

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Umum

pondasi adalah bagian bawah dari tubuh bendungan dan bersama dengan tubuh bendungan berfungsi untuk menampung air. Pondasi terdiri dari lapisan tanah atau batuan asli yang dipilih sebagai penopang tubuh bendungan beserta seluruh bangunan pelengkapannya. Agar fungsi sebagai penampung air baik dan bendungan *stabil* maka pondasi harus baik dan memenuhi persyaratan tertentu.

Pondasi sebagai penopang tubuh bendungan harus memenuhi (tiga) persyaratan terpenting yaitu:

1. Mempunyai daya dukung yang mampu menahan bahan dan tubuh bendungan dalam berbagai kondisi.
2. Mempunyai kemampuan untuk menghambat aliran filtrasi yang memadai, sesuai dengan fungsinya sebagai penahan air.
3. Mempunyai ketahanan terhadap gejala-gejala sufosi (*piping*) dan sembulan (*boiling*) yang disebabkan oleh aliran filtrasi yang melalui lapisan – lapisan pondasi tersebut.

Sesuai dengan jenis batuan yang membentuk lapisan pondasi, maka secara umum pondasi bendungan urugan dibedakan dalam 3 jenis yaitu:

1. Pondasi batuan
2. Pondasi pasir atau kerikil
3. Pondasi tanah

Apabila pondasi tidak memenuhi persyaratan bisa dilakukan perbaikan-perbaikan sepanjang perbaikan tersebut layak dari segi teknis maupun ekonomis.

2.2. Investigasi Geologi

Tujuan penelitian dan penyelidikan (investigasi) geologi adalah untuk mengetahui kekuatan pondasi, kondisi batuan pondasi, kondisi rembesan dan kemampuan bendungan untuk menyimpan air dalam jangka waktu lama. Pada umumnya investigasi geologi dan mekanika tanah dapat dilaksanakan oleh jasa konstruksi (kontraktor / konsultan) yang sama meskipun ada beberapa perbedaan yang nantinya dari persamaan dan perbedaan metode / teori dasar investigasi mekanika tanah dan geologi akan dibandingkan dan di diskusikan (Soedibyo, 2003, p.182).

❖ Persamaan:

- a. Mesin bor yang digunakan adalah sama, meskipun untuk investigasi geologi dengan kedalaman yang berbeda.
- b. Pengambilan contoh tanah asli dengan alat yang sama
- c. Investigasi untuk daya dukung pondasi bendungan
- d. Investigasi untuk rembesan bendungan

❖ Perbedaan:

- a. Penyelidikan (investigasi) mekanika tanah digunakan untuk mengetahui bahan konstruksi sedangkan investigasi geologi digunakan untuk mengetahui kondisi batuan pondasi.
- b. Investigasi mekanika tanah dilakukan oleh disiplin ilmu Teknik Sipil, sedangkan geologi dilakukan oleh disiplin ilmu Teknik Geologi, sehingga terkadang ada perbedaan penafsiran.
- c. Investigasi geologi mempelajari waktu / jaman dan kemungkinan sebab terbentuk batuan, sedangkan dalam mekanika tanah tidak dipelajari.

2.3. Klasifikasi Tanah

Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem pengaturan beberapa jenis tanah yang berbeda – beda tapi mempunyai sifat yang serupa kedalam kelompok dan sub-kelompok berdasarkan pemakaiannya.

Sistem klasifikasi tanah didasarkan pada dua pendekatan, antara lain:

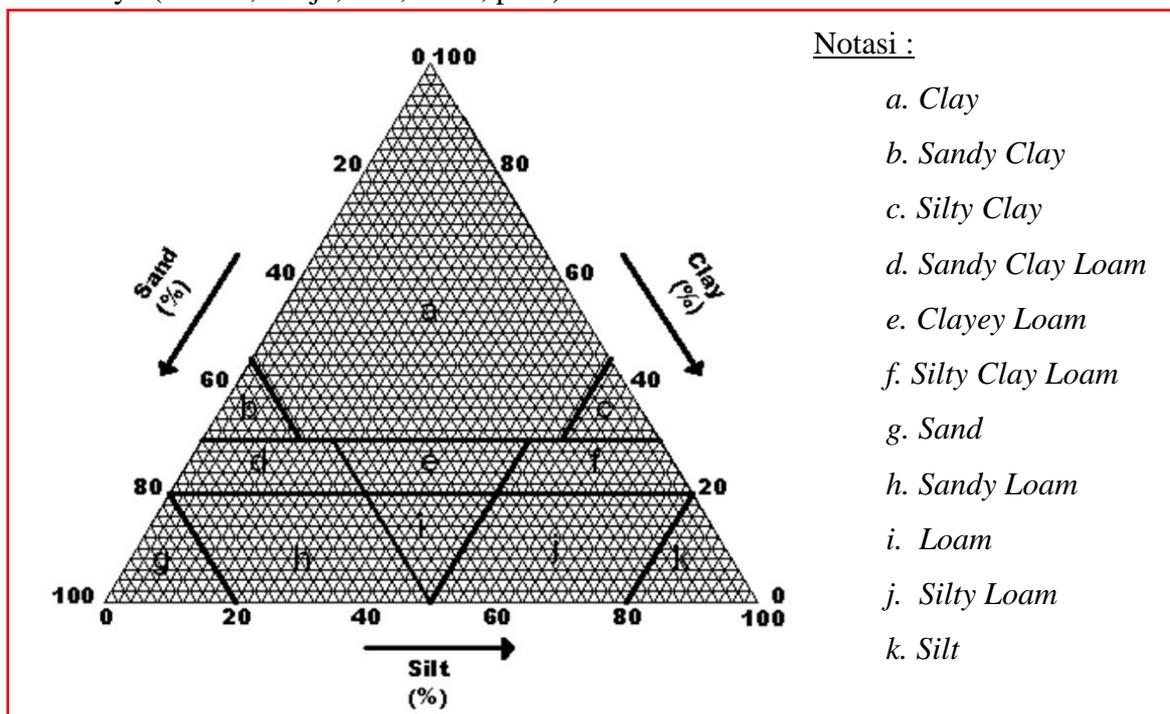
1. Klasifikasi berdasarkan tekstur (USDA)
2. Klasifikasi berdasarkan pemakaiaan

Sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur adalah *relative* sederhana karena hanya didasarkan distribusi ukuran tanahnya. Pada kenyataannya, jumlah dan jenis dari kandungan mineral lempung dalam tanah sangat mempengaruhi sifat fisik tanah yang bersangkutan. Dengan pertimbangan kondisi tersebut, maka diperlukan perhitungan sifat plastisitas tanah yang disebabkan karena adanya kandungan mineral lempung pada tanah agar dapat memperkirakan ciri – ciri atau karakteristik tanah dan jenis tanahnya.

Oleh karena itu, pada saat ini terdapat sistem klasifikasi tanah yang selalu dipakai oleh para ahli geoteknik, yaitu Sistem Klasifikasi AASHTO dan Sistem Klasifikasi Unified. Kedua sistem klasifikasi tersebut memperhitungkan distribusi ukuran butiran dan batas – batas Atterberg. Secara khusus sistem yang lebih banyak digunakan oleh para ahli geoteknik adalah Sistem Klasifikasi Unified (M Das, Braja, dkk, 1993, p.66).

2.3.1. Sistem Klasifikasi USDA

Dalam arti umum, yang dimaksud dengan tekstur tanah adalah keadaan permukaan tanah yang bersangkutan. Tektur tanah dipengaruhi oleh ukuran tiap – tiap butir yang terdapat di dalam tanah. Beberapa sistem klasifikasi tanah berdasarkan teksturnya telah banyak dikembangkan oleh beberapa organisasi dan sampai sekarang juga masih digunakan. Gambar 2.1 menunjukkan sistem klasifikasi berdasarkan tekstur tanah yang dikembangkan oleh USDA dengan beberapa kelompok berdasarkan ukuran butiran diantaranya lempung (*clay*), lanau (*silt*), kerikil (*gravel*) dan pasir (*sand*) (*United States Departement Of Agriculture*) (M Das, Braja, dkk, 1993, p.64). Secara umum, tanah asli merupakan campuran dari butir – butir yang memiliki ukuran yang berbeda. Dalam klasifikasi tanah berdasarkan kondisi teksturnya, pemberian nama tanah berdasarkan atas komponen (butir – butir) utama penyusunnya, misalkan lempung berpasir (*sandy clay*), lempung berlanau (*silty clay*), dan seterusnya (M Das, Braja, dkk, 1993, p.64).



Gambar 2.1. Klasifikasi Berdasarkan Tektur oleh USDA

Sumber: M Das, Braja, dkk, (1993, p.65)

Sistem ini didasarkan pada ukuran batas dari butiran tanah seperti yang diterangkan oleh sistem USDA (*United States Departement Of Agriculture*) dalam Gambar 2.1, yaitu :

- Pasir (*sand*) : butiran dengan diameter 2,0 ~ 0,05 mm
- Lanau (*silt*) : butiran dengan diameter 2,0 ~ 0,05 mm
- Lempung (*clay*) : butiran dengan diameter 2,0 ~ 0,05 mm

2.3.2. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) dikembangkan pada tahun 1929 sebagai *Public Road Administration Classification System*. Sistem ini sudah mengalami beberapa kali perbaikan dan versi yang saat ini diberlakukan adalah yang diajukan oleh *Committee on Classification of Material for Subgrade and Granular Type Road of the Highway Research Board* tahun 1945, berguna untuk menentukan kualitas tanah dalam perencanaan jalan, *subbase*, dan *subgrade*. Pada sistem ini tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar, A-1 sampai dengan A-7 merupakan sub-sub kelompok. Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan adalah analisis saringan dan batas-batas Atterberg.

Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah granuler. Tanah A-1 adalah tanah granuler bergradasi baik, sedang tanah A-3 adalah pasir bersih bergradasi buruk. Tanah A-2 termasuk tanah granuler, dimana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan no.200 yang masih mengandung lanau dan lempung. tanah berbutir halus diklasifikasikan dari A-4 sampai dengan A-7, yaitu sebagian besar mengandung tanah lempung dan lanau (M Das, Braja, dkk, 1993, p.66).

Sistem klasifikasi AASHTO didasarkan pada kriteria dibawah ini:

a. Ukuran butir

Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm dan tertahan pada ayakan no.20 (2mm).

Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan no.10 dan tertahan pada ayakan no.200 (0,074 mm).

Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan no.200

b. Plastisitas

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas *Plasticity Index* (PI) sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih.

c. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan tersebut harus dicatat.

Jika sistem klasifikasi tanah AASHTO dipakai untuk mengklasifikasikan tanah, maka data dari hasil pengujian dicocokkan dengan angka – angka pada *table* klasifikasi tanah AASHTO dari kolom sebelah kiri ke kolom sebelah kanan sampai menemukan angka – angka yang sesuai dengan hasil pengujian laboratorium.

Tabel 2.1.
Klasifikasi AASHTO

Klasifikasi Umum	Material granuler (<35% lolos saringan no. 200)							Tanah-tanah lanau-lempung (<35% lolos saringan no. 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi Kelompok	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Analisa Saringan (%lolos)											
2,00 mm (no. 10)	50 maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,425 mm (no. 40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
0,075 mm (no. 200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	36 min
Sifat Fraksi lolos saringan no. 40											
Batas Cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks Platis (PL)	6 maks		Np	10 maks	10 maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	11 min	11 min
Indeks Kelompok (G)	0		0	0		4 maks		8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau lempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik							Sedang sampai buruk			

Catatan :

Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas PL

untuk PL > 30, klasifikasinya A-7-5

untuk PL > 30, klasifikasinya A-7-6

Np = NonPlastis

Sumber: M Das, Braja, dkk, (1993, p.67)

2.3.3. Sistem Klasifikasi Unified

Sistem ini pada mulanya diperkenalkan oleh Casagrande pada tahun 1942. Pada saat ini sistem klasifikasi tersebut digunakan secara luas oleh para ahli teknik (M Das, Braja, dkk, 1993, p.70).

Sistem ini mengelompokkan tanah ke dalam dua kelompok besar, yaitu:

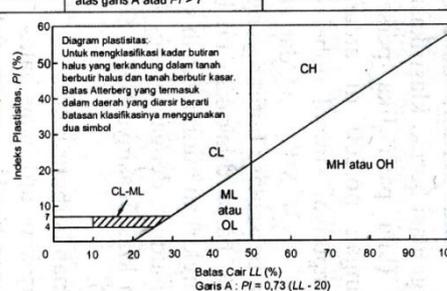
1. Tanah berbutir kasar (*coarse-grained-soil*), yaitu: tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan no.200. simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir. Tanah berbutir kasar ditandai dengan kelompok, seperti: GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, dan SC. Bilaman persentase butiran yang lolos ayakan no. 200 adalah antara 5% sampai dengan 12%, diperlukan simbol ganda seperti: GW-GM, GP-GM, GW-GC, GP-GC, SW-SM, SW-SC, SP-SM, dan SP-SC.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan no.200. simbol dari kelompok tanah ini dimulai dari 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-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi. Klasifikasi tanah berbutir halus

dengan simbol ML, CL, OL, MH, CH, dan OH didapat dengan cara menggambar batas cair dan indeks plastisitas tanah yang bersangkutan.

Simbol-simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi tanah Unified adalah:

- W= *Well Graded* (tanah gradasi baik)
- P= *Poorly Graded* (tanah dengan gradasi buruk)
- L= *Low Plasticity* (plastisitas rendah) (LL<50)
- H= *High Plasticity* (plastisitas tinggi) (LL>50)

Tabel 2.2.
Klasifikasi *Unified*

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Kriteria laboratorium
Tanah berbutir kasar 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0.075 mm)	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar ter-tahan saringan no. 4 (4.75 mm)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir - kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4, C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk GW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $P_i < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $P_i > 7$ $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6, C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kriteria untuk SW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $P_i < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $P_i > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai dobel simbol
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir - kerikil, atau tidak mengandung butiran halus	
		GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung	
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil pasir-lempung	
	Pasir lebih dari 50 % fraksi kasar lolos saringan no. 4 (4.75 mm)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	
		SM	Pasir berlanau, campuran pasir - lanau	
		SC	Pasir berlempung, campuran pasir - lempung	
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	Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol 
		CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ("lean clays")	
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
	Lanau dan lempung batas cair > 50 %	MH	Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis	
		CH	Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ("fat clays")	
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi	
Tanah dengan kadar organik tinggi	P _i	Gambut ("peat") dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488	

Sumber: M Das, Braja, dkk, (1993, p. 71-72)

2.4. Kekuatan Geser Tanah

Kekuatan geser suatu massa tanah adalah perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang dimaksud. Untuk menganalisis masalah Stabilitas tanah seperti daya dukung, Stabilitas lereng, maka kita harus mengetahui sifat – sifat ketahanan penggesernya tanah tersebut (M Das, Braja dkk, 1994, p.1).

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Dengan dasar pengertian ini, bila tanah mengalami pembebanan maka akan ditahan oleh:

1. Kohesi tanah yang bergantung pada jenis tanah dan kepadatannya, tidak tergantung dari tegangan normal yang bekerja pada bidang geser.

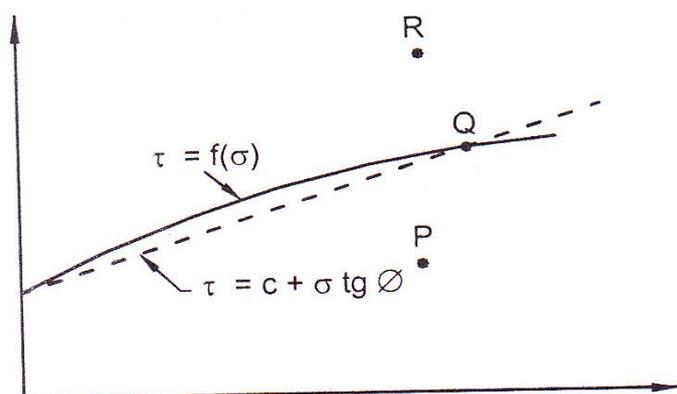
2. Gerakan antara butir-butir tanah yang besarnya berbanding lurus dengan tegangan normal pada bidang geser.

Nilai kekuatan geser tanah antara lain diperlukan untuk menghitung daya dukung tanah, Stabilitas lereng, dan juga untuk menyatakan kondisi runtuh.

Menurut teori Mohr (1910) kondisi keruntuhan suatu bahan terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser, sehingga dapat diambil hubungan fungsi antar tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya. Adapun persamaan yang menyatakan hubungan fungsi tersebut adalah:

$$\tau = f(\sigma) \quad (2-1)$$

Dengan τ adalah tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan dan σ adalah tegangan normal pada saat kondisi tersebut. Garis kegagalan yang ditunjukkan pada Persamaan (2-1) diatas adalah kurva yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.2. Kriteria Kegagalan Mohr dan Coloumb
Sumber: M. Das, Braja, dkk (1994,p.2)

Coulomb (1776) mendefinisikan $f(\sigma)$ sebagai :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (2-2)$$

Dimana:

τ = kekuatan geser (kN/m^2)

c = kohesi tanah (kN/m^2)

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

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

Persamaan (2-2) menunjukkan yang dimaksud dengan kriteria keruntuhan atau kegagalan Mohr-coulomb, dimana garis selubung kegagalan dari persamaan tersebut dilukiskan dalam bentuk garis lurus pada Gambar 2.2.

Pengertian dari keruntuhan suatu bahan dapat diterangkan dengan melihat Gambar 2.2, yaitu: Jika kedudukan tegangan-tegangan baru mencapai titik P, keruntuhan tanah akibat geser tidak akan terjadi. Keruntuhan tanah akibat geser akan terjadi, jika tegangan-tegangan mencapai titik Q yang terletak pada garis selubung kegagalan (*failure envelope*). Kedudukan tegangan yang ditunjukkan oleh titik R tidak akan pernah terjadi, karena sebelum tegangan yang terjadi mencapai titik R, bahan sudah mengalami keruntuhan.

Tegang efektif yang terjadi di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh tekanan air pori. Terzaghi (1935) mengubah persamaan Coulomb dengan bentuk tegangan efektif sebagai berikut:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (2-3)$$

Dimana: $\sigma' = \sigma - u$

τ = kekuatan geser (kN/m²)

c' = kohesi tanah (kN/m²)

φ' = sudut geser dalam tanah (°)

σ' = tegangan normal total yang bekerja pada bidang geser (kN/m²)

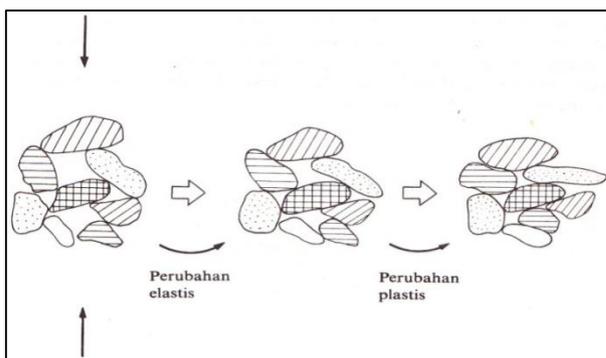
u = tegangan air pori

Ada bermacam-macam percobaan untuk menentukan kekuatan geser tanah (*direct shear*), misalnya saja pengujian triaxial (*triaxial test*), pengujian geser langsung, dan pengujian kekuatan geser *unconfined*.

2.5. Penurunan Tanah

Penambahan beban di atas suatu permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah dibawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan oleh adanya deformasi partikel tanah, relokasi tanah, keluarnya air atau udara dari dalam pori, dan sebab – sebab lain (M Das, Braja, dkk, 1993, p.177). Beberapa atau semau faktor – faktor tersebut mempunyai hubungan dengan dengan keadaan tanah yang bersangkutan. Penurunan pada tanah yang disebabkan oleh pembebanan dibagi menjadi penurunan konsolidasi dan segera.

Karakteristik tanah itu didominasi oleh karakteristik mekanisnya seperti permeabilitas atau kekuatan geser yang berubah-ubah sesuai dengan pembebanan. Mengingat kemampuan butir-butir tanah atau air itu secara teknis sangat kecil sehingga dapat diabaikan, maka proses deformasi tanah akibat beban luar dapat dipandang sebagai suatu gejala penyusutan pori.



Gambar 2.3. Perubahan dalam Struktur Butiran

Sumber: Sosrodarsono, Suyono dan Takeda, Kensaku, (1981,p.11)

Gambar 2.3 diatas menunjukkan, bahwa akibat dari beban yang bekerja pada tanah, susunan butir-butir tanah berubah atau kerangka struktur butir-butir tanah berubah sehingga angka perbandingan pori (*void ratio*) menjadi kecil yang mengakibatkan deformasi kemampuan. Jika beban yang bekerja pada tanah kecil, maka deformasi itu terjadi tanpa pergeseran pada titik-titik sentuh antara butir-butir tanah.

Pada bendungan urugan dengan pemadatan yang baik dan dengan pondasi yang terdiri dari batuan yang kompak dan eras, maka penurunan mercu bendungan tidak akan berarti. Penurunan tubuh bendungan yang disebabkan oleh proses konsolidasi pada tubuh bendungan tersebut, biasanya berkisar antara 0,2 ~ 0,4 % dari tingginya dan angka terbesar yang pernah terjadi adalah sekitar 1,0 % saja.

Pada bendungan urugan yang tubuhnya terdiri dari beberapa zona dengan karakteristik berbeda – beda dan cara penimbunan yang berbeda pula, serta tekanan yang berbeda – beda pada setiap titik dalam tubuh bendungan. Dengan demikian besarnya penurunan pada mercu sebuah bendungan urugan didasarkan pada rumus – rumus empiris atau pada hasil – hasil pengamatan terhadap bendungan lain yang sudah dibangun (Sosrodarsono, Suyono dan Takeda, Kensaku, 1981, p.174).

Besarnya penurunan bendungan (ΔH) yang disebabkan oleh adanya proses konsolidasi dihitung dengan rumus:

$$\Delta H = mv \times \Delta \sigma v \times H \quad (2-4)$$

Dimana:

ΔH = Besar penurunan tubuh bendungan (m)

H = Tinggi bendungan (m)

mv = Koefisien kompresibilitas (cm^2/kg)

$\Delta \sigma v$ = Selisih pertambahan tegangan vertikal awal dan akhir (kg/cm^2)

Waktu penurunan bendungan (t) yang disebabkan oleh adanya proses konsolidasi dihitung dengan rumus:

$$t = \frac{T \times H^2}{C_v} \quad (2-5)$$

Dimana:

- t = Waktu penurunan (tahun)
- H = Tinggi bendungan (m)
- T = Time faktor
- C_v = Koefisien konsolidasi (cm^2/dt)

2.6. Pondasi Bendungan

Keadaan geologi pada pondasi bendungan sangat mempengaruhi pemilihan tipe bendungan, sehingga investigasi geologi perlu diadakan dengan baik. Salah satu contoh lokasi perencanaan bendungan yang terletak di lembah yang sempit dan memiliki perbandingan lebar yang lebih sempit dari tingginya. Berdasarkan kondisi topografi lebih cocok untuk direncanakan tipe bendungan beton berbentuk lengkung, tetapi karena kondisi geologi yang kurang baik dan gaya geser batuan rendah mengakibatkan lokasi tersebut tidak dapat menahan bendungan beton maka harus dipilih tipe bendungan irigan batu atau tanah (Sudibyo, 2003, p.271).

2.6.1. Jenis - Jenis Pondasi Bendungan

Pondasi dapat digolongkan berdasarkan imana beban itu ditopang oleh tanah adalah pondasi dangkal atau biasa dinamakan sebagai alas, telapak, atau pondasi rakit (*mats*). Dengan kedalamannya $\frac{D}{B} \leq 1$. Sedangkan pondasi dalam atau biasa dinamakan sebagai tiang pancang atau tembok yang di bor dengan kedalaman $\frac{D}{B} \geq 4$ (Bowles, 1992, p.3).

Berdasarkan jenis batuan yang membentuk lapisan pondasi, pondasi bendungan dapat dibedakan kedalam 3 (tiga) jenis yaitu:

- Pondasi batuan
- Pondasi pasir
- Pondasi kerikil
- Pondasi tanah

Masing-masing pondasi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda.

a. Pondasi batuan (*rock foundation*)

Merupakan pondasi dengan daya dukung yang baik, walaupun kadang-kadang terdapat pelapukan-pelapukan pada lapisan atasnya.

b. Pondasi pasir dan kerikil (*sand & gravel foundation*)

Biasanya mempunyai kekuatan geser yang lebih tinggi dibandingkan kekuatan geser tubuh bendungan, sehingga cukup memenuhi persyaratan. Umumnya mempunyai permeabilitas yang cukup tinggi / porus, sehingga diperlukan suatu perbaikan khusus untuk meningkatkan kedapannya.

c. Pondasi tanah

Berdasarkan umur geologis dan kuat dukungnya dapat dikelompokkan menjadi:

- Tanah tua (*paleo soil*), berumur tersier ke bawah serta memiliki kepadatan, kedapapan dan kuat geser cukup tinggi.
- Tanah muda (*young soil = aluvial*), berumur kuartar, belum terkonsolidasi sempurna, daya dukung rendah. Di beberapa lokasi memiliki kandungan mineral lempung dengan sifat mengembang (*swelling*) dan sifat burai (*slaking*) tinggi, baik oleh udara (*air slaking*) maupun oleh air (*water slaking*).
- Tanah lunak (*soft soil*), berumur Kwartar, tidak terkonsolidasi baik, kuat geser rendah dan sifat kompresibilitas tinggi.
- Kuat geser untuk tanah lempung lunak: 12,5~25 kN/m², N-SPT 3~5; untuk tanah lempung sangat lunak < 12,5 kN/m² N-SPT < 3; Untuk tanah pasir/lanauan perlawanan konus sondir $q_c < 10 \text{ kN/m}^2$.

2.6.2. Bentuk Kegagalan Pondasi Bendungan

Dalam penilaian keamanan suatu bendungan urugan terhadap gaya – gaya perembesan air, perlu dilakukan analisis rembesan air pada tahap desain terlebih dahulu. Hasil analisis rembesan air tersebut kemudian dibandingkan dengan kriteria desain, yang biasanya dinyatakan dengan faktor keamanan. Bentuk – bentuk kegagalan bendungan tipe urugan akibat pengaruh gaya rembesan, seperti berikut:

a. Gradien Keluaran Berlebih

Jika gradien keluaran (I_e) yang terukur berlebihan, maka butiran tanah di bagian kaki bendungan akan terapung dan terlepas dari ikatannya. Hal ini terutama terjadi akibat berkurangnya gaya gravitasi yang tergantung dari jenis tanahnya, sehingga menimbulkan gejala – gejala sebagai berikut:

▪ Didih Pasir (*Sandboil*)

Didih pasir biasanya terjadi di dalam tanah nonkohesif dengan prosentase butiran kasar (kerikil) yang tinggi, yang butiran halusya terlepas dan diendapkan di permukaan. Tanah

yang mengalami didih pasir, struktur butiran tanahnya biasanya tetap *stabil*, sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan permeabilitas tanah.

- Likuifaksi statis

Likuifaksi (pencairan) statis biasanya terjadi pada jenis tanah nonkohesif yang mempunyai gradasi butiran lebih halus (pasir halus dan lanau). Massa tanah disebelah hilir dapat mengalami likuifaksi, jika air waduk meningkat karena gradien hidrauliknya mencapai nilai yang kritis (I_c).

- Erosi Buluh (*Piping*)

Erosi buluh dapat terjadi, baik di dalam massa pondasi, maupun di dalam tubuh bendungan urugan yang kohesif. Proses erosi buluh dimulai dari suatu titik diskontinuitas di sebelah hilir atau konsentrasi aliran air di sepanjang timbunan tanah yang kurang padat, terutama pada bidang kontak antara timbunan dengan struktur. Sebagai contoh: pemadatan yang kurang baik pada bidang kontak antara bendungan dengan struktur arah memanjang dari udik ke hilir, lubang bor yang terbuka, bekas galian, akar tanaman, dan liang binatang. Butir – butir tanah yang terlepas dimulai dari sebelah hilir, sehingga membentuk pipa – pipa kecil yang merambat secara perlahan – lahan ke udik bendungan. Pada umumnya, lintasan pipa – pipa kecil tersebut mempunyai bentuk seperti jaringan aliran (*flownet*). Untuk mencegah kejadian semacam ini, harus dibuat suatu sistem pengontrol yang perlu diamati secara kontinyu di lokasi – lokasi rembesan yang terkonsentrasi.

Faktor keamanan terhadap erosi buluh, biasanya dinyatakan sebagai nilai banding antara gradien kritis (I_c) dengan komponen vertical dari gradien keluaran. Gradien ini diperoleh dari perhitungan atau pembacaan langsung pada instrument pisometer di lapangan, dan dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$FK = \frac{I_c}{I_e} \geq 4 \quad (2-6)$$

$$I_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (2-7)$$

Dengan:

FK = Faktor keamanan (tanpa dimensi)

I_c = Gradien keluaran kritis (tanpa dimensi)

I_e = Gradien keluaran dari hasil analisis rembesan atau pembacaan instrument pisometer (tanpa dimensi)

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

γ_w = Berat isi air (t/m^3)

G_s = Berat spesifik (tanpa dimensi)

E = Angka Pori (tanpa dimensi)

Nilai rerata G_s biasanya digunakan untuk berbagai perhitungan gradien keluaran, karena variasi nilainya tidak berbeda jauh untuk jenis tanah yang berbeda. Namun, nilai e di lapangan untuk berbagai jenis tanah bervariasi cukup besar. Maka penafsiran (jika tidak ada data hasil pengujian) harus dilakukan secara hati – hati berdasarkan pengalaman dan pertimbangan teknis yang baik pula.

Jika tidak ada informasi mengenai berat spesifik G_s atau angka pori e , dapat digunakan $I_c = 1$ yang kurang lebih identik dengan kondisi pasir kuarsa di lapangan. Nilai ini bukan nilai konservatif, sehingga harus digunakan secara hati – hati, karena nilai I_c yang lebih rendah yaitu sebesar 0,5 pernah terukur pada beberapa penelitian untuk jenis tanah pasir halus dan lanau.

Faktor keamanan minimum untuk desain harus minimal 4, untuk mencegah terjadinya keruntuhan, karena pengaruh gradien keluaran yang berlebihan. Faktor ini, terutama untuk mencegah hal – hal yang tidak diperhitungkan dalam tahap desain. Misalnya, pengaruh heterogenitas tanah, kemerosotan mutu tanah akibat aliran rembesan dan penyimpanan hasil perkiraan. Dalam hal bendungan yang dilengkapi dengan filter pelindung, angka keamanan harus diambil paling tidak $SF \geq 2$ dengan menggunakan rumus Justin :

$$V = \sqrt{\frac{\gamma_s \cdot g}{A \cdot \gamma_w}} \quad (2-8)$$

Dengan:

V = Kecepatan kritis

γ_w = Berat isi air

γ_s = Berat isi jenuh material

g = Gravitasi

A = Luas penampang yang dilalui air

b. Tekanan Air Pori Berlebih

Apabila di dalam pondasi dan tubuh bendungan terjadi tekanan air pori berlebih (*excessive pore water pressure*), maka akan dapat terjadi berbagai jenis kegagalan, antara lain ketidakstabilan, deformasi, dan tekanan angkat yang berlebih.

- **Ketidakstabilan Lereng Timbunan dan Defomasi Berlebih**

Tekanan air pori dan gaya perembesan air merupakan penyebab utama ketidakstabilan pada bendungan tipe urugan. Petunjuk untuk analisis Stabilitas lereng bendungan

urugan dapat dilihat pada Pedoman Perencanaan Bendungan dan SNI. No. 1731-1989-F.

- Tekanan Air Pori di Dalam Pondasi

Tekanan air pori berlebihan di dalam pondasi bendungan dapat menyebabkan terjadinya tekanan angkat (*uplift*) yang tinggi pada bangunan fasilitasnya.

- Tekanan Air Pori yang Tinggi di Hilir Bendungan

Tekanan air pori yang tinggi di hilir pondasi bendungan dapat menimbulkan tekanan angkat yang tinggi, sehingga terjadi pengangkatan atau peletusan (*upheavel* atau *blowup*). Kondisi ini terjadi jika terdapat lapisan pondasi lulus air dibawah lapisan kedap air dalam kondisi aliran terkekang dibawah tubuh bendungan. Kegagalan mulai terjadi jika tekanan angkat dibawah lapisan kedap air melebihi berat lapisan kedap air di atasnya, sehingga, menyebabkan lapisan kedap berlubang dan terjadi peningkatan gradien keluaran. Erosi buluh atau likuifaksi statis dapat terjadi pada lapisan di bawahnya. Kondisi ini dapat dideteksi secara dini dengan memasang pisometer di hilir bendungan. Faktor keamanan terhadap pengaruh tekanan angkat yang tinggi, dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$FK = \frac{\gamma_n \cdot t}{\gamma_w \cdot h} = \frac{G \cdot t}{(1+e) \cdot h} \geq 2 \quad (2-9)$$

Dengan:

γ_n = Berat isi material lapisan penutup kedap air (t/m^3)

γ_w = Berat isi air (t/m^3)

t = Tebal lapisan tanah penutup (m)

h = Tinggi tekanan pisometrik (m)

e = Angka pori

Gs = Besat spesifik

c. Gradien Internal yang Tinggi Tanpa Filter

Jika zona inti bendungan tidak dilengkapi dengan filter dan mempunyai gradien internal yang tinggi, maka akan terjadi perpindahan butiran halus dari suatu zona ke zona lainnya di dalam tubuh bendungan tipe urugan, atau dari urugan ke dalam rongga pori tanah pondasi. Sebagai contoh berikut ini:

- Selimut kedap air atau inti kedap air yang terletak di atas pondasi alluvial berbutir kasar atau batuan yang mengandung banyak rekahan.
- Inti kedap air yang dibuat miring dan tipis di atas zona drainase
- Melewati puncak dinding halang kedap air dengan penutup yang sempit.

Untuk mencegah kegagalan jenis ini, harus dipasang saringan (*filter*) sesuai dengan standar yang berlaku.

d. Debit Rembesan Berlebih

Meskipun debit rembesan yang keluar dari kaki bendungan cukup besar, tetapi apabila tidak membawa material halus, hal tersebut tidak akan memicu terjadinya keruntuhan structural. Namun, apabila hal tersebut dibiarkan, akan dapat menimbulkan kehilangan air yang cukup besar, yang akan mengganggu kebutuhan air.

e. Retak Desikasi

Retak desikasi terjadi akibat berkurangnya kadar air di dalam zona inti ke arah air, jauh di bawah kadar air pelaksanaan. Hal ini dapat terjadi karena:

- Penguapan yang terjadi di permukaan urugan
- Pemantauan zona inti melalui sistem drainase bendungan
- Pemantauan zona inti melalui pondasi bendungan yang porous

Retak desikasi biasanya terjadi pada kondisi yang kadar airnya diantara batas plastis dan batas susut, atau jika kadar air turun di bawah batas plastis, sehingga kuat geser tanah juga menurun. Kekeringan yang terjadi pada kedalaman yang signifikan memerlukan waktu yang lama dan biasanya terjadi selama periode penurunan muka air waduk yang lama, sehingga kadar air urugan di atas muka air waduk sangat berkurang. Hal ini selain menimbulkan penurunan kadar air dalam inti yang menyebabkan retakan susut dan bocoran yang serius, juga menyebabkan terjadinya erosi yang akhirnya mengakibatkan kegagalan atau keruntuhan, terutama pada bendungan yang tinggi.

