BAB II
STUDI LITERATUR

2.1 Umum

Menurut SNI No. 1731-1989 F maka definisi bendungan adalah setiap penahan buatan, jenis urugan atau jenis lainnya yang menampung air atau dapat menampung air baik secara alamiah maupun buatan, termasuk fondasi, bukit/tebing tumpuan, serta bangunan pelengkap dan peralatannya

Bendungan mempunyai resiko yang tinggi, karena mengandung potensi bahaya keruntuhan yang dapat mengakibatkan kehilangan jiwa dan kerugian materil yang besar. Demikian pula karena bendungan sangat dibutuhkan untuk penyediaan air irigasi, air minum, air industri, perikanan air tawar, pembangkit tenaga listrik dan sebagainya, serta disebabkan biaya pembangunan yang relatif tinggi maka bendungan harus dijaga tetap utuh dan tidak runtuh sekalipun keadaaan yang kritikal yaitu pada saat pengisian waduk pertama kali.

2.2 Bagian-bagian Bendungan

Adapun bendungan terdiri dari bagian-bagian sebagai berikut:

A. Fondasi:

Fondasi pada bendungan berfungsi untuk:

1. Mendukung struktural bendungan
2. Menahan air supaya air tidak merembes melalui bawah bendungan

Kriteria kegagalan yang dapat terjadi pada fondasi bendungan adalah:

1. Terjadi penurunan yang tidak merata, dan melampaui batas aman atau batas desain
2. Terjadi aliran rembesan berlebihan

Penyebab kegagalan pada fondasi bendungan dapat berupa:

1. Likuifaksi/luluh
2. Longsoran
3. Amblesan
4. Hanyutnya butiran tanah dan material yang mudah larut
5. Material fondasi yang terlepas

6. Tergalinya/terpotongnya bagian bawah fondasi
7. Pergerakan Patahan

B. Tubuh Bendungan

Tubuh bendungan berfungsi untuk menahan air yang ada di hulu bendungan.

Kriteria kegagalan yang dapat terjadi pada tubuh bendungan adalah:

1. Terjadi bocoran berlebihan
2. Terjadi deformasi pada tubuh bendungan kearah hilir (gravity dam)
3. Terjadi deformasi berlebihan

Penyebab kegagalan pada bendungan urugan adalah:

1. Retakan termasuk retak hidrolis
2. Lubang benam
3. Erosi permukaan
4. Hanyutnya butiran tanah dan material yang mudah larut
5. Ketidakstabilan lereng
6. Rembesan berlebihan
7. Likuifaksi/luluh

C. Bangunan Pelimpah

Bangunan pelimpah berfungsi untuk melewatkan/mengatur aliran banjir dengan aman.

Kriteria kegagalan yang dapat terjadi pada bangunan pelimpah adalah:

1. Kapasitas tidak memenuhi
2. Aliran banjir menimbulkan erosi pada tubuh bendungan
3. Tidak stabil terhadap beban rencana
4. Terjadi kavitasi, erosi, gaya angkat

Penyebab kegagalan yang dapat terjadi adalah:

1. Adanya penyumbatan/hambatan aliran
2. Lining/dinding pecah
3. Deformasi lantai
4. Reaksi alkali, reaksi asam dan pelumeran beton
5. Kesalahan/cacat pada pintu dan alat angkat

6. Kegagalan operasi

D. Bangunan Pengeluaran (Outlet Work)

Bangunan pengeluaran berfungsi untukmengatur pengeluaran air pada bendungan.

Kriteria kegagalan yang dapat terjadi pada bangunan pengeluaran adalah:

1. Kegagalan struktur
2. Kegagalan akibat hidraulik
3. Kegagalan akibat rembesan
4. Kegagalan terhadap operasi

Hal-hal yang menyebabkan kegagalan adalah:

1. Adanya penyumbatan/hambatan aliran
2. Penumpukan endapan
3. Kerusakan pintu dan alat angkat
4. Posisi dan letak pintu tidak tepat

E. Bangunan Pengeluaran Bawah (Bottom outlet)

Bangunan pengeluaran bawah berfungsi untuk mengeluarkan air pada kondisi darurat.

Kriteria kegagalan yang dapat terjadi pada bangunan pengeluaran bawah adalah:

1. Kegagalan struktur
2. Kegagalan akibat hidraulik
3. Kegagalan akibat rembesan
4. Kegagalan terhadap operasi

Hal-hal yang menyebabkan kegagalan adalah:

1. Adanya penyumbatan/hambatan aliran
2. Penumpukan endapan
3. Kerusakan pintu dan alat angkat
4. Posisi dan letak pintu tidak tepat

F. Gedung Pusat Listrik (Power House)

Bangunan pusat listrik berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dari aktifitas bendungan.

Kegagalan yang dapat terjadi pada gedung pusat listrik adalah:

1. Adanya penyumbatan/hambatan aliran
2. Penumpukan endapan
3. Kerusakan pintu dan alat angkat
4. Posisi dan letak pintu tidak tepat

Hal-hal yang dapat menyebabkan kegagalan adalah:

1. Daya dukung fondasi yang tidak mencukupi
2. Gaya angkat (*uplift*) yang berlebihan
3. Gaya tekan ke fondasi tidak terdistribusi dengan baik
4. Pergeseran, guling dan penyimpangan atau defleksi
5. Tegangan berlebihan pada bangunan
6. Retakan, kemerosotan mutu, reaksi alkali, asam, dan pelumeran beton

G. Waduk

Waduk pada bendungan berfungsi untuk menampung air.

Kegagalan yang dapat terjadi pada waduk adalah:

1. Terjadinya bocoran berlebihan
2. Tidak stabilnya dinding waduk dan bukit sekitarnya

Penyebab kegagalan pada waduk adalah:

1. Bocoran pada dinding dan lantai waduk
2. Terjadinya lubang benam
3. Ketidakstabilan lereng
4. Tanggul alami berpotensi longsor/melemah.

2.3 Bendungan Urugan Batu (Rockfill Dam)

Dari segi konstruksi bendungan terdiri dari bendungan urugan dan bendungan beton. Bendungan urugan terdiri dari bendungan urugan serba sama (*homogenous*), bendungan urugan batu dengan lapisan kedap air di dalam tubuh bendungan (***claycore rockfill dam***, *zone dam*) dan bendungan urugan batu dengan lapisan kedap air di muka (*concrete face rockfill dam*). Sedang bendungan beton terdiri dari bendungan beton berdasar berat sendiri (*concrete gravity*), bendungan beton dengan penyangga (*buttress dam*), bendungan beton berbentuk lengkung

(*concrete arch dam*), dan bendungan beton berbentuk lebih dari satu lengkung (*multiple arch dam*).



Gambar 2. 1 Concrete Face Rockfill Dam Shuibuya di China

(Sumber: www.waterpowermagazine.com)



Gambar 2. 2 Bhakara Concrete Gravity Dam di India

(Sumber: http://theconstructor.org/)



Gambar 2. 3 Roseland Arch-Buttress di Perancis

(Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Buttress_dam)



Gambar 2. 4 El Atazar concrete arch dam di Madrid, Spanyol

(Sumber: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:El_Atazar_dam_view01.jpg)

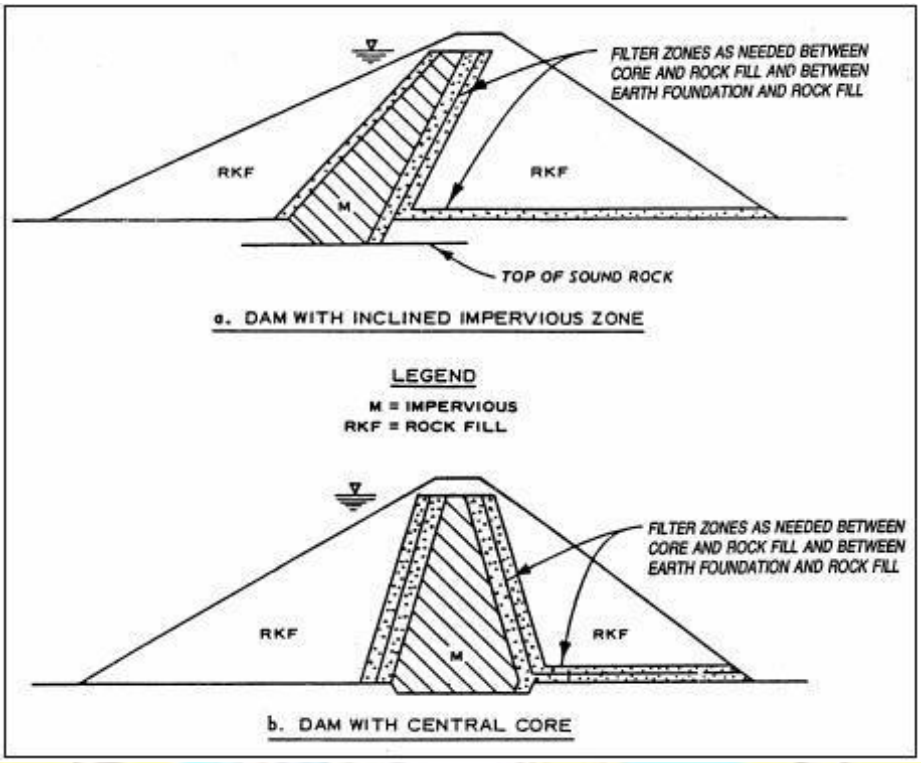


Gambar 2. 5 Daniel-Johnson Multiple Arch Dam di Kanada

(Sumber: http://www.quebecgetaways.com/le-barrage-daniel-johnson-et-la-centrale-manic-5)

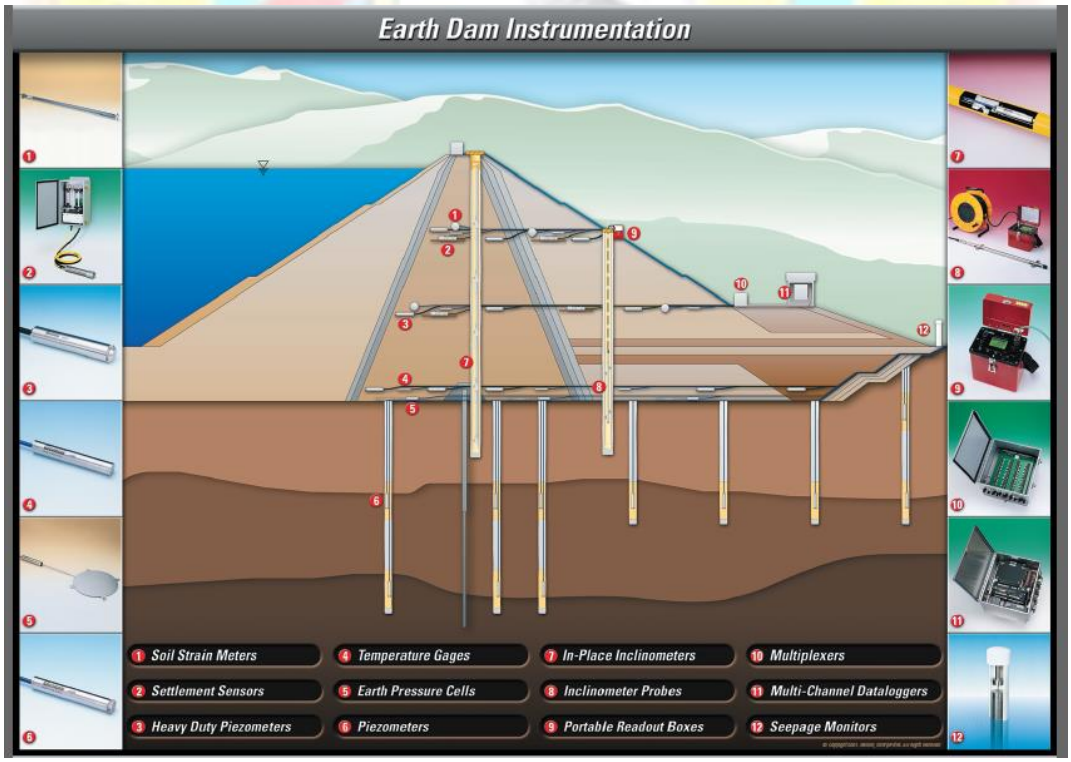
Bendungan urugan batu adalah bendungan dengan tanggul yang stabilitasnya bergantung pada batuan dan terdapat zona kedap air yang berupa lapisan lempung (*clay core*) untuk menahan aliran/rembesan air. Bendungan urugan batu merupakan bendungan dengan lima puluh persen atau lebih zona lolos air (urugan batu).

Pada bendungan urugan batu juga terdapat zona filter. Filter berfungsi untuk melindungi material tanah terhanyut dari inti bendungan dan menghambat erosi internal yang terjadi akibat *piping*. Filter halus (*fine filter*) biasanya berupa pasir atau pasir kerikil dan filter kasar (*coarse filter*) biasanya berupa pasir kerikil atau kerikil berpasir.



