JURNAL REKAYASA SIPIL (JRS-UNAND)
Vol. 22 No. 2, Juli 2026
Diterbitkan oleh:
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas (Unand)
ISSN (Print) : 1858-2133
ISSN (Online) : 2477-3484
http://jrs.ft.unand.ac.id

ANALISIS REMBESAN BENDUNGAN URUGAN ZONAL INTI TEGAK (STUDI KASUS BENDUNGAN MANIKIN)

DENIK SRI KRISNAYANTI[1*], KEVIN A. C. MANSULA[2], ANDI HIDAYAT RIZAL[3], TRI M.W. SIR[4], RALNO ROBSON KLAU[5], BATARA DOA MEGONONDO[6]

[1]Teknik Sipil, Fakultas Sains & Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Nusa Tenggara Timur
[2]Teknik Sipil, Fakultas Sains & Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Nusa Tenggara Timur
[3]Teknik Sipil, Fakultas Sains & Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Nusa Tenggara Timur
[4]Teknik Sipil, Fakultas Sains & Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Nusa Tenggara Timur
[5]Prodi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang, Nusa Tenggara Timur
[6]Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur

[*]Corresponding Author: denik.krisnayanti@staf.undana.ac.id

Naskah diterima: 12 Februari 2026. Disetujui: 19 Mei 2026. Diterbitkan: 31 Juli 2026

ABSTRAK

Bendungan Manikin merupakan bendungan urugan bertipe zonal inti tegak yang direncanakan terletak di Desa Kuaklalo, Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Bendungan urugan menyimpan potensi bahaya akibat kerusakan fisik dan kegagalan fungsi bendungan. Penyebab kerusakan dan kegagalan fungsi bendungan urugan ialah air yang merembes melalui tubuh bendungan melewati batas ijin debit rembesan bendungan. Penggunaan material lempung sebagai inti tegak perlu dianalisis debit rembesan yang terjadi di tubuh bendungan. Tujuan penelitian adalah menganalisis nilai debit rembesan dan nilai faktor keamanan yang terjadi pada Bendungan Manikin. Analisis menggunakan perangkat lunak metode elemen hingga SEEP/W dengan kondisi elevasi muka air minimum, normal, dan maksimum. Hasil analisis menunjukkan rembesan yang terjadi pada Bendungan Manikin dalam kondisi muka air minimum sebesar 6,899 x 10-5m3/dtk, muka air normal 1,879 x 10-4 m3/dtk dan muka air maksimum 2,174 x 10-4m3/dtk. Debit rembesan yang terjadi di Bendungan Manikin pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air maksimum berada di bawah batas ijin rembesan bendungan yaitu 1% dari rata-rata debit tahunan yang masuk ke dalam bendungan sebesar 0,012 m3/dtk. Semakin besar nilai permeabilitas maka semakin besar debit rembesan dan jika akan semakin kecil nilai faktor keamanannya. Apabila ketersediaan dari material lempung tidak mencukupi maka penggunaan material pengganti seperti aspal, atau bahan kedap lainnya bisa dilakukan dengan memenuhi spesifikasi teknis yang ditentukan.

Kata kunci : Bendungan urugan, debit, rembesan, inti tegak, manikin.

1. PENDAHULUAN

Bendungan berfungsi sebagai penangkap air dan menyimpannya di musim hujan waktu air sungai mengalir dalam jumlah besar dan yang melebihi kebutuhan baik untuk keperluan irigasi, air minum, industri atau yang lainnya (Sidharta, 1997). Berdasarkan karakteristiknya, bendungan urugan memiliki keistimewaan yaitu dapat dibangun pada hampir semua kondisi geologi dan geografi yang dijumpai serta bahan untuk tubuh bendungan dapat digunakan batuan yang terdapat di sekitar calon bendungan (Sosrodarsono dkk., 1977). Karena keistimewaan itulah, banyak bendungan yang dibangun dengan sistem bendungan urugan.

Bendungan Manikin merupakan bendungan bertipe urugan yang direncanakan terletak di Desa Kuaklalo, Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Bendungan Manikin memiliki kapasitas tampung 28,20 juta m^3 dan luas genangan normal 148,7 ha yang direncanakan dapat memenuhi kebutuhan irigasi seluas 310 hektar (Ha) dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber air baku sebesar 700 liter/detik untuk Kota Kupang dan Kabupaten Kupang, pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) sebesar 0,125 MW, pengendalian banjir di Dataran Manikin sebesar 531,70 m^3/detik, dan potensi pariwisata (PT. Indra Karya, 2023). Selain memiliki keistimewaan sebagai bendungan tipe urugan, Bendungan Manikin juga menyimpan potensi bahaya yang dapat timbul akibat kerusakan fisik dan kegagalan fungsi. Penelitian tentang kegagalan bendungan pernah dilakukan oleh Zhang dkk. (2016) bahwa bendungan urukan homogen dan bendungan urukan komposit, limpasan melewati puncak bendungan (*overtopping*) dan erosi internal merupakan dua penyebab kegagalan yang dominan. Sebaliknya, pada bendungan urukan dengan inti kedap, kegagalan lebih banyak disebabkan oleh *overtopping*, sedangkan erosi internal tampaknya lebih jarang terjadi. Penyebab utama kerusakan dan kegagalan fungsi pada bendungan urugan adalah ketika debit air yang merembes melalui tubuh bendungan melebihi batas yang diizinkan.

Rembesan sering didefinisikan orang sebagai aliran air di dalam tanah yang bergerak secara horizontal. Hal itulah yang menjadi pembeda utama antara rembesan (*seepage*) dengan infiltrasi (*infiltration*) dan perkolasi (*percolation*) yang bergerak ke arah vertikal sebagai akibat dari gaya gravitasi (Darwis, 2018). Penelitian tentang analisis rembesan juga sudah pernah dilakukan pada Bendungan Cijurey Kabupaten Bogor (Fauzi dkk., 2025), Bendungan Jragung di Kabupaten Semarang (Setiyawan dkk., 2025), dan Bendungan Saradan di Kabupaten Madiun (Saidillah, 2022).

