apabila ada gempa.

2.7 *Secant Pile*

2.7.1 Teori Umum *Secant Pile*

Secant pile merupakan dinding menerus dan merupakan salah satu pengembangan dari *bored pile*. *Secant pile* digunakan untuk mencegah tanah atau material lainnya agar tidak runtuh atau longsor. Selain itu, berguna untuk menjaga daya dukung dan kestabilan tanah (Jason dan Susilo, 2020). Pengerjaan *secant pile* hampir sama seperti pekerjaan *bored pile*, yaitu dengan cara mengebor tanah sampai kedalaman tertentu sesuai yang telah direncanakan, setelah itu dilakukannya pengecoran. *Secant pile* terbentuk dari rangkaian dinding *bored pile* yang saling tersambung satu sama lainnya. Pada dinding *secant pile* terdapat dua jenis tiang yaitu tiang utama (*primary pile*) dan tiang kedua (*secondary pile*). Pada kebanyakan proyek yang menggunakan *interlocking secant pile*, pada *secondary pile* dipasang tulangan, sedangkan pada *primary pile* tidak dipasang tulangan.



Gambar 2.11 Dinding *Secant Pile*
Sumber: (SNI 8460, 2017)

Secant pile saat ini banyak digunakan secara luas sebagai konstruksi dinding penahan tanah karena pemasangannya relatif cepat, serta pekerjaannya yang tidak minim suara dan sedikit getaran sehingga tidak mengganggu bangunan di sekitarnya. Dinding *secant pile* juga dapat dibangun menjadi dinding menerus yang kedap. Salah satu penggunaan *secant pile* yaitu untuk konstruksi *basement*.

2.7.2 Metode Konstruksi *Secant Pile*

Tahap awal pelaksanaan konstruksi *secant pile* yaitu membuat patok-patok dan *bowplank* dari kayu untuk titik-titik pengeboran sesuai dengan gambar rencana. Patok itu sendiri memiliki fungsi:

1. Pengarah agar penggalian lebih cepat.
2. Alat perencanaan untuk pengeboran.
3. Referensi dan tanda untuk melakukan pengeboran.

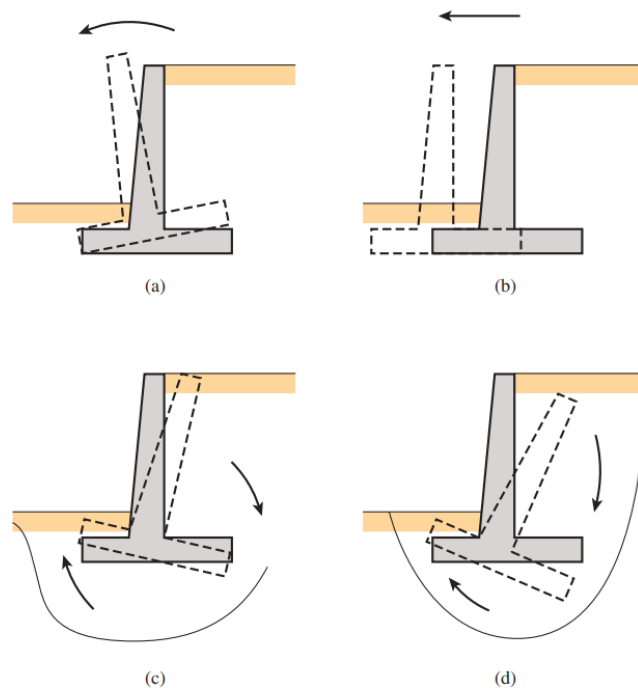
Setelah itu, dilakukannya pengeboran untuk *primary pile* sesuai dengan kedalaman yang direncanakan sebelumnya. Lalu dilakukan pengecoran ke dalam *casing* yang telah ditanam pada lubang pengeboran sebelumnya. Untuk pengeboran selanjutnya, yaitu pengeboran *secondary pile*, minimal harus diselang selama dua hari paska pengecoran *primary pile* sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Proses pengeboran dan pengecoran *secondary pile* tidak jauh berbeda dengan *primary pile*, yang membedakan hanya pada saat pengecoran *secondary pile*, ditambahkannya tulangan.

