

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bendungan Urugan

Bendungan urugan dibangun dengan cara menimbunkan bahan-bahan seperti: batu, krakal, kerikil, pasir dan tanah pada komposisi tertentu dengan fungsi untuk menaikkan tinggi permukaan air yang terdapat di dalam waduk. Berdasarkan ukuran butiran dari bahan timbunan yang digunakan, terdapat 2 tipe bendungan urugan, yaitu:

- a. Bendungan urugan batu (*rock fill dam*) atau disebut “Bendungan batu”
- b. Bendungan urugan tanah (*earth fill dam*) atau disebut “Bendungan tanah”

Selain kedua jenis tersebut, terdapat bendungan urugan campuran yang terdiri dari timbunan batu pada bagian hilir berfungsi sebagai penyangga, sedangkan pada bagian hulu terdiri dari timbunan tanah berfungsi sebagai penyangga tambahan dan sebagai tirai kedap air (Suyono dan Kensaku, 1977).

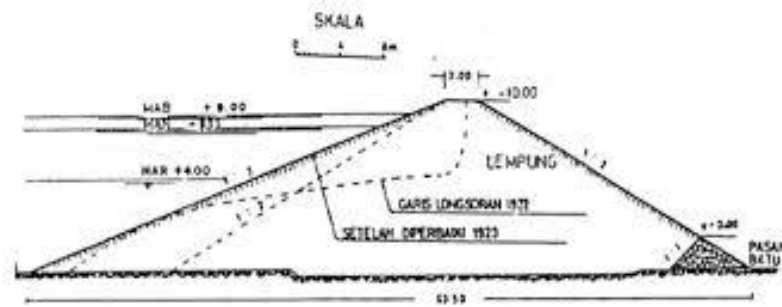
Penentuan tipe bendungan urugan ditentukan oleh faktor kualitas dan kuantitas bahan tubuh bendungan di sekitar calon bendungan, proses pengerjaan material timbunan bendungan, kondisi geologi lapisan pondasi bendungan, kondisi alur sungai, faktor klimatologi dan hidrologi pada lokasi bendungan.

2.1.1 Klasifikasi Bendungan Urugan

Berdasarkan fungsi bendungan sebagai pengangkat permukaan air di dalam suatu waduk, maka dapat dikatakan tubuh bendungan berfungsi sebagai penahan rembesan air ke arah hilir. Susunan bahan pembentuk tubuh bendungan disesuaikan dengan fungsi bendungan, maka terdapat 3 (tiga) tipe utama, yaitu:

- A. Bendungan Urugan Homogen (Bendungan Homogen)

Bendungan Homogen seperti Gambar 2.1 memiliki bahan pembentuk tubuh bendungan yang sejenis dan gradasi (susunan ukuran butiran) hampir seragam sebanyak 80%. Bendungan ini dapat menjadi bangunan penyangga dan juga bangunan penahan akibat rembesan air.



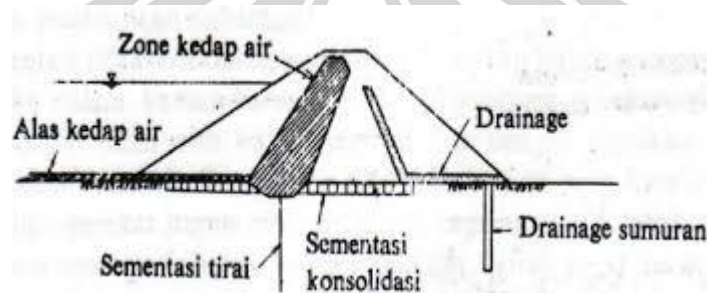
Gambar 2. 1 Bendungan Homogen
(Indradi, 2013)

B. Bendungan Urugan Zonal (Bendungan Zonal)

Menurut Suyono dan Kensaku (1977). Bendungan zonal memiliki bahan pembentuk tubuh bendungan yang terdiri dari batuan dengan gradasi yang berbeda dalam urutan pelapisan tertentu. Perbedaan batuan gradasi pada bendungan urugan terdiri dari 3 (tiga) bentuk tubuh bendungan, antara lain:

B.1 Bendungan Tirai

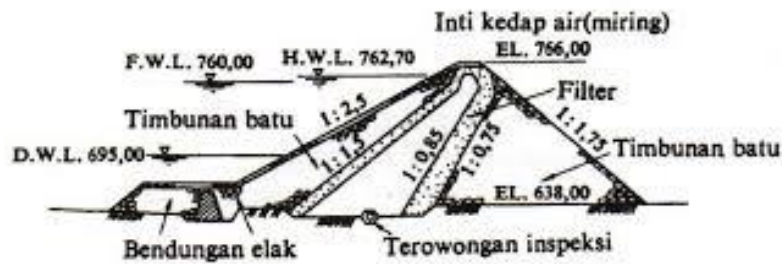
Bendungan tirai seperti Gambar 2.2 memiliki bahan pembentuk tubuh bendungan yang terdiri dari bahan yang lolos air, dan dilengkapi dengan tirai kedap air yang membentuk lereng udik bendungan.



Gambar 2. 2 Bendungan Tirai
(pengairan.ub.ac.id)

B.2 Bendungan Inti Miring

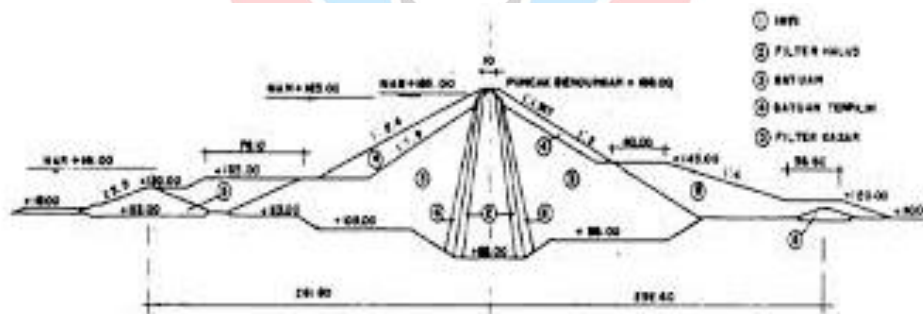
Bendungan inti miring seperti Gambar 2.3 memiliki bahan pembentuk tubuh bendungan yang terdiri dari bahan yang lolos air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan miring ke hilir.



Gambar 2. 3 Bendungan Inti Miring
(eprints.umm.ac.id)

B.3 Bendungan Inti Vertikal

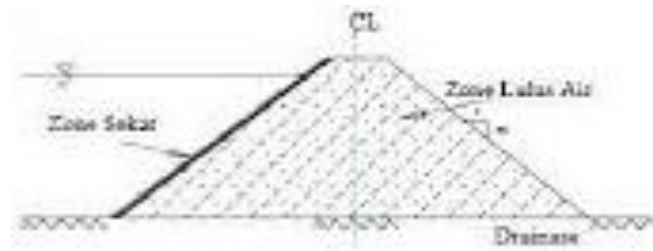
Bendungan inti vertikal atau inti tegak seperti Gambar 2.4 memiliki bahan pembentuk tubuh bendungan yang terdiri dari bahan yang lolos air, tetapi dilengkapi dengan inti kedap air yang berkedudukan vertikal.



Gambar 2. 4 Bendungan Inti Tegak
(Indradi, 2013)

C. Bendungan Urugan Bersekat (Bendungan Sekat)

Bendungan sekat (*facing*) seperti Gambar 2.5 memiliki bahan pembentuk tubuh bendungan yang terdiri dari bahan yang lolos air, tetapi dilengkapi dengan dinding tidak lolos air di lereng hulu bendungan yang terbuat dari lembaran baja tahan karat, lembaran beton bertulang, aspal beton, lembaran plastik, susunan beton blok dan lain-lain (Suyono dan Kensaku, 1977).



Gambar 2. 5 Bendungan Sekat
(Indradi, 2013)

2.1.2 Kelebihan dan Kekurangan Bendungan Urugan

Berdasarkan buku Suyono dan Kensaku (1977), bendungan tipe urugan memiliki keistimewaan dan kelemahan, berikut beberapa karakteristik bendungan adalah sebagai berikut:

Kelebihan bendungan tipe urugan yaitu:

- a. Bendungan dapat dibangun pada hampir semua kondisi geologi dan geografi.
- b. Bahan untuk tubuh bendungan menggunakan bahan batuan yang terdapat di sekitar calon bendungan.
- c. Beban utama yang didukung pondasi bendungan per satuan unit luas tergolong kecil.

Sedangkan kekurangan bendungan tipe urugan yaitu:

- a. Longsoran dapat terjadi baik pada lereng udik (hulu) maupun lereng hilir tubuh bendungan.
- b. Terjadi sufosi (erosi dalam atau *piping*) akibat gaya pada aliran filtrasi yang terjadi di dalam tubuh bendungan.
- c. Proses pelaksanaan pembangunan atau penimbunan tubuh bendungan sangat tergantung pada kondisi cuaca, dimana kelembaban optimum perlu dipertahankan.
- d. Bendungan tidak mampu menahan limpasan di atas mercunya, akibatnya limpasan tersebut mengakibatkan longsoran pada lereng hilir yang dapat mengakibatkan jebolnya bendungan.

2.2 Klasifikasi Material Timbunan Bendungan

Menurut Suyono dan Kensaku (1977), bahan atau material pada bendungan urugan merupakan material batu atau tanah yang berasal dari sekitar tempat kedudukan calon bendungan dan tipe dari bendungan biasanya tergantung dari jenis kualitas serta kuantitas material yang tersedia. Secara umum bendungan urugan biasanya membutuhkan bahan yang digunakan untuk zona peralihan dan zona lolos air, pembagian bahan dapat dikelompokkan sebagai berikut:

2.2.1 Bahan untuk Zona Kedap Air

Bahan-bahan kedap air merupakan bahan yang pasti diperlukan dalam pembangunan bendungan urugan. Persyaratan utama untuk bahan kedap air yaitu:

- A. Koefisien filtrasi (K) yang digunakan tidak melebihi nilai 1×10^{-5} cm/dt, dengan bahan yang melalui saringan No 300.
- B. Kekuatan geser suatu bahan ditentukan oleh daya kohesi (C) dan sudut geser dalam (Q), pada umumnya digunakan bahan dengan harga $D = 95 - 98$ untuk penimbunan tubuh bendungan.
- C. Kondisi kelembaban juga berpengaruh pada saat penimbunan, kondisi cuaca menjadi faktor utama yang mempengaruhi waktu penimbunan.
- D. Zat-zat organik pada bahan tidak boleh melebihi 5%.

