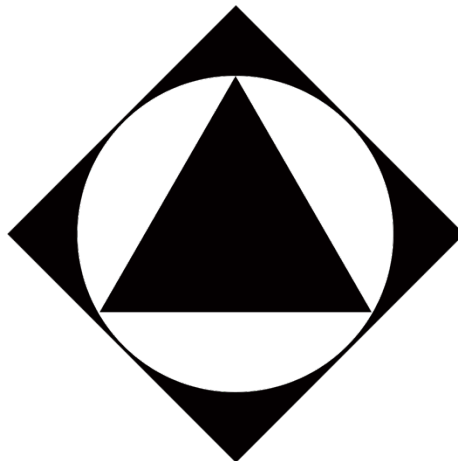


LAPORAN AKHIR PENELITIAN

ANALISIS DEBIT REMBESAN DI BAWAH TUBUH BENDUNG DENGAN PENDEKATAN METODE GRAFIS DAN NUMERIK

**Indra Noer Hamdhan
Fauziah Fitriani Iskandar
Gibral Maulana**



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL - BANDUNG

2018

ANALISIS DEBIT REMBESAN DI BAWAH TUBUH BENDUNG DENGAN PENDEKATAN METODE GRAFIS DAN NUMERIK

Indra Noer Hamdhan¹, Fauziah Fitriani Iskandar² dan Gibril Maulana³

¹Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung, Jl. PHH Mustofa 23 Bandung 40124
Email: indranh@itenas.ac.id

²Program Magister Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung (ITB) Bandung, Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
Email: fauziahfitrianiuji@gmail.com

³Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung, Jl. PHH Mustofa 23 Bandung 40124
Email: gibrilmaulana@gmail.com

ABSTRAK

Rembesan (*seepage*) air yang terjadi di bawah bendung merupakan salah satu penyebab utama dari kegagalan bendung. Upaya yang dilakukan untuk menghindari terjadinya kegagalan akibat rembesan yang terjadi yaitu dengan pemasangan dinding turap. Hal ini dikarenakan jarak tempuh aliran yang terjadi di bawah bendung semakin panjang dan memperbesar hambatan yang dilalui oleh aliran air akibat bidang kontak antara penampang bendung dengan tanah. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besar debit rembesan yang terjadi dibawah bendung dengan beberapa variasi penempatan dinding turap. Selain itu, tanah lempung yang bersifat homogen dibandingkan juga pada kondisi isotropik ($k_v=k_h$) dan anisotropik ($k_v \neq k_h$). Dinding turap pada analisis ini diposisikan di hulu bendung, di hilir bendung dan dinding turap diposisikan di hulu dan hilir bendung. Debit rembesan yang terjadi dibawah bendung dihitung serta dianalisis dengan menggunakan 2 (dua) metode yaitu metode grafis dengan menggunakan *flow net* (jaring aliran) dan metode numerik dengan menggunakan program PLAXIS 2D. PLAXIS 2D merupakan program analisis geoteknik yang berbasis elemen hingga. Tanah lempung sebagai dasar bendung pada analisis ini bersifat homogen dengan lapisan kedap air (*impervious*) pada kedalaman 12 m. Ketinggian muka air pada hulu bendung hingga dasar tanah yaitu 6 m, sedangkan ketinggian muka air di hilir bendung sejajar dengan permukaan tanah tersebut dimana lebar bendung yang dimodelkan yaitu 18 meter. Tanah pada kondisi anisotropik memiliki nilai permeabilitas arah horizontal lebih besar dari pada nilai permeabilitas arah vertikal, dimana nilai permeabilitas arah horizontal lebih besar sembilan kali lipat nilai permeabilitas arah vertikal ($k_h = 9k_v$). Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode jaring aliran (*flow net*) dan metode numerik (*numerical method*) terjadi reduksi debit rembesan pada ke-empat kondisi penempatan dinding turap. Pada kondisi isotropik, dinding turap dapat mereduksi debit rembesan hingga 25% dengan menggunakan metode jaring aliran (*flow net*) dan debit rembesan akan tereduksi sebesar 26% apabila dihitung menggunakan metode numerik. Sedangkan pada kondisi anisotropik, debit rembesan akan tereduksi hingga 44% apabila dihitung menggunakan metode jaring aliran (*flow net*) dan 35% apabila dihitung menggunakan metode numerik. Perbedaan debit rembesan pada ke-empat kondisi pemodelan dengan kedua metode pendekatan didapatkan bahwa perbedaan debit rembesan pada tanah isotropik tidak signifikan yaitu 3% hingga 5% sedangkan pada tanah anisotropik perbedaan debit rembesan 20% hingga 32%. Metoda numerik akan menunjukkan hasil yang konservatif pada kondisi tanah anisotropik dimana pada perencanaan bendung, debit rembesan yang terjadi harus diminimalisir.

Kata kunci: debit rembesan, isotropik, anisotropik, jaring aliran dan PLAXIS 2D.

1. PENDAHULUAN

Debit rembesan pada bendungan merupakan faktor utama dalam mendesain stabilitas bendung. Rembesan terjadi karena adanya perbedaan tinggi energi akibat beda tinggi muka air. Rembesan merupakan aliran yang secara terus menerus mengalir dari hulu menuju hilir atau dari tinggi energi total yang besar ke energi total yang kecil. Bendung dan bendungan memiliki fungsi yang berbeda. Bendung bertujuan untuk meninggikan muka air, yang mengakibatkan bedanya tinggi energi di hulu dan di hilir bendung. Sedangkan bendungan digunakan untuk pengendali debit rembesan akibat bedanya elevasi permukaan air yang mengalir.

Salah satu solusi untuk memperkecil nilai debit rembesan yang terjadi dibawah tubuh bendung yaitu dengan pemasangan dinding turap. Pemasangan dinding turap dibawah tubuh bendung diharapkan dapat mereduksi debit

rembesan. Hal ini dikarenakan jarak tempuh aliran rembesan dari hulu hingga keluar di hilir bendung menjadi lebih jauh dan memperbesar hambatan yang dilalui oleh aliran air akibat bidang kontak antara penampang bendung dengan tanah.

Tanah terdiri dari dua bagian yaitu bagian padat dan bagian rongga. Bagian padat terdiri dari partikel-partikel tanah, sedangkan bagian rongga terisi oleh air atau udara. Ukuran partikel-partikel tanah mempengaruhi cepat-lambat air dapat mengalir. Sifat kemampuan tanah dapat dilewati air melalui pori-pori tanah dapat disebut permeabilitas (*permeability*). Tanah berbutir halus memiliki nilai permeabilitas yang kecil dibandingkan tanah yang berbutir kasar. Hal ini diakibatkan tanah berbutir halus memiliki rongga pori yang kecil sedangkan tanah berbutir kasar memiliki rongga pori yang besar. Tanah yang bersifat rembesan kecil dan daya rembes besar disebabkan ukuran rongga pori dan butiran-butiran tanah yang kecil, sedangkan tanah yang bersifat rembesan besar dan daya rembes kecil disebabkan ukuran rongga pori dan butiran tanah yang besar (Bowles, 1989). Aliran air yang melewati pori-pori akan membawa partikel-partikel tanah. Akibat perpindahnya partikel-partikel tanah maka terjadi pembesaran ruang pori diantar butiran tanah. Pembesaran ruang pori ini akan menyebabkan debit air yang mengalir semakin besar dan volume tanah akan berkurang. Tanah yang memiliki nilai permeabilitas arah vertikal dan horizontal bernilai sama maka tanah tersebut disebut tanah dengan kondisi isotropik. Sedangkan tanah yang memiliki nilai permeabilitas arah vertikal dan horizontal yang berbeda disebut tanah dengan kondisi anisotropik.