Kedalaman untuk penggalian *secant pile* sedalam-dalamnya dapat mencapai 30 meter, namun setelah melewati 20 meter, tentunya tingkat kesulitan dalam konstruksi *secant pile* akan bertambah.

2.8 Stabilitas Dinding Penahan Tanah

Tekanan tanah dan gaya-gaya yang bekerja pada dinding penahan tanah sangat mempengaruhi stabilitas dari dinding penahan tanah itu sendiri. Supaya dinding penahan tanah yang akan kita bangun tidak mengalami deformasi atau keruntuhan, maka dinding haruslah memiliki kestabilan. Dinding penahan tersebut haruslah stabil terhadap:

1. Geseran (*sliding*) dan penurunan badan dinding terhadap tekanan tanah lateral pada badan dinding untuk mencegah dinding bergeser.
2. Guling (*overturning*) yang merupakan geser atau lentur alas pada badan dinding yang menyebabkan dinding miring dan disebabkan oleh pembebanan dinding menghasilkan tekanan tanah di atas telapak (atau alas) dinding.
3. Kapasitas daya dukung tanah (*bearing capacity*) untuk mendukung beban sehingga tidak terjadinya penurunan (*settlement*).
4. Deformasi (*lateral displacement*) dalam batas yang diterima.



Gambar 2.12 Keruntuhan Dinding Penahan Tanah: (a) Oleh Guling; (b) Oleh Geser; (c) Oleh Keruntuhan Daya Dukung Tanah; (d) Oleh *Global Sliding*
Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

2.8.1 Faktor Keamanan Stabilitas Dinding Penahan Tanah

Faktor keamanan merupakan perbandingan atau rasio antara kekuatan tahanan dan kekuatan pendorong, atau faktor yang berfungsi untuk mengurangi kekuatan. Aspek yang mempengaruhi nilai faktor keamanan antara lain:

1. Kemungkinan terjadinya keruntuhan.
2. Adanya ketidakpastian saat perencanaan parameter tanah, geometri dan lapisan tanah serta distribusi tekanan air pori.
3. Biaya konstruksi.

Faktor keamanan untuk deformasi yang diizinkan berdasarkan SNI 8460:2017 Pasal 10 dapat dilihat pada Tabel 2.13.

Tabel 2.13 Faktor Keamanan yang Diizinkan

| Faktor Keamanan | Deformasi Izin |
|------------------------|-----------------------|
| Guling | 2 |
| Geser Lateral Minimum | 1,5 |
| Daya Dukung | 3 |
| Stabilitas Global | 1,5 |
| Gempa | 1,1 |

Sumber: (Das & Sivakugan, 2019)

Faktor keamanan global didefinisikan sebagai perbandingan antara kekuatan geser tanah yang tersedia dengan kekuatan geser yang dibutuhkan agar kondisi galian tetap stabil. Dengan demikian, FK global memberikan gambaran mengenai cadangan kekuatan sistem perkuatan galian terhadap potensial keruntuhan.

2.9 Deformasi Lateral Dinding

Deformasi lateral adalah deformasi yang terjadi pada dinding penahan tanah akibat tekanan lateral tanah dan aktivitas galian. Besarnya deformasi pada dinding penahan tanah harus tetap berada dalam batas yang telah ditetapkan (Kusuma dkk., 2019). Batasan deformasi lateral izin dinding penahan tanah ditentukan oleh kondisi tanah, kedalaman galian serta jarak dan kondisi gedung terdekat yang besarnya ditentukan dalam rumusan masalah dapat dilihat pada Tabel 2.14.