2.2.2 Bahan untuk Zona Filter dan Zona Transisi

Zona timbunan tanah dan zona timbunan batu pada tubuh bendungan, biasanya dipisah dengan zona peralihan. Zona yang tipis disebut lapisan filter dan zona tebal disebut zona transisi. Bahan pasir dan kerikil digunakan untuk lapisan filter atau transisi supaya memiliki kekuatan geser dan kemampuan lolos air yang memadai. Spesifikasi zona transisi dapat dikelompokkan berdasarkan uji kompresi tri-sumbu dalam skala yang besar (Suyono dan Kensaku, 1977). Bahan filter menggunakan bahan dengan koefisien rembesan antara 20 sampai 100 kali lebih besar dari nilai koefisien bahan tubuh bendungan. Untuk mengetahui nilai koefisien rembesan untuk bahan filter menggunakan Tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Ukuran butiran dan koefisien filtrasi
(Desain Pondasi dan Tubuh Bendungan, 1999)

20% yang tertinggal pada saringan (mm)	Koefisien filtrasi (cm/det)	Klasifikasi
0,005	$3,0 \times 10^{-6}$	Lempung
0,01	$1,0 \times 10^{-5}$	
0,02	$4,0 \times 10^{-5}$	Lanau
0,03	$8,5 \times 10^{-5}$	
0,04	$1,8 \times 10^{-4}$	
0,05	$2,8 \times 10^{-4}$	
0,06	$4,6 \times 10^{-4}$	
0,07	$6,5 \times 10^{-4}$	Pasir halus
0,08	$9,0 \times 10^{-4}$	
0,09	$1,4 \times 10^{-3}$	
0,10	$1,8 \times 10^{-3}$	
0,12	$2,6 \times 10^{-3}$	
0,14	$3,8 \times 10^{-3}$	
0,16	$5,1 \times 10^{-3}$	
0,18	$6,9 \times 10^{-3}$	
0,20	$8,9 \times 10^{-3}$	
0,25	$1,4 \times 10^{-2}$	
0,30	$2,2 \times 10^{-2}$	Pasir sedang
0,35	$3,2 \times 10^{-2}$	
0,40	$4,5 \times 10^{-2}$	
0,45	$5,8 \times 10^{-2}$	
0,50	$7,5 \times 10^{-2}$	
0,60	$1,1 \times 10^{-1}$	Pasir
0,70	$1,6 \times 10^{-1}$	
0,80	$2,2 \times 10^{-1}$	
0,90	$2,8 \times 10^{-1}$	
1,00	$3,6 \times 10^{-1}$	
2,00	$1,1 \times 10^0$	Kerikil

2.2.3 Bahan Batu

Bendungan urugan sebagian besar terdiri dari timbunan batu berdiameter rata-rata 10 – 75 cm disebut bendungan batu. Pesyaratan bahan batu yang digunakan adalah sebagai berikut:

- A. Ukuran diameter batu antara 45 – 60 cm dengan berat 250 – 500 kg
- B. Batu yang berdiameter < 10 cm tidak diperkenankan melebihi 5% komposisi
- C. Bahan batu tidak mudah pecah
- D. Berat jenis tidak kurang dari 2,5
- E. Kekuatan tegangan tekan batu tidak kurang dari 700 kg/cm².

- F. Daya tahan terhadap pelapukan tinggi (pada pengujian dengan cairan Na_2SO_4 , penyusutan tidak melebihi 0,015%)

2.2.4 Bahan-bahan lainnya

Bahan lainnya merupakan bahan dengan kualitas lebih rendah yang digunakan pada penimbunan zona sembarangan (zona random), yaitu seperti:

- A. Bahan batu yang lunak dan mudah lapuk
- B. Bahan hasil galian pondasi zona kedap air atau pondasi
- C. Bahan hasil galian jalan masuk
- D. Bahan yang tidak memiliki karakteristik seragam

Zona sembarang difungsikan untuk mempertahankan kestabilan tubuh bendungan dan menopang beban pada tingkat tertentu.

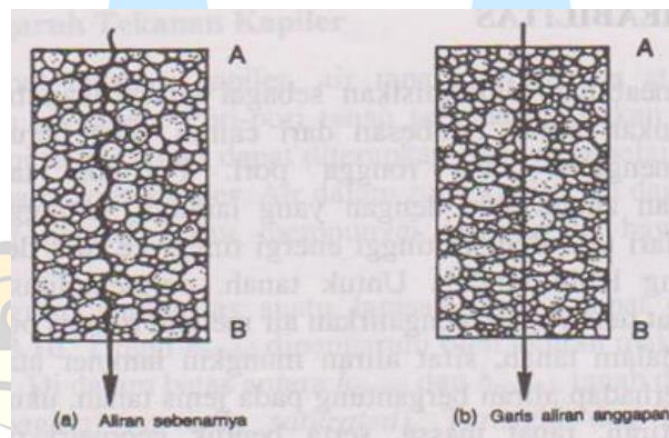
Karakteristik teknis material timbunan dan penyusun pada bendungan berdasarkan metode bendungan Nakasato dengan kategori kepadatan dan kekuatan geser tanah. Syarat ini didasarkan pada analisa dan perhitungan rencana terhadap gaya-gaya yang bekerja pada tubuh bendungan, stabilitas lereng calon bendungan, dan stabilitas calon tubuh bendungan terhadap gaya yang timbul karena adanya aliran filtrasi pada tubuh bendungan. Karakteristik material terdapat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Karakteristik teknis bendungan berdasarkan Bendungan Nakasato (Suyono dan Kensaku, 1977)

Zona	Karakteristik bahan	Kepadatan					Permeabilitas	Kekuatan geser				Catatan	
		Harga D standard untuk perencanaan-teknis						Koefisien filtrasi (cm/dt)	Metode kekuatan seluruhnya		Metode kekuatan efektif		
		Kepadatan kering (g/cm ³)	Kepadatan basah (g/cm ³)	Berat jenuh (g/cm ³)	Berat jenis jenuh (g/cm ³)	Angka kadar kelembaban untuk bahan penimbunan (%)			C _u	Ø _u	C'		Ø'
Zona kedap air (1)		1,86	2,09	2,11	1,11	Optimum +2 ~ Optimum	5×10^{-6}	6,0	19°	5,6	29°	Kepadatan untuk P= 40, D = 95	
Zona kedap air (2)		1,86	2,09	2,11	1,11	Optimum +1 ~ Optimum -2	5×10^{-5}	3,0	25°	3,0	32°		
Zona sembarangan (1)		1,86	2,09	2,11	1,11	Optimum ~ Optimum -2	5×10^{-4}	3,0	32°	3,0	32°		
Zona sembarangan (2)	Terutama terdiri dari tanah asli		1,80	1,90	0,90	Sekitar angka optimum	1×10^{-4}	1,0	25°	0	32°	Untuk harga D = 95	
Zona timbunan batu dan hampan pelindung	Tempat pengalihan batu		1,80	2,10	1,10	Penyiraman disesuaikan kondisi tertentu	1×10^{-2}	0	35°	0	35°	Untuk harga e = 0,4 ~ 0,5	
Drainage filter	Kerikil dasar sungai batuan lunak		2,00	2,20	1,20	Kondisi kering	5×10^{-3}	0	30°	0	30°	Untuk harga kepadatan relatif 40	
Alas kedap air	Lapisan permukaan tanah		1,80	1,90	0,90	Kondisi basah	5×10^{-6}					Alas kedap air penutup lereng dapat dianggap sebagai tirai kedap air	

2.3 Permeabilitas

Permeabilitas merupakan kemampuan bahan berpori untuk meloloskan aliran (rembesan) dari fluida (air/minyak) melalui rongga atau pori-pori. Jenis tanah yang memiliki kemampuan meloloskan fluida disebut “permeable” dan jenis tanah yang tidak mampu meloloskan aliran fluida disebut “impermeable”. Sedangkan tanah yang mempunyai sifat permeabilitas sangat kecil yang disebut “semi-permeable”. Air yang mengalir melalui pori memiliki pola aliran dari titik dengan energi tinggi ke titik dengan energi rendah. Hal tersebut digambarkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Bentuk Aliran Vertikal Tanah
(Darwis, 2018)

Pada kondisi lapangan partikel air akan bergerak dari ketinggian A menuju ketinggian B mengikuti lintasan yang berkelok-kelok, dengan mengikuti geometrik rongga/pori yang ada di dalam tanah seperti pada gambar 2.6 (a). Kecepatan aliran juga sangat bervariasi tergantung ukuran dan konfigurasi rongga/pori dalam tanah. Berdasarkan teori/rekayasa, tanah diasumsikan menjadi satu kesatuan sehingga aliran air dianggap lurus seperti pada gambar 2.6 (b), dengan kecepatan yang seragam per satuan jarak tempuh aliran. Hal tersebut dilakukan untuk memudahkan membuat perumusan model aliran dengan bentuk aliran yang sederhana (Darwis, 2018).

Berdasarkan Pedoman Pengendalian Rembesan pada Bendungan Urugan, permeabilitas dapat dibagi berdasarkan pola aliran air yaitu permeabilitas primer berhubungan dengan aliran air yang melalui struktur butiran tanah, sedangkan permeabilitas sekunder berhubungan dengan aliran air yang melewati rekahan pada tanah. Umumnya, permeabilitas primer tidak digunakan pada fondasi yang

mengandung banyak rekahan. Nilai permeabilitas digunakan untuk mengetahui besar aliran atau kecepatan aliran. Beberapa cara yang dilakukan untuk menentukan permeabilitas tanah antara lain:

2.3.1 Perkiraan Permeabilitas

Koefisien permeabilitas tanah pondasi diperkirakan berdasarkan data geoteknik di sekitar lokasi calon bendung yang telah terpublikasi, walaupun tidak dilengkapi dengan data uji permeabilitas. Sumber data tersebut dapat digunakan sebagai studi penelitian atau desain final jika masalah rembesan tidak kritis. Jika rembesan air dianggap kritis maka harus dilakukan penyelidikan tambahan yang lebih rinci.