Gambar 2. 6 Potongan melintang bendungan urugan batu

(Sumber: aryansah.wordpress.com)



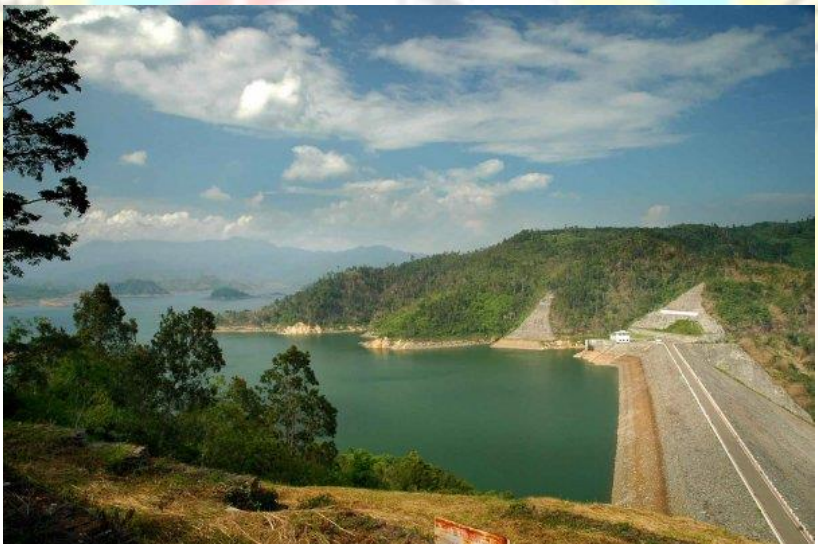
Gambar 2. 7 Bendungan Urugan Batu dan instrumentasi pada bendungan

(Sumber: www.geokon.com)

Di Indonesia terdapat beberapa bendungan urugan batu seperti: bendungan Jatiluhur, bendungan Jatigede, bendungan Batutegi, bendungan Wonorejo, dan bendungan Batubulan.



Gambar 2. 8 Bendungan Jatiluhur di Jawa Barat
(Sumber: *jatiluhurdam.wordpress.com*)



Gambar 2. 9 Bendungan Batutegi di Lampung
(Sumber: http://prima-mangiri.blogspot.com/)

2.4 Erosi Internal Pada Bendungan

Erosi internal adalah penyebab utama yang menyebabkan kegagalan pada bendungan. Proses erosi internal pada bendungan dapat dibagi ke dalam tiga

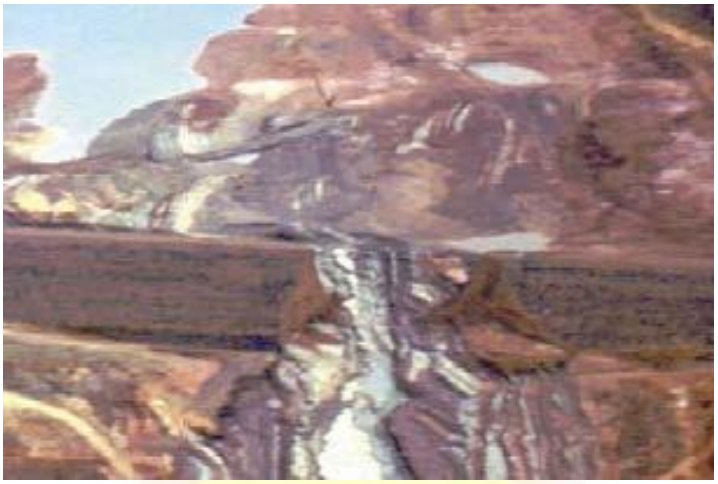
kategori. Satu dari ketiga kategori tersebut merupakan erosi internal di dalam tubuh bendungan. Ini adalah penyebab paling umum dibalik kegagalan bendungan akibat erosi internal (ICOLD 1995). Dua kategori yang lain melibatkan fondasi dari bendungan. Yang pertama adalah erosi **internal melewati fondasi bendungan** dan yang kedua adalah terjadi **erosi internal dari tanggul hingga fondasi**. Insiden piping yang dilaporkan menunjukkan bahwa piping pada tanggul (tubuh bendungan) adalah dua kali lebih sering dari pada piping pada fondasi dan dua puluh kali lebih sering daripada piping dari tanggul hingga fondasi.

Piping adalah bentuk erosi internal yang menyebabkan pembentukan lubang yang terus menerus (mirip pipa) melewati tanggul atau fondasi.



Gambar 2. 10 Keruntuhan Teton Dam, Idaho akibat erosi internal

(Sumber: US Army Corps of Engineers BUILDING STRONG)



Gambar 2. 11 Kegagalan bendungan Quail Creek Dike di Utah akibat erosi internal

(Sumber: US Army Corps of Engineers BUILDING STRONG)



Gambar 2. 12 Kegagalan bendungan Baldwin Hills di California akibat erosi internal

(Sumber: US Army Corps of Engineers BUILDING STRONG)

2.4.1 Proses terjadinya erosi internal

Menurut Fell et al. (2005), ada empat kondisi yang harus dipenuhi sehingga dapat terjadi erosi internal dan piping. Kondisi tersebut adalah:

1. Adanya rembesan
2. Adanya material yang dapat tererosi pada garis aliran dan material ini diangkut oleh rembesan
3. Adanya jalan keluar yang tidak terhambat sehingga material erosi dapat keluar
4. Untuk dapat terjadinya piping, material yang terpiping (material di atasnya) harus mampu mendukung terbentuknya piping

Terzaghi dan Peck (1948) membedakan dua tipe piping yang menyebabkan kegagalan pada bendungan. Pertama disebut **erosi *subsurface*** (*subsurface erosion*), dideskripsikan sebagai proses yang dimulai dengan pengaliran keluar dari rembesan, yang membawa butiran tanah, pada kaki hilir bendungan (*downstream toe*). Proses ini kemudian berlanjut ke arah hulu bendungan membentuk pipa melewati tubuh bendungan. Kedua adalah ***heave*** (penggelembungan), terjadi ketika tekanan pori sama dengan atau melebihi tegangan efektif yang terjadi pada tanah. Proses kedua ini sering disebut sebagai ***hydraulic fracture*** (retak hidrolis) ketika terjadi pada inti bendungan.

Proses erosi internal dan piping yang menyebabkan kegagalan bendungan dibagi menjadi empat tahapan (Wan dan Fell, 2004). Keempat tahapan tersebut adalah:

1. **Tahapan pertama**: **erosi internal** di dalam tanggul yang dimulai dengan *concentrate leak* (bocoran terkonsentrasi), *suffusion* (suffusi) atau erosi ke arah belakang.

Concentrate leak dapat terjadi oleh karena ***hydraulic fracture***. *Hydraulic fracture* sendiri terjadi karena faktor yang berbeda-beda. Salah satunya adalah konsolidasi diferrensial. Hal ini mengurangi tegangan total pada beberapa lokasi di inti bendungan, dan tegangan air pori akan membuka retakan yang sudah ada atau membuat sendiri piping pada inti bendungan. Bocoran terkonsentrasi juga terjadi pada inti bendungan yang tidak terkompaksi dengan sempurna. Tetapi, terjadinya bocoran terkonsentrasi tidak selalu menyebabkan erosi, akan tetapi kebanyakan tanah tidak akan mampu menahan tegangan geser yang terjadi pada retakan (Wan dan Fell, 2004).

Suffusion adalah inisiasi erosi internal lainnya. Ini terjadi pada tanah yang memiliki distribusi gradasi yang terlalu rengang dan akibatnya beberapa fraksi terhanyut pada saat rembesan. Ini dapat dihindari apabila tanah memiliki gradasi partikel yang baik. Tanah dikatakan tidak stabil secara internal apabila terjadi *suffusion*.

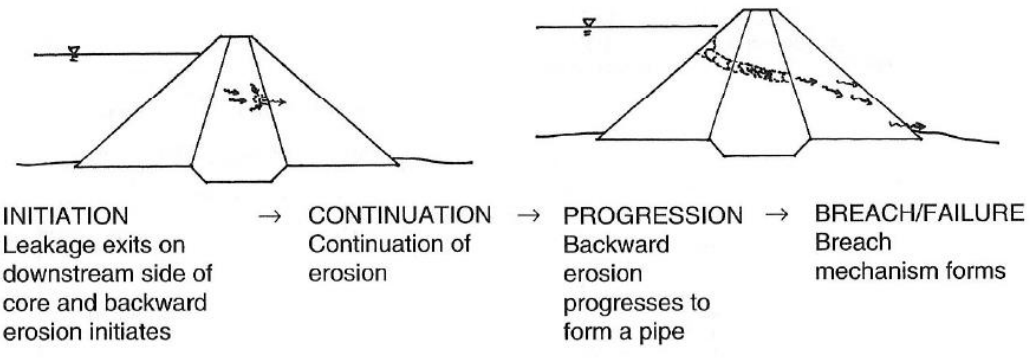
Erosi ke arah belakang atau dikenal dengan *backward erosion*, terjadi apabila rembesan terlalu kuat dan membuat partikel-partikel tanah mulai bergerak keluar.

2. Tahap kedua, erosi berkelanjutan: Apabila erosi internal tidak hilang maka akan terjadi erosi berkelanjutan. Pada inti bendungan biasanya terdapat filter yang berfungsi untuk menghentikan erosi internal. Filter yang bagus dapat secara efektif menghentikan erosi internal dengan menangkap partikel-partikel tanah yang terhanyut pada saat erosi.

3. Tahap ketiga, proses terjadinya piping

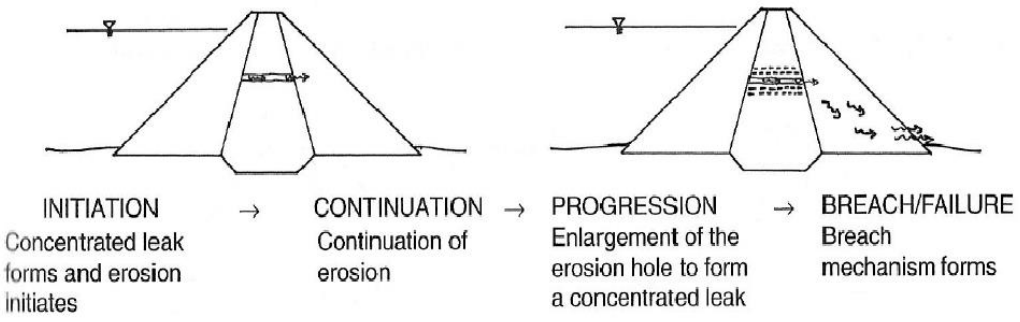
Jika erosi berkelanjutan, tidaklah berarti akan terus menerus terjadi sampai terjadi piping. Ini tergantung pada faktor proses awal. Pada kasus inisiasi yang terjadi akibat *concentrate leak*, proses ini bergantung pada bentuk geometri bocoran dan kemampuan tererosinya tanah. Apabila proses inisiasinya adalah backward erosion, proses terjadinya piping bergantung pada fungsionalitas dari filter. Sekalipun filter memperbolehkan terjadinya erosi berkelanjutan, apabila filter cukup baik proses erosi berkelanjutan dapat berhenti. Jika inisiasi adalah karena *suffusion* ada kemungkinan ketika *suffuse* sepenuhnya terjadi, tanah yang tersisa akan tererosi ke belakang (backward erosion) dan menyebabkan terjadinya piping

4. **Tahap keempat terbentuknya breach (jebolan).** Jika erosi internal telah sampai pada proses piping akan terjadi kerusakan structural pada bendungan dan pada kasus yang paling berbahaya adalah kegagalan bendungan (*dam failure*). Tetapi apabila inisiasi yang terjadi adalah akibat *suffusion* maka, mekanisme breach dapat terjadi tanpa melalui proses piping



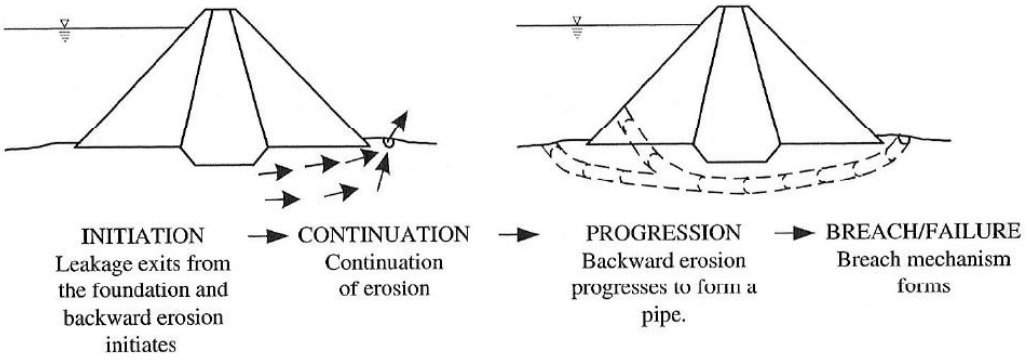
Gambar 2. 13 Proses kegagalan bendungan akibat backward erosion

(Sumber: Foster, 1999)