Salah satu fenomena yang dapat terjadi akibat rembesan air tersebut adalah *piping*, yang dapat menyebabkan kerusakan serius pada bendungan. *Piping* terjadi karena erosi partikel-partikel tanah, yang mengurangi kekuatan material tanah yang mendukung bendungan, sehingga mengarah pada ketidakstabilan struktur. Proses ini menciptakan jalur-jalur aliran air yang mempercepat rembesan, yang pada gilirannya meningkatkan laju erosi dan dapat menyebabkan kegagalan total pada struktur bendungan. Runtuhnya Bendungan Pampulha (Brasil, 20 April 1954) di mana sistem drainase yang tidak memadai menyebabkan gradien tinggi yang mengakibatkan *piping* (Leite dkk., 2025). Menurut Cruz (1996), untuk menjamin kinerja bendungan yang memadai dalam hal hidraulika struktural, bendungan harus memenuhi tiga persyaratan mendasar: 1) aliran terkendali; 2) stabilitas, dan 3) kompabilitas dalam deformasi.

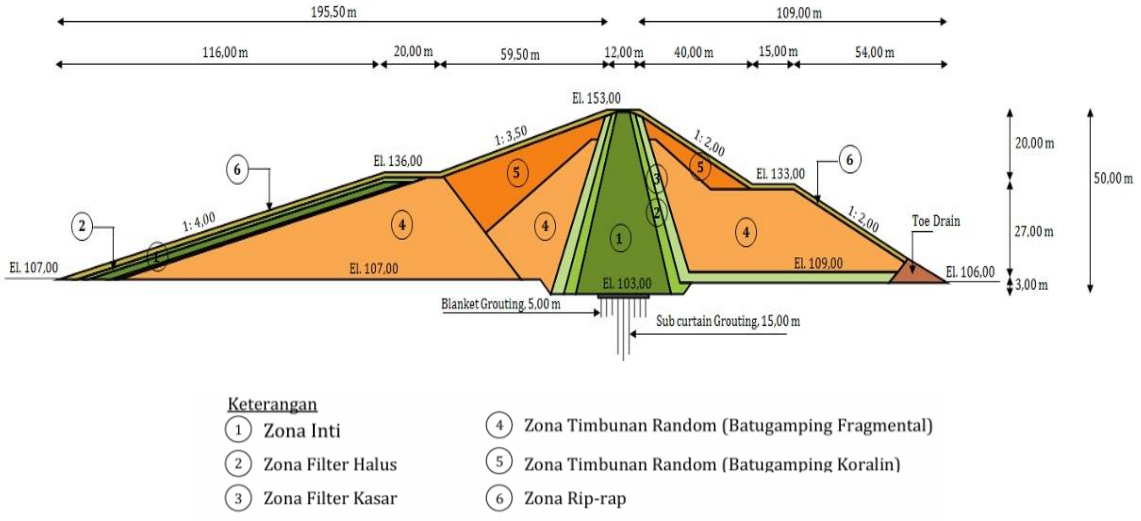
Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui dan mengukur debit air yang merembes melalui tubuh Bendungan Manikin serta mengevaluasi faktor keamanan terhadap potensi bahaya piping yang dapat terjadi pada bendungan tersebut. Dengan

memahami seberapa besar debit air yang merembes dan sejauh mana bendungan mampu menahan risiko piping, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi penting untuk menilai kondisi struktural bendungan. Hal ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi potensi risiko yang dapat membahayakan keberlanjutan fungsi bendungan, sehingga langkah-langkah pencegahan atau perbaikan yang tepat dapat diambil untuk menjaga keandalannya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode model numerik, dimana dalam pengerjaan analisis data akan dibantu dengan perangkat lunak *GeoStudio* dengan fitur *SEEP/W* yang dapat menyelesaikan analisis rembesan dan memberikan gambaran garis freatis pada tubuh material sesuai dengan parameter tanah yang dapat divariasikan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Desa Kuaklalo, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Secara topografis terletak pada koordinat 10° 12' 46" LS dan 123° 43' 04" BT. Objek penelitian dilakukan pada Bendungan Manikin yang masih dalam proses pembangunan serta penentuan penggunaan material inti zonal tegak. Jenis data yang digunakan adalah data sekunder yang diperoleh dari data perencanaan Bendungan Manikin melalui Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II. Data ini meliputi data teknis yang mencakup berbagai informasi yang berkaitan dengan desain, konstruksi, dan kondisi operasional Bendungan Manikin, data geologi yang mencakup parameter tanah yang digunakan sebagai timbunan yang dilihat pada Tabel 1, serta data geometri yang memuat gambar potongan perencanaan Bendungan Manikin pada Gambar 1.



Gambar 1. Potongan Melintang Bendungan Manikin.

Tabel 1. Parameter desain Bendungan Manikin

No	Zona	γ_{sat} (g/cm³)	γ_{wet} (g/cm³)	γ_{d} (g/cm³)	k (cm/dtk)	
					kLab	kdesain
1	Inti	1.895	1.793	1.430	1.41E-07	1.41E-06
2	Filter Halus	1.947	1.645	1.511	2.80E-03	2.80E-03