2.7. Perbaikan Pondasi

Pondasi alas suatu bendungan berfungsi sebagai pendukung semua beban yang diteruskan oleh bendungan yang bersangkutan. Setelah penimbunan tubuh bendungan selesai dilaksanakan, maka perubahan-perubahan yang terjadi pada lapisan pondasi sudah tidak mungkin lagi dapat dilihat secara visual. Demikian pula perbaikan - perbaikan yang diperlukan pada pondasi tersebut sudah tidak lagi dapat dilaksanakan secara sederhana. Mengingat hal-hal tersebut, maka sebelum penimbunan dimulai, supaya perbaikan yang diperlukan dilaksanakan secara cermat dan hati - hati, agar perbaikan pondasi (*foundation treatment*) tersebut dapat mencapai kualitas yang diharapkan. Karena lapisan-lapisan bawah pondasi tidak dapat dilihat secara visual dan investigasi yang dilaksanakan hingga tahap rencana teknis juga masih terbatas, sehingga masih banyak permasalahan teknis yang tidak

diketahui secara pasti. Karena itu rencana teknis perbaikan pondasi yang sudah ada biasanya baru berupa rencana yang masih kasar.

Dengan demikian pada saat dilaksanakannya penggalian - penggalian pondasi serta perbaikan pada pondasi tersebut, akan terjadi perubahan-perubahan serta penyempurnaan - penyempurnaan terhadap rencana teknis yang sudah ada, disesuaikan dengan hasil - hasil investigasi selama pelaksanaan pekerjaan pada pondasi yang bersangkutan, sehingga dituntut adanya suatu fleksibilitas pada pelaksanaan perbaikan pondasi tersebut.

Persyaratan umum pondasi bendungan urugan adalah harus memiliki kuat geser dan tingkat kedap air yang cukup sesuai persyaratan desain. Bila ada sebagian dasar pondasi yang belum memenuhi syarat tersebut, harus dibuang atau diperbaiki. Lapisan tanah organik, humus, akar tanaman harus dibuang dari alas bendungan. Lempung dan pasir halus yang kuat gesernya rendah, material kompresif (*compressible*), mudah tererosi, porus, pada prinsipnya harus dibuang pula. Namun apabila membuang lapisan tanah jelek tersebut secara ekonomis terlalu mahal misal karena penyebarannya yang luas, harus dilakukan upaya perbaikan pondasi. Upaya perbaikan pondasi bendungan akan tergantung pada jenis pondasi bendungan dan bentuk permukaan pondasi.

Untuk dapat mengadakan perbaikan pondasi harus diketahui terlebih dahulu jenis dan sifat - sifat batuan yang ada. Adapun tujuan dari perbaikan pondasi adalah (Soedibyo, 2003, p.275) :

- a. Agar tegangan tanah yang timbul sebagai akibat berat sendiri bendungan, tekanan air, gaya gempa, dan muatan - muatan yang bekerja pada bendungan tidak melebihi daya dukung tanah pondasi bendungan (di bawah) maupun di tebing kiri dan kanannya (abutmen).
- b. Agar rembesan air yang timbul di bawah pondasi bendungan dan di abutmen bendungan tidak melampaui batas yang telah ditetapkan.

Pondasi bendungan urugan dapat dibedakan dalam 3 (tiga) tipe utama, yaitu pondasi batuan, pondasi pasir atau kerikil dan pondasi tanah dengan karakteristik sebagai berikut:

- Pondasi batuan merupakan pondasi dengan daya dukung yang sangat baik, meskipun terkadang terdapat pelapukan - pelapukan pada lapisan atasnya. Disamping itu usaha peningkatan - peningkatan kekedapannya terhadap aliran filtrasi biasanya lebih mudah, tetapi masih timbul permasalahan tetapi biasanya pemecahannya tidak terlalu sukar.
- Pondasi pasir atau kerikil, biasanya mempunyai kekuatan geser yang lebih besar dari kekuatan geser tubuh bendungan, sehingga cukup memenuhi persyaratan. Akan tetapi umumnya mempunyai permeabilitas yang cukup tinggi, sehingga diperlukan suatu pekerjaan khusus untuk meningkatkan kekedapannya dengan jangkauanjangkauan yang

kadang-kadang begitu jauh dari tubuh bendungan, baik ke arah vertikal maupun ke arah horizontal.

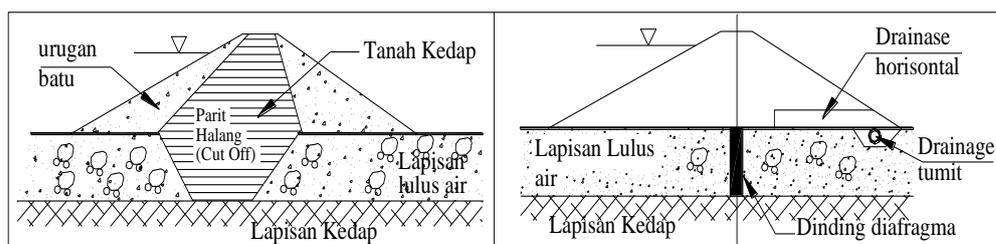
- Pondasi tanah. biasanya merupakan pondasi yang lemah, baik daya dukungnya maupun kekuatan gesernya, yang kadang-kadang bahkan lebih lemah dari tubuh bendungan yang harus didukungnya. Tetapi pondasi jenis ini umumnya mempunyai permeabilitas yang rendah, sehingga tidak diperlukan adanya pekerjaan - pekerjaan khusus untuk meningkatkan kedepannya.

Dengan banyaknya problema-problema yang dihadapi pada pekerjaan-pekerjaan perbaikan pondasi, maka pada pelaksanaannya diperlukan suatu supervisi yang didukung oleh suatu team tenaga ahli yang kuat dari berbagai unsur (teoritis, praktis dan laboratorium).

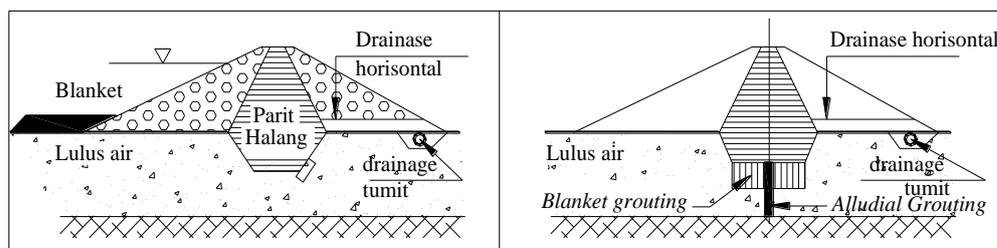
2.7.1. Jenis – Jenis Perbaikan Pondasi

Cara perbaikan pondasi bawah permukaan meliputi 3 (tiga) metode dasar, yaitu:

- Upaya mengurangi rembesan atau mereduksi sekecil mungkin dengan membuat penahan (*barrier = cut off*) secara vertikal menyeluruh atau dikenal sebagai *positive cut off*
- Mereduksi rembesan baik dengan *vertical cut off* sebagian (*partial*) atau selimut kedap di bagian hulu untuk mengontrol rembesan atau kombinasi keduanya.
- Mengendalikan rembesan di bagian hilir dengan sistem relief dan merupakan *negative cut off*.

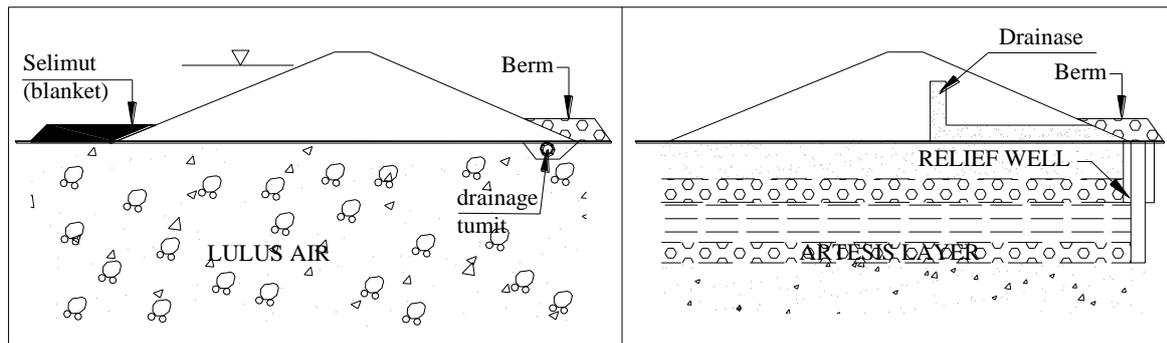


Gambar 2.4. Penahan Kedap Vertikal Secara Menyeluruh (*Positive Cut Off*)
Sumber: Modul Diklat Perbaikan Fondasi Bendungan (2009,p.3)



Gambar 2.5. Penahan Kedap Partial dan Kombinasi Dengan Penahan Kedap Semi Lulus Air (*Partial Cut Off*)

Sumber: Modul Diklat Perbaikan Fondasi Bendungan (2009,p.3)



Gambar 2.6. Macam-Macam Pengendalian Rembesan Dibagian Hilir (*Negative Cut Off*)
 Sumber: Modul Diklat Perbaikan Fondasi Bendungan (2009,p.3)

Metode perbaikan pondasi lulus air yang digunakan, tergantung pada ketebalan lapisan porus/pasir-kerikil diatas lapisan kedap air di bawahnya.

A. Perbaikan pondasi bawah permukaan dengan sementasi

- 1) Sementasi tirai dapat dilakukan dengan menggunakan bahan *portland cement*, kombinasi *portland cement* dengan bahan kimia. Berikut disajikan gambaran kemampuan penetrasi berbagai bahan sementasi kedalam ruang pori butiran, (Karol, 1960):
 - semen (*portland cement*): mampu penetrasi sampai ruang pori pasir kasar.
 - bentonite: mampu penetrasi sampai ruang pori pasir sedang.
 - *polyurethane, polyacrylamide, silicates, aminoplast*: pori pasir halus
 - *phenoplast, acrylates, acrilamide*: pori lanau kasar (*coarse silt*).

B. Perbaikan dengan dinding diafragma

Berdasarkan bahan pengisinya, dinding diafragma atau *cut-off wall* dapat diklasifikasi sebagai berikut:

- 1) Diafragma beton bertulang (*reinforced concrete diaphragm wall*) ; bersifat kaku impervious dan tahan terhadap tegangan tanah aktif maupun pasif.
- 2) Diafragma tanah dan semen (*soil dan cement diaphragm wall*) ; cara ini digunakan sebagai *cut off* pada pondasi kerikil, tipe ini lebih murah dibanding beton. Pasir dari galian dipilah kemudian dicampur semen menjadi adukan dan dipompakan kembali kedalam paritan (*trench*).
- 3) Diafragma tanah dan bentonit (*S-B slurry diaphragm wall*) ; soil bentonit slurry (*S-B Slurry*) dikenal sebagai diafragma tipe Amerika, merupakan diafragma yang paling ekonomis, namun kualitasnya kurang memadai.
- 4) Diafragma semen dan bentonit (*C-B slurry diaphragm wall*) ; adukan terdiri bekas lumpur penggalian kemudian diproses kembali dan ditambah semen kemudian dipompa

kedalam paritan. Hasilnya dikenal dengan *plastic cut-off wall* yang banyak diterapkan untuk perbaikan pondasi bendungan.

C. Sumur pelepas tekanan (*Relief Wells*)

Sumur pelepas berfungsi untuk mengurangi tekanan air pori yang berlebihan dari lapisan pondasi. Apabila dijumpai gejala artesis dari bawah pondasi, tekanan pisometrik, tekanan angkat dan erosi buluh dapat direduksi.

D. Metode perbaikan untuk pondasi tanah lunak

Beberapa metode perbaikan tanah pondasi yang berupa tanah lunak adalah :

- Penggantian (*replacing*)
- Percepatan konsolidasi
- Penambahan *berm* pemberat (*counter weight*)

2.7.2. Pelaksanaan Perbaikan Pondasi

Pondasi dapat dianggap sebagai lapisan permulaan dari timbunan tubuh bendungan. Apabila terdapat lapisan - lapisan yang karakteristiknya tidak dapat memenuhi persyaratan untuk penimbulan tubuh bendungan, maka lapisan tersebut harus disingkirkan secara keseluruhannya, sehingga antara permukaan pondasi dan alas tubuh bendungan terdapat kontak yang baik. lapisan tersebut biasanya merupakan lapisan teratas permukaan tanah yang mengandung humus, akar tumbuhan serta lapisan lumpur lunak, hahan-hahan pengisi rekahan-rekahan serta lubang - lubang yang terdapat pada pondasi batuan, dan lain-lain. Akan tetapi apa bila volume lapisan yang harus disingkirkan terlalu besar, sehingga ekonomis sudah tidak memungkinkan lagi, maka perlu dilakukan pengujian secara cermat untuk memperoleh batas lapisan yang memang harus disingkirkan serta untuk memperoleh metode perbaikan yang paling ekonomis untuk lapisan lemah yang masih tertinggal.

Umumnya bidang kontak antara permukaan pondasi dan alas tubuh bendungan, merupakan daerah yang paling lemah terhadap aliran filtrasi dan melalui bidang ini biasanya terjadi kebocoran - kebocoran yang berlebihan serta dapat timbul gejala sufosi yang sangat membahayakan kestabilan tubuh bendungan. Karena itu sangat diperlukan adanya kontak yang sempurna, antara permukaan pondasi dengan alas tubuh bendungan terutama pada alas zone kedap airnya.

Pada permukaan pondasi yang terletak disebelah hilir zone kedap air suatu bendungan batu kondisinya sering berubah biasanya tergenang air dan juga bisa dalam kondisi kering, sehingga intensitas pelapukan pada pondasi tersebut akan meningkat. Untuk mencegah peningkatan proses pelapukan pondasi di daerah ini biasanya pada permukaan pondasi

tersebut dilindungi dengan lapisan pelindung aspal (*asphalt coat*) (Sosrodarsono, 1977, p. 266-268).

Pekerjaan penggalian pada permukaan pondasi supaya dilaksanakan dengan hati – hati dengan metode yang paling sesuai untuk jenis lapisan pembentukan permukaan pondasi tersebut. Sesudah penggalian diselesaikan, maka pada seluruh permukaannya harus diperiksa dengan teliti, jika terjadi permasalahan yang tidak terduga seperti adanya batu besar yang akan mengganggu trayektori aliran filtrasi, adanya penggalian yang terlalu dalam sehingga merusak struktur lapisan, adanya lubang – lubang, patahan – patahan serta rekahan – rekahan, dll (Sosrodarsono, 1977, p. 266-268).

❖ Pondasi untuk zone kedap air

Penggalian pondasi untuk zone kedap air supaya dilaksanakan hingga mencapai lapisan dengan kekuatan dan kekedapan yang memadai dan permukaan pondasi dibuat sedemikian rupa sehingga dasar zona kedap air dapat melekat secara sempurna dengan permukaan pondasi tersebut. Apa bila pondasi tersebut terdiri dari lapisan batuan yang kukuh, maka harus dilaksanakan penggalian - penggalian lapisan sedimen dan lapisan batuan yang sangat lapuk, hingga mencapai batuan yang cukup memadai untuk alas zone kedap air tersebut. Dinding samping lubang galian supaya diambil dengan kemiringan tertentu, disesuaikan dengan kemiringan yang stabil untuk lapisan sedimen yang bersangkutan. Terutama pada penggalian lapisan sedimen yang tebal, dimana air sungai meresap ke dalam lapisan tersebut dan kemudian mengalir memasuki parit galian secara berlimpah, maka diperlukan pemasangan suatu sistem pencegahannya. Sistem pencegah ini biasanya bekerja dengan prinsip menurunkan permukaan air tanah di daerah penggalian pondasi. Dalam merencanakan sistem ini supaya dihindarkan terjadinya longsoran - longsoran pada dinding samping galian yang mungkin dapat diakibatkan oleh gradien garis depresi yang terlalu besar.

Pada lapisan batuan yang cukup keras, yang penggaliannya harus dengan ledakan, supaya penggunaan ledakan tersebut sudah dihentikan sebelum mencapai bidang terakhir dinding galian. Sedangkan untuk mencapai bidang terakhir tersebut, supaya dilaksanakan dengan tenaga manusia. Dengan demikian kerusakan - kerusakan serta kehancuran - kehancuran struktur batuan pada permukaan terakhir dinding galian pondasi tersebut dapat dihindarkan. Agar antara alas zone kedap air dengan permukaan pondasi batuan yang terletak di bagian tebing sungai terjadi perlekatan yang baik, maka permukaan pondasi pada daerah tersebut supaya dibuat dengan permukaan yang halus dan dengan kemiringan yang hampir seragam.

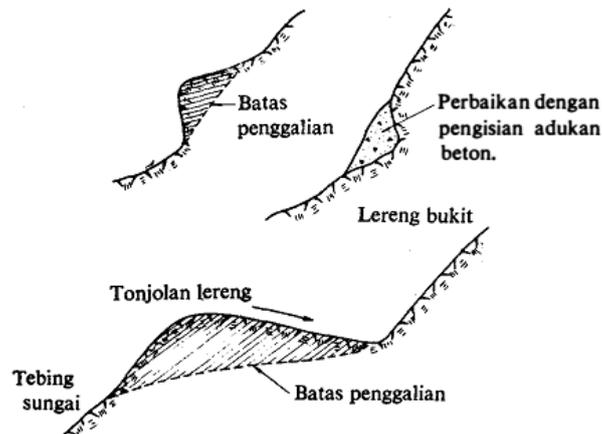
Apabila pondasi terdiri dari batuan lunak, pasir atau kerikil, maka kemiringan pada tebing sungai agar dibuat selandai mungkin dengan menggunakan mesin penggali yang ringan. Sedangkan apa bila pondasi terdiri dari batuan yang mudah lapuk oleh pengaruh udara, maka penggalian agar dihentikan sementara setelah hampir mencapai akhir dinding galian dan lapisan terakhir tersebut baru boleh disingkap apa bila penimbunan - penimbunan zona kedap air akan segera dimulai di tempat tersebut atau ketika permukaan pondasi tersebut segera akan ditutup dengan lapisan cairan aspal semprot sebagai pelindung. Selanjutnya pada permukaan pondasi yang terletak di kedua tebing sungai biasanya diberi perekat lempung yang tipis sebagai timbunan lapisan pertama dan dipadatkan dengan mesin giling datar (*flat roller*) atau dengan setamper (*tamper*). Pada tahap-tahap permulaan, pemadatan dengan mesin giling tumbuk seperti mesin giling tapak biri-biri (*sheepfoot roller*) tidak, karena akan menggaruk lapisan pelindung serta akan menggilas pinggir - pinggir timbunan yang dapat mengakibatkan kerusakan-kerusakan pada permukaan pondasi. Meskipun tidak ada keharusan untuk meratakan permukaan bidang kontak antara permukaan pondasi dengan alas zone kedap air, tetapi tonjolan - tonjolan pada permukaan pondasi yang diperkirakan akan mengganggu kesempurnaan perlekatannya supaya disingkirkan.

Apabila sepanjang parit galian pondasi untuk alas zone kedap air dibuatkan penampang memanjangnya, maka diusahakan agar penampang tersebut merupakan garis lengkung yang baik dan landai. Hal tersebut dibutuhkan agar setelah penimbunan selesai, perbedaan-perbedaan tinggi penurunan pondasi tidak terlalu besar. Walaupun terdapat tonjolan - tonjolan atau cekungan - cekungan kadang-kadang tampaknya cukup landai, sedapat mungkin tonjolan - tonjolan atau cekungan tersebut agar diratakan mendekati garis lengkung penampang galian pondasi (Gambar. 2.7). Akan tetapi apa bila cekungan-cekungan tersebut berbentuk lubang-lubang yang sempit tetapi agak dalam dan penggaliannya akan mengalami kesukaran-kesukaran, maka lubang-lubang tersebut dapat juga ditutup dengan adukan beton sesudah dibersihkan dengan cermat.

❖ Pondasi untuk zone-zone lainnya

Pada pondasi untuk zone-zone lainnya biasanya tidak disyaratkan agar mempunyai kekedapan tertentu, akan tetapi kadang-kadang dilakukan pula perbaikan pada lapisan atas pondasi tersebut, supaya mempunyai daya dukung dan kekuatan. Geser yang memadai untuk menampung semua beban yang diperoleh dari tubuh bendungan. Dengan demikian tidak pula diharuskan agar penggalian pondasinya mencapai batuan yang kukuh.

Akan tetapi terhadap problema-problema yang berhubungan dengan penurunan - penurunan dan longsoran-longsoran pada pondasi perlu mendapat perhatian dan dengan demikian lapisan-lapisan yang lemah yang kadang-kadang mengandung zat-zat organis supaya disingkap dan disingkirkan. (seperti: lapisan teratas permukaan tanah, lapisan-lapisan tanah, pasir atau kerikil yang longgar, lapisan lumpur, dan lain-lain).



Gambar 2.7. Metode Perbaikan Tebing Sungai Pada Pondasi Bendungan
Sumber: Sosrodarsono, (1977,p.268)

2.7.3. Penutupan Lubang Pengujian dan Lubang Bor

Lubang - lubang pengujian dan lubang bor yang dibuat saat dilaksanakannya investigasi geologi dan mekanika tanah yang terletak di daerah alas tubuh bendungan supaya ditutup kembali disesuaikan dengan lokasi dan kondisi masing-masing dan disesuaikan dengan persyaratan - persyaratan yang diperlukan permukaan pondasi tubuh bendungan yang bersangkutan.

A. Penutupan lubang-lubang pengujian dan lubang-lubang bor

- ❖ Penutupan lubang - lubang pengujian dan lubang - lubang bor yang terdapat di dalam parit pondasi alas zone kedap air. Lubang - lubang pengujian maupun lubang - lubang pengeboran baik yang terdapat di dalam parit pondasi alas zone kedap air maupun yang terdapat tidak jauh dari parit tersebut, akan mengakibatkan kebocoran waduk yang sangat membahayakan. Disamping itu di saat pelaksanaan injeksi sementasi, kemungkinan dapat terjadi kebocoran bubur sementasi yang keluar melalui lubang-lubang pengecoran. Karena itu semua lubang - lubang pengujian maupun lubang - lubang pengeboran di daerah ini supaya diisi kembali dengan adukan semen.
- ❖ Penutupan lubang - lubang pengujian dan lubang-lubang bor yang lokasinya berjauhan dengan parit galian pondasi alas zone kedap air. Lubang - lubang pengujian yang lokasinya berjauhan dengan parit galian pondasi supaya diisi kembali dengan bahan

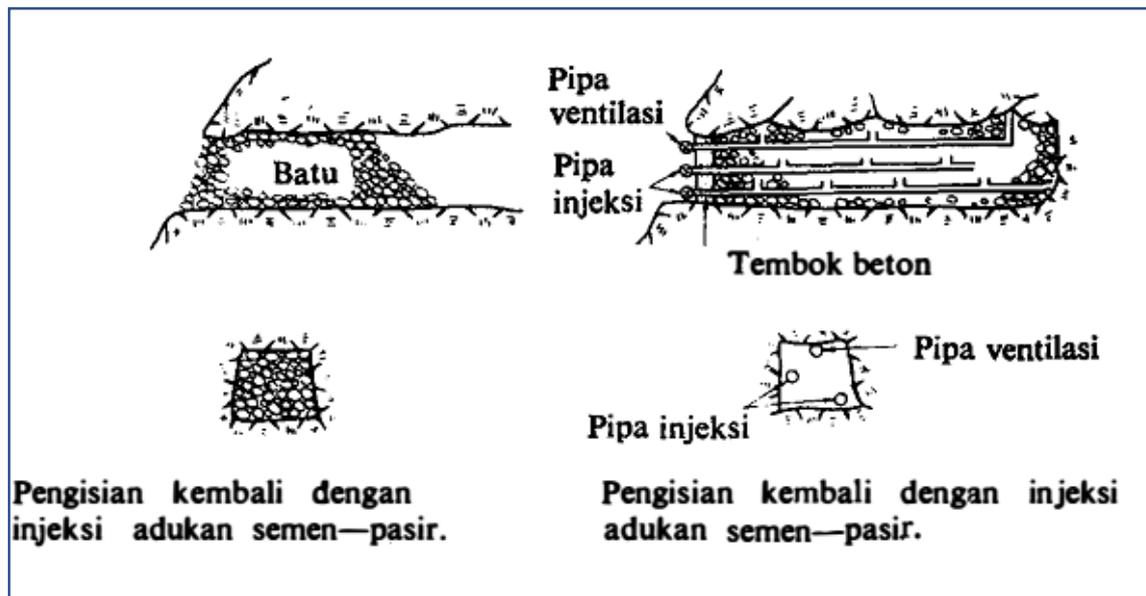
kerikil atau batu sedalam 10 meter dari bibir lubang, agar tidak terjadi penurunan - penurunan yang membahayakan tubuh bendungan. Dinding lubang - lubang pengujian (*lateral-holes*), harus diperkuat, supaya tidak terjadi keruntuhan yang membahayakan. Sedang pada lubang - lubang bor tidak perlu diisi kembali, cukup dibiarkan begitu saja.

- ❖ Pengisian kembali lubang - lubang pengujian dengan bahan - bahan batu supaya diperhatikan agar timbunan teratas bahan batu bersentuhan dengan dinding lubang untuk ini supaya pengisian teratasnya dilakukan dengan tenaga manusia, agar kepadatannya meyakinkan. Apabila kondisi dan lubang tersebut begitu lemah sehingga membutuhkan pengisian kembali dengan beton, maka pada lubang yang telah terisi batu tersebut dapat diinjeksi dengan adukan semen pasir (mortar) atau dengan pengecoran-pengecoran secara langsung.
- ❖ Metode injeksi adukan semen-pasir. Mula - mula lubang pengujian tersebut dibagi dua memanjang dengan dinding vertikal setebal 30 cm. Di atas dinding vertikal tersebut diletakkan sebuah pipa yang berfungsi sebagai ventilasi, sedang di kedua bagian lubang dipasang masing - masing sebuah pipa yang kelak akan berfungsi sebagai pipa injeksi. Untuk ketiga pipa tersebut dapat digunakan pipa gas yang berdiameter 3 cm. Skema penempatan pipa - pipa tersebut dapat diperiksa pada (Gambar 2.8). Pada kedua pipa injeksi tersebut dibuat lubang-lubang dengan jarak interval 3 m. Sedang pada pipa ventilasi dibuatkan lubang - lubang tepat di bawah lubang pengujian yang cekung ke atas dan ujung pipa tersebut dibengkokkan ke atas. Pelaksanaan injeksi dimulai dari pipa yang letaknya pada elevasi terbawah dan apabila sudah kelihatan adanya aliran adukan semen-pasir keluar dari pipa injeksi kedua, maka injeksi supaya dipindahkan pada pipa tersebut. Selanjutnya apabila pada pelaksanaan injeksi tersebut, sudah kelihatan adanya aliran adukan semen-pasir yang keluar dari pipa ventilasi maka injeksi pada pipa kedua inipun harus dihentikan, dan akhirnya injeksi dilakukan melalui pipa ventilasi. Tekanan pompa pada pipa ventilasi harus dikurangi dan injeksi dilaksanakan dengan tempo yang lambat dan dengan tekanan yang konstan. Akan tetapi pada akhir injeksi, biasanya tekanan pompa akan naik dengan sendirinya dan injeksi supaya dihentikan setelah tekanan pada pompa menunjukkan angka (2 s/d 3) kg/cm².

Komposisi adukan semen-pasir sebagai batas maximum biasanya diambil sebagai berikut:

- * Perbandingan volume antara semen/pasir biasanya diambil 3 : 2.
- * Perbandingan volume air/semen biasanya diambil 7 : 10.

Tergantung dari kondisi setempat, maka perbandingan volume semen/pasir dapat diambil lebih rendah dari angka 3 : 2.



Gambar 2.8. Penutupan Kembali Terowongan Pengujian
Sumber: Sosrodarsono, (1977,p.268)

B. Pengisian lubang-lubang bor

Semua lubang-lubang bor yang terletak di daerah parit galian pondasi alas zone kedap air supaya diisi kembali dengan menginjeksikan bubur sementasi melalui masing-masing lubang bor tersebut. Terutama pada lubang-lubang bor yang mengalirkan air-artesis, supaya diisi kembali secara cermat, sehingga air tidak lagi mengalir keluar dari lubang bor yang bersangkutan.

Akan tetapi untuk lubang-lubang bor yang lokasinya di luar daerah tersebut, maka tidak diperlukan pengisian kembali dan cukup dibiarkan begitu saja, kecuali pada lubang-lubang bor yang mengalirkan air-artesis. Selain itu, apabila sesudah waduk diisi, diperkirakan akan ada lubang bor yang mengalirkan air rembesan dari waduk, maka lubang bor semacam ini supaya diisi kembali dengan cara sebagaimana diuraikan di atas.

2.8. Dinding Halang

Metode parit halang (*cut off trench*) konvensional yang dilakukan dengan galian yang terlalu dalam dan muka air tanah yang tinggi dinilai tidak ekonomis untuk dilaksanakan. Metode lain yang dapat digunakan sebagai alternatif permasalahan tersebut dapat dilakukan dengan pembuatan dinding halang (*cut off wall*). Dinding halang dapat dikonstruksi dengan berbagai cara yang tidak memerlukan pengeringan pondasi (*dewatering*) dan dengan volume

galian yang jauh lebih kecil dibanding galian yang diperlukan dalam pembuatan paritan halang.

Dalam pedoman pembuatan dinding halang, dijelaskan hal - hal yang perlu dipertimbangkan dalam penyiapan desain dan pelaksanaan dinding halang untuk tipe yang paling sering digunakan dan diterima sebagai alternatif lain dari paritan halang konvensional.

2.8.1. Tujuan Pemakaian Dinding Halang

Tujuan utama dinding halang pada bendungan urugan adalah untuk mengendalikan rembesan pada tubuh dan pondasi bendungan. Dinding halang berfungsi mengurangi debit dan kecepatan rembesan. Dinding halang sering ditempatkan dibsgisn hulu as bendungan sehingga tekanan air dan gradien hidraulik yang tinggi tidak menimbulkan dampak yang merugikan terhadap bendungan. Dalam penggunaannya dinding halang sering dikombinasikan dengan metode pengendalian rembesan lain, baik yang bersifat upaya pengurangan rembesan, maupun berupa sistem drainasi.

Untuk meningkatkan efektifitas, dinding halang dipasang menembus lapisan lolos air sampai masuk kedalam lapisan kedap air (batuan keras). Dinding halang sepenggal (*partial cutoff wall*) yang hanya menembus 50% lapisan lolos air hanya akan mampu mengurangi debit rembesar sekitar 20% dan dinding halang sepenggal, sering digunakan sebagai upaya pengendalian rembesan dengan cara memotong semua zona lolos air di bagian atas lapisan yang mungkin ada dan tidak terdeteksi selama investigasi.

Dinding halang sepenggal kurang efisien untuk mengurangi tekanan gaya angkat (*uplift pressure*) dan gradien keluaran (*exit gradient*). Secara umum, dinding halang sepenggal pada lapisan lolos air, tidak memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap gradien keluaran, sehingga masih diperlukan upaya tambahan berupa pengendalian rembesan cara lain, seperti drainasi pada pondasi atau drainasi kaki. Apabila dinding halang direncanakan dengan penetrasi penuh sampai masuk ke dalam lapisan semi kedap air, kedalaman penetrasi dinding halang kedalam lapisan semi kedap dan pengaruh pengurangan gradien keluaran harus diperhitungkan secara tepat.

2.8.2. Jenis – Jenis Dinding Halang

Jenis - jenis dinding halang yang sering digunakan pada bendungan urugan, yaitu:

- Dinding halang paritan *slurry* tanah-bentonit
- Dinding halang beton
- Dinding halang paritan *slurry* semen-bentonit

- Dinding halang tiang, galeri beton bersusun, dan dinding halang tipis

Secara teori, semua jenis dinding halang tersebut dapat didesain sebagai penghalang rembesan positif (*positive cut off*). Namun masih ada beberapa ketidakpastian didalam desain dan pelaksanaan konstruksi pada semua jenis dinding halang. Perencana harus memahami benar kelebihan dan kekurangan setiap jenis dinding halang tersebut, agar dapat dipilih jenis dinding halang yang paling sesuai dengan dengan kondisi lapangan (investigasi). Faktor – faktor yang mempengaruhi desain dinding halang meliputi :

- Fungsi yang diinginkan
- Kondisi pondasi setempat
- Gradien hidraulik
- Pertimbangan ekonomi

Karakteristik utama dari dinding halang tersebut adalah seperti pada *tabel* dibawah :

Tabel 2.3.

Karakteristik Utama Dinding Halang (ICOLD, Bullein 129,2005)

Karakteris-tik	Dinding diafragma	Dinding diafragma	Dinding diafragma	Dinding diafragma	Dinding diafragma	Dinding slurry	Dinding tiang
Cara penggalian dan atau pemasangan	<i>Clamshells</i> mekanis	<i>Clamshells</i> mekanis	<i>Clamshells</i> mekanis(Kelly grabs)	Mesin pemotong (teknik pemotongan dgn sirkulasi balik)	Mesin pemotong (teknik pemotongan dgn.sirkulasi balik)	<i>Draglines, shovel</i> mekanis	<i>Downhole hammer drilling</i>
Material pengisi	Bentonit	Beton konvensional atau plastis	Bentonit/sem en atau beton (konvensional atau plastis)	<i>slurry</i> bentonite / semen	Beton konvensional atau plastis	Bentonit tanah atau bentonit semen	Beton
Sambungan (<i>joints</i>)	Tidak ada sambung- an	Sambungan keliling, sambungan cetakan	Sambungan keliling, sambungan cetakan	Beton / beton tanpa sambungan	Beton / beton tanpa sambungan	Tanpa sambungan	Dengan sambungan
Kedalaman maksimum (m)	50	120	50 – 60	50	150	15 – 20	50
Jenis tanah / batuan	Tanah penutup (<i>over burden</i>)	Tanah penutup(<i>over burden</i>)	Tanah penutup	Tanah penutup batuan terlapuk, batuan sampai 100 Mpa (dengan alat khusus)	Tanah penutup batuan terlapuk, batuan sampai 100 Mpa (dengan alat khusus)	Tanah penutup	Batuan keras (<i>over burden</i>)
Keterangan	-	-	-	Untuk kedalaman > 10 m	Untuk kedalaman > 10 m	Gradien hidraulik $i \leq 10m$	Mahal

Sumber: ICOLD, Bulletin 129 (2005)

Sedangkan karakteristik material pengisi adalah seperti *tabel 2* dibawah ini:

Tabel 2.4.

Karakteristik Material Untuk Dinding Diafragma (ICOLD, Bulletin 129, 2005)

Jenis Material	Kekuatan (Mpa)	Permeabilitas k (m/dtk)	Deformabilitas	Sifat Retakan	Komposisi
Beton tremi	30 – 50	10^{-12}	Kaku	Mudah retak (brittle)	Semen + agregat slump 20 cm w/c = 0,5 – 0,7
Beton plastis	1,0 – 3,0	10^{-9}	Tinggi	Tahan terhadap regangan sampai 10 % tanpa retak	Semen + agregat + lempung + bentonit w/c \cong 0,5
<i>Slurry</i> semen/ bentonit	0,1 – 1,0	10^{-8}	Sangat tinggi	Tahan terhadap deformasi dan tekanan lateral	Semen + bentonit w/c \cong 0,5

Sumber: ICOLD, Bulletin 129 (2005)

Perencana juga harus mempertimbangkan perlunya pemasangan instrumen untuk memantau kinerja dinding halang. Jenis instrumen yang sering digunakan adalah

- Inklinometer dan atau alat ukur penurunan (*settlement gauge*), untuk memantau deformasi,
- Pisometer yang dipasang di sebelah hulu dan hilir dinding halang untuk memantau efisiensi dinding beton.