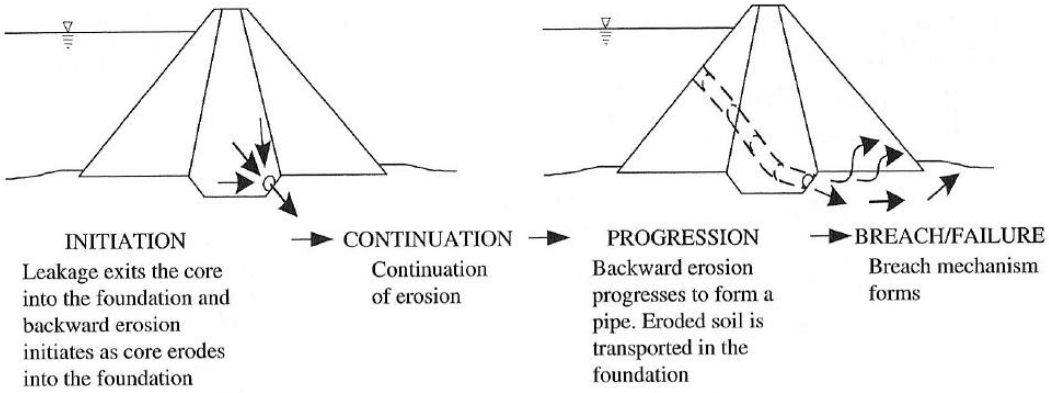
Gambar 2. 14 Proses kegagalan bendungan akibat concentrated leak

(Sumber: Foster, 1999)



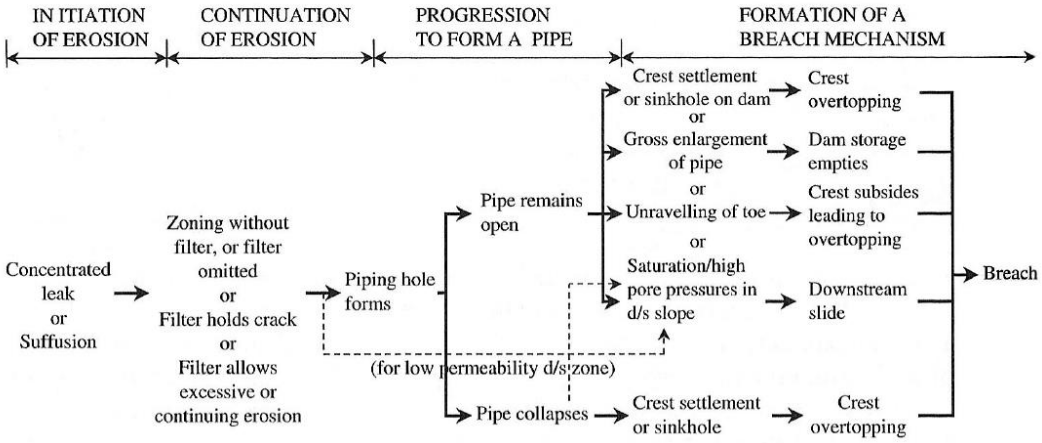
Gambar 2. 15 Proses kegagalan akibat piping pada fondasi bendungan

(Sumber: Foster, 1999)



Gambar 2. 16 Proses kegagalan bendungan akibat piping pada fondasi dan tubuh bendungan

(Sumber: Foster, 1999)



Gambar 2. 17 Diagram alir proses kegagalan bendungan akibat piping pada tubuh bendungan oleh Foster

(Sumber: Foster, 1999)

2.5 *Hydraulic Fracture* pada Pengisian Pertama Waduk

Hydraulic fracture (retak hidrolis) pada bendungan urugan batu didefinisikan sebagai retaknya permukaan hulu inti kedap air bendungan urugan batu akibat tekanan air waduk, karena terjadinya efek busur (arching) yang menyebabkan tegangan total lebih rendah dari beban di atasnya (*overburden pressure*), dan pada penggenangan pertama tegangan air pori mengurangi tegangan efektif sedemikian rupa sehingga tekanan hidrolis air waduk dapat membuat retak tarik (*tension fracture*) (Nobari et al., Seed et al., 1976., Ng dan Small, 1999). Apabila retak dibiarkan maka akan menyebabkan terjadinya piping yang berpotensi terjadinya kegagalan bendungan.



Gambar 2. 18 Bendungan Teton di Amerika yang runtuh akibat *hydraulic fracture*

(Sumber: http://web1.boisestate.edu/)

Hydraulic fracture selalu terjadi pada saat pengisian pertama, dan kecepatan penimbunan dan kecepatan pengisian waduk tidak mempengaruhi terjadinya *hydraulic fracture*. Pada pelaksanaan penimbunan yang lebih lama tubuh bendungan akan mengalami konsolidasi yang lebih besar dibandingkan dengan bendungan dengan pelaksanaan penimbunan yang cepat, demikian juga pada pengisian waduk yang lebih lama, inti akan mengalami pembasahan yang lebih lama, sehingga jejaring aliran (*flownet*) sudah terbentuk dibanding dengan pengisian waduk yang lebih cepat. Kedua hal tersebut tidak mempengaruhi *hydraulic fracture* (Djawardi, 2011).

Tabel 2. 1 Perbedaan kecepatan penimbunan dan penggenangan pada bendungan yang mengalami retak hidrolis (Djawardi, 2013)

Bendungan	Tinggi (m)	Waktu Pelaksanaan (tahun)	Kecepatan Penggenangan (m/bulan)
Balderhead	48	4	2
Hyttejuvet	90	1	20
Viddalsvatn	70	1	11
Teton	93	3	27
Yard's Creek	24	2	7

Analisis Fell et al (2004), menyatakan bahwa rasio tinggi berbanding lebar dasar inti bendungan (H/W > 2) adalah bendungan yang sangat rawan terhadap *hydraulic fracture*, sedangkan apabila rasio 1<(H/W)<2, maka bendungan tersebut rawan terjadi *hydraulic fracture*.

Pada saat pengisian waduk pertama kali, air akan membasahi bagian rockfill bendungan dan kemudian merembes masuk ke dalam tubuh bendungan dan inti menjadi basah oleh karena rembesan tersebut. Akibat adanya rembesan maka akan terjadi penurunan tegangan efektif pada tanah. Apabila dicapai suatu kondisi dimana tegangan efektif tanah lebih kecil dari pada tekanan air pori maka akan terjadi tarikan hidrostatis yang memiliki potensi menyebabkan retak. Hubungan rembesan dan tegangan efektif akan dijelaskan pada sub bab Tegangan dan Tekanan Air Pori.

Kriteria terjadinya *hydraulic fracture* dalam analisis *hydraulic fracture* dengan metode elemen hingga dari evaluasi tegangan sebagai berikut:

a. Nilai tegangan vertikal efektif (σ_y') pada permukaan hulu inti hasil analisis tegangan dan deformasi dengan menggunakan analisis ganda (*coupled analysis*) dibandingkan dengan tekanan hidrolis air waduk (σ_w) dalam suatu tabel dan grafik,
b. Apabila tegangan vertikal efektif pada suatu titik lebih kecil dari tekanan hidrolik ($\sigma_y' < \sigma_w$) maka pada titik tersebut terjadi tegangan tarik (σ_t) dan berpotensi terjadi *hydraulic fracture*,
c. Tegangan tarik yang terjadi pada titik tersebut kemudian dibandingkan dengan tegangan tarik pada saat terjadi retakan hasil uji *hydraulic fracture* di laboratorium,
d. Apabila tegangan tarik pada titik yang ditinjau lebih besar dari tegangan tarik pada saat terjadi retakan hasil uji *hydraulic fracture* di laboratorium, maka akan terjadi *hydraulic fracture*,
e. Apabila tegangan tarik pada titik yang ditinjau lebih kecil dari tegangan tarik pada saat terjadi retakan hasil uji *hydraulic fracture* di laboratorium, meskipun terjadi tegangan tarik, tetap tidak terjadi *hydraulic fracture*,

Apabila ada potensi terjadinya hydraulic fracture maka solusi untuk menghindari *hydraulic fracture* adalah sebagai berikut:

1. Memperlebar dasar inti bendungan sesuai dengan analisis Fell et al
2. Menaikkan tegangan efektif dan tegangan tarik dari tanah dengan cara pemadatan tanah
3. Merencanakan inti kedap air dengan kemiringan sisi hulu dan sisi hilir secara simetris dengan sudut tertentu yang tergantung dari parameter bahan timbunan inti kedap air agar fenomena busur dapat dikurangi (Djawardi, 2013)

Uji *Hydraulic Fracture* di Laboratorium

Konsep *hydraulic fracture* pada permukaan hulu inti kedap air bendungan urugan batu didasarkan pada pengembangan konsep penelitian terdahulu yaitu tekanan vertikal efektif pada suatu titik kurang dari tekanan hidrolis, sedangkan tegangan efektif vertikal pada titik tersebut kurang dari tekanan oleh berat sendiri karena pengaruh busur (arching), dan pola kerusakan adalah retak tarik (*tension*).

Benda uji bukan merupakan model inti di lapangan, tetapi benda uji hanya suatu sarana untuk memperoleh nilai tegangan tarik tanah pada saat retak (σ_t) dengan pola retak tarik di laboratorium, yang tegangan awal uji sebagai representasi tegangan pada permukaan inti.

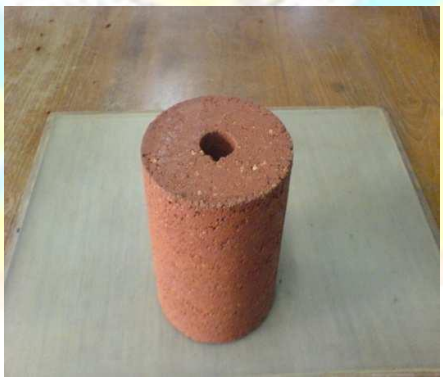
Uji *hydraulic fracture* di laboratorium dilakukan dengan asumsi sebagai berikut:

a. Tegangan pada seluruh titik di dalam benda uji dianggap sama,
b. tekanan hidrolis dianggap sebagai tinggi muka air di dalam waduk,
c. tegangan awal adalah tegangan vertikal (σ_y) dan tegangan horizontal (σ_x) pada permukaan hulu inti,
d. tegangan pada permukaan lubang di dalam benda uji dianggap sama,
e. kuat tarik benda uji saat retak dirumuskan sebagai tegangan utama mayor efektif dikurangi dengan tekanan hydraulic fracture, dan dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$\sigma_t \leq (\sigma_1' - u_f)$$

dengan σ_t = kuat tarik tanah pada saat retak (kPa), σ'_1 = tegangan efektif utama mayor (kPa), dan u_f = tekanan *hydraulic fracture* (kPa)

f. fenomena busur oleh pengaruh kemiringan bukit sandaran bendungan urugan batu tidak termodelkan dalam uji *hydraulic fracture* di laboratorium (Djawardi, 2011)



Gambar 2. 19 Contoh Benda Uji *hydraulic fracture* di laboratorium

(Sumber: Djawardi, 2013)

Bagian atau komponen alat uji *hydraulic fracture* inti kedap air bendungan *rockfill* di laboratorium adalah sebagai berikut:

a. *hydraulic fracturing chamber*

b. *pressure chamber*
c. alat untuk pemberi tekanan hydraulic
d. alat untuk pemberi tekanan isotropik
e. alat pengukur tegangan pada benda uji
f. alat pengukur deformasi aksial benda uji
g. alat pengukur aliran air ke dalam benda uji

2.6 Permeabilitas dan Rembesan (Seepage)

Tanah terdiri atas butiran-butiran yang memiliki rongga-rongga di antara butiran tersebut. Hal ini memungkinkan air untuk mengalir melewati rongga-rongga dalam butiran tersebut. Sehingga dalam ilmu Geoteknik dikenal adanya **permeabilitas** dan **rembesan**.

Rembesan dapat terjadi karena adanya perbedaan tinggi tinggi energy total (*total head*). Menurut persamaan Bernoulli tinggi energy total pada suatu titik dapat dapat dinyatakan dengan:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2 \cdot g} + Z$$

Dimana:

h = tinggi energi total
p = tekanan
v = kecepatan
g = percepatan gravitasi
γ_w = berat volume air

Apabila persamaan Bernouli diterapkan pada air yang mengalir melalui pori-pori tanah, maka kecepatan dapat diabaikan. Sehingga tinggi energi total pada suatu titik dalam tanah dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + Z$$

Menurut **Hukum Darcy**, rumus sederhana untuk menghitung kecepatan rembesan dalam tanah adalah sebagai berikut:

$$v = k \, . \, i$$

Dimana:

v = kecepatan rembesan

k = koefisien rembesan, untuk tanah pada umumnya lihat Tabel 2.2

i = gradient hidrolik

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Δh = perbedaan ketinggian

L = jarak antara 2 titik yang ditinjau

Tabel 2. 2 Nilai koefisien rembesan untuk beberapa jenis tanah

Jenis Tanah	Koefisien Rembesan (m/s)
Kerikil	≥ 0,01
Pasir Kasar	10^{-2} - 10^{-3}
Pasir Sedang	10^{-3} - 10^{-4}
Pasir Halus	10^{-5} - 10^{-6}
Lanau	10^{-6} - 10^{-7}
Lempung Kelanauan	10^{-7} - 10^{-9}
Lempung	10^{-8} - 10^{-11}

Perhitungan Rembesan dengan menggunakan Jaringan Aliran

Rembesan pada dasar tanah secara sederhana dapat dihitung dengan menggunakan jarring-jaring aliran. Jaring-jaring aliran tersusun atas 2 garis yaitu:

1. Garis aliran yang mewakili arah gerak air atau lintasan air dalam permukaan tanah
2. Garis ekipotensial adalah suatu garis dimana tinggi energi di semua titik pada garis tersebut adalah sama

Rumus untuk mencari besarnya rembesan adalah

$$q = k \cdot \frac{H \cdot Nf}{Nd}$$

Dimana:

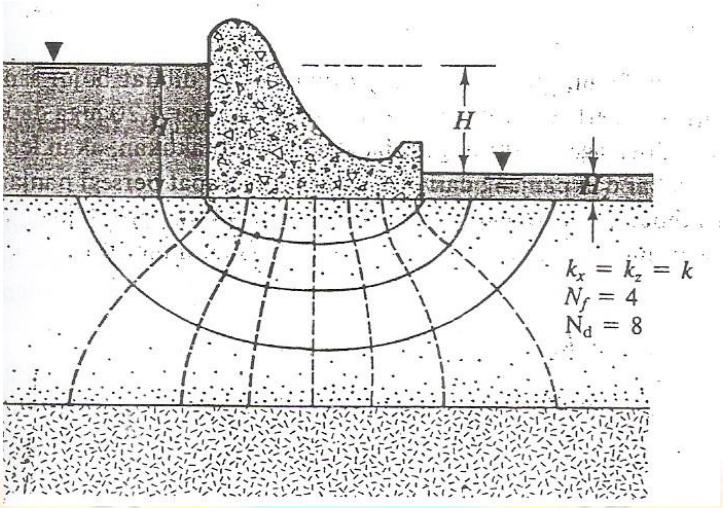
q = rembesan

k = koefisien rembesan

H = perbedaan tinggi muka air pada hulu dan hilir

Nf = banyaknya garis aliran

Nd = banyaknya garis ekipotensial



Gambar 2. 20 Jaringan aliran di bawah bendungan

(Sumber: Braja M. Das)

2.7 Sifat Tanah Tidak Jenuh (*Unsaturated soil*)

Pada saat pengisian pertama pada bendungan *rockfill*, air akan masuk membasahi bagian rockfill terlebih dahulu dan merembes masuk ke dalam tubuh bendungan secara perlahan-lahan karena adanya perbedaan tinggi energi antara hulu dan hilir dan menjenuhi tanah dengan air. Pada kondisi sebenarnya di lapangan air tidak akan menjenuhi tanah pada tubuh bendungan dengan cepat karena pengaruh koefisien permeabilitas, sehingga akan terdapat bagian tubuh bendungan yang tidak jenuh oleh air (*unsaturated soil*).

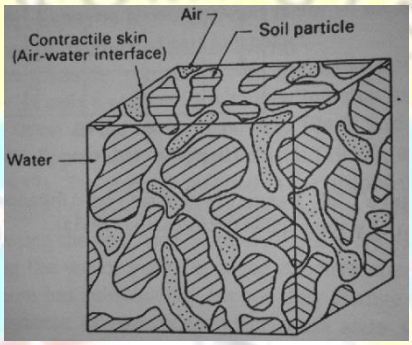
Pada bendungan ketinggian permukaan freatik merupakan hal yang harus diperhatikan. Garis freatik adalah garis dimana tekanan air pori bernilai nol. Apabila tanah berada di bawah permukaan freatik maka tanah adalah tanah jenuh dengan tekanan air pori bernilai positif. Apabila tanah berada di atas permukaan freatik maka tanah tersebut adalah tanah tidak jenuh dengan tekanan air pori bernilai negatif (*vadose zone*).

Pada umumnya mekanika tanah dapat dibagi menjadi 2 subdivisi, yaitu mekanika tanah pada tanah jenuh (*saturated soil*) dan mekanika tanah tidak jenuh (*unsaturated soil*). Perbedaan diantara kedua jenis tanah sangat penting karena memiliki sifat teknis yang berbeda.

Sifat-sifat tanah jenuh (saturated soil) adalah sebagai berikut:

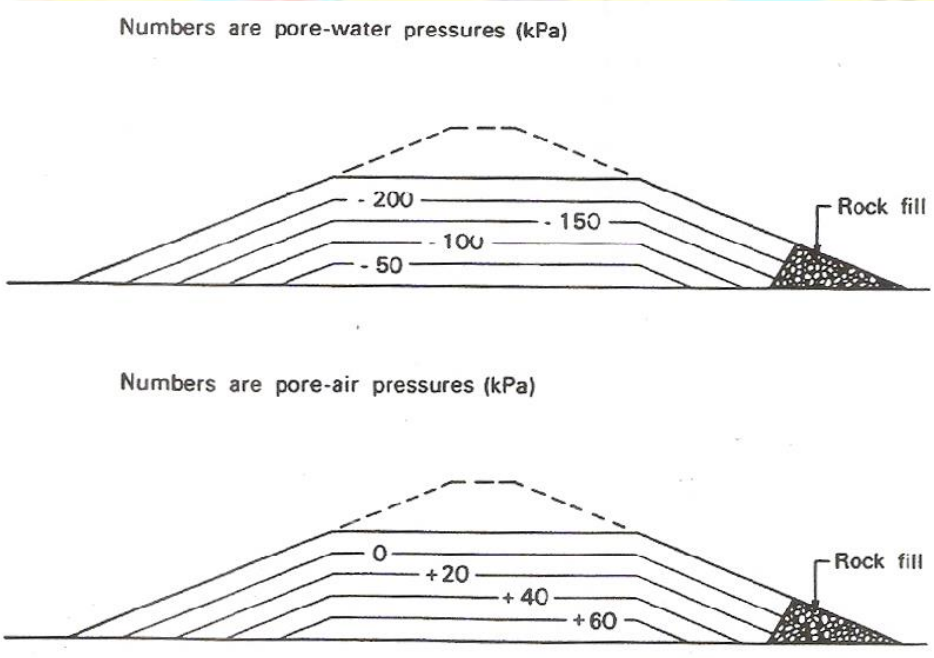
1. Terdiri dari 2 fase yaitu fase butiran padat dan air
2. Nilai derajat kejenuhan untuk tanah jenuh adalah 100%
3. Tekanan air-pori pada tanah jenuh bernilai positif
4. Koefisien permeabilitas pada tanah jenuh adalah konstan
5. Tegangan (σ) total adalah total tegangan efektif (σ') dan tekanan air-pori (u)

Tanah tidak jenuh memiliki lebih dari dua fase yaitu: padat, air, udara dan air-udara *(contractile skin)*, dan tekanan air pori negatif (*matric suction*). (Fredlund, 1993)



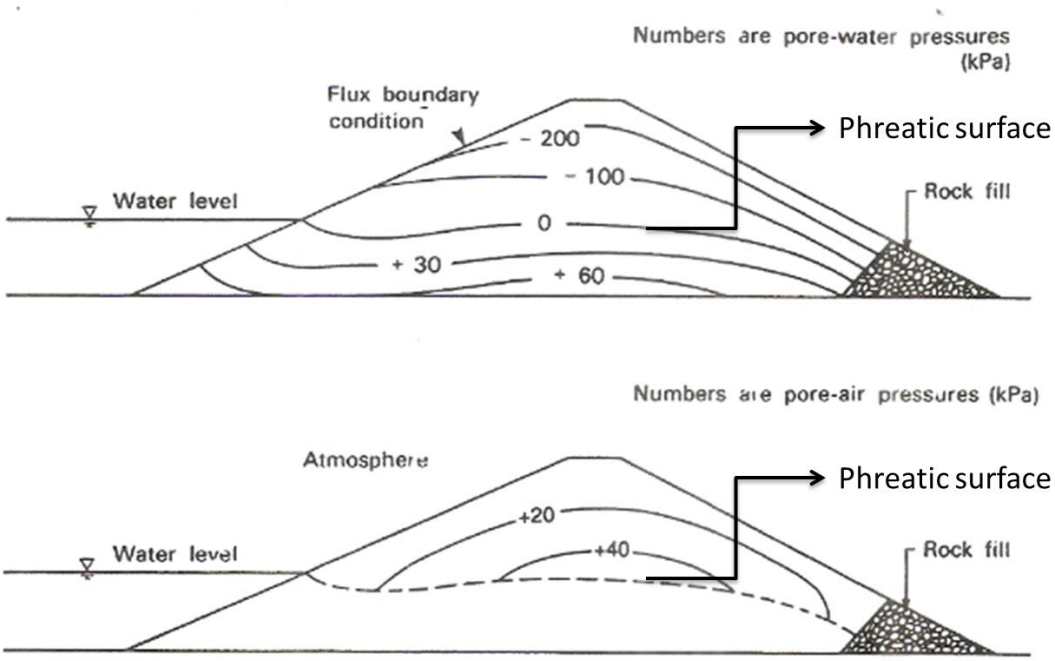
Gambar 2. 21 Fase pada *unsaturated soil*

(Sumber: Fredlund and Rahardjo, 1993)



Gambar 2. 22 Contoh tekanan air pori pada bendungan

(Sumber: Fredlund and Rahardjo, 1993)



Gambar 2. 23 Contoh permukaan freatik pada bendungan

(Sumber: Fredlund and Rahardjo, 1993)

2.7.1 Hisapan Tanah (Soil Suction)

Hisapan tanah (*soil suction*) pada umumnya berhubungan dengan kondisi energi bebas pada air tanah (Edlefsen dan Anderson, 1943). Energi bebas pada air tanah dapat diukur dalam bentuk tekanan uap parsial dari tanah. Hubungan termodinamika antara hisapan tanah (energi bebas pada air tanah) dan tekanan uap parsial dari air-pori dapat ditulis sebagai berikut:

$$\psi = -\frac{R \cdot T}{\nu_{w0} \cdot \omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right)$$

Dimana:

Ψ = soil suction (kPa)

R = tetapan gas ideal (8,314 J/(mol.K)

T = temperatur absolut dalam Kelvin [$T = (273{,}16 + t^0)$]

t = temperatur dalam Celsius

ν_{w0} = volume spesifik air atau invers dari berat jenis air [$(1/\rho_w)$ (m^3/kg)]

ρ_w = berat jenis air (0,998 kg/m^3 pada suhu 20^0C)

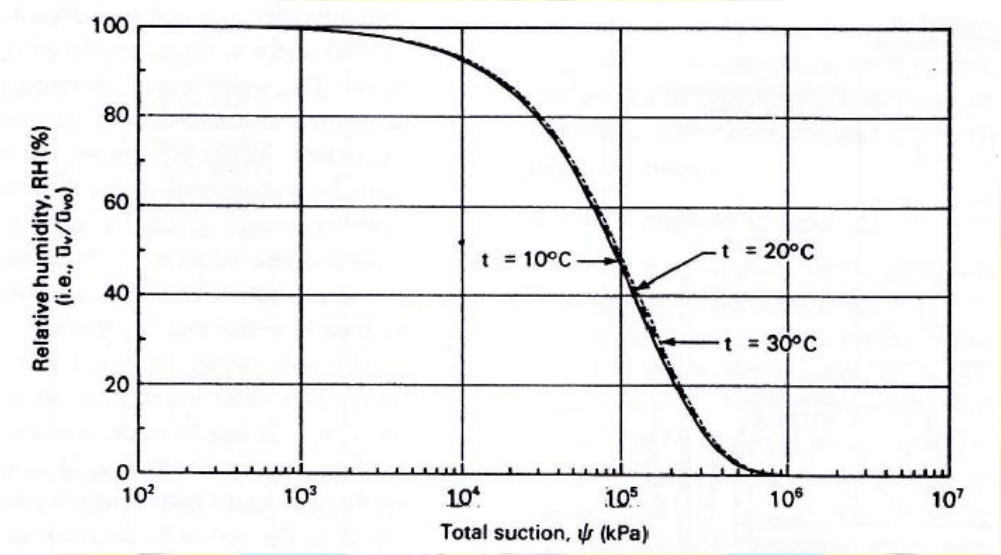
ω_v = berat molekul uap air (18,016 kg/kmol)

$\bar{u}_v$ = tekanan uap persial air pori (kPa)

$\bar{u}_{v0}$ = tekanan jenuh uap air pada bidang datar air murni pada suhu yang sama (kPa)

$\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}$ = kelembaban relatif (RH)

Hisapan tanah bernilai negatif ketika kelembaban relatif (RH) bernilai 100%. Nilai kelembaban relatif yang kurang dari 100% mengindikasikan adanya hisapan tanah.



Gambar 2. 24 Hubungan kelembaban relatif dan hisapan total

(Sumber: Fredlund and Rahardjo, 1993)

Hisapan tanah sebagaimana diukur dari kelembaban relatif umumnya disebut "hisapan total" (***total suction***). Hisapan total mempunyai dua komponen yaitu hisapan matrik (***matric suction***) dan hisapan osmotik (***osmotic suction***). Hisapan total, hisapan matrik, dan hisapan osmotik dapat didefinisikan sebagai berikut:

"Matrik atau komponen kapiler energi bebas adalah setara hisapan yang berasal dari pengukuran tekanan uap air parsial dalam kesetimbangan dengan air tanah, relatif terhadap tekanan parsial uap air pada kesetimbangan larutan identik dalam komposisi dengan air tanah.

Osmotik (zat terlarut) komponen dari energi bebas adalah setara hisapan yang berasal dari pengukuran tekanan uap air parsial dalam kesetimbangan dengan

larutan yang identik dalam komposisi dengan air tanah, relatif terhadap tekanan parsial dari uap air pada kesetimbangan dengan air murni

Hisapan total atau energi bebas pada air tanah adalah setara hisapan yang berasal dari pengukuran tekanan uap air parsial dalam kesetimbangan dengan larutan yang identik dalam komposisi dengan air tanah, relatif terhadap tekanan parsial dari uap air pada kesetimbangan dengan air murni."