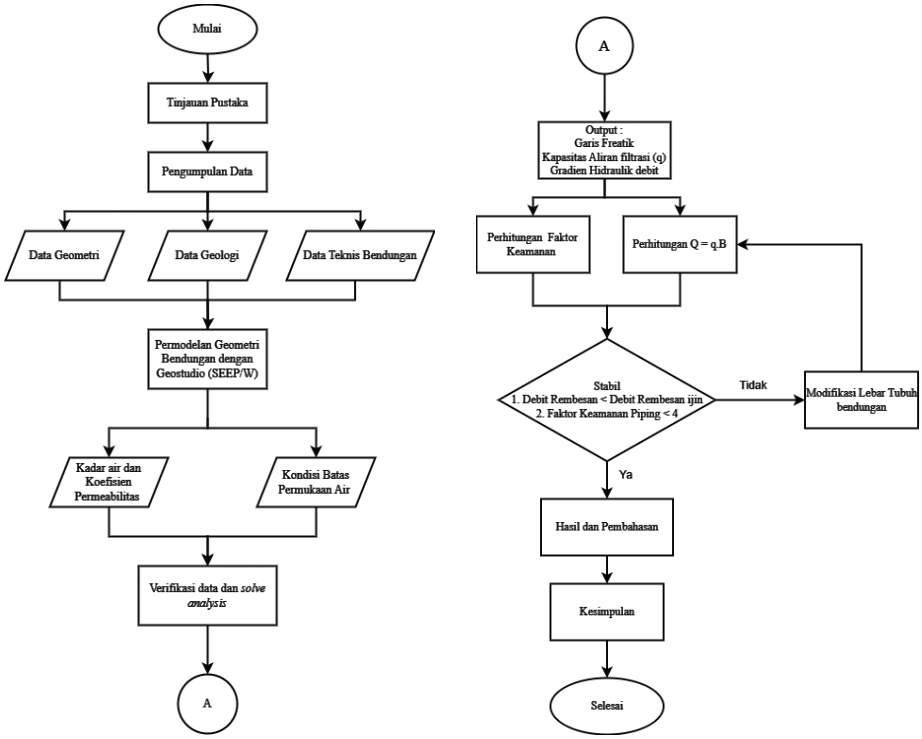
No	Zona	g_{sat} (g/cm³)	g_{wet} (g/cm³)	g_{d} (g/cm³)	k (cm/dtk)	
					kLab	kdesain
3	Filter Kasar	1.947	1.645	1.511	1.83E-03	1.83E-03
4	Timbunan (batu gamping koralin, D = 350 mm)	2.022	1.794	1.680	1.28E-02	1.28E-02
5	Timbunan (batu gamping koralin, D = 700 mm)	2.022	1.794	1.680	1.28E-02	1.28E-02
6	Rip rap	2.022	1.794	1.680	2.16E-01	2.16E-01
7	Pondasi	2.121	2.053	1.783	7.18E-06	7.18E-06

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan pemodelan *software* GeoStudio, di mana untuk perhitungan rembesan digunakan program SEEP/W.

1) Mengumpulkan data sekunder yang diperoleh dari pihak pengelola bendungan.
2) Menyiapkan data-data yang berupa :
   - Data Teknis Bendungan Manikin berupa Lokasi, Manfaat, Elevasi, tipe bendungan.
   - Data geologi Bendungan Manikin berupa data yang memuat parameter bahan (tanah) yang digunakan dalam pembuatan Bendungan Manikin.
   - Data geometri Bendungan Manikin yang memuat potongan melintang bendungan.
3) Pemodelan Geometri
4) *Input* Material
5) *Input* Kondisi Batas
6) Simulasi dan dilakukan verifikasi
7) Mengecek apakah debit rembesan < debit rembesan ijin dan jika tidak maka dilakukan simulasi ulang untuk dimensi penampang tubuh bendungan.

Untuk lebih jelasnya bagan alir dalam penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian.

Untuk persamaan empiris yang digunakan dalam analisis ini adalah:

1. Persamaan Darcy

Persamaan Darcy menggambarkan hubungan antara debit aliran fluida melalui media permeabel dengan gradien hidraulik. Hukum ini banyak digunakan dalam perhitungan aliran air dalam tanah, seperti pada rembesan air melalui struktur bendungan. Hukum darcy memiliki persamaan seperti berikut :

$$v = k \, . \, i \qquad (1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \qquad (2)$$

Keterangan:

v = Kecepatan air rembesan (cm/dtk)
k = koefisien permeabilitas (m/dtk)
i = kemiringan hidraulik
Δh = Selisih tinggi energi total kedua titik (hulu dan hilir) (m)
L = Jarak antar kedua titik (hulu dan hilir) (m)

2. Kapasitas aliran filtrasi

Kapasitas aliran filtrasi mengacu pada kemampuan suatu bendungan untuk mangalirkan rembesan air yang bergerak dari hulu ke hilir melalui tubuh bendungan dan pondasinya. Setiap bendungan memiliki batas tertentu terkait kapasitas filtrasi ini. Apabila aliran filtrasi melampaui batas yang telah ditentukan, maka potensi kehilangan air dapat meningkat secara signifikan, yang pada akhirnya dapat memengaruhi efisiensi dan keamanan bendungan. Besarnya kapasitas aliran filtrasi yang terjadi melalui tubuh bendungan dan pondasi bergantung pada distribusi dan jalur trayektori aliran filtrasi di dalam material

bendungan. Untuk menganalisis dan menghitung kapasitas ini, digunakan beberapa pendekatan matematis yang didasarkan pada sifat-sifat material serta pola aliran air yang terjadi. Pendekatan ini memungkinkan insinyur untuk memahami sejauh mana rembesan dapat terjadi dan merancang langkah-langkah mitigasi untuk menjaga stabilitas dan keamanan bendungan. Berikut adalah rumus yang dapat digunakan dalam perhitungan kapasitas filtrasi tersebut :

$$Q = \Sigma q \,.\, B \quad (3)$$

dan

$$q = k \,.\, i \,.\, A \quad (4)$$

Keterangan:

Q = kapasitas filtrasi (m^3/dtk)
q = kapasitas filtrasi per unit lebar tubuh bendungan (m^3/dtk)
B = lebar potongan memanjang tubuh bendungan (m)
k = koefisien filtrasi (m/dtk)
i = kemiringan hidraulik (tanpa dimensi)
A = luas potongan melintang yang dilalui aliran filtrasi per unit lebar (m^2)

Batas aman rembesan berdasarkan debitnya mengikuti Pedoman *Grouting* untuk Bendungan yang mengacu pada batasan yang berlaku di Jepang (*Japanese Institute of Irrigation and Drainage* 1988). Nilai angka rembesan yang diperkenankan pada bendungan yaitu sebanyak total rembesan dari waduk yang melewati fondasi dan badan bendungan tidak boleh lebih dari 1% dari rata-rata debit sungai yang masuk ke dalam waduk (Qi).

