

Analisis Potensi *Piping* Bendungan Menggunakan Persamaan Empiris dan Metode Elemen Hingga 3 Dimensi

Anafi Minmahddun^{1,*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara

*penulis koresponden: anafi.minmahddun@uho.ac.id

Submit : 28/10/2023

Revisi : 04/12/2023

Diterima : 15/12/2023

Abstrak. Rembesan merupakan hal yang pasti terjadi pada bendungan tipe urugan, namun pada kondisi tertentu dapat menyebabkan *piping* pada bendungan. *Piping* adalah terbentuknya rongga pada tanah karena terangkutnya butiran halus tanah akibat gaya rembesan. Fenomena ini menjadi salah satu masalah serius yang dapat memengaruhi stabilitas dan keamanan bendungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi *piping* pada salah satu bendungan yang berada di Jawa Barat menggunakan metode elemen hingga dan persamaan empiris. Analisis dengan metode elemen hingga dilakukan untuk mendapatkan nilai gradien hidrolik keluar pada bendungan untuk menghitung faktor keamanan terhadap bahaya *piping*. Adapun, persamaan empiris menggunakan pendekatan *weight creep ratio* (WCR) untuk mengetahui potensi *piping* pada bendungan. Analisis potensi *piping* dilakukan pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air banjir. Hasil analisis elemen hingga menunjukkan nilai gradien hidrolik keluar berada pada rentang 0,20-0,33 dan menghasilkan faktor aman pada rentang 4,58-8,25. Faktor aman yang diperoleh masih memenuhi kriteria faktor aman minimum yang disyaratkan oleh SNI 8065:2016 yaitu 4. Analisis potensi *piping* menggunakan pendekatan empiris diperoleh nilai WCR pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air banjir secara berturut-turut adalah 4,71, 3,36 dan 3,30. Nilai WCR hasil perhitungan lebih besar dari nilai angka aman untuk WCR jenis batuan yaitu 1,6. Berdasarkan dua analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa bendungan aman terhadap bahaya *piping*.

Kata kunci: rembesan; *piping*; WCR; faktor keamanan

Abstract. Seepage is an inevitable occurrence in embankment dams, but under certain conditions, it can lead to piping. Piping is the formation of cavities in the soil due to the transport of fine soil particles by seepage forces. This phenomenon is one of the serious issues that can affect the stability of the dam. This study aims to analyze the potential for piping in one of the dams located in West Java using finite element and empirical equation methods. The finite element method analysis was conducted to obtain the exit hydraulic gradient values in the dam to calculate the safety factor against piping hazards. Meanwhile, the empirical equation used the weight creep ratio (WCR) to assess the potential for piping. The potential for piping analysis was conducted under minimum, normal, and flood water level conditions. The results of the finite element analysis showed that the hydraulic gradient exit values ranged from 0.20 to 0.33, resulting in safety factors ranging from 4.58 to 8.25. The obtained safety factors still meet the minimum safety factor criteria required by SNI 8065:2016, which is 4. The potential for piping analysis using the empirical approach yielded WCR values under the minimum, normal, and flood water level conditions, which were 4.71, 3.36, and 3.30, respectively. The calculated WCR values are higher than the typical value for WCR in hard rock, which is 1.6. Based on these two analyses, it can be concluded that the dam is safe against piping hazards.

Keywords: seepage; piping; WCR; safety factor

Pendahuluan

Bendungan tipe urugan adalah salah satu tipe bendungan yang memungkinkan air merembes pada material urugan melalui rongga antara butiran tanah. Pada kondisi tertentu, rembesan dapat menimbulkan *piping* yang dapat menjadi salah satu penyebab

kegagalan bendungan [1], [2]. *Piping* adalah terbentuknya rongga dalam tanah akibat terangkutnya butir-butir tanah halus akibat gaya rembesan. Adanya gaya rembesan akan mengubah kondisi tegangan efektif dalam tanah [3].

Pada kasus bendungan, perbedaan tinggi muka air antara hulu dan hilir akan menyebabkan terjadinya aliran ke atas yang menyebabkan terjadinya penambahan tekanan air pori dari kondisi hidrostatik sehingga menurunkan tegangan efektif tanah. Ketika tegangan efektif tanah sama dengan nol, tanah dalam keadaan mengapung atau terangkat ke atas (*quick-condition*). Gradien hidrolik pada kondisi ini didefinisikan sebagai gradien hidraulik kritis. Dalam perancangan struktur hidrolis, nilai gradien hidrolik keluar maksimum harus lebih kecil dibandingkan dengan gradien hidrolik kritis dibagi dengan faktor aman tertentu [3].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi *piping* pada salah satu bendungan di Indonesia. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan empiris serta simulasi numeris dengan metode elemen hingga tiga dimensi untuk mendapatkan nilai gradien hidrolik keluar maksimum pada kaki bendungan bagian hilir. Evaluasi keamanan mengacu pada SNI 8065 tentang metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan [4].