Dari pernyataan di atas jelas bahwa hisapan total berhubungan dengan energi bebas pada air tanah, sedangkan hisapan matrik dan hisapan osmotik adalah komponen dari energi bebas. Dalam bentuk persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi$$

Dimana:

$(u_a - u_w)$ = hisapan matrik

u_a = tekanan udara-pori

u_w = tekanan air-pori

π = hisapan osmotik

Hisapan matrik dapat didefinisikan sebagai perbedaan antara tekanan udara-pori dan tekanan air-pori. Pada tanah kering, hisapan matrik akan sangat besar hingga 1000000kPa dan bernilai nol pada tanah jenuh sepenuhnya. Hisapan matrik dapat disamakan dengan tekanan air pori negatif dan merupakan salah satu faktor penentu dalam mekanika tanah tidak jenuh (*unsaturated soil mechanics*)

Oleh karena pada tanah tidak jenuh terdapat empat fase maka tegangan total pada setiap butiran tanah terdiri dari tegangan efektif, tegangan air-pori dan tegangan udara-pori. Persamaan tegangan total dari tanah tidak jenuh dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi \cdot (u_a + u_w)$$

Dimana:

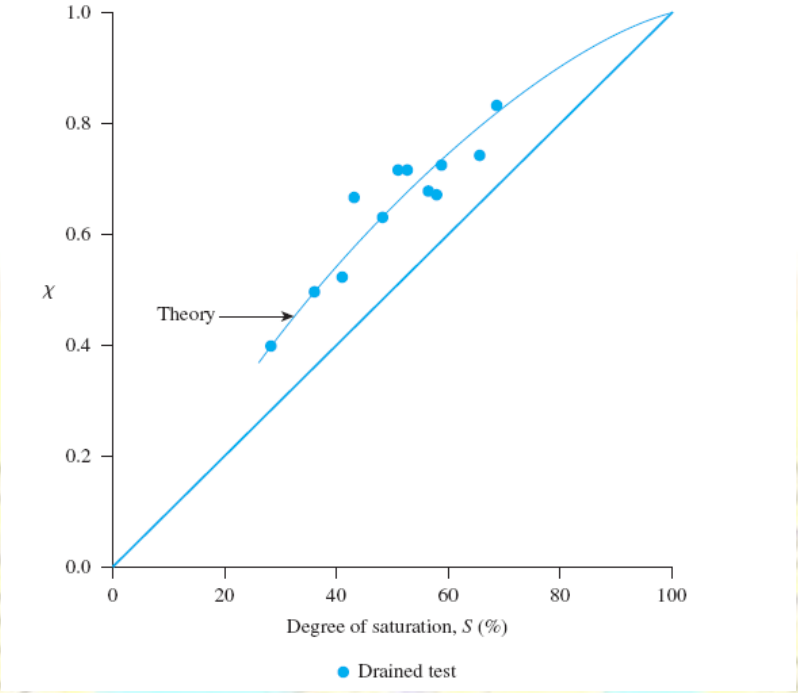
σ' = tegangan efektif

σ = tegangan total

$(u_a - u_w)$ = hisapan matrik

χ = parameter yang berhubungan dengan derajat kejenuhan tanah, untuk tanah kering bernilai 1 dan untuk tanah jenuh air bernilai 1

Nilai χ adalah nilai didapat dari hasil percobaan yang dilakukan Donald (1961) dan Blight (1961). Hasil percobaan menunjukkan hubungan nilai χ dan derajat kejenuhan adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 25 Grafik Hubungan χ terhadap Derajat Kejenuhan

(Sumber: Braja M. Das)

2.7.2 Hubungan Koefisien Permeabilitas dan Fase Air

Hubungan antara koefisien permeabilitas (k_w) dan fase air adalah pengukuran ruang yang tersedia bagi air untuk mengalir melalui tanah. Apabila ruang bagi air untuk mengalir sangat kecil maka nilai koefisien permeabilitas juga bernilai kecil, hal ini disebabkan oleh besaran pori-pori tanah. Pada pasir nilai koefisien permeabilitas lebih besar daripada lempung dikarenakan pasir memiliki pori-pori yang lebih besar daripada lempung.

2.7.2.1 Hubungan Permeabilitas dan Volume-Massa

Koefisien permeabilitas, k_w, adalah dua fungsi dari tiga kemungkinan dari properti volume-massa (Lloret dan Alonso, 1980; Fredlund, 1981):

$$k_w = k_w (S,e)$$

atau

$$k_w = k_w (e,w)$$

atau

$$k_w = k_w(w,S)$$

dimana:

S = derajat kejenuhan

e = angka pori

w = kadar air

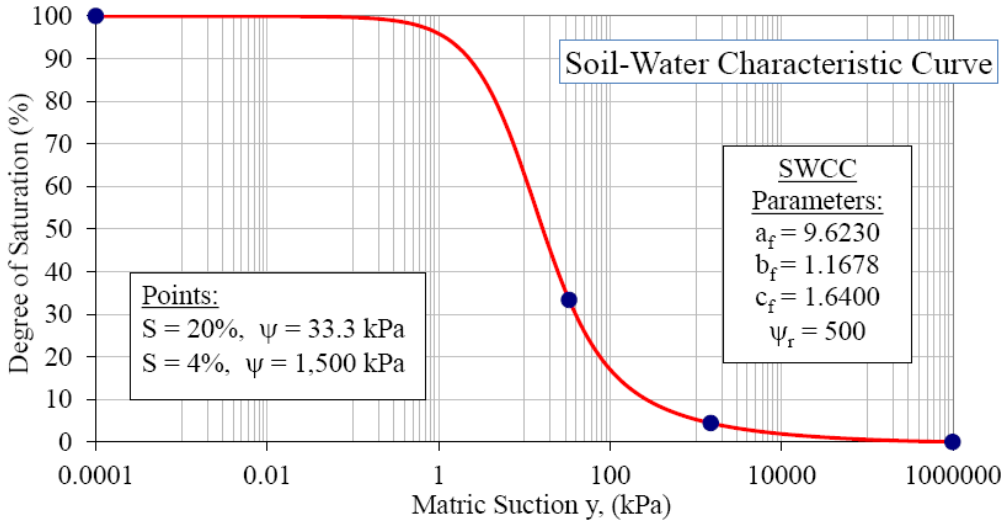
Pada tanah tidak jenuh, koefisien permeabilitas secara signifikan dipengaruhi oleh angka pori dan derajat kejenuhan atau kadar air pada tanah. Air mengalir melewati ruang pori yang dipenuhi air; oleh karena itu persentase dari pori yang dipenuhi oleh air adalah faktor utama. Ketika tanah adalah tanah tidak jenuh, udara menggantikan air mengisi pori-pori yang besar, dan menyebabkan air mengalir melewati pori yang lebih kecil dengan peningkatan tortuositas. Selanjutnya peningkatan pada hisapan matrik dari tanah menyebabkan penurunan pada volume pori yang diisi oleh air. Hasilnya, koefisien permeabilitas terhadap fase air berkurang dengan cepat seperti ruang untuk air untuk mengalir berkurang.

2.7.2.2 Efek Variasi Derajat Kejenuhan pada Permeabilitas

Koefisien permeabilitas pada tanah tidak jenuh dapat bervariasi selama proses transien sebagai hasil dari perubahan volume-massa. Perubahan pada angka pori pada tanah tidak jenuh mungkin kecil dan efek pada koefisien permeabilitas mungkin sekunder. Tetapi, efek perubahan derajat kejenuhan bisa sangat signifikan. Derajat kejenuhan, S, merupakan persentase pori-pori tanah yang diisi oleh air. Sehingga, koefisien permeabilitas sering dideskripsikan sebagai fungsi singular dari derajat kejenuhan, S, atau volume kadar air (*Volumetric Water Content / VWC*)

Perubahan pada hisapan matrik dapat menghasilkan perubahan yang lebih signifikan pada derajat kejenuhan atau kadar air. Derajat kejenuhan biasanya

dideskripsi sebagai fungsi hisapan matrik (Hisapan matrik vs. Derajat kejenuhan). Hubungan tersebut disebut dengan *Soil-Water Characteristic Curve* / SWCC.



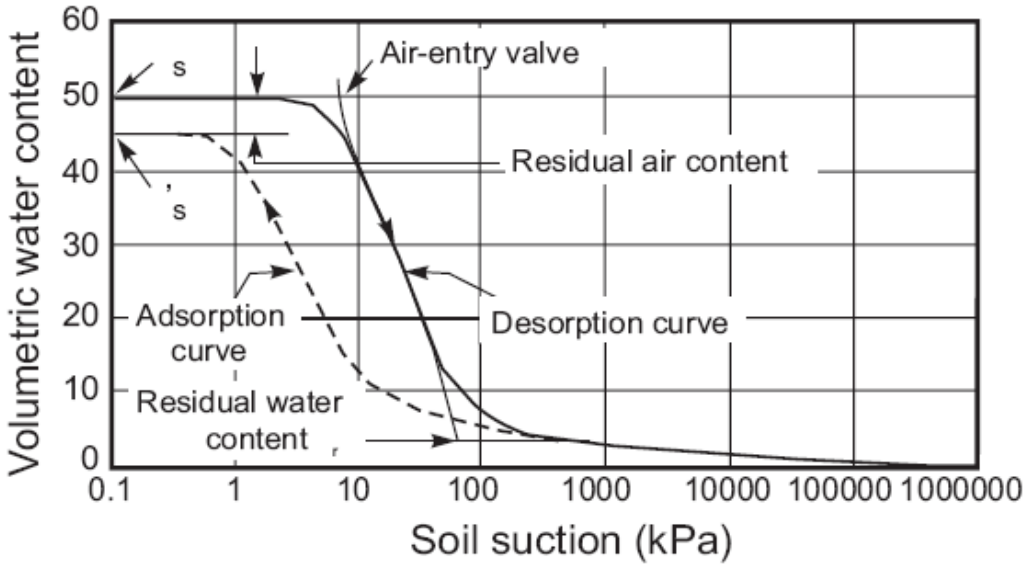
Gambar 2. 26 Contoh *Soil-Water Characteristic Curve*

(Sumber: Gustavo Torres Hernandez, 2011)

2.8 *Soil-Water Characteristic Curve* / SWCC

Soil-Water Characteristic Curve didefinisikan sebagai hubungan antara kadar air dengan hisapan tanah (Williams 1982). Kadar air menyatakan jumlah air yang terkandung dalam pori-pori tanah. Dalam ilmu tanah, sangat umum digunakan volume kadar air, θ.

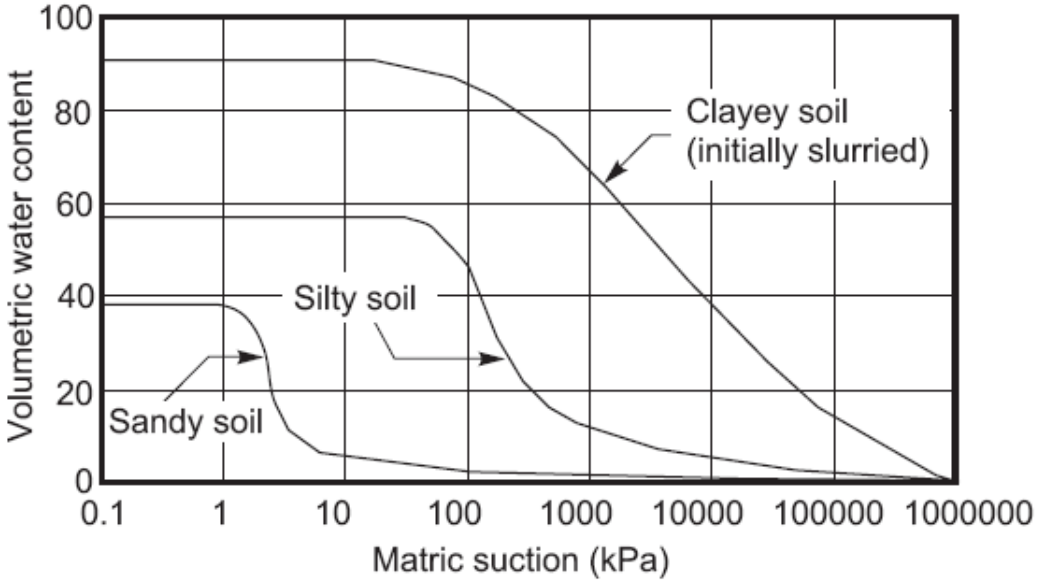
Hisapan dapat berupa hisapan matrik dari tanah (u_a-u_w, dimana u_a adalah tekanan udara-pori dan u_w adalah tekanan air-pori) atau hisapan total (matrik ditambah hisapan osmotik), Pada hisapan yang tinggi (> 1500 kPa), hisapan matrik dan hisapan total dapat diasumsikan ekuivalen.



Gambar 2. 27 *Soil-Water Characteristic Curve* pada tanah lanau

(Sumber: Fredlund and Xing, 1993)

Gambar 2. 27 menyatakan kurva karakteristik tanah-air untuk tanah lanau, dengan beberapa kunci karakteristik. Nilai *air-entry value* dari tanah adalah hisapan matrik dimana udara mulai masuk ke pori-pori terbesar tanah. Kadar air sisa (*residual water content*) adalah kadar air dimana hisapan yang besar dibutuhkan untuk mengeluarkan air tambahan dari dalam tanah. Definisi ini kurang jelas dan prosedur empiris untuk menghitungnya akan sangat berguna. Cara konsisten untuk mendefinisikan kadar air sisa ditunjukkan pada Gambar 2. 27. Garis singgung digambar dari titik belok. Kurva jarak hisapan matrik yang besar dapat diperkirakan sebagai ordinat dari titik dimana dua garis memotong. Apabila kadar air bernilai nol maka hisapan total bernilai sama untuk setiap jenis tanah.