2.3.2 Data Permeabilitas Tahap Desain atau Konstruksi

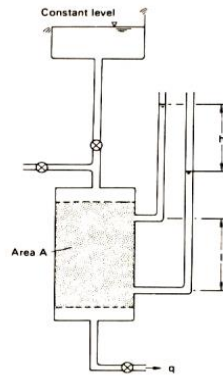
Data permeabilitas yang diperoleh pada tahap desain atau konstruksi, memiliki tingkat ketelitian yang dipengaruhi oleh jumlah pengujian lapang. Data ini merupakan sumber data awal yang digunakan untuk mempelajari rembesan air di dalam bendungan, mencakup data pengujian sebagai berikut:

- A. Uji permeabilitas lapangan dari laporan penyelidikan geoteknik
- B. Uji permeabilitas di laboratorium
- C. Uji gradasi material

2.3.3 Data Permeabilitas Hasil Uji Laboratorium

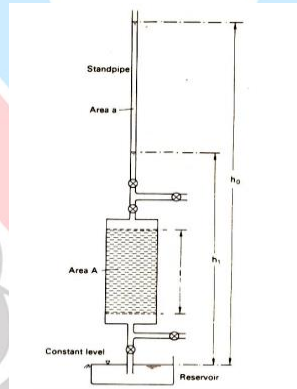
Data yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium berupa sampel tanah tidak terganggu (*undisturbed samples*) dari tanah pondasi dan material urugan (*disturbed samples*). Uji permeabilitas ini dilakukan untuk mengetahui sifat permeabilitas dari bahan urugan berbutir halus dan bahan selimut kedap air. dalam pengujian dibuat variasi gradien hidraulik untuk mempersingkat waktu pengujian. Beberapa metode uji permeabilitas berdasarkan Panduan Perencanaan Bendungan Urugan (1999) yaitu:

- A. Metode pengujian laboratorium tentang kelulusan air bertekanan tetap (*constant head*) seperti pada Gambar 2.7 pada pedoman SNI 03-2435-1991



Gambar 2. 7 Uji *Constant Head*
(simantu.pu.go.id, 2021)

- B. Metode pengujian laboratorium tentang kelulusan air dengan tekanan yang menurun (*falling head*) seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Uji *Falling Head*
(simantu.pu.go.id, 2021)

- C. Metode pengujian laboratorium analisis kelulusan air dengan tekanan yang menurun dengan pedoman SNI 03-3423-1994.
D. Kurva pembagian butiran tanag dengan rumus empiris Hazen.

2.3.4 Data Permeabilitas Hasil Uji Lapangan

Data permeabilitas material pondasi yang paling akurat dapat diperoleh dari hasil pengujian lapangan dengan metode uji sebagai berikut:

- A. Metode pengujian lapangan tentang kelulusan air bertekanan dengan pedoman SNI 03-2441-1991
- B. Uji pemompaan dalam lubang bor
- C. Uji infiltrasi dalam sumur dangkal
- D. Uji kelulusan air dengan alat *permeameter* cincin

2.3.5 Data Pengamatan Fluktuasi Muka Air Tanah

Data pengamatan fluktuasi muka air tanah dapat didapatkan dari hasil pengujian pada sumuran ponsai atau pengamatan volume air yang masuk dan keluar dari sumuran.

2.3.6 Data Hasil Analisis

Data hasil analisis balik (*back analyses*) diperoleh dari hasil pengujian analisis numerik. Analisis ini dilakukan dengan *trial and error* terhadap besar koefisien permeabilitas material, sehingga menghasilkan kondisi yang sama dengan hasil pengamatan pisometer di lapang.

2.4 Rembesan

Rembesan adalah aliran air di dalam tanah yang bergerak secara horizontal. Menurut Barenblatt et al (1960), teori rembesan modern didasarkan pada konsep media berpori yang terdiri dari butiran keping air yang dipisahkan oleh ruang pori. Tetapi berdasarkan hasil perbandingan antara hasil perhitungan teoritis dengan hasil penyelidikan laboratorium terdapat aliran non-steady, sehingga disimpulkan bahwa konsep media berpori tidak memadai untuk menjelaskan tentang rembesan yang cukup kompleks (Darwis, 2018).

Air pada keadaan statis di dalam tanah akan mengakibatkan tekanan hidrostatis yang arahnya ke atas (*uplift*). Akan tetapi, jika aliran air melewati lapisan tanah, aliran air akan mendesak partikel tanah sebesar tekanan rembesan hidrodinamis yang bekerja sesuai arah alirannya. Besar tekanan rembesan dipengaruhi oleh *gradient* hidrolik (i).

2.4.1 Analisis Rembesan

Analisis rembesan dilakukan untuk memperkirakan besar debit rembesan pada tubuh dan pondasi bendungan. Kondisi muka air yang umum digunakan sebagai faktor pembebanan pada analisis rembesan, antara lain:

- a. Elevasi muka air maksimum atau muka air banjir PMF harus digunakan untuk mengetahui gradient keluaran dan tekanan angkat pada pondasi bendungan.
- b. Elevasi muka air normal harus digunakan untuk mengetahui debit rembesan dan garis freatik pada kondisi aliran langgeng (*steady seepage*).
- c. Elevasi muka air waduk minimum atau muka air konservasi tidak aktif atau dapat dikatakan kosong, digunakan untuk mengetahui retak susut pada tubuh bendungan dalam kurun waktu yang lama.
- d. Elevasi muka air buri (*tail water*) rata-rata digunakan pada analisis aliran langgeng.

Pemilihan analisis rembesan air ditentukan dengan hati-hati dan disesuaikan pengalaman tenaga ahli dalam bidang bendungan. Metode penentuan analisis rembesan yang disyaratkan berada pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Metode Analisis Rembesan Air
(Pedoman Pengendali Rembesan, 2005)

No	Situasi	Penyelidikan khusus	Contoh Metode
1	Urugan homogen dengan fondasi kedap air, aliran langgeng 2D	<ul style="list-style-type: none"> • Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) 	Grafis atau garik freatik
2	Urugan zonal dengan fondasi kedap air, aliran langgeng 2D	<ul style="list-style-type: none"> • Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) 	Jaring alir
3	Urugan homogen dengan pondasi porous yang seragam, aliran langgeng 2D	<ul style="list-style-type: none"> • Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) • Gradien keluaran dan debit rembesan • Alternatif sitem pengendalian dan variasi parameter material 	Jaring alir
4	Urugan zonal dengan fondasi porous, aliran langgeng 2D	<ul style="list-style-type: none"> • Garis freatik, tekanan air pori, gaya perembesan air (stabilitas) • Gradien keluaran dan debit rembesan • Alternatif sitem pengendalian dan variasi parameter material 	Model numerik (SEEP2D, PC-SHEEP, SEEP/W, PLAXIS, dll)

5	Aliran transien 2D, kondisi batas tetap	<ul style="list-style-type: none"> • Proses penjumlahan dan waktu sampai terjadi aliran tetap 	Model numerik (SEEP2D, PC-SHEEP, SEEP/W, PLAXIS, dll)
6	Situasi termasuk aliran 2D tidak langgeng, jenuh-tidak jenuh, urugan zonal dan homogeny, pondasi heteerogen, kondisi batas transien	<ul style="list-style-type: none"> • Pengisian pertama, operasi waduk, perubahan kadar air dan tekanan air pori, pengatuh presipitasi dan evaporasi 	Model numerik (SEEP2D, PC-SHEEP, SEEP/W, PLAXIS, dll)

Metode yang digunakan pada analisis rembesan terdiri atas:

A. Metode Numerik

Metode numerik yang digunakan untuk menganalisa rembesan memiliki keunggulan yaitu:

- a. Masalah yang sulit dibentuk dalam model dengan mudah
- b. Tidak perlu adanya perubahan dimensi bendungan
- c. Hasil luaran digambarkan sebagai garis ekipotensial dan tekanan air pori pada setiap titik tinjau.
- d. Variasi parameter tanah dapat diubah dengan mudah

Salah satu program komputer yang digunakan yaitu program PC-SEEP/SEEP-W dari Geo-Slope Programming LTD 1987. PC-SHEEP/SEEP-W merupakan perangkat lunak berbasis DOS yang digunakan dalam analisis rembesan dengan memuat model gerakan aliran air dua dimensi yang melalui media berpori. Program ini digunakan untuk menghitung parameter debit rembesan, tekanan air pori, tekanan angkat, kecepatan aliran, arah aliran, gradient hidraulik dan volume aliran.

B. Metode Persamaan dan Grafis

Metode persamaan dan grafis digunakan dalam analisis pendahuluan untuk memperkirakan biaya dan jika diterima digunakan dalam desain sistem pengendalian rembesan. Metode ini menggunakan Hukum Darcy sebagai analisa debit dan gaya rembesan.

C. Metode Grafis

Metode garis greatik digunakan dalam kondisi aliran langgung, dengan fungsi memperkirakan tekanan air dalam analisis stabilitas lereng bendungan, acuan posisi penempatan pisometer dan pembanding data yang terbaca oleh instrumen.

D. Metode Jaring Alir

Metode jaring alir dilakukan dengan menggambar tinggi potensial hidraulik dan arah aliran 2 dimensi pada aliran langgeng jenuh air, dengan fungsi memperkirakan tekanan air pori, gradient hidraulik dan debit rembesan.

E. Metode Tahanan Listrik

Metode tahanan listrik digunakan dengan hukum Ohm. Dimana material tanah disesuaikan dengan tahanan listrik yang dialiri arus listrik, metode ini untuk mengetahui tinggi tekanan air yang terukur oleh voltase.

2.4.2 Nilai Rembesan Izin

Toleransi terhadap rembesan yang melalui bendungan dapat dilihat berdasarkan tinggi bendungan dan nilai rembesan yang terjadi pada tubuh bendung. Nilai rembesan yang diizinkan yaitu pada Tabel 2.4 (Huda, 2019).