Metode

Keamanan terhadap bahaya *piping* didefinisikan sebagai rasio antara gradien hidrolik kritis dan gradien hidrolik keluar maksimum yang secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$SF = \frac{i_c}{i_e} \quad (1)$$

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (2)$$

dengan i_e adalah gradien hidrolik keluar maksimum, i_c adalah gradien hidrolik kritis, γ' adalah berat volume apung dan γ_w adalah berat volume air [5].

Gradien hidrolik keluar maksimum didapat dari hasil analisis rembesan menggunakan metode elemen hingga 3D dengan bantuan *software* Midas GTS NX. Dalam analisis rembesan, input material yang dibutuhkan adalah nilai koefisien permeabilitas setiap zona dan fondasi bendungan. Kondisi batas yang diterapkan dalam analisis adalah *nodal head* dan *review*. *Nodal head* adalah total head pada sisi hulu bendungan, adapun *review* berfungsi melakukan perhitungan berulang ketika garis rembesan yang tepat sulit ditemukan [6]. *Kondisi batas* ini diterapkan pada sisi hilir bendungan.

Analisis rembesan dilakukan pada kondisi *steady state* dalam 3 (tiga) kondisi yaitu kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air banjir. Analisis *steady state* artinya aliran masuk sama dengan aliran keluar [7]. Luaran dari analisis ini adalah *total head* dan nilai gradien hidrolik pada setiap nodal. Nilai *total head* akan menjadi gambaran bagaimana pengaruh pembagian zona bendungan terhadap pola rembesan yang terjadi, adapun nilai gradien hidrolik akan menjadi dasar evaluasi bahaya *piping* pada bendungan.

Sebagai pembanding, analisis potensi *piping* juga dievaluasi menggunakan *weighted creep ratio* (WCR) yang diusulkan oleh Lane (1953) [8]. Pendekatan empiris ini menggunakan panjang lintasan air yang melalui dasar bendung. Nilai WCR dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

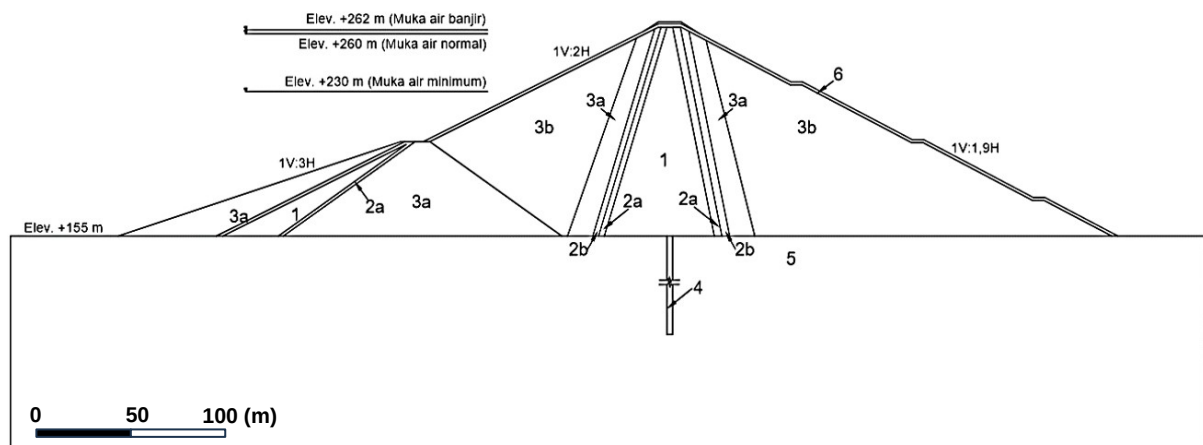
$$L_w = \frac{\Sigma L_h}{3} + \Sigma L_v \quad (3)$$

$$WCR = \frac{\Sigma L_w}{H_1 - H_2} \quad (4)$$

dengan L_w adalah *weighted creep distance*, ΣL_h adalah jumlah jarak horizontal menurut lintasan terpendek, ΣL_v adalah jumlah jarak vertikal menurut lintasan terpendek dan H adalah tinggi muka air hulu dan hilir bendungan. Nilai WCR harus lebih besar dari nilai WCR minimum masing-masing tipikal tanah yang telah diusulkan oleh Lane (1953) [8].

Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini mengambil studi kasus pada salah satu bendungan yang berada di Provinsi Jawa Barat. Bendungan ini bertipe urugan batu inti tegak dengan beberapa zona (zona 1 ada inti bendungan) dan berdiri di atas fondasi berupa batuan breksi vulkanik. Titik tertinggi bendungan dari dasar adalah 114 m. Potongan melintang bendungan beserta pembagian zona dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Potongan melintang dan pembagian zona bendungan

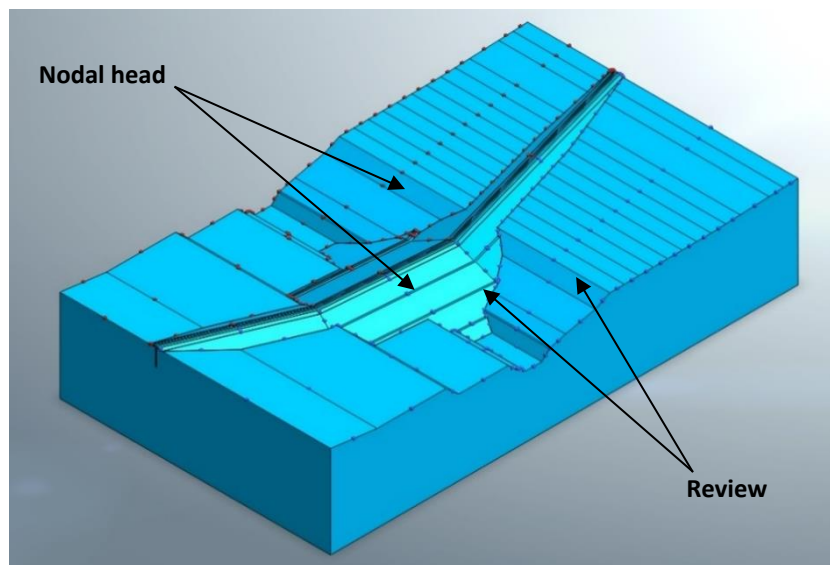
Dalam analisis, pemodelan tiga dimensi bendungan akan menyesuaikan elevasi sepanjang dasar bendungan dengan tetap memperhatikan pembagian zona (Gambar 2). Input *properties* material masing-masing zona dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Properties material bendungan

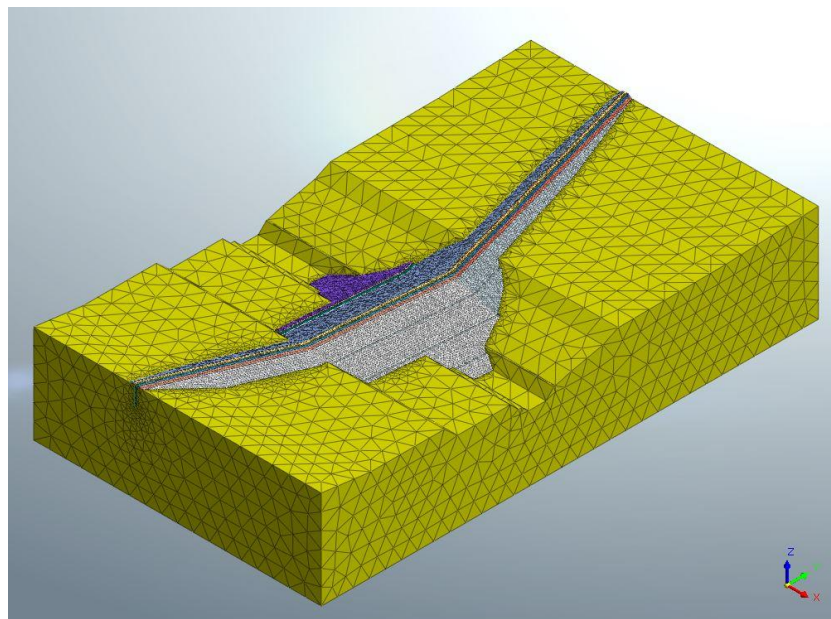
Zona	1	2A	2B	3A	3B	Breksi vulkanik	Grouting
k (cm/detik)	5×10^{-6}	$6,5 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-3}$	1	1,7	1×10^{-4}	1×10^{-20}

Kondisi batas yang diterapkan dalam analisis adalah *nodal head* dengan acuan elevasi muka air normal, muka air minimum dan muka air banjir. Kondisi batas diterapkan pada tubuh dan seluruh permukaan dasar bendungan. Setelah penerapan Kondisi batas

selanjutnya dilakukan proses *meshing* menggunakan elemen tetrahedron dengan jumlah 395.000 elemen. Hasil penerapan *Kondisi batas* dan proses *meshing* secara berturut-turut terdapat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