Maksud dan tujuan penelitian ini adalah melakukan analisis terhadap debit rembesan yang terjadi dengan memvariasikan posisi penempatan dinding turap pada tanah isotropik dan anisotropik dengan dua metode pendekatan yaitu metode jaring aliran (*flow net*) dan metode numerik (*numerical method*). Metode Jaring aliran (*flow net*) merupakan metode yang didasarkan pada pendekatan jaring aliran yang berupa garis ekuipotensial dan garis aliran, sedangkan pada metode numerik menggunakan metode yang berbasis elemen hingga (PLAXIS 2D) sehingga didapatkan debit rembesan pada kondisi tanah isotropik dan anisotropik. Pemodelan yang dilakukan pada analisis debit rembesan dibawah tubuh bendung yaitu dengan membandingkan debit rembesan pada kondisi tanpa dinding turap, dinding turap di hulu bendung, dinding turap di hilir bendung serta dinding turap di hulu dan di hilir bendung.

2. TINJAUAN PUSTAKA

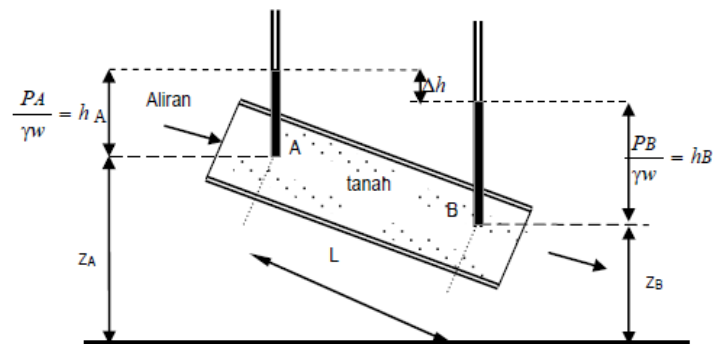
Aliran air dalam tanah

Aliran air mengalir diakibatkan adanya perbedaan tinggi energi total yang mengalir dari tinggi energi total yang besar ke tinggi energi total yang kecil. Tinggi energi total (*total head*) merupakan pertambahan tinggi energi elevasi (*elevation head*) dan tinggi energi tekanan (*pressure head*) seperti pada Gambar 1. Menurut Triatmojo (1996) persamaan bernoulli berlaku untuk aliran *steady flow* satu dimensi, aliran air diasumsikan zat cair ideal dan tidak termampatkan. Besarnya tekanan air pori yang terjadi pada kedalaman dibawah muka air tanah dengan persamaan Bernoulli memberikan suatu persamaan :

$$h - h_p - h_v - h_e = \text{konstan energi} \quad (1)$$

$$h - \frac{u}{\gamma_w} - \frac{v^2}{2g} - z = \text{konstan energi} \quad (2)$$

dengan h = tinggi energi total (m), u / γ_w = tinggi energi tekanan (m), $v^2/2g$ = tinggi energi kecepatan (m), z = tinggi energi elevasi (m), u = tekanan air tanah (kN/m^2), γ_w = berat isi air (kN/m^3), v = kecepatan air (m/s), g = percepatan gravitasi (m/s^2). Kecepatan rembesan di dalam tanah sangat kecil, sehingga tinggi energi kecepatan ($v^2/2g = 0$).



Gambar 1. Tekanan, elevasi dan tinggi energi total aliran dalam tanah (Harseno, 2008)

Hukum darcy merupakan dasar teori yang digunakan untuk menggambarkan aliran air melalui tanah dalam kondisi jenuh dan tidak jenuh. Hukum ini mengasumsikan bahwa aliran air di dalam tanah merupakan aliran laminar. Menurut Darcy (1856), kecepatan air dan gradient hidrolik dapat dihubungkan sebagai berikut.

$$v = k.i \quad (3)$$

dengan v = kecepatan aliran (m/s), i = gradien hidrolik dan k = koefisien permeabilitas (m/s).

sedangkan untuk mendapatkan besar debit rembesan dapat dinyatakan sebagai berikut:

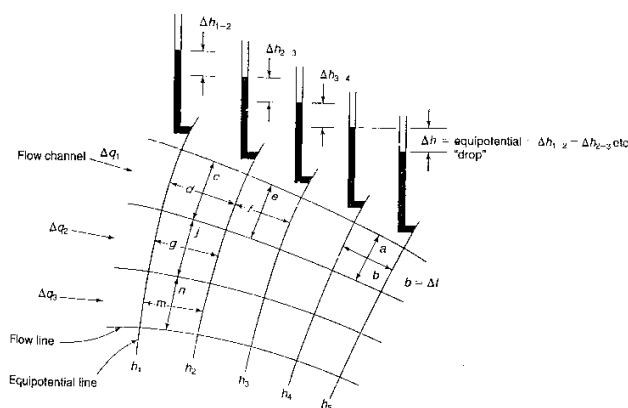
$$q = v.A = k.i.A = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (4)$$

dengan q = total debit rembesan (m^3/s), k = koefisien permeabilitas (m/s), i = Gradien hidrolik, A = Luas penampang tanah (m^2), Δh = potensial drop (m) dan L = panjang aliran (m).

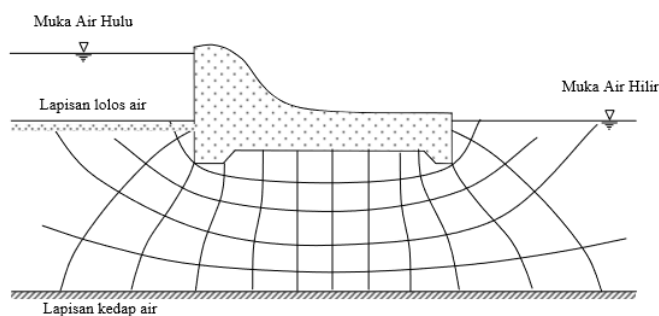
Penyelesaian untuk memecahkan aliran air dalam tanah terdapat beberapa solusi, yaitu *close-form solution*, *model solution* dan *Approximate solution*. *Approximate solution* terdapat dua solusi pendekatan yaitu *graphical solution* dan *numerical method*. Salah satu analisis berupa *graphical method* yaitu pembuatan jaring aliran (*flow net*). Jaring aliran merupakan solusi dalam permasalahan aliran air dalam tanah dengan menggambarkan garis aliran (*flow line*) dan garis ekuipotensial (*equipotential line*), sedangkan solusi *numerical method* merupakan metode yang berbasis elemen hingga (*finite element method*). salah satu program numerik yang berbasis metode elemen hingga yaitu PLAXIS 2D.