3. Garis Freatis

Garis freatis adalah garis aliran air yang berhubungan dengan bidang imajiner dalam tubuh dan pondasi bendungan yang tekanan air dan porinya sama dengan tekanan atmosfer. Sederhananya, garis freatis adalah garis imajiner yang memisahkan antara zona di dalam material berpori seperti tanah yang jenuh dengan air dan yang tidak. Dalam perancangan dan analisis struktur bendungan, garis freatis memegang peranan penting karena mempengaruhi sebaran tekanan air pori di dalam tanah. Garis freatis perlu digambarkan secara manual sebagai perbandingan dengan garis freatis hasil *output* analisis dengan perangkat lunak *SEEP/W*. Persamaan bentuk dasar untuk menentukan koordinat garis freatis adalah sebagai berikut (Sosrodarsono dkk., 1977):

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{y_0} \quad (5)$$

atau

$$y = \sqrt{2y_0 x + y_0^2} \quad (6)$$

Dan

$$y_0 = \sqrt{h^2 + d^2} - d \quad (7)$$

Keterangan :

x = titik koordinat pada sumbu x
y = titik koordinat pada sumbu y
y_0 = titik koordinat awal pada sumbu y
h = jarak vertikal antara titik-titik A dan B. (m)
d = jarak horizontal antara titik B2 dan A. (m)
l_1 = jarak horizontal antara titik-titik B dan E. (m)
l_2 = jarak horizontal antara titik-titik B dan A. (m)
A = ujung tumit hilir bendungan.

B = titik perpotongan antara permukaan air waduk dan lereng udik bendungan.
A1 = titik perpotongan antara parabola bentuk besar garis freatis dengan garis vertikal melalui titik B.
B2 = titik yang terletak sejauh 0,3/1, horizontal ke arah udik dari titik B.

4. Faktor keamanan terhadap sufosi (*piping*)

Piping adalah fenomena erosi internal yang terjadi ketika air merembes melalui tanah di bawah atau di sekitar bendungan, membawa partikel-partikel tanah keluar dan menciptakan saluran-saluran kecil atau "pipa" di dalam tanah. *Piping* bisa mengakibatkan kerusakan serius pada bendungan karena erosi partikel-partikel tanah mengurangi kekuatan material tanah yang mendukung bendungan sehingga menyebabkan ketidakstabilan. *Piping* akan menciptakan jalur-jalur aliran yang mempercepat rembesan air melalui bendungan, yang bisa menyebabkan peningkatan laju erosi dan akhirnya menyebabkan kegagalan struktur. Menurut Hardiyatmo (2002) menyatakan bahwa nilai faktor keamanan bangunan air terhadap bahaya *piping* berupa perbandingan antara nilai gradien hidrolik kritis dengan gradien keluar maksimum harus lebih besar dari 3 sampai dengan 4. Nilai faktor keamanan ini diambil untuk mencegah terjadinya keruntuhan akibat gradien keluaran yang melampaui batas. Nilai faktor ini digunakan untuk mencegah hal-hal yang tidak diperhitungkan dalam tahap desain. Misalnya pengaruh heterogenitas tanah, kemunduran kualitas tanah yang merupakan fungsi dari waktu dan penyimpangan hasil perkiraan. Berdasarkan SNI-8065 tentang Metode Analisis dan cara pengendalian rembesan air bendungan tipe urugan, nilai faktor keamanan terhadap bahaya erosi buluh (*piping)* dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut :

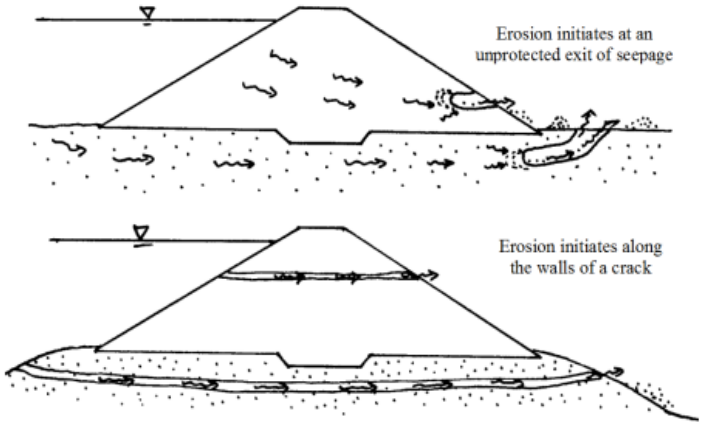
Syarat Keamanan $= \frac{I_c}{I_e} \geq 2$ untuk bendungan dengan filter (8)

Gradien Hidrolik Kritis $= Ic = \frac{\gamma'}{\gamma w} = \frac{G_s - 1}{1+e}$ (9)

Gradien Keluar Maksimum $= Ie = \frac{h}{L}$ (10)

Keterangan:
γ' = Berat Volume Terapung (kg/m^3)
γw = Berat Volume air (kg/m^3)
Ic = Gradien hidrolik dari material (tanpa dimensi)
Ie = Gradien hidrolik keluaran hasil analisis (tanpa dimensi)
Gs = Berat jenis tanah (g/cm^3)
e = Angka pori (tanpa dimensi)
h = kehilangan energi dari dua garis potensial dan tinggi bendungan
L = Panjang lintasan aliran *piping*