Analisis kimiawi, dan kondisi fisik air rembesan, sering dapat membantu mengetahui titik asal rembesan.

2.8.3. Paritan *Slurry* Bentonite-Tanah

Dinding halang paritan *slurry* bentonit dibuat dengan cara menggali paritan sempit tegak dengan lebar 1,0 m sampai 3,0 m pada lapisan pondasi lurus air. Kedalaman maksimum dinding halang tipe ini tergantung pada metode dan alat gali yang digunakan, untuk *backhoe*, dapat mencapai kedalaman sekitar 10 m, *dragline* 20 m dan *clamshell* 25 m.

Bila paritan *slurry* bentonit-tanah difungsikan sebagai dinding halang positif (*positive cut off*), umumnya galian dibuat sampai lapisan yang relatif kedap air. Selama pelaksanaan galian, paritan yang tergenang air diisi dengan *suspense slurry* bentonit. Untuk menjaga agar permukaan *slurry* konstan didekat bibir galian, *slurry* baru selalu ditambahkan sejalan dengan laju penggalian. Air dari suspensi *slurry* meresap kedalam dinding yang porous dan meninggalkan lapisan tipis butiran koloid di sekeliling permukaan galian membentuk semacam *zona filter* pelindung yang berbentuk kurungan atau disebut “kurungan *filter*”. Kombinasi antara tekanan hidrostatik *slurry* dan kurungan *filter* akan menciptakan Stabilitas

pada dinding galian. Setelah dinding halang selesai dikerjakan, kurungan *filter* nantinya akan berfungsi sebagai lapisan kedap air (*low permeability*) pertama dari dinding halang.

Setelah paritan selesai digali, lubang paritan diurug kembali dengan tanah dari hasil galian paritan yang umumnya berupa pasir dan kerikil dicampur dengan *slurry* dari paritan. Material yang sering digunakan sebagai bahan urugan kembali, perlu dicampur dengan material dari sumber galian lain untuk memodifikasi gradasinya, agar memiliki gradasi yang baik (*well graded*).

Pengisian material ke dalam paritan dilakukan dengan menggunakan *tremie*, *clamshell*, atau dengan cara didorong langsung masuk kedalam paritan bercampur dengan *slurry*. Menurut ICOLD (1985), material urugan kembali, biasanya terdiri dari adonan bentonit dengan bentonit 5 – 15% (perbandingan berat), mempunyai viskositas dari corong *marsh* lebih dari 40 detik, dicampur dengan pasir bergradasi baik dan kerikil ukuran 0,02 dan 30 mm. Campuran tersebut harus mempunyai standar *slump* antara 100 – 200 mm. Menurut Xanthakos (1979), tanah lempungan yang ada di lokasi mungkin dapat digunakan, meskipun mempunyai batas cair lebih dari 60% dan akan sulit dicampur dalam kondisi menggumpal. Kandungan minimum lanau 10% dan butiran halus lempung ukuran 0,05 mm diperlukan untuk menghasilkan permeabilitas yang rendah.

Tabel 2.5.

Batasan Gradasi Tipikal Untuk Material Urugan Kembali (*Back Fill*) Paritan *Slurry*

Ukuran (mm)	%- <i>passing</i> (UK dan Australia)	%- <i>passing</i> (USA)
75	80-100	80-100
19	40-100	40-100
4,75	30-70	30-80
0,6	20-50	20-60
0,075	10-25	10-30

Sumber: Pedoman Pembuatan Dinding Halang (*Cut Off Wall*) Pada Bendungan Urugan (2005,p.6)

Paritan diisi kembali dengan menggunakan material diatas menggunakan *bulldozer*, sedemikian rupa sehingga kemiringan lereng urugan antara 6 : 1 dan 8 : 1. Untuk memulai pengurugan kembali, kemiringan awal harus dibentuk menurunkan material menggunakan *clamsheel bucket*, menjatuhkan begitu saja material, akan menyebabkan terjadinya pemisahan butiran. Celah selebar 15 – 45 m dibiarkan diantara bidang galian dan kaki urugan, supaya dasar paritan dapat dibersihkan. Pada kasus tertentu, beton setebal 0,6 – 0,9 m dihampar di dasar paritan, untuk melindungi dasar paritan terhadap gerusan air rembesan. Bagian atas parit halang harus dilindungi terhadap pengeringan dengan menutupnya menggunakan urugan tanah. Penurunan yang terjadi tergantung dari lebar parit, bertambah

lebar parit, bertambah besar penurunannya. Penurunan tersebut biasanya terjadi selama 6 bulan pertama.

Pada prinsipnya, metode parit *slurry* ini digunakan berdasarkan kenyataan, bahwa dinding lobang atau dinding parit pada lapisan aluvial tetap *stabil* tanpa penyangga, bila diisi dengan adonan / *slurry* lumpur yang bersifat thixotropis. Adonan tersebut biasanya berupa bentonit atau lempung aktif. Sebagai penahan air, biasanya digunakan panel berbentuk empat persegi panjang.

2.8.3.1. Desain Campuran *Slurry*

Campuran atau suspensi bentonit yang kandungan lempungnya lebih besar 1% akan bersifat thixotropis, misalnya suspensi *montmorillonite*. Lempung *illite* akan menjadi aktif dan bersifat thixotropis, apabila ditambahkan 5% (perbandingan berat) sodium karbonat. Material bentonit yang diperoleh secara alamiah adalah merupakan material yang lebih baik, apabila tersedia. Suspensi yang bersifat thixotropis tersebut, mampu membuat batas kedap air pada bidang kontak dan akan menghasilkan tekanan hidrostatik yang mengimbangi tekanan tanah. Suspensi tersebut juga cukup *stabil*, yaitu tidak mudah mengendap (*settle*) dan berat spesifiknya tidak akan berubah sepanjang masa.

Suspensi tersebut juga akan menghasilkan gaya-gaya :

- a. Tekanan hidrostatik
- b. Perlawanan geser yang bekerja di dekat permukaan dinding parit
- c. Perlawanan pasif dari *slurry*
- d. Perlawanan terhadap deformasi
- e. Gaya *electro-osmosis*

Dua butir terakhir sangat kecil dan dapat diabaikan.

Pengalaman lapangan menunjukkan, bahwa 75 – 90% gaya-gaya untuk membuat *stabil* di atas, dihasilkan oleh tekanan hidrostatik *slurry*. Meskipun endapan lapisan kedap air yang menempel pada dinding parit (*filter cake*) tidak mempunyai gaya perlawanan yang signifikan, namun formasinya sangat efektif terhadap tekanan hidrostatik *slurry*, tanpa ada penahan air di antaranya. Hal ini tidak dipunyai oleh cairan lain, karena tekanan cairan lain tersebut tidak dapat mengimbangi tekanan tanah.

Slurry umumnya terdiri dari suspensi koloidal bentonit yang dicairkan dengan air. Bentonit yang digunakan harus murni, bermutu baik yang secara alami berbentuk tepung (*sodium cation-base bentonite*), dengan sifat mengembang yang tinggi (*high swelling*). Dipasaran, sering sulit untuk memperoleh bentonit murni tanpa campuran bahan aditif

anorganik atau tanpa tambahan pengembang (*extender*) yang berfungsi untuk menjaga mutunya.

Penggunaan bahan tambahan tersebut umumnya dapat diterima, namun perencana harus mempertimbangkan kerugian yang ditimbulkannya akibat pemakaian aditif yang berlebihan khususnya aditif organik seperti *carboximethyl cellulose* (CMC), dalam jangka panjang karena terjadinya dekomposisi pada kurungan filter.

Konsentrasi bentonite didalam *slurry* umumnya sebesar 5 sampai 15% (di USA lazimnya sekitar 5%), diukur dari perbandingan berat kering bentonit dan air, tergantung pada jenis aditif yang digunakan dan sifat *slurry* yang diperlukan.

2.8.3.2. Karakteristik Slurry

Terdapat empat sifat penting *slurry*, masing-masing sifat memiliki pengaruh terhadap pelaksanaan konstruksi dan pengaruh jangka panjang terhadap kinerja dinding halang. Di antara keempatnya, hanya satu sifat yang dapat diukur di lapangan, yaitu : kerapatan, kekentalan, Gel/Jelly, Filtrasi. Selain itu, juga harus ditetapkan spesifikasi kualitas (*grade*) *bentonit* dan konsentrasi bentonit yang akan digunakan.

2.8.3.3. Stabilitas Paritan

Beban kerja yang harus dipertimbangkan untuk stabilitas paritan meliputi :

- Peralatan kerja
- Elevasi muka air tanah
- Elevasi permukaan *slurry*
- Kerapatan *slurry*

Stabilitas *slurry* dianalisis dengan metoda yang sesuai untuk menghitung tekanan hidrostatis *slurry* pada permukaan dinding galian paritan, umumnya cukup menggunakan analisis baji sederhana (*simple wedge analyzed*). Pada sebagian besar pondasi lolos air, analisis Stabilitas dinding galian paritan umumnya cukup memadai dengan menggunakan parameter kekuatan pada kondisi zona drainasi (*drainage strengths*). Apabila dijumpai adanya endapan lanau atau lempung, parameter yang digunakan adalah parameter kekuatan pada kondisi tak terdrainasi (*undrain*).

Penggunaan *slurry* dengan kerapatan tinggi akan mengalami kesulitan dalam menjaga kerapatan *slurry* di bawah nilai maksimum pada bagian bawah galian paritan tanpa melakukan pengadukan *slurry* secara terus menerus. Bila Stabilitas paritan tidak mencukupi, sebaiknya digunakan berm untuk menaikkan Stabilitas galian paritan.

2.8.3.4. Campuran Material Pengisi

Permeabilitas material urugan kembali dinding halang, tergantung pada gradasi material tanah dan banyaknya bentonit yang dicampurkan. Umumnya, permeabilitas material urugan kembali akan turun seiring dengan setiap 1% peningkatan konsentrasi campuran bentonit dari berat kering material urugan kembali (umumnya konsentrasi bentonit 5% dari berat kering material urugan kembali).

Pada kondisi tanah kering dapat direncanakan *slurry* dengan *slump* sebesar 50 sampai 150 mm, kandungan bentonit yang diperlukan dalam material urugan kembali adalah sebesar $\pm 2\%$ dari perbandingan berat kering. *Slump* sebesar 5 – 15 mm, umumnya akan dapat membentuk kemiringan lereng antara 10:1 dan 15:1 pada kondisi normal.

Kandungan air memiliki hubungan langsung dengan *slump*. Kandungan air sebesar 20 sampai 30%, umumnya akan menghasilkan *slump* sekitar 50 sampai 150 mm. Material tanah yang digunakan untuk urugan kembali yang diambil dari bawah muka air tanah dan memiliki kandungan air 10 sampai 20%.

Gradien hidraulik yang diperlukan untuk mengatasi kekuatan gel *slurry* bentonit dalam material urugan kembali dan mendorong bentonit keluar dari material urugan kembali, biasanya diukur dengan uji “*blowout gradient test*”. Menurut *Xanthako's dan D'Appolonia*, uji ini adalah berupa uji gradien hidraulik pada contoh setebal 300 mm pada suatu alat bertekanan. Untuk gradasi material urugan kembali yang normal, biasanya akan menghasilkan *blowout gradient* sekitar 32. Uji ini dapat memberi nilai gradien yang diperlukan untuk mengatasi kekuatan gel *slurry*, tetapi kenyataan di lapangan menunjukkan, bahwa mekanisme kelongsoran urugan kembali adalah sangat berbeda.

Tekanan terkekang pada urugan kembali (dinding halang) didalam paritan sangat terbatas, karena adanya pengaruh “*arching*”. Kemungkinan terjadinya rekah hidraulik pada material urugan kembali tidak mungkin terjadi, karena kurungan filter kemungkinan telah berperan membantu mencegah terjadinya rekah hidraulik. Karena belum adanya kejelasan mengenai potensi rekah hidraulik tersebut, desain campuran material urugan kembali dibuat dengan pendekatan yang konservatif.

2.8.4. Dinding Halang Beton (*Plastic Concrete Cut Off Wall*)

Dinding halang beton atau dinding diafragma digunakan sebagai penghalang rembesan positif pada tubuh bendungan dan pada pondasi batuan atau tanah. Bagian bawah dinding halang harus tertanam pada lapisan kedap air. Dinding halang beton dapat berupa suatu seri panel beton yang dicor langsung di dalam paritan atau dengan panel beton “*precast*” yang dicor di luar lokasi.

Slurry berfungsi meningkatkan Stabilitas galian paritan sebelum panel beton dicor atau dipasang. Beton yang digunakan dapat berupa beton konvensional atau beton plastis. Beton konvensional lebih sering digunakan pada bangunan gedung dan untuk konstruksi dinding halang dinilai terlalu kaku (*rigid*), sehingga lebih sering digunakan beton plastis. Beton plastis berfungsi sebagai dinding penahan air yang bersifat plastis dan lentur. Campuran yang biasa digunakan adalah *slurry* bentonit-semen dan agregat. Sering pula digunakan campuran 1 PC : 0,85 lempung : 4 pasir : 1,66 air (perbandingan berat). Dengan perbandingan campuran tersebut dapat diperoleh kuat tekan sekitar 40 kg/cm². Sedangkan untuk dinding beton konvensional, biasanya digunakan campuran 1 : 1,5 : 3 dengan ukuran agregat maksimum 19 mm dengan rasio air-semen 0,5. Kuat tekan umur 28 hari yang diperoleh dapat mencapai 200 kg/cm². Besi tulangan yang digunakan biasanya berdiameter 16-20 mm dengan interval jarak antara 300-325 mm.

2.8.4.1. Campuran Beton

Beton harus memiliki tingkat kemudahan alir dan kemudahan pengerjaan yang tinggi, agar bubur beton yang dituang melalui pipa penyalur (*tremi*), dapat mendesak keatas bubur beton yang telah dituang terlebih dulu. Kemudahan pengerjaan beton, adalah merupakan sifat beton yang terpenting untuk mencapai kualitas tinggi dinding halang. Beton, harus mudah pengerjaannya dan tidak boleh terjadi segregasi. Desain campuran beton menurut pedoman pembuatan dinding halang bendungan urugan, harus sesuai dengan standar yang berlaku, antara lain:

- *Slump*, berkisar 150 sampai 225 mm
- Perbandingan berat maksimum air-semen (*WCR*) 0,5 sampai 0,6
- Kuat tekan (*compressive strength*) 28 hari, 1 sampai 3 Mpa.

ICOLD (1985) menyarankan beberapa sifat sebagai berikut :

- Perbandingan modulus *Young* antara dinding halang dengan tanah:

$$E_{\text{wall}} \leq 5 E_{\text{soil}},$$
- Tegangan runtuh (*failure strain*) harus tinggi, lihat contoh Gambar 7
- Kuat tekan antara 1 sampai 3 Mpa.

Komposisi campuran beton plastis per m³ terdiri dari :

- *Slurry* bentonit : 400 ~ 500 liter
- Semen : 100 ~ 200 kg
- Agregat ukuran < 30 mm bergradasi baik : 1300 ~ 1500 kg

Perbandingan semen dan air (*CWR*) : 0,1 sampai 0,3 sesuai tipe semen.

Perbandingan berat bentonit dan air : 2 ~ 12 % tergantung tingkat hidrasi dan viskositas 50 detik *Marsh*.

Bila agregat kasar digantikan dengan agregat medium sampai pasir halus (semen mortar), maka komposisi campuran disarankan menjadi :

- Bentonite *slurry* : 375 ~ 750 liter
- Semen : 75 ~ 290 kg
- Agregat medium ~ pasir halus : 500 ~ 1000 kg

Pada bendungan urugan, kekuatan beton bukan merupakan sasaran utama, sasaran utamanya adalah dinding halang harus bersifat kedap air.

Hal-hal lain yang perlu diperhatikan pada bahan campuran beton adalah :

a. Agregat

Kecenderungan terjadinya segregasi beton dapat dikurangi dengan membatasi ukuran agregat maksimum sebesar 25 mm dan agregat yang digunakan harus bergradasi baik. Kemampuan alir dan kemudahan pengerjaan dapat ditingkatkan dengan menggunakan agregat berbentuk mendekati bulat (*rounded*) seperti material endapan sungai.

b. Kandungan udara

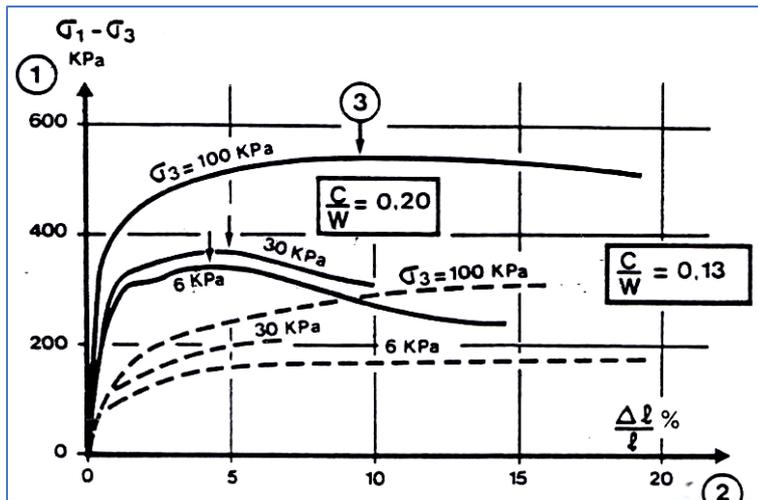
Kandungan udara (*air entrainment*) dapat meningkatkan kemudahan pengerjaan, tetapi juga akan mengurangi kekuatan beton. Perencana harus menetapkan nilai kekuatan beton pada kondisi kemudahan pengerjaan sesuai yang diinginkan. Umumnya, desain campuran beton menggunakan kandungan udara sebesar 4 sampai 7 %.

c. Retarder

Unsur pelambat (*retarder*), digunakan untuk mencegah pengerasan beton yang terlalu cepat, atau memperlambat pengerasan beton ketika dijumpai kondisi yang sulit untuk pengecoran beton. Sebelum digunakan, perencana harus memeriksa dan membandingkan lebih dulu “*setting time*” dengan waktu yang diperlukan untuk pembetonan. Dalam pelaksanaannya, sering digunakan “*super plasticizers*” untuk memperlambat waktu pengerasan, sekaligus lebih mempermudah pengerjaan beton, dan juga mengurangi retakan pada dinding beton.

d. Semen

Untuk beton dinding halang, biasanya digunakan semen tipe I. Perencana hendaknya meneliti kemungkinan adanya potensi reaksi kimia yang dapat memperlemah beton, dan bila perlu dapat digunakan semen tipe II atau tipe V.



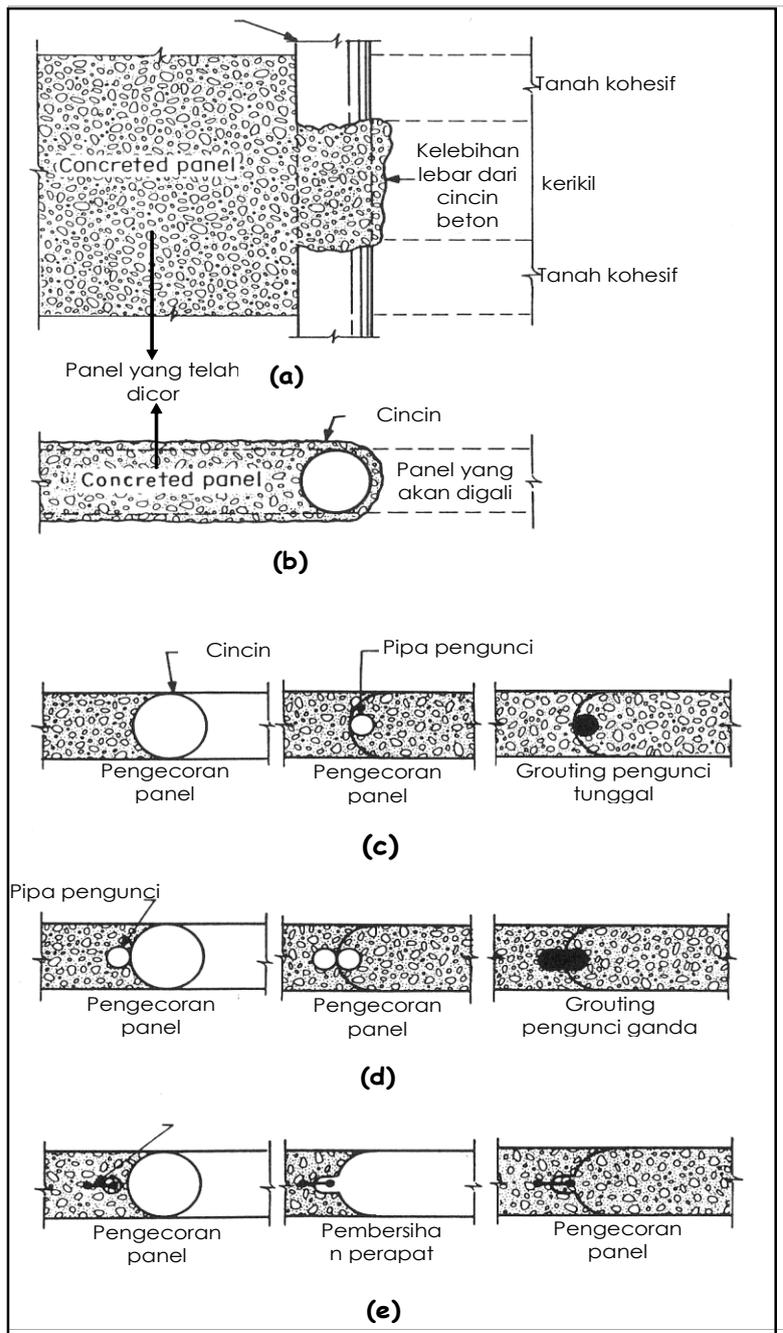
Gambar 2.9. Uji Triaxial pada Beton Plastis
Sumber: ICOLD (1985)

2.8.4.2. Pengujian Sebelum Pelaksanaan

Sebelum pelaksanaan konstruksi dinding halang, sebaiknya dilakukan uji penggalian dan metode pengecoran di lapangan dengan skala penuh, untuk menetapkan kelayakan metode konstruksinya. Selama pelaksanaan konstruksi, sebaiknya perencana melakukan pemeriksaan lapangan, kondisi pondasi setelah digali kemungkinan akan berpengaruh dalam pemilihan peralatan gali.

2.8.4.3. Hubungan dengan Konstruksi Eksisting

Hubungan antara dinding halang dengan konstruksi harus sangat agar pertemuan tersebut tidak bocor. Biasanya, ujung akhir dinding halang akan bertemu dengan konstruksi beton yang telah dilaksanakan lebih dulu. Sebelum pembetonan panel, permukaan beton konstruksi lama harus dikupas dan dibersihkan dari kotoran tanah, agar beton lama dan baru dapat tersambung dengan baik dan kedap air. Bila perlu dapat dilakukan *grouting* pada sambungan. Tidak boleh terjadi kerusakan pada konstruksi yang sudah ada awal, sehingga dapat digunakan cara lain dengan menggunakan dinding bentonit-tanah pada sambungan dengan konstruksi lama.



Gambar 2.10. Gambar a) & b) Kelebihan Pengecoran Akibat Kelebihan Galian (*Overbreak*). Gambar c), d), e) : Sambungan Panel Dengan c) *Key Joint* Tunggal; d) *Key Joint* Ganda; e) Dengan Perapat Air
Sumber: Xanthakos (1979)

2.8.5. Dinding Halang *Slurry* Semen - Betonite

Dinding halang *slurry* bentonit-semen atau *cement-bentonite slurry trench cut off wall* atau *grout diaphragm wall*, di buat dengan cara menggali paritan selebar 0,60 sampai 0,90m (ICOLD 1985: 0,5 ~1,5m) pada pondasi lolos air. Untuk menahan agar galian paritan tidak runtuh, setelah selesai penggalian paritan diisi campuran bentonit-semen-air, campuran

tetap dibiarkan berada diparitan, dan kemudian setelah mengeras akan membentuk dinding kedap air.

Metode lain yang paling sering dilakukan, adalah dengan teknik penggalian panel yang dilakukan secara bergantian dengan lebar panel 3 sampai 6 m. Penggalian pertama dilakukan untuk rangkaian panel primer dan sebelum *slurry* bentonit - semen panel primer mengeras, panel sekunder yang terletak berselang - selang dengan panel primer digali memotong sedikit panel primer seperti gambar dibawah.

Penggalian dilakukan dengan *grab bucket* atau *clamshell*. Tidak ada ketentuan praktis yang membatasi kedalaman dinding halang *slurry* bentonit-semen, dinding halang jenis ini dapat dikonstruksi sampai kedalaman lebih dari 50 m.

2.8.5.1. Campuran *Slurry* Bentonite-Semen

Fungsi utama *slurry* bentonit adalah untuk membantu jenis *blast furnish cement* menjaga agar semen tetap dalam bentuk suspensi sampai terjadi set up awal (*initial set up*). Semen ditambahkan setelah *slurry* betonite mencapai hidrasi penuh (*full hydrated*). Pencampuran bentonit bersamaan semen dengan air tidak dibenarkan. Perbandingan semen-air akan berpengaruh pada kekuatan, deformabilitas dan permeabilitas.

Komposisi yang disarankan ICOLD (1985) untuk campuran *slurry* bentonit-semen per m³ adalah sebagai berikut:

- Semen 80 sampai 350 kg
- Bentonit 30 sampai 50 kg

Menurut *Xanthakos*, persentasi campuran adalah sebagai berikut:

- Semen 15 – 20%
- Bentonit 2 – 4%
- Pasir dan krikil 5 – 10 %

Perbandingan berat semen-air:

- Untuk semen Portland, berkisar 3,3 : 1 sampai 5 : 1 ,
- Untuk semen jenis *blast furnish cement* (BLF) berkisar 4 : 1 sampai 10 : 1. Semen memiliki ketahanan yang lebih besar terhadap serangan atau reaksi air tanah yang akan melarutkan kandungan kapur didalam semen.

Apabila terjadi kemungkinan reaksi yang merugikan dari air tanah, sementara semen jenis *blast furnish cement* tidak tersedia dipasaran, sebagai penggantinya dapat digunakan semen Portland ditambah 10 ~ 100% abu terbang dihitung dari berat semen. Untuk menetapkan besar campuran semen-air bagi suatu *slurry* bentonit, sebaiknya dilakukan uji

laboratorium agar diperoleh *slurry* bentonit semen yang memiliki kekakuan, deformabilitas dan permeabilitas sesuai rencana.

Slurry bentonit-semen, akan mulai mengeras dalam beberapa jam. Retarder, dapat digunakan untuk memperlambat pengerasan sekaligus meningkatkan kemudahan pengerjaan (*workability*) *slurry*. Sebelum memberikan persetujuan penggunaan suatu jenis retarder, perencana harus meneliti lebih dulu kemungkinan adanya efek yang merugikan terhadap kinerja jangka panjang dinding.

2.8.5.2. Stabilitas Paritan Selama Pelaksanaan

Kurungan filter *slurry* bentonit-semen yang terbentuk pada sekeliling galian paritan adalah lebih lulus air dibanding kurungan filter *slurry* bentonit tanpa semen. Kondisi ini, umumnya tidak menjadi masalah bila dinding halang dilaksanakan dengan menggunakan metode panel. Karena panjang panel umumnya hanya 3 sampai 6 m, maka pengaruh *arching* mempunyai peran yang cukup besar pada Stabilitas paritan selama pelaksanaan konstruksi, sehingga hanya memerlukan sedikit tekanan hidrostatik pada paritan. Tetapi, untuk panel yang lebih panjang atau paritan terbuka menerus, efek dari kecilnya efisiensi kurungan filter pada Stabilitas paritan perlu dipertimbangkan.

2.8.5.3. Hubungan dengan Zona Inti

Pada dinding halang *slurry* bentonit-semen perlu perhatian khusus pada sambungan antara dinding halang dengan timbunan inti, agar benar-benar menyatu. Meskipun penurunan bentonit-semen tidak terlalu besar setelah mengeras, tetapi kompresibilitasnya akan berbeda dengan material pondasi disekelilingnya. Sehingga, dilakukan upaya pencegahan terjadinya konsentrasi tegangan tinggi atau tegangan rendah. Untuk mengatasi hal tersebut, di atas dinding halang, umumnya dipasang zona transisi, untuk meneruskan tegangan pada sambungan dengan urugan inti.

2.8.6. Dinding Halang Jenis Lain

Dinding halang tipe lain yang masih masuk di dalam kelompok *positive cut-off* yaitu:

- (1) Dinding tiang (*piles*)
- (2) Gallery beton bersusun (*superposed concreted galleries*)
- (3) Dinding getar (*vib, slim vibrated cutoff, thin cutoff*)

Dinding-dinding halang tersebut digunakan, apabila tipe dinding halang seperti yang telah dibahas sebelumnya, mengalami kesulitan dalam pelaksanaannya atau tidak sesuai dengan kondisi di lapangan.

2.8.6.1. Dinding Tiang

Deretan menerus dari *bored piles* adalah juga merupakan suatu konstruksi penahan air yang kedap air. Tiang-tiang yang dibuat saling menutup (*interlocking*) atau dikenal sebagai “*secant piles*” adalah merupakan perkembangan dari tiang yang disusun secara rapat dan menerus, karena dinding semakin bertambah tebal. Bahan yang digunakan adalah beton plastis, untuk mencegah terjadinya rembesan.

Tahapan pelaksanaan pembuatan tiang-tiang ini adalah sebagai berikut :

1. Buat dinding pengarah, untuk menjamin tiang dapat dipasang secara vertikal. Biasanya, dinding pengarah ini dibuat dari beton bertulang berukuran 500 x 600 mm di bagian kiri dan kanan tiang bor *secant wall*, menggunakan tulangan utama 4 D25 mm dan sengkang D10 – 200.
2. Buat tiang bor primer yang dipasang secara berselang-seling dengan tiang bor sekunder, dengan cara :
 - a. Buat lubang bor dan *casing* dengan menggunakan mesin bor BG-14. Pemasangan *casing* dilakukan terlebih dahulu per seksi sepanjang 14 m. Material kotoran bor (*cutting*) diambil dengan *auger*, bila tidak ada air tanah, atau dengan *drill bucket*, bila dijumpai air tanah. Bila dijumpai bongkah batu, maka *casing* harus dipasang terlebih dahulu sampai pada bongkah batu tersebut. Pengeboran dilanjutkan dengan menggunakan *double core barrel* untuk menghancurkan bongkah batu tersebut.
 - b. Teruskan pengeboran sampai kedalaman yang direncanakan.
 - c. Masukkan pipa tremi untuk pengecoran beton.
 - d. Masukkan campuran beton plastis yang terdiri dari semen tipe I, agregat dan bentonit. Mutu beton tersebut dapat di desain mendekati K-300 dengan slump 180 mm. Pastikan ujung bawah pipa tremi tertanam di dalam beton minimal sedalam 2 m selama pengecoran, sampai pengecoran selesai.
 - e. Cabut *casing* dengan bantuan mesin bor.
 - f. Setelah beton plastis dari tiang bor primer mengeras dalam waktu 1 – 3 hari, buat tiang bor sekunder dengan melakukan pemboran. Pemboran tersebut dilakukan sedemikian rupa, sehingga memotong tiang primer dengan bantuan *casing* bergigi sampai mencapai kedalaman rencana. Bagian sisi tiang bor primer harus dapat terpotong sekitar 100 mm kiri dan kanan.
 - g. Bila telah mencapai kedalaman yang direncanakan, masukkan pipa tremi guna pengecoran beton plastis.

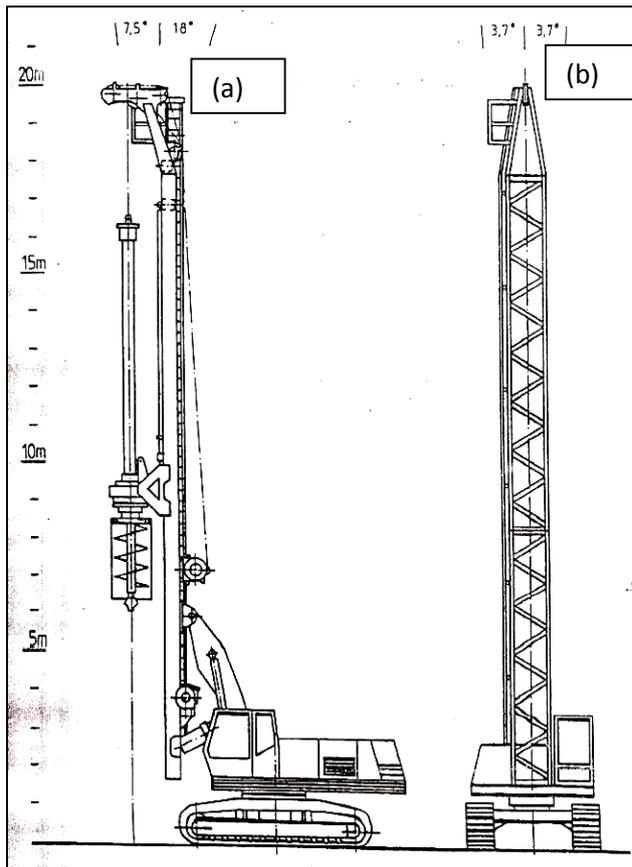
- h. Seperti halnya pada tiang sekunder, cor ke dalam pipa tremi campuran beton plastis dengan mutu beton mendekati K-300 dengan slump 180 mm. Lakukan pengecoran beton plastis seperti halnya pada tiang primer.

Jenis dinding halang yang lain adalah jenis ICOS yang terdiri dari tiang-tiang terpisah dengan elemen cembung dua (*bi-concave element*) di antaranya contoh pada bendungan Zoccolo, Italia, dengan tiang berdiameter 0.60 m dan kedalaman 45-55 m (Pedoman Pembuatan Dinding Halang (*Cut Off Wall*) Pada Bendungan Urugan, 2005, p.41).

Metode dinding tiang, dapat diaplikasikan pada batuan yang sangat keras atau batuan abrasif dan juga pada tanah campur bongkah batu (*boulders*). Alat yang digunakan biasanya berupa alat bor tumbuk (*down-hole hammer drilling percussion*) atau alat bor putar. Kedalaman yang dapat dicapai adalah lebih dari 50 m. Presisi saat pelaksanaan pembuatan tiang sangat diperlukan untuk memastikan bahwa tiang tidak berubah arah secara berlebihan pada bagian ujung bawahnya. Contohnya, pada bendungan Khao Laem, Watakeekul & Cole yang dibangun tahun 1985, lubang untuk tiang dibor dengan toleransi 0.02%, untuk memastikan overlap yang cukup.