Solusi pendekatan menggunakan jaring aliran (*flow net*)

Jaring aliran terdiri dari dua garis yang saling tegak lurus satu sama lain yaitu garis aliran (*flow line*) dan garis ekuipotensial (*equipotential line*). Garis aliran (*flow line*) adalah garis dimana butiran butiran air akan bergerak dari hulu menuju hilir melalui media tanah yang tembus air (*permeable*). Sedangkan garis ekuipotensial (*equipotential line*) adalah garis dengan nilai tinggi potensial di setiap titik pada garis tersebut bernilai sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Jaring aliran yang berupa garis aliran (*flow line*) dan garis ekuipotensial (*equipotential line*) merupakan konsep ilustrasi grafik dimana terjadi hilangnya energi sesuai dengan aliran air pada media poros. Kombinasi dari beberapa garis aliran dan garis-garis ekuipotensial dinamakan jaringan aliran (*flow net*) seperti pada Gambar 2. Penggambaran jaring aliran (*flow net*) terdapat beberapa cara, yaitu metode *trial and error sketching*, cara analitis, pemodelan di laboratorium dan analogi listrik.



Gambar 2. Ilustrasi jaring aliran berupa garis aliran dan garis ekuipotensial (Holtz, 2011)



Gambar 3. Jaringan aliran (Hardiyatmo, H.C., 2006)

Jaringan aliran ini didasarkan pada persamaan kontinuitas Laplace yang menjelaskan mengenai keadaan aliran yang terus menerus (*steady state*) untuk suatu titik di dalam massa tanah. Jaringan aliran (*Flow net*) merupakan solusi pendekatan secara grafis dari persamaan Laplace pada dua dimensi sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

dengan x dan y = kordinat arah rembesan dan h = total energi pada kordinat (x,y)

$$q = k.h. \left(\frac{a}{b} \right) \left(\frac{N_f}{N_d} \right) \quad (6)$$

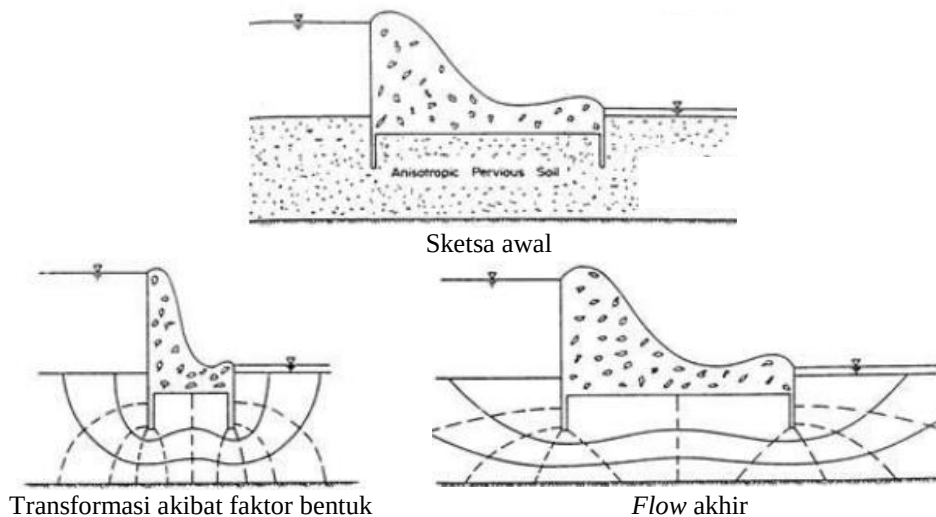
Garis aliran dan garis ekipotensial memotong tegak lurus garis aliran dan elemen-elemen aliran hingga mendekat bentuk bujur sangkar seperti pada Gambar 3. Jika dalam penggambaran jaring aliran berbentuk bujur sangkar pada *flow net* maka a = b. Hal ini mengakibatkan persamaan debit rembesan yang terjadi menjadi :

$$q = k.h. \left(\frac{N_f}{N_d} \right) \quad (7)$$

dengan k = koefisien permeabilitas (m/s), h = total kehilangan energi (m), N_f = jumlah alur aliran, N_d = jumlah penurunan energi atau potensial, N_f/N_d disebut dengan faktor bentuk.

Kondisi tanah anisotropik

Tanah anisotropik merupakan kondisi tanah memiliki nilai permeabilitas arah dan nilai horizontal maupun vertikal tidak sama ($k_H \neq k_V$). Tanah dapat dikatakan anisotropik meskipun tanah tersebut homogen. Oleh sebab itu, agar persamaan Laplace dapat berlaku maka pemodelan tanah anisotropik dibuat faktor skala pada sumbu x (searah potongan memotong bendung) dengan mengtransformasikan aliran tanah anisotropik menjadi aliran isotropik seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Transformasi jaring aliran akibat kondisi tanah anisotropik di bawah bendung (Perloff and Baron, 1876)

Perubahan skala pada sumbu x dapat dituliskan sebagai berikut :

$$x = \sqrt{\frac{k_V}{k_H}} \quad (8)$$

dengan $\bar{x}$ = perubahan skala, k_V = nilai koefisien permeabilitas arah vertikal (m/s), k_H = nilai koefisien permeabilitas arah horizontal (m/s). Efek dari transformasi tersebut maka nilai permeabilitas yang digunakan menggunakan nilai permeabilitas ekuivalen (k_{ek}), nilai permeabilitas ekuivalen dapat dituliskan sebagai berikut :

$$k_{ek} = \sqrt{k_H \cdot k_V} \quad (9)$$

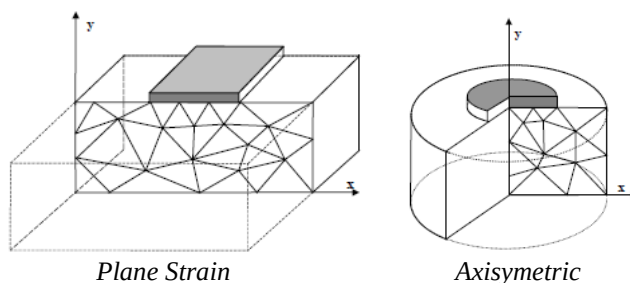
Dengan k_{ek} = nilai permeabilitas ekuivalen (m/s), k_v = nilai koefisien permeabilitas arah vertikal (m/s), k_h = nilai koefisien permeabilitas arah horizontal (m/s). Sehingga debit rembesan dapat dihitung :

$$q = k_{eh} \cdot h \cdot \frac{N_f}{N_d} \quad (10)$$

dengan q = debit rembesan (m/s^3), k_{ek} = nilai permeabilitas ekuivalen (m/s), Δh = potensial *drop* (m), N_f = jumlah alur aliran dan N_d = jumlah penurunan energi atau potensial.

