

2 LANDASAN TEORI

2.1 Bendungan

Berdasarkan (Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 27/PRT/M/2015 Tentang Bendungan, 2015), bendungan adalah bangunan yang berupa urukan tanah, urukan batu, dan beton, yang dibangun selain untuk menahan dan menampung air, dapat pula dibangun untuk menahan dan menampung limbah tambang, atau menampung lumpur sehingga terbentuk waduk.

2.1.1 Klasifikasi Bendungan

2.1.1.1 Berdasarkan Bahan Konstruksi

1. Bendungan Urugan (*Emankment Dams*)
 - a. Bendungan Tanah (*Earthfill Dam*)

Bendungan tanah (*earthfill dam*) terbuat dari tanah atau material granural yang di padatkan.
 - b. Bendungan Batu (*Rockfill Dam*)

Bendungan batu (*rockfill dam*) terbuat dari batu yang diisi dan dipadatkan.
2. Bendungan Beton (*Concrete Dams*)
 - a. Bendungan Gravitasi (*Gravity Dam*)

Bendungan gravitasi (*gravity dam*) adalah bendungan yang menahan tekanan air melalui berat massanya.
 - b. Bendungan Lereng (*Arch Dam*)

Bendungan lereng (*arch dam*) adalah bendungan yang melengkung ke arah hulu dan mentransfer tekanan air ke dinding lembah.
 - c. Bendungan Karet (*Rubber Dam*)

Bendungan karet (*rubber dam*) adalah bendungan yang terbuat dari bahan karet yang dapat diisi dengan udara atau air.

2.1.1.2 Berdasarkan Fungsi

1. Bendungan Penyimpanan (*Storage Dam*)

Bendungan penyimpanan (*storage dam*) berfungsi untuk menyimpan air bagi keperluan irigasi, penyedia air minum, atau pembangkit listrik.

2. Bendungan Pengendali Banjir (*Flood Control Dam*)

Bendungan pengendali banjir (*flood control dam*) berfungsi untuk mengendalikan aliran air dan mencegah banjir.

3. Bendungan Pembangkit Listrik (*Hydropower Dam*)

Bendungan pembangkit listrik (*hydropower dam*) berfungsi untuk pembangkit tenaga listrik.

4. Bendungan Irigasi (*Irrigation Dam*)

Bendungan irigasi (*irrigation dam*) berfungsi untuk menyediakan air bagi keperluan irigasi.

5. Bendungan Penahan Sedimen (*Silt Retention Dam*)

Bendungan penahan sedimen (*silt retention dam*) berfungsi untuk menahan sedimen agar tidak masuk ke aliran air utama.

2.1.1.3 Berdasarkan Ketinggian

1. Bendungan Rendah (*Low Dam*)

Bendungan rendah (*low dam*) tingginya kurang dari 15 m.

2. Bendungan Menengah (*Medium Dam*)

Bendungan menengah (*medium dam*) tingginya antara 15 – 100 m.

3. Bendungan Tinggi (*High Dam*)

Bendungan tinggi (*high dam*) tingginya lebih dari 100 m.

2.1.1.4 Berdasarkan Metode Konstruksi

1. Bendungan Beton Masif (*Mass Concrete Dam*)

Bendungan beton masif (*mass concrete dam*) terbuat dari beton dalam jumlah besar.

2. Bendungan Beton Patekan (*Prestressed Concrete Dam*)

Bendungan beton patekan (*prestressed concrete dam*) menggunakan kabel patekan untuk meningkatkan kekuatan.

3. Bendungan Beton Rolled (*Roller Compacted Concrete Dam*)

Bendungan beton rolled (*roller compacted concrete dam*) menggunakan beton yang dipadatkan dengan rol.

2.1.2 Tipe Bendungan

Bendungan Leuwikeris di desain tipe urugan berzonal yang terdiri dari bendungan utama dan *cofferdam* yang menjadi satu kesatuan bendungan. *Cofferdam* dibangun untuk memindahkan aliran sungai masuk ke bangunan pengalih. Keduanya mempunyai tipe urugan berzonal yang terdiri atas inti vertikal, filter, transisi, dan urugan batu. Adapun kemiringan lereng udik adalah 1 : 3 dan lereng hilir 1 : 2. Desain potonga melintang tubuh bendungan terdapat pada Gambar 2.1 (RSNI T-01, 2002).

Dalam mendesain suatu bendungan dengan tipe timbunan terdapat 3 (tiga) parameter teknis penting yang sangat dibutuhkan antara lain sebagai berikut.

1. Kekuatan geser yang biasanya dinyatakan dengan sudut geser dalam (ϕ , ϕ') dan kohesi (c , c') yang diperoleh dari uji triaksial atau uji geser langsung.
2. Kompresibilitas yang biasanya dinyatakan dengan modulus kompresibilitas ($E_s = 1/m_v$) yang diperoleh dari hasil uji konsolidasi.
3. Permeabilitas yang biasanya dinyatakan dengan koefisien permeabilitas (k) yang diperoleh dari hasil uji kelulusan air.

Dikarenakan timbunan tanah dikerjakan dengan pemadatan tanah di lapangan dengan mengontrol kepadatan kering dan kadar airnya, jadi sebelum melakukan uji laboratorium untuk memperoleh kuat geser, kompresibilitas dan kelulusan air, maka terlebih dahulu ditentukan kadar air pemadatan dan berat volume kering yang ingin dicapai.

Menurut spesifikasi yang dipersyaratkan, kepadatan kering yang harus dicapai di lapangan adalah 95% dari kepadatan kering maksimum ($MDD = \text{Maximum Dry Density}$) dengan kadar air lapangan antara OMC dan OMC + 3% (OMC = *Optimum Moisture Content*) dengan menggunakan energi standar *proctor*.

2.2 Lereng

Lereng adalah suatu permukaan yang menghubungkan tanah yang lebih tinggi dengan permukaan tanah yang lebih rendah, dan stabilitas lereng erat kaitannya dengan longsor atau gerakan tanah yang merupakan perpindahan massa tanah secara alami dari tempat tinggi ke tempat yang lebih rendah (Rajagukguk et al., 2014).

Ada 3 (tiga) macam lereng yang perlu mendapat perhatian dari para ahli geoteknik, yaitu:

1. Lereng alam, yaitu lereng yang terbentuk akibat kegiatan alam, seperti erosi, gerakan tektonik dan sebagainya.
2. Lereng yang dibuat manusia, akibat penggalian atau pemotongan pada tanah asli untuk pembuatan jalan atau keperluan irigasi.
3. Lereng timbunan tanah, seperti urugan untuk jalan raya atau bendungan tanah.

Pada permukaan tanah yang tidak rata atau miring, komponen gravitasi cenderung bergerak ke bawah. Keruntuhan lereng terjadi ketika komponen gravitasi meningkat dan melampaui ketahanan geser yang dapat diberikan oleh tanah pada permukaan longsor. Analisis kestabilan permukaan suatu lereng disebut analisis kestabilan lereng. Analisis ini banyak digunakan dalam desain beberapa bangunan seperti jalan raya, rel kereta api, bandara, tanggul, kanal, dan lain-lain. Umumnya analisis stabilitas dilakukan untuk memeriksa keamanan dari lereng alam, lereng galian, dan lereng urugan tanah (Hardiyatmo, 2018).

2.3 Geologi Daerah Penelitian

Secara regional Sungai Citanduy ini terletak pada 4 (empat) kabupaten yang meliputi Kabupaten Majalengka, Kabupaten Garut, Kabupaten Tasikmalaya, Kabupaten Ciamis, Kotamadya Banjar, dan Kotamadya Tasikmalaya Provinsi Jawa Barat.

Berdasarkan hasil pemetaan topografi di daerah lokasi proyek pembangunan Bendungan Leuwikeris, selain as bendungan yang telah ditentukan pada tahun 1974, ditemukan juga as bendungan lainnya yang terletak disebelah hulu dari rencana as terdahulu yang diperkirakan akan lebih baik dari rencana as bendungan yang sudah ada.

Dilihat dari hasil pemetaan geologi permukaan dan pemboran inti pada pada lokasi proyek pembangunan Bendungan Leuwikeris, tanah dan batuan yang ada di daerah lokasi bendungan adalah berupa tanah lempung, breksi yang lapuk dan yang masih segar dialasi oleh batuan sedimen yang berupa selang seling batu pasir

tufaan, tufa, dan batu lempung. Sedangkan pada palung sungai ditempati oleh endapan aluvial.

2.3.1 Morfologi

Daerah penyelidikan menempati daerah perbukitan di sepanjang Sungai Citanduy dengan elevasinya berkisar antara 70 m dpl – 216 m dpl. Daerahnya merupakan daerah perbukitan berlereng agak curam sampai curam terutama di daerah tebing Sungai Citanduy, terkadang di dapatkan tebing sungai yang kemiringannya lebih dari 70°. Secara umum, daerah ini ditempati hutan dan Perkebunan serta daerah persawahan, dan secara umum daerah pemukiman terletak diatas elevasi 150 m dpl. Lembah sungainya memperlihatkan lembah sungai yang membentuk huruf V yang menunjukkan bahwa daerah aliran Sungai Citanduy ini masih ada dalam tahap erosi vertikalnya masih lebih besar daripada erosi horizontal.

2.3.2 Kondisi Tanah dan Batuan

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan dan pemboran inti serta penggalian sumuran uji, daerah aliran Sungai Citanduy di Lokasi Bendungan Leuwikeris ini ditempati oleh batuan sedimen vulkanik yang secara umum berupa breksi vulkanik, batu pasir tufaan, dan konglomerat, serta dibagian atas ditutupi oleh tanah pelapukan dan endapan sungai.

1. Endapan Sungai

Endapan sungai ini terdiri dari campuran lempung, lanau, pasir, kerikil, kerikil kerakal, bongkah batuan beku, dan breksi, serta butiran sedimen lainnya dan bersifat mudah urai, koefisien permeabilitasnya berkisar antara 10^{-2} cm/detik – 10^{-3} cm/detik. Ketebalan dari endapan sungai ini berkisar antara 4 m – 6 m, dengan penyebarannya di sepanjang Sungai Citanduy.

2. Tanah Lempung

Tanah ini berupa tanah lempung lanauan – lanau lempungan, berwarna coklat – coklat kemerahan, bersifat plastis, agak teguh sampai teguh, dibagian atasnya terdapat akar tumbuhan samap kedalaman kurang lebih 1 m. Koefisien permeabilitasnya berkisar antara 10^{-5} cm/detik – 10^{-7} cm/detik.

Ketebalan dari tanah ini berdasarkan pengamatan di lapangan pada jalan setapak yang cukup terjal bisa mencapai lebih dari 6 m. di daerah hulu dari lokasi penyelidikan ketebalan tanah ini pada lokasi Bendungan Cirahong bisa mencapai 15 m. penyebaran dari tanah ini hampir menutupi seluruh daerah penyelidikan.

3. Breksi Vulkanik

Batuan breksi vulkanik merupakan hasil gunungapi tua (QTvs) yang terdiri atas perselingan breksi, lava, tufa, dan lahar yang bersusun mineral seperti andesit sampai basal. Batuan ini diperkirakan hasil kegiatan gunungapi strato dari Gunung Sawal yang diduga merupakan hasil kegiatan gunungapi pada masa Plio – Plistosen. Berdasarkan hasil pemboran inti pada lokasi BIL-1 dan BIL-2 diketahui bahwa breksi di daerah ini sampai dengan kedalaman 35 m masih mengalami pelapukan pada tingkat lapuk sedang sampai lapuk. Hal ini ditunjukkan juga oleh nilai N-SPT yang berkisar antara 19 – 25 pukulan/30 cm, bersifat agak keras dan diperkirakan bisa dijadikan batuan pondasi. Sedangkan di BIL-2 disebelah hilir N-SPTnya menunjukkan angka yang berkisar pada 30 pukulan/30 cm sampai kedalaman 7 m dan nilai N-SPTnya menjadi lebih besar dari 50 pukulan/30 cm. berdasarkan hasil pemboran terdahulu di titik DH. 1 dan DH. 4, ketebalan dari breksi ini berkisar antara 50 m – 60 m. penyebaran dari batuan ini secara umum menutupi hampir seluruh lokasi rencana bendungan baik di sebelah kiri sungai maupun di sebelah kanan sungai.

2.3.3 Material Timbunan

Bahan bangunan yang diperlukan pada pembangunan bendungan secara umum berupa tanah, pasir, dan kerikil, serta batu. Untuk tanah kemungkinan dapat dipenuhi dari daerah sekitar lokasi penyelidikan, sedangkan untuk bahan bangunan yang berupa batu, kerikil, dan pasir dapat dipenuhi dari luar lokasi sejauh kurang lebih 10 km – 15 km kearah selatan dari lokasi rencana bendungan yaitu di daerah Gunung Pangajar dan Gunung Beureum yang berupa batuan beku diorit dan dasit serta dari komponen-komponen breksi yang berupa batuan andesit di daerah Gunung Palasari (PT Aditya *Engineering Consultant*, 2011).

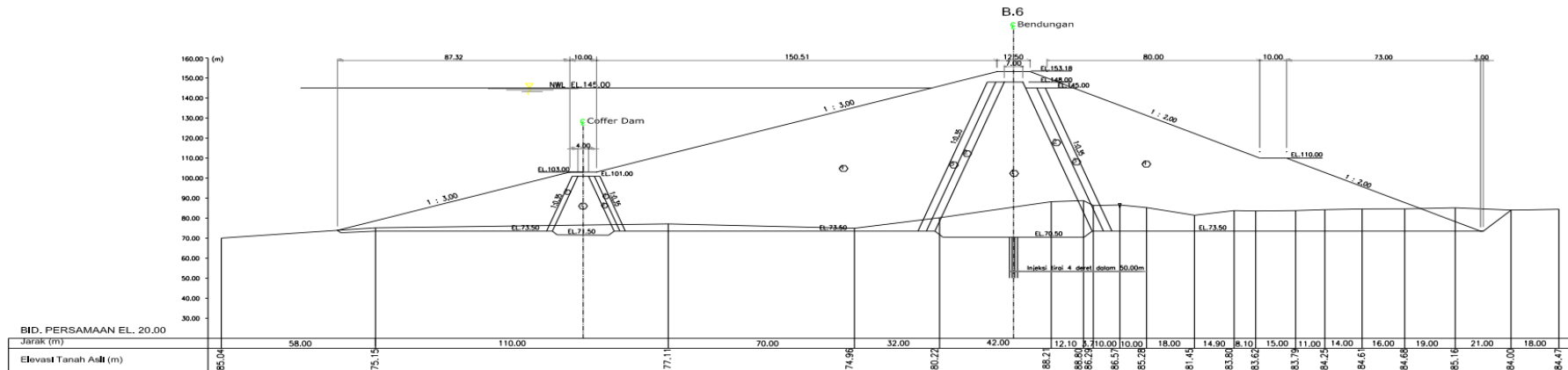
Tabel 2.1 Ketersediaan Material Tanah dan Batu untuk Urugan Bendungan

No.	Borrow Area/ Quarry	Lokasi	Jenis Material	Jarak dari Damsite km	Tebal Penutup m	Tebal Tanah/ Pasir/ Batu m	Luas ha	Volume m ³
1	BA – A	Ancol	Lempung Lanauan	0,5 km ke Barat	0,5	5	10	500 ribu
2	BA – B	Ciharalang	Lempung Lanauan	0,7 km ke Barat	0,3 – 0,5	4 – 6	20	1 juta
	Quarry Batu	G. Pangajar	Dasit	15 km ke Selatan	0,6	25	150	2,6 juta

Parameter desain bendungan dapat diperiksa pada Tabel 2.2 dengan koefisien kegempaan untuk bendungan dihitung dengan menggunakan koefisien gempa horizontal berdasarkan kriteria desain yang telah ditentukan (PT Aditya Engineering Consultant, 2011). Parameter tanah ditentukan sesuai pelapisan tanah yang telah dibagi menjadi beberapa lapisan berdasarkan jenis dan kekuatan tanah (Gusnadi et al., 2023). Nilai parameter kuat geser tanah yang digunakan dengan menyesuaikan jenis tanah, jenis *test* laboratorium, dan analisis stabilitas kritis (Sarifah et al., 2023).

Tabel 2.2 Parameter Desain Bahan Urugan Bendungan

No.	Parameter Desain	Inti	Filter	Transisi	Rockfill	Batuan Dasar
1	Spesifikasi gravitasi (Gs)	2,60	-	-	-	-
2	Berat volume kering γ_d (t/m ³)	1,10	-	-	-	-
3	Kadar air OMC W _n (%)	32	-	-	-	-
4	Berat volume pemadatan γ_n (t/m ³)	1,60	1,90	1,90	1,90	1,90
5	Berat volume jenuh γ_{sat} (t/m ³)	1,70	2	2	2	2
6	Kohesi total C _{uu} (t/m ²)	4,50	-	-	-	-
7	Sudut geser dalam total ϕ_{uu} (°)	8	-	-	-	-
8	Kohesi geser dalam efektif C' _{cuB} (t/m ²)	1	0	0	0	250
9	Sudut geser dalam efektif ϕ'_{cuB} (°)	22	32,50	35	41	28
10	Koefisien permeabilitas k (cm/dt)	1,00 10 ⁻⁶	1,00 10 ⁻³	1,00 10 ⁻³	1,00 10 ⁻²	1,60 10 ⁻⁵



Gambar 2.1 Potongan Melintang Tubuh Bendungan

Sumber : PT Aditya Engineering Consultant (2011)

Timbunan tanah dikerjakan dengan pemadatan di lapangan dengan mengontrol kepadatan kering dan kadar airnya. Jadi sebelum melakukan uji laboratorium untuk memperoleh kuat geser, kompresibilitas, dan kelulusan air, maka terlebih dahulu ditentukan kadar air pemadatan dan berat volume kering yang ingin dicapai.