Diameter tiang, biasanya antara 0.5 – 1.0 m, contoh pada bendungan Khao Laem dengan diameter 0,76 m, seperti halnya dinding difragma, saat pelaksanaan, diperlukan andang atau lantai kerja horisontal (*horizontal working platforms*) yang stabil yang harus dipersiapkan terlebih dulu. Pada bendungan *Wolf Creek; USA*, jenis tiang ICOS dipasang pada puncak bendungan saat muka air waduk hampir penuh. Panjang total deretan tiang adalah 85 m dengan penetrasi sampai kedalaman 30 m, masuk ke dalam batuan karst (Pedoman Pembuatan Dinding Halang (*Cut Off Wall*) Pada Bendungan Urugan, 2005, p.41).

Di Indonesia, jenis dinding halang tiang telah diaplikasikan pada bendungan Jatiluhur sebagai konstruksi pemisah air rembesan dari waduk dengan air dari *tail race*, sehingga pengukuran rembesan di V notch tidak terganggu oleh air dari *tail race*.



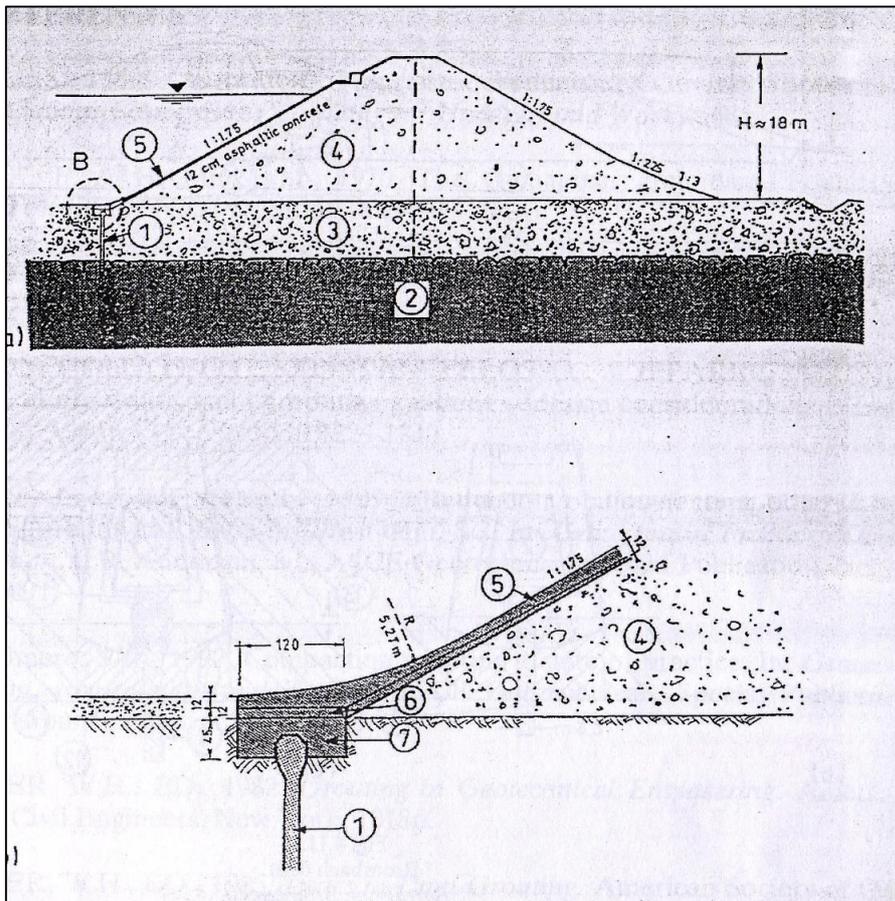
Gambar 2.11. (a) Mesin Bor Tiang BAUER BG-14 (b) Tebal Perpotongan Tiang Bor
 Sumber: Pedoman Pembuatan Dinding Halang (*Cut Off Wall*) Pada Bendungan Urugan
 (2005,p.43)

2.8.6.2. Dinding Halang Tipis

Dinding halang tipis atau sering disebut pula *vib walls* atau *slim vibrated cutoff* atau *thin cutoff*, cocok untuk digunakan pada pondasi tanah yang tidak mengandung bongkah batu. Lubang untuk dinding dibuat dengan cara menggetarkan dan menggerakkan balok (*beam*) kebawah, kemudian balok ditarik keatas sambil mengisi lubang dengan mortar. Rangkaian panel yang tersusun rapat akan membentuk dinding. Untuk mengisi lubang, sering digunakan material grouting atau mortar yang campur dengan tepung batu, sehingga terbentuk material yang padat dengan kerapatan $1,6 \text{ Mg/m}^3$, yang dapat mencegah terjadinya penyusutan serta dapat mengisi dengan baik cetakan lubang yang terbentuk oleh balok setelah diangkat keatas. Untuk memperoleh dinding yang kedap, selama pelaksanaan perlu dilakukan pemeriksaan secara menerus.

Dinding halang tipis, sering digunakan untuk bangunan sementara dengan tekanan air yang kecil. Tebal dinding sekitar beberapa cm sampai 15 cm, dengan kedalaman sampai 20 m. Konstruksi ini biasanya digunakan untuk tanggul sementara atau *cofferdam*.

Penggunaan konstruksi ini harus mempertimbangkan kemungkinan terjadinya erosi internal akibat gradien hidraulik yang tinggi.

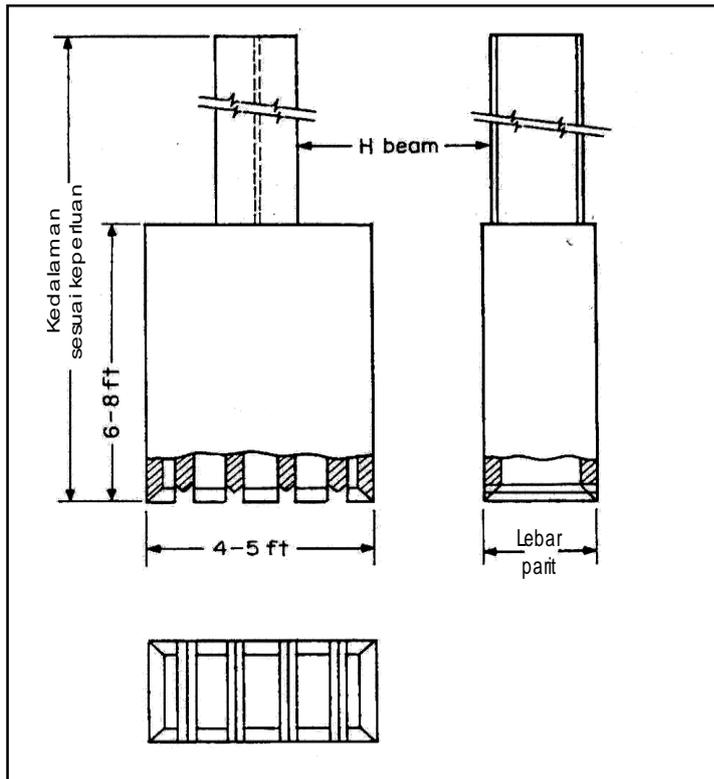


Gambar 2.12. Bendungan Lech

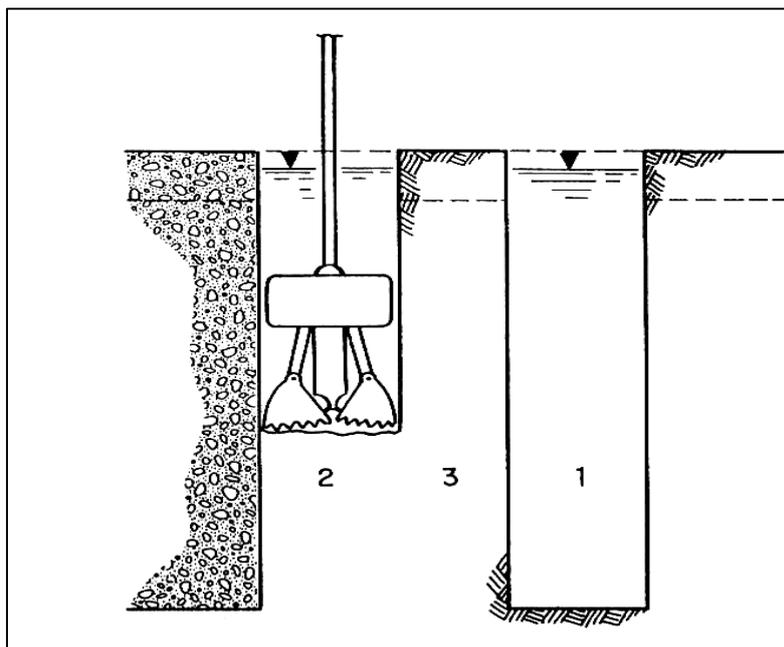
Sumber: Modul Diklat Perbaikan Pondasi Bendungan (2009,p.74)

Gambar diatas merupakan Potongan melintang tubuh bendungan.

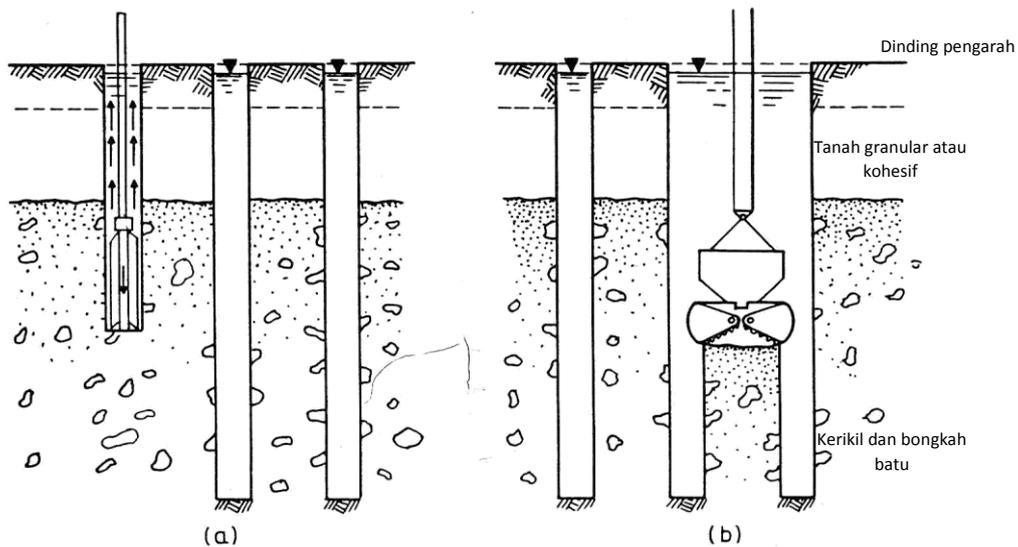
- 1). Dinding Halang Getar
- 2). Lempung Lacustrine
- 3). Kerikil
- 4). Timbunan Kerikil
- 5). Facing/Lapisan Kedap Air Beton Aspal 12 Cm
- 6). Pelat Dasar (*Base Plate*) Beton Aspal
- 7). Cap (*Dense Plastic Asphalt*)



Gambar 2.13. Contoh Alat Pahat Pemecah Boulder Yang Berada Di Dalam Lubang Galian
Sumber: Modul Diklat Perbaikan Fondasi Bendungan (2009,p.74)



Gambar 2.14. Contoh Penggalan Dengan Metode Satu Tahap (*Single Stage*) dengan *Clamshell Bucket*; 1) Lintasan Galian Pertama (*1st Pass/Bite*); 2) Lintasan Galian Kedua; 3) Lintasan Galian Terakhir
Sumber: Modul Diklat Perbaikan Fondasi Bendungan (2009,p.75)



Gambar 2.15. Contoh Penggalian Dengan Metode Dua Tahap (*Two Stages*) Menggunakan Bor Perkusi dan *Clamshell*; a) Tahap Pertama Penggalian *Pilot Hole* dengan Bor Perkusi; b) Tahap Kedua Penggalian Dengan *Bucket Clamshell*.

Sumber: ICOLD (1985)

2.9. Grouting

Grouting merupakan salah satu teknik perbaikan pondasi dengan memasukkan atau menginjeksikan suatu bubur semen / grouting yang terdiri dari campuran semen plus aditif dan lempung ke dalam batuan pondasi bawah permukaan melalui lubang bor untuk menyumbat atau mengisi kekar, retakan, rekahan atau lubang - lubang bawah tanah (*goa*) atau *void*. Cara perbaikan pondasi bawah permukaan ini telah banyak diaplikasikan pada bendungan-bendungan di Indonesia yang mempunyai kondisi geologi tertentu.

2.9.1. Tujuan Grouting

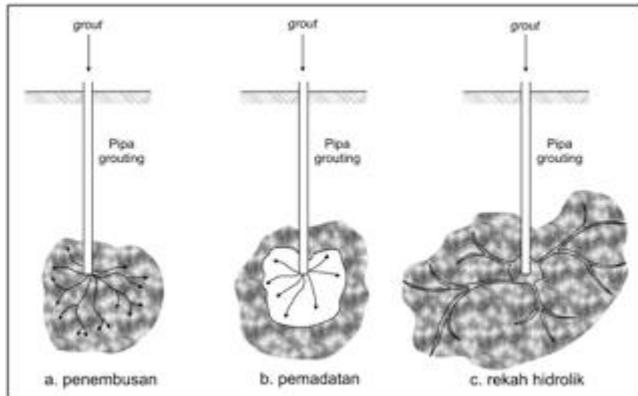
Proses grouting dengan memasukkan suatu cairan dengan tekanan ke dalam rongga memiliki tujuan – tujuan sebagai berikut :

- Menurunkan permeabilitas
- Meningkatkan kuat geser
- Mengurangi kompresibilitas
- Mengurangi potensi erosi internal, terutama pada pondasi alluvial

Fungsi grouting :

- a. Penetrasi atau penembusan, pengaliran grouting kedalam rongga tanah dan lapisan tipis batuan dengan pengaruh minimum struktur asli yang berfungsi untuk menurunkan permeabilitas dan meningkatkan kuat geser.

- b. Pemadatan, massa grout yang sangat kental dipompa ke dalam tanah dengan tujuan mendorong dan memadatkan, sehingga tanah dapat meningkatkan daya dukung tanah berbutir halus.
- c. Rekah hidrolis, tekanan grouting lebih besar dari kuat batuan atau tanah yang akan di grouting, sehingga mampu memecah material dan mampu menembus zona rekahan dengan tujuan mengurangi kompresibilitas dan menurunkan permeabilitas massa tanah / batuan.



Gambar 2.16. Berbagai Fungsi Grouting Tanah dan Batuan

Sumber: <https://smiagiundip.files.wordpress.com/2013/03/untitled.png>

2.9.2. Jenis - Jenis Grouting

Grouting semen sekarang ini sering digunakan untuk memperbaiki kondisi batuan pondasi dari bendungan atau pondasi bangunan pelimpah.

Hal-hal yang perlu diperhatikan pada perbaikan pondasi ini, antara lain :

- 1) Pondasi batuan sesuai dengan kondisi geologinya, baik dari jenis batuan penyusun maupun struktur bawah permukaan sangat variatif dari satu lokasi ke lokasi lain.
- 2) Perlu mencermati penampang geologi dan penampang permeabilitas melintang dan memanjang tapak bendungan untuk mempersiapkan pekerjaan pondasi bawah Permukaan
- 3) Metode grouting dinilai cocok untuk memperbaiki pondasi bawah permukaan yang lebih dalam 10 m hingga 100 m tanpa melakukan penggalian dan cukup dengan pengeboran dari permukaan pondasi.

Jenis perbaikan pondasi dengan grouting dapat dikelompokkan menjadi :

- a) Grouting tirai
- b) Grouting konsolidasi
- c) Grouting selimut
- d) Pengisi rongga (*cavity*)

- e) Pengisi lubang bor
- f) Grouting terowongan
- g) Grouting kontak
- h) Grouting khusus (tanah)

2.9.2.1. Grouting Tirai (*Curtain Grouting*)

Berfungsi membuat tirai sekat kedap air yang dapat menahan rembesan yang besar dengan memperpanjang filtrasi sehingga berfungsi pula mengurangi *uplift* dan kemungkinan *piping*. Sebagai petunjuk umum untuk perencanaan awal, kedalaman grouting dapat diambil sebesar $2/3$ beda tinggi tekanan air waduk. Permeabilitas pondasi batuan biasanya berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman. Grouting dilakukan dari permukaan pondasi dengan menggunakan tekanan yang rendah atau mendekati tekanan gravitasi untuk bagian/zona yang lebih atas. Perlu perhatian khusus untuk mencegah terjadinya rekahan atau tererosinya timbunan.

Grouting di dalam galeri biasanya dilakukan setelah konstruksi hampir selesai. Pengeboran untuk drainasi tidak dilakukan setelah grouting selesai. Menurut kaidah hidrolik, rumus umum pola grouting untuk bendungan dengan ketinggian (H) adalah :

Tabel 2.6.

Rumus Umum Kedalaman Dan Jarak Titik Grouting

Rumus	Kedalaman Lubang Grouting (m)	Jarak antar lubang (m)	Keterangan
I	$1/3H + 10 \sim 20$	3 atau kurang	dihitung dari dasar sungai
II	$1/2 H$	1.5	–
III	$0.7H \sim 0.8H$	bervariasi	tergantung kekar batuan

Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.123)

2.9.2.2. Grouting Konsolidasi (*Consolidation Grouting*)

Berfungsi merekondisi struktur batuan pondasi yang mengalami kerusakan waktu digali, baik dengan alat besar ataupun dengan peledakan. Meningkatkan kekuatan geser batuan yang jelek, hancur dan berkekar. Kedalaman grouting bervariasi dari 5 m hingga 10 m dan spasi dari 5 m hingga 2,5 m dalam sistim grid.

2.9.2.3. Grouting Selimut (*Blanket Grouting*)

Berfungsi menahan rembesan air pada lapisan permukaan pondasi yang melalui retakan-retakan, umumnya berdampingan dengan grouting tirai pada dasar zona inti kedap air, kedalaman umumnya 5 m dan jarak 2,5 m- 5 m.

2.9.2.4. Grouting Pengisi Rongga (*Filling Grouting*)

Kekar-kekar terbuka dapat digROUT dengan semen, namun bila terisi oleh lempung, hasilnya meragukan. Keberhasilan grout melalui rongga tergantung dari penyebaran rongga dan material pengisinya, untuk itu diperlukan investigasi tambahan yang mendalam. Bila suatu rongga ditemui saat pengeboran, rongga tersebut harus diisi dengan semen campur pasir.

2.9.2.5. Grouting Pengisi Lubang Bor

Bila tidak diisi, lubang bor pada bendungan urugan tanah dapat berpotensi bahaya terhadap rembesan dan piping. Lubang bor pada pondasi batuan harus diisi dengan grouting yang mempunyai rasio air-semen antara 0,7 – 1,0 dicampur sekitar 4% bentonit. Material grout dipompakan melalui suatu pipa besi (tremi) berdiameter minimum 1” dan pipa ditarik pelan-pelan selama pemompaan, sehingga lubang terisi penuh dengan material grout. Metode tersebut juga digunakan untuk mengisi lubang bor pada tubuh bendungan, tetapi material grout yang digunakan dibuat lebih plastis (campuran bentonit lebih banyak).

2.9.2.6. Grouting Sambungan (*Contact Grouting, Joint Grouting*)

Berfungsi mengisi sambungan antara beton lama dan baru, mengisi rongga susutan beton dan rongga susutan antara *steel liner* dan beton. Material grout mengisi rongga / celah pada bidang kontak akibat susutan dengan menggunakan semen yang lebih sedikit melalui pipa-pipa yang telah dipersiapkan selama konstruksi.

Tekanan grouting yang digunakan mungkin bervariasi, tetapi dianjurkan menggunakan tekanan yang cukup tinggi. Grouting kontak dilakukan untuk memperoleh bidang kontak yang baik antara struktur beton dengan struktur besi dengan batuan disekitarnya. Susutan yang terjadi pada struktur beton dapat mengakibatkan terjadinya rembesan melalui sepanjang bidang kontak. Perbaikan ini dilakukan di daerah tumpuan bendungan beton atau di daerah mahkota / puncak terowongan pada batuan.

2.9.2.7. Grouting Tanah

Grouting pada batuan tidak dapat diaplikasikan untuk tanah. Grouting tanah biasanya dilakukan untuk mengurangi rembesan atau meningkatkan daya dukung tanah. Yang dimaksudkan dengan tanah ini mencakup: material granular yang bervariasi dari lempung, lanau, pasir (halus hingga kasar), hingga kerikil campur pasir.

Metode grouting tanah tersebut dapat diringkas sebagai berikut :

- a. *Casing* : suatu pipa lindung (*casing*) dimasukkan ke dalam lubang bor pada bagian lapisan tanah yang akan diperbaiki. Bersamaan dengan material grout yang dimasukkan ke dalam pipa, pipa lindung tersebut ditarik ke atas. Material grout yang digunakan biasanya menggunakan grout kimia.
- b. *Grout sheath* : suatu pipa tertentu (*flush pipe*) dimasukkan dengan menggunakan grout yang getas (*brittle grout*) untuk mencegah kebocoran dari luar pipa. Pipa grout kemudian ditarik pada jarak tertentu, menyisakan selubung grout getas di bawah pipa. Grout dipompakan ke dalam tanah melalui retakan-retakan yang dihasilkan oleh tekanan grout ke dalam selubung grout getas di bawah bagian ujung pipa grout.
- c. *Tubes a manchette* : pada cara ini, suatu pipa perforasi yang dilengkapi dengan suatu selubung khusus dimasukkan ke dalam lubang injeksi. Lubang-lubang/perforasi ditutup oleh bagian pendek dari suatu selubung karet (*manchette*) di bagian luar pipa sebagai penutup/katup satu arah. Bagian perforasi dari pipa dipasang pada bagian yang akan diinjeksi. Suatu *packer* ganda dipasang pada bagian yang akan diperbaiki. Tekanan grout dipompakan ke dalam lubang di antara *packer* akan menyebabkan terdorongnya selubung karet yang menutupi perforasi, memecahkan selubung grout dan mengakibatkan material grout masuk ke dalam tanah. Alat ini cocok digunakan untuk menginjeksikan grout semen, lempung atau grout kimia. Lubang-lubang dan ventilasi-ventilasi selubung karet telah digunakan untuk menginjeksikan setiap material grout secara terpisah dan bergantian ke dalam tanah. Secara ekonomi, cara ini merupakan suatu cara perbaikan yang cocok dilakukan pada rongga besar dengan menggunakan grout kimia yang mahal dengan pertama kali mengisinya menggunakan campuran lempung dengan semen.
 - 1) **Lempung dan lanau halus** : material grout ini hanya dapat memindahkan butiran-butiran dengan melakukan penetrasi bidang perlemahan ke bentuk lensa-lensa lensa-lensa atau dengan memadatkan material untuk membentuknya menjadi bola-bola grout (*grout bulbs*). Cara grouting ini dapat dilakukan dengan menggunakan semen atau campuran semen dengan material halus lainnya.
 - 2) **Lanau sedang-kasar dan pasir halus** : merupakan material granular dimana permeabilitas sedang untuk melewatkan material grout kimia untuk mengisi pori-pori dan membentuk massa yang terkonsolidasi.
 - 3) **Pasir kasar dan kerikil** : material grout yang cocok untuk lapisan ini adalah material grout kimia yang cukup kental atau *slurry* semen.

2.9.3. Investigasi Geoteknik untuk Grouting

Investigasi geoteknik merupakan kegiatan yang sangat penting sebelum kegiatan operasi grouting dilakukan. Hasil investigasi geoteknik merupakan informasi penting yang dipakai sebagai dasar dalam menilai kemampuan grouting (*groutability*) suatu lokasi, pemakaian bahan inieksi dan penyusunan program pelaksanaan grouting. Informasi paling minimal dari hasil studi geoteknik untuk keperluan grouting suatu lokasi proyek adalah

- 1) Kondisi permukaan
- 2) Kondisi Geologi
- 3) Sifat-sifat fisik dan teknik dari batuan/tanah.

1. Kondisi Permukaan

Dalam survey geoteknik yang secara lengkap memberikan data fisik permukaan, akan dapat mengetahui gambaran situasi di daerah lokasi secara terinci dan mampu memberikan informasi yang diperlukan antara lain :

- 1) Kemampuan untuk dilakukan grouting pada permukaan tanah
- 4) Lokasi yang paling baik untuk peralatan pencampur, operasi grouting dan sistem pemompaan serta peletakan gudang bahan grouting.

2. Kondisi Geologi

Keadaan geologi daerah lokasi harus diketahui dengan berbagai cara antara lain dengan pemboran, sehingga informasi dapat diberikan selengkap mungkin antara lain :

- 1) Stratigrafi, struktur serta jenis batuan, tanah dsb.
- 2) Permeabilitas dan porositas dari tanah
- 3) Kedalaman air tanah dan sifat kimianya

Peta dan profil geologi harus dibuat pada beberapa tempat terutama profil sepanjang terowongan, sehingga dapat diperoleh gambaran tentang jenis batuan/tanah yang akan ditembus oleh terowongan tersebut.

3. Sifat Fisik dan Teknik Tanah/Batuan

Informasi sifat fisik dan teknik tanah mempunyai arti yang penting terutama bila grouting akan di pertimbangkan sebagai bagian dari penggalian terowongan. Sifat teknik dari tanah dalam kaitannya dengan hal tersebut adalah untuk mengetahui :

- 1) Mengetahui kelayakan untuk dilakukan grouting
- 2) Pola grouting
- 3) Penentuan material grouting
- 4) Biaya pelaksanaan grouting

Analisa ukuran butir dapat juga digunakan dalam penentuan amal untuk menilai

kemampuan injeksi. Suatu batasan secara kasar sebagai pegangan, yaitu jika dalam analisa butir memperlihatkan lebih dari PO % dari contoh dapat lolos pada saringan it 200, tanah tersebut tidak dapat diinjeksi secara baik. Grouting dapat dilakukan pada jenis tanah yang bolos 10 - 20 % bila mempergunakan bahan grout yang memiliki viskositas sangat rendah, namun kemungkinan berhasil mengisi rongga antar butir tanah sangat kecil dan lebih mungkin hanya bersifat kompaksi pada tanah saja.

Apabila analisa butir memberikan indikasi bahwa tanah memiliki kemampuan injeksi, maka harus dilanjutkan pengujian laboratorium untuk menentukan koefisien permeabilitasnya. Sedangkan untuk batuan yang banyak diskontinuitas apa saja yang dijumpai di lapangan berupa struktur geologi yang ada serta jenis batumannya yang terpenting adalah karakteristik dari rekahan batuan antara lain kekar, sesar, zona geser dan sebagainya. Diskontinuitas yang terjadi secara alami pada masa batuan atau retakan akibat peledakan memiliki arti yang penting dalam ilmu geoteknik dan harus diperhitungkan dalam teknik pondasi. Rekahan akan menentukan permeabilitas, *groutabilitas*, kompresibilitas dan kekuatan masa batuan dimana semuanya merupakan sifat teknik batuan yang paling mendasar. Karakteristik rekahan dari masa batuan antara lain adalah

- 1) Frekuensi.
- 2) Lebar retakan.
- 3) Orientasi.
- 4) Kontinuitas.
- 5) Permukaan rekahan dan bahan isian rekahan tersebut.

2.9.4. Pola Grouting

2.9.4.1. Grouting Tirai

Pola dan kedalaman lubang grouting ditentukan oleh persyaratan desain dan sifat alami batuan. Bila kegunaannya untuk konsolidasi, lubang ditata pada pola teratur pada seluruh daerah permukaan yang diperkuat dan kedalaman ditentukan oleh penyebaran batuan yang terpecah belah (*broken rock*) sesuai persyaratan struktural mengenai deformabilitas dan kekuatan pondasi. Apabila digunakan untuk kekedapan, lubang grout harus di dalam satu seri barisan membentuk tirai menuju tegak lurus arah rembesan. Ukuran lubang grouting semen biasanya digunakan dengan diameter lubang 38 mm, untuk material yang lebih kasar maka digunakan diameter yang lebih besar.

a. Grouting Tirai Baris Tunggal

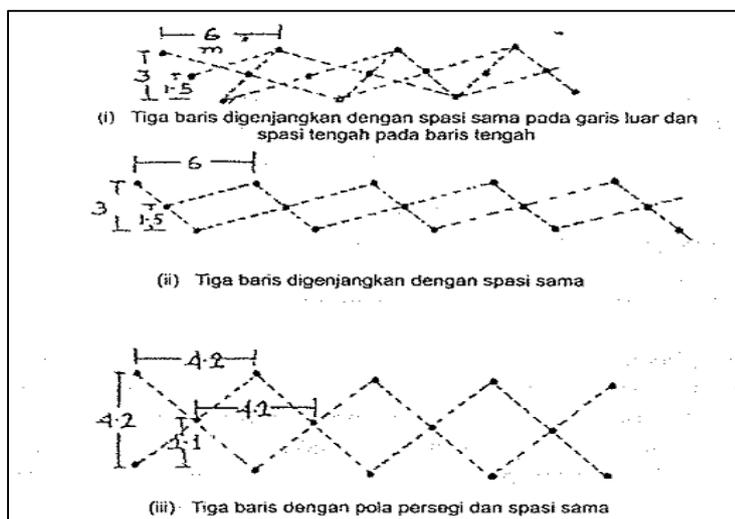
Tirai baris tunggal dapat diterapkan pada formasi batuan yang tergolong kompak. Efektif digunakan pada batuan yang mempunyai jaringan diskontinuitas cukup teratur

dengan ukuran bukaan yang seragam. Pada tirai baris tunggal, biasanya pengeboran berspasi lebar dimulai dari lubang primer, diikuti lubang sekunder dan tersier yang bertahap dengan spasi yang lebih pendek. Jarak lubang primer ditentukan berdasarkan panjang interkoneksi antar lubang grout. Spesi atau jarak awal dari lubang primer biasanya bervariasi 6 m sampai 12 m dan tetap dengan mempertimbangkan kondisi geologi (Mistry, 1965). Lubang sekunder dan tersier memiliki jarak lebih pendek dibandingkan lubang primer serta kebutuhan dari lubang sekunder dan tersier ditentukan berdasarkan hasil *test* grouting.

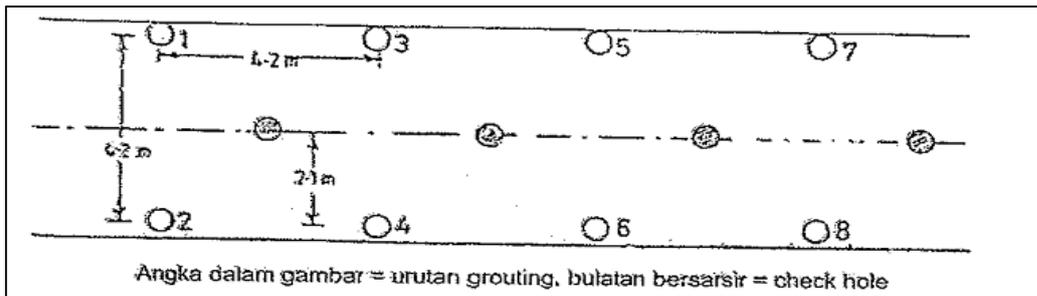
b. Grouting Tirai Baris Ganda

Pada kondisi geologi bukaan yang lebar, gua, sebaran grout tidak teratur maka tidak efektif apabila dilakukan dengan baris tunggal. Bukaan yang besar menyebabkan absorpsi volume grouting yang berlebih bila digunakan tekanan tinggi dan grouting yang encer, sedangkan untuk bahan grouting yang lebih kental digunakan untuk menutup lubang yang lebih besar dan menahan penetrasi dari retakan yang lebih halus. Kelebihan dari tirai baris ganda adalah terdapat baris lubang grouting dengan bahan grouting yang kental diluar lubang grouting awal. Setelah grouting lubang terluar selesai dilaksanakan, maka pada lubang baris tengah atau lubang lain dibor dan digrouting dengan tekanan yang lebih tinggi dan bahan grouting yang lebih encer.

Grouting pada bariterluar dikerjakan lebih awal dengan tujuan memberikan batasan grouting dan meningkatkan efektifitas grouting pada lubang baris berikutnya (tengah) atau barisan spasi final untuk mengisi rekahan yang lebih halus dengan tekanan yang lebih tinggi. Spasi atau jarak dari lubang setiap baris ditentukan berdasarkan sifat diskontinuitas batuan dan terkadang pada baris tengah metode pisah-spasi (*Spilt Spacing*) harus disesuaikan hingga nilai koefisien rembesan atau lugeon yang diinginkan tercapai.



Gambar 2.17. Contoh Pola Lubang Grouting di Bendungan Ukai, India
Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.112)



Gambar 2.18. Urutan Grouting Bendungan Ukai, India
 Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.113)

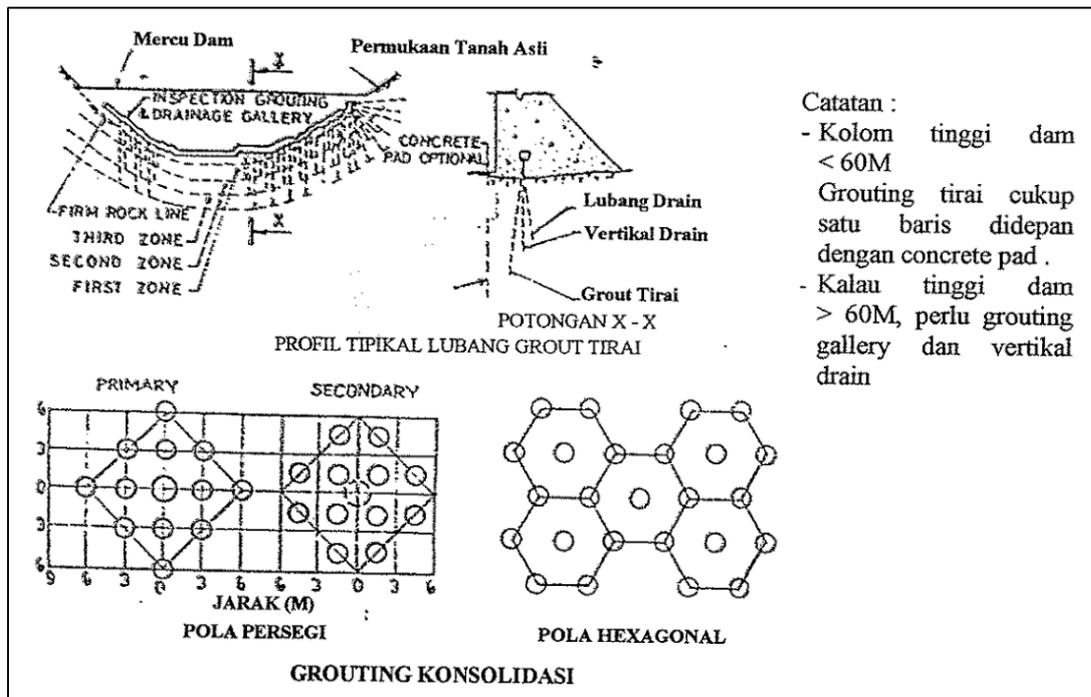
Pola tipikal lubang grouting di Bendungan Ukai, India meliputi :

- a) Tiga baris digenjang oleh spasi sama dari baris luar pada jarak 6 m dan spasi tengah pada baris tengah.
- b) Tiga baris digenjang dengan spasi sama pada jarak 6 m.
- c) Tiga baris digenjang pola persegi dan spasi sama pada jarak 4,2 m.