Gambar 2. 28 Perbandingan *Soil-Water Characteristic Curve* untuk tanah, lanau dan lempung

(Sumber: Fredlund and Xing, 1993)

Beberapa persamaan empiris telah diusulkan untuk mensimulasi Soil-Water Characteristic Curve. Persamaan yang cukup dikenal adalah:

1. Persamaan *Van Genuchten* (1980)
2. Persamaan *Fredlund and Xing* (1994)

2.8.1 Persamaan Van Genuchten

Van Genuchten mengusulkan 4 parameter sebagai solusi untuk memprediksi fungsi *Volumetric Water Content*. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\Theta_w = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\Psi}{a}\right)^n\right]^m}$$

Dimana:

Θw = volume kadar air

Θs = volume kadar air kondisi jenuh

Ψ = tekanan air-pori negatif

a, n, m = parameter untuk kurva

Meskipun secara terminologi parameter a, n dan m sama dengan parameter pada persamaan Fredlung and Xing (1994), definisinya sedikit berbeda. Parameter a khususnya tidak dapat diestimasi dengan nilai air-value entry, tetapi adalah titik pusat dimana parameter n mengubah slope dari fungsi. Parameter m mempengaruhi ketajaman dari bagian slope kurva.

2.8.2 Persamaan *Fredlund and Xing*

Persamaan *Fredlund and Xing* dapat digunakan untuk menghasilkan fungsi *Volumetric Water Content* untuk semua tekanan negatif antara nol sampai 1000000 kPa adalah:

$$\Theta_w = C_\psi \cdot \frac{\Theta_s}{\left\{ \ln\left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m}$$

Dimana:

Θ_w = volume kadar air

C_ψ = nilai koreksi fungsi

Θ_s = volume kadar air kondisi jenuh

e = nilai natural (2,71828)

ψ = tekanan air pori negatif

a, n, m = nilai parameter kurva

$$a = \Psi_i$$

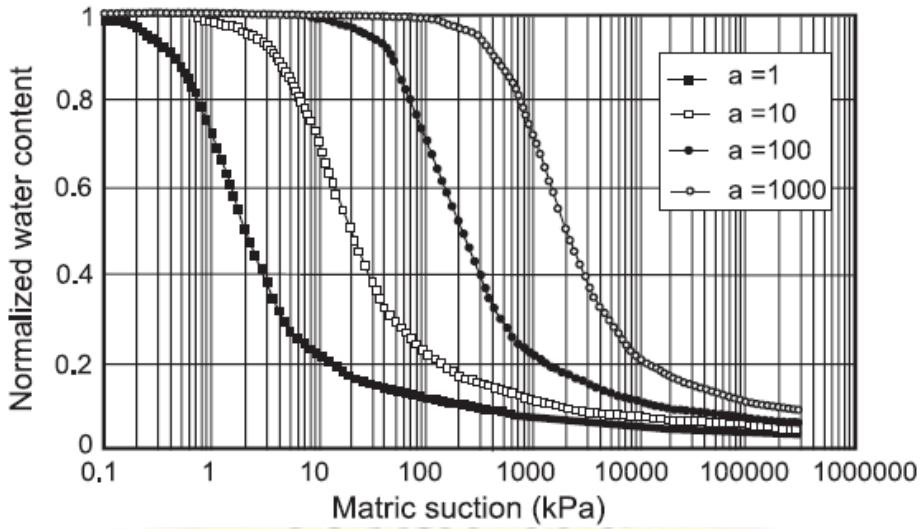
$$m = 3{,}67 \ln\left(\frac{\Theta_s}{\Theta_i} \right)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\Theta_s} 3.72 \cdot s \cdot \psi_i$$

dimana:

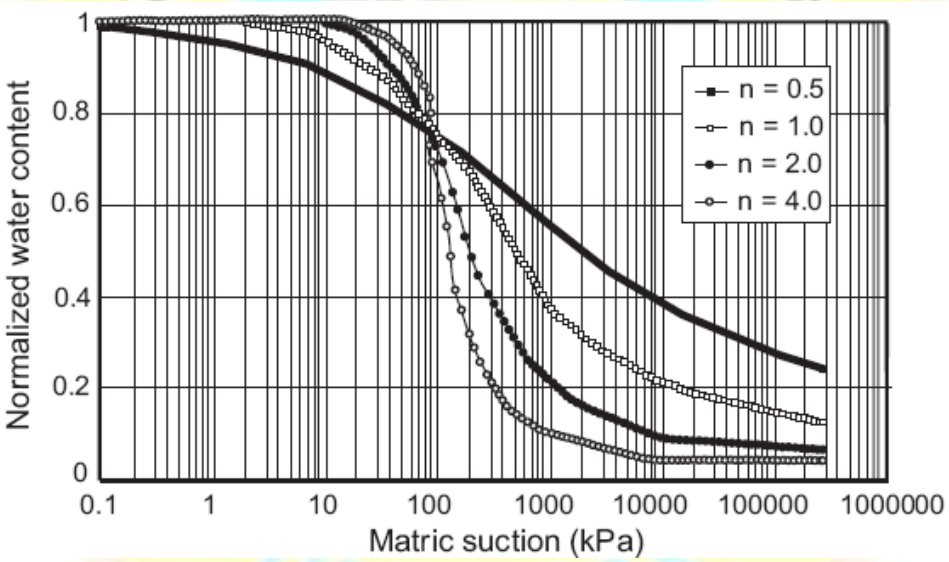
Ψi = tekanan hisapan terhadap kadar air yang terjadi pada titik belok kurva

s = slope dari garis singgung terhadap fungsi yang melewati titik belok



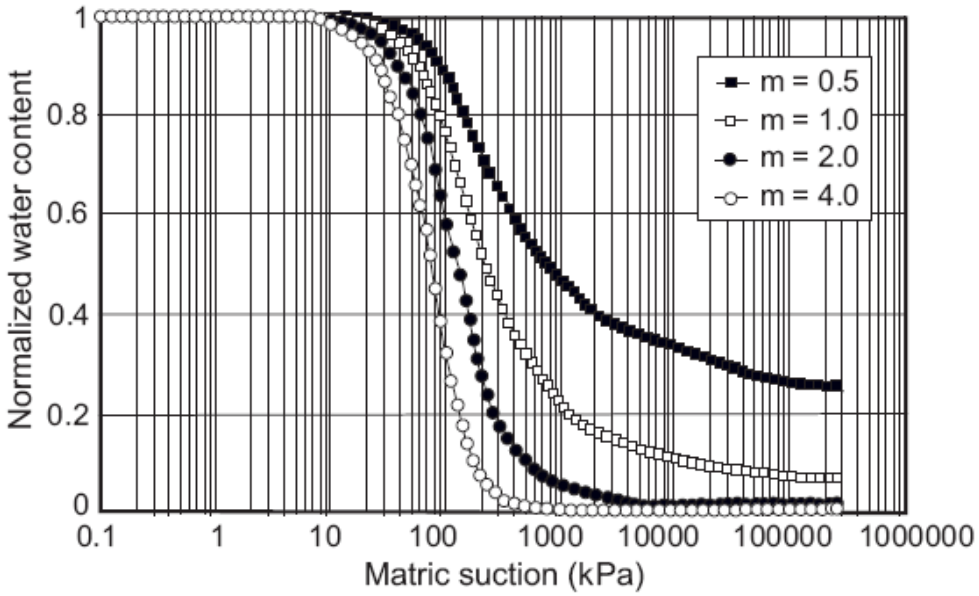
Gambar 2. 29 Contoh Fungsi untuk n=2, m=1, dan a bervariasi

(Sumber: Fredlund and Xing, 1993)



Gambar 2. 30 Contoh Fungsi untuk a=100, m=1, dan n bervariasi

(Sumber: Fredlund and Xing, 1993)



Gambar 2. 31 Contoh Fungsi untuk a=100, n=2, dan m bervariasi

(Sumber: Fredlund and Xing, 1993)

Persamaan SWCC pada persamaan *Fredlund and Xing* jika diinterpretasikan dalam hubungan dengan derajat kejenuhan adalah:

$$S(\%) = \frac{\Theta_w}{\Theta_s} = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{h_r}\right)}\right] \cdot \left[\frac{1}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{b_f}\right]\right\}^{c_f}}\right]$$

a_f, b_f, c_f, h_r = *fitting curve parameter*

Witczak et al., 2006 membagi parameter SWCC pada persamaan *Fredlund and Xing* untuk dua kelompok tanah, yaitu:

1. Parameter untuk tanah Non-plastic atau tanah bergranular (butir kasar) yaitu pasir dan kerikil
2. Parameter untuk tanah plastic atau tanah berbutir halus yaitu lempung dan lanau

2.8.2.1 Parameter untuk Tanah Granular pada Persamaan *Fredlund and Xing*

Persamaan pada parameter tanah *non-plastic* yang diusulkan oleh Witczak et al., 2006 adalah:

$$a_f = 1{,}14 \cdot a - 0{,}5$$

$$a = -2{,}79 - 14{,}1\log(D_{20}) - 1{,}9\times10^{-6} \cdot P_{200}^{4{,}34} + 7\log(D_{30}) + 0{,}055 \cdot D_{100}$$

dimana:

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{m_1} + \log(D_{60})\right]}$$

$$m_1 = \frac{30}{\left[\log(D_{90}) - \log(D_{60})\right]}$$

a_f = Parameter penyesuai SWCC

D_{20} = Diameter butiran yang bersesuaian dengan 20% lolos ayakan, dalam mm

D_{30} = Diameter butiran yang bersesuaian dengan 30% lolos ayakan, dalam mm

D_{60} = Diameter butiran yang bersesuaian dengan 60% lolos ayakan, dalam mm

D_{90} = Diameter butiran yang bersesuaian dengan 90% lolos ayakan, dalam mm

P_{200} = Persentase lolos ayakan No. 200

Untuk parameter b_f adalah:

$$b_f = 0{,}936 \cdot b - 3{,}8$$

dimana:

b_f = Parameter penyesuai SWCC

D_{10} = Diameter butiran yang bersesuaian dengan 20% lolos ayakan, dalam mm

$$b = \left\{5{,}39 - 0{,}29\ln\left[P_{200}\left(\frac{D_{90}}{D_{10}}\right)\right] + 3 \cdot D_0^{0{,}57} + 0{,}021 \cdot P_{200}^{1{,}19}\right\} \cdot m_1^{0{,}1}$$

$$D_0 = 10^{\left[\frac{-30}{m_2} + \log(D_{20})\right]}$$

$$m_2 = \frac{20}{\left[\log(D_{30}) - \log(D_{10})\right]}$$

Untuk parameter c_f adalah:

$$c_f = 0{,}26 \cdot e^{0{,}758} + 1{,}4 \cdot D_{10}$$

dimana:

c_f = parameter penyesuai SWCC

$$c = \log\left(m_2^{1{,}15}\right) - \left(1 - \frac{1}{b_f}\right)$$

Parameter h_{cf} didefinisikan konstan:

$h_{cf} = 100$

Persamaan tersebut memiliki beberapa batasan yaitu:

Jika $a_f < 1$, maka $a_f = 2{,}25\ P_{200}^{0{,}5} + 5$

dan

$0{,}3 < bf < 4$

2.8.2.2 Parameter untuk Tanah Berbutir Halus pada Persamaan *Fredlund and Xing*

Untuk tanah berbutir halus, parameter untuk persamaan *Fredlund and Xing* Witczak et al., mengusulkan sebagai berikut:

$$a_f = 32{,}835\{\ln(wPI)\} + 32{,}438$$

$$b_f = 1{,}421(wPI)^{-0{,}3185}$$

$$c_f = -0{,}2154\{\ln(wPI)\} + 0{,}7145$$

$$h_{rf} = 500$$

$$wPI = \frac{P_{200} \cdot PI}{100}$$

dimana:

wPI = indeks plastisitas tertimbang

PI = indeks plastisitas

Dengan batasan adalah sebagai berikut:

Jika $a_f < 5$, maka $a_f = 5$

dan

jika $c_f < 0{,}01$, maka $c_f = 0{,}03$

Pada kasus khusus dimana wPI lebih kecil dari 2 untuk tanah berbutir halus maka persamaan untuk parameter a_f adalah:

$$a_{favg} = a_{fn} + \frac{wPI}{2} \cdot \left(a_{fp} - a_{fn}\right)$$

dimana:

a_{favg} = a_f rata-rata

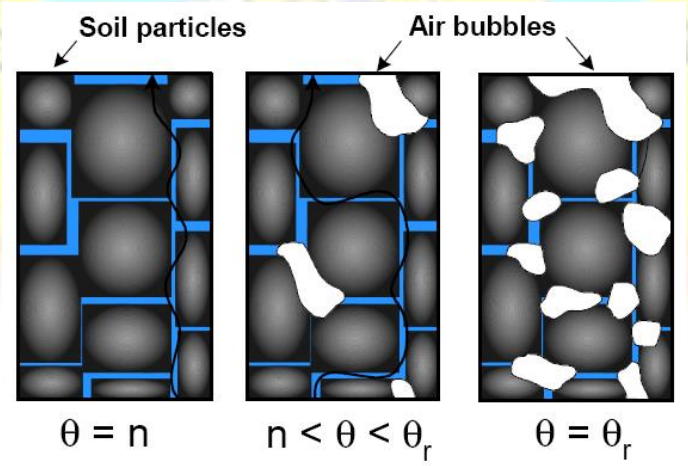
a_{fn} = nilai a_f untuk tanah bergranular

a_{fp} = nilai a_f untuk tanah berbutir halus

Dapat disimpulkan bahwa pada tanah bergranular (pasir dan kerikil) untuk dapat memprediksi SWCC diperlukan analisis ayakan (*Grain size analysis*). Sedangkan pada tanah berbutir halus diperlukan nilai Indeks Plastisitas yang didapat dari analisis nilai *Atterberg Limit*.