Tabel 2.14 Batas Maksimum Deformasi Lateral Dinding

| Batas maksimum deformasi lateral pada dinding Keterangan: x = jarak dari batas galian, H = kedalaman galian, δw = defleksi dinding | Lokasi Gedung dan Infrastruktur Eksisting Terdekat | | | |
|--|---|-----------------------------------|----------------------|--------------|
| | Zona 1 ($x/H < 1$) | Zona 2 ($1 \leq x/H \leq 2$) | Zona 3 ($x/H > 2$) | |
| | | | Tanah Tipe A | Tanah Tipe B |
| Batas izin maksimum deformasi ($\delta w/H$) | 0,5% | 0,7% | 0,7% | 1,0% |

Sumber: (SNI 8460, 2017)

Keterangan:

- a) Tanah tipe A meliputi: tanah lempung dan lanau *overconsolidated* (*overconsolidated stiff clays* dan *silts*), tanah residual (*residual soils*) dan tanah pasir dengan kepadatan sedang sampai dengan padat (*medium to dense sands*).
- b) Tipe tanah B meliputi: tanah lempung dan lanau lunak (*soft clays, silts*), tanah organik (*organic soils*) dan tanah timbunan tidak terpadatkan (*loose fills*).

2.10 Stabilitas Dasar Galian

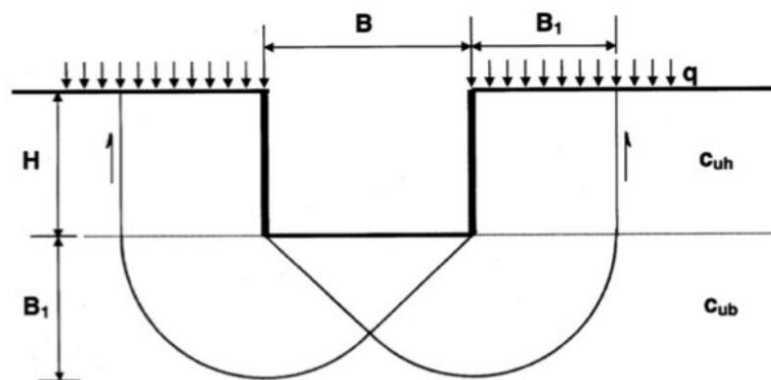
2.10.1 Basal Heave

Basal heave adalah mengalirnya tanah ke dalam galian akibat terganggunya kesetimbangan daya dukung tanah pada level ujung bawah *embedded wall* (SNI 8460, 2017). Dalam melakukan pemeriksaan terhadap bahaya *basal heave* perlu diperhitungkan adanya beban tambahan.

Faktor keamanan terhadap bahaya *basal heave* sesuai dengan persyaratan SNI 8460-2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik yaitu:

$$FK_{heave} \geq 1,25 \quad (2.15)$$

Galian pada tanah lunak (khususnya lempung) berpotensi mengalami keruntuhan berupa *heaving*, yaitu pengangkatan tanah di dasar galian akibat tekanan geser dari lapisan bawah. Kondisi ini terjadi apabila kekuatan geser tanah di bawah dasar galian tidak mampu menahan beban dari tanah di atas maupun beban luar. Skema keruntuhan *heaving* ditunjukkan dan dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Stabilitas Keruntuhan *Heaving* pada Galian
Sumber: (Wong & Goh, 2002)

$$FK_{heave} = \frac{5,7 \times C_{ub} \times B1}{(\gamma \times H \times B1) - (C_{uh} \times H)} \quad (2.16)$$

dimana,

B = kedalaman galian (m)

B1 = kedalaman tanah kedap di bawah galian (m)

H = kedalaman *secant pile* (m)

C_{ub} = nilai C_u rata-rata di atas *secant pile* (kN/m²)

C_{uh} = nilai C_u rata-rata di bawah *secant pile* (kN/m²)

γ = berat isi tanah rata-rata di bawah *secant pile* (kN/m³)

q = beban (kN/m)

Bidang keruntuhan berbentuk busur melengkung yang berpotongan di bawah dasar galian. Mekanisme ini menandakan tanah di bawah dasar galian terdorong ke atas akibat tekanan tanah lateral dan beban permukaan. Stabilitas terhadap *heaving* biasanya dianalisis dengan menghitung faktor keamanan *basal heave*, yaitu perbandingan antara tahanan geser tanah terhadap gaya pengangkat.