Urutan grouting pada bendungan Ukai digambarkan pada Gambar 2.18, dapat dilihat bahwa pola persegi dengan *check hole* pada garis tengah lebih efektif daripada pola dengan genjang (*staggered pattern*).

2.9.4.2. Grouting Konsolidasi

Pemilihan pola untuk grouting konsolidasi tergantung pada apakah perlu mencuci dan memancarkan (*jet*) lubang secara sistematis. Apabila harus dilakukan pencucian dan pemancaran maka pola hexagonal sangat cocok karena memungkinkan untuk aliran balik (*reversal*). Apabila pencucian dan pemancaran dilakukan untuk menghilangkan material lunak pada lapisan tipia, maka tidak perlu ada lubang primer dan sekunder. Pola bujur sangkar atau persegi cocok dipilih apabila menginginkan keberhasilan grouting dengan membandingkan absorpsi grout pada lubang primer dan sekunder.



Gambar 2.19. Pola Lubang Grouting

Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.113)

2.9.5. Tekanan Grouting

Pengujian tekanan (pemompaan air) digunakan untuk mengetahui karakteristik lubang aliran grouting dan kemampuan batuan pondasi dalam menerima tekanan grouting. Karakteristik lubang grouting diantaranya adalah laminar, turbulen, batuan bergerak (*dilation*), runtuh (*collapse*), tercuci (*wash out*), dan berongga (*blind void*). Menentukan tekanan grouting sesuai dengan kondisi geologi pondasi merupakan kegiatan yang sulit dan harus ditentukan oleh tenaga ahli yang sudah berpengalaman. Apabila tekanan yang ditentukan terlalu rendah maka akan mengakibatkan sebaran grouting tidak maksimal. Sebaliknya jika tekanan terlalu besar menurut Soedibyo (2003:303) akan mengakibatkan :

- Dapat melemahkan (*daya dukung*) dan merusak struktur batuan pondasi
- Kuantitas injeksi semen akan terlalu banyak, karena sebaran injeksi grouting sangat luas
- Jika terdapat pelat beton (*concrete slab*) maka beton akan terangkat
- Akan mengakibatkan biaya dan waktu yang kurang efisien.

Melihat besarnya resiko akibat pemilihan tekanan yang tidak tepat, maka perlu berhati-hati dalam penentuan tekanan dengan dilakukan beberapa kali *trial grouting*. Dalam pelaksanaannya, untuk *Water Pressure Test (WPT)* dengan tekanan kurang dari 10 kg/cm^2 akan dilakukan peningkatan bertahap tanpa mengacu pengujian standar lugeon.

Tabel 2.7.
Karakteristik Tekanan Grouting

Grup	Tahapan Per 10 menit	Pola Tekanan Pemompaan	Pola Lugeon	Karakteristik dalam lubang uji
A - Aliran Laminar	1	//// a	=====	Nilai Lugeon hampir sama sehingga aliran laminar harga lugeon dapat direrata prosentase terjadi aktual = 78%, penyimpangan = 5%
	2	//// b	=====	
	3	//// c	=====	
	4	//// d=b	=====	
	5	//// e=a	=====	
B - Aliran Turbulen	1	//// a	=====	Nilai Lugeon terendah pada tekanan tertinggi menandakan aliran terbuka. Nilai Lugeon dipilih pada tekanan tertinggi, prosentase = 13% terhadap 53%
	2	//// b	=====	
	3	//// c	=====	
	4	//// d=b	=====	
	5	//// e=a	=====	
C - Aliran Dilatasi	1	//// a	=====	Lugeon tertinggi terjadi pada tekanan tertinggi hingga dilatasi pakai nilai Lugeon terendah untuk tekanan menengah. Prosentase kejadian = 1%, penyimpangan = 9%
	2	//// b	=====	
	3	//// c	=====	
	4	//// d=b	=====	
	5	//// e=a	=====	
D - Aliran Tercuci (wash out)	1	//// a	=====	Nilai Lugeon meningkat selama proses test sehingga test menyebabkan perubahan pondasi pilih nilai Lugeon tertinggi. Prosentase kejadian = 2%, deviasi=21%
	2	//// b	=====	
	3	//// c	=====	
	4	//// d=b	=====	
	5	//// e=a	=====	
E - Aliran Mengisi Rongga (void filling)	1	//// a	=====	Nilai Lugeon menurun selama proses test sehingga mengisi perlahan rongga besar. Biasanya dipakai lugeon terakhir Prosentasi kejadian = 6 % deviasi = 12 %
	2	//// b	=====	
	3	//// c	=====	
	4	//// d=b	=====	
	5	//// e=a	=====	

Sumber : Houlsby, 1983

Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.14)

2.9.6. Material Grouting

Pada tahap pertama (*stage 1*) biasanya digunakan campuran encer dengan perbandingan W/C 10 : 1 dilanjutkan dengan 5 : 1, 2 : 1, 1 : 1, 0.5 : 1 yang dianggap campuran paling kental. Untuk kondisi batuan yang mudah runtuh ditambah bentonite dengan perbandingan terhadap berat semen 2 % - 5 %. Penggunaan betonnite juga dapat menyebabkan waktu pengerasan dapat diperlambat, sehingga grouting dapat mengisi rongga yang lebih jauh. Pada kondisi batuan yang sangat porous (berlubang – lubang) maka dapat digunakan pasir halus yang bersih sehingga dapat mengurangi biaya grouting. Untuk mengetahui jumlah / volume grouting pada batuan ada istilah grouting *take* yang merupakan banyaknya semen yang masuk ke dalam lubang per meter dan dari grouting *take* dapat juga mengetahui tinggi rendahnya sementasi.

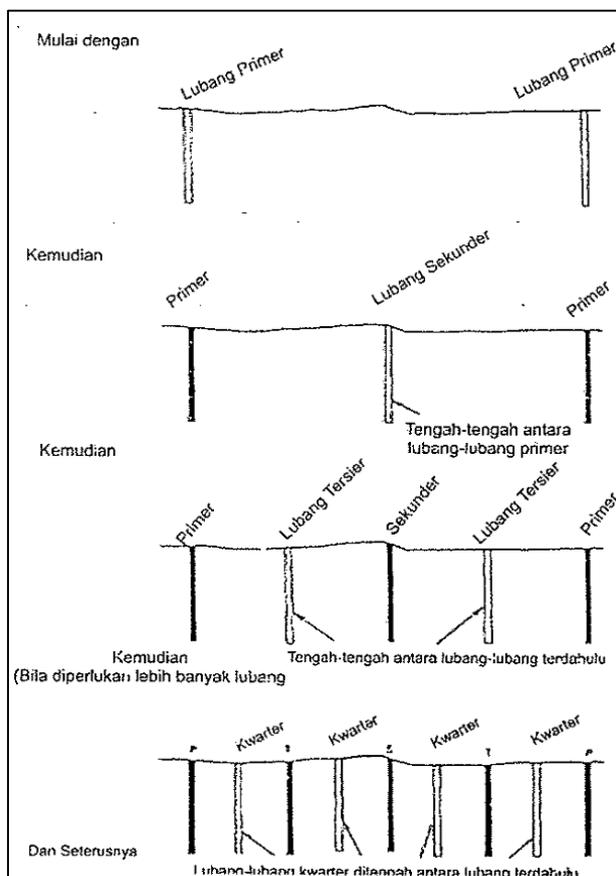
Tabel 2.8.
Grouting Take

No.	Besarnya grout take Kg/m'	Keterangan
1.	0 – 25	Rendah (low)
2.	26 – 50	Cukup rendah (moderately low)
3.	51 – 100	Cukup (moderate)
4.	101 – 200	Cukup tinggi (moderately high)
5.	201 – 400	Tinggi (high)
6.	> 400	Sangat tinggi (very high)

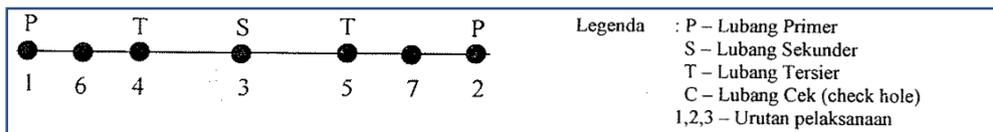
Sumber: Soedibyo (2003,p.300)

2.9.7. Pelaksanaan Grouting Berkaitan Pola Lubang

Masuknya injeksi semen (grouting) dimulai pada lubang primer, untuk mencegah terganggunya injeksi grouting maka sebelum dilakukan grouting perlu dipastikan bahwa tidak ada proses pengeboran di dekat lokasi lubang primer. Pada metode *split spacing* atau merapat, grouting pada lubang primer dilakukan paling awal pada interval terpanjang dan dilanjutkan grouting pada lubang sekunder. Apabila diperlukan lubang tersier dan kwarter maka pelaksanaannya dilakukan setelah grouting lubang primer dan sekunder selesai.

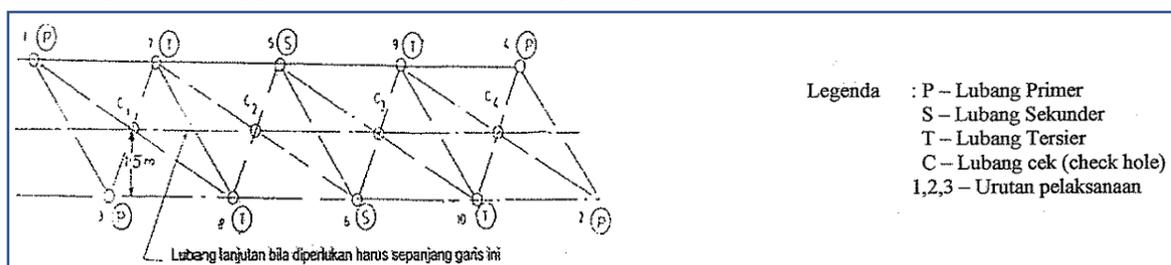


Gambar 2.20. Urutan Pelaksanaan Gouting
Sumber: Pedoman Pelaksanaan Grouting (2005,p.114)



Gambar 2.21. Lubang Grouting Baris Tunggal Sepanjang Parit Halang
Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.114)

Lubang Cek (*Check Hole*) dilakukan dengan tujuan mengetahui nilai permeabilitas setelah dilakukan grouting, apabila pada lubang cek dijumpai nilai permeabilitas yang masih besar maka diperlukan jarak lubang grouting yang lebih rapat. Grouting dapat dilakukan pada dua baris atau lebih dengan *split spacing* persegi atau jajar genjang. Grouting tirai dengan 2 atau 3 baris akan menghasilkan tirai yang lebih tebal dibanding grouting baris tunggal dan baik untuk mengurangi rembesan.



Gambar 2.22. Grouting Tirai 2 Baris dengan Metode *Split Spacing*
Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.115)

Metode *split spacing* berasal dari Eropa dan dispesifikasikan bahwa lubang yang dibor merupakan lubang yang akan di grouting. Pada Metode *split spacing* tidak dilakukan pencucian lubang karena akan merusak material pengisi kekar dan dilakukan dengan tekanan tinggi yang dapat memecah rekahan lemah agar memperoleh zona pengaruh yang lebih besar. Pada grouting dua baris dengan metode *split spacing*, *check hole* biasanya terletak pada perpotongan diagonal dari jajar genjang atau persegi dari lubang yang berdampingan. Apabila diperlukan lubang cek lanjutan, biasanya berada di sepanjang garis yang dibentuk oleh satu titik yang menghubungkan titik – titik potong dari diagonal. Sedangkan praktek di Amerika adalah dengan member dan mencuci semua lubang dalam satu blok sehingga semua grouting dapat terhubung / menyatu. Grouting dilaksanakan dengan tekanan rendah untuk menutup semua kekar.

2.10. Uji Nilai Lugeon dan Permeabilitas (*Water Pressure Test*)

Sebelum pelaksanaan sementasi dimulai harus diadakan pengujian air dan pengujian sementasi untuk memperkirakan campuran dan tekanan yang sesuai. Meskipun sudah banyak rumus untuk menetapkan campuran dan tekanan, tetapi penujian ini sangat diperlukan karena penelitian dan penyelidikan geologi tidak mungkin dilaksanakan dengan sempurna.

2.10.1. Metode Lugeon Test

Untuk pekerjaan grouting pada batuan, penggunaan metode Lugeon telah distandarkan secara internasional dibanding metode permeabilitas dengan nilai *velositas*. Nilai 1 (satu) Lugeon unit (LU) di definisikan :

- Debit air (*water take*) 1 liter per meter panjang uji per menit pada tekanan 10 bar (1000 Kpa atau 150 Psi) dan sangat mendekati $K=1,2 \times 10^{-5}$ cm/detik atau 10 kaki/tahun.

Lebih mudahnya pengertian nilai Lugeon dapat diuraikan sebagai berikut :

Tabel 2.9.

Hubungan nilai Lugeon dan keperluan grouting

Nilai Lugeon	Deskripsi
1	derajat permeabilitas pada pondasi yang ketat dan hampir tidak perlu di grout
3	pondasi perlu sedikit di grout, apabila ditempati bendungan beton atau air waduknya sangat berharga, cenderung piping sehingga perlu penghentian rembesan
5	perlu dijamin grout yang ekstensif untuk bendungan beton atau grouting regional untuk bendungan urugan tanah atau batu
10	perlu dijamin dengan grout untuk semua tipe bendungan
20	tapak yang sangat berkekar - kekar dengan bukaan kekar relatif kecil
100	tapak yang sangat berkekar - kekar dengan bukaan kekar yang relatif kasar. dapat pula dengan tapak pondasi dengan kekar jarang, namun bukaannya sangat lebar.

Sumber: Pedoman Grouting Untuk Bendungan (2005,p.13)

- Pelaksanaan *Lugeon test* dilakukan dengan pemompaan air kedalam bor pada panjang *step* 5,00 m dengan tekanan standar 10 bar atau 150 Psi ($10,5 \text{ Kg/cm}^2$). Dalam praktek tekanan standar 10 Kg/cm^2 adalah terlalu tinggi untuk pekerjaan *grouting* secara rutin dan penurunan tekanan perlu dilakukan.
- Pada batuan yang lemah perlu dilakukan pentahapan tekanan ke dalam 5 tahapan masing – masing dengan durasi 10 menit sebagai berikut :
 - 10 menit pertama dengan tekanan rendah (tekanan “a”)
 - 10 menit kedua dengan tekanan rendah (tekanan “b”)
 - 10 menit ketiga dengan tekanan rendah (tekanan “c”)
 - 10 menit keempat dengan tekanan rendah (tekanan “b”)
 - 10 menit kelima dengan tekanan rendah (tekanan “a”)
- Pola tekanan terhadap dengan pentahapan $0,5 \rightarrow 1,5 \rightarrow 3 \rightarrow 5 \rightarrow 7 \rightarrow 10 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \text{ Kg/cm}^2$ dapat pula diterapkan untuk *Lugeon test*.
- Pengujian *Lugeon* dan permeabilitas lebih baik dengan metode bertahap ke bawah menggunakan *packer tunggal (downstage with single packer)* dibanding bertahap keatas

dengan *packer ganda (upstage with double packer)* untuk menghindari kebocoran yang tidak terdeteksi selama pengujian.

2.10.2. Metode Permeabilitas Test

Air dalam tanah adalah air bebas dalam zona jenuh (*saturation zone*) yang selanjutnya dapat dibedakan atas air tanpa tekanan dengan permukaan yang bebas dan air tanah terkekang tanpa permukaan bebas (Anonim, 2005, 13).

- Pada tahap investigasi, pengujian permeabilitas atau *test* air secara umum lebih diperlukan untuk perencanaan dibanding dengan *Lugeon test*. Terutama menghadapi batuan yang lebih lunak, lebih lemah atau bahkan kondisi kurang terkonsolidasi, perlu pengujian kelulusan air dengan tekanan yang lebih rendah.
- Mempertimbangkan kondisi batuan atau tanah terutama konsolidasi lubang uji (*test length*) dalam pelaksanaan pengujian permeabilitas di tempat (*in-situ permeability*) dapat ditempuh dengan 2 (dua) cara yaitu :
 - Pemompaan air ke dalam (*pump-in test*)
 - Pemompaan air ke luar (*pump-out test*)
- Cara pemompaan air ke dalam menurut USBR, 1960, dapat dilakukan dengan *packer test* untuk tanah yang kompak atau tidak urug, sedangkan apabila kondisi lubang urug sehingga tidak memungkinkan dibuat *test length* yang panjang perlu dilakukan *open-end test* dengan bantuan pipa casing.
- Untuk *packer test* penyiapan lubang uji (*test length*) dapat dilakukan dengan *packer tunggal (single packer)* atau *packer ganda (double packer)* mengikuti posisi pengetesan yang dikehendaki. Biasanya panjang uji (*test length*) berkisar 3 m hingga 5 m.
- Dalam tahap investigasi, karena kondisi tanah bocor sehingga tidak memungkinkan dilakukan pemompaan, pengujian dilakukan dengan metode *constant head* melalui pipa casing.
- Pada formasi tanah yang tak terkonsolidasi seperti pada endapan sungai yang tebal atau alluvium dan data permeabilitas yang akurat sangat diperlukan, pengujian dengan *pump-out test* perlu dilakukan.

2.11. Perhitungan Permeabilitas dan Lugeon Test

2.11.1. Cara Penentuan Permeabilitas

Untuk menentukan koefisien permeabilitas (K) dengan metode *packer test* dipergunakan rumus sebagai berikut:

$$K = \frac{Q \times 10^3}{2 \pi L H \times 60} \ln \frac{L}{R}, \text{ bila } L \geq 10 R \quad (2-10)$$

$$K = \frac{Q \times 10^3}{2 \pi L H \times 60} \sinh^{-1} \frac{L}{R}, \text{ bila } 10 R > L \geq R \quad (2-11)$$

Dimana :

K = Koefisien permeabilitas (cm/dt)

Q = Banyaknya air yang masuk dalam lubang (l/menit)

L = Panjang lubang bor yang diuji (cm)

r = Radius lubang bor yang diuji (cm)

H = Tinggi tekanan air (cm) dan $H = A+B+C-H_f$

A = Pembacaan *pressure gauge* (cm)

B = Tekanan statik (cm)

C = Tinggi *pressure gauge* dari muka tanah (cm)

$H_f = \text{Friction loss}$

2.11.2. Cara Menghitung Lugeon Value (Lu)

Menurut *Lugeon* 1933, 1 *Lugeon* adalah debit masuk 1 liter/menit/m pada tekanan pemompaan 10 bar = 10 Psi = 10,5 kg/cm², namun untuk pekerjaan rutin *grouting* dinilai terlalu tinggi, sehingga dikoreksi menjadi:

$$Lu = \frac{10Q}{P} \quad (2-12)$$

Dimana: Q = Debit injeksi (l/menit)

P = Tekanan injeksi (kg/cm²)

Pada prakteknya dapat dimodifikasi Bersama *permeability test* menjadi:

$$Lu = \frac{Q}{LH} \times 10^6 \quad (2-13)$$

Dimana: Q = Debit injeksi (l/menit)

L = Panjang lubang uji (cm)

H = Tinggi tekanan air (cm)

Bila formasi batuan lepas dan tidak memungkinkan lubang uji yang panjang, dapat dilakukan dengan ujung pipa terbuka (*Open-end test*) dengan rumus:

$$K = \frac{Q}{5,5RH \times 60} \quad (2-14)$$

Dimana: K = Koefisien permeabilitas (cm/dt)

R = Radius pipa casing (cm)

H = Tinggi muka air konstan sampai dasar casing (cm)

Q = Debit masuk rerata (cm³/menit)

2.11.3. Pengecekan Angka Lugeon setelah Grouting

Sebelum dilaksanakan *grouting*, telah dihitung angka lugeonnya dengan pengujian air. Sesudah pengujian *grouting* selesai lalu dibuat lubang didekatnya dengan pengeboran. Batas perlu tidaknya dilakukan *grouting* adalah dengan nilai *Lugeon* > 3. Apabila keadaan geologinya jelek dan porous untuk mencapai angka *Lugeon* < 3 akan mengalami kesulitan. Untuk *treatment grouting* hal yang dapat dilakukan untuk mendapat nilai *Lugeon* yang diinginkan, angka *Lugeon* sesudah sementasi dapat diperiksa dari pendekatan sebagai berikut (Soediby, 2003:306).

$$Lug = Lu \times \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}\right) \quad (2-15)$$

Dimana : *Lug* = Angka *lugeon* setelah sementasi

Lu = Angka *lugeon* sebelum sementasi

Apabila dengan tekanan mencapai 10 kg/cm² dan ternyata dipompakan kurang dari 3 liter/meter/menit atau 3 lugeon maka tidak perlu di *grouting*. Apabila kondisi geologinya jelek, porous dan sukar diperoleh nilai *Lugeon* ≤ 3, artinya biaya yang dikeluarkan untuk *grouting* sangat mahal dan tidak sebanding dengan hasil yang dicapai. Dalam hal ini nilai *Lugeon* sesudah *grouting* diambil $\frac{1}{5}$ sampai $\frac{1}{10}$ x terhadap angka *Lugeon* sebelum *grouting* dengan maksimal 40 *Lugeon* (sebelum *grouting*). Jadi apabila sebelum *grouting* didapat 40 *Lugeon* sedangkan sesudah pelaksanaan didapat nilai 8 *Lugeon*, hasil ini sudah dianggap baik.

- Kekuatan Geser

Kekuatan geser suatu material terutama ditentukan oleh daya kohesi (*C*) dan sudut geseran dalamnya (*Q*). Pada umumnya suatu material dengan harga *D* = 95 s/d 98 merupakan harga yang cukup baik untuk digunakan pada penimbunan tubuh bendungan. Sedangkan bahan – bahan dengan harga *D* = 90 s/d 95 biasanya digunakan untuk pembangunan bendungan rendah (< 30 m) atau untuk bendungan dari timbunan material berbutiran halus, dimana penimbunannya dilakukan pada kondisi kelembapan di daerah yang lebih basah dari angka kadar air optimumnya.

- Karakteristik Proses Konsolidasi

Semakin halus gradasi suatu material dan semakin tinggi angka kadar airnya, maka tingkat konsolidasinya akan menjadi lebih besar dan tekanan air pori mungkin dapat terjadi pada saat proses konsolidasi berlangsung. Dengan demikian dalam tubuh

bendungan yang baru selesai ditimbun, selain timbul tekanan yang dihasilkan dari proses pemadatan maka timbul pula tekanan tambahan yang diakibatkan oleh adanya proses konsolidasi (tekanan konsolidasi).

Terutama untuk calon tubuh bendungan yang kondisi kelembapannya terletak pada daerah yang lebih basah dari angka kadar air optimumnya, dimana pada saat pelaksanaan pemadatan tekanan air porinya rendah. Akan tetapi, pada saat berlangsungnya proses konsolidasinya, maka tekanan air pori meningkat dan kemungkinan dapat melampaui batas – batas kemampuan Stabilitas dari tubuh bendungan tersebut.

2.12. Rembesan Pada Tubuh dan Pondasi Bendungan

Salah satu persyaratan dasar untuk perencanaan bendungan timbunan tanah (*Earthfill*) maupun timbunan batu (*Rockfill*) adalah untuk menjamin keamanan terhadap erosi internal, *piping*, dan tekanan air pori yang berlebihan di dalam bendungan maupun pada pondasi. Rembesan air waduk melalui tubuh bendungan atau melalui bidang pertemuan antara pondasi bendungan atau tumpuan bendungan akan menyebabkan dua masalah utama yaitu :

1. Menyebabkan kehilangan air yang berlebihan dan dengan demikian mengurangi penyimpanan yang dapat digunakan sebagai *reservoir*.
2. *Piping*, yaitu erosi yang terjadi dari tempat keluarnya air rembesan yaitu pada lereng urugan atau permukaan pondasi, yang kemudian berkembang ke hulu membentuk buluh (pipa).

Erosi buluh dapat terjadi, baik dalam massa pondasi maupun didalam tubuh bendungan urugan yang kohesif. Proses erosi buluh dimulai dari suatu titik diskontinuitas di sebelah hilir atau konsentrasi aliran di sepanjang timbunan tanah yang kurang padat, terutama pada bidang kontak antara bendungan dengan struktur tanah arah memanjang dari udik ke hilir, lubang bor yang terbuka, bekas galian, akar tanaman dengan liang binatang. Butir – butir tanah yang terlepas dimulai dari sebelah hilir, hingga membentuk pipa - pipa kecil yang merambat secara perlahan – lahan ke udik bendungan. Pada umumnya lintasan pipa – pipa kecil tersebut mempunyai bentuk seperti jaringan aliran (*flownet*). Untuk mencegah kejadian semacam ini, harus dibuat suatu sistem pengontrol yang perlu diamati secara kontinu di lokasi – lokasi rembesan yang terkonsentrasi.

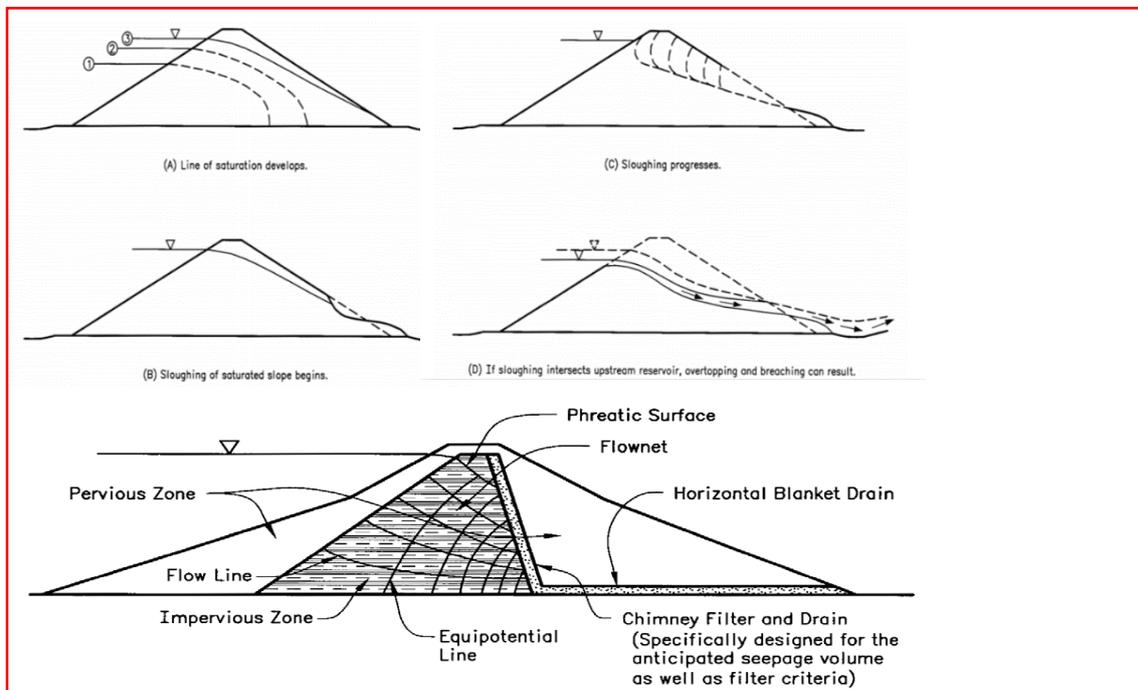
Di dalam upaya untuk melindungi bendungan terhadap bahaya rembesan, terdapat 2 buah kategori yaitu:

1. Mengurangi debit rembesan

- a. *Cut off trenches* (parit halang)
 - b. *Grouting* konsolidasi, *Grouting Blanket*, *Grouting Tirai*
 - c. Dinding halang beton atau baja (*Sheetpile wall, concrete cut off wall*)
 - d. Alas kedap air (*Upstream blanket*)
2. Mengontrol debit rembesan atau pengendalian drainasi
- e. Timbunan zonal (*Embankment zoning*)
 - b. Selimut drainase (*Longitudinal drain and blankets*)
 - c. Drainase (*Chimney drain*)
 - d. Drainase kaki (*toe drains*)
 - e. Sumur pelepas tekanan (*Relief well*)

Desain bendungan biasanya menggunakan kombinasi kedua cara tersebut, meskipun prinsip kerja dari kedua cara tersebut berbeda tetapi di dalam analisa rembesan harus digabungkan sebagai satu kesatuan.

Dalam merencanakan sebuah bendungan perlu diperhatikan Stabilitasnya terhadap bahaya longsor, erosi lereng dan kehilangan air akibat rembesan yang melalui tubuh bendungan. Baik tubuh bendungan maupun pondasinya diharuskan mampu mempertahankan diri terhadap gaya – gaya yang di timbulkan oleh adanya air filtrasi yang mengalir melalui celah – celah antara butiran – butiran tanah pembentuk tubuh bendungan dan pondasi tersebut (Christady Hardiyatmo, Hary, 2007, p.255).



Gambar 2.23. Pola Kegagalan dan Garis Trayektori pada Tubuh Bendungan Urugan Akibat Rembesan

Sumber: Pelatihan Keamanan Bendungan Jakarta-Rembesan (2009:Slide 37)

Kapasitas aliran filtrasi adalah kapasitas rembesan air yang mengalir ke hilir melalui tubuh bendungan dan pondasi bendungan. Kapasitas aliran filtrasi suatu bendungan mempunyai batas – batas tertentu yang mana apabila kapasitas aliran filtrasi tersebut melampaui batas tersebut, maka kehilangan air yang terjadi akan cukup besar dan dapat mengakibatkan gejala sufosi (*piping*) dan sembulan (*boiling*) (Anonim, Pelatihan Keamanan Bendungan Jakarta – Rembesan, 2008:Slide 37).

Apabila material pembentuk tubuh bendungan dan pondasi bendungan memiliki harga k_v dan k_h yang berbeda, maka untuk menghitung kapasitas aliran filtrasi dilakukan dengan harga k yang telah dimodifikasi (k),

$$k = \sqrt{k_h} \times k_v \quad (2-16)$$

Dimana :

k = koefisien filtrasi yang telah dimodifisir (m^3/dt)

k_v = koefisien filtrasi vertikal (m^3/dt)

k_h = koefisien filtrasi horizontal (m^3/dt)

Sedangkan untuk memperkirakan besarnya kapasitas filtrasi yang mengalir melalui tubuh dan pondasi bendungan yang didasarkan pada jaringan trayektori aliran filtrasi, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$Q_f = \frac{N_f}{N_p} \times k \times H \times L \quad (2-17)$$

Dimana :

Q_f = Kapasitas rembesan (m^3/dt)

N_f = angka pembagi dari garis trayektori aliran filtrasi

N_p = angka pembagi dari garis equi-potensial

k = koefisien filtrasi (m^3/dt)

H = tinggi tekanan air total (m)

L = panjang profil melintang tubuh bendungan (m)

Sebuah bendungan urugan dapat disebut aman terhadap rembesan yang terjadi pada bagian tubuh bendungannya apabila kecepatan rembesan kritis (V_c) > kecepatan rembesan yang terjadi (V_s) (Departemen Pekerjaan Umum, Perhitungan Stabilitas Bendungan Gonggang, 2009, p.12).

Untuk mengetahui kecepatan rembesan yang terdapat dalam tanah jenuh (*saturated soil*) Darcy pada tahun 1856 memperkenalkan suatu persamaan sederhana, yaitu :

$$v = k \times i \quad (2-18)$$

Dimana :

v = Kecepatan pada bidang aliran keluaranya filtrasi (m/dt)

k = Koefisien filtrasi (cm/dt)

i = Gradient hidrolik (m)

Erosi buluh (*piping*) terjadi bila air waduk mengalir atau merembes melalui pori-pori tanah timbunan atau pondasi menghasilkan suatu gaya tarik yang cukup kuat membawa butiran tanah keluar melalui titik keluaran. Penggerusan atau erosi tersebut berlangsung terus dan membentuk pipa di dalam timbunan atau pondasi. Pipa tersebut terus membesar sebagai hasil dari gerusan dan mengakibatkan runtuhnya bendungan.

Lima kondisi yang memicu terjadinya *piping*, adalah :

- Terbentuknya alur aliran air
- Gradien hidraulik pada tempat keluaran telah melebihi dari nilai batas yang tergantung dari jenis tanahnya
- Tempat keluaran dalam kondisi bebas dan tidak dilindungi filter secara memadai
- Terdapat tanah yang rawan *piping* pada alur aliran rembesan
- Telah terbentuk "pipa" atau tanah di atasnya telah membentuk seperti "atap" untuk menjaga terbukanya "pipa"

Didih pasir (*sand boiling*) adalah sirkulasi dari tanah tak berkohesi sebagai hasil pendidihan akibat tingginya kecepatan rembesan yang keluar dari titik keluaran. Bila rembesan yang keluar keruh, ini mengindikasikan telah terjadinya *piping* (Anonim, Pelatihan Keamanan Bendungan Jakarta-*Piping*, 2009: Slide 30).

Sehingga untuk mengetahui bendungan urugan aman terhadap gejala *piping* dan *boiling* dapat diketahui dengan rumus sebagai berikut:

$$FK = \frac{i_{cr}}{i_{cal}} \quad (2-19)$$

Dimana :

i_{cr} = Gradien hidraulik kritis (tanpa dimensi)

i_{cal} = Gradien keluaran dari hasil analisa rembesan (tanpa dimensi)

FK = Faktor keamanan terhadap gejala *piping* > 4 (tanpa dimensi)

2.12.1. Kontrol Rembesan pada Timbunan Bendungan

Metode untuk mengontrol rembesan pada timbunan bendungan adalah

1. Menggunakan filter

Aliran rembesan yang menyebabkan terjadinya *piping* harus dilindungi oleh filter. Filter harus ditempatkan diantara dua jenis material yang memiliki permeabilitas yang

berbeda, untuk mencegah terjadinya perpindahan butiran material inti masuk ke zona urugan batu yang permeabilitasnya lebih tinggi. Disamping itu fungsi dari filter adalah mengalirkan aliran rembesan tetapi tetap menjaga butiran tanah untuk tetap di tempatnya.

Fungsi filter adalah :

- Mencegah terjadinya erosi internal dengan menutup migrasi butiran tanah dari tempat asalnya.
- Sebagai saluran drainase dari aliran rembesan tanpa menimbulkan kehilangan tekanan rembesan dan tekanan hidrostatik pada filter atau drainase

2. Menggunakan inti (*Impervious Core*)

Zona kedap air atau zona inti mutlak diperlukan untuk pembangunan bendungan urugan. Sebagai standard, koefisien filtrasi (K) dari bahan yang digunakan untuk zona kedap air supaya memiliki K tidak melebihi 1×10^{-5} cm/dt.

3. Menggunakan drainase

Konstruksi drainase yang diperlukan pada bendungan yang sekaligus berfungsi sebagai filter biasanya menggunakan bahan dengan koefisien filtrasi (K) antara 20 sampai dengan 100 kali lebih besar daripada harga K dari bahan tubuh bendungan.

Pembuatan sistem drainase tersebut supaya dilakukan dengan sangat hati – hati serta pemilihan tipenya didasarkan pada hal – hal sebagai berikut :

- Perbandingan nilai K anatara bahan tubuh bendungan dan bahan drainase yang terpilih.
- Angka kadara air yang akan terdapat dalam tubuh bendungan.
- Metode pemadatan tubuh bendungan
- Kemungkinan pencampuran – pencampuran yang dilakukan untuk bahan tubuh bendungan.