Solusi pendekatan metode numerik menggunakan PLAXIS 2D

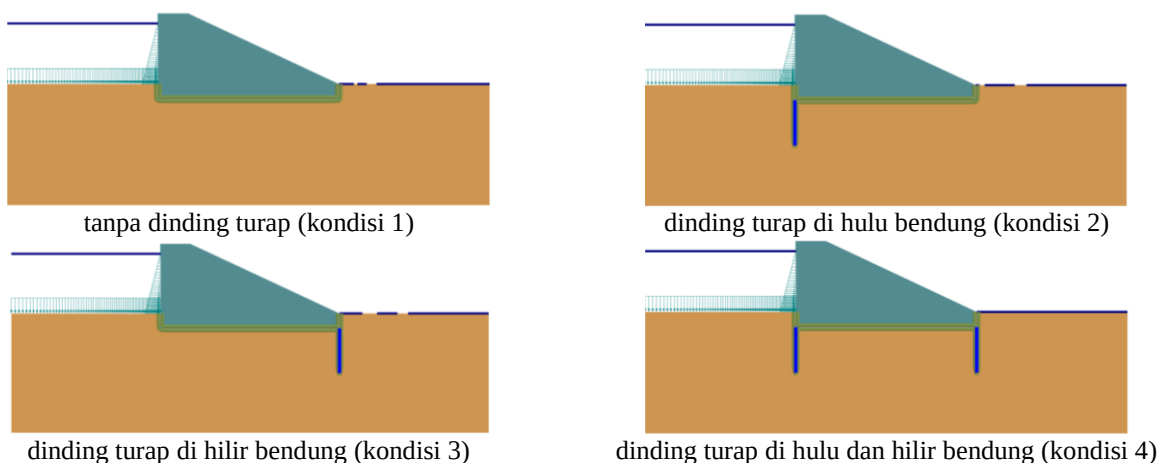
PLAXIS merupakan perangkat lunak yang dapat digunakan dalam berbagai permasalahan geoteknik, salah satunya aliran air dalam tanah (*seepage*). Metode elemen hingga (*finite element method*) sebagai dasar analisis pada program PLAXIS 2D. Dalam analisis menggunakan PLAXIS, pemodelan dibagi menjadi elemen-elemen yang disebut sebagai jaring elemen hingga. Menurut Brinkgreve (2016) pada manual PLAXIS 2D, jenis elemen dasar dari suatu jaring elemen adalah elemen segitiga dengan 15 titik nodal atau elemen segitiga dengan 6 nodal. Pada PLAXIS 2D terdapat dua tipe pemodelan yaitu kondisi pemodelan *Plane Strain* dan pemodelan *Axisymmetric* seperti pada Gambar 6. Kondisi *Plane-strain* digunakan apabila dalam analisis memiliki potongan melintang dan kondisi tegangan yang seragam, sedangkan kondisi *axisymmetric* digunakan apabila dalam analisis struktur atau pemodelan lingkaran yang memiliki potongan radial dan pembebanan yang seragam terhadap arah radialnya.



Gambar 6. Tipe pemodelan *plane strain* dan *axisymmetric* pada PLAXIS 2D (Brinkgreve, 2016)

3. PEMBAHASAN

Pembahasan pada analisis ini, membandingkan empat kondisi pemodelan rembesan dibawah tubuh bendung yaitu, pemodelan tanpa dinding turap, pemodelan dengan dinding turap di hulu bendung, pemodelan dengan dinding turap di hilir bendung serta pemodelan dengan dinding turap di hulu dan hilir bendung seperti pada Gambar 7. Pemodelan tersebut dilakukan dengan menggunakan *graphical method* yaitu metode jaring aliran (*flow net*) dan metode numerik (*numerical method*).



Gambar 7. Kondisi pemodelan dengan variasi penempatan dinding turap pada tanah isotropik dan anisotropik

Pada kondisi pemodelan tersebut akan dianalisis dengan dua kondisi tanah, yaitu kondisi tanah isotropik dan anisotropik. Pemodelan kondisi tanah isotropik nilai permeabilitas arah horizontal bernilai sama ($k_h = k_v$), sedangkan kondisi tanah anisotropik memiliki nilai permeabilitas arah horizontal lebih besar dari pada nilai permeabilitas arah

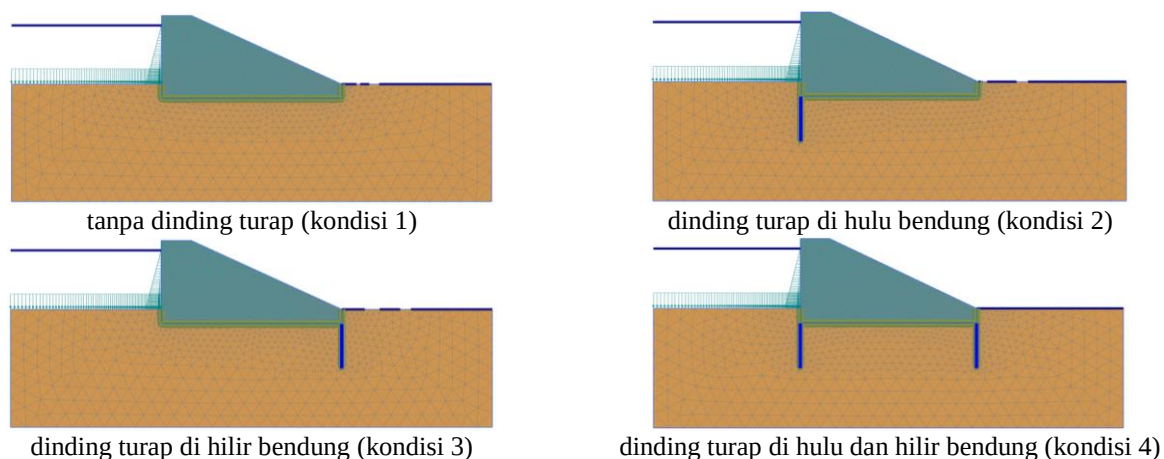
vertikal, dimana nilai permeabilitas arah horizontal lebih besar sembilan kali lipat nilai permeabilitas arah vertikal. Analisis debit rembesan pada pemodelan ini dilakukan pada tanah lempung homogen dengan lapisan kedap air (*impervious*) pada kedalaman 12 m. Ketinggian muka air pada hulu bendung hingga dasar tanah yaitu 6 m, sedangkan ketinggian muka air di hilir bendung tepat berada di permukaan tanah tersebut. Bendung pada pemodelan ini berupa bendung beton dengan lebar bendung yang dimodelkan yaitu 18 meter. Elevasi dasar bendung berada pada kedalaman 1.5 m pada tanah dasar. Dinding turap yang digunakan berupa beton dengan panjang dinding turap yaitu 4.5 m dari dasar tubuh bendung.