Mekanisme terjadinya *piping* sangat kompleks, tidak mudah terlihat sehingga tidak mudah untuk diartikan (D. J. Hagerty, 1992). Mekanisme terjadinya piping sangat kompleks dan sulit dideteksi karena banyak faktor yang terlibat dan sering terjadi di bawah permukaan tanah. Kondisi cuaca seperti curah hujan yang tinggi atau siklus pembekuan dan pencairan dapat meningkatkan tekanan hidrolis dan menyebabkan terjadinya retakan pada tanah. Upaya untuk mencegah *piping* melibatkan desain dan pemasangan filter yang tepat, pemantauan rutin dengan instrumen geoteknik, dan penerapan teknik survei geofisika.
Piping tidak akan terjadi terkecuali jika ada titik keluaran dimana air dapat keluar melalui titik tersebut dan meninggalkan massa tanah yang dilaluinya kemudian ikut membawa partikel tanah yang dilalui sebelumnya (Putra dkk., 2022). Mekanisme terjadinya *piping* dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 3.

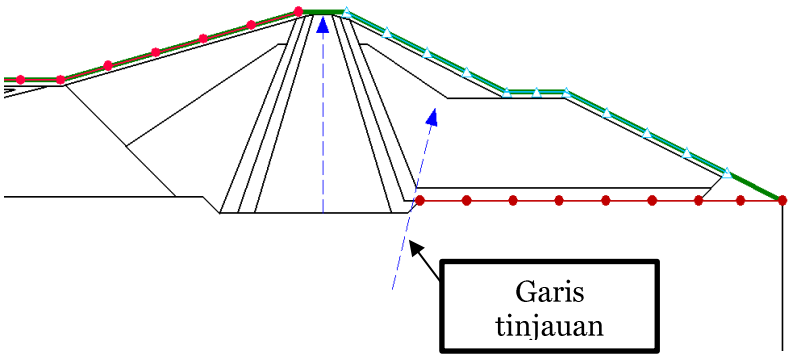


Gambar 3. Mekanisme terjadinya *piping* pada bendungan (Sumber: Foster, 1999)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Rembesan

Analisis dilakukan dengan menggunakan analisis *steady state* dua dimensi pada program *SEEP*/W untuk mengevaluasi kondisi muka air minimum (El +133,6), kondisi muka air normal (El +147,5) , dan kondisi muka air maksimum (El +150,47) di bendungan. Proses analisis ini mencakup beberapa tahap penting, pada tahap awal tujuan utama adalah untuk menentukan garis freatis bendungan, yaitu batas antara zona jenuh air dan zona tidak jenuh, pada berbagai kondisi muka air. Langkah awal perhitungan debit rembesan adalah menganalisis nilai debit rembesan per meter lebar (q) pada garis tinjauan *(flux section)* pada bagian tubuh bendungan dan fondasi bendungan yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Aplikasi *flux section* pada analisis Bendungan Manikin

Output nilai debit rembesan per meter lebar (q) digunakan dalam perhitungan debit rembesan (Q) dengan Persamaan 3. Berdasarkan data teknis Bendungan Manikin, debit air rata-rata tahunan yang masuk ke dalam Bendungan Manikin adalah (Qi) 1,2 m^3/dtk. Besarnya debit rembesan yang mengalir melalui bendungan (Q) harus lebih kecil dari 1% dari debit air rata-rata tahunan yang masuk ke dalam bendungan (Qi), sehingga Q < Qi ; 0,01 Qi = 0,012 m^3/dtk.

Analisis dengan pemodelan elemen hingga pada program *SEEP/W* menghasilkan nilai debit rembesan yang mendekati hasil sebenarnya di lapangan (q). Hasil analisis debit rembesan

yang terjadi pada Bendungan Manikin pada kondisi muka air minimum (El +133,6), kondisi muka air normal (El +147,5) , dan kondisi muka air maksimum (El +150,47) dihitung dengan Persamaan 3 yakni sebagai berikut:

1) Kondisi Muka Air Minimum (El +133,6)
   q = $2{,}689 \times 10^{-7}$ m^3/dtk/m
   B = 256,583 m
   Q = q x B
   Q = $2{,}689 \times 10^{-7}$ x 256,583
   Sehingga
   Q < 1%Qi = $6{,}899 \times 10^{-5}$ m^3/dtk < 0,012 m^3/dtk ..... Aman

2) Kondisi Muka Air Normal (El +147,5)
   q = $7{,}323 \times 10^{-7}$ m^3/dtk/m
   B = 256,583 m
   Q = q x B
   Q = $7{,}323 \times 10^{-7}$ x 256,583
   Q = $1{,}879 \times 10^{-4}$ m^3/dtk
   Sehingga
   Q < 1%Qi = $1{,}879 \times 10^{-4}$ m^3/dtk < 0,012 m^3/dtk ..... Aman

3) Kondisi Muka Air Maksimum (El +150,47)
   q = $8{,}472 \times 10^{-7}$ m^3/dtk/m
   B = 256,583 m
   Q = q x B
   Q = $8{,}472 \times 10^{-7}$ x 256,583
   Q = $2{,}174 \times 10^{-4}$ m^3/dtk
   Sehingga
   Q < 1%Qi = $2{,}174 \times 10^{-4}$ m^3/dtk < 0,012 m^3/dtk ..... Aman.