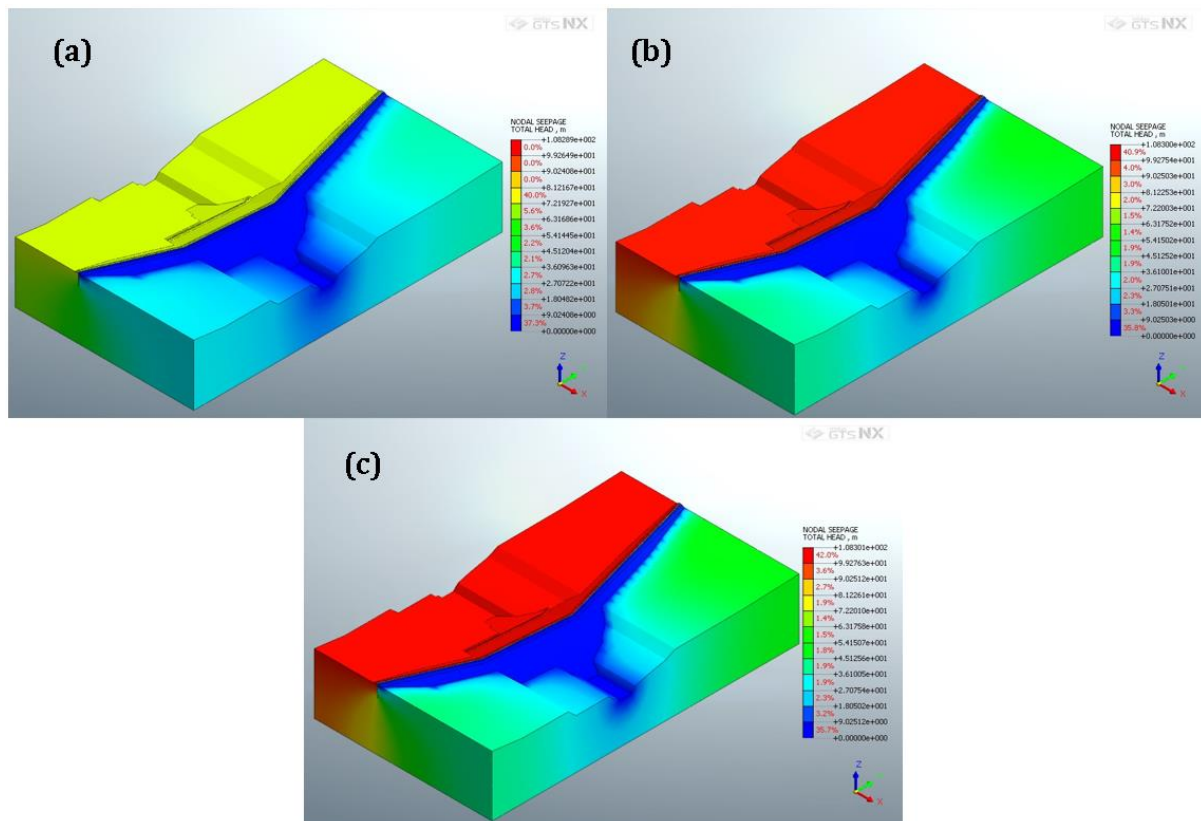
Gambar 2. Penerapan kondisi batas



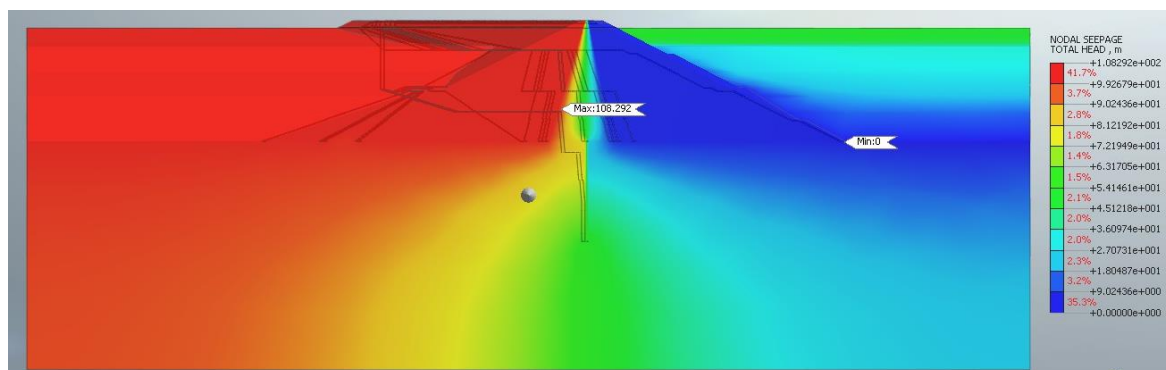
Gambar 3. Hasil *meshing*

Hasil analisis rembesan pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air banjir terdapat pada Gambar 4. Analisis rembesan menunjukkan kenaikan muka air waduk mengakibatkan terjadinya perubahan tekanan air pori yang terjadi di dalam tubuh dan fondasi bendungan. Pada fondasi bendungan adanya tirai sementasi (*grouting*) memperpanjang aliran rembesan yang memperkecil gradien hidrolik sehingga mereduksi tekanan air pori sisi hilir tirai tersebut. Hal ini dapat memperkecil gaya angkat pada dasar bendungan. Pada tubuh bendungan, pembagian zona dengan permeabilitas yang semakin kecil menuju inti bendungan menyebabkan aliran rembesan tidak berpengaruh signifikan pada sisi hilir. Hal ini disebabkan ketika aliran dari lapisan permeabilitas tinggi menuju lapisan dengan permeabilitas rendah menyebabkan aliran

rembesan akan bergerak ke bawah [3], hal ini terlihat dari potongan melintang pola rembesan pada saat muka air banjir yang terdapat pada Gambar 5.

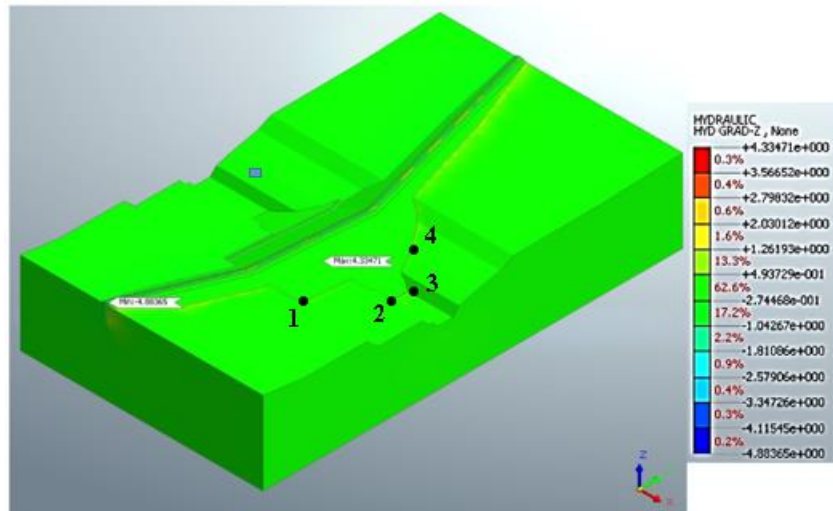


Gambar 4. Hasil analisis rembesan (a) muka air minimum; (b) muka air normal; (c) muka air banjir