Analisis menggunakan solusi pengedekatan menggunakan metode numerik (PLAXIS 2D)

Analisis menggunakan PLAXIS 2D langkah yang harus dilakukan sebelum melakukan perhitungan yaitu penentuan model geometri, model material dan penentuan parameter. Pada analisis pemodelan menggunakan PLAXIS 2D model geometri menggunakan tipe pemodel *Plane Strain*, hal ini dikarenakan pada potongan melintang memiliki tegangan yang seragam. Model yang digunakan untuk tanah dan bendung beton pada PLAXIS 2D menggunakan kluster. Kluster merupakan suatu area yang dibatasi garis geometri dan setiap kluster memiliki sifat material tertentu untuk memodelkan perilaku tanah atau struktur. Sedangkan dinding turap menggunakan elemen pelat yang merupakan objek struktural yang memodelkan struktur yang tipis dalam tanah dengan kekakuan lentur yang signifikan serta kekakuan normal. Setiap terjadinya interaksi antara permukaan bendung beton dan dinding turap yang berhubungan dengan tanah dalam pemodelan menggunakan *interface*. Tujuan penggunaan *interface* dalam pemodelan yaitu memberikan faktor ketebalan dan mencegah terjadinya aliran air dalam media struktur yang kedap air dalam analisis aliran air dalam tanah.

Material model yang digunakan pada tanah lempung yaitu Mohr-Coulomb. Parameter tanah lempung yang digunakan yaitu $\gamma_{\text{unsat}} = 16 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}} = 17 \text{ kN/m}^3$, $E' = 20000 \text{ kN/m}^2$, $\nu' = 0.3$, $c = 100 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 5^\circ$, $\psi = 0^\circ$, $k_v = 0.1 \text{ m/hari}$. Tanah lempung isotropik nilai permeabilitas arah horizontal bernilai sama dengan arah vertikal ($k_h = k_v$), namun pada tanah lempung anisotropik lebih besar sembilan kali lipat dari nilai permeabilitas arah vertikal ($k_h = 9 k_v = 0.9 \text{ m/hari}$). Parameter bendung beton yang digunakan yaitu $\gamma_{\text{unsat}} = 20 \text{ kN/m}^3$, $E = 23500 \text{ kN/m}^2$, sedangkan input parameter dinding turap yaitu $EA = 4.867 \times 10^6 \text{ kN/m}$, $EI = 4.895 \times 10^4 \text{ kN/m}$, $d = 0.347 \text{ m}$ dan $w = 3.290 \text{ kN/m/m}$.

Proses pembagian struktur menjadi elemen-elemen untuk melakukan perhitungan setiap jaring yang disebut *Mesh*. Jenis *mesh* yang digunakan yaitu *very fine* berikut hasil *mesh* pada ke-empat kondisi pemodelan yang ditunjukkan pada Gambar 8.

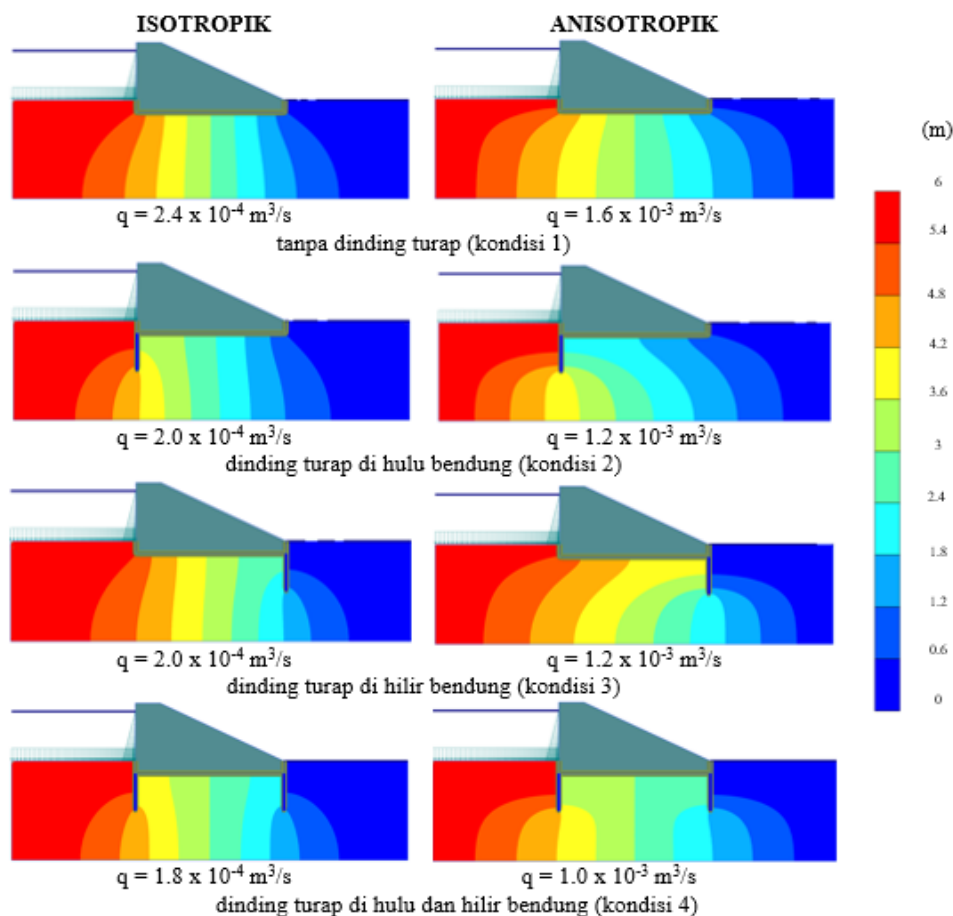


Gambar 8. Jaring-jaring elemen pada pemodelan menggunakan PLAXIS 2D untuk kondisi isotropik dan anisotropik

Hasil analisis aliran dalam tanah menggunakan PLAXIS 2D yaitu debit rembesan, arah rembesan dan penggambaran perubahan beda tinggi energi tegangan pada tanah isotropik dan anisotropik. Perubahan tinggi energi tegangan dalam analisis ini, dibagi menjadi sepuluh bagian atau sepuluh potensial drop sehingga perubahan tinggi energi tegangan dapat dibandingkan. Hasil Perubahan tinggi energi tegangan dan debit rembesan yang terjadi tepat di tengah bendung pada ke-empat kondisi pemodelan isotropik dan anisotropik menggunakan PLAXIS 2D dapat dilihat pada Gambar 9.