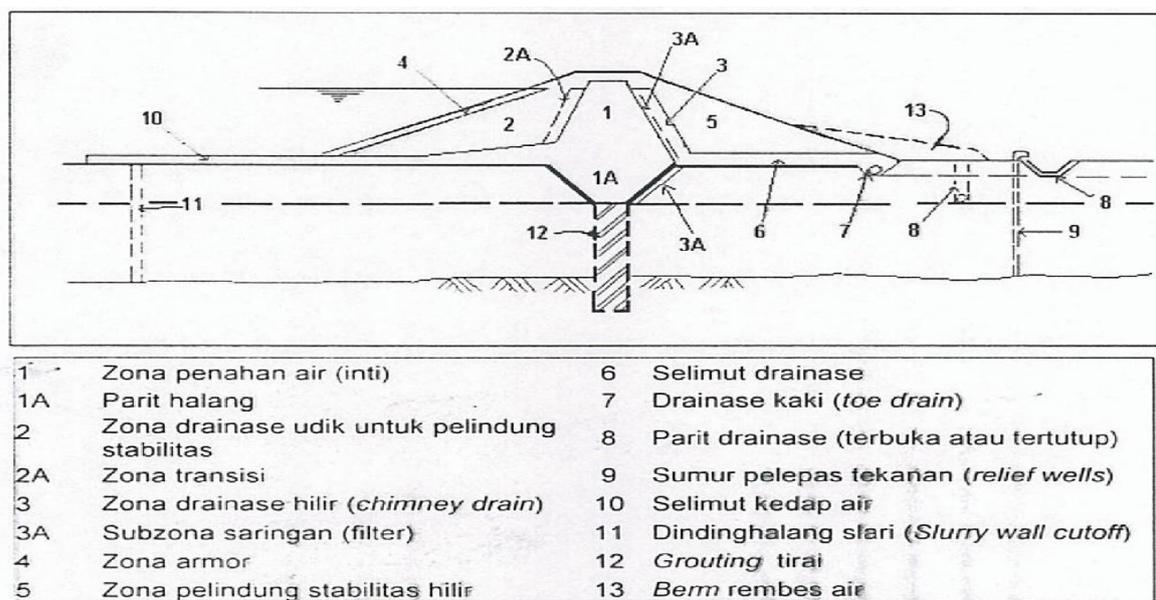
2.12.2. Kontrol Rembesan pada Pondasi Bendungan

Pondasi dan *abutment* dari bendungan, yang harus *stabil* terhadap pengaruh dari air tanah, sangat memungkinkan terjadinya *piping* dan erosi yang disebabkan oleh perubahan regim aliran tanah pada saat pengisian waduk. *Piping* yang terjadi pada pondasi bendungan dapat juga disebabkan oleh adanya lapisan pondasi yang lulus air. Maka, untuk mengontrol rembesan yang terjadi pada pondasi bendungan diperlukan perbaikan pondasi.

Metode yang umumnya digunakan untuk mengontrol rembesan pada pondasi yang lulus air antara lain:

- a) Parit halang yang diisi kembali dengan lempung yang dipadatkan
- b) Dinding halang (*diafragma*) cairan lempung dengan bentonite
- c) Dinding halang beton
- d) Selimut lempung kedap air bagian hulu
- e) *Horizontal drain* dibagian hilir
- f) *Toe drain*
- g) Sumur pelepas tekanan (*relief well*)
- h) Kombinasi metode satu dengan cara lain diatas

Metode pengendalian rembesan diatas dilakukan dengan tujuan utama untuk mengurangi debit rembesan (<1 % debit rerata sungai) yang dapat menyebabkan hilangnya atau keborcoran pada air waduk dengan jumlah yang besar, serta untuk melindungi konstruksi bendungan dari bahaya – bahaya lain yang kan ditimbulkan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.24.



Gambar 2.24. Kontrol Rembesan Pada Bendungan Urugan

Sumber: Pedoman Pengendalian Rembesan Pada Bendungan Urugan (2005,p.27)

Analisa rembesan pada pondasi dan bendungan umumnya dimodelkan baik secara fisik maupun secara empiris untuk mengetahui fenomena pola aliran dari rembesan. Dengan memberikan kondisi batas tertentu dan sifat fisik material tanah maupun pondasi, pemodelan ini dapat digunakan untuk menentukan tekanan hidraulik, pola aliran, serta jumlah debit rembesan. Analisa rembesan yang logis, diawali oleh hukum Darcy 1856 dan persamaan Laplace untuk kondisi aliran langger (*steady state flow*) suatu fluida melalui suatu media yang lulus air (porous).

2.13. Analisa Stabilitas

Analisa Stabilitas konstruksi digunakan untuk menentukan ukuran (dimensi) bendungan agar mampu menahan berat dan gaya – gaya yang bekerja pada bendungan dalam beberapa kondisi. Pada konstruksi bendungan terdapat beberapa syarat – syarat Stabilitas bendungan yang harus terpenuhi, yakni Stabilitas longsor, terhadap daya dukung, penurunan (*settlement*), dan rembesan.

2.13.1. Analisa Daya Dukung Pondasi

Karena dalam pondasi batuan dijumpai adanya celah – celah, retak – retak, sesar – sesar, kekar – kekar sehingga daya dukungnya kurang dan diperlukan adanya perbaikan pondasi. Derajat dari perbaikan pondasi ditentukan oleh kondisi pembebanan pada batuan tersebut, dimana perbedaan kondisi pembebanan sangat tergantung dari tipe dan tinggi bendungan yang akan dibangun.

a. Kemampuan untuk menanggulangi perubahan bentuk deformasi

Kemampuan deformasi pada umumnya merupakan faktor penting untuk bendungan beton dan tidak begitu penting untuk bendungan urugan, meskipun demikian minimal harus dilakukan perbaikan pondasi untuk menghindari terjadinya deformasi yang terlalu besar. Teori dasar deformasi atau perubahan bentuk adalah hukum Hooke, dari sini diaplikasikan dalam mekanika tanah dengan percobaan konsolidasi yaitu mengukur penurunan akibat pembebanan konstruksi di atasnya. Dalam pondasi bendungan yang perlu diketahui adalah besarnya penurunan yang akan terjadi dan kecepatan penurunan, mengevaluasi dan menghitung penurunan yang akan terjadi toleransi atau perlu tindakan pencegahan salah satunya cara *grouting* (Anonim, 2005, p.19).

b. Kemampuan untuk menanggulangi beban – beban

Pada bendungan tipe urugan, karena luas pondasi bendungan besar sehingga beban tersebar per satuan luas menjadi kecil, tetapi untuk bendungan beton kekuatan pondasi merupakan hal yang penting, tergantung dari tipe dan tingginya. Daya dukung tanah ini dapat dihitung dengan rumus Terzhagi dan daya dukung ini adalah daya dukung teoritis, sedangkan daya dukung yang diijinkan adalah daya dukung teoritis dibagi dengan angka keamanan (2 sampai 3). Apabila kurang dari nilai standar maka perlu dilakukan perbaikan pondasi (Anonim, 2005, p.2).

Daya dukung tanah ijin (q_u) didefinisikan sebagai tekanan maksimum yang boleh dikerjakan pada tanah sedemikian rupa sehingga kedua kebutuhan dasar di atas terpenuhi. Suatu persyaratan menetapkan bahwa pondasi dan kegiatan yang terlihat

dalam pembangunannya, tidak boleh menimbulkan pengaruh yang kurang baik terhadap struktur – struktur di sekitarnya serta fasilitas – fasilitas pelayanannya.

➤ **Tegangan Vertikal Pada Pondasi Bendungan**

Kemampuan pondasi Bendungan dalam memikul tubuh bendungan, menggunakan analisa tegangan vertikal pada pondasi bendungan tepat pada As bendungan utama (*main dam*) dan bendungan pengelak (*cofferdam*). Asumsi yang digunakan dalam analisa tegangan vertikal tersebut antara lain :

- Untuk menghitung beban akibat timbunan tubuh bendungan (q) digunakan berat material timbunan (γ_{sat}) yang terbesar.
- Perhitungan tegangan vertikal yang terjadi dibawah pondasi Bendungan misalkan diasumsi berada pada kedalaman $z = 15$ m.

Sehingga penyelesaian dari perhitungan tegangan vertikal adalah sebagai berikut,

- Beban timbunan (q) (Hardiyatmo, 2007, p.27)

$$q = H \times \gamma_{sat} \quad (2-20)$$

Dimana :

q = Beban timbunan tubuh bendungan (kN/m²)

H = Tinggi bendungan (m)

γ_{sat} = Berat material timbunan terbesar (kN/m²)

➤ **Tegangan Vertikal Pada Pondasi As *Main Dam* Pada $Z = 15$ m**

$$\sigma_z = (I_1 + I_2)q_{main\ dam} \quad (2-21)$$

Dimana :

σ_z = Tegangan vertikal yang terjadi pada kedalaman z (kN/m²)

I = Faktor pengaruh (tanpa dimensi)

$$= \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{a+b}{a} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right]$$

q = Beban tubuh bendungan (kN/m²)

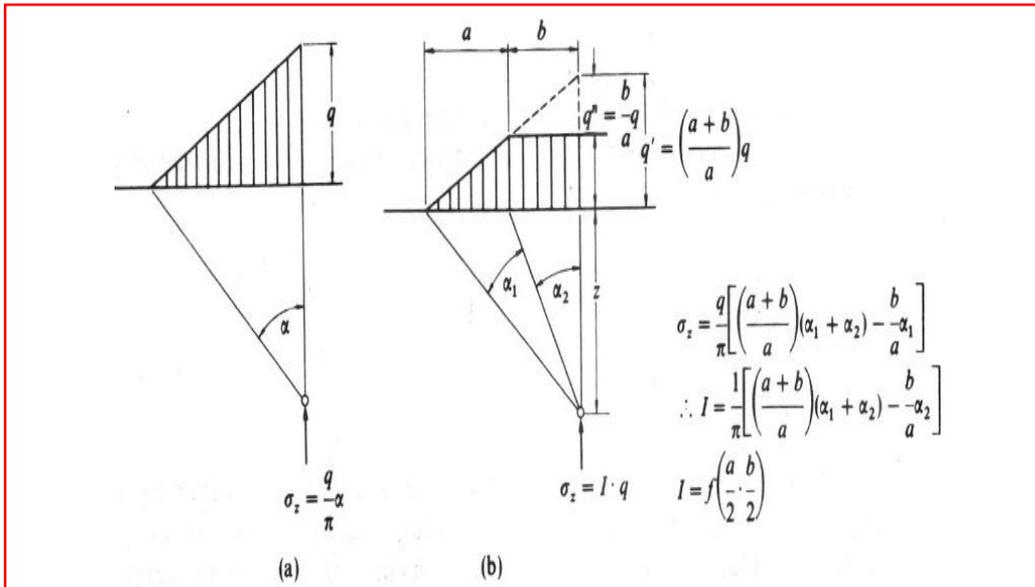
a = Panjang lengan pada bidang miring tubuh bendungan (m)

b = Panjang lengan pada bidang datar tubuh bendungan (m)

z = Kedalaman tegangan vertikal pada pondasi (m)

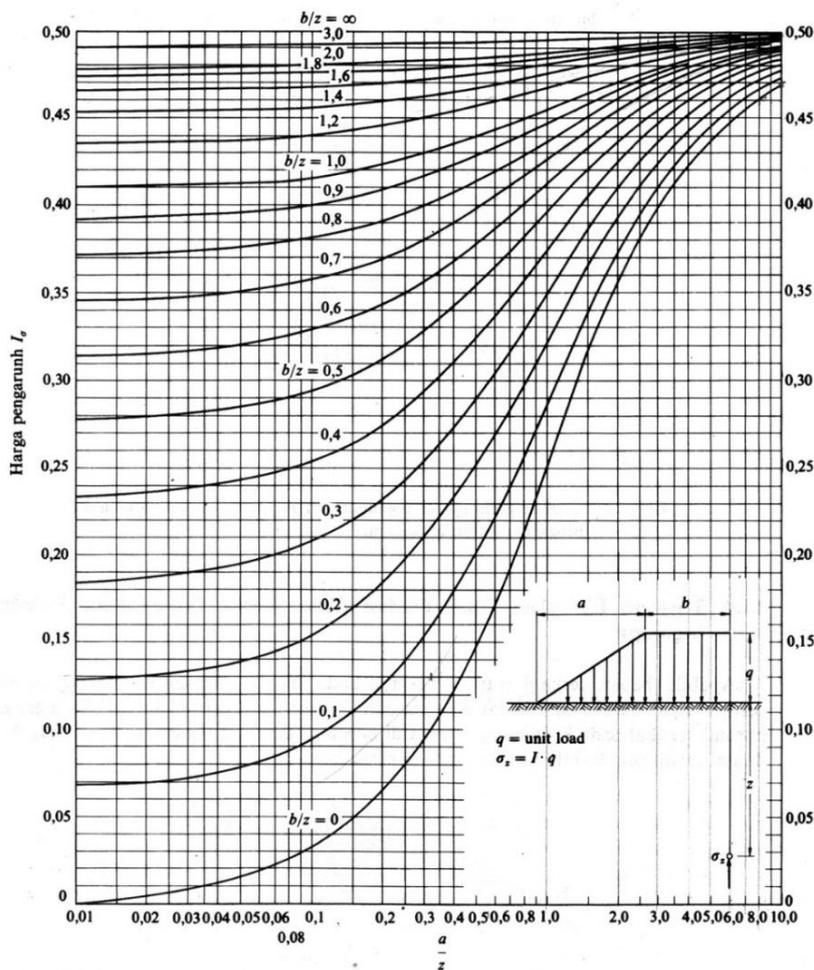
α_1 = Sudut pengaruh kedalaman berdasarkan panjang a (radian)

α_2 = Sudut pengaruh kedalaman berdasarkan panjang b (radian)



Gambar 2.25. Perhitungan Tegangan Dalam Tanah Pondasi
 Sumber: Hardiyatmo (2007: 27)

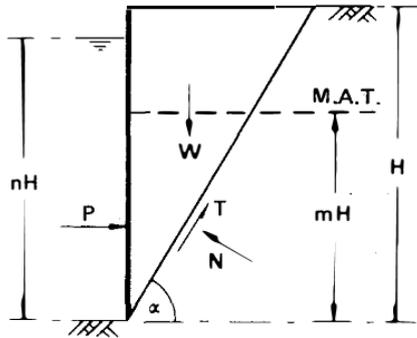
Pembagian Tegangan Dalam Tanah Pondasi



Gambar 2.26. Koefisien Tekanan Vertikal dalam *Semi-Indenfinite* Disebabkan Beban Bentuk Trapesium
 Sumber: Hardiyatmo (2007:27)

2.13.2. Stabilitas Parit Dinding Halang Terhadap Longsor

Stabilitas parit dipengaruhi oleh campuran bentonite yang melekat pada dinding puritan atau kerapatan minimum campuran. Diasumsikan bahwa tekanan hidrostatik campuran bekerja sepenuhnya pada sisi parit. Pada gambar 2.27 merupakan suatu bagian atau potongan tanah yang telah dicampur bentonite pada dinding – dinding nya.



Gambar 2.27. Analisa Stabilitas Parit

Sumber: Craig (1991,p.204)

Keterangan :

nH : Kedalaman campuran (m)

mH : Muka air tanah (m)

H : Kedalaman parit (H)

γ_s : Berat jenis campuran (Kg.cm^{-3})

γ : Berat jenis (Kg.cm^{-3})

N & T : Gaya resultan bidang runtuh

α : $45 + \varphi/2$

Dengan demikian kesetimbangan gaya – gaya pada gambar di atas adalah sebagai berikut :

$$P + T \cos \alpha - N \sin \alpha = 0 \quad (2-22)$$

$$W - T \sin \alpha - N \cos \alpha \quad (2-23)$$

Maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \gamma_s \cdot (n \cdot H)^2 \quad (2-24)$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \cos \alpha \quad (2-25)$$

2.13.3. Analisa Rembesan Dengan Geostudio SEEP/W 2007

SEEP/W adalah suatu program yang di desain dan dikembangkan secara umum sebagai alat untuk menganalisa masalah rembesan pada sebuah struktur tanah. Antara lain kecepatan, kapasitas, tekanan air pori, dll. SEEP/W salah satu aplikasi yang terintegrasi dengan baik dan dapat menyelesaikan berbagai macam tipe analisa di bidang geoteknik yang lebih luas.

Langkah-langkah analisis rembesan menggunakan Geostudio SEEP/W 2007 adalah sebagai berikut :

Sebagai contoh digunakan data teknis sebuah bendungan zonal dengan inti tegak adalah sebagai berikut:

- Tipe bendungan : Zonal dengan inti tegak
- Elevasi dasar pondasi : +156 m
- Elevasi puncak bendungan : + 244.85 m
- Panjang melintang bendungan : 475 m
- Elevasi muka air waduk : +239,05 m (MAN)
- Lebar puncak bendungan : 12 m

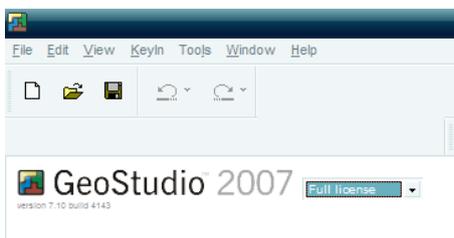
Tabel 2.10.

Input Data Parameter Hydraulic Conductivity

Name of Material	Estimation Method	Vol. Water Content	K	K	Residual WC m ³ /m ³	Minimum Suction	Maximum Suction	Number of Points
			cm/sec	m/sec				
Core material	Fredlund & Xing	core material	1.240E-05	1.240E-07	0	0.01	1000	20
Fine filter material	Fredlund & Xing	fine filter material	5.0E-03	5.00E-05	0	0.01	1000	20
Coarse filter material	Fredlund & Xing	coarse filter material	2.5E-02	2.50E-04	0	0.01	1000	20
Random material	Fredlund & Xing	random material	5.0E-04	5.00E-06	0	0.01	1000	20
Random rock material	Fredlund & Xing	random rock material	1.00	1.00	0	0.01	1000	20
Rip-rap material	Fredlund & Xing	rip-rap material	1.00	1.00	0	0.01	1000	20
Pondasi batuan	Van Genuchten	pondasi batuan	4.690E-04	1.00E-06	0	0.01	1000	20
Dinding diafragma	Van Genuchten	core material	1.0E-07	1.00E-09	0	0.01	1000	20
Pondasi grouting	Van Genuchten	core material	1.42E-05	1.42E-07	0	0.01	1000	20
Pondasi alluvial	Van Genuchten	core material	5.0E-04	5.00E-06	0	0.01	1000	20
Pondasi kollovial	Van Genuchten	core material	2.810E-04	2.810E-06	0	0.01	1000	20
Pondasi batuan lapuk kuat	Van Genuchten	core material	1.10E-03	1.10E-05	0	0.01	1000	20
Draine material	Fredlund & Xing	draine material	1.0E-01	1.00E-03	0	0.01	1000	20

Sumber: Laporan Hasil Pengujian Laboratorium Mekanika Tanah (2016)

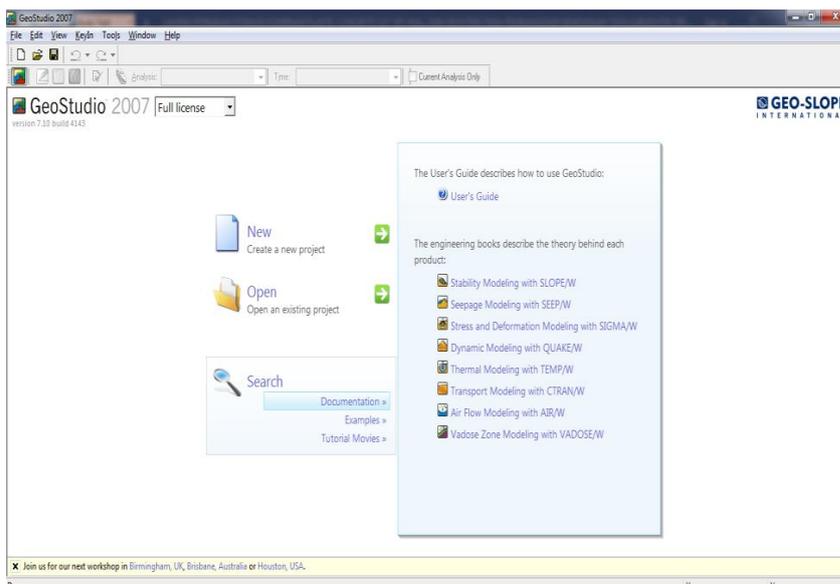
- ✚ Install program terlebih dahulu dengan versi *full lisenca* dan buka dengan meng-klik pada Icon Geo-SLOPE pada desktop komputer anda.



Gambar 2.28. Option Full Lisenca di GeoStudio 2007

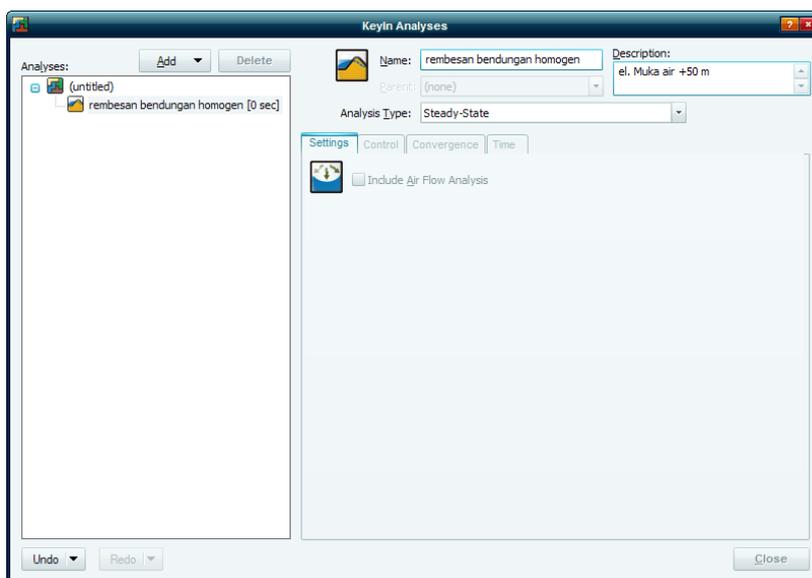
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- ✚ Klik “New” pada *tab-file* tersebut kemudian klik ikon SEEP/W



Gambar 2.29. Option New pada GeoStudio 2007
Sumber: Hasil Analisa (2018)

✚ Setelah muncul *Pop-Up* seperti gambar dibawah ini,



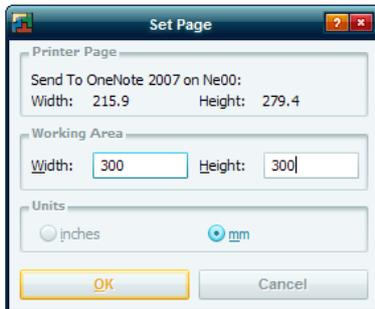
Gambar 2.30. Option Setting pada *Pop-Up Keyin Analyses*
Sumber: Hasil Analisa (2018)

Lakukan langkah – langkah sebagai berikut kemudian klik “close” :

- Kolom “Name” anda dapat mengisi dengan nama pekerjaan dll (contoh : rembesan bendungan homogen)
- Kolom “Description” dapat anda tambahkan keterangan tentang pekerjaan tersebut dll (contoh: el. Muka air +239,05 m)
- Kolom “Analysis Type” dapat diganti sesuai dengan jenis analisa yang akan anda jalankan. Pada contoh ini dipilih *Analysis Type = Steady State* (aliran tetap)

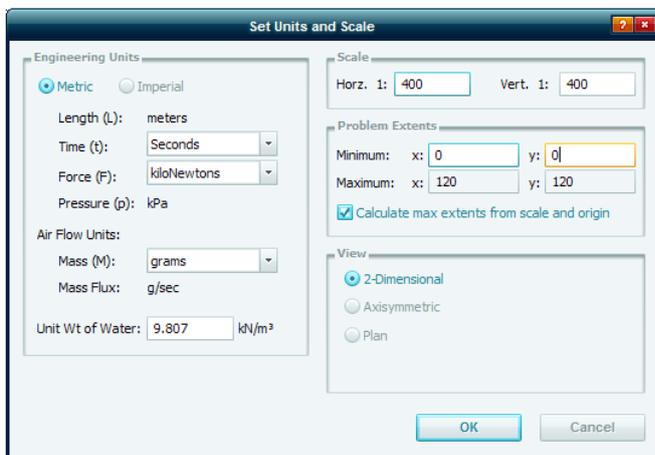
- ✚ Setelah muncul lembar kerja atur lembar kerja tersebut sebelum melanjutkan proses, yang meliputi:

- ✚ “Set Page”: untuk mengatur besarnya lembar kerja (satuan dalam inchi dan mm)



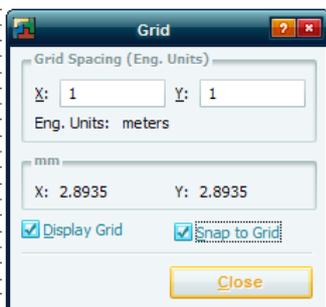
Gambar 2.31. Option Set Page untuk Pengaturan Lembar Kerja
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- “Set Unit and Scale”: untuk mengatur skala gambar



Gambar 2.32. Option Set Unit and Scale untuk Pengaturan Skala Gambar
Sumber Hasil Analisa (2018)

- “Grid”: untuk memunculkan grid pada lembar kerja dan Snap to Grid (centang keduanya) kemudian klik “close”



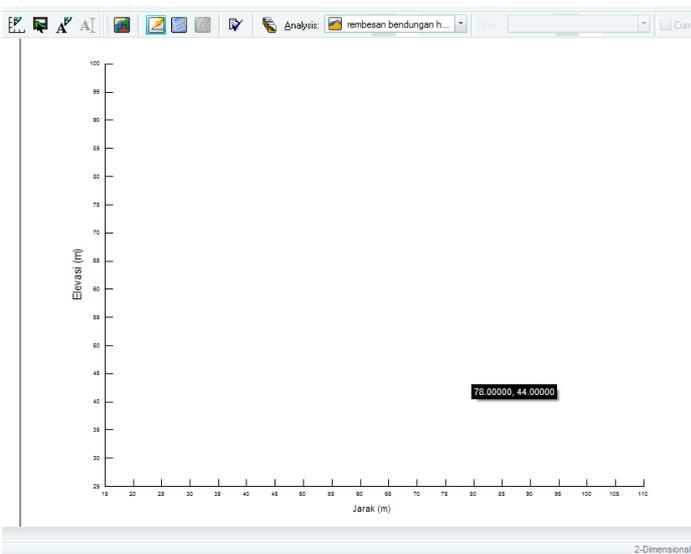
Gambar 2.33. Option Grid untuk Pengaturan Grid pada Lembar Kerja
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- “Axes” : untuk membuat sumbu x,y pada lembar kerja, kemudian ganti kolom “Bottom x” dengan (jarak m) dan kolom “Left y” dengan (Elevasi m). seperti gambar dibawah. klik “ok”



Gambar 2.34. Option Axes untuk Membuat Sumbu X Dan Y
Sumber: Hasil Analisa (2018)

✚ Tahan klik kiri mouse pada lembar kerja anda, dan tarik dari posisi kiri bawah ke kanan atas pada lembar kerja anda, apabila sukses akan membentuk sebuah sumbu x, y seperti pada gambar dibawah ini:

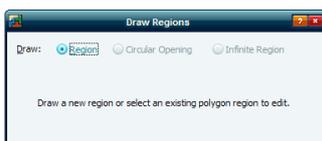


Gambar 2.35. Hasil dari Penggambaran Sumbu X Dan Y
Sumber: Hasil Analisa (2018)

✚ Klik toolbar “Sketch” dan klik “Sketch Polylines”

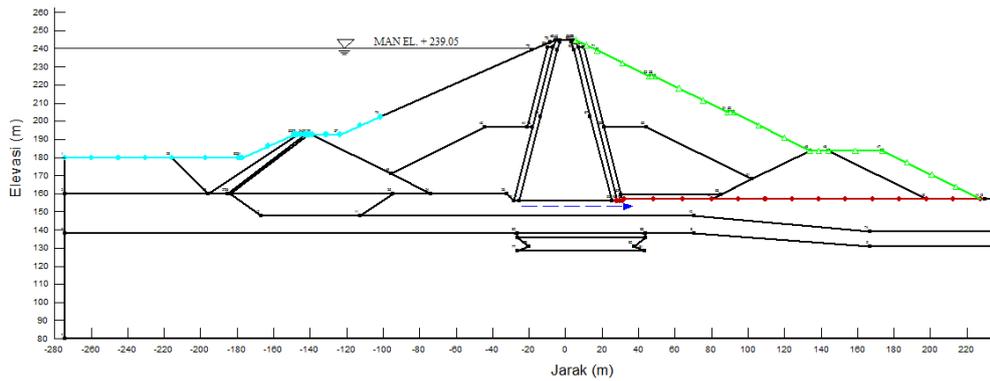
Kemudian gambar bendungan sesuai dengan data teknis yang terdapat di atas. Dan hasilnya akan terlihat seperti gambar dibawah ini,

✚ Kemudian buat *region* pada sketsa gambar bendungan anda, agar dapat di-input dengan data material sesuai contoh soal diatas. Klik “Draw” kemudian klik “Regions” dan akan muncul gambar seperti dibawah ini,



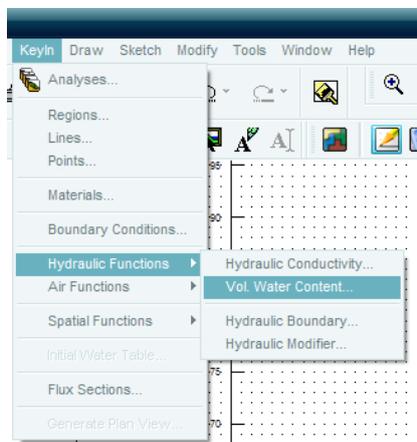
Gambar 2.36. Pop-Up untuk Region
Sumber: Hasil Analisa (2018)

✚ Gambar bendungan anda dengan region tersebut (caranya adalah seperti menggambar pada langkah menggambar dengan *polylines*). Setelah berhasil, klik tanda [x] pada Pop-Up “Draw Regions”. Sehingga akan menjadi seperti gambar dibawah ini,



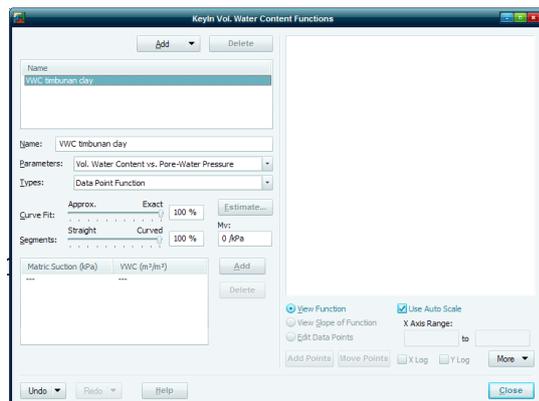
Gambar 2.37. Hasil Penggambaran Pot. Melintang Tubuh Bendungan dengan Region
Sumber: Hasil Analisa (2018)

Arahkan *cursor* pada toolbar “KeyIn” klik geser ke “Hydraulic Function” dan klik ke “Vol. Water Content. Seperti pada gambar dibawah ini :



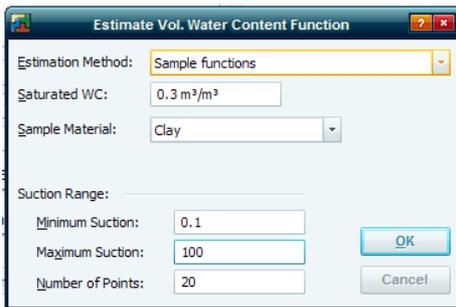
Gambar 2.38. Command untuk Vol. Water Content
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Klik “Add” ganti kolom “Name” dengan “WVC timbunan clay”, ganti kolom “Type” dengan “Data Point Function”. Sehingga tampak seperti gambar dibawah ini,



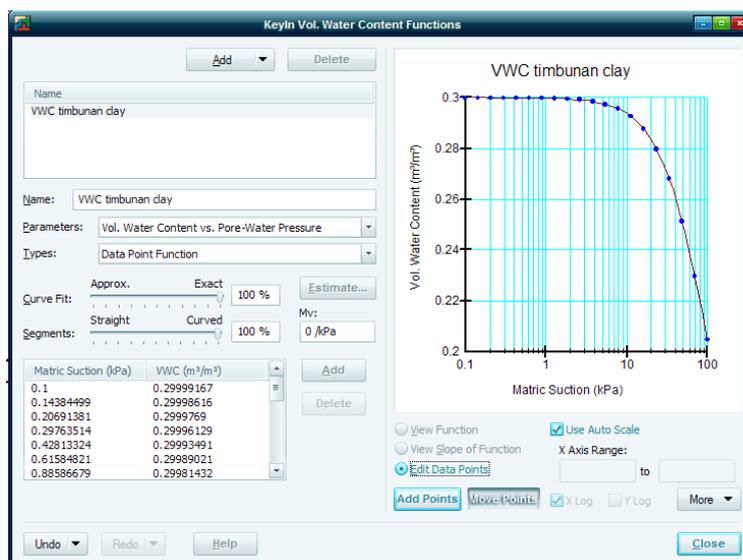
Gambar 2.39. Setting Material pada Vol. Water Content Functions
Sumber : Hasil Analisa (2018)

- Kemudian klik “Estimate”, maka akan muncul *Pop-Up* seperti gambar dibawah ini,



Gambar 2.40. Setting Material pada Estimate Vol. Water Content Functions
Sumber : Hasil Analisa (2018)

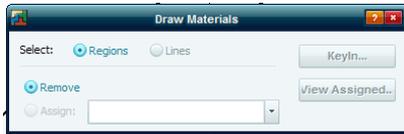
- ✚ Pada kolom “*Estimation Method*” pilih “*Sample Functions*” (karena contoh soal tidak memberikan data asli material).
- ✚ [Pilihan lain, anda dapat menggunakan data material asli ‘apabila ada’ dengan memilih “*grain-size data*” pada kolom “*estimation method*” (input data a.l: D10, D60, LL, dan *Vol. Water content* material yang anda miliki).
- ✚ Pada kolom “*Saturated WC*” tulis angka 0,3 (asumsi kadar air material dalam kondisi jenuh).
- ✚ Pada kolom “*Sample Material*” pilih material “*Clay*” sesuai dengan jenis material pada data diatas.
- ✚ Ganti angka pada kolom dibawah “*Suction Range*” sesuai dengan gambar diatas. Terakhir klik “*Ok*” dan akan muncul grafik hubungan antara tekanan air pori dengan jumlah kadar air pada material sampel.
- Kemudian ganti *Option* “*View Function*” dengan “*Edit Data Points*” kemudian klik “*Ok*”. Sehingga akan muncul gambar seperti dibawah ini, kemudian klik “*Close*”.



Gambar 2.41. Grafik Hub. Vol. Water Contents dengan Pore Water Pressure
Sumber : Hasil Analisa (2018)

Kesimpulan di dalam *Option hydraulic function* adalah anda memperkirakan besarnya nilai k material yang akan anda gunakan berdasarkan sample yang telah disediakan oleh program geostudio seep/w atau dengan data material asli yang anda miliki.