Tabel 2. 4 Kriteria Penerimaan Rembesan pada Tubuh Bendungan (Huda, 2019)

Tinggi bendungan (m)	Rembesan (ltr/det)	
	Aman	Tidak Aman
<5	< 0.05	>0.075
5-10	< 0.075	>0.175
10-20	< 0.175	>0.35
20-40	< 0.35	>0.70
>40	< 0.70	>1.40

2.5 Penyebab Kegagalan Bendungan Akibat Rembesan

Berdasarkan peristiwa keruntuhan bendungan lebih dari sepertiga kejadian diakibatkan oleh rembesan air melalui pondasi atau tubuh bendungan. Rembesan merupakan hal yang wajar pada bendungan tanah dan umumnya tidak menimbulkan masalah. Namun rembesan yang tidak terkontrol menyebabkan erosi pada timbunan atau pada pondasi yang mengakibatkan aliran buluh. Erosi buluh

merupakan erosi yang berkembang pada bendungan. Hal tersebut diawali dari titik pusat rembesan yang mempunyai beda tinggi tekanan yang cukup besar sehingga mampu menimbulkan kecepatan yang menyebabkan erosi (Panduan Perencanaan Bendungan Urugan, 1999).

Apabila gaya yang menahan rembesan seperti kohesi, pengaruh saling mengunci (*interlockin*), berat partikel tanahm pengaruh filter di hilir dan lainnya lebih kecil dari pada gaya erosi maka partikel tanah dapat hanyut dan menimbulkan aliran buluh. Keruntuhan akibat rembesan berdasarkan Panduan Perencanaan Bendungan Urugan (1999), dapat disebabkan oleh:

2.5.1 Pondasi Lolos Air

Lensa-lensa pasir atau kerikil yang berlapis-lapis, dengan permeabilitas yang tinggi atau rongga dan celah-celah dapat menimbulkan konsentrasi aliran air dari waduk yang menyebabkan erosi buluh. Penyebab kegagalan akibat rembesan lainnya adalah adanya saluran yang tertimbun dibawah bendungan.

2.5.2 Rembesan Melalui Timbunan

Rembesan atau bocoran pada timbunan umumnya disebabkan oleh:

- A. Pengawasan pelaksanaan pekerja yang lemah, dimana pemadatan tidak dilakukan dengan sempurna.
- B. Retakan yang terjadi pada timbunan atau pipa pengeluaran yang diakibatkan oleh penurunan pondasi.
- C. Lubang yang iakibatkan oleh aktivitas binatang.
- D. Pengkerutan dan retak akibat pengeringan.
- E. Adanya akar-akar, kantong-kantong kerikil atau batuan pada timbunan.
- F. Kemungkinan urugan tidak homogeny.

2.5.3 Rembesan pada Pipa Pengeluaran (*Conduit*)

Pipa pengeluaran melalui tubuh bendungan menjadi salah satu penyebab timbulnya rembesan, dan dari statistic hamper seperdelapan dari seluruh kegagalan bendungan disebabkan oleh bocoran ini. Terdapat dua jenis kegagalan yang terjadi yaitu:

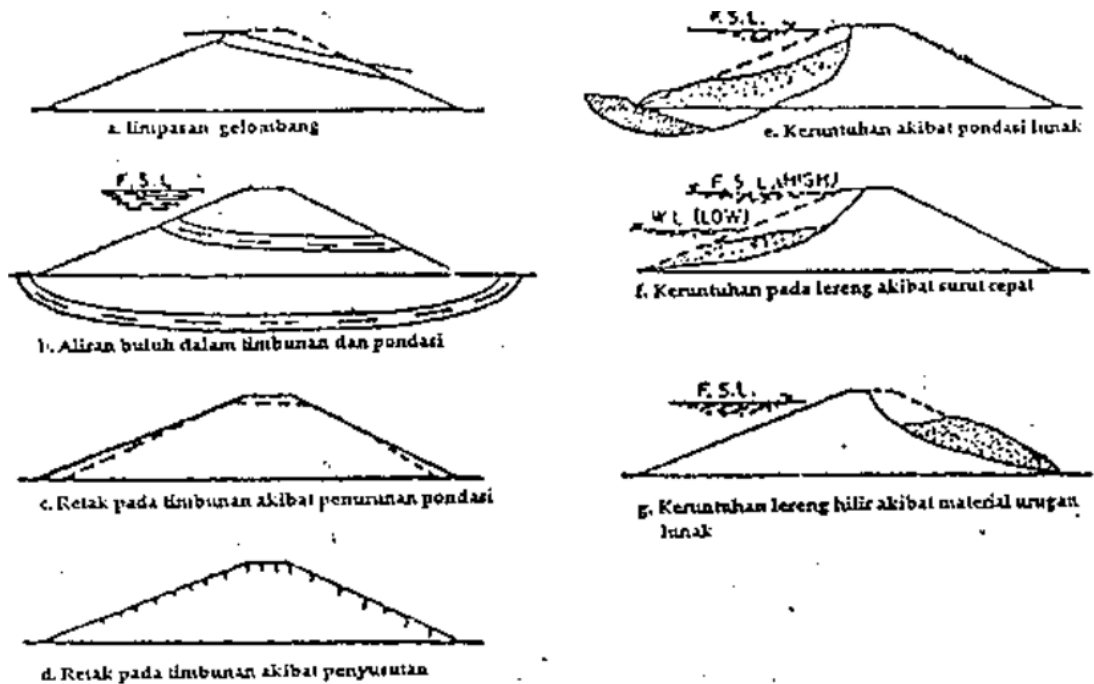
- A. Rembesan melalui sepanjang bidang kontak pipa pengeluaran bagian luar dan berkembang menjadi aliran buluh.
- B. Rembesan akibat bocornya pipa pengeluaran yang berkembang menjadi aliran erosi buluh.

Bidang kontak rembesan sepanjang dinding pipa pengeluaran tidak hanya disebabkan oleh pemadatan tanah yang tidak baik, tetapi juga dapat terjadi karena adanya rongga antara pipa pengeluaran dan timbunan. Rembesan melalui zona pemadatan yang tidak baik akan berkembang menjadi aliran erosi buluh. Penurunan yang berbeda atau pembebanan yang berlebihan dari timbunan akan mengakibatkan pipa retak. Oleh karena itu, disarankan untuk tidak membuat desain pipa pengeluaran di daerah timbunan.

2.5.4 Longsoran pada Tubuh Bendungan

Keruntuhan dapat terjadi akibat kejenuhan air pada bagian hilir bendungan karena tersumbatnya filter pada drainase tumit (*toe drian*) atau disebabkan lapisan kedap air ditubuh bendungan. Proses ini diawali dengan terjadinya erosi kecil terhadap material di drainase tumit bagian hilir yang mengakibatkan longsoran kecil. Kejadian ini mengakibatkan permukaan lereng menjadi relatif curam dan jenuh air oleh rembesan dari *reservoir* (waduk), sehingga akan menimbulkan longsoran lagi dengan bidang longsoran yang semakin tinggi dan permukaan yang lebih tidak stabil. Proses ini akan terus terjadi hingga bagian bendungan yang tersisa menjadi tipis untuk menahan tekanan air dan menyebabkan keruntuhan total.

Beberapa jenis keruntuhan yang dapat menyebabkan kerusakan pada bendungan urugan tanah terdiri atas keruntuhan akibat limpasan gelombang pada Gambar 2.10 (a), keruntuhan akibat aliran buluh dalam timbunan dan pondasi pada Gambar 2.10 (b), retakan pada timbunan akibat penurunan pondasi pada Gambar 2.10 (c), retak pada timbunan akibat penyusutan pada Gambar 2.10 (d), keruntuhan akibat pondasi lunak pada Gambar 2.10 (e), keruntuhan pada lereng akibat surut cepat pada Gambar 2.10 (f), dan keruntuhan lereng hilir akibat material urugan lunak pada Gambar 2.10 (g).



Gambar 2. 9 Jenis-jenis Keruntuhan Bendungan Tanah
(Panduan Perencanaan Bendungan Urugan, 1999)

2.6 Keamanan Aliran Rembesan atau Filtrasi

Keruntuhan akibat rembesan dapat dilakukan dengan membuat aliran air yang melalui tubuh bendungan dan pondasi tidak boleh terlalu besar agar tidak mengakibatkan kerusakan pada bendungan, atau tekanan air yang terjaga dapat menghindari erosi buluh. Untuk mencegah keruntuhan dapat diantisipasi dengan melakukan hal-hal sebagai berikut:

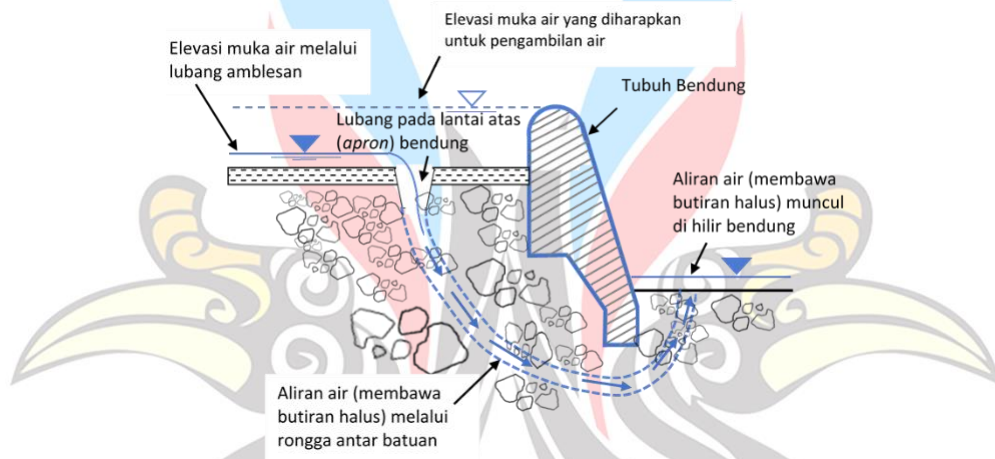
- A. Debit rembesan melalui tubuh bendungan dan pondasi harus dibatasi.
- B. Jarak antara permukaan garis rembesan dengan permukaan lereng hilir tubuh bendungan harus cukup aman untuk mencegah terjadinya longsoran.
- C. Rembesan melalui tubuh bendungan dan pondasi tidak boleh membawa butiran-butiran tanah yang menyebabkan erosi buluh.
- D. Tidak boleh ada bocoran dari permukaan bagian hulu sampai hilir.