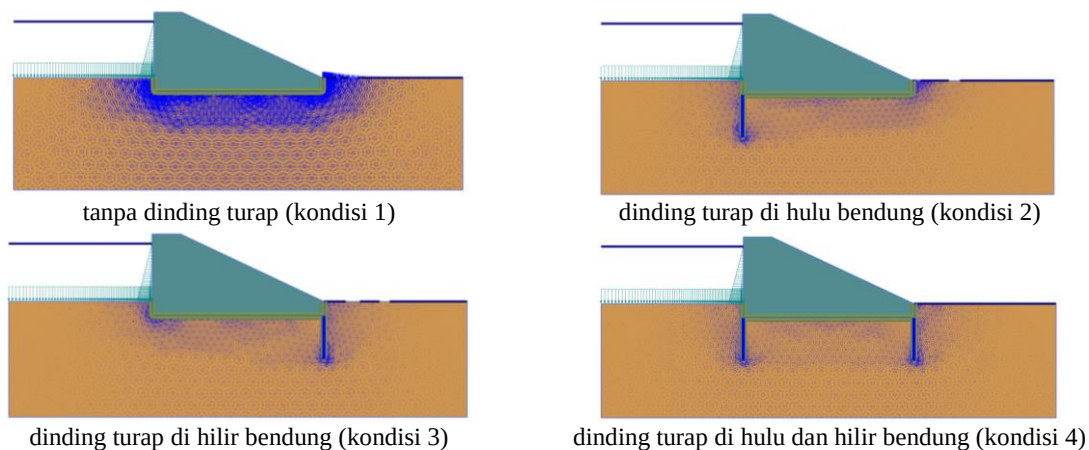
Perubahan bentuk akibat perbedaan tinggi energi pada tanah isotropik dan tanah anisotropik terlihat berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pada tanah anisotropik bentuk perubahan akibat perbedaan tinggi energi lebih melebar dibandingkan pada tanah isotropik. Hal ini dikarenakan pada tanah anisotropik nilai permeabilitas arah

horizontal lebih besar dibandingkan nilai permeabilitas arah vertikal. Arah rembesan yang terjadi dari ke-empat kondisi pemodelan pada tanah isotropik dan anisotropik dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Pada kondisi 2 dan kondisi 3 memiliki penempatan dinding turap yang berbeda, namun debit rembesan pada pada kondisi 2 dan kondisi 3 bernilai sama. Hal ini dikarenakan pada kondisi 2 dan kondisi 3 memiliki panjang aliran yang sama.

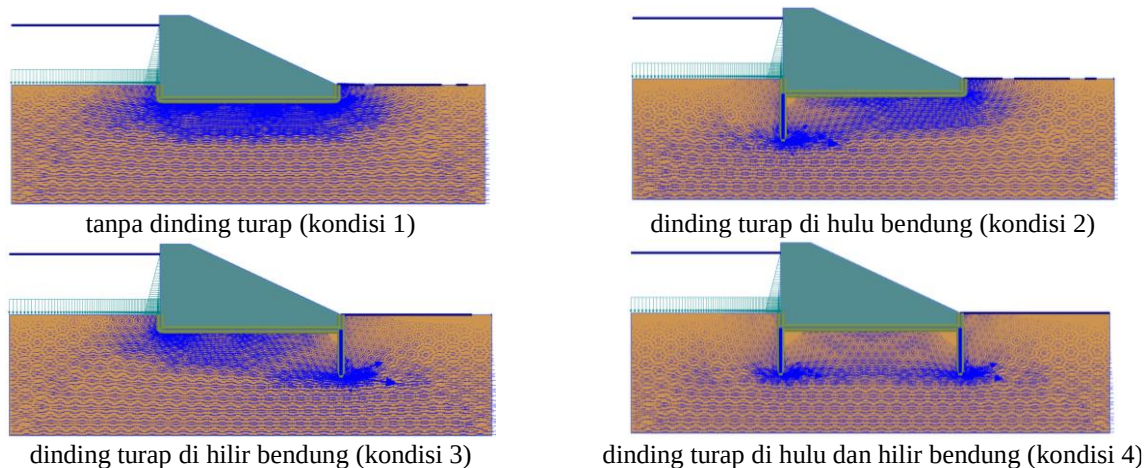


Gambar 9. Debit rembesan dan tinggi energi yang terjadi pada tanah isotropik dan anisotropik

Pada Gambar 10 dan Gambar 11 dapat dilihat bahwa arah pergerakan aliran rembesan pada tanah isotropik dan anisotropik dengan adanya turap arah pergerakan rembesan lebih sedikit dibandingkan tanpa adanya dinding turap. Jika dibandingkan arah pergerakan rembesan pada tanah isotropik dan anisotropik. Pada tanah anisotropik arah rembesan yang terjadi lebih banyak dibandingkan pada tanah isotropik. Arah pergerakan rembesan pada tanah anisotropik pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa rembesan arah horizontal lebih mendominasi dibandingkan arah vertikal akibat perbedaan nilai permeabilitas arah vertikal dan horizontal.



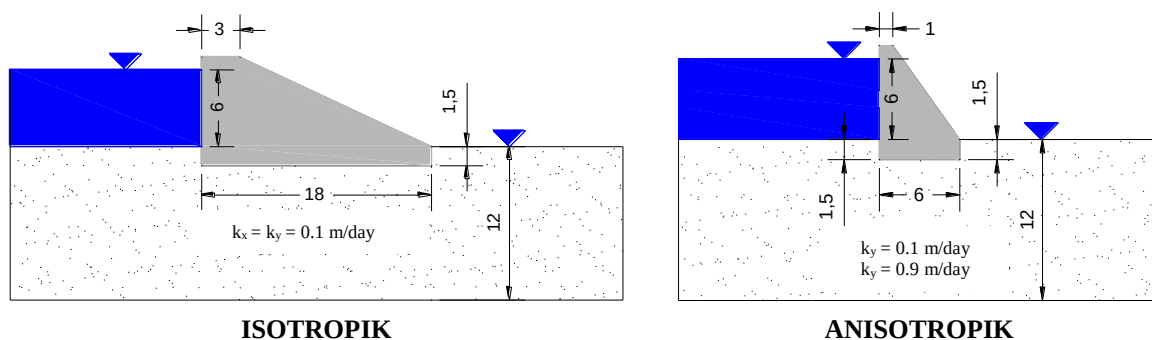
Gambar 10. Arah pergerakan debit rembesan di sekitar bendung dan dinding turap pada tanah isotropik



Gambar 11. Arah pergerakan debit rembesan disekitar bendung dan dinding turap pada tanah anisotropik

Analisis menggunakan solusi pendekatan menggunakan jaring aliran (*flow net*)

Dalam analisis ini, proses penggambaran jaring aliran (*flow net*) menggunakan metode *trial and error sketching*. Hal yang diperhatikan dalam penggambaran jaring aliran yaitu ketegaklurusan dan adanya kondisi batas. Kondisi batas pada pemodelan jaring aliran (*flow net*) sesuai dengan lapisan kedap air yaitu pada kedalaman 12 m. Pada kondisi isotropik dalam pembuatan jaring aliran, pemodelan tidak terjadi perubahan skala, sedangkan kondisi anisotropik terjadi perubahan skala akibat adanya perbedaan nilai permeabilitas, nilai permeabilitas arah horizontal lebih besar sembilan kali lipat nilai permeabilitas arah vertikal ($k_h = 9 k_v$). Perubahan skala (α) yang terjadi sesuai dengan Pers. 8 pada tanah anisotropik, maka pada arah horizontal menjadi sepertiga dari kondisi isotropik. Kondisi isotropik dan anisotropik dengan perubahan skala yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 12.