Menurut spesifikasi yang dipersyaratkan, kepadatan kering yang harus dicapai di lapangan adalah 95% dari kepadatan kering maksimum (MDD = *Maximum Dry Density*) dengan kadar air lapangan antara OMC dan OMC + 3% (OMC = *Optimum Moisture Content*) dengan menggunakan energi standar *proctor*.

2.4 Tanah

Tanah adalah kumpulan partikel mineral alami (agregat) yang dapat dipisahkan secara mekanis dengan mengaduk agregat tersebut di dalam air. Sedangkan batuan adalah kumpulan mineral yang disatukan oleh kekuatan kohesif yang permanen dan kuat serta tidak dapat dipisahkan dengan cara mekanis sederhana.

Istilah pasir (*sand*), lempung (*clay*), lanau (*silt*), dan lumpur (*mud*) digunakan untuk menggambarkan sifat fisik tanah serta menggambarkan ukuran partikel dalam batas ukuran partikel tertentu. Misalnya, tanah lempung merupakan jenis tanah yang bersifat plastis dan kohesif, sedangkan pasir merupakan jenis tanah yang bersifat non-plastis dan non-kohesif. Namun, di alam sangat sedikit tanah yang hanya tersusun atas satu ukuran partikel saja, tanah merupakan campuran partikel-partikel dengan berbagai viskositas.

Sedangkan istilah tanah residual (*residual soil*) dan tanah terangkut (*transported soil*) digunakan untuk menggambarkan tempat tanah dan asal mula proses pelapukan. Ukuran partikel material tanah dapat bervariasi antara lebih besar dari 100 mm sampai berukuran lebih kecil dari 0,001 mm (Darwis, 2018).

2.4.1 Penyelidikan Tanah

Informasi kondisi tanah dasar untuk fondasi dapat diperoleh dengan cara menggali lubang secara langsung dipermukaan tanah yang disebut lubang uji (*test pit*), maupun dengan cara pengeboran tanah. Penyelidikan yang lebih detail dengan melakukan pengeboran dan dilanjut dengan pengujian di laboratorium ataupun di lapangan selalu dilakukan untuk penyelidikan tanah pada suatu proyek konstruksi yang besar.

Tujuan penyelidikan tanah adalah menentukan batas-batas praktis, sifat-sifat stratifikasi dan teknik dari tanah yang mendasari suatu tempat. Sifat-sifat utama yang ditinjau adalah karakteristik kekuatan, deformasi, dan hidrolik. Penyelidikan harus direncanakan sedemikian rupa sehingga jumlah deformasi yang diperoleh maksimum dengan biaya minimum (Bowles, 1997).

Penyelidikan tanah di lokasi proyek merupakan prasyarat bagi perancangan konstruksi bangunan. Penyelidikan tanah dengan tujuan peruntukan lahan pada

umumnya dibagi menjadi uji lapangan (*in situ test*) dan uji laboratorium (*laboratory test*).

2.4.1.1 Uji Laboratorium (*Laboratory Test*)

Uji laboratorium dimaksudkan untuk mendapatkan sifat-sifat fisik maupun parameter keteknikan yang diperlukandalam perencanaan suatu konstruksi. Penyelidikan laboratorium yang berkaitan dengan masalah peruntukan tanah terdiri dari beberapa jenis, yaitu sebagai berikut (Nugroho, 2024).

1. Uji Kadar Air (*Water Content*)

Uji kadar air (w) pada material tanah merupakan berat air (W_w) dengan berat butiran (W_s) dan dinyatakan dalam persamaan berikut (Hardiyatmo, 2019).

$$W(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (2.1)$$

2. *Grain Size Analysis*

Menggolongkan tanah berdasarkan ukuran butiran tanah, hal itu berguna guna menentukan berat butiran dalam satu saringan dengan ukuran saringan tertentu dalam presentase. Dengan analisis tersebut, butiran tanah dapat digolongkan menjadi dua jenis sebagai berikut (Nugroho, 2024).

a. Tanah Berbutir Kasar

Kricak (*gravel*) : Diameter butiran lebih dari 2 mm

Pasir (*sand*)

Kasar : Diameter 0,5 – 2 mm

Sedang : Diameter 0,2 – 0,5 mm

Halus : Diameter 0,06 – 0,2 mm

b. Tanah Berbutir Halus

Lanau : Diameter 0,0002 – 0,6 mm

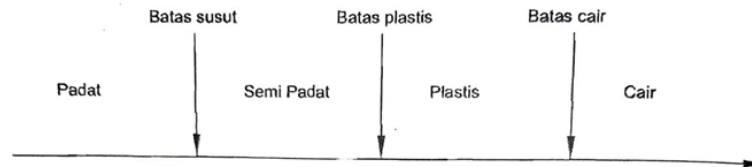
Lempung : Diameter kurang dari 0,002 mm

Guna memperoleh diameter butiran yang diperlukan, dilakukan dua pengujian berupa analisis saringan dan hidrometri.

3. Atterberg Limit

Sifat plastis pada tanah perlu diperhatikan pada tanah lempung, sifat plastis menunjukkan kemampuan tanah dalam penyesuaian perubahan bentuk pada volume yang tetap tanpa adanya retakan. Berikut cara dalam menggambarkan

batas-batas konsisten pada tanah dengan butiran halus yang mempertimbangkan kandungan air dalam tanah, batas-batas tersebut yaitu : batas cair (*liquid limit*), batas plastis (*plastis limit*), dan batas surut (*shrinkage limit*) (Hardiyatmo, 2019).



Gambar 2.2 Batas-batas Atterberg Limit

a. LL (*Liquid Limit*)

Batas cair dapat dimaknai dengan kadar air dalam tanah pada batas antara kondisi cair dan kondisi *plastic*. Berikut persamaan batas cair (Nugroho, 2024).

$$LL = w \frac{N}{25} \times \text{tg}\beta \quad (2.2)$$

Keterangan:

N = jumlah pukulan untuk menutup celah 0,5 inch (12.7 mm)

w = kadar air

$\text{tg}\beta$ = 0,121 ($\text{tg}\beta$ tidak sama untuk semua jenis tanah)

b. PL (*Plastic Limit*)

Batas plastis dapat diartikan dengan kadar air pada kondisi antara plastis dan semi padat, yaitu presentase kadar air dengan tanah diameter silinder yang retak ketika digulung (Nugroho, 2024).

c. SL (*Shrinkage Limit*)

Batas susut diartikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu presentase kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Pengujian dilakukan dengan cawan porselin berdiameter 44.4 mm dan tinggi 12,7 mm. Bagian dalam cawan diberi pelumas dan diisi dengan tanah jenuh sempurna. Selanjutnya dikeringkan dalam oven. Volume ditentukan dengan mencelupkannya dengan air raksa. Batas susut dinyatakan pada persamaan berikut (Nugroho, 2024).

$$SL = \left(\frac{m1-m2}{m2} - \frac{v1-v2}{m2} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

Keterangan:

m1 = berat tanah basah pada cawan percobaan (g)

m2 = berat tanah kering dari oven (g)

v1 = volume tanah basah (g)

v2 = volume tanah kering dari oven (g)

γ_w = berat volume cair (cm³)

4. *Specific Grativity*

Gs (*specific grativity*) merupakan perbandingan antara berat volume butiran padat (γ_s) dan volume air (γ_w) ditemperatur (Nugroho, 2024).

$$Gs = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (2.4)$$

Specific grativity tidak memiliki atau satuan, berbagai jenis tanah berkisar antara 2,65 – 2,75. Untuk berat jenis 2,65 digunakan pada tanah yang tidak berkohefif (tanah granular). Untuk berat jenis 2,68 – 2,71 digunakan untuk tanah kohefif yang mengandung tanah organik (Nugroho, 2024).

Tabel 2.3 Berat Jenis Tanah

Macam Tanah	Berat Jenis
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lempung anorganik	2,65 – 2,68
Lempung organik	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
gambut	1,25 – 1,80

5. *Standart Proctor Test*

Standart proctor test merupakan uji yang dilakukan guna menentukan hubungan antara kadar air dan berat volume air untuk memenuhi syarat kepadatan. Pengujian dilakukan dengan beberapa tanah dalam 3 lapisan dan ditumbuk sebanyak 25 kali pada tiap lapisan. Untuk kadar air yang berasal dari *plastic limit* (W_{pi}) untuk kadar air puncak rencana dan untuk sisi kering dilakukan pengurangan serta penambahan untuk sisi basah (Nugroho, 2024).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1 + w} \quad (2.5)$$

Keterangan:

γ_d = berat tanah kering (g/cm^3)

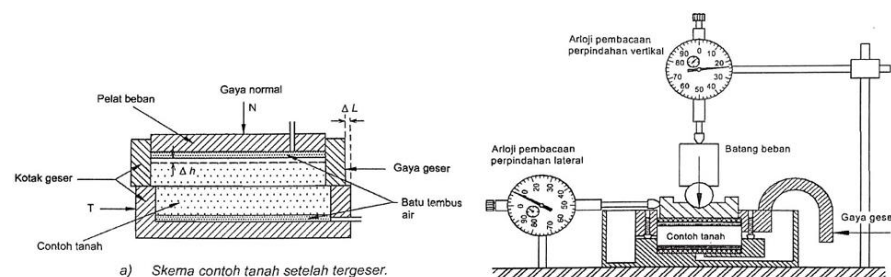
γ_b = berat tanah basah (g/cm^3)

w = kadar air (%)

6. Uji Kuat Geser

a. Uji *Direct Shear*

Pengujian dilakukan menggunakan kotak geser dari besi dengan berbentuk lingkaran atau bujur sangkar dengan ukuran kira-kira $19,35 \text{ cm}^2$ sampai $25,8 \text{ cm}^2$ dengan tingi $2,54 \text{ cm}^2$, dan terpisah dalam 2 bagian yang sama. Tegangan normal pada benda uji diberikan di atas kotak geser. Gaya geser ditetapkan pada setengah bagian kotak geser, guna memberikan geseran pada tengah benda uji. Hasil dari pengujian ini berupa lingkaran mohr dengan sumbu koordinat tegangan normal (τ) dan sumbu absisnya tegangan pengekan (σ) (Cragi, 2004).



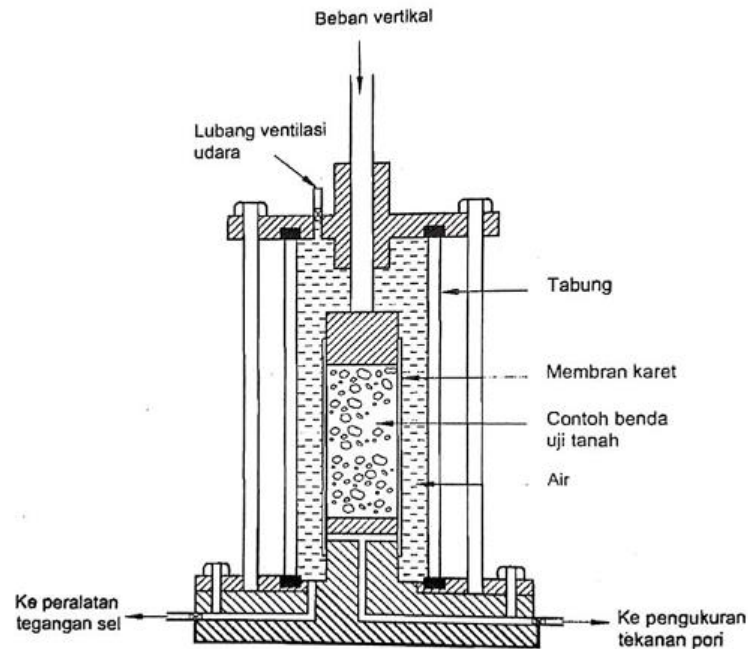
Gambar 2.3 Uji Geser Langsung

b. Uji Triaksial

Pengujian ini dilakukan dengan benda uji dengan diameter kira-kira 3,81 cm dan tinggi 7,62 cm. Benda uji dimasukkan kedalam selubung karet tipis yang diletakkan ke dalam tabung kaca. Biasanya ruang di dalam tabung diisi dengan air atau udara. Benda uji ditekan oleh tekanan sel (σ_3), yang berasal dari tekanan cairan di dalam tabung. Udara dalam tabung digunakan untuk penerapan tekanan selnya (*confining pressure*). Selanjutnya pengujian dilakukan dengan menghubungkan pengatur drainase ke dalam maupun ke luar benda uji. Pengujian ini untuk menentukan besarnya kuat geser tanah baik dalam kondisi kering maupun

jenuh terhadap tarikan atau desakan. Uji Triaksial ini dapat dilakukan dengan dengan 3 (tiga) cara, yaitu sebagai berikut (Hardiyatmo, 2019).

- 1) *Unconsolidated-Undrained* UU (tak terkonsolidasi – tak terdrainase).
- 2) *Consolidated-Undrained* CU (terkonsolidasi – tak terdrainase).
- 3) *Consolidated-Drained* CD (terkonsolidasi – terdrainase).



Gambar 2.4 Alat Uji Triaksial

2.4.1.2 Uji Lapangan (*In Situ Test*)

Penyelidikan lapangan dimaksudkan untuk menentukan urutan, ketebalan lapisan tanah/batuan serta penyebaran ke arah lateral dan vertikal, mengetahui sifat keteknikan tanah/batuan dan diperoleh contoh tanah untuk keperluan identifikasi lapangan dan laboratorium, serta untuk identifikasi kondisi airtanah. Penyelidikan lapangan yang berkaitan dengan masalah peruntukan tanah terdiri dari beberapa jenis, yaitu sebagai berikut (Heriyadi, 2001).

1. *Soil Sample*

a. Lubang Uji (*Test Pit*)

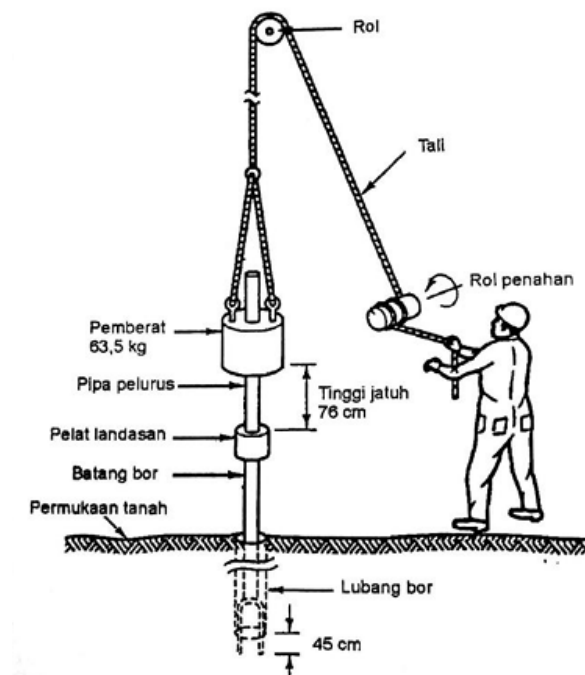
Lubang uji dibuat dengan bujur sangkar atau persegi panjang dengan ukuran 150 cm x 300 cm dan kedalaman 500 cm. Pemompaan dilakukan secukupnya apabila didapati air pada lubang uji dan dilakukan perkuatan berupa blok kayu atau papan jika dinding tanah longsor.

b. Luang Uji Dalam (*Test Shaft*)

Diameter lubang sama dengan test pit, tetapi kedalaman lubang lebih dari 5 m, serta agar lebih stabil lubang bisa beerbentuk lingkaran.

2. N-SPT

N-SPT (*Standard Penetration Test*) dilakukan guna memperoleh data kapasitas dukung tanah berupa kerapatan relatif, terlebih pada tanah yang non kohesif seperti pasir dan kerikil. Pengujian menggunakan alat tabung belah standar atau *split barrel sampler*. Pengujian dilakukan dengan membuat lubang bor pada kedalaman uji serta diameter berkisar 6 – 20 cm. Alat ditancapkan ke tanah dengan tarik pukulan setinggi 76 cm dan berat 63,5 kg. Pukulan dilakukan secara berulang hingga kedalaman 45 cm, setiap 15 cm kedalaman jumlah pukulan dicatat. Pada setiap 15 cm kedalaman pengujian dihentikan apabila jumlah pukulan melebihi 50 kali, dan apabila lebih dari 100 pukulan berulang. Nilai N (n value) berupa jumlah pukulan per kaki (*blows per foot*). Sampel tanah diambil dari alat yang dikeluarkan dari lubang bor saat pengeboran selesai. Sampel tanah dapat digunakan dalam klasifikasi tanah seperti batas Atterberg dan *grand size analysis*. Namun, tidak cocok untuk pengujian lain dikarenakan jarak yang melintasi terlalu kecil dan dianggap salah (Hardiyatmo, 2019).