2.7 Keamanan Bendungan terhadap Erosi Buluh (*Piping*)

Tekanan rembesan ke atas yang terjadi dalam tanah sama dengan i_c , maka tanah akan berada dalam kondisi mengapung. Pada kondisi ini akan mengakibatkan

terangkutnya butir-butir tanah halus yang menyebabkan terjadi lubang di dalam tanah atau disebut peristiwa piping. Kondisi tersebut dapat mengganggu tubuh stabilitas bendungan (Darwis, 2018).

Erosi buluh (piping) merupakan peristiwa amblesan dasar sungai yang disertai dengan keluarnya aliran air dan butir-butir tanah pada bagian hilir bendungan. Hal tersebut disebabkan meningkatnya koefisien permeabilitas dan kecepatan aliran air sehingga terjadi erosi internal, serta penurunan kekuatan geser tanah terutama pada tanah lanau dan pasir halus sehingga menyebabkan terbentuknya saluran kecil di hilir urugan. Berikut ilustrasi peristiwa erosi buluh (piping) pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 10 Sketsa Erosi Buluh (Piping) pada Dasar Bendung (clapeyronmedia.com,2020)

Faktor keamanan terhadap erosi buluh, dinyatakan sebagai nilai banding antara gradient kritis (I_c) dengan komponen vertical dari gradient keluaran. Gradient ini diperoleh dari perhitungan, pembacaan instrumen pisometer, atau analisis menggunakan *software*. Sehingga faktor keamanan (FK) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$FK = \frac{I_c}{I_e} \geq 4$$

$$I_c = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

Keterangan:

FK : faktor keamanan

- I_c : gradien keluaran kritis
- I_e : gradien keluaran dari hasil analisis
- γ : berat isi efektif (terendam) (t/m^3)
- γ_w : berat isi efektif (terendam) (t/m^3)
- G_s : berat spesifik
- e : angka pori

Nilai rata-rata G_s umumnya menggunakan berbagai perhitungan gradient keluaran, karena variasi nilai tidak jauh berbeda untuk jenis tanah yang berbeda. Sedangkan nilai e di lapangan untuk berbagai jenis tanah memiliki variasi cukup besar, sehingga dibutuhkan penaksiran yang dilakukan dengan hati-hati berdasarkan pengalaman dan pertimbangan teknis yang baik. Jika tidak ada informasi mengenai nilai berat spesifik G_s dan angka pori e , maka dapat digunakan $I_c = 1$ yang mendekati kondisi pasir kuarsa di lapangan. Faktor keamanan minimum pada desain bendungan menggunakan minimal 4 untuk mencegah terjadinya keruntuhan akibat pengaruh gradient keluaran yang berlebih. Faktor ini digunakan untuk mencegah hal-hal yang tidak terduga seperti pengaruh heterogenitas tanah, kemunduran kualitas tanah, dan kesalahan perencana dalam perencanaan desain bendungan.

2.8 Keamanan Bendungan terhadap Tekanan Angkat (*Uplift*)

Tekanan air pori umumnya terjadi pada hilir pondasi bendungan dan menimbulkan tekanan angkat tinggi yang menimbulkan pengangkatan atau peletusan (*uplift, upheavel atau blowup*). Biasanya kondisi ini terjadi apabila terdapat lapisan pondasi dengan koefisien permeabilitas tinggi di bawah tubuh bendungan. Hal ini akan memicu keruntuhan apabila tekanan angkat di bawah lapisan pondasi tak terkekang (*unconfined layer*), yang dapat meningkatkan gradient keluaran (SNI 8065:2016). Faktor keamanan terhadap tekanan angkat yang tinggi diperhitungkan dengan persamaan berikut

$$FK = \frac{\gamma_n}{\gamma_w h} = \frac{G_s t}{(1 + e)h} > 2$$

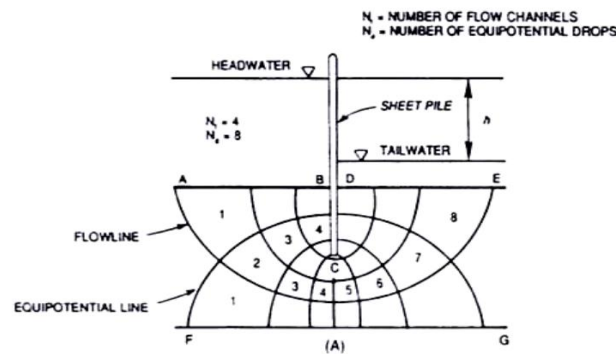
Keterangan

- γ_n : berat volume material pondai (t/m^3)

- t : tebal overburden (*total head*) (m)
h : tinggi tekanan air (*pressure head*) (m)

2.9 Pola Aliran (*Flownet*)

Flownet merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menggambar jaring aliran. Suatu *flownet* yaitu 2 garis atau kurva yang saling berpotongan saling tegak lurus yang membentuk jaring yang terdiri dari *flowline* dan *equipotensial line*. Berikut ilustrasi *flownet* pada lapisan yang porous pada Gambar 2.12.

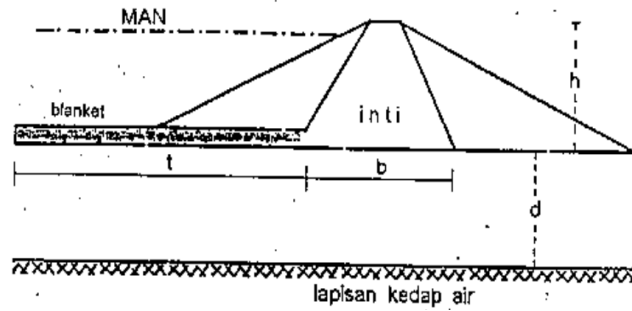


Gambar 2. 11 *Flownet* dari *sheetpiles* pada lapisan yang porous (simantu.pu.go.id, 2021)

Flownet dapat digambarkan dalam kondisi-kondisi aliran bebas dan aliran tertekan, untuk kondisi permeabilitas anisotropis, aliran *transient* dan penampang komposit, seperti pondasi yang berlapis-lapis (stratifikasi) dan bendungan jenis zonal. *Flownet* juga menggambarkan distribusi tekanan-tekanan dan arah aliran. Berdasarkan pengetahuan mengenai tekanan hidraulik dan permeabilitas pada media yang porous, *flownet* dapat memberikan informasi penting mengenai stabilitas dan debit rembesan, gradien keluaran, gaya-gaya rembesan dan tekanan-tekanan angkat yang bekerja di dasar bangunan.

2.10 *Blanket Layer*

Lapisan selimut (*blanket layer*) seperti Gambar 2.13 memiliki keuntungan yaitu penggunaan lapisan lempung kedap air pada hulu bendungan dan menyambung dengan lapisan yang kedap air (inti) menjadi cara yang baik untuk mengurangi rembesan.



Gambar 2. 12 Lapisan Kedap Air di Hulu
(Panduan Perencanaan Bendungan Urugan, 1999)

Selimut kedap air berfungsi untuk menurunkan gradient rembesan atau jumlah rembesan akibat adanya beda tinggi muka air waduk dan muka air hilir (*head*). Gradient yang tinggi sering terjadi pada potongan tebal selimut. Untuk mencegah hal ini, perlu dipasang lapisan filter yang memenuhi syarat filter di bawah selimut. Lapisan selimut harus dibuat lebih tebal di daerah sambungan dengan inti bendungan, agar tahan terhadap bahaya erosi buluh dan bobolnya bendungan, yang garis alirnya terpendek (SNI 8065:2016).

2.10.1 Panjang Selimut

Panjang selimut dapat dihitung dengan langkah berikut

- Sebelum dipasang selimut, debit q dapat dihitung:

$$q = \frac{k \cdot h \cdot d}{b}$$

- Sesudah dipasang selimut,

$$pq = \frac{k \cdot h \cdot d}{(b + l)}$$

- Panjang selimut

$$\begin{aligned} l &= \frac{k \cdot h \cdot d}{pq} - b \\ &= \frac{k \cdot h \cdot d}{pq} - \frac{k \cdot h \cdot d}{q} \\ &= \frac{k \cdot h \cdot d}{q} \left(\frac{1}{p} - 1 \right) \\ l &= b \left(\frac{1-p}{p} \right) \end{aligned}$$

Dimana:

- q : debit rembesan dalam m³/detik per meter panjang dari bendungan tanpa selimut
- l : panjang lapisan selimut hulu dalam meter
- k : koefisien permeabilitas horizontal rata-rata dari lapisan yang lolos air m/det
- h : tinggi tekan dalam meter pada selimut kedap air hulu diukur dari muka air waduk maksimum sampai dengan muka air hilir
- d : kedalaman lapisan lolos air di bawah selimut dalam meter
- p : presentase aliran di bawah bendungan tanpa selimut (dalam decimal), elevasi yang diinginkan untuk dikurangi rembesannya dengan adanya selimut-selimut tersebut. Sebagai contoh, jika rembesan akan dikurangi sampai 25% dari awal, maka p = 0,25
- b : panjang zona kedap air di dasar bendungan dalam meter

2.10.2 Tebal Selimut

Ketebalan selimut merupakan fungsi dari hubungan permeabilitas selimut, permeabilitas material pondasi dan kedalamannya. Secara teori, ketebalan selimut bervariasi dari nol bagian ujungnya sampai maksimum pada pertemuannya dengan zona kedap air bendungan. Ketebalan selimut (t) pada jarak (b) dari ujung hulu tumpukan selimut, dapat diperoleh dengan rumus:

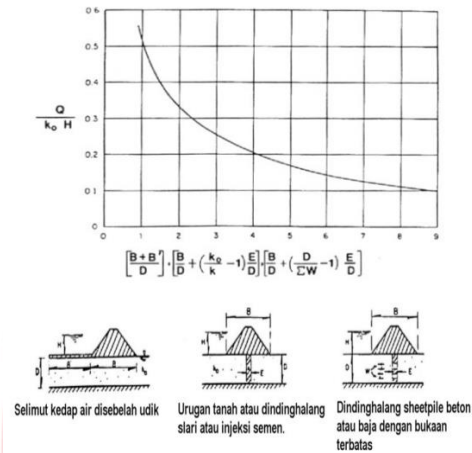
$$t = \frac{K_2}{K_1} \times b' \times \frac{b}{d}$$

Dimana:

- t : ketebalan selimut pada titik yang ditinjau
- b' : jarak dari titik yang ditinjau sampai ujung hulu selimut
- K₁: permeabilitas rata-rata lapisan
- K₂: permeabilitas selimut
- b : panjang selimut dari ujung hulu sampai dengan zona kedap air
- d : kedalaman lapisan kedap air dalam meter

2.10.3 Efektivitas Selimut

Cara memperkirakan efektivitas selimut kedap air (*blanket layer*) di udik, dengan grafik pada Gambar 2.14 berikut:



Gambar 2. 13 Efisiensi Selimut Kedap Air dan Dinding Halang (SNI 8065:2016)

2.11 Grouting

Grouting atau injeksi yaitu suatu proses pemasukan suatu cairan dengan tekanan ke dalam rongga atau pori, rekahan dan kekar pada batuan. Dimana pada waktu tertentu cairan tersebut akan menjadi padat dan keras secara fisika maupun kimiawi. Bahan *grouting* berupa campuran semen Portland (PC) dan air serta bahan tambahan dengan perbandingan tertentu atau bahan kimia (Pedoman Grouting, 2005).