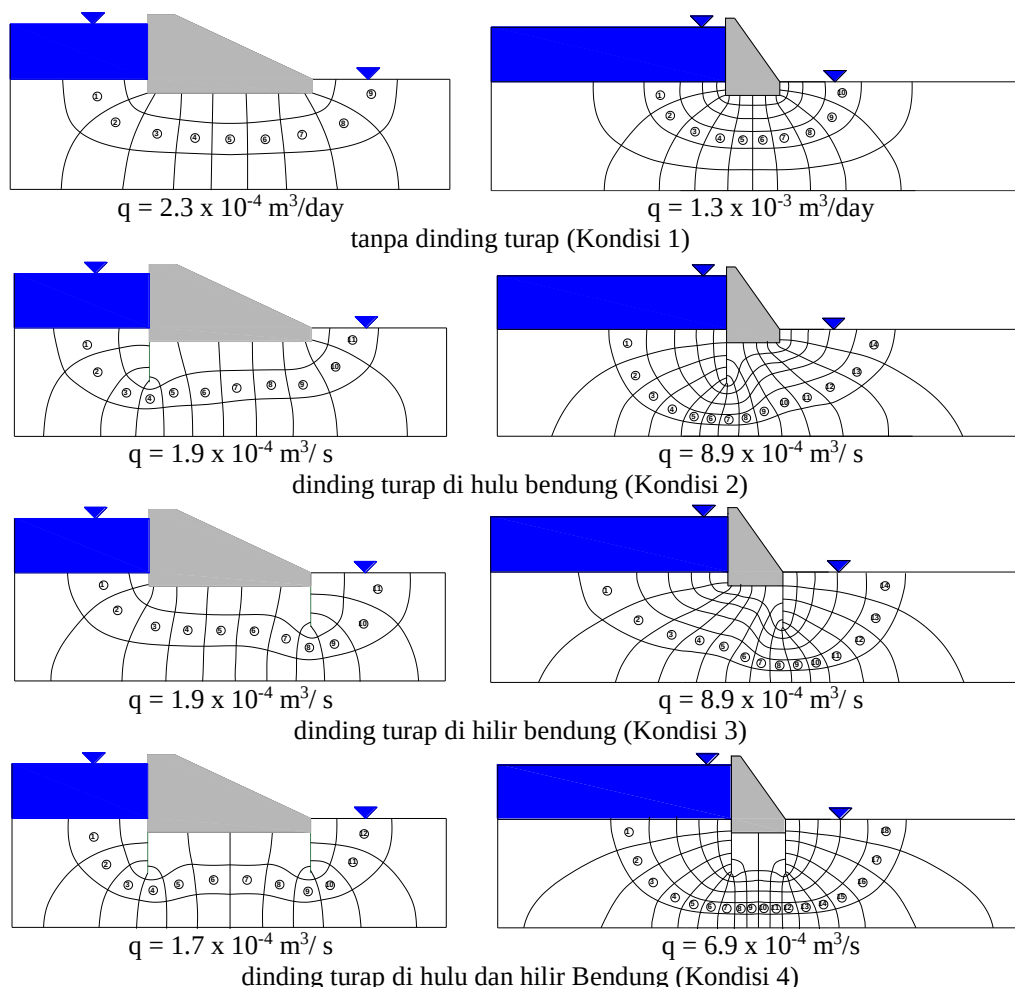


Gambar 12. Pemodelan isotropik dan anisotropik pada jaring aliran (*flow net*)

Dalam pembuatan jaring aliran (*flow net*), garis aliran (*flow line*) ditentukan terlebih dahulu, untuk kondisi tanah isotropik garis aliran yang digunakan berjumlah 3 sedangkan pada tanah anisotropik berjumlah 6. Hasil pembuatan jaring aliran (*flow net*) dengan menggunakan metode *trial and error* dan debit rembesan yang terjadi dengan perhitungan Pers. 7 untuk tanah isotropik dan Pers. 10 tanah anisotropik dapat dilihat pada Gambar 13.

Jaring aliran (*flow net*) menggunakan metode *trial and error* pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa pemodelan dengan adanya turap memperbesar jumlah garis ekipotensial, sehingga berbanding N_f/N_d atau faktor bentuk menjadi lebih kecil. Faktor bentuk tersebut mengakibatkan debit rembesan yang terjadi pun menjadi lebih kecil dibandingkan dengan pemodelan tanpa adanya turap.

Setelah analisis debit rembesan pada ke-empat kondisi pemodelan menggunakan *graphical method* dengan solusi pendekatan metode jaring aliran (*flow net*) dan *numerical method* yang berbasis metode elemen hingga (PLAXIS 2D), hasil kedua analisis tersebut direkap pada Tabel 1 dan Tabel 2. Pada Tabel 1 untuk mengetahui persen reduksi debit rembesan yang terjadi akibat adanya turap dibandingkan dengan kondisi tanpa turap, sedangkan persen perbedaan hasil debit rembesan menggunakan metode pendekatan jaring aliran (*flow net*) dan (*numerical method*) dibandingkan dengan metode numerik dapat dilihat pada Tabel 2 sebagai berikut.



Gambar 13. Jaringan aliran (*flow net*) menggunakan metode *trial and error* pada kondisi isotropik dan anisotropik

Tabel 1. Rekapitulasi Persen Debit Rembesan dengan Pendekatan Jaringan Aliran (*Flow Net*) dan (*Numerical Method*) Akibat Adanya Dinding Turap dan Tanpa Adanya Dinding Turap.

Kondisi	Nilai Permeabilitas ky = 0.1 m/day	Debit Rembesan (m³/s)		% Reduksi Debit Rembesan	
		Jaring Aliran	PLAXIS 2D	Jaring Aliran	PLAXIS 2D
Isotropik					
Kondisi 1	kx = ky	2.3 x 10 ⁻⁴	2.4 x 10 ⁻⁴	0.00	0.00
Kondisi 2	kx = ky	1.9 x 10 ⁻⁴	2.0 x 10 ⁻⁴	18.18	15.61
Kondisi 3	kx = ky	1.9 x 10 ⁻⁴	2.0 x 10 ⁻⁴	18.18	15.61
Kondisi 4	kx = ky	1.7 x 10 ⁻⁴	1.8 x 10 ⁻⁴	25.00	26.97
Anisotropik					
Kondisi 1	kx = 9ky	1.3 x 10 ⁻³	1.6 x 10 ⁻³	0.00	0.00
Kondisi 2	kx = 9ky	8.9 x 10 ⁻⁴	1.2 x 10 ⁻³	28.57	23.33
Kondisi 3	kx = 9ky	8.9 x 10 ⁻⁴	1.2 x 10 ⁻³	28.57	23.40
Kondisi 4	kx = 9kv	6.9 x 10 ⁻⁴	1.0 x 10 ⁻³	44.44	35.00

Hasil kedua analisis menggunakan metode jaringan aliran dan metode numerik menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode jaringan aliran dan metode numerik menyebabkan terjadinya reduksi debit rembesan baik posisi dinding turap di hulu bendung (kondisi 2), dinding turap di hilir bendung (kondisi 3) dan dinding turap di posisi keduanya (kondisi 4) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Reduksi debit rembesan yang terjadi pada tanah isotropik hingga 25% untuk analisis jaringan aliran dan 26% pada analisis menggunakan PLAXIS 2D. Sedangkan reduksi debit rembesan pada tanah anisotropik pada analisis menggunakan jaringan aliran yaitu 44% dan analisis menggunakan PLAXIS 2D yaitu 35%.