2.9 Fungsi Koefisien Permeabilitas (Koefisien Rembesan)

Koefisien permeabilitas (Konduktivitas Hidrolik) dapat didefinisikan sebagai kemampuan air untuk mengalirkan air pada kondisi tanah jenuh maupun tidak jenuh. Ketika udara memasuki pori-pori tanah, kemampuan tanah untuk mengalirkan air akan berkurang. Apabila tekanan air-pori meningkat semakin negatif, maka pori-pori tanah akan semakin banyak diisi oleh udara dan koefisien permeabilitas semakin menurun.



Gambar 2. 32 Pengaliran air pada tanah untuk variasi kondisi pori tanah

(Sumber: SEEP/W 2007 Engineering Book)

Fungsi koefisien permeabilitas untuk setiap jenis tanah tidak jenuh perlu ditentukan. Pada tanah tidak jenuh, kita tidak dapat memberikan nilai fungsi yang

konstan seperti pada tanah jenuh karena adanya fase udara yang menghambat air untuk dapat lewat begitu saja. Koefisien permeabilitas pada tanah tiak jenuh adalah variabel yang sebagian besar merupakan fungsi dari kadar air (*water content*) atau hisapan matrik (*matric suction*) dari tanah tidak jenuh.

Setelah menentukan Soil-Water Characteristic Curve (SWCC), maka kita dapat menentukan fungsi koefisien permeabilitas tanah. Fungsi koefisien permeabilitas dapat diprediksi dengan metode sebagai berikut:

1. Metode Van Genuchten (1980)
2. Metode Fredlund et al (1994)

2.9.1 Metode *Van Genuchten* (1980)

Van Genuchten (1980) mengusulkan persamaan untuk menyatakan konduktivitas hidrolik tanah sebagai fugsi hisapan matrik:

$$k_w = k_s \cdot \frac{\left[1-\left(a\cdot\Psi^{(n-1)}\right)\cdot\left(1+\left(a\cdot\Psi^{n}\right)^{-m}\right)\right]^2}{\left[\left((1+a\cdot\Psi)^{n}\right)^{\frac{m}{2}}\right]}$$

Dimana:

ks = konduktivitas hidrolik tanah jenuh

a,n,m = parameter penyesuai kurva

n = 1/(1-m) dan

ψ = rentang hisapan yang diperlukan

Dari persamaan diatas, fungsi konduktivitas hidrolik dari tanah dapat diestimasi apabila konduktivitas jenuh dan dua *fitting curve parameter*, a dan m diketahui.

Van Genuchten (1980) menunjukkan bahwa *fitting curve parameter* dapat diestimasi dengan grafik fungsi *Volumetric Water Content*. Menurut Van Genuchten, point terbaik untuk mengevaluasi parameter penyesuai kurva adalah titik tengah antara kadar air residu dan kadar air jenuh dari fungsi volume kadar air.

Slope dari fungsi dapat dihitung dengan persamaan:

$$S_p = \frac{1}{(\Theta_s - \Theta_r)} \cdot \left| \frac{d\Theta_p}{d(\log \Psi_p)} \right|$$

dimana:

Θ_s = kadar air jenuh

Θ_r = kadar air residu

Θ_p = volume kadar air pada titik tengah fungsi volume kadar air

Ψ_p = hisapan matrik pada titik yang sama

Van Genuchten mengusulkan rumus berikut untuk mengestimasi parameter m dan n ketika S_p dihitung

$$m = 1 - \exp(-0{,}8S_p)$$

untuk Sp antara 0 dan 1;

$$m = 1 - \frac{0{,}5755}{S_p} + \frac{0{,}1}{S_p^{\,2}} + \frac{0{,}025}{S_p^{\,3}}$$

untuk $S_p > 1$; dan

$$a = \frac{1}{\Psi}\left(2^{\frac{1}{m}} - 1\right)^{(1-m)}$$

2.9.2 Metode *Fredlund et al* (1994)

Persamaan untuk metode *Fredlund et al* adalah

$$k_w = k_s \cdot \frac{\sum_{i=j}^{N} \frac{\Theta \cdot \left(e^{y}\right) - \Theta \cdot (\psi)}{e^{y_i}} \cdot \Theta' \cdot \left(e^{y_i}\right)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{\Theta \cdot \left(e^{y}\right) - \Theta_s}{e^{y_i}} \cdot \Theta' \cdot \left(e^{y_i}\right)}$$

Dimana:

kw = konduktivitas yang dihitung untuk kadar air atau tekanan air-pori negatif

ks = konduktivitas yang diukur pada tanah jenuh

Θs = volume kadar air

e = nilai natural 2,71828

y = variable peubah dari integral mewakili logaritma tekanan air-pori negatif

i = interval antara j ke N

j = tekanan air-pori paling kecil yang dideskripsikan fungsi akhir

ψ = hisapan terhadap interval ke-j

Θ’ = turunan pertama dari persamaan…

$$\Theta = C(\psi) \cdot \frac{\Theta s}{\left\{ \ln\left[e + \left(\frac{\Psi}{a} \right)^{n} \right] \right\}^{m}}$$

dimana:

a = nilai *air-entry value* tanah

n = parameter control slope pada titik belok pada fungsi volume kadar air

m = parameter berkaitan dengan kadar air residu

C(ψ) = nilai koreksi fungsi dengan definisi seperti berikut

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\Psi}{C_r} \right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{C_r} \right)}$$

dimana:

C_r = nilai hisapan matrik konstan terhadap kadar air residu

Biasanya bernilai 1500 kPa. Nilai 1000000 pada persamaan diatas berdasarkan hisapan matrik (kPa) pada saat kelembaban yang tertinggal tidak ada pada tanah pada fase cair atau uap.

2.10 Tegangan dan Tekanan Air Pori di dalam Tanah

Tegangan vertikal pada suatu tanah di kedalaman tertentu adalah sebesar:

$$\sigma_v = \gamma \cdot D$$

Dimana:

σv = tegangan vertikal total / tegangan total

γ = berat jenis tanah

D = kedalaman tanah

Tegangan vertikal merupakan tegangan total karena merupakan hasil dari berat seluruh tanah di atasnya.

Selain itu, dapat juga ditentukan tegangan lain pada kedalaman tanah tersebut yaitu tekanan pada air yang terkandung dalam pori tanah. Tekanan ini disebut **tekanan air pori**.

Tekanan air pori dapat dihitung dengan rumus:

$$u = \gamma_w \cdot (D - H_w)$$

dimana:

u = tekanan air pori

γ_w = berat satuan air (9,81 kN/m^3)

D = kedalaman tanah

H_w = kedalaman tanah yang tanpa air

Perbedaan antara tegangan total dan tegangan air pori disebut **tegangan efektif**, yaitu:

$$\sigma' = \sigma_v - u = \gamma \cdot D - \gamma_w \cdot (D - H_w)$$

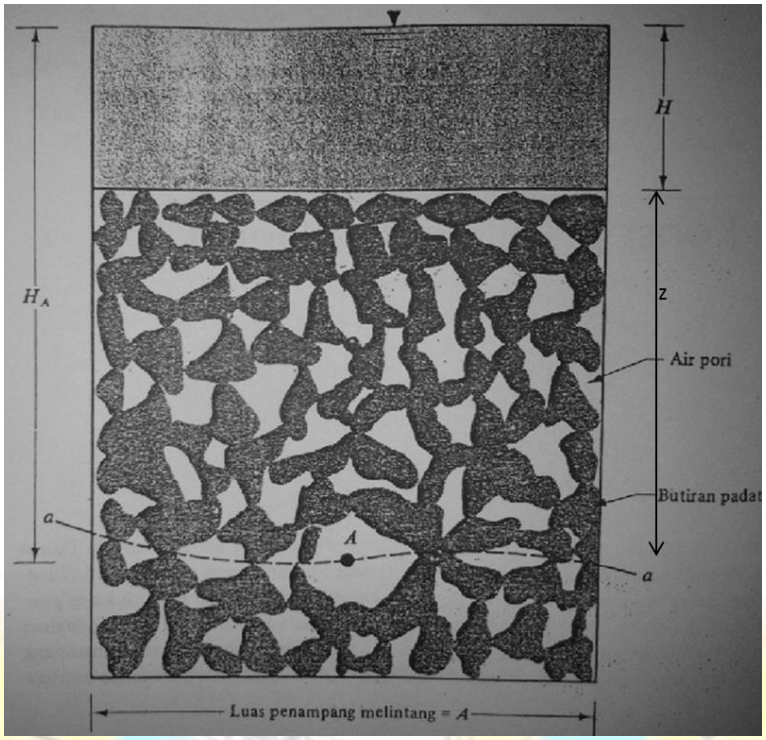
Hubungan antara tegangan total, tegangan air pori dan tegangan efektif yang berlaku secara umum ditulis sebagai berikut:

$$\sigma' = \sigma - u$$

Persamaan tersebut adalah persamaan yang paling penting dalam mekanika tanah karena menyatakan konsep yang dikenal sebagi prinsip tegangan efektif (*principal of effective stess*). Menurut prinsip ini, perilaku tanah hanya dipengaruhi oleh tegangan efektif, bukan oleh tegangan total. Deformasi, pemampatan, atau perubahan kekuatan hanya terjadi apabila ada perubahan tegangan efektif, bukan perubahan tegangan total.

2.10.1 Tegangan pada Tanah Jenuh Air tanpa Rembesan

Gambar 2. 34 menunjukkan suatu massa tanah jenuh air tanpa adanya rembesan air ke segala arah. Tegangan total pada titik A dapat dihitung dari berat volume tanah jenuh air dan berat volume air diatasnya.



Gambar 2. 33 Peninjauan tegangan efektif untuk suatu tanah jenuh air tanpa rembesan

(Sumber: Braja M. Das)

Tegangan total pada titik A dapat dituliskan:

$$\sigma = H \cdot \gamma_w + (H_A - H) \cdot \gamma_{sat}$$

Dimana:

σ = tegangan total

γ_w = berat volume air (9,81 kN/m^3)

γ_{sat} = berat volume tanah jenuh air

H = tinggi muka air diukur dari permukaan tanah

H_A = jarak antara titik A dan muka air.

Tegangan total, σ, pada persamaan di atas dapat dibagi dalam dua bagian:

1. Bagian yang diterima oleh air di dalam ruang pori yang menerus. Tegangan ini bekerja ke segala arah sama besar
2. Sisa dari tegangan total dipikul oleh butiran tanah padat pada titik-titik sentuhnya. Penjumlahan komponen vertikal dari gaya-gaya yang terbentuk pada titik-titik sentuhan butiran tanah tersebut per satuan luas penampang melintang massa tanah dinamakan tegangan efektif (*effective stress*).

Tegangan efektif pada Gambar 2. 35 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u = \gamma_w \cdot (H + z)$$

$$\sigma = \gamma_{sat} \cdot z + \gamma_w \cdot H$$

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma' = \gamma_{sat} \cdot z + \gamma_w \cdot H - \gamma_w \cdot H - \gamma_w \cdot z$$

$$\sigma' = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot z$$

$$\sigma' = \gamma' \cdot z$$

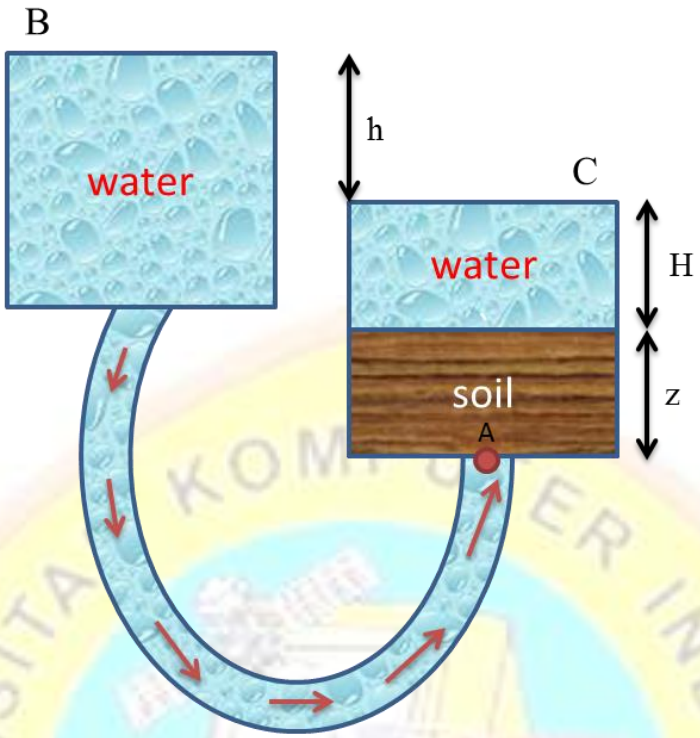
dimana $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$ disebut sebagai berat volume tanah terendam air (*submerged unit weight*)

Sehingga dapat disimpulkan tegangan efektif adalah merupakan gaya per satuan luas yang dipikul oleh butir-butir tanah. Perubahan volume dan kekuatan tanah tergantung pada tegangan efektif di dalam massa tanah. Makin tinggi tegangan efektif suatu tanah, makin padat tanah tersebut.