2.11.1 Jenis-jenis Grouting

Berdasarkan pedoman *grouting* untuk bendungan (2005), jenis grouting pada pekerjaan sub-struktur atau pondasi bendungan utama meliputi pondasi bawah permukaan (*sub-surface foundation*) dan atas permukaan (*surface foundation*). Berikut jenis *grouting* pada bendungan meliputi:

A. *Grouting* bawah permukaan, terdiri atas:

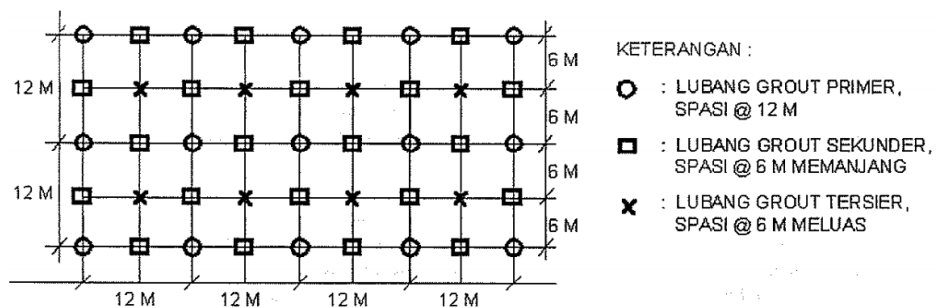
A.1 *Grouting* Tirai

Grouting tirai berfungsi sebagai penghalang (*cut off* atau *barrier*) dari rembesan air dalam pondasi bendungan yang cenderung membesar atau bocor setelah pengisian waduk. Pelaksanaan grouting dilakukan pada ruang

terbuka dengan udara bebas atau tertutup di dalam lorong *grouting* (*grouting gallery*). Waktu pelaksanaan dilakukan sesuai tipe bendungan apakah dikerjakan sebelum penimbunan atau bersamaan laju penimpunan.

A.2 *Grouting* Konsolidasi

Grouting konsolidasi digunakan untuk menutup lubang, celah dan rekahan yang ada di bawah pondasi bendungan sehingga menjadi lebih kuat dan menambah modulus deformasi batuan. Kedalaman *grouting* konsolidasi berkisar 3 hingga 15 m dengan pola lubang *grout system grid* dengan spasi 6 hingga 30 m dengan pola tipikal seperti Gambar 2.15.



Gambar 2. 14 Pola Lubang Grout Konsolidasi (Pedoman Grouting, 2005)

A.3 *Grouting Blanket* (Selimut)

Grouting blanket memiliki fungsi mereduksi gaya angkat dibawah atau di belakang struktur karena tekanan hidrostatik. Pada bendungan urugan yang berponasi pada pondasi pasir dan kerikil (*sand-gravel foundation*) dibawah *concrete pad* akan dilengkapi beberapa baris *grouting* dangkal yang berfungsi sebagai *blanket grouting*. *Grouting* dangkal memiliki kedalaman berkisar 5 - 15 m, jarak spasi lubang 5- 10 m, berpola primer-sekunder dan dilaksanakn dengan tekanan maksimum 3,5 kg/cm².

B. *Grouting* atas permukaan, terdiri atas:

B.1 *Shotcreting* (*Grouting Semprot Kasar*)

Shotcreting bertujuan untuk memperkuat bidang permukaan pondasi sehingga terjadi kontak yang baik terutama pada zona inti kedap bendungan urugan dan menambah efektifitas dari *grouting* konsolidasi sehingga tidak terjadi bocor ke permukaan. Bahan campuran yaitu semen : agregat berkisar

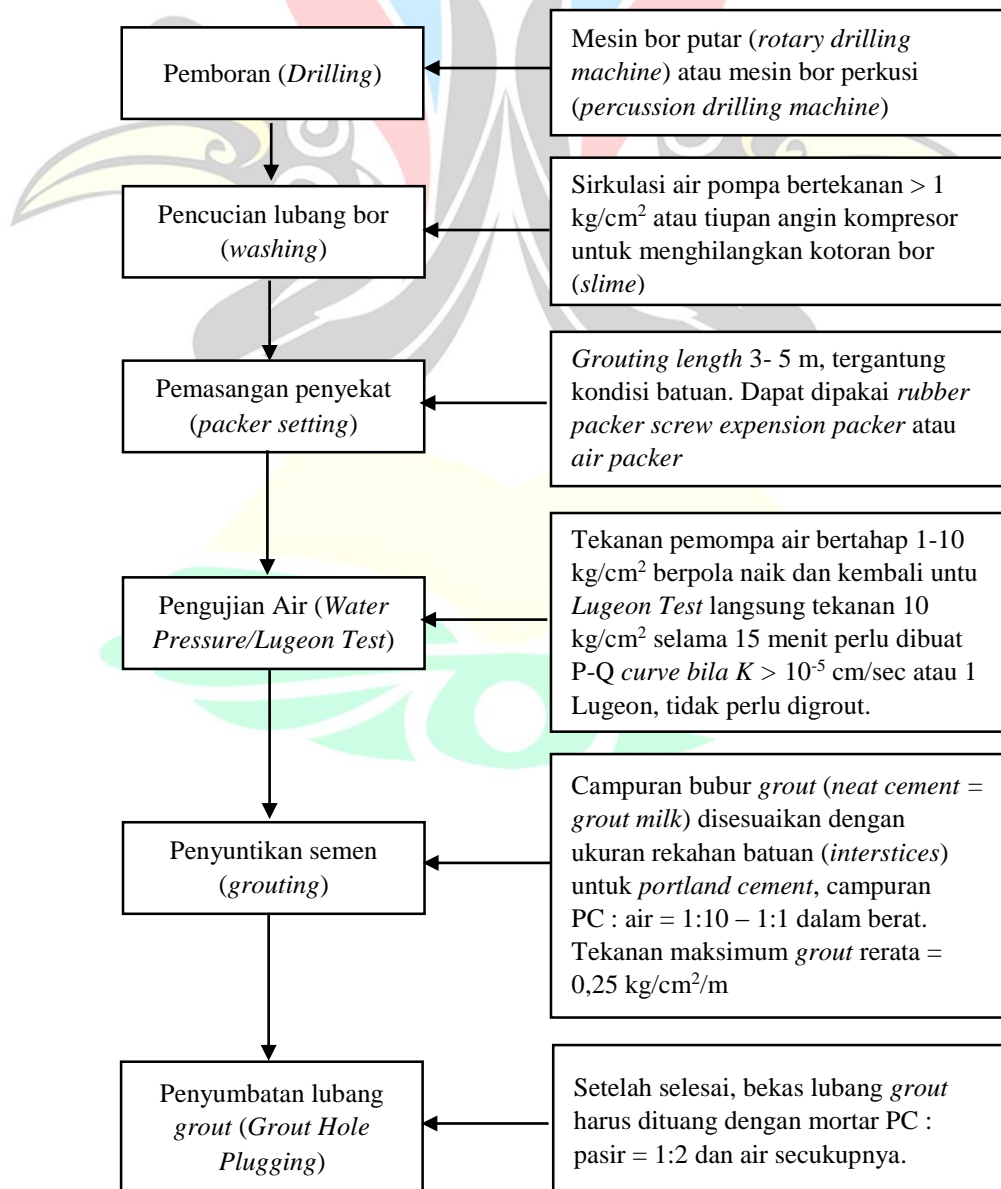
1:3 dengan berat dan rasio semen : air sekitar 0,42. Ketebalan *grouting* berkisar 5-15 cm tanpa diperkuat dengan *wire mesh*.

B.2 *Guniting (Grouting Semprot Halus)*

Guniting pada permukaan pondasi untuk mencegah terjadinya slaking (sifat ambyar) batuan oleh sinar matahari (*air slaking*) atau air (*water slaking*) secara berkelanjutan. Bahan campuran yaitu semen Portland dicampur pasir halus dengan perbandingan 1:2 hingga 1:5 dengan rasio berat dan rasio semen banding air sekitar 0,45. Ketebalan *guniting* rerata 2 – 5 cm untuk perbaikan permukaan pondasi tanpa *wire mesh*.

2.11.2 Pelaksanaan *Grouting*

Prosedur pelaksanaan *grouting* untuk pondasi bendungan utama dapat dibuat urutan kerja secara umum seperti Gambar 2.16.



Gambar 2. 15 Urutan Kerja Pelaksanaan *Grouting*

Sumber: Pedoman *Grouting*, 2005

A. Pemboran (*drilling*)

Pemboran dengan cara putar (*rotary method*) menggunakan mesin bor putar hidrolis dengan kapasitas kedalaman mencapai 100 m, jika menggunakan mesin bor tumbuk atau perkusi untuk pemboran dangkal kapasitas kedalaman maksimal 15 m. Pada umumnya digunakan mata bor dengan diameter 56 – 46 meter dari jenis metal *crown* atau *cross bit*, penggunaannya tergantung jenis batuan yang dibor.