2.10.2 *Blow-in*

Blow-in terjadi ketika tanah dasar galian berupa tanah lempung yang kedap air namun relatif tipis, sedangkan di bawahnya terdapat lapisan tanah berbutir seperti pasir atau kerikil yang berfungsi sebagai akuifer tertekan (*confined aquifer*). Lapisan kedap air tersebut tidak mampu menahan tekanan air dari bawah, sehingga mengalami kerusakan dan terdorong ke atas. Faktor keamanan terhadap risiko *blow-in* mengacu pada persyaratan yang ditetapkan dalam SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, yaitu:

$$FK_{blow-in} \geq 1,25 \quad (2.17)$$

Stabilitas terhadap keruntuhan *blow-in* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$FK_{blow-in} = \frac{R_{dinding}}{P_a + P_{air}} \quad (2.18)$$

dimana,

$R_{dinding}$ = tekanan lateral dinding (MPa)

P_a = tekanan lateral tanah aktif sepanjang dinding *secant pile* (kPa)

P_{air} = tekanan air lateral (kPa)

Nilai tekanan lateral dinding ($R_{dinding}$) dan tekanan air lateral (P_{air}) diperoleh menggunakan persamaan berikut.

1. Inersia Tiang (I).

$$I = \frac{t \times D^3}{12} \quad (2.19)$$

dimana,

t = tebal dinding *pile* (m)

D = diameter *pile* (m)

2. Momen Maximum Tiang (M_{max}).

$$M_{max} = \frac{P_a \times L^2}{2} \quad (2.20)$$

dimana,

L = panjang *pile* (m)

3. Jarak Sumbu Netral ke Tepi *Pile* ($Y_{extreme}$).

$$Y_{extreme} = \frac{t}{2} \quad (2.21)$$

4. *Section Modulus* (Z).

$$Z = \frac{Y_{extreme}}{I} \quad (2.22)$$

5. Tahanan Lateral Dinding ($R_{dinding}$).

$$R_{dinding} = \frac{M_{max}}{Z} \quad (2.23)$$

6. Tekanan Air Lateral (P_{air}).

$$P_{air} = h_w \times \gamma_w \quad (2.24)$$

dimana,

h_w = kedalaman dari MAT ke dasar galian (m)

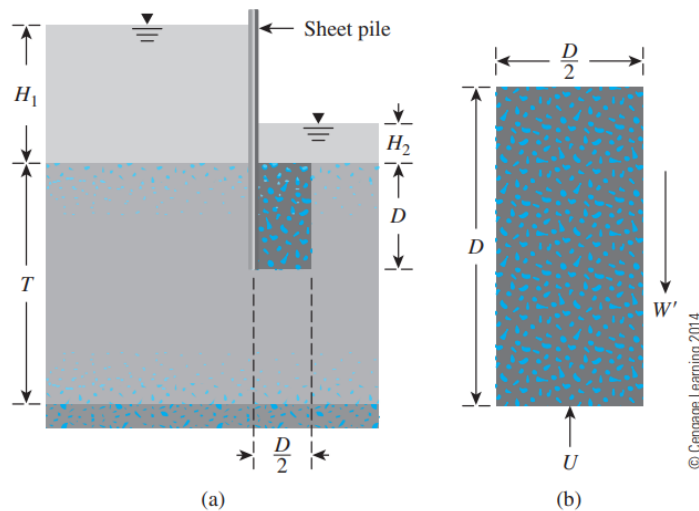
γ_w = berat jenis air = 9,807 kN/m³

2.10.3 Piping (Quick Condition, Sand Boiling)

Piping terjadi ketika tanah pada dasar galian berupa pasir. Risiko *piping* muncul apabila *exit gradient* melebihi *critical hydraulic gradient*, yang dapat menyebabkan kerusakan pada dasar galian hingga tampak seperti mendidih. Dasar galian dianggap aman dari bahaya *piping* jika memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik, yaitu:

$$FK_{piping} \geq 1,5 \quad (2.25)$$

Piping merupakan bentuk ketidakstabilan galian yang terjadi akibat tekanan air tanah berlebih pada dasar galian. Mekanisme ini timbul ketika air mengalir dari sisi luar *pile* menuju dasar galian karena adanya perbedaan muka air tanah (MAT). Tekanan air pori yang bekerja ke atas dapat mendorong tanah dasar sehingga menyebabkan terjadinya pengangkatan atau penetrasi air secara tiba-tiba ke dalam galian. Skema aliran air tanah yang melewati dasar galian atau *piping* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Stabilitas Galian terhadap *Piping*: (a) Kondisi Penampang Galian dan Distribusi Tekanan Air; (b) Model Elemen Tanah Dasar Galian
Sumber: (Das & Sobhan, 2014)

$$FK_{pipping} = \frac{\gamma' \times D}{0,36(H1 - H2)\gamma_w} \quad (2.26)$$

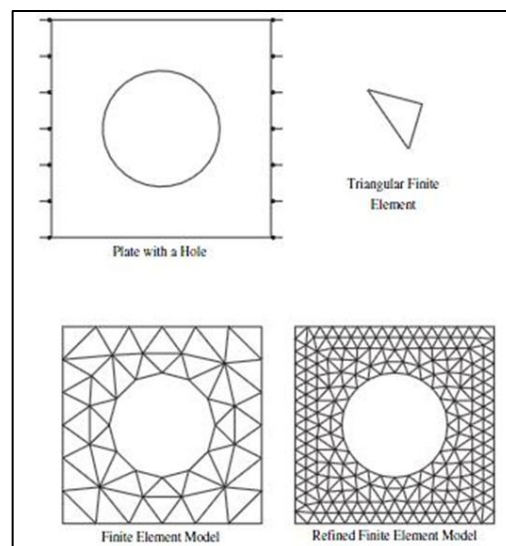
dimana,

- γ' = berat jenis efektif ujung galian ke lapisan *impermeable* (kN/m³)
 D = kedalaman ujung lapisan *permeable* ke lapisan *impermeable* (m)
 $H1$ = kedalaman galian + $H2$ (m)
 $H2$ = kedalaman ujung galian ke lapisan *permeable* (m)
 γ_w = berat jenis air = 9,807 kN/m³

2.11 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah prosedur numerik yang dapat digunakan untuk memecahkan masalah mekanika kontinum dengan tingkat ketelitian yang dapat diterima (Cook, 1981). Pada dasarnya, elemen hingga merupakan bagian-bagian kecil dari struktur aktual (sebenarnya). Elemen hingga harus dapat berdeformasi dengan cara yang terbatas (Pranata, 2024).

Untuk memformulasikan suatu elemen, gaya-gaya titik nodal (*nodal forces*) harus dihitung dan dicari terlebih dahulu untuk menghasilkan berbagai macam elemen. Pemecahan model struktur kontinu menjadi bagian-bagian kecil dilakukan melalui proses diskretisasi (*meshing*), sehingga model yang awalnya bersifat kontinu diubah menjadi model diskrit.



Gambar 2.15 Model Metode Elemen Hingga

Analisis deformasi dan stabilitas dengan metode elemen hingga (*finite element*) dapat dilakukan menggunakan program berbasis elemen hingga. Perangkat lunak berbasis elemen hingga adalah sebuah perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis permasalahan geoteknik dalam perencanaan konstruksi teknik sipil. Aplikasi ini memungkinkan pemodelan berbagai kondisi tanah, mulai dari lereng hingga fondasi, dengan berbagai variasi parameter. Dengan mengolah data yang dimasukkan, perangkat lunak tersebut dapat memberikan hasil analisis yang mendekati kondisi sebenarnya di lapangan, sehingga dapat digunakan sebagai gambaran atau cerminan dari situasi nyata saat konstruksi diterapkan.