Gambar 2.5 Pengujian SPT (*Standard Penetration Test*) secara Manual

3. *Lugeon Test*

Uji air lugeon merupakan modifikasi dari uji tekanan air (uji *packer*) dengan maksud menentukan besarnya angka lugeon (L_u) dari formasi batuan, berupa nilai yang menunjukkan besarnya volume yang rembes ke dalam formasi batuan sepanjang 1 meter selama 1 menit. Uji ini serupa dengan uji *packer*, hanya menggunakan tekanan standar sebesar 10 bar (10 kg/cm^2). Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali, dengan mencatat debit air yang masuk ke dalam formasi batuan selama 10 menit. Nilai lugeon dihitung dengan persamaan berikut.

$$L_u = q \times \frac{10}{PL} \quad (2.6)$$

Keterangan:

L_u = nilai Lugeon (liter/meter/menit)

P = tekanan modifikasi selama pengujian (kg/cm^2)

L = panjang atau interval pengukuran dari formasi/batuan yang diuji (m)

q = debit air yang masuk ke dalam formasi batuan (liter/menit)

4. Uji Density (*In Situ Field Density*)

Uji kepadatan lapangan menggunakan metode *water replacement* SNI 03-6872-2002. *Water replacement test* merupakan tes yang digunakan untuk menentukan kepadatan lapangan dalam lubang galian yang besar, yang ditujukan untuk penimbunan struktural. Tujuan dari *water replacement test* yaitu untuk mencari derajat kepadatan yang ada di Lapangan sesuai dengan jumlah lintasan.

5. Uji Rembesan (*In Situ Permeability*)

Uji Kelulusan air (*falling head method*) USBR 7300-89 bertujuan untuk mencari nilai permeabilitas (K) dari suatu jenis tanah. *Test falling head* dalam pekerjaan maindam untuk mencari nilai rembesan yang terjadi sehingga rembesan yang terjadi dapat terkontrol dengan baik.

2.4.2 Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi mempunyai sifat yang serupa kedalam beberapa kelompok berdasarkan pemakaiannya. Sistem klasifikasi memberikan suatu bahasa yang

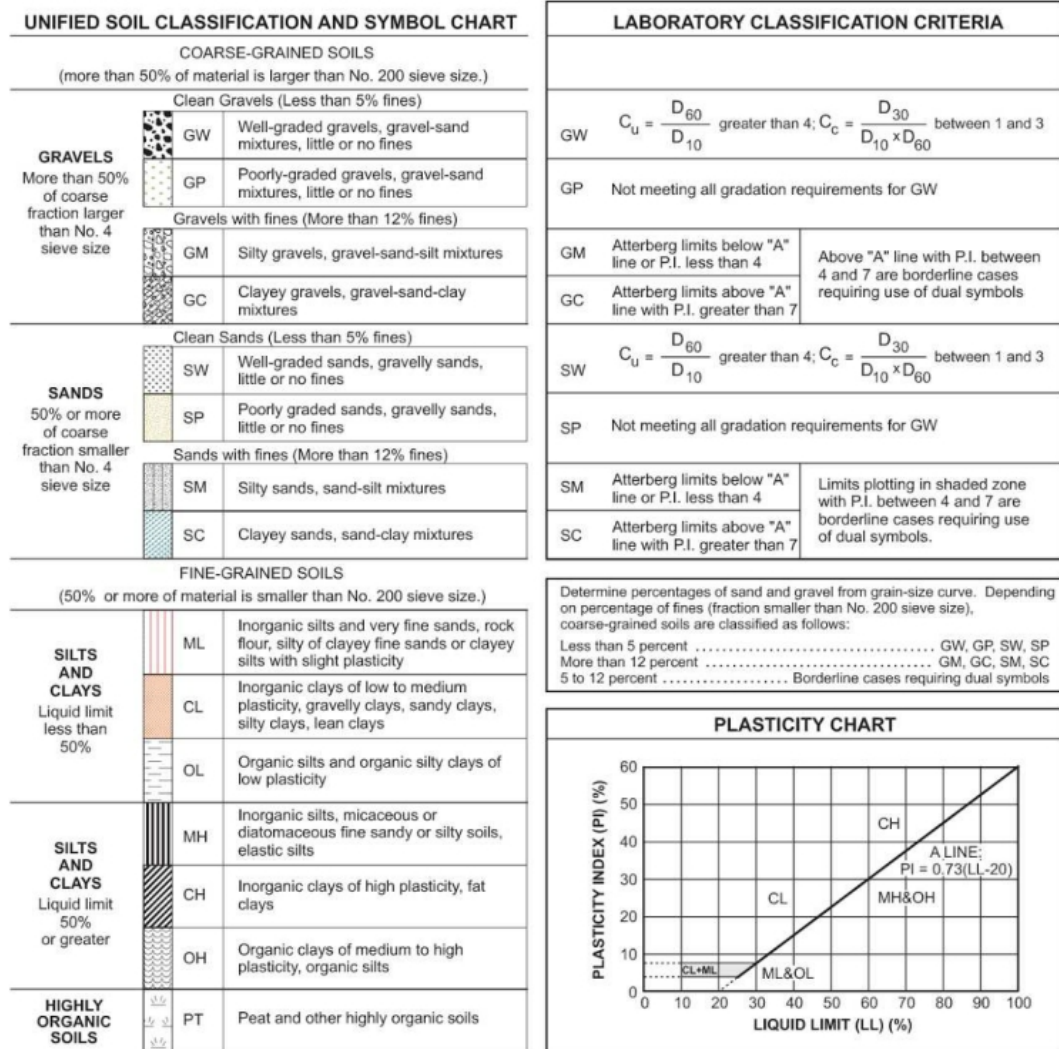
mudah untuk menjelaskan secara singkat sifat-sifat umum tanah yang sangat bervariasi tanpa penjelasan yang terperinci (M. Das & Soban, 2014).

Sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan yaitu, sistem USCS (*Unified Soil Classification System*) dan sistem AASHTO (*American of State Highway and Transportation Officials*). Sistem USCS digunakan untuk pengelompokan tanah secara universal, sedangkan sistem AASHTO lebih digunakan untuk mengklasifikasikan tanah *subgrade*. Untuk penelitian tugas akhir ini menggunakan sistem USCS.

Sistem USCS ini pada mulanya diperkenalkan oleh Cassagrande pada tahun 1942 untuk dipergunakan pada pekerjaan pembuatan lapangan terbang. Pada masa kini, sistem klasifikasi tersebut digunakan secara luas oleh para ahli teknik. Sistem USCS mengklasifikasikan tanah pada 2 (dua) kelompok besar yaitu sebagai berikut (PUPR, 2019).

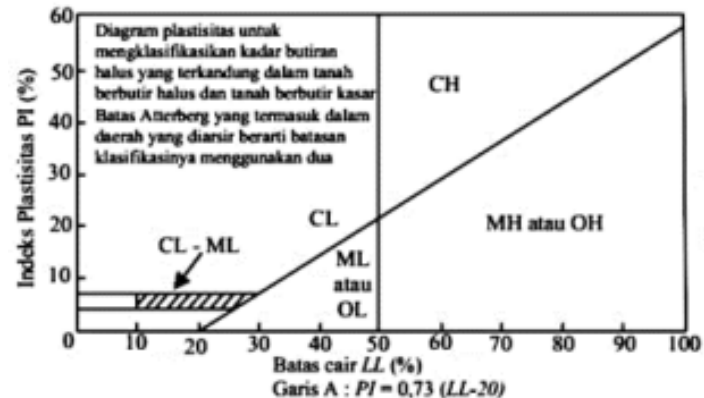
1. Tanah berbutir kasar (*coarse grained soil*), yaitu tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf G (*gravel*) atau S (*sand*).
2. Tanah berbutir halus (*fine grained soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau organik dan lempung – organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), muck, dan tanah lain dengan kadar organik tertinggi.

Secara detail, klasifikasi tanah sistem USCS dapat dilihat pada Gambar 2.6 dengan cara membaca grafik dari kiri ke kanan. Tabel 2.4 menunjukkan penggolongan sistem USCS ini (Navy, 1986).

Gambar 2.6 Sistem Klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*)

Tabel 2.4 USCS (*United Soil Classification System*)

Divisi Utama			Simbol Kelompok	Nama Jenis		Kriteria Laboratorium	
Tanah berbutir kasar 50% butiran tanah tertahan pada saringan No. 200 (0,075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari gradasi kasar tertahan saringan No. 4 (4,75 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil sedikit atau tidak mengandung butiran halus	Klasifikasi berdasarkan presentase butiran halus, kurang dari 5% lolos saringan No. 200 : GW, GP, SW, SP. Lebih dari 12% lolos saringan No. 200 : GM, GC, SM, SC. 5% – 12% lolos saringan No. 200 : batasan	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3	
			GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi kriteria untuk GW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lanau		Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai <i>double</i> simbol
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung		Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	
	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3	

	saringan No. 4 (4,75 mm)	butiran halus)	SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	klasifikasi yang mempunyai simbol <i>double</i>	Tidak memenuhi kriteria untuk SW	
		Kerikil banyak kandungan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau		Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai <i>double</i> simbol
			SC	Pasir berlanau, campuran pasir-lempung		Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan No. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung				
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus (<i>clean clays</i>)				
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah				

	Lanau dan lempung batas cair > 50%	MH	Lanau tak organik atau pasir halus <i>diatomae</i> , lanau elastis	
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (<i>flat clays</i>)	
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	
Tanah dengan kadar organik tinggi		Pt	Gambut (<i>peat</i>) dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488

2.4.3 Parameter Tanah

2.4.3.1 Modulus Young (Modulus Elastisitas)

Nilai modulus *young* menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah dan menyatakan perbandingan tegangan yang timbul terhadap regangan. Nilai ini didapatkan dari *triaxial test*. Secara umum, modulus *young* (E) diperoleh dari uji triaksial pada keadaan tak terdrainase, dan modulus *young* diperoleh dari pendekatan kemiringan kurva tegangan-regangan berdasarkan pada setengah dari beban *axial ultimate*. *Poisson ratio* (ν) dapat dihitung berdasarkan dari pengukuran regangan kompresi aksial dan regangan lateral selama *triaxial test*. Nilai modulus *young* (E) dapat ditentukan secara empiris berdasarkan tipe tanah dan data sondir seperti pada hubungan antara modulus elastisitas tanah dengan qc dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5 (Das, 1995).

Untuk tanah granular seperti pasir, modulus *young* dapat ditentukan dengan *triaxial test*. Nilai modulus *young* yang sebanding dengan $(\sigma_0)^n$, σ_0 merupakan tekanan kekang hidrostatik dan nilai n mendekati 0,5. Dengan menggunakan data sondir, *booring*, dan grafik triaksial dapat digunakan untuk mencari besarnya nilai elastisitas tanah. Nilai yang dibutuhkan adalah nilai *cone resistance* (qc) dengan menggunakan rumus pada Persamaan (2.7), (2.8), dan (2.9).

$$E = 2 qc \text{ kg/cm}^2 \quad (2.7)$$

$$E = 3 qc \text{ kg/cm}^2 \text{ (untuk pasir)} \quad (2.8)$$

$$E = 2 qc - 8 qc \text{ kg/cm}^2 \text{ (untuk lempung)} \quad (2.9)$$

Nilai yang dibutuhkan adalah nilai N. Pendekatan nilai modulus elastisitas menggunakan rumus pada Persamaan (2.10), (2.11), dan (2.12).

$$E = 2 qc \text{ kg/cm}^2 \quad (2.10)$$

$$E = 3 qc \text{ kg/cm}^2 \text{ (untuk pasir)} \quad (2.11)$$

$$E = 2 qc - 8 qc \text{ kg/cm}^2 \text{ (untuk lempung)} \quad (2.12)$$

Nilai yang dibutuhkan adalah nilai N. Pendekatan nilai modulus elastisitas menggunakan rumus pada Persamaan (2.13) dan (2.14).

$$E = 6 (N+5) \text{ k/ft}^2 \text{ (untuk pasir berlempung)} \quad (2.13)$$

$$E = 10 (N+15) \text{ k/ft}^2 \text{ (untuk pasir)} \quad (2.14)$$

Hubungan antara modulus elastisitas tanah dengan qc dari berbagai jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 2.5 (Das, 1995).

Tabel 2.5 Hubungan antara Es dengan qc

No.	Jenis Tanah	CPT (kg/cm ²)
1	Pasir Terkonsolidasi Normal	$E_s = (2 - 4) q_c$
2	Pasir Over Consolidation	$E_s = (6 - 30) q_c$
3	Pasir Berlempung	$E_s = (3 - 6) q_c$
4	Pasir Berlanau	$E_s = (1 - 2) q_c$
5	Lempung Lunak	$E_s = (3 - 8) q_c$

Nilai modulus *young* (modulus elastisitas) menunjukkan besarnya nilai elastisitas tanah sebagai perbandingan utama yang terjadi antara tegangan dan regangan. Nilai elastisitas tanah ini diperoleh berdasarkan *triaxial test*. Nilai modulus *young* (E) dapat ditentukan secara empiris dari jenis tanah dan data sondir seperti pada Tabel 2.6 (Bowles, 1997).

Tabel 2.6 Nilai Perkiraan Modulus *Young* Tanah

No.	Macam Tanah	E (kN/m ²)
Lempung:		
1	Sangat Lunak	300 – 3000
2	Lunak	2.000 – 4.000
3	Sedang	4.500 – 9.000
4	Keras	7.000 – 20.000
5	Berpasir	30.000 – 42.500
Pasir:		
1	Berlanau	5.000 – 20.000
2	Tidak Padat	10.000 – 25.000
3	Padat	50.000 – 100.000
4	Lanau	2.000 – 20.000
5	Loess	15.000 – 60.000
6	Cadas	140.000 – 1.400.000

2.4.3.2 Poisson Ratio

Nilai *poisson ratio* ditentukan sebagai rasio tekan poros terhadap regangan muai lateral. Nilai *poisson ratio* dapat ditentukan berdasarkan dari macam-macam tanah sesuai dengan Tabel 2.7 (Das, 1995).

Tabel 2.7 Hubungan antara Macam-macam Tanah dan *Poisson Ratio*

No.	Macam Tanah	ν
1	Lempung Jenuh	0,40 – 0,50
2	Lempung Tak Jenuh	0,10 – 0,50
3	Lempung Berpasir	0,20 – 0,30

No.	Macam Tanah	v
4	Lanau	0,30 – 0,35
5	Pasir Padat	0,20 – 0,40
6	Pasir Kasar ($e = 0,4 - 0,7$)	0,15
7	Pasir Halus ($e = 0,4 - 0,7$)	0,25
8	Batu	0,10 – 0,40
9	Loess	0,10 – 0,30

2.4.3.3 Kohesi

Kohesi adalah gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersamaan dengan sudut geser dalam, kohesi adalah parameter kuat geser tanah yang menentukan ketahanan tanah terhadap deformasi akibat beban-beban yang bekerja pada tanah, hal ini berupa gerakan lateral tanah. Nilai ini ditentukan dari *triaxial test* dan *direct shear test* (uji geser langsung).

2.4.3.4 Kuat Geser Tanah

Kuat geser tanah diperlukan untuk menghitung daya dukung tanah (*bearing capacity*), tegangan tanah pada dinding penahan tanah (*earth pressure*), dan kestabilan lereng. Kekuatan geser tanah terdiri dari 2 (dua) parameter, yaitu sebagai berikut.

1. Bagian yang bersifat kohesi (c) tergantung pada jenisnya.
2. Bagian yang memiliki sifat gesekan (σ) yang bekerja pada bidang geser.

Parameter kuat geser tanah terdiri dari gesek dalam (φ) dan kohesi tanah (c), Dimana dapat diperoleh dengan *direct shear test*. Menurut teori Mohr-Coulumb, kuat geser tanah didefinisikan dengan Persamaan (2.15).

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (2.15)$$

Keterangan:

τ = kuat geser tanah (kN/m^2)

σ = tegangan total pada bidang geser (kN/m^2)

c = kohesi tanah (kN/m^2)

φ = sudut gesek dalam tanah ($^\circ$)

Kekuatan geser dalam memiliki kohesi variabel dan sudut geser dalam. Sudut geser dalam bersamaan dengan gaya kohesif menentukan ketahanan tanah akibat tegangan yang diberikan dalam bentuk tekanan tanah lateral. Nilai tersebut

ditentukan dari pengukuran sifat-sifat tanah berupa uji triaksial dan uji geser langsung sesuai Tabel 2.8 (Das, 1995).

Tabel 2.8 Hubungan antara Sudut Geser Dalam dengan Jenis Tanah

No.	Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam
1	Kerikil Kepasiran	35 – 40
2	Kerikil Kerakal	35 – 40
3	Pasir Padat	35 – 40
4	Pasir Lepas	30
5	Lempung	25 – 30
6	Lempung	20 – 25

2.5 Analisis Stabilitas Lereng

2.5.1 Penyebab Tanah Longsor

Penyebab terjadinya tanah longsor antara lain pengaruh internal dan eksternal. Pengaruh internal adalah pengaruh yang mengakibatkan bertambahnya gaya geser tanpa mengubah kuat geser tanah, misalnya karena campur tangan manusia seperti penajaman lereng batuan, pendalaman galian tanah, atau erosi sungai. Dampak internal adalah tanah longsor yang terjadi tanpa adanya perubahan kondisi eksternal atau gempa bumi. Misalnya pengaruh peningkatan tekanan air pori pada lereng (Hardiyatmo, 2018).