B. Pencucian (*washing*)

Pemboran dengan cara putar membutuhkan sirkulasi air yang berfungsi untuk membersihkan lubang dari sisa pemboran (*slime*). Apabila dipakai mesin bor perkusi sisa pemboran akan dibersihkan tanpa air hanya dengan kompresor udara. Pada pencucian sirkulasi air dapat dinyatakan selesai saat air pembilas tampak jernih kembali.

C. Pemasangan penyekat (*packer setting*)

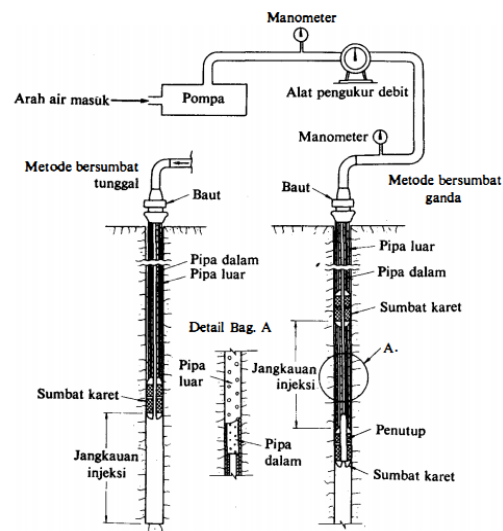
Pada penetaoan *grout length* dilakukan dengan pemasangan penyekat (*packer*). Panjang *grout length* pada setiap step umumnya 5 m untuk formasi bantuan kompak dan 3 m untuk batuan urug. Pemilihan *packer* disesuaikan dengan kondisi batuan, dimana batuan kompak dan tidak retak dipakai tipe *expansion packer* dan pada batuan yang kurang kompak serta retak dipakai tipe *air packer*. Apabila dibutuhkan *grout length* dengan kedalaman tertentu maka dipasang tipe *double packer*.

D. Pengujian permeabilitas (*permeability test*)

Efektifitas pekerjaan *grouting* diuji terutama oleh nilai (rasio) antara nilai koefisien filtrasi (K) atau *Lugeon* (Lu) sebelum *grouting* dan sesudah *grouting*. Didasarkan pada jenis perlengkapan injeksi, terdapat 2 jenis alat pengujian *Lugeon* seperti pada Gambar 2.17, yaitu:

D.1 Alat pengujian permeabilitas bersumbat tunggal (*single packer type Lugeon test devices*).

D.2 Alat pengujian permeabilitas bersumbat kembar (*double packer type Lugeon test devices*).



Gambar 2. 16 Alat Pengujian Lugeon
Sumber: Sosrodarsono, 1977

Pengujian permeabilitas dalam *grouting* sebaiknya dilakukan dengan tekanan, hal tersebut dilakukan untuk mengetahui kenaikan tekanan yang terjadi atau dapat langsung menggunakan tekanan maksimum yang diizinkan seperti nilai *Lugeon Test. Water Pressure Test (WPT)* juga dapat memperkirakan kondisi permeabilitas batuan sebelum dan sesudah *grouting*. Hasil pengujian metode Lugeon yang dilakukan dengan lubang bor 40 – 80 mm, maka harga 1 Lugeon kurang lebih sama dengan koefisien filtrasi (K) seharga 10^{-5} cm/detik dalam rumus Darcy.

Adapun rumus harga K atau Lugeon Unit (Lu) adalah sebagai berikut:

$$Lu = \frac{Q}{LH} \times 10^6$$

$$K = \frac{Q \times 10^3}{2\pi LH} \ln \frac{L}{R}, \text{ bila } 10R > L \geq R$$

Dimana:

Lu = Lugeon Unit

K = Koefisien permeabilitas (cm/detik)

Q = Debit injeksi rerata (l/menit)

L = Panjang lubang yang diuji (cm)

R = Radius lubang yang diuji (cm)

H = Ketinggian rejakan air pada titik tengah lubang uji (cm)

E. Grouting

Tahap setelah membuat lubang *grout*, pengecekan nilai lugeoun, serta pemasangan penyekat. Selanjutnya dilakukan pencampuran beton (*batching*) dari bahan *grout* sesuai spesifikasi bahan yang dipakai yaitu campuran semen *Portland* murni (*neat coment*) dengan air menjadi bubur semen (*grout milk*). Kepekatan atau viskositas bubur semen ditentukan oleh perbandingan air : semen yang berkisar 1:10 hingga 1:1 dalam perbandingan berat. Kepekatan tersebut berdasarkan tingkat keretakan batuan pondasi dengan klasifikasi pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 5 Perbandingan campuran pada bubur semen
(Pedoman Grouting Bendungan, 2005)

Material	Campuran
Batuan dengan keretakan kecil	1:10 - 1:8
Batuan dengan retakan sedang	1:5 – 1:2
Batuan dengan retakan lebar	1:1 – 1:0,5

Berdasarkan Tabel 2.3, injeksi dapat dimulai dengan kepekatan antara 1:3 – 1:5, namun apabila terjadi kesulitan pemompaan, maka kepekatan bubur *grout* harus diturunkan. Berdasarkan SNI 03-2393-1091, terdapat pedoman dalam perubahan campuran bubur *grout* pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 6 Perbandingan campuran *grout* berdasarkan nilai *lugeon*
(Pedoman Grouting Bendungan, 2005)

Nilai Lugeon	Campuran awal injeksi	Perubahan campuran berikutnya
Lu < 5	1:6	(1:4). (1:2),(1:1)
5 < Lu < 10	1:4	(1:2),(1:1)
Lu > 10	1:2	(1:1)

Penentuan tekanan maksimum injeksi (kg/m^2) yang digunakan tergantung pada kondisi batuan dan minerak yaitu $0,23 d$, dimana nilai d merupakan kedalaman lubang yang diinjeksi.

F. Penyumbatan (*plugging*)

Penyumbatan dilakukan pada situasi sebagai berikut:

F.1 Selama pelaksanaan *grouting* tertutup oada step pertama apabila terjadi kebocoran keperluan perlu disumbat denga bekas sack semen, kain perca atau diplester dengan mortar di sekitar lubang bor (*caulking*).

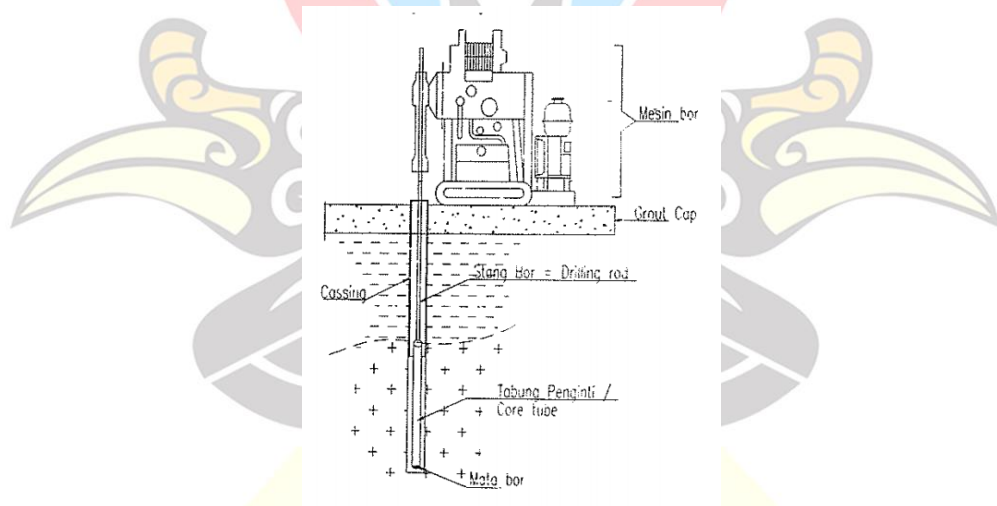
F.2 Apabila bocor ke samping melalui rekahan atau bidang perlapisan, maka dibuat pasak-pasak kayu dan dikombinasi dengan cara *caulking*.

F.3 Lubang *grout* yang telah selesai, harus disumbat rapat dengan mengecor mortas sampai penuh dan padat. Campuran mortar yaitu semen:pasir 2:1 dengan air secukupnya.

2.11.3 Peralatan *Grouting*

Terdapat dua tahap dengan alat yang berbeda yaitu tahap I adalah pemboran (*drilling = boring*) dan tahap II adalah *grouting*.

Pada tahap I diperlukan peralatan seperti pada gambar 2.18 yang terdiri atas:



Gambar 2. 17 Mesin Bor Putar Tipe Spindle Hidrolik dan Peralatan Bor (Pedoman Grouting Bendungan, 2005)

A. *Stang bor (drilling rod)*

Standarisasi ukuran stang bor diantaranya: DCDMA (Amerika Serikat), CDDA (Canada), BSI (Inggris), ADDA (Afrika Selatan) dan JIS (Jepang).

B. Tabung Penginti (*Corel Barrel = Core Tube*)

Dalam perkrjaan *drilling grouting* terutama *pilot hole* dan *check hole* akan diperlukan tabung penginti. Terdapat tiga tipe yang digunakan pada *drilling grouting*, yaitu:

- B.1 *Single core barrel*
- B.2 *Double core barrel*
- B.3 *Triple core barrel*

C. Mata Bor (*Bit*)

Terdapat 2 jenis mata bor yang biasa dipasang berdasarkan pertimbangan formasi batuan yang akan dibor, yaitu:

- C.1 Mata bor intan (*diamond bit*), untuk batuan keras (B hingga H *rock class*)
- C.2 Mata bor metal (*metal bit*), untuk batuan lunak (C hingga D *rock class*)

2.11.4 Efektifitas *Grouting*

Menurut Maksal, dkk (2019). Nilai efektifitas *grouting* didapatkan dengan persamaan berikut:

$$EFS = 100 - \frac{Kg}{K} \times 100$$

Dimana:

- Efs : Efektifitas *grouting* dalam persen (%)
- Kg : Permeabilitas setelah *grouting*
- K : Permeabilitas sebelum *grouting*

2.11.5 Material *Grouting*

Material *grouting* terdiri atas semen, air, dan bahan kimia lain dengan komposisi kebutuhan dan kegunaan *grouting*. Pemilihan bahan *grouting* salah satunya akibat faktor aplikasi geoteknik dan juga faktor-faktor lainnya. Kebutuhan campuran material *grouting* akan berbeda sesuai kegunaannya sebagai peningkatan kekuatan, pereduksi permeabilitas, atau peningkatan kekuatan dan pereduksi permeabilitas. Serta pengaruh alami dari tanah, elemen batuan, dan bahan *grouting* juga mempengaruhi komposisi campuran yang digunakan. Kekuatan tanah yang lulus air tidak hanya dipengaruhi jenis *grouting*, namun juga densitas dan distribusi ukuran butir formasi. Berikut ringkasan hasil data kekuatan dan permabilitas *grouting* pada tabel 2.7.