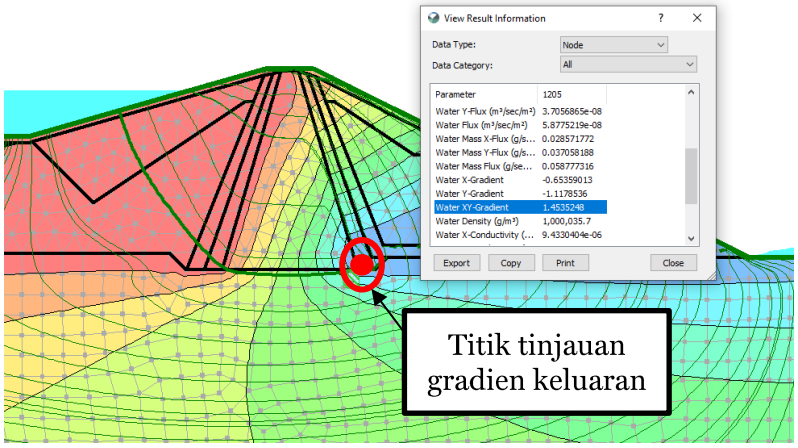
3.2. Analisis Faktor Keamanan Piping Bendungan

Faktor keamanan *piping* pada bendungan dinyatakan sebagai perbandingan antara gradien kritis (I_c) dengan gradien keluaran (I_e). Perhitungan faktor keamanan terhadap biaya *piping* dilakukan pada zona inti bendungan yang berupa material timbunan tanah lempung pada ketinggian muka air normal yang merupakan keadaan yang umumnya terjadi pada Bendungan Manikin. Perhitungan ini dihitung menggunakan Persamaan 9 dengan data sekunder berat spesifik material zona inti Gs = 2,684 dan angka pori material zona inti e = 0,786 sehingga untuk gradien kritis zona inti lempung (I_c) bendungan adalah sebagai berikut

$$I_c = \frac{2{,}684-1}{1+0{,}786} = 0{,}943$$

Nilai *output* gradien keluaran maksimum pada program *SEEP/W* dapat dilihat pada hasil rinci dari objek *material* pada pemodelan Bendungan Manikin. titik tinjau yang digunakan merupakan representasi gradien keluaran inti Bendungan Manikin yang bersentuhan dengan pondasi untuk mengetahui potensi terjadinya *piping*. Titik tinjauan nilai gradien keluaran bendungan adalah titik di bagian lereng hilir ke arah hilir bendungan yang diindikasikan terjadi erosi internal akibat rembesan pada Bendungan Manikin, yang jika dilihat pada hasil rembesan ditandai dengan adanya vektor aliran mengarah dari luar

tubuh bendungan ke dalam bendungan itu sendiri. Hasil gradien keluaran dapat dilihat pada besarnya komponen vertikal gradien keluaran atau nilai maksimum pada sumbu Y dan XY yang terlihat pada Gambar 5.



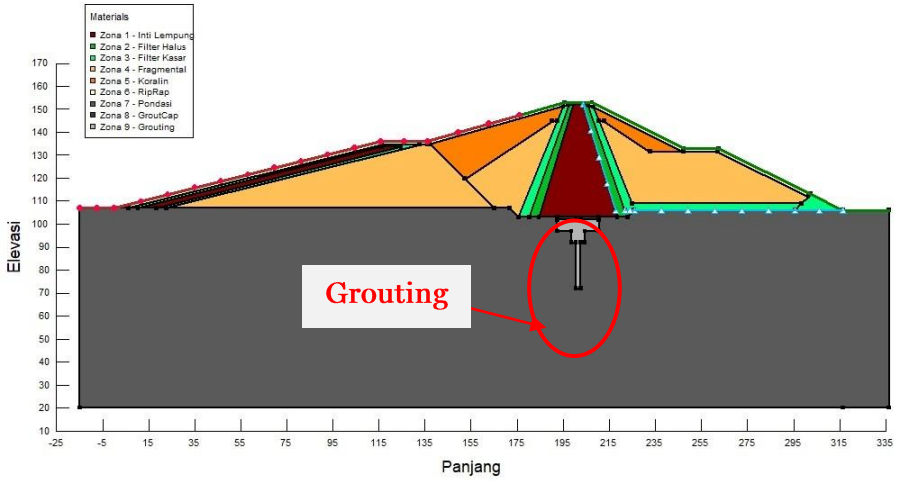
Gambar 5. Analisis nilai gradien kritis Bendungan Manikin dengan *SEEP/W*

Nilai maksimum gradien kritis untuk sumbu Y dan XY berdasarkan analisis rembesan dengan *SEEP/W* adalah I_e = 1,453. Sehingga untuk perhitungan faktor keamanan adalah sebagai berikut:

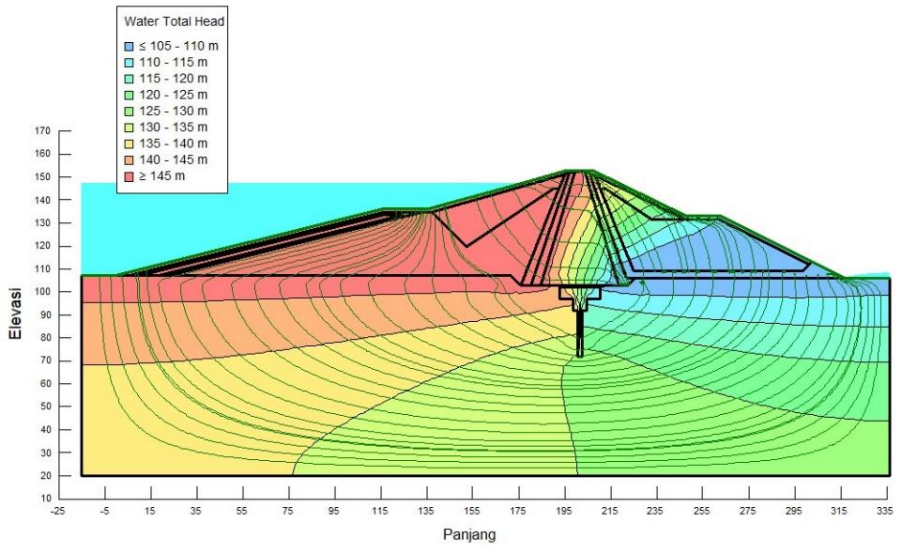
$$\text{FK} = \frac{0{,}943}{1{,}453} \geq 2 \text{ (diambil nilai maksimum yaitu 2)}$$