Keruntuhan lereng alami dapat disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu sebagai berikut.

1. Penambahan beban pada lereng. Beban tambahan pada lereng dapat terjadi dalam bentuk bangunan baru, beban tambahan dari air yang merembes ke dalam pori-pori tanah atau terakumulasi pada permukaan tanah, dan beban dinamis dari vegetasi yang tertiup angin.
2. Penggalian atau pemotongan tanah pada dasar suatu lereng.
3. Penggalian untuk mempertajam lereng.
4. Perubahan tinggi muka air secara tiba-tiba (*rapid drawdown*). Contohnya bendungan, sungai, dan lain-lain.
5. Kenaikan tekanan lateral akibat air (retakan berisi air mendorong tanah ke samping).
6. Gempa bumi atau getaran berlebihan.

7. Meningkatnya kadar air akibat adanya genangan air dalam tanah, meningkatnya tekanan air pori, dan meningkatnya tekanan rembesan mengurangi kuat geser tanah pembentuk lereng, dan tanah pada lereng tersebut mengandung lempung sehingga mudah mengembang dan mengempis.

2.5.2 Teori Analisis Stabilitas Lereng

Analisis kestabilan lereng biasanya didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (*limit plastic equilibrium*). Tujuan analisis kestabilan lereng adalah untuk mengetahui faktor keamanan pada daerah rawan longsor. Stabil atau tidak stabilnya suatu lereng ditentukan oleh faktor keamanannya (Hardiyatmo, 2018).

Beberapa asumsi yang terdapat dalam analisis stabilitas lereng, yaitu sebagai berikut.

1. Keruntuhan lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang keruntuhan tertentu dan dapat dipandang sebagai masalah bidang dua dimensi.
2. Massa tanah longsor dianggap sebagai benda yang sangat besar.
3. Ketahanan geser suatu massa tanah pada setiap titik sepanjang permukaan longsor tidak bergantung pada orientasi permukaan longsor, atau kekuatan geser tanah dianggap isotropik.
4. Faktor aman ditentukan dengan mempertimbangkan tegangan geser rata-rata di sepanjang permukaan tanah longsor, dan kuat geser rata-rata di sepanjang permukaan tanah longsor. Oleh karena itu, meskipun faktor keamanan yang dihitung lebih besar dari 1, kekuatan geser tanah dapat terlampaui di lokasi tertentu pada permukaan longsor.

Faktor aman didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan seperti pada Persamaan (2.16).

$$SF = \frac{\tau}{\tau_d} \quad (2.16)$$

Keterangan:

- τ = tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah (kN/m²)
- τ_d = tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor (kN/m²)

SF = faktor aman

Menurut teori Mohr-Coulumb, ketahanan geser maksimum adalah kuat geser tanah (τ) yang dapat dimobilisasi oleh tanah sepanjang permukaan longsor dan dinyatakan dengan Persamaan (2.15), dimana nilai c dan ϕ merupakan parameter kuat geser tanah sepanjang bidang longsor.

Demikian pula persamaan tegangan geser yang terjadi (τ_d) disebabkan oleh beban tanah dan beban lain pada suatu tanah longsor seperti pada Persamaan (2.17).

$$\tau_d = c_d + \sigma \operatorname{tg} \phi_d \quad (2.17)$$

Dengan c_d dan ϕ_d adalah kohesi dan sudut gesek dalam yang terjadi atau yang dibutuhkan untuk keseimbangan pada bidang kelongsornya.

Dari substitusi Persamaan (2.15) dan (2.17) ke Persamaan (2.16) diperoleh persamaan faktor aman seperti pada Persamaan (2.18).

$$SF = \frac{c + \sigma \operatorname{tg} \phi}{c_d + \sigma \operatorname{tg} \phi_d} \quad (2.18)$$

Untuk menambahkan faktor aman terhadap setiap bagian kuat geser, maka dari itu faktor aman dinyatakan pada Persamaan (2.13) dan (2.14).

$$SF_c = \frac{c}{c_d} \quad (2.19)$$

$$SF_\phi = \frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \phi_d} \quad (2.20)$$

Keterangan:

SF_c = faktor aman pada komponen kohesi

SF_ϕ = faktor aman pada komponen gesek

Pada umumnya, metode kesetimbangan batas menganggap $SF_c = SF_\phi$. Hal ini menunjukkan bahwa komponen kohesi c dan gesekan (ϕ) secara bersamaan dimobilisasi dengan kecepatan yang sama sepanjang permukaan longsor. Secara umum, faktor keamanan stabilitas lereng atau faktor keamanan kuat geser tanah diasumsikan 1,2 – 1,5 atau lebih tinggi.

Faktor keamanan yang diisyaratkan untuk dinding penahan tanah berdasarkan SNI 8460:2017 mengenai Persyaratan Perencanaan adalah sebagai berikut (SNI 8460, 2017).

1. Faktor keamanan terhadap guling minimal 2.
2. Faktor keamanan terhadap geser lateral minimal 1,5.

3. Faktor keamanan terhadap daya dukung minimal 3.
4. Faktor keamanan terhadap stabilitas global minimal 1,5.
5. Faktor keamanan terhadap bebam gempa minimal 1,1.

Tabel 2.9 Klasifikasi Kestabilan Lereng

No.	Faktor Aman	Klasifikasi	Keterangan
1	$FK > 1,5$	Stabil	Hanya gangguan besar dapat membuat ketidakstabilan
2	$1,25 < FK < 1,5$	Kestabilan Sedang	Gangguan ketidakstabilan sedang dapat membuat ketidakstabilan
3	$1 < FK < 1,25$	Agak Stabil	Gangguan ketidakstabilan minor dapat mengganggu stabilitas
4	$FK < 1$	Tidak Stabil	Memerlukan perbaikan stabilitas lereng

Sumber : SNI 8460 (2017)

2.5.3 Metode Perhitungan Stabilitas Lereng

Dalam perhitungan stabilitas tanah, terdapat beberapa metode yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan suatu lereng atau struktur untuk menjaga integritasnya terhadap gaya-gaya eksternal. Berikut adalah beberapa metode umum dalam perhitungan stabilitas tanah.

1. Metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

Metode ini adalah pendekatan paling umum yang digunakan dalam analisis stabilitas. Prinsipnya adalah mencari titik keseimbangan dimana momen gaya geser internal tanah sama dengan momen dan gaya geser eksternal yang bekerja pada lereng. Metode ini mencakup beberapa submetode seperti *Morgenstern-Price*, metode *Bishop*, dan metode *Janbu*. Hasil analisis biasanya dinyatakan dalam FK (Faktor Keamanan), sebagai berikut.

$$FK = \frac{\text{Kuat geser (shear strenght)}}{\text{Tegangan geser (shear stress)}} \quad (2.21)$$

Dengan:

$$FK = \frac{s}{\tau} \geq 1 \text{ aman}$$

atau $s > \tau$, aman

$s < \tau$, tidak stabil

Tabel 2.10 Analisis Stabilitas dengan Cara Kesenimbangan Batas

Metode	Program	Karakteristik
Bishop termodifikasi (1955)	Mstabl, Mstab, Slope-w, Stabl-g, Sb-slope, Stablgm	Hanya bidang runtuh lingkaran, memenuhi keseimbangan momen, tidak memenuhi keseimbangan gaya-gaya horizontal dan vertikal
Force Equilibrium (Lowe dan Karafiat, 1960 dan US Corps of Engineers 1970)	Utexas2, Utexas3, Slope-w	Segala bentuk bidang runtuh, tidak memenuhi keseimbangan momen, memenuhi keseimbangan gaya-gaya horizontal dan vertikal
Janbu's Generalized Procedure (Janbu, 1968)	Stabl-g	Segala bentuk bidang runtuh, memenuhi segala kondisi keseimbangan, lokasi gaya samping dapat divariasi.
Morgenstern and Price's (1965)	Slope-w	Segala bentuk bidang runtuh, memenuhi segala kondisi keseimbangan, lokasi gaya samping dapat divariasi
Spencer's (1967)	Mstab, Slope-w, Sb-slope, Sstab2	Segala bentuk bidang runtuh, memenuhi segala kondisi keseimbangan, lokasi gaya samping dapat divariasi

2. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga adalah pendekatan numerik yang lebih kompleks, yang membagi tanah menjadi elemen-elemen kecil dan memodelkan perilaku tanah berdasarkan persamaan fisika. Metode ini dapat mengatasi geometri dan kondisi beban yang kompleks, serta efek dinamis, dan biasanya diimplementasikan dalam *software* geoteknik. Hasil analisis dengan cara elemen hingga, dapat berupa perubahan tegangan dan regangan untuk berbagi sifat elastisitas material, heterogenitas massa tanah dan bentuk geometri. Berikut merupakan program yang digunakan untuk analisis dengan cara elemen hingga (SNI 8064, 2016).

Tabel 2.11 Program Elemen Hingga yang Dapat Digunakan untuk Analisis

No.	Program	Kemampuan	Keterangan
1	Plaxis 7.2	Menghitung tegangan dan regangan baik waktu konstruksi berlangsung maupun waktu terjadi aliran langgeng; untuk menilai apakah lereng dalam keadaan stabil dapat dilihat dari nilai $t/t_{makx} < 1$ (stabil)	
2	Sigma-w	Menghitung tegangan dan regangan baik waktu konstruksi berlangsung maupun waktu terjadi aliran langgeng; untuk menilai apakah lereng dalam keadaan stabil dapat dilihat dari $t/t_{makx} < 1$ (stabil)	Perhitungan FK dapat dilakukan dengan Slope-w dengan menggunakan tegangan geser yang diperoleh dari Sigma-w

3. Metode Elemen Batas (*Boundary Element Method*)

Mirip dengan metode elemen hingga, metode ini fokus pada persamaan yang diterapkan pada batas antara zona stabilitas dan zona tidak stabil pada lereng. Metode ini efisien untuk analisis ketika perubahan geometri sangat signifikan.

4. Metode Penyederhanaan Analitis

Beberapa metode analitis lebih sederhana digunakan untuk mengestimasi stabilitas tanah dalam kondisi tertentu. Contoh termasuk metode Culmann, metode Bishop Simplified, dan metode Taylor. Meskipun hasilnya bisa lebih kasar, metode ini berguna untuk analisis cepat atau tahap awal perencanaan.

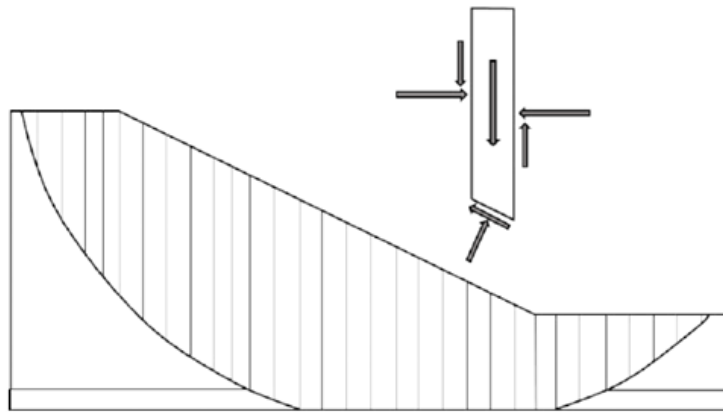
5. Metode Analisis Numerik Umum

Selain metode khusus untuk stabilitas tanah, ada juga *software* analisis numerik umum seperti PLAXIS, ABAQUS, dan FLAC yang dapat digunakan untuk menganalisis stabilitas tanah. Metode ini dapat mengatasi berbagai masalah geoteknik dengan akurasi tinggi, tetapi memerlukan pemahaman mendalam tentang pemodelan dan interpretasi hasil.

2.5.4 Teknik Penyelesaian Metode Kesetimbangan Batas

Metode kesetimbangan batas atau LEM (*Limit Equilibrium Method*) adalah metode yang menggunakan kondisi kesetimbangan statik dan mengabaikan hubungan tegangan-regangan pada lereng. Dimana dalam analisisnya menggunakan perbandingan gaya pendorong dan gaya penahan lereng. Pada analisis kesetimbangan batas, asumsi geometri dari bentuk bidang runtuh harus diketahui dan ditentukan terlebih dahulu lalu menghitung data-data untuk setiap irisan (Khadijah et al., 2016).

lereng dengan metode kesetimbangan batas dapat dikerjakan menggunakan beberapa teknik penyelesaian. Teknik-teknik penyelesaian tersebut berupa persamaan statika yang terpenuhi dan asumsi hubungan antara geser antar kolom dan gaya normal. Gaya geser bekerja pada dasar dan sisi kolom, geser antar kolom dan gaya normal bekerja pada tepi vertikal. Massa geser dianggap berada pada kondisi kesetimbangan batas atau pada titik runtuhnya, sehingga jumlah seluruh gaya dan momen bekerja pada semua kolom sama dengan nol (Nugroho, 2024).



Gambar 2.7 Diskritisasi Kolom dan Gaya Kolom untuk Massa Geser

Teknik penyelesaian pertama yang dikembangkan dikenal dengan metode Ordinary dan Fellenius. Cara ini mengabaikan semua gaya antar kolom dan hanya memenuhi kesetimbangan momen. Berdasarkan pada asumsi yang disederhanakan ini memungkinkan perhitungan faktor keamanan menggunakan perhitungan tangan. Selanjutnya Bishop (1955) mendesain sebuah skema yang memasukkan gaya normal antar kolom tetapi mengabaikan gaya geser antar kolom. Kemudian, cara Bishop yang disederhanakan atau Simplified Bishop hanya memenuhi

kesetimbangan momen. Memasukkan gaya antar kolom normal dan menghasilkan persamaan faktor keamanan non-linier yang memerlukan prosedur solusi yang berulang. Cara Simplified Janbu mirip dengan cara Simplified Bishop karena mencakup gaya normal antar kolom dan mengabaikan gaya geser antar kolom. Namun, cara Janbu memenuhi kesetimbangan gaya horizontal, bukan kesetimbangan momen.

Seiring berkembangnya waktu, saat ini sangat memungkinkan proses komputasi dengan mudah untuk menangani prosedur berulang yang melekat pada metode kesetimbangan batas, yang menjurus pada perhitungan matematis yang rumit dan mencakup semua gaya antar kolom dan memenuhi semua persamaan statika. Kedua cara tersebut adalah Morgenstern-Price dan Spencer. Tabel 2.12 mencantumkan cara atau metode yang tersedia di GeoStudio, beserta persamaan statika yang dipenuhi untuk masing-masing metode atau cara (Nugroho, 2024).

Tabel 2.12 Persamaan Statika yang Dipenuhi untuk Setiap Metode

Cara	2D	3D	Momen Kesetimbangan	Kesetimbangan Kekuatan
Ordinary atau Fellenius	Ya	Tidak	Ya	Tidak
Bishop Simplified	Ya	Ya	Ya	Tidak
Janbu Simplified	Ya	Ya	Tidak	Ya
Spencer	Ya	Ya	Ya	Ya
Morgenstern-Price	Ya	Ya	Ya	Ya
<i>Corps of Engineers – 1</i>	Ya	Tidak	Tidak	Ya
<i>Corps of Engineers – 2</i>	Ya	Tidak	Tidak	Ya
Lowe-Karafiath	Ya	Tidak	Tidak	Ya
Janbu Generalized	Ya	Tidak	Ya (menurut kolom)	Ya
Sarma – <i>vertical columns</i>	Ya	Tidak	Ya	Ya

Tabel 2.12 memberikan ringkasan gaya antar kolom yang termasuk dalam setiap metode dan asumsi hubungan antara gaya geser antar kolom dan gaya normal.

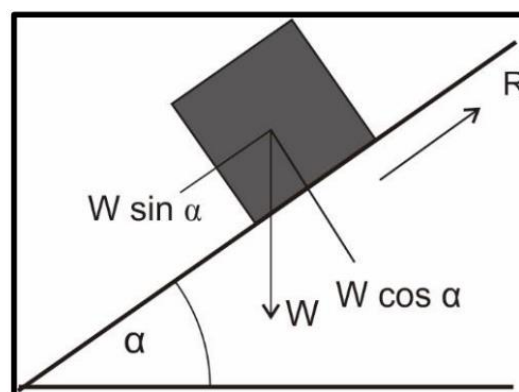
Tabel 2.13 Karakteristik dan Hubungan Antar Kolom

Cara	Antar Kolom Normal (E)	Antar Kolom Geser (x)	Hubungan X/E/Kecenderungan Resultan
Ordinary atau Fellenius	Tidak	Tidak	Tidak ada gaya antar kolom
Bishop Simplified	Ya	Tidak	Tidak ada/horizontal
Janbu Simplified	Ya	Ya	Tidak ada/horizontal
Spencer	Ya	Ya	Ditentukan/konstan
Morgenstern-Price	Ya	Ya	Fungsi/variabel pengguna
<i>Corps of Engineers</i> – 1	Ya	Ya	Ditentukan/kecenderungan garis dari puncak sampai ujung kaki
<i>Corps of Engineers</i> – 2	Ya	Ya	Ditentukan/kecenderungan permukaan tanah di bagian atas kolom
Lowe-Karafiath	Ya	Ya	Ditentukan/kecenderungan permukaan tanah dan kolom kemiringan dasar
Janbu Generalized	Ya	Ya	Garis yang ditentukan/diterapkan gaya dorong dan momen kesetimbangan kolom
Sarma – <i>vertical columns</i>	Ya	Ya	Ditentukan/ $X = c + E \tan \phi$

Hubungan antara geser antar kolom dan gaya normal merupakan salah satu pembeda utama. Spencer mengasumsikan $\lambda = 1.0$, sedangkan Morgenstern-Price mengasumsikan hubungan sinus, yang berarti geser antar kolom adalah nol pada puncak dan ujung permukaan slip, sedangkan garis geser dan garis normal sama besar pada titik tengah permukaan gelincir. Cara *Corp Engineers* – 1 menggunakan kemiringan (yaitu naik/turun) suatu garis dari puncak hingga ujung kaki untuk menentukan rasio sedangkan metode *The Corps of Engineers method 1* menggunakan kemiringan permukaan tanah. Metode Lowe-Karafiath serupa, hanya saja metode ini menggunakan rata-rata kemiringan permukaan tanah dan dasar kolom. Metode Sarma – kolom vertikal menggunakan hubungan yang disajikan pada Tabel 2.12, menjadikan gaya geser antar kolom sebagai fungsi dari sudut kohesi dan gesekan (Nugroho, 2024).