Pada Tabel 2 menunjukkan perbedaan debit rembesan pada tanah isotropik untuk kedua metode yang digunakan tidak signifikan, yaitu hanya berbeda 1% hingga 6%. Sedangkan debit rembesan pada tanah anisotropik, memiliki

perbedaan yang cukup signifikan untuk kedua metode ini, yaitu berbeda 20% hingga 32%. Dalam metode jaring aliran pada tanah isotropik tidak dilakukan transformasi dimensi bendung dalam arah horizontal, sehingga debit rembesannya hampir sama dengan metode numerik (PLAXIS 2D), sedangkan pada tanah anisotropik dilakukan transformasi dimensi bendung dalam arah horizontal sehingga terjadi perbedaan yang signifikan dengan metode numerik (PLAXIS 2D). Analisis rembesan menggunakan metode numerik menggunakan nilai permeabilitas yang berbeda untuk arah vertikal dan horizontal yang lebih konservatif, sehingga debit rembesan yang dihasilkan akan lebih akurat dibandingkan dengan metode jaring aliran (*flow net*).

Tabel 2. Rekapitulasi Persen Debit Rembesan pada Ke-empat Pemodelan dengan Menggunakan Metode Pendekatan Jaring Aliran (*flow net*) dan metode numerik (*numerical method*)

Kondisi	Nilai Permeabilitas ky = 0.1 m/day	Debit rembesan (m³/s)		% Jaring Aliran & PLAXIS 2D
		Jaring Aliran	PLAXIS 2D	
Isotropik				
Kondisi 1	kx = ky	2.3 x 10 ⁻⁴	2.4 x 10 ⁻⁴	3.7
Kondisi 2	kx = ky	1.9 x 10 ⁻⁴	2.0 x 10 ⁻⁴	6.6
Kondisi 3	kx = ky	1.9 x 10 ⁻⁴	2.0 x 10 ⁻⁴	6.6
Kondisi 4	kx = ky	1.7 x 10 ⁻⁴	1.8 x 10 ⁻⁴	1.1
Anisotropik				
Kondisi 1	kx = 9ky	1.3 x 10 ⁻³	1.6 x 10 ⁻³	20.8
Kondisi 2	kx = 9ky	8.9 x 10 ⁻⁴	1.2 x 10 ⁻³	26.2
Kondisi 3	kx = 9ky	8.9 x 10 ⁻⁴	1.2 x 10 ⁻³	26.1
Kondisi 4	kx = 9kv	6.9 x 10 ⁻⁴	1.0 x 10 ⁻³	32.3

4. KESIMPULAN

Analisis yang dilakukan dengan membandingkan debit rembesan yang terjadi dengan variasi penempatan dinding turap di bawah tubuh bendung pada tanah lempung yang bersifat homogen dan membandingkan pada kondisi tanah isotropik ($k_v=k_h$) dan anisotropik ($k_v \neq k_h$). Analisis debit rembesan dilakukan dengan menggunakan dua solusi pendekan yaitu metode grafis dengan menggunakan jaring aliran (*flow net*) dan metode numerik (*numerical method*). Kondisi pemodelan dalam analisis ini yaitu tanpa adanya dinding turap (kondisi 1), dinding turap di hulu bendung (kondisi 2), dinding turap di hilir bendung (kondisi 3) dan dinding turap di hulu dan hilir bendung (kondisi 4). Hasil analisis pada penelitian ini ditunjukkan bahwa dinding turap dapat mereduksi debit rembesan pada tanah isotropik hingga sebesar 25% dengan metode jaring aliran dan 26% dengan metode numerik, sedangkan reduksi debit rembesan pada tanah anisotropik hingga sebesar 44% dengan metode jaring aliran dan 35% dengan metode numerik. Hal ini terjadi dikarenakan jarak tempuh aliran air dari hulu menuju hilir menjadi lebih panjang dibandingkan dengan tanpa adanya dinding turap dan memperbesar hambatan yang dilalui oleh air akibat bidang kontak antara penampang bendung terhadap tanah. Perbedaan debit rembesan pada tanah isotropik untuk kedua metode yang digunakan tidak signifikan, yaitu hanya berbeda 1% hingga 6%. Sedangkan debit rembesan pada tanah anisotropik, memiliki perbedaan yang cukup signifikan untuk kedua metode ini, yaitu berbeda 20% hingga 32%. Hal ini dikarenakan pada metode jaring aliran pada tanah isotropik tidak dilakukan transformasi, sehingga debit rembesannya tidak signifikan berbeda dengan metode numerik, sedangkan pada tanah anisotropik dilakukan transformasi dengan metode jaring aliran sehingga terjadi perbedaan yang signifikan dengan metode numerik. Oleh karena itu, pada kondisi tanah isotropik untuk menganalisis debit rembesan dibawah tubuh bendung dapat menggunakan kedua metode tersebut yaitu metode jaring aliran dan metode numerik, namun pada tanah anisotropik untuk menghitung debit rembesan lebih konservatif dengan menggunakan metode numerik dibandingkan metode jaring aliran.

DAFTAR PUSTAKA

- Baron, W. And Perloff, W. H. (1876). *Soil mechanics – principles and application*. The Ronald Press Company, New York, pp. 359-361.
- Bowles, J., Hainim, J. K, (1989), *Sifat- Sifat Fisis dan Geoteknik Tanah*, edisi kedua, Erlangga, Jakarta.
- Brinkgreve, RBJ et al, 2016, *Reference Manual*. PLAXIS, Netherlands.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de dijon*. Dalmont, Paris.
- Hardiyatmo, H. C., (2006). *Mekanika Tanah I*, Edisi Keempat, Penerbit Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Harr, M.E., (1962), *Groundwater and seepage*. McGraw-Hill. New York.
- Harseno, Ery (2008), “Tinjauan Tinggi Tekanan Air di Bawah Bendung dengan Turap dan Tanpa Turap pada Tanah Berbutir Halus”. *Majalah Ilmiah UKRIM* Edisi 2/th XIII/2008.
- Triatmodjo, B., (1996). *Hidraulika I*, Beta Offset, Yogyakarta.