$$= 0{,}649 < 2 \text{ ..... Tidak aman.}$$

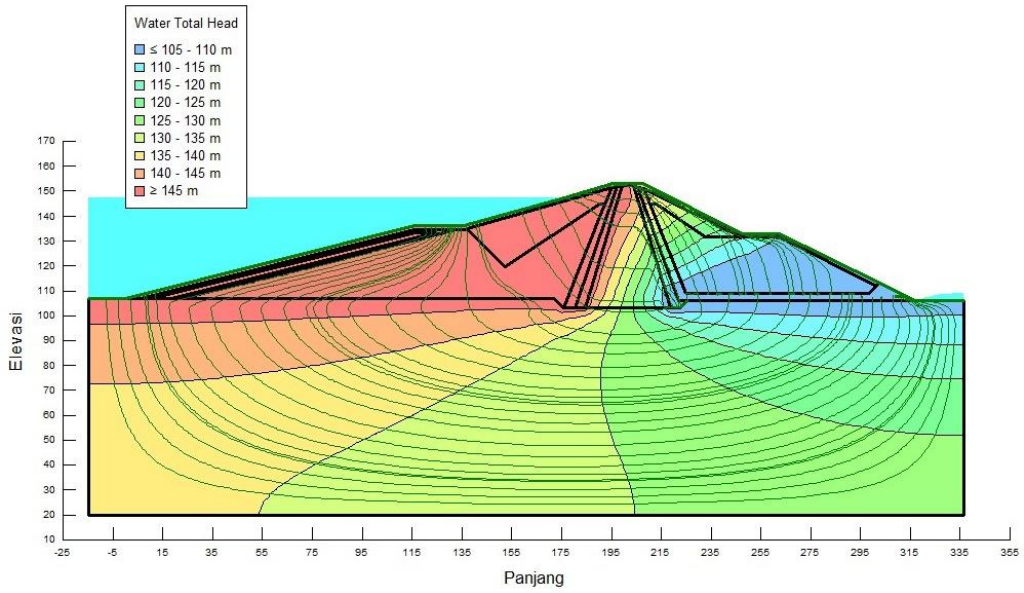
Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan bendungan terhadap bahaya *piping* berada di bawah batas minimum yang ditetapkan, yaitu 2. Kondisi ini mengindikasikan potensi terjadinya piping pada dasar fondasi, khususnya di bawah inti bendungan, yang dapat memicu erosi internal pada lereng hilir dan berisiko menyebabkan kegagalan bendungan. Pada analisis ini, dilakukan perbaikan fondasi berupa *grouting* fondasi yang juga telah dilakukan pada perencanaan pembangunan Bendungan Manikin. Proses *grouting* atau sementasi tirai pada penelitian ini dilakukan pada kedalaman 30 m, 35 m, 40 m dan 50 m, yang digunakan sebagai nilai *input* pada analisis rembesan dengan program *SEEP/W*. Analisis rembesan kemudian dilakukan pada kondisi muka air normal dengan el. +147.5 m, yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Pemodelan grouting kedalaman 30 m Bendungan Manikin dengan SEEP/W



Gambar 7. Analisis rembesan grouting kedalaman 30 m dengan SEEP/W



Gambar 8. Analisis rembesan tanpa grouting dengan SEEP/W

Berdasarkan Gambar 7 dan Gambar 8, hasil analisis yang dilakukan dengan menggunakan metode perbaikan pondasi *grouting* menunjukkan bahwa terdapat perubahan signifikan pada garis kontur aliran di area pondasi yang telah di*grouting*. Dampak dari dilakukannya *grouting* selain pada berubahnya nilai faktor keamanan terhadap bahaya *piping*, juga berdampak pada berkurangnya rembesan pada fondasi bendungan manikin akibat tertutupnya pori-pori tanah fondasi dengan cairan sementasi serta menambah kestabilan struktur bawah bendungan. Hasil perhitungan ini disajikan dalam Tabel 2 dan Tabel 3

Tabel 2. Hasil perhitungan rembesan dengan grouting bendungan

Kedalaman Grouting	q m^3/dtk/m	B m	Q m^3/dtk	Persentase Penurunan Q %
Tanpa Grouting	8.472E-07	256.583	2.174E-04	0
30	6.332E-07	256.583	1.625E-04	25,25
35	6.335E-07	256.583	1.625E-04	25,22
40	6.348E-07	256.583	1.629E-04	25,07
50	6.353E-07	256.583	1.630E-04	22,01

Tabel 3. Hasil Perhitungan faktor keamanan

Kedalaman *Grouting*	Ic	Ie	FK	Persentase Kenaikan FK	Kondisi bendungan (FK >4)
Tanpa *Grouting*	0,943	1,453	0,649	0 %	Kurang aman
30	0,943	0,639	1,475	127 %	Kurang aman
35	0,943	0,589	1,601	147 %	Kurang aman
40	0,943	0,469	2,010	210 %	Aman
50	0,943	0,397	2,375	266 %	Aman

Berdasarkan tabel hasil perhitungan faktor keamanan diatas, kedalaman *grouting* mempengaruhi besarnya nilai gradien keluaran $I_{e,}$. Hal ini karena material tanah yang sudah di *grouting* mempengaruhi permeabilitas tanah pondasi yang berdampak pada bertambahnya panjang lintasan trayektori aliran dibawah inti bendungan. Perhitungan faktor keamanan pada kedalaman *grouting* 50 m memperoleh hasil dengan besaran angka 2,375 dengan persentase kenaikan nilai faktor keamanan dari kondisi bendungan dari sebelum *grouting* adalah sebesar 266% dari kondisi bendungan sebelum di-*grouting*. Keadaan serupa juga terjadi pada penelitian terhadap Bendungan Pidekso (Nashihah dkk., 2022) dimana proses *grouting* bendungan mampu menaikan nilai faktor keamanan terhadap *piping* sehingga bendungan aman dari resiko terjadinya kegagalan bendungan akibat rembesan dan erosi internal.