Metode ini memerlukan massa batuan dengan bidang permukaan yang kontinu. Bidang permukaan ini sangat penting untuk menentukan nilai faktor keamanan (FK) minimum. Metode ini dinyatakan dengan persamaan-persamaan kesetimbangan dari satu atau beberapa blok yang diasumsikan tidak mengalami deformasi, dan mengurangi gaya-gaya yang tidak diketahui (reaksi dari bagian stabil massa batuan atau gaya-gaya antar blok), khususnya gaya geser yang bekerja pada permukaan longsoran yang dipilih sebelumnya. Kondisi kestabilan lereng dengan menggunakan metode ini dinyatakan dalam nilai faktor keamanan. Faktor keamanan dihitung menggunakan kesetimbangan gaya atau kesetimbangan momen, maupun keduanya tergantung dari metode perhitungan yang dipakai.

Dalam keadaan tidak terganggu, massa batuan pada umumnya memiliki kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja. Kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja tersebut dapat terganggu dikarenakan adanya perubahan kondisi massa batuan, baik secara alamiah (erosi, patah, dan peningkatan airtanah) maupun aktivitas manusia (pengupasan, pengangkutan, penggalian, penimbunan). Dapat dilihat pada Gambar 2.6 di bawah ini yang memperlihatkan gaya-gaya yang bekerja pada suatu blok yang berada pada suatu bidang miring yang mempunyai sudut kemiringan sebesar α (Frans & Nurfalaq, 2020).



Gambar 2.8 Mekanisme Luncuran Blok pada Bidang

Gambar di atas menunjukkan hubungan gaya-gaya yang bekerja pada bidang miring. Gaya pendorong digambarkan sebagai gaya yang bekerja searah dengan kemiringan bidang. Sedangkan gaya normal bekerja tegak lurus terhadap permukaan bidang miring. Besarnya gaya yang dimiliki oleh benda (lereng) sebanding dengan nilai massa batuan, dan terjadinya gaya disebabkan oleh adanya

gravitasi. Apabila nilai gaya penggerak yang bekerja adalah $W \sin \alpha$, maka nilai FK dinyatakan dengan Persamaan (2.22).

$$FK = \frac{c + (\sigma - \mu) \tan \phi}{W \sin \alpha} \quad (2.22)$$

Keterangan:

c = kuat geser tanah (kN/m^2)

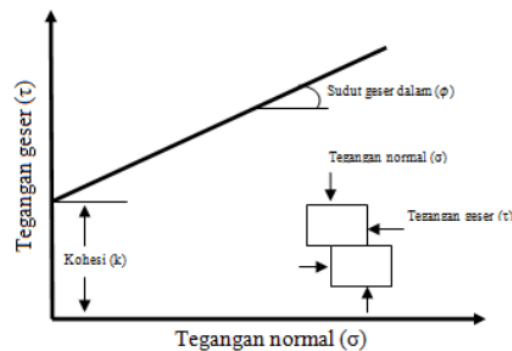
σ = tegangan total pada bidang geser (kN/m^2)

ϕ = kohesi tanah (kN/m^2)

α = sudut gesek dalam tanah ($^\circ$)

Sifat-sifat material yang relevan dengan masalah kemantapan lereng adalah sudut geser dalam (ϕ), kohesi (c), dan berat satuan (γ) batuan. Grafik pada Gambar 2.4 menjelaskan secara sederhana tentang batuan yang mengandung bidang diskontinu, di mana bekerja tegangan normal dan tegangan geser, sehingga batuan retak pada bidang diskontinu dan mengalami pergeseran (Frans & Nurfalaq, 2020). Hubungan antara kuat geser (τ) dan tegangan normal (σ) dapat dinyatakan oleh Persamaan (2.23).

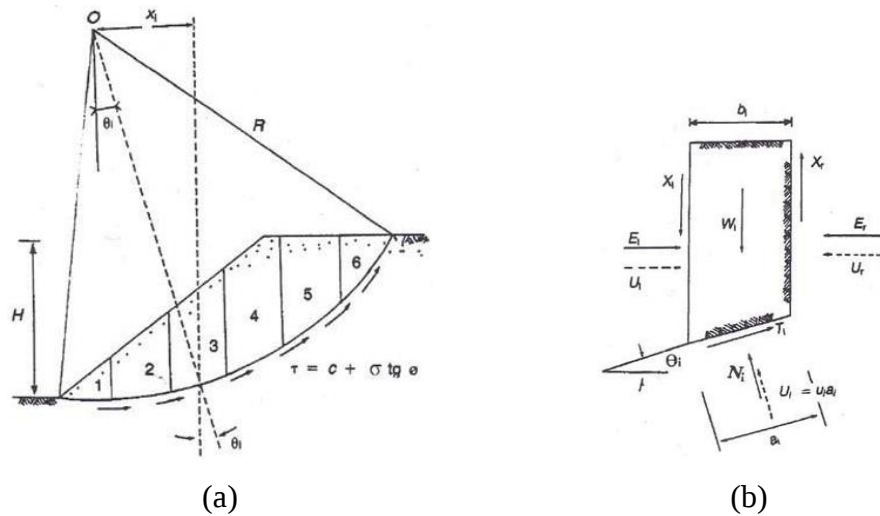
$$\tau_d = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.23)$$



Gambar 2.9 Grafik Hubungan Kuat Geser (τ) dengan Tegangan Normal (σ)

Metode irisan merupakan metode yang umum digunakan dalam menganalisa kestabilan lereng maupun timbunan. Metode ini menyediakan sarana yang efektif untuk analisa kuantitatif. Gaya normal yang bekerja pada suatu titik di lingkaran longsor, terutama sangat dipengaruhi beban massa tanah/batuan di atasnya. Pada metode irisan, massa batuan yang longsor dibagi menjadi beberapa irisan vertikal. Penyelesaian nilai faktor keamanan membutuhkan sedikitnya satu asumsi yang berkaitan dengan gaya-gaya antar irisan (*interslice forces*). Asumsi yang umum

digunakan berkaitan dengan arah, besar, dan titik kerja (*point of application*) dari gaya-gaya antar irisan. Setiap gaya yang bekerja pada masing-masing irisan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Hardiyatmo, 2010).



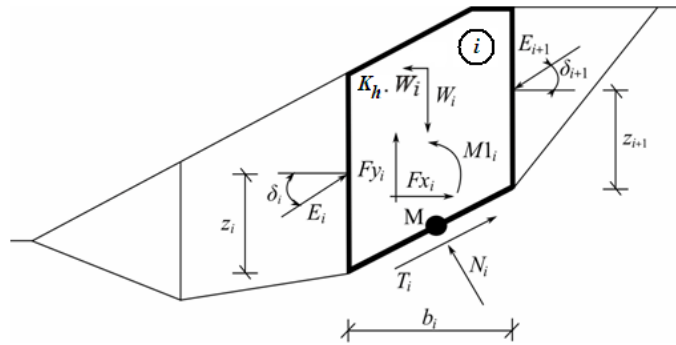
Gambar 2.10 Gaya yang Bekerja pada Irisan

Keterangan:

- X_i, X_r : Gaya geser efektif sepanjang sisi irisan.
- E_i, E_r : Gaya normal efektif sepanjang sisi irisan.
- T_i : Resultan gaya geser efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan.
- N_i : Resultan gaya normal efektif yang bekerja sepanjang dasar irisan.
- U_i, U_r : Tekanan air pori yang bekerja pada kedua sisi

Didalam satu irisan terdapat tiga persamaan kesetimbangan, yaitu kesetimbangan arah horizontal, vertikal, dan momen serta satu persamaan Mohr-Coulomb. Dengan demikian, untuk n irisan akan terdapat $4n$ persamaan. Jumlah bilangan yang *unknown* sebanyak $6n-2$, sehingga persoalan tersebut merupakan persoalan statis tak tentu tingkat $(2n-2)$. Oleh karena itu, penyelesaian persoalan tersebut memerlukan asumsi agar menjadi statis tertentu. Setiap metode perhitungan memiliki asumsi yang berbeda sehingga penyelesaian yang diperoleh pun akan berbeda antar metode.

Morgenstern-Price merupakan metode irisan umum yang dikembangkan berdasarkan kesetimbangan batas. Metode ini memerlukan keseimbangan gaya dan momen yang bekerja pada masing-masing balok. Balok dibuat dengan membagi tanah di atas permukaan longsoran dengan membagi bidang. Gaya yang bekerja pada masing-masing balok pada gambar berikut (Fine spol. s r.o., 2022).

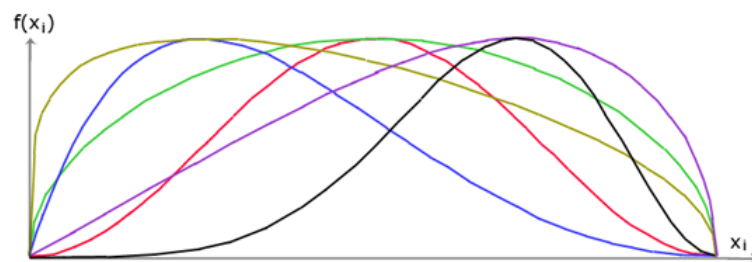


Gambar 2.11 Skema Statis Metode Morgenstern-Price

Setiap balok diasumsikan memberikan kontribusi karena gaya yang sama seperti pada metode Spencer. Asumsi berikut diperkenalkan dalam metode Morgenstern-Price untuk menghitung kesetimbangan batas gaya dan momen pada masing-masing balok.

1. Bidang pemisah antar balok selalu vertikal.
2. Garis gaya berat balok W_i melewati pusat segmen ke- i permukaan gelincir yang dipresentasikan oleh titik M .
3. Gaya normal N_i bekerja di pusat segmen ke- i permukaan gelincir, di titik M .
4. Kemiringan gaya E_i yang bekerja antara balok yang berbeda pada setiap balok (δ_i) di titik akhir permukaan gelincir $\delta = 0$.

Satu-satunya perbedaan antara metode Spencer dan Morgenstern-Price ditunjukkan pada daftar asumsi diatas. Pilihan sudut kemiringan δ_i dari gaya E_i yang bekerja di antara balok diwujudkan dengan bantuan fungsi *half-sine* salah satu fungsi dalam gambar berikut dipilih secara otomatis. Pilihan bentuk fungsi ini memiliki pengaruh kecil pada hasil akhir, tetapi pilihan yang tepat dapat meningkatkan konvergensi dari metode. Nilai fungsional *half-sine* $f(x_i)$ pada titik batas x_i dikalikan dengan parameter λ menghasilkan nilai sudut kemiringan δ_i .



Gambar 2.12 Fungsi *Half-sine*

Solusinya dapat dinyatakan pada Persamaan (2.24), (2.25), (2.26), (2.27) dan (2.28) ditunjukkan dalam metode Spencer, yaitu sebagai berikut.

Hubungan antara nilai efektif dan total gaya normal yang bekerja pada permukaan longsoran:

$$N_i = N'_i + U_i \quad (2.24)$$

Kondisi Mohr-Coulomb yang menggambarkan hubungan antara gaya normal dan gaya geser pada segmen permukaan tertentu (N_i a T_i):

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \quad (2.25)$$

Persamaan gaya keseimbangan dalam arah tegak lurus segmen ke-i permukaan longsoran:

$$N'_i + U_i - W_i \cos \alpha_i + K_h W_i \sin \alpha_i + F_y \cos \alpha_i + F_{x_i} \sin \alpha_i + E_{i+1} \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (2.26)$$

Persamaan gaya keseimbangan sepanjang segmen ke-i permukaan longsoran:

$$N'_i \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS \cos \alpha_i} - W_i \sin \alpha_i + K_h W_i \cos \alpha_i + F_{y_i} \sin \alpha_i + F_{x_i} \cos \alpha_i - E_{i+1} \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (2.27)$$

Persamaan momen keseimbangan di sekitar titik M:

$$E_{i+1} \cos \delta_{i+1} \left(Z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cos \delta_i \left(Z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \sin \delta_i \frac{b_i}{2} + M1_i - K_h W_i (y_M - y_{gi}) = 0 \quad (2.28)$$

Keterangan:

φ_i = sudut gesekan internal tanah pada segmen permukaan longsor

c_i = kohesi tanah pada segmen permukaan longsor

α_i = kemiringan segmen permukaan longsor

Modifikasi persamaan Persamaan (2.26) dan (2.27) menghasilkan rumus rekursif sebagai berikut.

$$E_{i+1} = \frac{\left[(W_i - F_{y_i}) \cos \alpha_i - (K_h W_i - F_{x_i}) \sin \alpha_i - U_i + E_i \sin(\alpha_i) \right] \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS}}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})} \quad (2.29)$$

$$\frac{\frac{b_i}{\cos \alpha_i} - (W_i - F_{y_i}) \sin \alpha_i - (K_h W_i - F_{x_i}) + E_i \sin(\alpha_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_{i+1})}$$

Rumus ini memungkinkan perhitungan semua gaya E_i yang bekerja di antara balok untuk nilai δ_i dan SF yang diberikan. Solusi ini mengasumsikan bahwa pada titik asal permukaan longsor, nilai E diketahui dan sama dengan $E_1 = 0$.

Rumus rekursif tambahan Persamaan (2.30) mengikuti Persamaan (2.28) yaitu sebagai berikut.

$$z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} [E_{i+1} (\sin \delta_{i+1} - \cos \delta_{i+1} \tan \alpha_i) + E_i (\sin \delta_i - \cos \delta_i \tan \alpha)]}{E_{i+1} \cos \delta_{i+1}} \quad (2.30)$$

$$\frac{E_i z_i \cos \delta_i - M1_i + K_h W_i (y_M - y_{gi})}{}$$

Rumus ini memungkinkan kita untuk mengitung semua lengan gaya z_i yang bekerja di antara balok untuk nilai δ_i tertentu, dengan mengetahui nilai di sebelah kiri pada titik asal permukaan slip, dimana $z_1 = 0$.

Faktor keamanan SF ditentukan dengan menggunakan proses iterasi sebagai berikut.

1. Nilai awal sudut δ_i ditetapkan berdasarkan fungsi setelah sinus ($\delta_i = \lambda \cdot f(x_i)$).
2. Faktor keamanan SF untuk nilai δ_i tertentu mengikuti Persamaan (2.29) dengan mengasumsikan nilai $E_{n+1} = 0$ di ujung permukaan longsor.
3. Nilai δ_i disediakan oleh Persamaan (2.30) menggunakan nilai E_i yang ditentukan pada langkah sebelumnya dengan persyaratan memiliki momen pada balok terakhir sama dengan nol. Nilai fungsional $f(x_i)$ sama sepanjang waktu selama iterasi, hanya parameter λ yang diiterasi. Persamaan (2.30) tidak memberikan nilai z_{n+1} karena sama dengan nol. Untuk nilai ini, Persamaan (2.28) momen kesetimbangan harus terpenuhi.
4. Langkah 2 dan 3 kemudian diulang hingga nilai δ_i (parameter λ) tidak berubah.

Solusi yang tidak stabil perlu dihindari agar proses iterasi berhasil. Ketidakstabilan tersebut terjadi pada titik-titik dimana pembagian dengan nol dalam ekspansi Persamaan (2.29) dan (2.30) terjadi. Dalam Persamaan (2.30), pembagian dengan nol terjadi untuk $\delta_i = \frac{\pi}{2}$ atau $\delta_i = \frac{-\pi}{2}$. Oleh karena itu, nilai sudut δ_i harus ditemukan dalam interval $(\frac{\pi}{2}; \frac{-\pi}{2})$.

Pembagian dengan nol pada Persamaan (2.29) muncul ketika:

$$FS = \tan \varphi_i \tan(\delta_{i+1} - \alpha_i)$$

Pemeriksaan lain yang mencegah ketidakstabilan numerik adalah verifikasi parameter m_α , kondisi berikut harus dipenuhi.

$$m_\alpha = \cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \tan \varphi_i}{FS} > 0,2$$

Oleh karena itu, sebelum iterasi dijalankan, diperlukan untuk menemukan nilai kritis tertinggi $SF_{\min}$ yang memenuhi kondisi yang disebutkan di atas. Nilai di bawah nilai kritis $SF_{\min}$ ini berada dalam area solusi yang tidak stabil, oleh karena itu iterasi dimulai dengan menetapkan SF ke nilai tepat di atas $SF_{\min}$ dan semua nilai hasil SF dari iterasi yang dijalankan lebih tinggi dari $SF_{\min}$.