Tabel 2. 7 Data Kekuatan dan Permeabilitas dari Massa yang DigROUT

Grout berbasis semen	Massa yang digROUT	Data kekuatan atau permeabilitas	Peneliti
Bentonit	Pasir ukuran butir 0,43 mm $K=2 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$	Washout gradient = 100 $K=6 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$	Jones, 1963
Semen+bentonite+lempung	Pasir kasar $K=1,2 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$	Washout gradient = 125 $K=3,0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$	Mistry, 1964
Semen+bentonite+Silikat fosfat	Pasir menengah-kasar	Washout gradient = 150 $K=1,25 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$	Shroff dan Moghe, 1999
Semen W:C = 2:1+2%bentonit	Massa yang di grout mempunyai $K=10^{-1} \text{cm/sec}$	$K=5 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$	Bell, 1983
Grout semen W:C = 8:1	Perbaikan lempung lunak	$Q_u = 21,2 \text{ kg/cm}^2$ Washout gradient = 200 $\sigma_1 - \sigma_3 = 14,7 \text{ kg/cm}^2$	Zhang, 1982
Semen+bentonite W:C = 0,6:1+8%bentonit	Batu gamping dengan rekahan alami Lebar : 3,90 mm Lebar : 0,91 mm Lebar : 2,68 mm	Reduksi K = 22% Reduksi K = 80% Reduksi K = 21%	Gerard, 1982

Faktor yang digunakan pada hasil penelitian di Tabel 2.7 antara lain nilai q_u (*unconfined compressive strength*), *triaxial test* dan reduksi permeabilitas berdasarkan *washout adherence strength* sebagai gradient hidrolis. *Triaxial test* digunakan untuk memberikan replikasi di laboratorium dari kondisi actual di lapangan, hal tersebut disebabkan *grouting* di bawah muka tanah yang menyebabkan *lateral pressure* berkembang secara signifikan. Namun hasil *unconfined compressive strength* sangat berguna untuk komparatif. Penelitian ini juga didasarkan pada viskositas awal, kekuatan gel dan kekuatan jangka panjang dari *grouting*. Tanpa dasar tersebut, hasil *grouting* akan menyubut dan menghasilkan massa yang tidak tergrout.

2.12 Geo Studio (Seep/W)

SEEP/W merupakan salah satu program dari perangkat lunak Geo Studio. *Software* aplikasi ini digunakan pada bendungan untuk analisis rembesan yang melewati tubuh dan pondasi bendungan, infiltrasi air lewat drainase dan sumur injeksi. Perangkat lunak ini digunakan untuk menghitung parameter rembesan, seperti tekanan air pori, tekanan angkat, kecepatan aliran, arah aliran, gradient hidraulik dan volume aliran pada bagian tertentu dalam kondisi batas. Program ini

dinilai lebih baik dan akurat disbanding dengan perhitungan metode manual seperti metode grafis, metode jaring alir, dan metode tahanan listrik.

SEEP/W mampu memodelkan kondisi-kondisi seperti berikut:

- Analisis *steady* dan *transient*
- Cara pandang *2 dimensional*, *Axisymmetric*, dan *plan*.
- *Infinitive element*
- Batasan kondisi berupa tekanan atau jumlah aliran air
- Batasan kondisi yang berubah berdasarkan waktu
- Penggambaran garis *phreatic* dengan kondisi tidak jenuh
- Infiltrasi akibat hujan

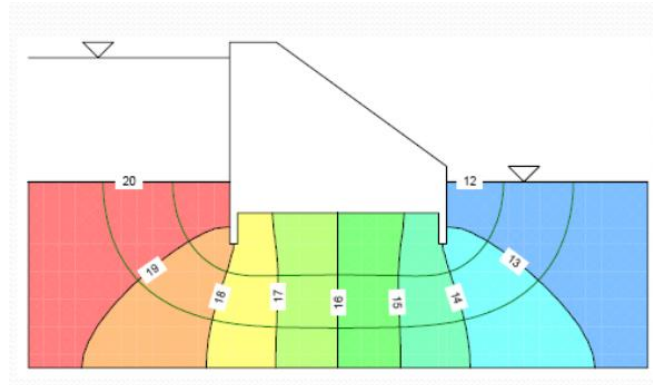
Untuk menganalisis rembesan kondisi *steady seepage* pada kasus bendungan urugan dengan SEEP/W input yang dibutuhkan adalah:

- Koefisien Permeabilitas (m/s)
- *Total Head* (m)
- *Unit flux* (m/s)

Hasil output SEEP/W dapat divisualisasikan dalam bentuk kontur, antara lain:

- *Total Head*
- *Pore-Water Pressure*
- *Pressure Head*
- *X-Velocity*
- *Y-Velocity*
- *X-Gradient*
- *Y-Gradient*
- *XY-Gradient*
- *X-Conductivity*
- *Y-Conductivity*
- *Vol. Water Content*

Berikut simulasi flow net pada SEEP/W



Gambar 2. 18 Simulasi Flow Net
(simantu.pu.go.id, 2020)

2.13 Studi Komparasi

Istilah “Studi Komparasi” terdiri atas dua kata yaitu “Studi” dan “Komparasi”. Menurut KBBI studi adalah penelitian ilmiah, kajian, atau telaahan. Sedangkan komparasi merupakan kata serapan dari Bahasa Inggris “Comparison” yang berarti membandingkan dan menurut KBBI komparasi adalah perbandingan. Studi komparasi adalah sebuah penelitian dimana peneliti berusaha mencari persamaan dan perbedaan fenomena, selanjutnya mencari arti atau manfaat dari adanya persamaan dan perbedaan yang ada (Atqiya, 2018). Studi komparasi juga merupakan suatu usaha penyelidikan atau penelitian yang bertujuan untuk membandingkan sesuatu dengan sesuatu yang lain.

Sedangkan dalam penelitian ini komparasi berarti perbandingan dua metode pengendali rembesan pada bendungan yaitu metode *grouting* dan metode *blanket layer*, yang dibandingkan dengan analisa sebelum penerapan metode pengendali rembesan. Faktor pembanding pada penelitian ini antara lain penurunan debit rembesan, faktor keamanan terhadap erosi buluh (*piping*), faktor keamanan terhadap tekanan angkat (*uplift*), dan perubahan pola rembesan. Sehingga dapat diketahui metode yang terbaik untuk menanggulangi resiko rembesan yang mungkin terjadi pada bendungan.

2.13 Penelitian Terdahulu

Adapun penelitian terdahulu yang menjadi referensi dalam penelitian ini terdapat pada Tabel 2.7.

No	Nama dan Judul	Hasil
1	Penulis : Heni Setyawati, Najib, Ahmad Hidayatillah Judul : Analisis Rembesan pada Perencanaan Pembangunan Bendungan Logung, Kbupaten Kudus, Jawa Tengah	Metode : Menghitung rembesan dengan program Slide 6.0 Hasil : Debit rembesan mengalami penurunan $0,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{dt}$ setelah dilakukan <i>grouting</i> , kemanan <i>piping</i> sebelumnya 1,38 menjadi 4,77 setelah <i>grouting</i> .
2	Penulis : I Gusti Ngurah Putu Dharmayasa Judul : Analisis Rembesan di Bawah Tubuh Bendungan Urugan	Metode : Menghitung rembesan dengan program SEEP/W Hasil : Debit rembesan yang menurun dengan <i>cut-off</i> dimana sebelumnya $3,162 \times 10^{-6}$ m^3/dt menjadi $2,077 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{dt}$.
3	Penulis : Siswanto, Suprpto, Sri Sangkawati Sachro Judul : Estimasi dan Evaluasi Debit Rembesan pada Bendungan Urugan Batu Zonal Inti Tegak	Metode : Menghitung debit rembesan dengan metode statistic dan regresi berdasarkan akusisi data rembesan melauai v-notch. Hasil : Pola linier hubungan debit rembesan berdasarkan ketinggian muka air waduk yaitu $q = 0,5221h - 68,958$ dan koefisien determinasi pada model sebesar 78,5%.
4	Penulis : Adib Lathiful Huda, Sri Prabandiyani R.W, Suharyanto Judul : Evaluasi Tekanan Air Pori dan Rembesan Pada Bendungan Panohan	Metode : Perbandingan tekanan air pori dan rembesan pada instrument piezometer dan v-notch dengan program SEEP/W Hasil : Perbandingan nilai tekanan air pori berdasarkan analisis SEEP/W lebih besar dari nilai air pori hasil pengukuran piezometer pada kondisi muka air normal, sedangkan lebih kecil pada muka air banjir.

2.14 Lokasi Penelitian

Adapun lokasi studi pada penelitian ini yaitu pada Bendungan Ciawi (Cipayung) yang terletak di bagian Hulu Sungai Ciliwung di Desa Cipayung, Desa Gadog, dan Desa Sukakarya, Kecamatan Megamendung, dan Desa Kopo,

Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor, dan dekat dengan jalan raya Puncak Pass ± 0,4 km.

Secara geografis, bendungan ini terletak pada koordinat $106^{\circ} 52' 46''$ Bujur Timur dan $6^{\circ} 39' 34''$ Lintang Selatan, dan berbatasan langsung dengan:

- Sebelah Utara : Kota Bogor dan Kota Depok
- Sebelah Barat : Kabupaten Lebak Provinsi Banten
- Sebelah Timur : Kabupaten Cianjur dan Kabupaten Purwakarta
- Sebelah Selatan : Kabupaten Sukabumi

Lokasi Bendungan Ciawi dapat dilihat pada Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Lokasi Bendungan Ciawi