4. KESIMPULAN

Besarnya debit rembesan yang mengalir pada Bendungan Manikin dalam kondisi muka air minimum sebesar 6,899 x 10-5 m3/dtk, muka air normal 1,879 x 10-4 m3/dtk dan muka air maksimum 2,174 x 10-4 m3/dtk. Debit rembesan yang terjadi di Bendungan Manikin pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air maksimum berada di bawah batas ijin rembesan bendungan yaitu 1% dari rata-rata debit tahunan yang masuk ke dalam bendungan sebesar 0,012 m3/dtk. Perencanaan Bendungan Manikin dengan inti tegak tanah lempung, diperkirakan aman terhadap bahaya piping. Nilai faktor keamanan bendungan terhadap piping adalah sebesar 0,649 ≥ 2. Hasil analisis setelah dilakukan perbaikan fondasi dengan metode grouting sedalam 30 m, 35 m, 40 m, dan 50 m didapatkan nilai faktor keamanan terbesar pada kedalaman grouting 50 m sebesar 2,375 ≥ 2. Perbaikan fondasi ini berdasarkan hasil simulasi data teknis dari studi kasus Bendungan Manikin. Nilai faktor keamanan ini telah memenuhi batas ijin faktor keamanan bendungan terhadap piping berdasarkan faktor pembagi nilai gradien keluaran pada bendungan, sehingga Bendungan Manikin dengan tipe zonal inti tegak ini dapat dibangun dan beroperasi serta dinilai aman dari kegagalan Bendungan akibat rembesan hingga umur rencana diatas 50 tahun dengan pemeliharaan dan perawatan yang rutin dilakukan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana yang sudah membantu dalam proses penyusunan jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standarisasi Nasional. (2016). SNI 8065-2016. Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan. In Badan Standarisasi Nasional.

Cruz, P. T. D. (1996). 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. Oficina de Texto, São Paulo.

Darwis. (2018). Dasar-dasar Mekanika Tanah (A. Kodir (Ed.); 1st ed.). Pena Indis

Design Of Small Dam. (1987). Bureau Of Reclamation.

D. J. Hagerty. (1992). Piping/Sapping Erosion. I: Basic Considerations. University of South Florida, 117(8), 991–1008. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733- 9429(1991)117:8(991)

Fauzi, D.A., Marsudi, S., Cahya, E.N. (2023).Analisa Rembesan Terhadap Terjadinya Piping pada BendunganCijurey Kabupaten Bogor Provinsi Jawa Barat. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air Vol. 03 No. 02 (2023) 500-513.

Foster, M. A. (1999). The Probability of Failure of Embankment Dams by Internal erosion and piping. In University of New South Wales.

GEO-SLOPE International Ltd. (2012). Seepage Modeling with SEEP/W. GEO-SLOPE International Ltd., July, 1–199. http://www.geo-slope.com

Hardiyatmo, H. C. (2002). Mekanika Tanah 1 (Ketiga). Universitas Gadjah Mada.

Krisdianto, F. (2021). Analisis Stabilitas Pada Tubuh Bendungan Dengan Irisan Fellenius Dan Debit Rembesan Dengan Metode Casagrande Menggunakan Software Geostudio.

Leite, D., Marcelino, J., Guerra, N., Manso, J., & Sardinha, R. (2025). MAIN FAILURE MODES IN EMBANKMENT DAMS, MAPPABLE WITH DRONE SURVEYS. Proceedings of the Fifth International DAM WORLD Conference (hal. 1145-1161). Portugal: LNEC.

Nashihah, A D., Hidajat, W.K., Santi, N. (2022). Analisis Rembesan Pada Perencanaan Pembangunan Terhadap Keamanan Bendungan Pidekso, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah. Jurnal Geosains dan Teknologi 5(1): 1-15. DOI: 10.14710/jgt.5.1.2022.1-15

Pedoman Pengendalian Rembesan Pada Bendungan Urugan. (2005). Balai Bendungan Direktorat Sungai Danau dan Waduk, Direktorat Jenderal DPU, Sumber Daya Air.

PT. Indra Karya Persero. (2023). Sertifikasi Desain Dan Model Test Bendungan Tefmo/Manikin Kabupaten Kupang.

Putra, R. A. M., Putra, A. D., & Wahono, E. P. (2022). Analisis Rembesan Terhadap Bahaya Piping pada Bendungan Way Sekampung. Serambi Engineering, VII(3), 3454–3465.

Saidillah, M., Artati, H.K. (2022). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Saradan. Jurnal Teknik Sipil Cendekia 3(2): 1-15. DOI: 10.51988/jtsc.v3i2.43

Setiyawan, R.B., Sutrisno, R.F., Rochim, A., Hidayawan, A. (2025). Analisis Stabilitas Pondasi Terhadap Rembesan Dan Piping Pada Bendungan (Studi Kasus Bendungan Jragung Kabupaten Semarang). Jurnal Civil Engineering Study 5(02):215-232. DOI: 10.34001/ces.v5i02.1545

Sidharta. (1997). Irigasi dan Bangunan Air. Universitas Gunadarma.

Sosrodarsono, S., Takeda, & Kensaku. (1977). Bendungan Type Urugan. PT. Pradnya Paramita.

U.S. Army Corps of Engineers. (1995). Instrumentation of Embankment Dams and Levees. Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the US Army Corps of Engineers. No. 26, June, 88.

Zhang, L. M., Peng, M., Chang, D.S., & Xu, Yao. (2016). Statistical Analysis of Failures of Constructed Embankment Dams. In book: Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment. DOI: 10.1002/9781118558522.ch2