Umumnya, metode yang ketat konvergenya lebih buruk daripada metode yang lebih sederhana (Bishop dan Fellenius). Contoh dengan masalah konvergensi meliputi bagian permukaan longsor yang terlalu curam, geometri yang kompleks, lonjakan muatan tambahan yang signifikan, dan sebagainya. Jika tidak ada hasil yang diperoleh, disarankan melakukan perubahan data masukan. Permukaan longsor yang kurang curam, masukkan lebih titik ke permukaan longsor atau menggunakan beberapa metode yang lebih sederhana.

Pada penelitian ini menggunakan analisis berdasarkan pemodelan Morgenstern-Price. Zhu et al., (2005), merangkum keunggulan dan kelemahan Morgenstern-Price dibandingkan dengan metode analisis lereng lainnya. Keunggulan metode Morgenstern-Price adalah sesuai untuk semua jenis material dengan segala bentuk bidang gelincir dan menghasilkan nilai analisis yang lebih stabil, serta perhitungan numerik lebih sederhana berdasarkan kondisi kesetimbangan batas. Kekurangan metode Morgenstern-Price dalam penentuan faktor penskala λ dan angka keamanan (FS) membutuhkan perhitungan rumit dan persamaan kesetimbangan batas bukan merupakan persamaan linear.

2.6 Stabilitas Bendungan terhadap Rembesan

2.6.1 Teori Rembesan

Ahli hidraulika dari Perancis itu mengadakan suatu percobaan aliran air yang melalui suatu lapisan tanah (Darcy, 1856). Karena aliran air dalam lapisan tanah mempunyai kecepatan yang kecil sekali, maka aliran tersebut dapat dianggap

sebagai aliran laminar. Darcy mendapatkan bahwa besarnya kecepatan aliran yang mengalir masuk ataupun keluar dari lapisan tanah sebanding dengan gradien hidrauliknya.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan pada hukum Darcy adalah sebagai berikut.

1. Kecepatan aliran (V_d) adalah kecepatan aliran fluida dan didefinisikan sebagai jumlah kotor aliran yang mengalir melalui luas penampang massa tanah dalam satuan waktu tertentu. Karena aliran hanya terjadi melalui pori-pori tanah, aliran air yang riil atau kecepatan rembesan (V_s) untuk suatu molekul tunggal dari air yang melalui suatu alur unik dari pori-pori tanah adalah lebih besar dibandingkan dengan kecepatan debitnya.
2. Kecepatan rembesan secara kasar adalah sama dengan kecepatan debit dibagi dengan porositas tanah.
3. Hukum Darcy hanya berlaku untuk aliran laminar (aliran-aliran air yang berdekatan saling sejajar dan lurus serta kecepatan aliran V_d adalah proporsional dengan gradien hidraulik). Hukum ini berlaku untuk kebanyakan tanah, tetapi aliran melalui kerikil kasar dan bukaan dalam batuan dapat berubah menjadi turbulen dan V_d akan proporsional dengan akar kuadrat dari i .
4. Hukum Darcy dibatasi untuk aliran melalui material yang jenuh. Aliran melalui material yang tak jenuh adalah dalam kondisi "*transient*" yang tergantung dari waktu (*time dependent*).
5. Hukum Darcy tidak cocok untuk aliran melalui retakan atau rekahan dari batu atau tanah.

Hukum Darcy ditulis sebagai berikut.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.31)$$

$$Q = \frac{k (h_1 - h_2)}{L} A \quad (2.32)$$

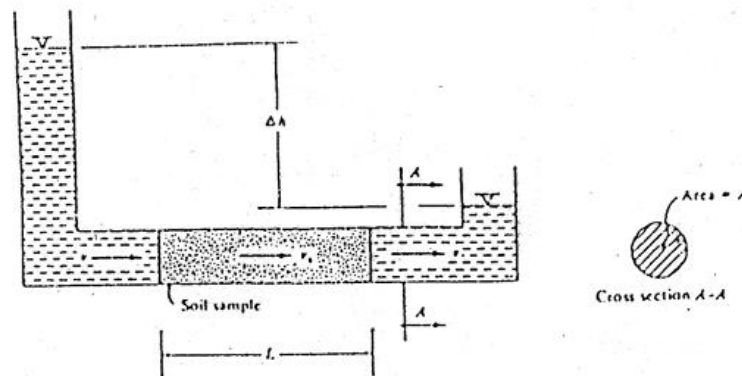
$$\frac{Q}{A} = v = k \cdot i \quad (2.33)$$

Keterangan:

$$Q = \text{volume aliran air (cm}^3\text{/detik)}$$

- k = konstanta yang disebut koefisien permeabilitas (cm/detik)
 i = garidien hidrolik
 A = luas penampang tanah (cm²)
 $h_1 - h_2$ = perbedaan tinggi muka air pada kedua ujung contoh tanah (cm)
 L = panjang lapisan tanah rembesan (cm)
 V = kecepatan aliran (cm³/detik)

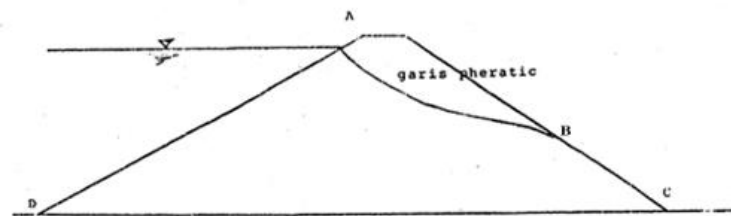
Berikut ini merupakan aliran didalam butiran tanah menurut Darcy (PUPR, 2017).



Gambar 2.13 Aliran Air Didalam Butiran Tanah

2.6.2 Garis Phreatic dan Flownet

Jaringan aliran untuk bendungan tanah yang fondasinya berupa tanah yang kedap air dapat digambarkan mengikuti prosedur yang telah dibicarakan terdahulu, hanya saja haruslah diperhatikan beberapa hal sebagai berikut (PUPR, 2017).

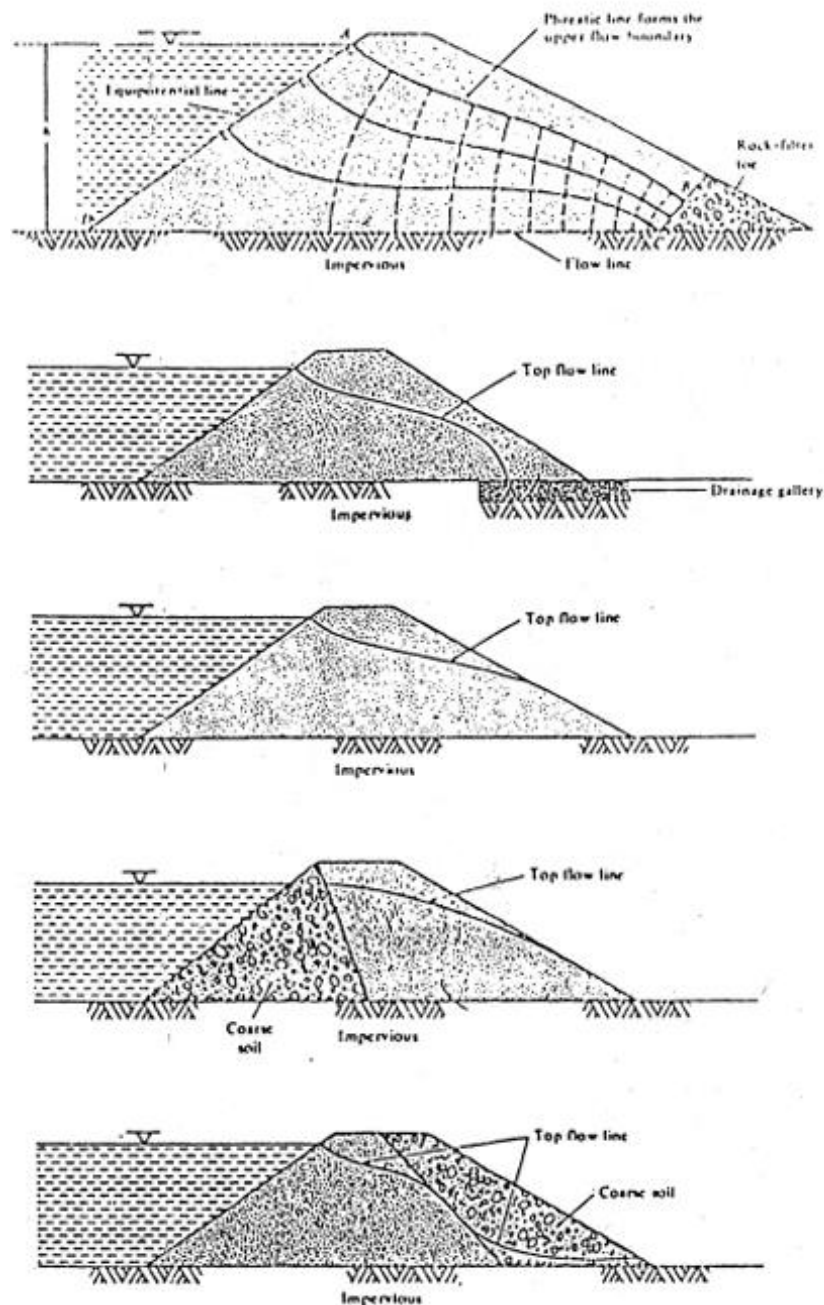


Gambar 2.14 Jaringan Aliran pada Bendungan yang Homogen

1. Dinding bendungan yang berbatasan dengan air merupakan garis ekipotensial batas (garis AB).
2. Dasar tempat bendungan tanah yang diletakan di atas tanah yang kedap air merupakan garis aliran batas (garis DC).

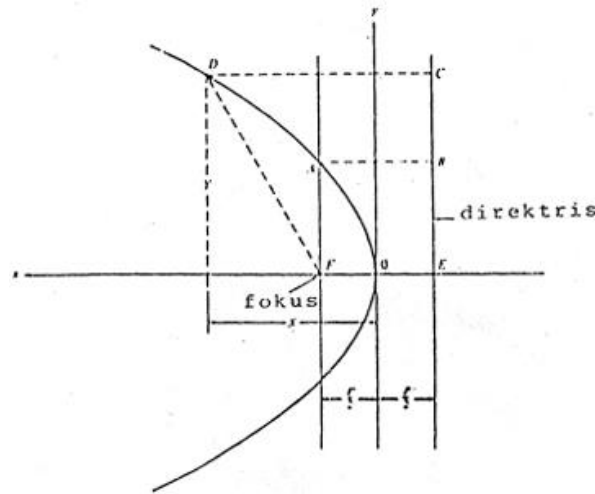
3. Garis AB merupakan garis aliran paling atas, disebut juga garis *phreatic* atau *top flow line*. Rembesan pada bendungan terjadi di bawah garis ini. Garis ini juga merupakan batas daerah yang jenuh dan yang kering. Batas garis *phreatic* berbeda-beda sehubungan dengan ada atau tidaknya filter, dan dimana letak dari filter tersebut.

Gambar di bawah ini menunjukkan bentuk lain dari penampang melintang bendungan tanah beserta garis *phreatic*-nya (PUPR, 2017).



Gambar 2.15 Macam-macam Garis Freatik pada Bendungan Urugan Tanah

Penggambaran garis aliran paling atas atau *top flow line* dapat dilakukan menurut Cassagrande, yakni garis *phreatic*. Garis ini berbentuk parabola, seperti digambarkan di bawah ini (PUPR, 2017).



Gambar 2.16 Penentuan Titik Fokus dan Direktris untuk Pembuatan Garis Freatik

Sesuai gambar di atas dapat dilihat karakteristik dasar dari parabola, yaitu bahwa setiap titik pada parabola mempunyai jarak yang sama ke titik fokus F dan ke garis direktris CE, sehingga $AF = AB$, dan $DF = DC$.

Titik O merupakan titik sumbu koordinat x y.

$$DC = \frac{p}{2} + x \quad (2.34)$$

$$(FD^2) = y^2 + \left(x - \frac{p}{2}\right)^2 \quad (2.35)$$

Karena $DF = DC$, maka:

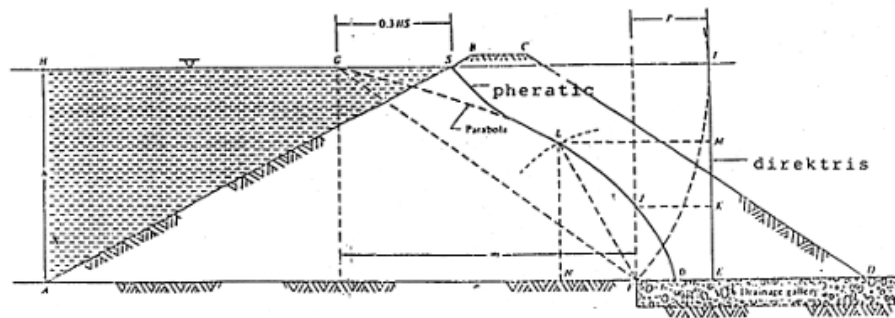
$$\left(\frac{p}{2} + x\right)^2 = y^2 + \left(x - \frac{p}{2}\right)^2 \quad (2.36)$$

$y^2 = 2px$, dimana $2p$ merupakan parameter dari parabola.

2.6.2.1 Cara Menggambar Garis *Phreatic* pada Bendungan Tanah dengan Filter Horizontal Menurut Metoda Cassagrande

Prosedur penggambaran adalah sebagai berikut.

1. Ambil $CS = 1/3 HS$.
2. Titik fokus (titik F) diasumsikan sebagai bagian ujung dari filter. Dari titik G sebagai pusat lingkaran dibuat busur lingkaran dengan radius = GF yang memotong perpanjangan garis HS di I. Diperoleh $GF = GI$ (sifat parabola) (PUPR, 2017).



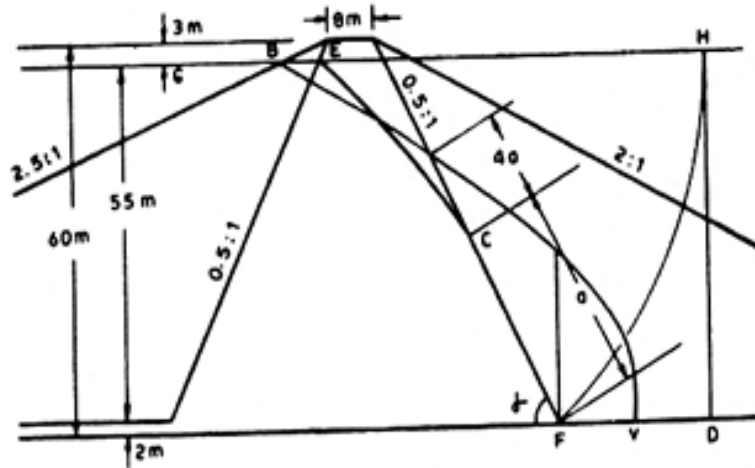
Gambar 2.17 Penggambaran Garis Freatik pada Suatu Bendungan Tanah Homogen

3. Garis vertikal melalui I merupakan garis direktris (garis EI).
4. Titik 0 tengah-tengahnya F dan E. Titik 0 dan G terletak pada parabola.
5. Tentukan beberapa titik bantu lainnya dengan mengingat sifat parabola yaitu jarak setiap titik ke fokus dan ke garis bisektris adalah sama. Caranya sebagai berikut:
 - a. Ambil sembarang titik N pada dasar bendungan dan tarik garis vertikal melalui N.
 - b. Busur lingkaran yang dibuat dari titik F dengan radius = NE memotong garis vertikal melalui N di L. $LF = NE = LM$, berarti L terletak pada parabola.
 - c. AB garis ekipotensial batas, garis *phreatic* sebagai garis aliran batas harus memotong garis ekipotensial batas secara tegak lurus di titik S.

Dengan menggunakan garis freatik dan garis batas lainnya, jaringan aliran dapat diselesaikan dan debit rembesan dapat dihitung.

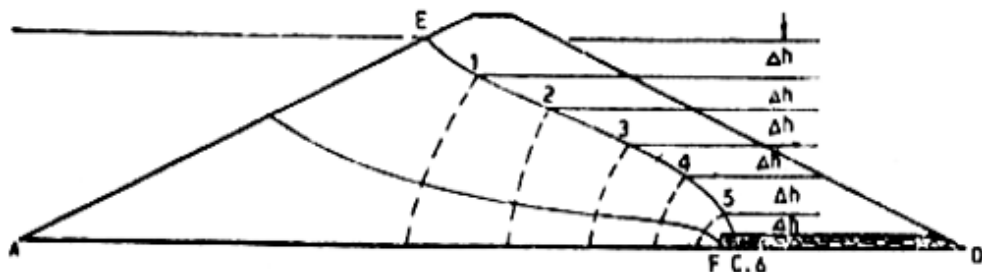
Untuk sudut kemiringan lereng (α) $< 30^\circ$, dapat digunakan cara Saffernak & Iterson, sebagai berikut:

- a. Tarik garis vertikal melalui titik B dan memotong garis perpanjangan lereng hilir di titik 1.
- b. Tarik garis horizontal melalui B dan memotong lereng hilir di titik 2.
- c. Buat garis semi-lingkaran melalui titik-titik 1 dan D sebagai garis tengahnya.
- d. Buat garis D-3 = D-2 dengan melingkarkan dengan jangka melalui titik D.
- e. Buat garis 1-C = 1-3 dengan melingkarkan dengan jangka melalui titik 1.