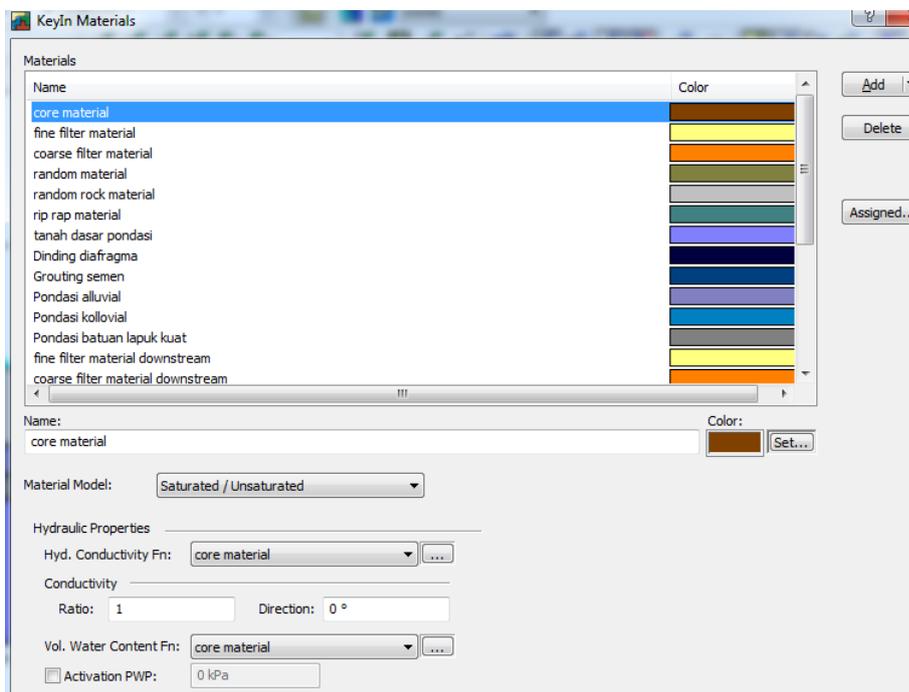
- klik cursor ke toolbar “Draw” dan klik *Option* “materials” dan akan muncul *Pop-Up* seperti gambar dibawah ini,



Gambar 2.42. Setting Draw Materials pada SEEP/W

Sumber : Hasil Analisa (2018)

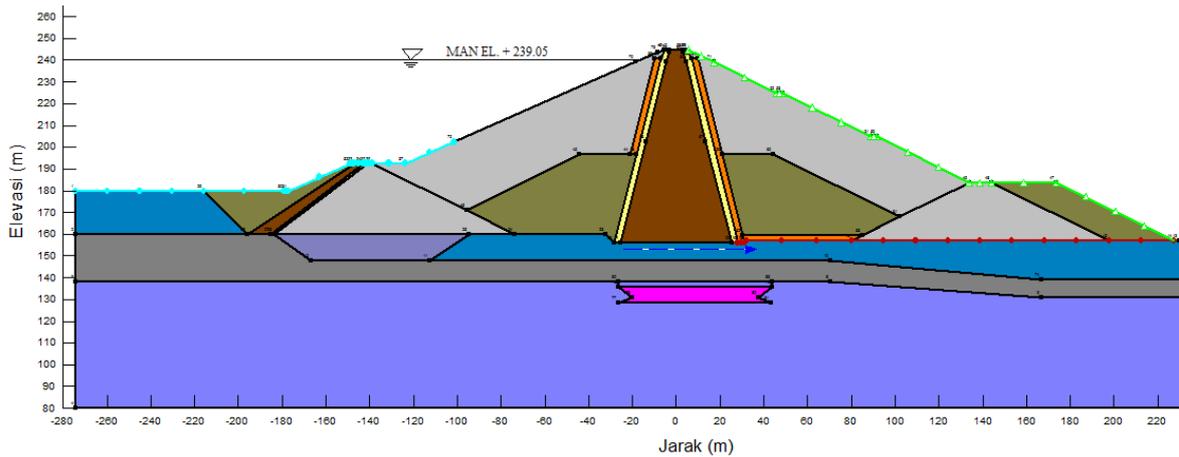
- Kemudian klik “KeyIn”. Selanjutnya adalah
- Klik “Add”
- Kolom “Name” isi dengan nama “timbunan clay” (dapat juga nama lain), icon “Set” untuk mengganti warna
- Pada kolom “Material Model” ganti dengan “Saturated/Unsaturated”
- Pada kolom “Hyd. Conductivity Fn” ganti dengan “HD timbunan clay”. Dan akan terlihat seperti pada gambar dibawah ini,



Gambar 2.43. Setting Keyin Material pada SEEP/W

Sumber : Hasil Analisa (2018)

- Setelah itu klik pada tubuh bendungan untuk mengisi bendungan homogen tersebut dengan material yang sudah di siapkan sebelumnya. Kemudian klik close pada *Pop-Up* “Draw Materials”. Dan akan terlihat seperti gambar dibawah ini,



Gambar 2.44. Hasil input data Material Pada Gambar Melintang Tubuh Bendungan
Sumber: Hasil Analisa (2018)

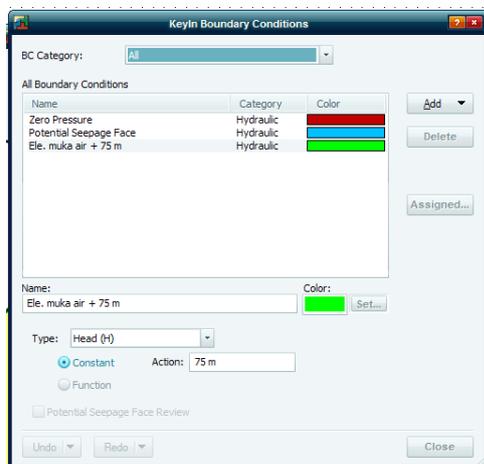
- Untuk menggambar muka air dll, klik pada toolbar “Draw” kemudian klik pada Option “Draw Boundary Conditions”. Dan akan muncul Pop-Up seperti dibawah ini,



Gambar 2.45. Setting Draw Boundary Conditions pada SEEP/W
Sumber : Hasil Analisa (2018)

- Klik Option “KeyIn”. dan ikuti langkah berikut :
- Klik pada Option “Add” dan klik pada “New Boundary Condition”
- Kolom “Name” ganti dengan nama “ Ele. muka air + 239,05 m”
- Ganti warna agar tidak sama dengan Option lainnya dengan klik Option “Set”
- Kolom “Type” ganti dengan Option “Head (H)” dan isi kolom “Action” dengan angka 239,05 m

Dan akan tampak seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.46. Setting Keyin Boundary Conditions pada SEEP/W
Sumber : Hasil Analisa (2018)

- Memasukkan data muka air waduk, daerah potensi rembesan, dan tekanan rembesan = 0. Yakni sebagai berikut:

Akan terdapat *pop up* seperti gambar berikut,



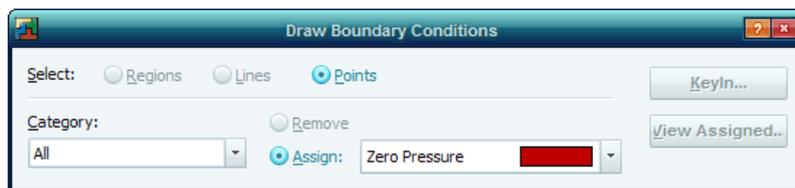
Gambar 2.47. Setting Elevasi Muka Air pada *Keyin Boundary Conditions*
Sumber : Hasil Analisa (2018)

- Klik pada bagian lereng hulu bendungan.
- Ganti *Option* “Assign” ke “Potential Seepage Face” dan klik pada bagian lereng hilir bendungan seperti *Pop-Up* dibawah ini :

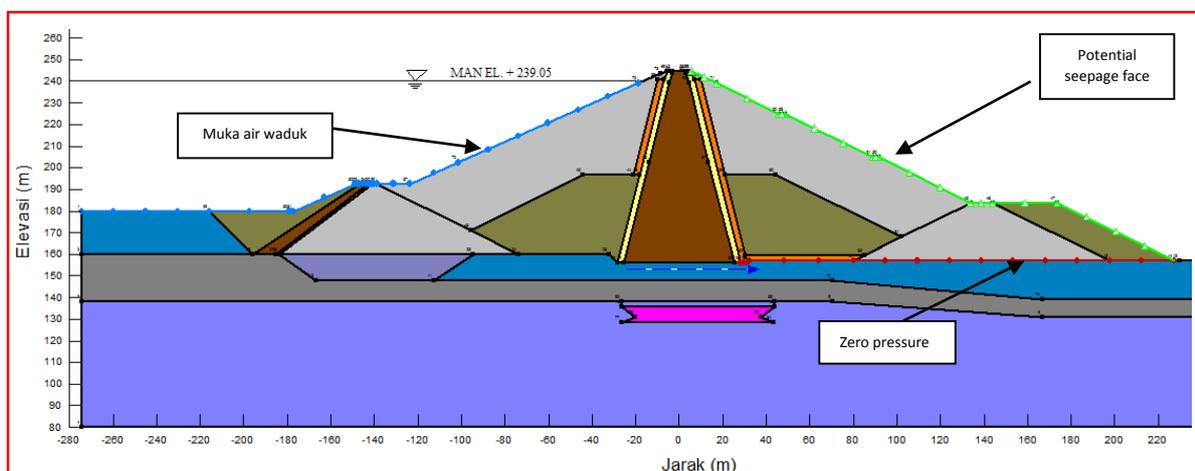


Gambar 2.48. Setting *Potential Seepage Face* pada *Keyin Boundary Conditions*
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Ganti *Option* “Assign” ke “Zero Pressure”, ganti *Option* “Select” dari “Lines” ke “Points”. Dan klik pada bagian *toe* di hilir bendungan. Seperti *Pop-Up* dibawah ini,

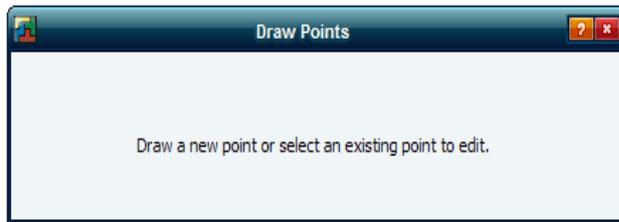


Gambar 2.49. Setting *Zero Pressure* Pada *Keyin Boundary Conditions*
Sumber: Hasil Analisa (2018)



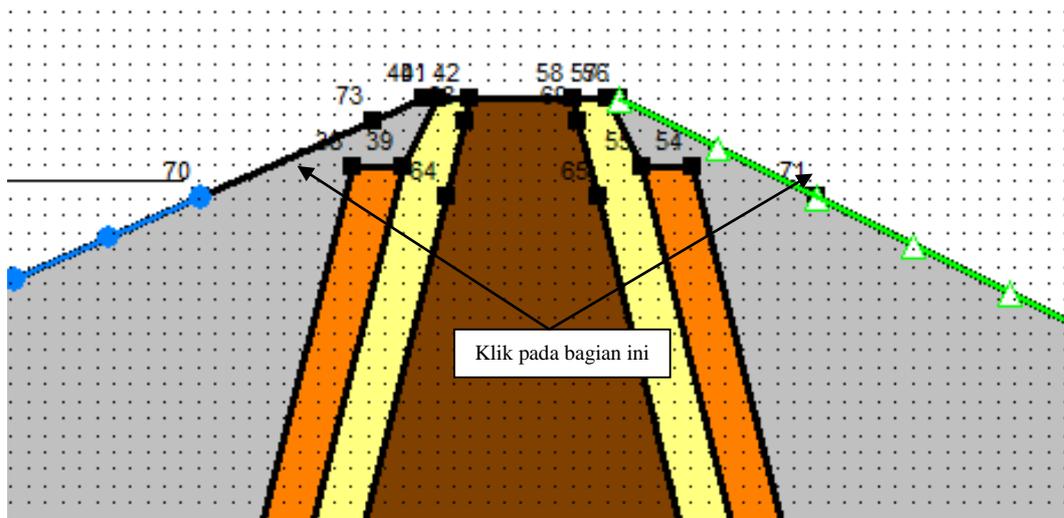
Gambar 2.50. *Boundary Conditions* Yang Diletakkan Pada Gambar Melintang Bendungan
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Karena elevasi muka air waduk dan *potential seepage face* masih belum berada pada el. +239,05 m, oleh karena itu harus dijadikan menjadi ke el. +239,05 m. caranya adalah sebagai berikut :
- Klik toolbar “Draw” kemudian klik “Points”. Akan muncul gambar seperti dibawah ini :



Gambar 2.51. Pop-Up Draw Point pada SEEP/W
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Klik pada bagian lereng hulu dan hilir. Pada elevasi +239,05 m. seperti pada gambar berikut :



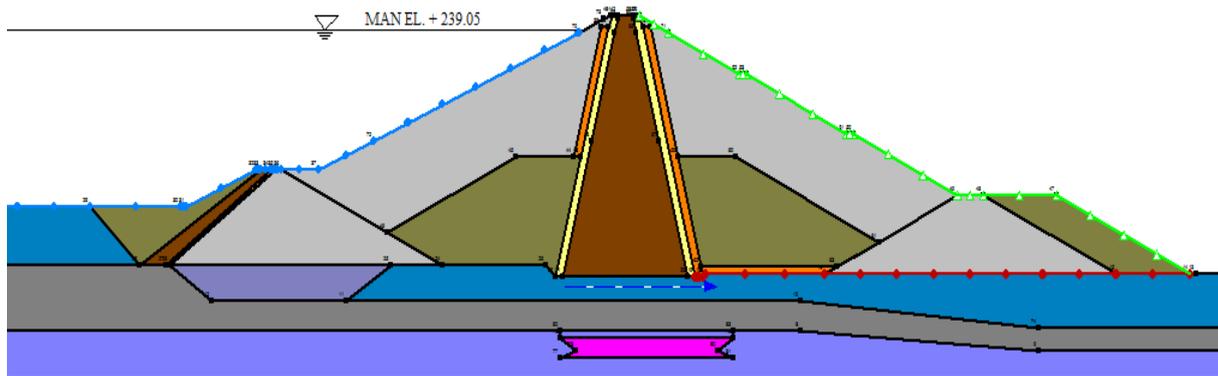
Gambar 2.52. Setting Draw Point pada Gambar Melintang Bendungan
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Kemudian klik toolbar “Draw” klik lagi pada “Draw Boundary Conditions”. Dan ganti Option “Assign” ke *Remove*. Dan ganti Option select “Points” ke “Lines”.



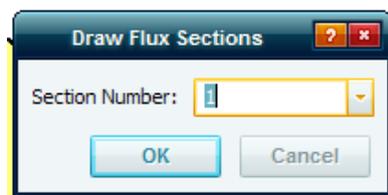
Gambar 2.53. Setting Remove Boundary pada gambar melintang bendungan
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Klik pada bagian lereng hulu dan hilir bendungan pada elevasi + 19 m ke atas (pada bagian diatas point yang telah anda gambar). Hasilnya akan seperti berikut,



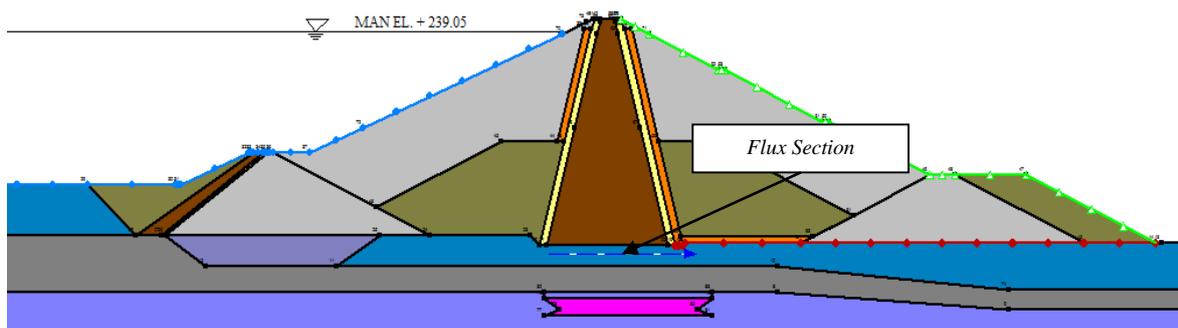
Gambar 2.54. Hasil *Remove Boundary* pada Gambar Melintang Bendungan
Sumber : Hasil Analisa (2018)

- Untuk mengetahui kapasitas rembesan yang melewati bagian as bendungan homogen, caranya adalah sebagai berikut :
- Klik toolbar “*Draw*”, dan klik “*Flux Section*”. Akan muncul *Pop-Up* seperti dibawah ini, dan klik “*Ok*”



Gambar 2.55. *Pop-Up Draw Flux Section* pada SEEP/W
Sumber : Hasil Analisa (2018)

- Tarik garis vertikal lurus sepanjang garis as bendungan homogen tersebut dari bawah ke atas, hingga terlihat seperti gambar dibawah ini,



Gambar 2.56. Hasil Penggambaran *Flux Section* pada Gambar Melintang Bendungan
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Langkah terakhir adalah me-*running* semua input yang telah dimasukan ke dalam gambar bendungan homogen tersebut. caranya adalah sebagai berikut :
- Klik toolbar “*Tools*”, klik “*Solve Analyses*”, klik “*Yes*”. Akan muncul *Pop-Up* seperti berikut :



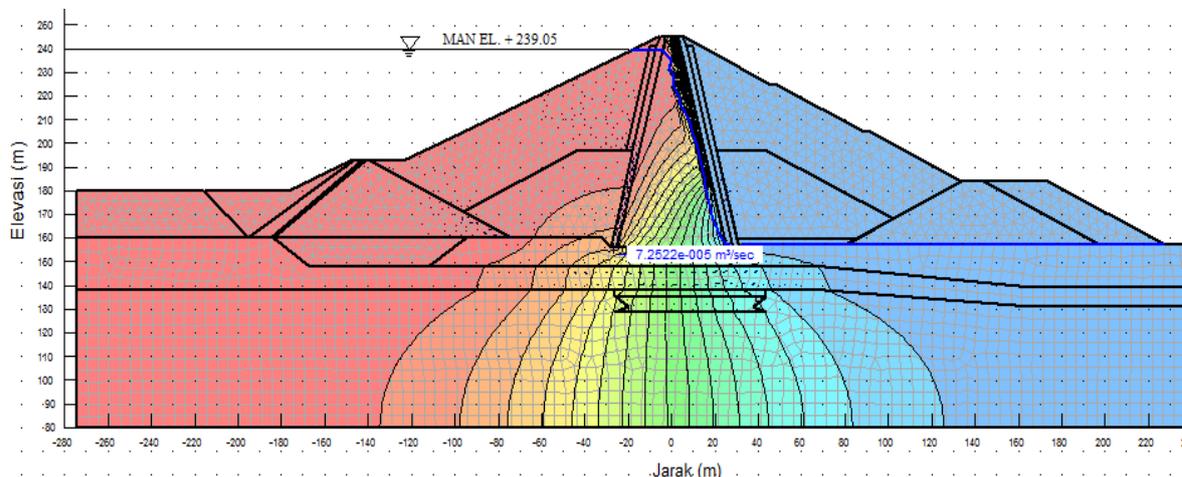
Gambar 2.57. Pop-Up Solve Analyses pada SEEP/W
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Klik start dan tunggu proses analisis berlangsung. Klik “Close”
- Klik icon seperti gambar dibawah ini,



Gambar 2.58. Icon pada Toolbar untuk Merubah Tampilan Sesuda Proses Solve
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Untuk mengetahui kapasitas rembesan yang melewati bagian as bendungan adalah sebagai berikut :
- Klik toolbar “Draw” kemudian klik “Flux Label”
- Kemudian, klik pada bagian as bendungan (garis flux section pada gambar bendungan anda). Dan akan terlihat seperti gambar dibawah ini,



Gambar 2.59. Hasil dari Proses Solve pada Contoh Bendungan Zonal
Sumber: Hasil Analisa (2018)

- Jadi, kapasitas rembesan pada muka air waduk di elevasi +239,05 m yang melewati as bendungan homogen tersebut = $7,25 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{dt}$.
- Simpan file dengan nama “rembesan bendungan zonal”

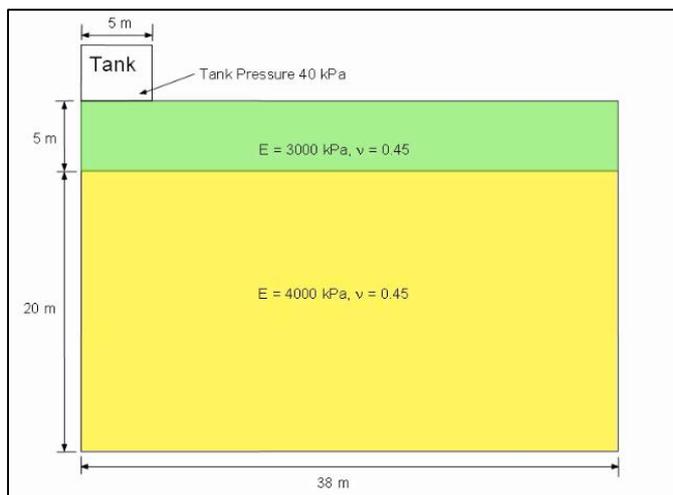
2.13.4. Analisa Deformasi Bendungan dengan Geostudio SIGMA/W 2007

SIGMA/W adalah salah satu software yang digunakan untuk menganalisis tekanan geoteknik dan masalah masalah deformasi. Dengan SIGMA/W dapat dipertimbangkan analisis mulai dari masalah deformasi sederhana hingga masalah tekanan efektif lanjutan secara bertahap dengan menggunakan model konstitutif tanah seperti linear-elastis, anisotropik linier-elastik, nonlinier-elastis (hiperbolik), elastis-plastik atau *Cam-clay*.

Langkah-langkah analisis deformasi menggunakan Geostudio SIGMA/W 2007 adalah sebagai berikut:

Sebagai contoh digunakan data teknis sebuah tangki yang berada di atas tanah pondasi yang memiliki 2 karakteristik yang akan dianalisa deformasi / penurunan dengan data sebagai berikut:

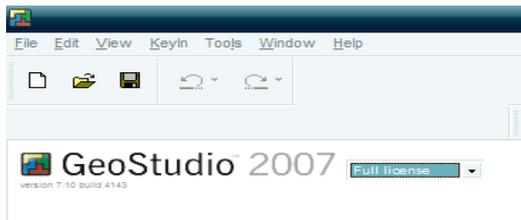
- Benda : tangki
- Ukuran tangki : 5 x 5 m
- Tekanan tangki : 40 Kps
- Kedalaman tanah pindasi A : 20 m
- E-Modulus tanah A : 4000 Kpa
- Poisson's Ratio tanah A : 0.45
- Kedalaman tanah pindasi B : 5 m
- E-Modulus tanah B : 3000 Kpa
- Poisson's Ratio tanah B : 0.45



Gambar 2.60. Profil Tangki dan Tanah Pondasi

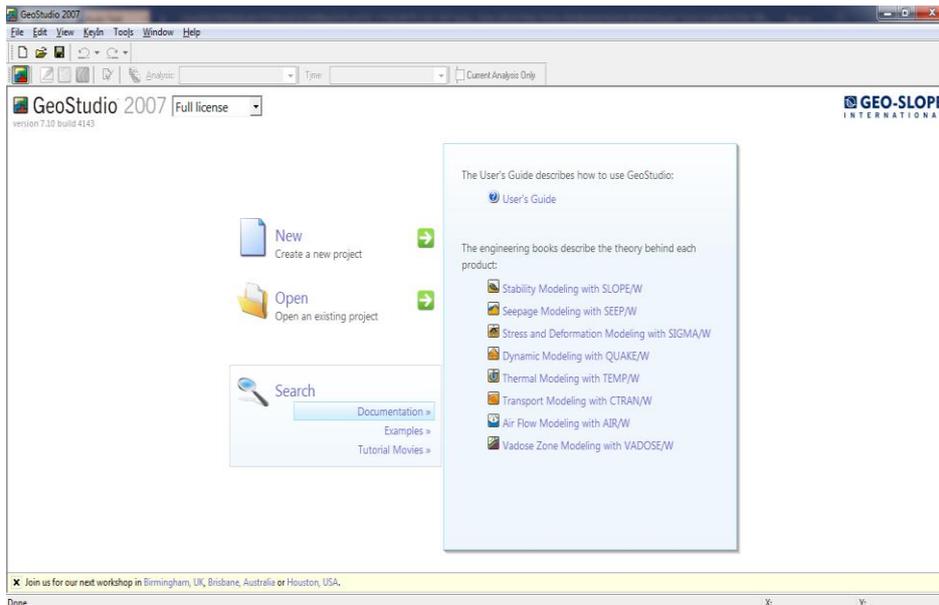
Sumber: Contoh (2008)

- ✚ Install program terlebih dahulu dengan versi *full lisence* dan buka dengan meng-klik pada Icon Geo-SLOPE pada desktop komputer anda.



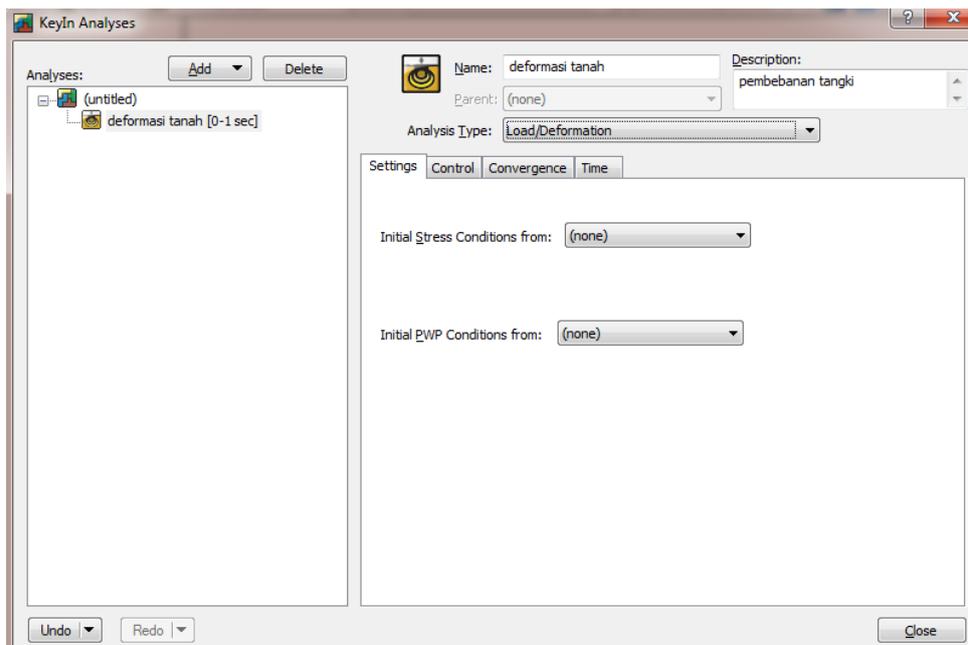
Gambar 2.61. Option Full Lisence di GeoStudio 2007
Sumber: Contoh (2008)

✚ Klik “New” pada *tab-file* tersebut kemudian klik ikon SIGMA/W



Gambar 2.62. Option New pada Geostudio 2007
Sumber: Contoh (2008)

✚ Setelah muncul *Pop-Up* seperti gambar dibawah ini,



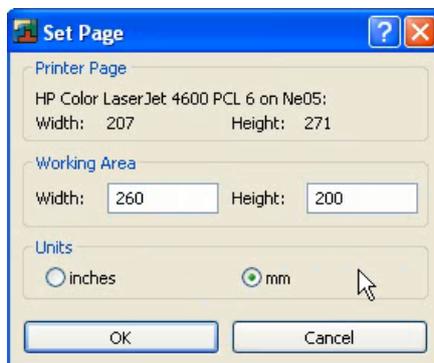
Gambar 2.63. Option Setting pada *Pop-Up Keyin Analyses*
Sumber: Contoh (2008)

Lakukan langkah – langkah sebagai berikut kemudian klik “close” :

- Kolom “Name” anda dapat mengisi dengan nama pekerjaan dll (contoh : deformasi tanah)
- Kolom “Description” dapat anda tambahkan keterangan tentang pekerjaan tersebut dll (contoh : pembebanan tangki)
- Kolom “Analysis Type” dapat diganti sesuai dengan jenis analisa yang akan anda jalankan. Pada contoh ini dipilih *Analysis Type = Load/Deformation* (pembenan/deformasi)

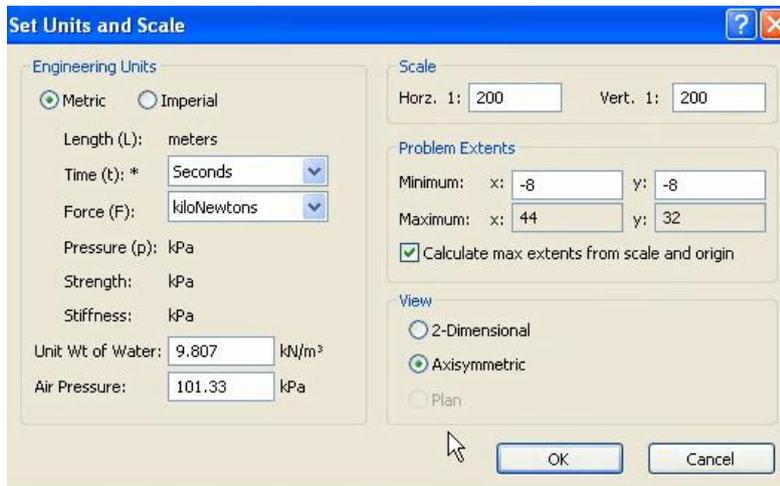
✚ Setelah muncul lembar kerja atur lembar kerja tersebut sebelum melanjutkan proses, yang meliputi :

✚ “Set Page” : untuk mengatur besarnya lembar kerja (satuan dalam inchi dan mm)



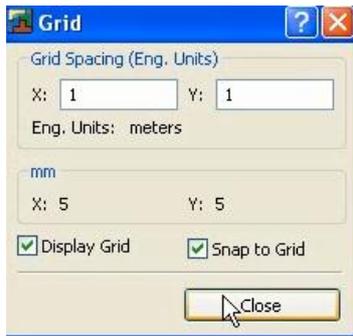
Gambar 2.64. Option Set Page untuk Pengaturan Lembar Kerja
Sumber: Contoh (2008)

- “Set Unit and Scale” : untuk mengatur skala gambar



Gambar 2.65. Option Set Unit and Scale untuk Pengaturan Skala Gambar
Sumber: Contoh (2008)

- “Grid” : untuk memunculkan *grid* pada lembar kerja dan *Snap to Grid* (centang keduanya) kemudian klik “close”



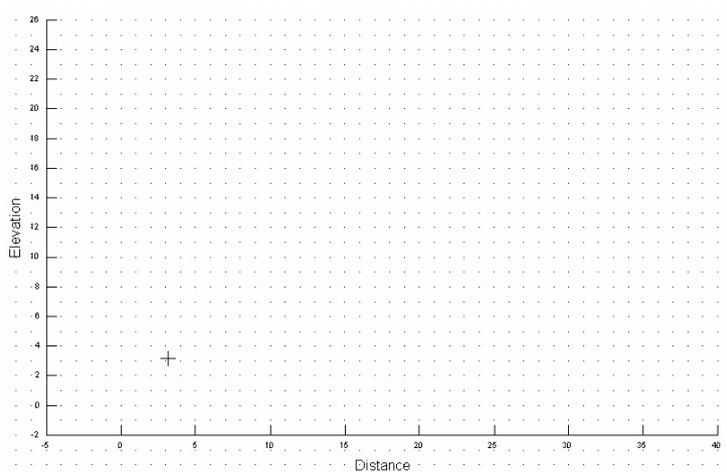
Gambar 2.66. Option Grid untuk Pengaturan Grid pada Lembar Kerja
Sumber: Contoh (2008)

- “Axes” : untuk membuat sumbu x,y pada lembar kerja, kemudian ganti kolom “Bottom x” dengan (jarak m) dan kolom “Left y” dengan (Elevasi m). seperti gambar dibawah. klik “ok”



Gambar 2.67. Option Axes untuk Membuat Sumbu X dan Y
Sumber: Contoh (2008)

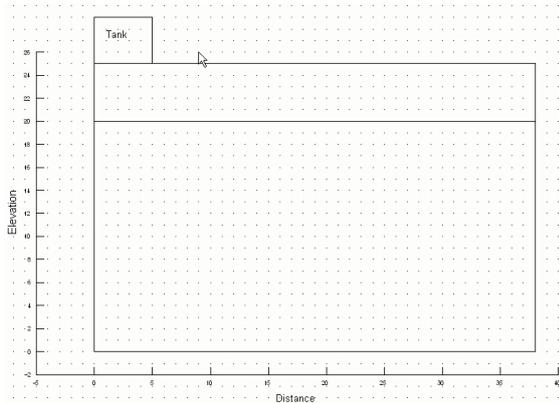
- ✚ Tahan klik kiri mouse pada lembar kerja anda, dan tarik dari posisi kiri bawah ke kanan atas pada lembar kerja anda, apabila sukses akan membentuk sebuah sumbu x,y seperti pada gambar dibawah ini,



Gambar 2.68. Hasil dari Penggambaran Sumbu X dan Y
Sumber: Contoh (2008)

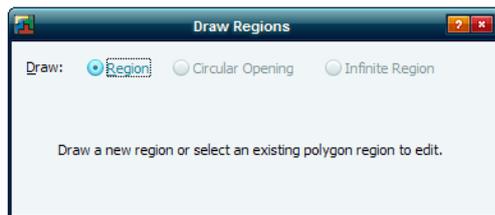
- ✚ Klik toolbar “Sketch” dan klik “Sketch Polylines”

Kemudian gambar bendungan sesuai dengan data teknis yang terdapat di atas. Dan hasilnya akan terlihat seperti gambar dibawah ini,



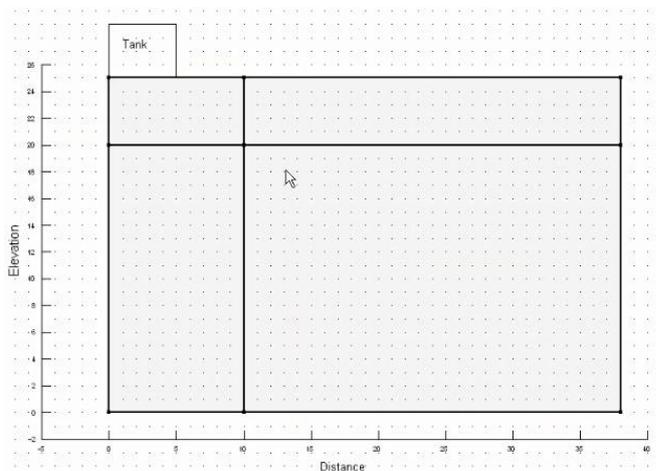
Gambar 2.69. Hasil dari Penggambaran Profil Tanah dan Tangki
Sumber: Contoh (2008)

✚ Kemudian buat *region* pada sketsa gambar bendungan anda, agar dapat di-input-dengan data material sesuai contoh soal diatas. Klik “*Draw*” kemudian klik “*Regions*” dan akan muncul gambar seperti dibawah ini,



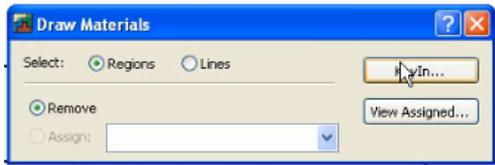
Gambar 2.70. Pop-Up untuk *Region*
Sumber: Contoh (2008)