2.10.2 Tegangan pada Tanah Jenuh Air dengan Rembesan

Tegangan efektif pada suatu titik di dalam massa tanah akan mengalami perubahan dikarenakan adanya rembesan air yang melaluinya. Tegangan efektif ini akan bertambah besar atau kecil tergantung pada arah dari rembesan.

2.10.2.1 Rembesan Air Ke Atas



Gambar 2. 34 Peninjauan tegangan efektif untuk suatu tanah jenuh air dengan rembesan air ke arah atas

Rembesan terjadi apabila ada perbedaan tinggi energi (total head). Pada Gambar 2. 36 terdapat perbedaan tinggi energi total (total head) sebesar h pada tabung B dan tabung C sehingga akan terjadi rembesan ke arah tabung C yang terdapat spesimen tanah.

Tegangan efektif pada titik A dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sigma_A = \gamma_{sat} \cdot z + \gamma_w \cdot H$$

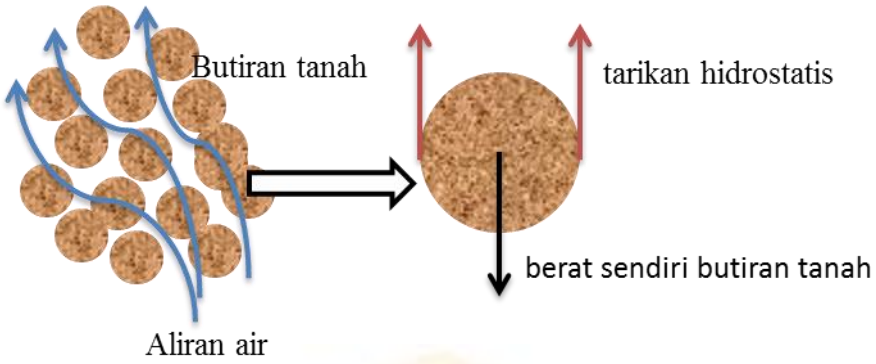
$$u_A = \gamma_w \cdot (z + H + h)$$

$$\sigma'_A = \sigma_A - u_A$$

$$\sigma'_A = \gamma_{sat} \cdot z + \gamma_w \cdot H - \gamma_w \cdot H - \gamma_w \cdot z - \gamma_w \cdot h$$

$$\sigma'_A = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot z - \gamma_w \cdot h$$

$$\sigma'_A = \gamma' \cdot z - \gamma_w \cdot h$$



Gambar 2. 35 Gaya pada butiran tanah akibat rembesan ke atas

Apabila tegangan efektif tanah terus berkurang terus menerus akibat tarikan hidrostatis yang terjadi akibat adanya rembesan maka akan dicapai suatu kondisi dimana tegangan efektif sama dengan 0. Pada saat tersebut tidak ada kekuatan yang menahan butiran tanah lagi sehingga tanah akan tertarik.

$$\sigma' = \gamma' \cdot z - \gamma_w \cdot h_{cr} = 0$$

$$h_{cr} = \frac{\gamma' \cdot z}{\gamma_w}$$

Dimana:

h_{cr} = beda tinggi energi kondisi kritis (untuk keadaan dimana tegangan efektif sama dengan 0)

Sesuai dengan Hukum Darcy gradient hidrolik adalah

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

maka

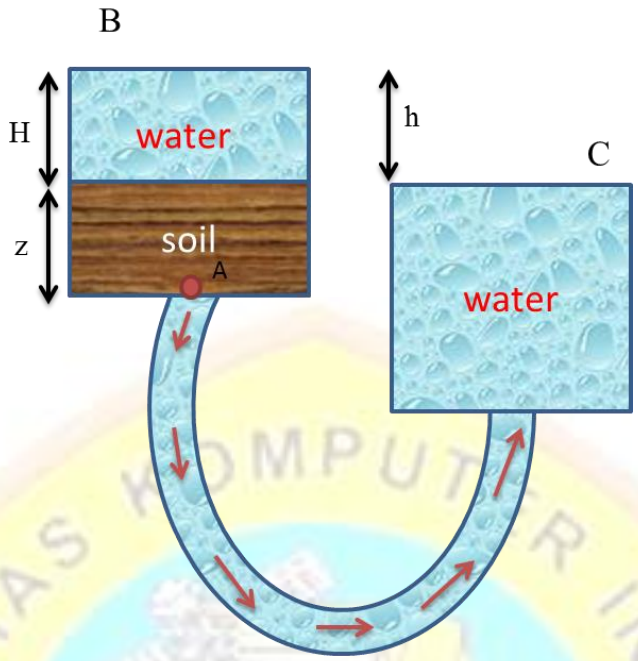
$$i_{cr} = \frac{h_{cr}}{z}$$

$$i_{cr} = \frac{\gamma' \cdot z}{\gamma_w \cdot z}$$

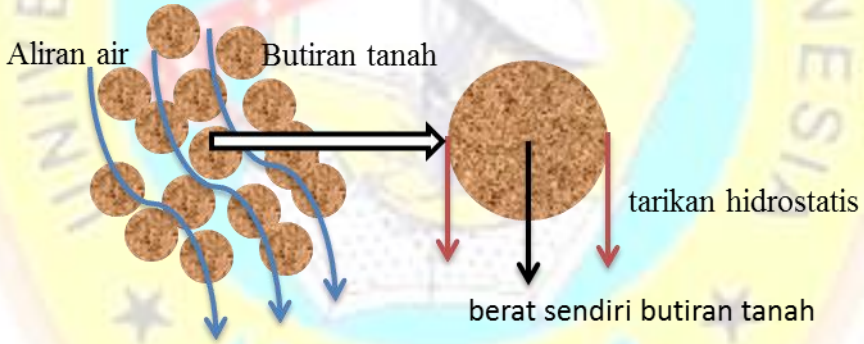
$$i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

Dalam keadaan ini, kestabilan tanah akan hilang. Keadaan ini biasanya dikenal sebagai *boiling* atau *quick condition.*

2.10.2.2 Rembesan Air Ke Bawah



Gambar 2. 36 Peninjauan tegangan efektif untuk suatu tanah jenuh air dengan rembesan air ke arah atas



Gambar 2. 37 Gaya pada butiran tanah akibat rembesan ke bawah

Pada Gambar 2.38 air merembes dari tabung B ke tabung C dan specimen tanah berada tabung B.

Tegangan efektif pada titik A dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sigma_A = \gamma_{sat} \cdot z + \gamma_w \cdot H$$

$$u_A = \gamma_w \cdot (z + H - h)$$

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$\sigma'_A = \gamma_{sat} \cdot z + \gamma_w \cdot H - \gamma_w \cdot H - \gamma_w \cdot z + \gamma_w \cdot h$$

$$\sigma'_A = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \cdot z + \gamma_w \cdot h$$

$$\sigma'_A = \gamma' \cdot z + \gamma_w \cdot h$$

Kesimpulan dari persamaan di atas adalah rembesan mempengaruhi tegangan efektif. Apabila rembesan ke atas maka tegangan efektif akan berkurang sedangkan apabila rembesan ke bawah maka tegangan efektif akan bertambah.

Permeabilitas dan rembesan air di dalam tanah merupakan hal yang perlu diperhatikan dalam merancang suatu bendungan. Seperti diperlihatkan di atas bahwa rembesan dapat mempengaruhi tegangan efektif dari tanah.

Pada tubuh bendungan apabila terjadi rembesan akan menyebabkan terjadinya tarikan pada butiran tanah dan adanya kemungkinan nilai tegangan efektif akan turun. Apabila nilai tegangan efektif lebih kecil dari tekanan air-pori maka akan terdapat potensi ***hydraulic fracture*** pada tubuh bendungan.

2.11 Pemodelan Tanah

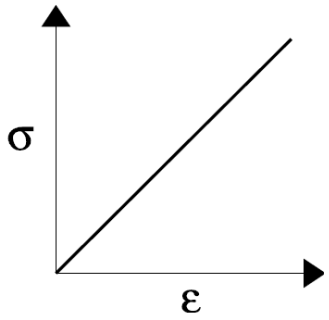
Ketika tanah dibebani maka tanah akan mengalami regangan atau deformasi. Deformasi dapat berupa perubahan bentuk (distorsi) atau perubahan volume. Pada beberapa material deformasi atau regangan dapat terjadi seketika itu juga ketika dibebani atau membutuhkan waktu yang relatif lama.

Hubungan tegangan dan regangan memberikan karakteristik suatu model tanah. Pemodelan tanah yang dipakai untuk analisis tegangan dan regangan yaitu:

1. Linear Elastik
2. Non-linear Elastik (Hyperbolic E-B)
3. Elastic Plastic (Mohr-Coulomb atau Tresca)

2.11.1 Linear Elastik

Model tanah yang paling sederhana adalah model tanah Linear elastik dimana tegangan proporsional dengan regangan. Apabila suatu tanah linear elastic dibebani sedemikian maka akan terjadi regangan dan tanah akan kembali ke bentuk semula apabila beban diambil.



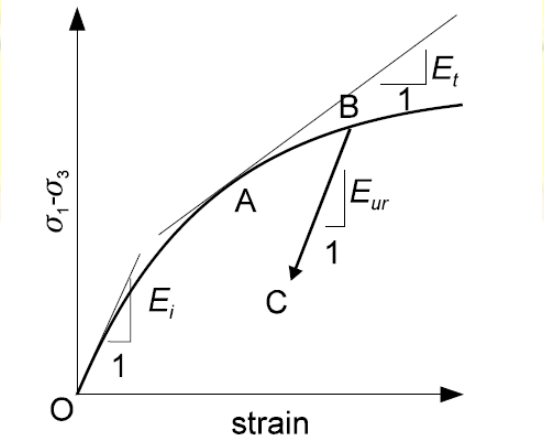
Gambar 2. 38 Grafik Tegangan-Regangan Model Linear Elastik

2.11.2 Non-linear Elastik (Hyperbolic E-B)

Model tanah Hyperbolic E-B dideskripsikan oleh Duncan et al. (1980). Dengan mengasumsikan modulus Bulk konstan selama pembebanan dan modulus elastisitas beragam sesuai dengan hubungan hyperbolic (Duncan dan Chang. 1970). Hasil yang didapatkan adalah ketidak-linearan dari respon tegangan-regangan.

Bulk modulus adalah koefisien elastisitas suatu substansi yang memperlihatkan rasio antara tekanan yang diberikan untuk merubah volume dari substansi dan perubahan fraksi volume yang dihasilkan. (http://dictionary.reference.com/)

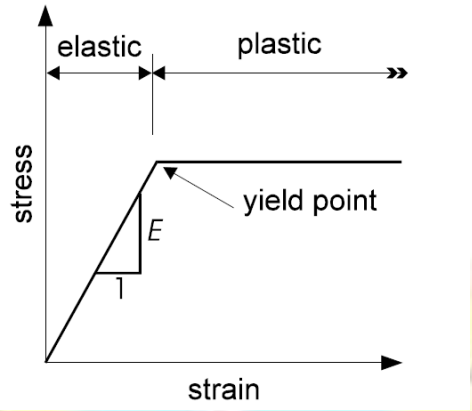
Model Hyperbolic juga memberikan respon yang unik terhadap unloading (beban diambil) dan reloading (beban kembali diberikan). Respon tegangan regangan selama unloading dan reloading (titik B-C) memperlihatkan respon yang lebih kaku dibandingkan respon pembebanan awal (titik O).



Gambar 2. 39 Grafik Tegangan Regangan Model Hyperbolic

2.11.3 Elastic Plastic (Mohr-Coulomb atau Tresca)

Pada pemodelan tanah Elastic plastic, kurva tegangan regangan menunjukkan tegangan proporsi dengan regangan sampai dicapai titik leleh (*yield point*). Setelah melewati titik leleh, maka kurva tegangan dan regangan adalah horizontal.



Gambar 2. 40 Grafik Tegangan Regangan Model Elasto Plastic

2.12 Analisis Uncoupled dan Coupled

Analisis uncoupled adalah analisis dimana persamaan aliran diselesaikan terpisah dengan persamaan kesetimbangan. Sedangkan analisis coupled adalah analisis dimana persamaan aliran deselesaikan serentak dengan persamaan kesetimbangan. Pada pemodelan rembesan dan tegangan, analisis uncoupled tidak menghitung perubahan tekanan air-pori akibat perubahan tegangan total karena tekanan air-pori dihitung secara terpisah dari perubahan tegangan total. Tekanan air-pori dihitung berdasarkan analisis rembesan dengan menggunakan SEEP/W.

Sangat disarankan untuk melakukan analisis persamaan aliran (analisis uncoupled) untuk memperoleh pengertian yang mendalam terhadap rembesan dan kondisi-kondisi batasnya, kemudian melakukan analisis persamaan aliran dan persamaan kesetimbangan secara serentak (analisis coupled).