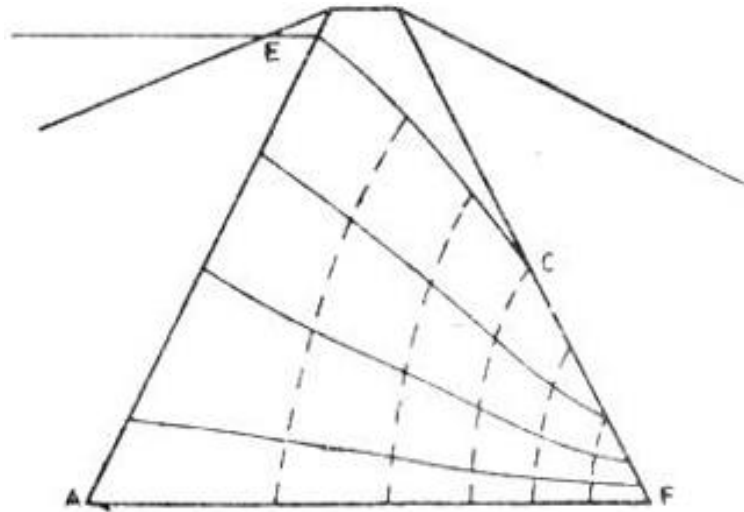
Gambar 2.20 Penggambaran Garis Freatik untuk $(\alpha) > 30^\circ$ Menurut Cassagrande

Penggambaran *flownet* melalui tubuh bendungan dapat dilakukan dengan menggambarkan garis-garis aliran dan garis-garis ekuipotensial yang saling tegak lurus dengan cara coba-coba (*trial and error*) seperti gambar berikut (PUPR, 2017).



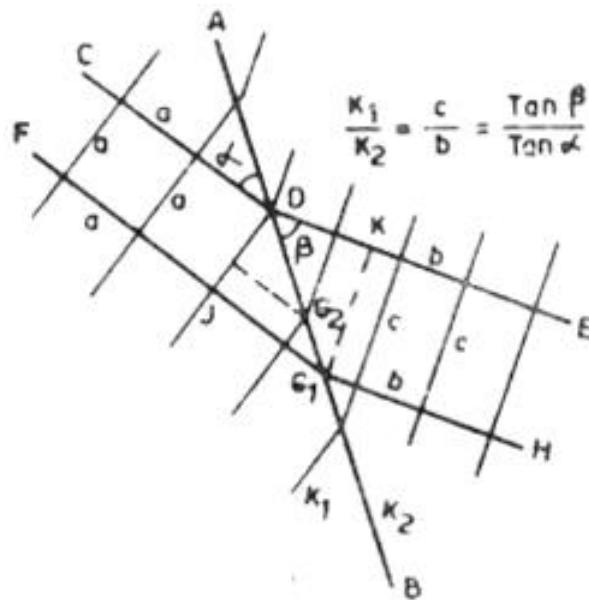
Gambar 2.21 *Flownet* Tubuh Bendungan Urugan Tanah

Sedangkan untuk bendungan jenis zonal, *flownet* pada zona inti adalah seperti gambar di bawah. Garis AE adalah merupakan permukaan ekuipotensial. Garis freatik EC dibuat seperti yang telah dijelaskan dan merupakan batas atas dari *flownet*. Di sepanjang garis preatik ini tekanan pori adalah sama dengan tekanan atmosfer dan sebagai garis equipressure. Potential drops di sepanjang garis ini adalah hanya diakibatkan oleh turunnya posisi tinggi tekanan (*head*). Potential drop Δh dari garis ekuipotensial adalah sama. Garis-garis ekuipotensial tersebut akan memotong garis preatik dengan Potential drop Δh yang sama (PUPR, 2017).

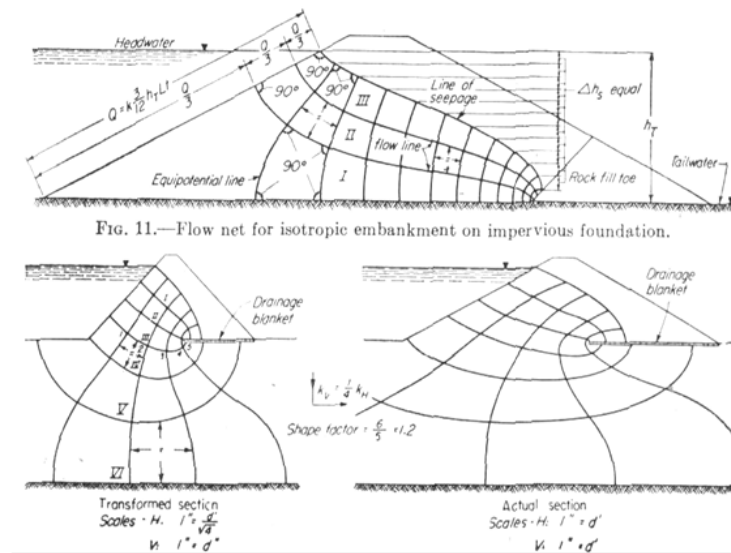


Gambar 2.22 *Flownet* pada Zona Inti Bendungan Tipe Zonal

Pada lapisan tanah isotropis dengan koefisien permeabilitas yang berbeda, garis aliran dari *flownet* akan berbelok/menyimpang. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.23 di bawah, garis aliran akan menyimpang pada garis batas perbedaan permeabilitas, proporsional dengan rasio $k_1/k_2 = c/b = \tan\beta/\tan\alpha$, dimana $k_1 < k_2$ (PUPR, 2017).

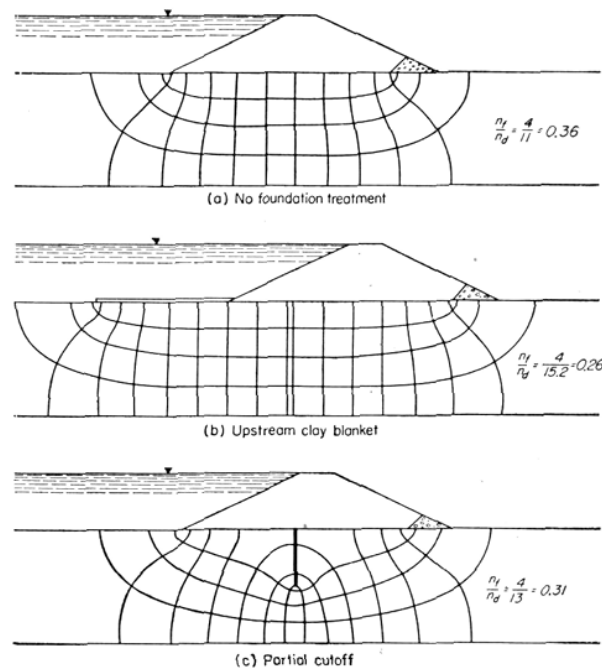


Gambar 2.23 Penyimpangan Garis Aliran Karena Perbedaan Permeabilitas



Gambar 2.24 *Flownet* Melalui Tubuh Bendungan Isotropis dan Fondasi Kedap Air (Atas) serta Melalui Bendungan dan Fondasi yang Berlapis (Bawah)

Sedangkan untuk *flownet* melalui fondasi bendungan yang porous dengan berbagai perbaikan fondasinya ditunjukkan seperti gambar berikut (PUPR, 2017).

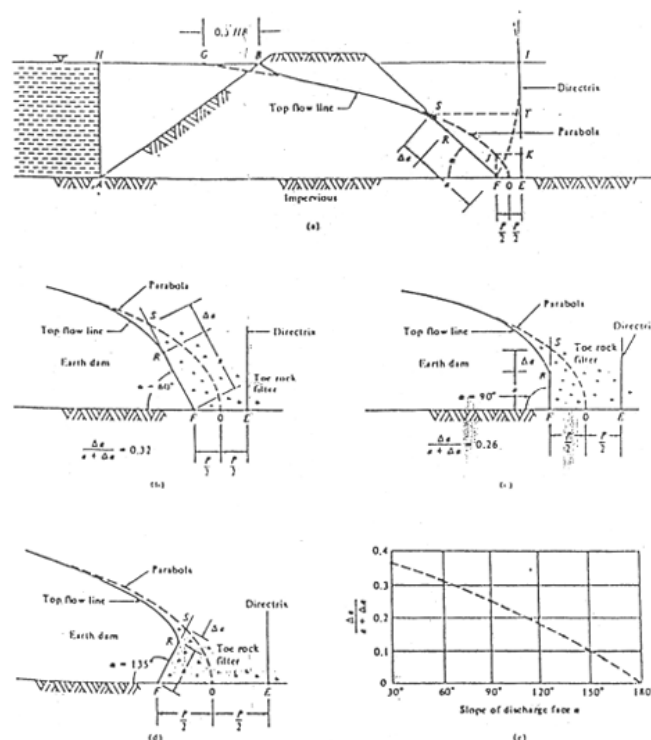


Gambar 2.25 Pengaruh Perbaikan Fondasi terhadap Konfigurasi *Flownet*
Dari gambar 2.25 di atas, bila tanpa dilakukan perbaikan fondasi (a), debit rembesan dapat dihitung, yakni sebesar $Q = k \cdot h (N_f/N_d)$. Bila dilakukan

perbaikan fondasi dengan memasang *clay blanket* di bagian hulu (b), N_d akan bertambah dan debit rembesan melalui fondasi akan berkurang. Demikian juga bila dilakukan perbaikan dengan *partial cut off* yang dipasang vertikal (c), N_d juga akan bertambah dan debit rembesan yang keluar dari kaki bendungan juga akan berkurang. Dari uraian diatas, jelas bahwa perbaikan fondasi yang dilakukan adalah untuk mengurangi debit rembesan yang keluar sekaligus juga memperkecil *exit gradient*.

2.6.2.2 Garis Freatik untuk Beberapa Bentuk Kaki Drainase

Bentuk akhir dari parabola sebagai garis preatik harus dimodifikasi sesuai dengan kondisi akhir pengaliran yang tersedia. Gambar 2.26 di bawah menunjukkan beberapa konfigurasi yang mungkin ditemui. Titik fokus F adalah perpotongan antara garis aliran batas bawah dengan mulut pengaliran. Sudut α adalah sudut antara mulut pengaliran dan garis horizontal, diukur searah dengan jarum jam. a = jarak pergeseran dari parabola ke garis freatik (RS) yaitu a = jarak dari titik pergeseran R ke fokus F. Cassagrande memberikan korelasi antara $a/(a + a)$ seperti pada Gambar 2.26e (PUPR, 2017).



Gambar 2.26 Konfigurasi Garis Freatik

Cara menggambar nya adalah sebagai berikut:

1. Tentukan titik fokus F.

Hukum Darcy juga digunakan untuk mengatasi masalah-masalah rembesan dan drainase pada bendungan urugan. Contoh adalah menentukan permeabilitas yang diperlukan atau penentuan drainase miring atau horisontal dari suatu bendungan. Beberapa contoh garis preatik melalui tubuh bendungan urugan tanah dengan berbagai drainasi kaki, adalah seperti gambar-gambar di bawah (PUPR, 2017).

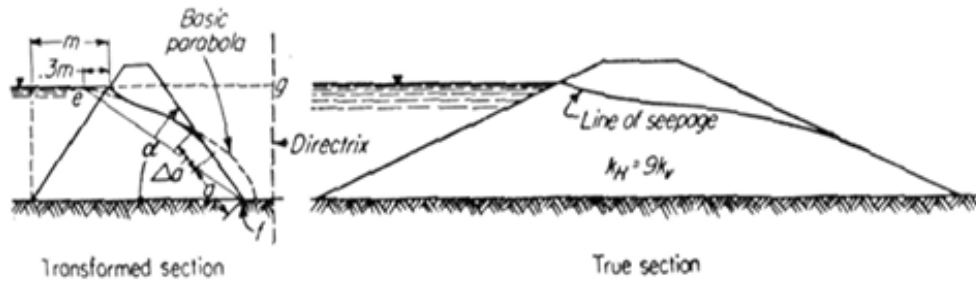


FIG. 3.—Position of line of seepage in uniform embankment on impervious foundation.

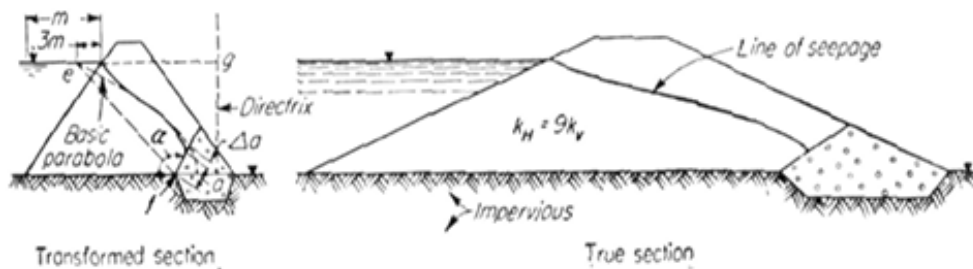
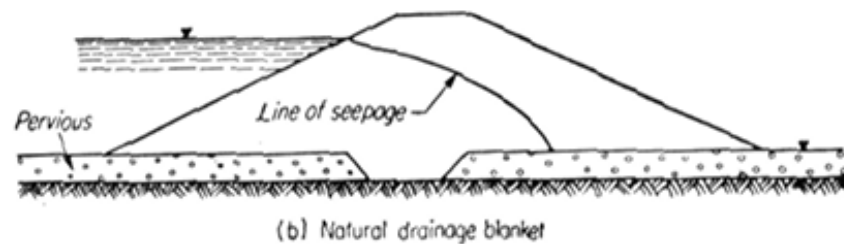
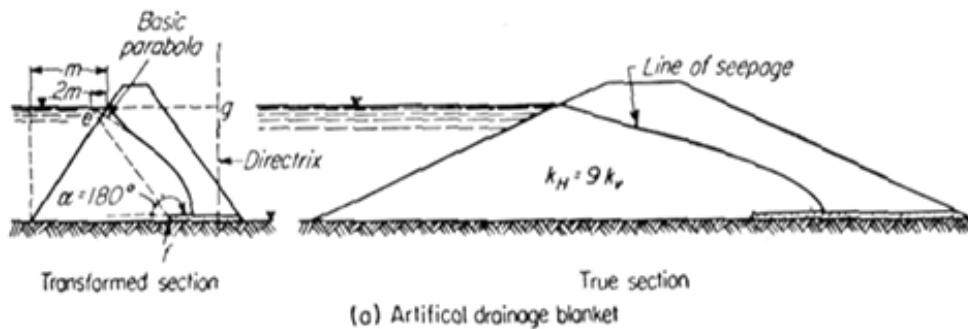
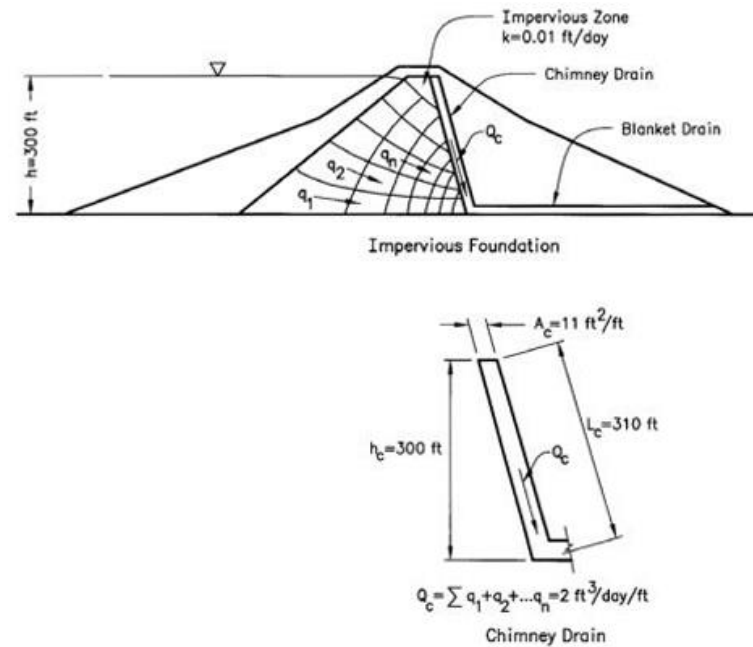


FIG. 4.—Position of line of seepage in uniform embankment with rock-fill toe.



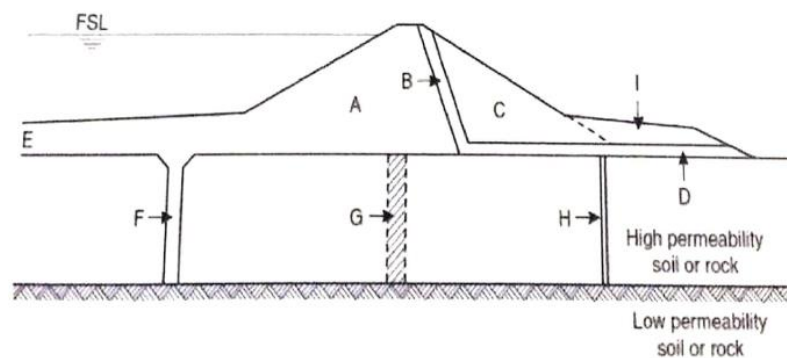
Gambar 2.28 Garis Freatik Melalui Tubuh Bendungan dengan Berbagai Drainase Kaki



Gambar 2.29 Desain *Chimney Drain* Menggunakan Hukum Darcy

2.6.4 Metode Penanganan Rembesan

Stabilitas bendungan urugan sangat dipengaruhi oleh adanya rembesan air. Maka dari itu, penting adanya meminimalkan bahaya akibat rembesan pada zonasi bendungan seperti pada Gambar 2.8 (Nugroho, 2024).