✚ Gambar timbunan tanah dan tangki anda dengan *region* tersebut (caranya adalah seperti menggambar pada langkah menggambar dengan *polylines*). Setelah berhasil, klik tanda [x] pada *Pop-Up* “*Draw Regions*”. Sehingga akan menjadi seperti gambar dibawah ini,



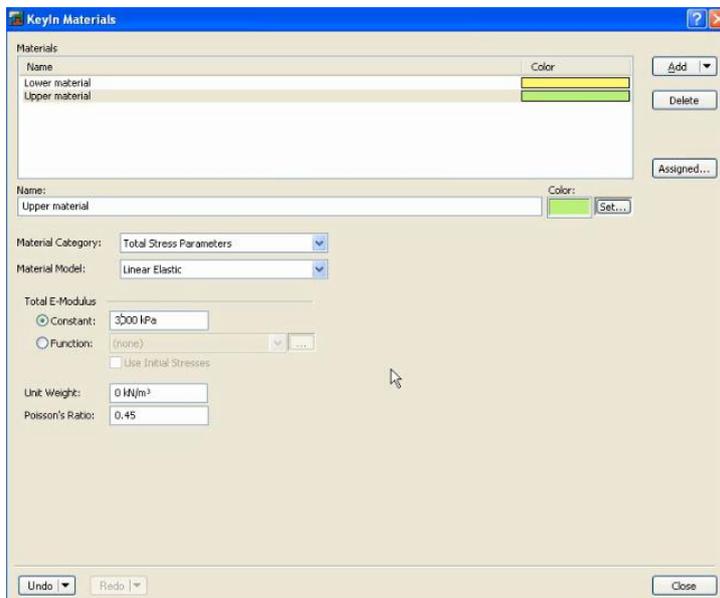
Gambar 2.71. Hasil Penggambaran Potongan Melintang Tanah dan Tangki dengan *Region*
Sumber: Contoh (2008)

➤ Arahkan *cursor* pada toolbar “KeyIn” klik geser ke “Materials” dan muncul tampilan seperti pada gambar dibawah ini,



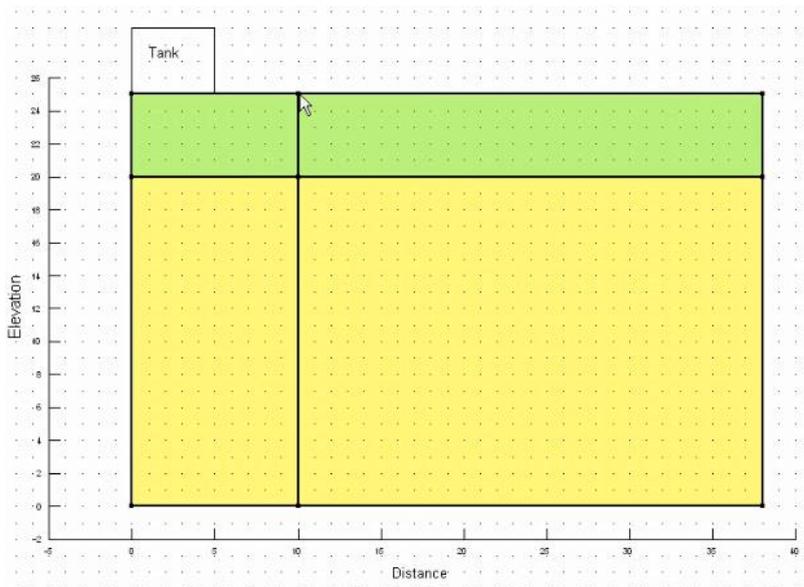
Gambar 2.72. Tampilan *Draw Materials*
Sumber: Contoh (2008)

- Kemudian klik “KeyIn”. Selanjutnya adalah :
- Klik “Add”
- Kolom “Name” isi dengan nama “*lower material*” (dapat juga nama lain), icon “Set” untuk mengganti warna
- Pada kolom “*Material Category*” ganti dengan “*Total Stress Parameters*”
- Pada kolom “*Material Model*” ganti dengan “*Linear Elastic*”
- Pada kolom “*Total E-Modulus*” pilih “*Constant*” dan masukkan nilai E-modulus dari material
- Pada kolom “*Poisson’s Ratio*” masukkan nilai *Poisson’s Ratio* dari material



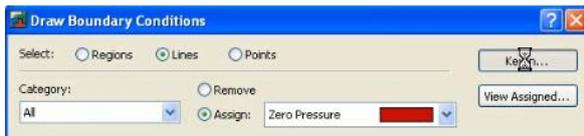
Gambar 2.73. Setting *Keyin Material* pada SIGMA/W
Sumber: Contoh (2008)

- Setelah itu klik pada tanah untuk mengisi tanah tersebut dengan material yang sudah di siapkan sebelumnya. Kemudian klik close pada *Pop-Up “Draw Materials”*. Dan akan terlihat seperti gambar dibawah ini,



Gambar 2.74. Hasil *Input Data Material* pada Gambar Melintang Tipikal Tanah
Sumber: Contoh (2008)

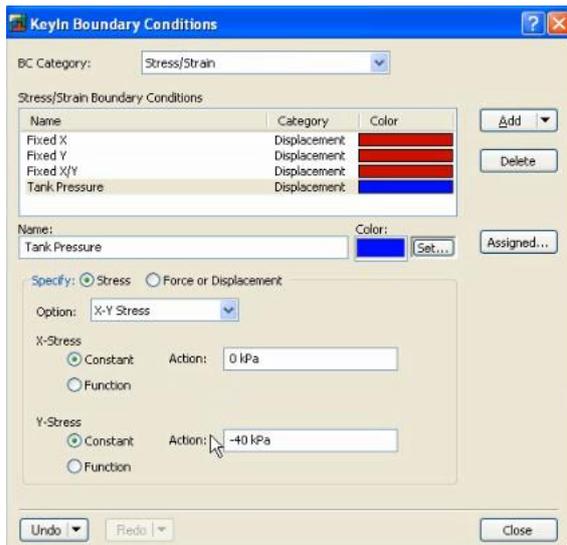
- Untuk menggambar muka air dll, klik pada toolbar “*Draw*” kemudian klik pada *Option “Draw Boundary Conditions”*. Dan akan muncul *Pop-Up* seperti dibawah ini,



Gambar 2.75. *Setting Draw Boundary Conditions* pada SIGMA/W
Sumber: Contoh (2008)

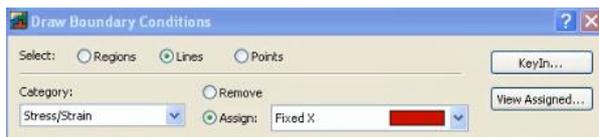
- Klik *Option “KeyIn”*. dan ikuti langkah berikut :
- Pada kolom “*BC Ctegrory*” ganti dengan “*Stress/Strain*”
- Klik pada *Option “Add”* dan klik pada “*New Boundary Condition*”
- Kolom “*Name*” ganti dengan nama “*Tank Pressure*”
- Ganti warna agar tidak sama dengan *Option* lainnya dengan klik *Option “Set”*
- Kolom “*Specify*” ganti dengan *Option “Stress”* dan ganti kolom “*Option*” dengan “*X-Y Stress*”
- Kolom “*Y-Stress*” ganti dengan *Option “Constant”* dan isi kolom “*Action*” dengan nilai tekanan dari tangki

Dan akan tampak seperti gambar dibawah ini,



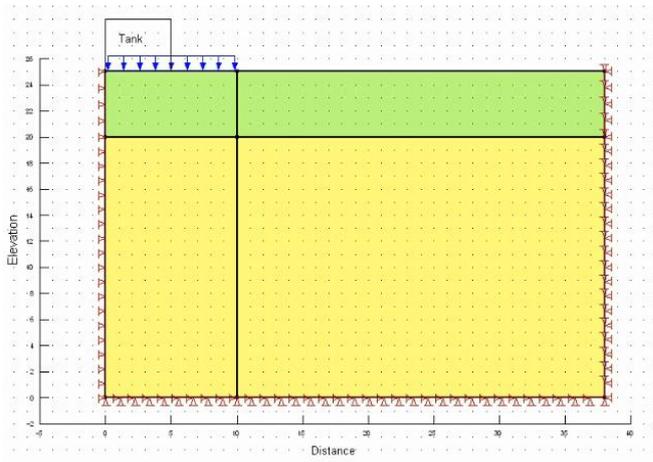
Gambar 2.76. Setting Keyin Boundary Conditions pada SEEP/W
Sumber: Contoh (2008)

- Memasukkan data tekanan arah sumbu X daerah dasar (dibawah tangki)
Akan terdapat *pop up* seperti gambar berikut :



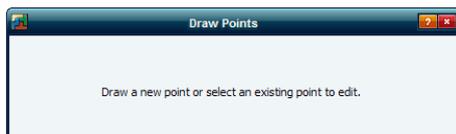
Gambar 2.77. Setting Tekanan Tanah pada Keyin Boundary Conditions
Sumber: Contoh (2008)

- Klik pada bagian tanah yang akan menahan tekanan horizontal
- Ganti *Option* “Assign” ke “Fixed X” dan klik pada bagian tanah pondasi yang menahan tekanan horizontal
- Ganti *Option* “Assign” ke “Fixed X/Y”, dan klik pada bagian tanah yang menahan tekanan horizontal /vertikal
- Ganti *Option* “Assign” ke “Tank Pressure”, dan klik pada bagian tanah yang menahan tekanan tangki secara langsung, hasil masukan *Boundary Conditions* seperti gambar dibawah :



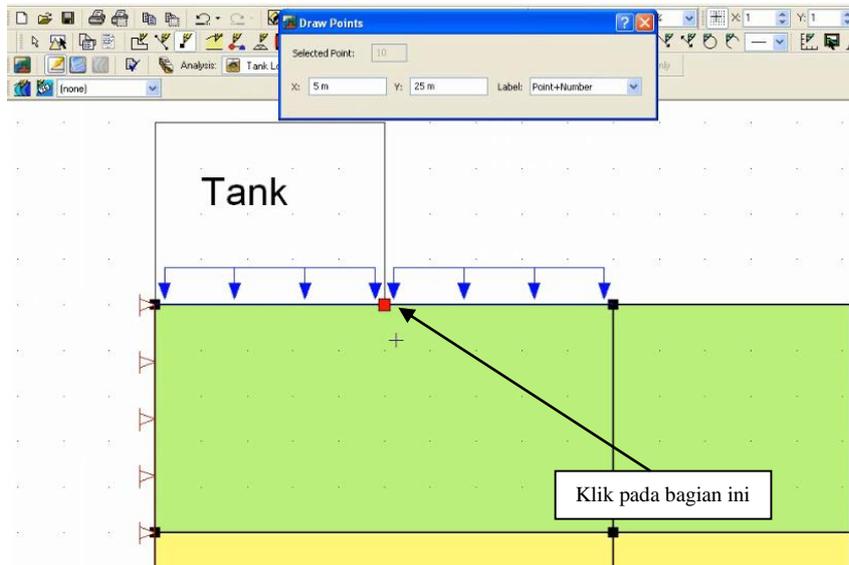
Gambar 2.78. *Boundary Conditions* yang Diletakkan pada Gambar Melintang Bendungan
Sumber: Contoh (2008)

- Karena letak tekanan langsung dari tangki belum berada tepat dibawah tangki maka perlu dilakukan dengan cara sebagai berikut :
- Klik toolbar “*Draw*” kemudian klik “*Points*”. Akan akan muncul gambar seperti dibawah ini,



Gambar 2.79. *Pop-Up Draw Point* pada SIGMA/W
Sumber: Contoh (2008)

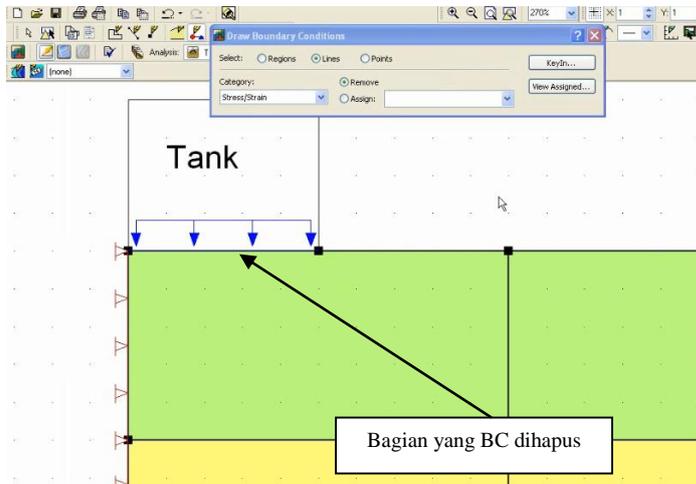
- Klik pada bagian ujung dasar tangki yang menyentuh tanah seperti gambar berikut



Gambar 2.80. *Setting Draw Point* pada Gambar Melintang Tanah Dasar Tangki
Sumber: Contoh (2008)

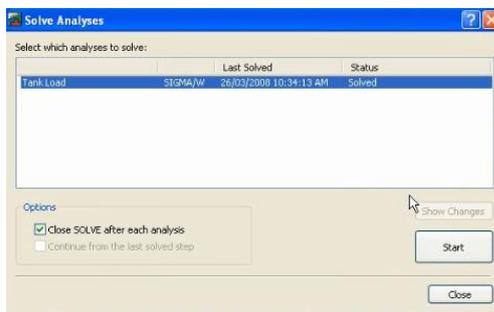
- Kemudian klik toolbar “*Draw*” klik lagi pada “*Draw Boundary Conditions*”. Dan ganti *Option* “*Assign*” ke *Remove*”. Dan ganti *Option* select “*Points*” ke “*Lines*”.

- Klik pada bagian tanah yang tidak menerima tekanan langsung dari tangki. Hasilnya akan seperti berikut:



Gambar 2.81. Hasil *Remove Boundary* pada Gambar Melintang Bendungan
Sumber: Contoh (2008)

- Langkah terakhir adalah me-*running* semua input yang telah dimasukkan ke dalam gambar tanah dasar tangki tersebut. caranya adalah sebagai berikut :
- Klik toolbar "*Tools*", klik "*Solve Analyses*", klik "*Yes*". Akan muncul *Pop-Up* seperti berikut :



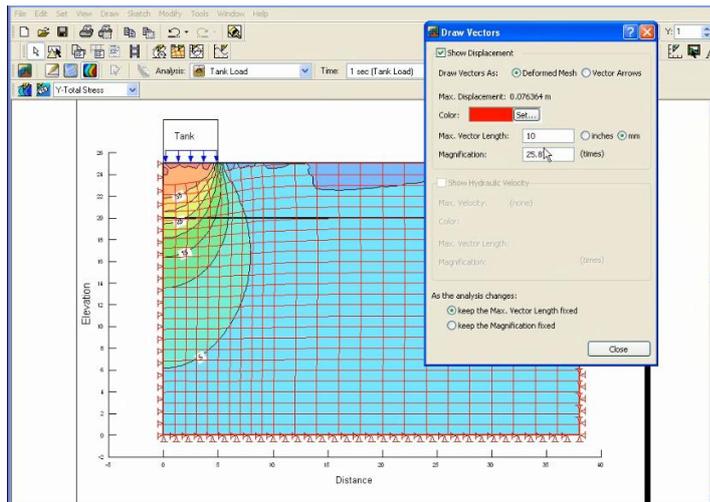
Gambar 2.82. *Pop-Up Solve Analyses* pada SIGMA/W
Sumber: Contoh (2008)

- Klik start dan tunggu proses analisis berlangsung. Klik "*Close*"
- Klik icon seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.83. Icon Pada *Toolbar* untuk Merubah Tampilan Sesuda Proses *Solve*
Sumber: Contoh (2008)

- Untuk mengetahui deformasi / penurunan tanah adalah sebagai berikut :
- Klik toolbar "*Draw*" kemudian klik "*Draw Vectors*"
- Kemudian, klik "*Show Displacement*", nilai pada kolom "*Max. Displacement*" menunjukkan deformasi maksimal dari tanah. Hasil *running* seperti gambar dibawah :



Gambar 2.84. Hasil dari Proses *Solve* pada Contoh Tangki yang Berada diatas Tanah
Sumber: Contoh (2008)

- Jadi, kapasitas rembesan pada muka air waduk di elevasi +75 m yang melewati as bendungan homogen tersebut = 0.0756 m.
- Simpan *file* dengan nama “Contoh SIGMA/W”

2.14. Analisis Regresi

Penentuan hubungan antara dua variabel atau lebih dapat dibuat dalam bentuk persamaan atau rumus matematik. Suatu analisis yang membahas hubungan antara dua variabel atau lebih disebut analisis regresi (Soewarno, 1995:132). Langkah pertama yang harus dilakukan untuk menyatakan hubungna antar variabel adalah mengumpulkan data yang menunjukkan nilai dari hubungan variabel yang diamati. Data – data digambarkan pada suatu diagram pancar (*scatter diagram*), dari diagram tersebut akan diperoleh suatu kurva regresi yang disesuaikan.

Penyesuaian kurva dapat dilakukan dengan cara grafis maupun analisis. Prosedur analisis memberikan suatu metode yang lebih pasti untuk mendapatkan kurva yang diinginkan. Salah satu cara yang dapat digunakan adalah metode kuadrat terkecil (*least square method*). Model regresi yang biasa digunakan yaitu model regresi linier, model regresi eksponensial, model regresi berpangkat, model regresi logaritmik, serta model regresi polynomial.

A. Model Regresi Linier

Apabila terdapat dua variabel yang saling berpasangan $\{(X_i, Y_i); i=1,2,3,\dots,n\}$, maka hubungan antar variabel tersebut dapat berupa garis kurva linier dengan persamaan sebagai berikut (Soewarno, 1995:40) :

$$\hat{Y} = mX + n \quad (2-26)$$

Dengan :

\hat{Y} = Persamaan garis lurus Y terhadap X

m = Koefisien regresi, merupakan koefisien arah dari regresi

n = konstanta yang merupakan titik potong dari garis regresi

Besarnya koefisien korelasi yang menunjukkan hubungan antara variabel Xi dan Yi adalah sebagai berikut :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2][\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]} \quad (2-27)$$

Dengan :

\bar{X} = Rerata nilai X

\bar{Y} = Rerata nilai Y

B. Model Regresi Eksponensial

Dari serangkaian pasangan data – data variabel $\{(X_i, Y_i); 1 = 1, 2, 3, \dots, n\}$ apabila dihitung dengan persamaan regresi eksponensial, maka modelnya adalah sebagai berikut (Soewarno, 1995:163).

$$\hat{Y} = n \cdot e^{m \cdot x} \quad (2-28)$$

Dengan :

\hat{Y} = Persamaan garis lurus Y terhadap X, merupakan variabel tak bebas

X = Variabel bebas

m.n = Parameter

e = Bilangan pokok logaritma asli = 2,7183

C. Model Regresi Berpangkat

Model regresi berpangkat dari data –data variabel berpasangan $\{(X_i, Y_i); 1=1, 2, 3, \dots, n\}$ adalah sebagai berikut (Soewarno, 1995:172).

$$\hat{Y} = n \cdot X^m \quad (2-29)$$

Dengan :

\hat{Y} = Persamaan garis lurus Y terhadap X, merupakan variabel tak bebas

X = Variabel bebas

m = Parameter

D. Model Regresi Logaritmik

Model regresi logaritmik dinyatakan dengan persamaan matematik sebagai berikut:

$$\hat{Y} = n + m \log X \quad (2-30)$$

Dengan :

\hat{Y} = Persamaan garis lurus Y terhadap X, merupakan variabel tak bebas

X = Variabel bebas

m = Parameter

E. Model Regresi Polinomial

Persamaan regresi polinomial mempunyai beberapa orde yang menyatakan hubungan dua atau lebih variabel. Persamaan regresi polinomial orde dua dapat dinyatakan sebagai berikut (Soewarno, 1995:185):

$$\hat{Y} = a + bX + cX^2 \quad (2-31)$$

❖ Koefisien Korelasi dan Determinasi

Nilai koefisien korelasi berkisar antara $-1 \leq R \leq 1$. Kuat tidaknya hubungan dan variabel dilihat dari koefisien korelasinya adalah sebagai berikut :

Tabel 2.11.

Kemantapan Kurva Regresi

Koefisien Korelasi	Keterangan
R = 1	Hubungan positif sempurna
0,6 < R < 1	Hubungan langsung positif baik/kuat
0 < R < 0,6	Hubungan langsung positif lemah
R = 0	Tidak terdapat hubungan
-0,6 < R < 0	Hubungan negatif lemah
-1 < R < -0,6	Hubungan negatif baik/kuat
R = -1	Hubungan negatif sempurna

Sumber: Soewarno (1995,p.135)

Untuk mengetahui kemantapan kurva regresi digunakan koefisien determinasi yang merupakan kuadrat dari koefisien korelasi (R^2). Bila koefisien determinasi sama dengan nol (0) atau mendekati nol (0), dikatakan bahwa presiksi kurva regresi perlu dikaji kembali. Sebaliknya apabila nilai koefisien determinasi sama dengan atau mendekati satu maka prediksi dapat diharapkan.

2.15. Pembetonan dan Penulangan (*Concrete Slab*)

Suatu bangunan yang telah direncanakan dimensinya, perlu juga dianalisa mengenai pembetonan dan penulangannya. Berikut merupakan hal-hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan pembetonan dan penulangan konstruksi.

2.15.1. Kuat Tekan Beton (f'_c) dan Kuat Tarik Baja (f_y)

Beton bertulang merupakan gabungan dari dua jenis bahan yaitu beton yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi tetapi kekuatan tarik nya rendah dan batangan baja yang ditanamkan dalam beton dapat memberikan kekuatan tarik yang diperlukan. Hasil kombinasi ini mempunyai beberapa keuntungan seperti, harga yang relatif murah, dimensi bangunan

tidak terlalu besar, daya tahan yang baik terhadap pengaruh cuaca dan api, kekuatan tekan yang baik dari beton serta kekuatan tarik yang tinggi dari baja.

Kekuatan tekan beton ditentukan berdasarkan komposisi semen, agregat kasar, agregat halus, air, dan campuran lainnya. Perbandingan air terhadap semen merupakan faktor utama didalam penentuan kekuatan beton. Air dalam jumlah tertentu diperlukan untuk mendapatkan aksi kimiawi dalam proses pengerasan beton, air yang berlebihan akan meningkatkan kemampuan pengerjaan untuk mencetak beton akan tetapi juga berakibat menurunkan kekuatan dari beton tersebut. Lambang untuk kekuatan tekan beton adalah f'_c .

Dalam sebuah perencanaan bangunan, *output* yang dihasilkan untuk beton adalah f'_c dalam satuan Mpa. Tetapi dalam spesifikasi teknis suatu proyek, mutu beton yang tercantum adalah menggunakan beton K. Kualitas beton dalam f'_c dan K tidaklah sama. Hal ini dikarenakan K adalah kuat tekan karakteristik beton kg/cm^2 dengan benda uji berupa suatu kubus bersisi 15 cm. Sedangkan f'_c dalam Mpa merupakan kuat tekan beton yang diisyaratkan Mpa atau kg/cm^2 dengan benda uji berupa silinder berdiameter 15 cm dengan tinggi 30 cm. Karena perbedaan benda uji maka mutu betonnya menjadi tidak sama.

2.15.2. Pembebanan pada Konstruksi

Faktor-faktor pembebanan (*load factor*) terdiri dari beban hidup (*life load*) dan beban mati (*dead load*). Untuk pembebanan mati dikalikan faktor yang didapat dari beban-beban ijin dengan menggunakan hubungan seperti di bawah ini (SNI 2847, 2013) :

$$U = 1,4 D \quad (2-32)$$

dengan:

U = kekuatan yang diperlukan (berdasarkan kemungkinan pelampauan batas)

D = beban mati

2.15.3. Tinggi atau Tebal Total Beton Bertulang (h)

Dalam hal mendukung beban lentur, jika ukuran balok maupun pelat terlalu kecil maka akan terjadi lendutan yang sangat berbahaya bagi keamanan struktur, bahkan akan timbul retak yang lebar sehingga dapat meruntuhkan balok (Asroni, 2010:40).

Jika persyaratan lendutan tidak diperhitungkan secara detail, maka SNI 03-2847-2013 memberikan tinggi penampang (h) minimal pada balok maupun pelat seperti tercantum pada Tabel 2.12.

Tabel 2.12.
Tebal Minimum (h)

Komponen struktur	Tebal minimum (h)			
	Tertumpu sederhana	Satu ujung menerus	Kedua ujung menerus	Kantilever
Pelat masif satu arah	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
Balok atau pelat rusuk satu arah	$l/16$	$l/18,5$	$l/21$	$l/8$

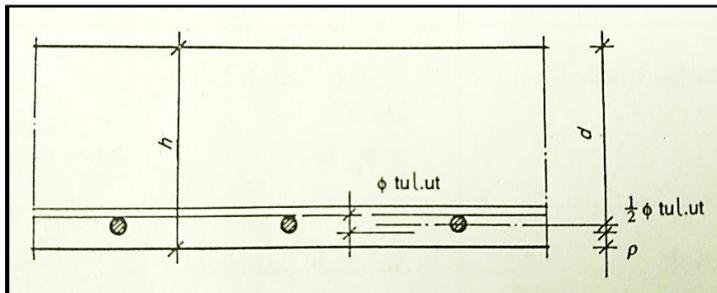
Sumber: SNI 03-2847-2013

Ada beberapa catatan yang perlu diperhatikan dalam penggunaan Tabel 2.12. di atas, yaitu:

1. Panjang bentang dalam mm.
2. Nilai yang diberikan harus digunakan langsung untuk komponen struktur dengan beton normal dan tulangan mutu 420 Mpa. Untuk kondisi lain, nilai di atas harus dimodifikasi sebagai berikut :
 - Untuk struktur beton ringan dengan berat jenis (*equilibrium density*) w_c di antara 1440 sampai 1840 kg/cm³ harus dikalikan dengan $(1,65 - 0,0003w_c)$ tetapi tidak kurang dari 1,09.
 - Untuk f_y selain 420 MPa, nilainya harus dikalikan dengan $(0,4 + f_y/700)$.

2.15.4. Tebal Efektif

Dua besaran yang mempunyai peran penting pada analisis penampang beton bertulang adalah tinggi total h dan tinggi efektif d . Gambar 2.4. menunjukkan kedua besaran ini pada sebuah pelat.



Gambar 2.85. Hubungan h , d dan penutup beton p

Sumber: Vis (1993,p.43)

Hubungan antara h dan d untuk sebuah pelat adalah sebagai berikut :

$$h = d + \frac{1}{2}\phi_{tul. ut} + p \quad (2-33)$$

dengan:

h = tinggi total pelat (mm)

d = tebal efektif (mm)

p = tebal penutup beton (mm)

$\emptyset_{tul. ut}$ = diameter tulangan utama

Salah satu faktor yang menentukan perbedaan antara d dan h , baik dalam pelat maupun balok adalah penutup beton p . Sesuai dengan namanya penutup beton ini digunakan untuk melindungi baja tulangan. Lapisan pelindung yang digunakan sesuai dengan ketentuan tebal penutup beton akan berfungsi untuk (Vis, 1993:43) :

1. Menjamin penanaman tulangan dan lekatannya dengan beton.
2. Menghindarkan korosi pada tulangan.
3. Meningkatkan perlindungan struktur terhadap kebakaran.

Tabel 2.13.

Tebal Minimum Penutup Beton pada Tulangan Terluar

	Selimit beton (mm)
(a) Beton yang di cor di atas dan selalu berhubungan dengan tanah	75
(b) Beton yang berhubungan dengan tanah atau cuaca: Batang tulangan D-19 hingga D-57 Batang tulangan D-16, kawat M-16 ulir atau polos, dan yang lebih kecil	50 40
(c) Beton yang tidak berhubungan dengan cuaca atau berhubungan dengan tanah: Slab, dinding, balok usuk: Batang tulangan D-44 dan D-57 Batang tulangan D-36 dan yang lebih kecil	40 20
Balok, kolom: Tulangan utama, pengikat, sengkang, spiral	40
Komponen struktur cangkang, pelat lipat: Batang tulangan D-19 dan yang lebih besar Batang tulangan D-16, kawat M-16 ulir atau polos, dan yang lebih kecil	20 13

Sumber: SNI 03-2847-2013

2.15.5. Perencanaan Tulangan

Apabila momen M_u pada sebuah penampang diketahui, kemudian diperkirakan ukuran beton b dan d . selanjutnya mutu beton dan mutu baja ditentukan, maka jumlah tulangan yang diperlukan dapat dihitung (Vis, 1993,p.53). Dengan nilai $f'_c \leq 30$ Mpa maka persamaan umumnya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{M_u}{bd^2} = \rho \cdot 0,8 \cdot f_y \left(1 - 0,588\rho \frac{f_y}{f'_c} \right) \quad (2-34)$$

Dengan:

M_u = momen lapangan Mpa

b = panjang persatuan lebar (mm)

d = tebal efektif plat (mm)

f'_c = kuat tekan beton (Mpa)

f_y = kuat tarik baja (Mpa)

ρ = rasio tulangan

Pada persamaan ini ruas kanan hanya bergantung pada mutu beton dan mutu baja serta jumlah tulangan. Akan tetapi karena mutu beton dan baja sudah ditetapkan maka pada ruas

ini telah mempunyai nilai tertentu. Sehingga yang belum diketahui hanyalah jumlah tulangan ρ .

Pertambahan tegangan baja yang tiba-tiba dapat mengakibatkan baja mendadak putus. Untuk mencegahnya, maka penampang beton bertulang yang dibebani lentur harus diberi sejumlah tulangan minimum tertentu. Hal ini dapat dinyatakan dengan nilai tulangan minimum ρ_{min} . Nilai tulangan minimum harus dipilih sedemikian rupa sehingga terdapat perbedaan yang kecil antarmomen lentur yang dapat ditahan oleh penampang yang tak retak dan momen lentur yang dapat ditahan oleh penampang yang retak (Vis, 1993:50).

Tabel 2.14.

Presentase Tulangan Minimum ρ_{min} yang Disyaratkan

Seluruh mutu beton	$f_y = 250$ MPa	$f_y = 400$ MPa
Balok dan umumnya	0,0056	0,0035
Alternatif	$\frac{4}{3} \cdot \rho_{an}$	$\frac{4}{3} \cdot \rho_{an}$
Pelat	0,0025	0,0018

Sumber: Vis (1993,p.51)

Di samping persyaratan tulangan minimum, dengan mempertahankan rasio tulangan yang lebih rendah dari ρ_{maks} akan menghasilkan struktur dengan kapasitas deformasi yang cukup.

Pada Tabel 2.15. diberikan harga ρ_{maks} untuk seluruh kombinasi mutu beton dan baja.

Tabel 2.15.

Presentase Tulangan Maksimum ρ_{maks}

f_y MPa (kg/cm^2)	f'_c MPa (kg/cm^2)				
	15 (150)	20 (200)	25 (250)	30 (300)	35 (350)
240 (2400)	0,0242	0,0323	0,0404	0,0484	0,0538
400 (4000)	0,0122	0,0163	0,0203	0,0244	0,0271

Sumber: Vis (1993,p.52)

2.15.6. Luas Tulangan Perlu (A_s Total)

Luas tulangan perlu dihitung untuk mendapatkan luasan tulangan yang diperlukan oleh konstruksi tersebut. Perhitungan luas tulangan perlu dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$A_{s_{total}} = \rho \cdot b \cdot d \quad (2-35)$$

dengan:

$$A_{s_{total}} = \text{luas tulangan perlu (mm}^2\text{)}$$

ρ = rasio tulangan

b = panjang per satuan lebar (mm)

d = tebal efektif plat (mm)

2.15.7. Tulangan Pokok dan Tulangan Pembagi

Dalam pemilihan diameter tulangan dan jumlah tulangan harus sesuai dengan batas minimum luas tulangan perlu. Luas tulangan yang telah dipilih harus lebih dari luas tulangan perlu pada perhitungan sebelumnya, dengan perbandingan sebagai berikut:

$$A_{S_{total}} < A_s \quad (2-36)$$

Sesuai dengan SKSNI T-15-1991-03 dijelaskan bahwa luas penampang tulangan pokok harus lebih besar dari tulangan baja untuk susut dan suhu. Dengan melihat rasio tulangan minimum, maka dapat dihitung tulangan minimum menggunakan persamaan:

$$A_{S_{min}} = \rho_{min} \cdot b \cdot d \quad (2-37)$$

Apabila persyaratan luas tulangan telah terpenuhi maka diameter tulangan dan jumlah tulangan dapat digunakan dalam perencanaan.

Sesuai dengan SKSNI T-15-1991-03 Pasal 3.16.12. dalam arah tegak lurus terhadap tulangan utama harus disediakan tulangan pembagi (demi tegangan suhu dan susut) (Vis, 1993:78).

$$\text{Untuk } f_y = 240 \text{ Mpa} : A_s = \frac{0,25 \cdot b \cdot h}{100} \quad (2-38)$$

$$\text{Untuk } f_y = 400 \text{ Mpa} : A_s = \frac{0,18 \cdot b \cdot h}{100} \quad (2-39)$$

2.16. Analisa Biaya Konstruksi

Biaya suatu proyek konstruksi dapat dibagi menjadi 2 (dua) kelompok biaya yaitu sebagai berikut (Nugraha, Natan dan Sutjipto. 1985,p.65) :

1. Biaya Langsung (*Direct Cost*)

Biaya langsung adalah biaya yang langsung berhubungan dengan konstruksi / bangunan, yaitu:

- a. Bahan / material konstruksi.
- b. Upah buruh / *man power*.
- c. Biaya peralatan / *equitments*.

2. Biaya Tidak Langsung (*Indirect Cost*)

Biaya tidak langsung adalah biaya yang tidak secara langsung berhubungan dengan konstruksi / bangunan tetapi ada, dan tidak dapat dilepaskan dari proyek, yaitu :

- a. Kemungkinan terhadap hal yang tidak terduga (*contingencies*) dari biaya langsung. Pada umumnya besarnya urang lebih 5 – 10 %.
- b. *Overhead*
- c. Keuntungan / *profit*

Dalam kajian ini, hanya menganalisa biaya langsung dari pekerjaan konstruksi perbaikan pondasi bendungan dengan metode *concrete cut off wall* dan grouting. Biaya langsung didapat dengan mengalikan volume / kuantitas satu pos pekerjaan dengan harga satuan (*unit cost*) dan koefisien dari pekerjaan konstruksi. Harga satuan dari konstruksi perbaikan pondasi bendungan dengan metode *concrete cut off wall* dan grouting antara lain:

- Upah Buruh

Banyaknya tenaga kerja yang dibutuhkan untuk mengerjakan konstruksi dengan mempertimbangkan adanya tenaga ahli dan tenaga kerja biasa serta waktu yang dibutuhkan untuk penyelesaian konstruksi.

- Harga Bahan / Material Konstruksi

Banyak dan jenis material yang digunakan untuk konstruksi antara lain :

- Semen portland
- Agregat kasar dan halus
- Pasir
- Bentonite, dll.

- Biaya Peralatan

Macam – macam alat yang digunakan untuk konstruksi mulai dari awal sampai akhir pelaksanaan konstruksi antara alain : Peralatan BW drill system, peralatan cadangan, bahan bakar dll.

Pada akhirnya akan didapatkan total biaya yang dibutuhkan untuk pelaksanaan konstruksi dari perbaikan pondasi bendungan dengan metode *concrete cut off wall* dan grouting pada Bendungan Tugu.