Gambar 2.30 Rancangan Bendungan Urugan Guna Meminimalisir Bahaya Rembesan dan Erosi

Keterangan:

- Titik A merupakan zona inti yang memiliki permeabilitas tanah rendah.
- Titik B merupakan filter cerobong dengan bagian yang memotong tubuh bendungan untuk mengatasi peristiwa erosi internal dan mengontrol tekanan air pori tanah.

- c. Titik C merupakan zona hilir yang berfungsi sebagai stabilitas bendungan dan mengontrol tekanan air pori jika, permeabilitasnya lebih tinggi dari zona inti dan zona filter.
- d. Titik D merupakan filter saluran horizontal yang berguna dalam mengalirkan air yang tertangkap di saluran filter cerobong.
- e. Titik E merupakan selimut permeabilitas rendah di sisi hulu (*upstream low permeability blanket*) yang berfungsi untuk memperpanjang alur rembesan air dan juga mengurangi debit aliran rembesan dan *exit gradient*.
- f. Titik G merupakan grouting yang berfungsi sebagai pengurang peristiwa rembesan dan *exit gradient*.
- g. Titik H merupakan sumur pengering tekanan (*pressure relief wells*) yang berguna dalam membantu keluarnya air dari saluran horizontal sehingga tekanannya berkurang.
- h. Titik I merupakan tumit pemberat (*weight berm*) yang berfungsi untuk meningkatkan stabilitas tanah lereng di hulu dan mengatasi peristiwa *boiling*.

Dalam penggunaan pengamanan rembesan, disesuaikan dengan kondisi bendungan tersebut. Seperti pada bendungan urugan batu yang inti timbunannya berupa tanah *clay* atau lempung dan diletakan diatas pondasi batuan yang kuat sehingga tahan akan bahaya erosi. Akan tetapi, pada pekerjaannya tetap saja membutuhkan pekerjaan *grouting* namun tanpa saluran filter horizontal.

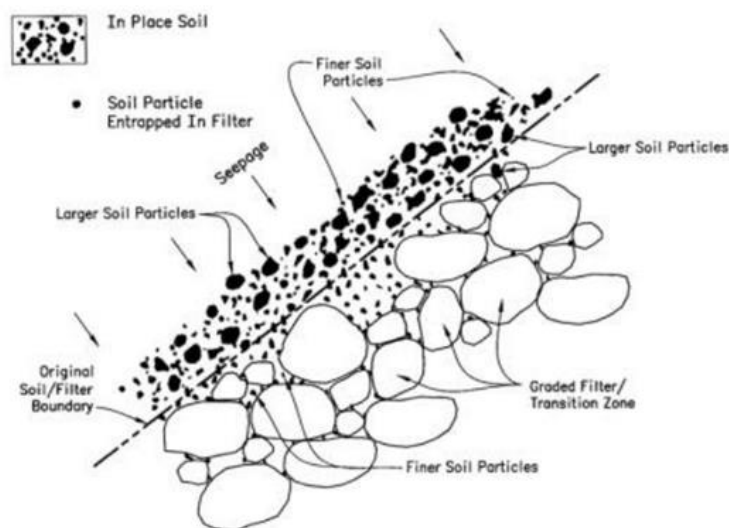
2.6.5 Pengendalian Rembesan

Penting adanya mengerti metode yang digunakan guna mengendalikan infiltrasi dan sangkutannya dengan bendungan dan bangunan pendukungnya. Pada dasarnya, cara mengoptimalkan pengendalian infiltrasi sebagai berikut (Nugroho, 2024).

1. Timbunan filter dan transisi.
2. Metode pengurangan rembesan.
3. Berbagai macam drainase.
4. Perbaikan pada fondasi dan tumpuan.

2.6.5.1 Lapisan Filter

Lapisan filter berguna untuk melindungi terbawanya butiran material terhadap rembesan melalui tubuh dan fondasi bendungan, dan pada waktu bersamaan membiarkan air rembesan keluar tanpa memicu tekanan air pori berlebih. Lapisan filter tersebut dibuat secara tersendiri, atau saluran pembuang tersebut juga didesain sebagai filtrasi dan sekaligus untuk mengalir. Debit infiltrasi dan gradasi material urugan yang harus dihindari akan menentukan suatu rancangan penyaring yang diharapkan. Konsep dasar dari fungsi filter sebagai pelindung luruhnya gradasi material tanah digambarkan sebagai berikut (PUPR, 2017).

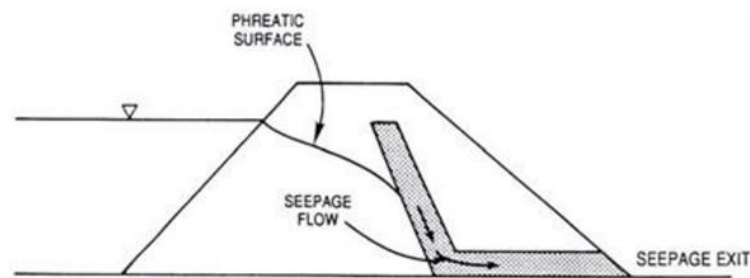


Gambar 2.31 Lapisan Filter Sebagai Pelindung Terhadap *Piping*

Lapisan filter juga digunakan untuk piping, melainkan juga untuk mengatasi masalah erosi internal. Oleh karenanya, air yang keluar adalah merupakan faktor sekunder untuk menyaring partikel tanah melalui retakan dan bangunan struktur bangunan pelengkap dan timbunan atau fondasi.

Lapisan filter yang dirancang serta dibangun dengan sesuai dapat “menangkap” rembesan yang terjadi pada timbunan. Rembesan dapat mengalir dengan bebas menuju saluran pembuang yang aman pada tepi bawah hilir timbunan tanpa membawa material tanah. Jika rembesan melalui retakan infiltrasi, retakan tersebut harus berakhir di permukaan sehingga rancangan hanya memertimbangkan rembesan melalui material tanah. Apa bila suatu gradasi filter memenuhi persyaratan dasar, *piping* tidak akan terjadi, walaupun kemiringannya besar. Sebagai contoh lapisan filter harus cukup lebar, guna mengantisipasi retakan

berkelanjutan serta terdapat kapasitas yang cukup untuk mengalirkan rembesan tanpa memicu tekanan air pori berlebihan (PUPR, 2017).

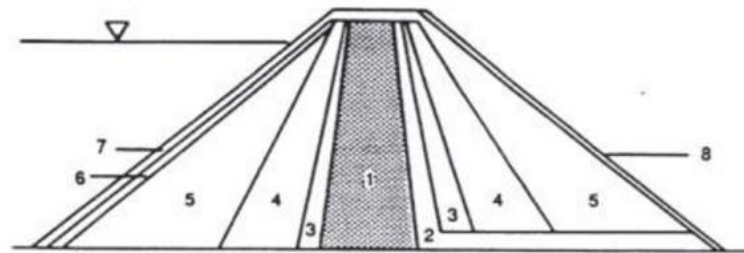


Gambar 2.32 Lapisan Filter yang Dapat Menangkap Air Rembesan dengan Baik

2.6.5.2 Meminimalisir Rembesan

Metode ini digunakan untuk mengurangi tekanan air yang tinggi pada waduk yang merembes melewati timbunan. Dengan cara sebagai berikut (PUPR, 2017).

- Desain bangunan bendungan tanah homogen dengan kemiringan yang relatif sangat landai.
- Desain zona inti condong ke arah hulu.
- Desain bendungan dengan area *core* di tengah.
- Struktur dinding inti terbuat dari beton atau tanah bentonit yang plastis.



Gambar 2.33 Zona Inti Kedap di Tengah

Keterangan:

- Inti
- Fiter atau *drain*
- Transisi
- Timbunan
- Area pelindung luar
- Transisi di hulu
- Area pelindung stabilitas hulu (*typically riprap*)
- Area pelindung stabilitas hilir

2.6.6 Stabilitas Bendungan terhadap Bahaya *Piping*

Rembesan melalui tubuh bendungan, fondasi, tumpuan, dan tepian/bukit sekeliling waduk harus terkendali, sehingga tidak boleh terjadi gaya angkat (*uplift*) yang berlebihan (Hidayawan & Hikmatyar, 2022). Bila terjadi tekanan rembesan ke atas yang terjadi dalam tanah sama dengan i_c , maka tanah akan pada kondisi mengapung. Keadaan semacam ini dapat berakibat terangkutnya butir-butir tanah halus, sehingga terjadi pipa-pipa yang berbentuk rongga-rongga, dapat mengakibatkan fondasi bangunan mengalami penurunan, hingga mengganggu stabilitas bangunan (Hardiyatmo, 2002).

Keamanan bendungan urugan tanah terhadap *piping* dapat dihitung berdasarkan rumus berikut.

$$SF = \frac{I_c}{I_e} \geq 4 \quad (2.37)$$

$$I_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2.38)$$

Keterangan:

I_c = gradien keluaran kritis

I_e = gradien keluaran dari hasil analisis rembesan atau pembacaan instrumen piezometric

γ' = berat isi efektif (terendam) (t/m^3)

γ_w = berat isi air (t/m^3)

G_s = berat jenis

e = angka pori

2.7 Stabilitas Bendungan Akibat Beban Gempa

2.7.1 Kriteria Keamanan Minimum Stabilitas Bendungan Tipe Urugan

Pada analisis stabilitas lereng, faktor keamanan diartikan sebagai rasio dari total tahanan geser tanah yang diperbolehkan terhadap tegangan geser tanah. Keamanan dibutuhkan guna mempertahankan keseimbangan sepanjang permukaan bidang yang memiliki berpotensi terhadap tergelincir atau longsor. Faktor keamanan minimum pada desain stabilitas lereng ditentukan dengan mengutamakan dasar pertimbangan faktor-faktor pengawasan terhadap tekanan air

pori dan asumsi kuat geser material. Berikut ini merupakan faktor keamanan minimum untuk stabilitas bendungan tipe urugan menurut (SNI 8064, 2016).

Tabel 2.14 Persyaratan Faktor Keamanan Minimum untuk Stabilitas Tipe Urugan

No.	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa*
1	Selesai konstruksi tergantung: 1. Jadwal konstruksi 2. Hubungan antara tekanan air pori dan waktu Lereng U/S dan D/S Dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 50% koefisien gempa desain	Efektif	Peningkatan tekanan air pori pada urugan dan fondasi dihitung menggunakan data laboratorium dan pengawasan instrumen	1,30	1,20
			Idem hanya tanpa pengawasan instrumen	1,40	1,20
			Hanya pada urugan tanpa data laboratorium dan dengan/tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
		Total	Tanpa pengawasan instrumen	1,30	1,20
2	Aliran langgeng tergantung: 1. Elevasi muka air normal sebelah udik 2. Elevasi muka air sebelah hilir Lereng U/S dan D/S dengan gempa tanpa kerusakan digunakan 100% koefisien gempa desain	Efektif	Dari analisis rembesan	1,50	1,20
3	Pengoperasian waduk tergantung: 1. Elevasi muka air maksimum di udik 2. Elevasi muka air minimum di udik (<i>dead storage</i>) Lereng U/S harus dianalisis untuk kondisi surut cepat	Efektif	Surut Cepat dari elevasi muka air normal sampai elevasi muka air minimum. Lereng U/S dan D/S	1,30	1,10
			Surut cepat dari elevasi muka air maksimum sampai elevasi muka air minimum, pengaruh gempa diambil 0% dari koefisien gempa desain	1,30	-
4	Kondisi darurat tergantung: 1. Pembuntuan pada sistem drainase 2. Surut cepat karena penggunaan air	Efektif	Surut cepat dari elevasi muka air maksimum sampai elevasi terendah bangunan pengeluaran, pengaruh gempa diabaikan	1,20	-

No.	Kondisi	Kuat Geser	Tekanan Air Pori	FK Tanpa Gempa	FK dengan Gempa*
	melebihi kebutuhan 3. Surut cepat keperluan darurat				

**Catatan : Periksa standar tentang metode analisis stabilitas lereng dinamik bendungan tipe urugan.*

Pembebanan gempa pada analisis ini menggunakan metode koefisien gempa termodifikasi. Dalam metode koefisien gempa termodifikasi koefisien gempa desain pada tubuh bendungan yang merupakan fungsi dari kedalaman, dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$K_0 = \alpha_2 \times k_h \quad (2.39)$$

Keterangan:

K_0 = koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah

α_2 = koreksi pengaruh jenis struktur = 0,5 (untuk bendungan tipe urugan)

k_h = koefisien gempa dasar yang tergantung periode ulang T

Pada analisis stabilitas lereng ini koefisien gempa pada kedalaman bidang gelincir Y dari puncak bendungan yang berbeda-beda. Analisis dilakukan pada tinjauan $Y = 0,25 H$; $0,50 H$; $0,75 H$; dan H (tinggi bendungan) dengan menggunakan K_h pada periode ulang sesuai yang disyaratkan. Koefisien gempa rata-rata K pada Y yang berbeda dihitung menggunakan persamaan berikut.

Untuk $0 < Y/H \leq 0,4$

$$k = K_0 \times (2,5 - 1,85 \times Y/H) \quad (2.40)$$

Untuk $0 < Y/H \leq 1,0$

$$k = K_0 \times (2,0 - 0,60 \times Y/H) \quad (2.41)$$

2.7.2 Perhitungan Klasifikasi Kelas Risiko Hazard

Risiko pada analisis stabilitas bendungan bertipe urugan terdapat empat faktor, di antaranya kapasitas waduk, tinggi bendungan, kebutuhan atas evakuasi, dan kerusakan di hilir. Kemudian, setiap faktor risiko diklasifikasi kedalam empat kondisi risiko, kondisi risiko ekstrem, kondisi risiko tinggi, kondisi risiko moderat, dan kondisi risiko rendah dengan pemberian nilai bobot. Faktor risiko dihitung untuk menentukan kelas beban gempa. Besarnya risiko bahaya bendungan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$FR_{tot} = FR_k + FR_t + FR_e + FR_h \quad (2.42)$$

Keterangan:

FR_{tot} = faktor risiko total

FR_k = faktor risiko pengaruh kapasitas waduk

FR_t = faktor risiko pengaruh tingi bendungan

FR_e = faktor risiko kebutuhan evakuasi

FR_h = faktor risiko tingkat kerusakan di hilir, didapat dari Pedoman Klasifikasi Bahaya Bendungan

Dalam analisis penentuan kelas beban gempa mempertimbangkan kriteria faktor faktor risiko di atas dan disajikan pada Tabel 2.14 (Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, 2004).

Tabel 2.15 Faktor Risiko untuk Evaluasi Keamanan Bendungan

Faktor Risiko	Angka Bobot Dalam Kurung			
	Ekstrim	Tinggi		Rendah
Kapasitas ($10^6 m^3$) (FR_k)	> 100 (6)	100 – 1,25 (4)		1,00 – 0,125 (2) < 0,125 (0)
Tinggi (m) (FR_t)	> 45 (6)	45 – 30 (4)		30 – 15 (2) < 15 (0)
Kebutuhan evakuasi (jumlah orang) (FR_e)	> 1.000 (12)	1.000 – 100 (8)		100 – 1 (4) 0 (0)
Tingkat kerusakan hilir (FR_h)	Sangat Tinggi (12)	Tinggi (10)	Agak Tinggi (8)	Moderat (4) Tidak Ada (0)

Berdasar pada akumulasi faktor risiko total, ditentukanlah kelas risiko untuk desain bendungan menurut Tabel 2.15. Dengan kelas risiko, kriteria beban gempa untuk desain bendungan dapat ditentukan berdasarkan Tabel 2.16 (Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, 2004).

Tabel 2.16 Kelas Risiko Bendungan dan Bangunan Air

Kelas Risiko Total	Kelas Risiko
(0 – 6)	I (Rendah)
(7 – 18)	II (Moderat)
(19 – 30)	III (Tinggi)
(31 – 36)	IV (Ekstrim)

Tabel 2.17 Kriteria Beban Gempa untuk Desain Bendungan

Kelas Risiko dengan Masa Guna	Persyaratan Tanpa Kerusakan		Persyaratan Diperkenankan Ada Kerusakan Tanpa Keruntuhan	
	T (Tahun)	Metode Analisis	T (Tahun)	Metode Analisis
IV N = 100	100 – 200 $ad \geq 0.1 \text{ g}$	Koef. Gempa	10.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
III N = 100	50 – 100 $ad \geq 0.1 \text{ g}$	Koef. Gempa	10.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
II N = 100	50 – 100 $ad \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. Gempa	10.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik
I N = 100	50 – 100 $ad \geq 0,1 \text{ g}$	Koef. Gempa	10.000 (MDE)	Koef. Gempa atau Dinamik