Gambar 5. Pola rembesan pada kondisi muka air banjir

Hasil analisis gradien hidrolis keluar maksimum terdapat pada Gambar 6. Faktor aman terhadap bahaya *piping* dilakukan pada beberapa titik didasar bendungan dengan menggunakan kriteria faktor aman minimum adalah 4 [4]. Analisis dilakukan pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air banjir. Hasil analisis menunjukkan nilai gradien hidrolis keluar di setiap titik tinjauan pada seluruh kondisi muka air berada pada rentang 0,3-0,4. Perhitungan faktor aman terhadap bahaya *piping* secara lengkap terdapat pada Tabel 2. Hasil analisis menunjukkan bendungan aman terhadap bahaya *piping* pada seluruh kondisi muka air. Nilai faktor aman terkecil pada Tabel 2 sebesar 4,58 menunjukkan bahwa gaya akibat berat efektif tanah memiliki nilai 4n58 kali lebih besar dari gaya hidrodinamik akibat rembesan.



Gambar 6. Nilai gradien hidrolis keluar dan titik tinjauan potensi piping

Tabel 2. Hasil analisis keamanan terhadap bahaya piping

Kondisi	Titik	γ^* (kN/m ³)	γ_w (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	i_c	i_e	Faktor aman
Muka air minimum	1	26	9,81	16,19	1,65	0,23	7,18
	2	26	9,81	16,19	1,65	0,33	5,00
	3	26	9,81	16,19	1,65	0,33	5,00
	4	26	9,81	16,19	1,65	0,20	8,25
Muka air normal	1	26	9,81	16,19	1,65	0,33	5,00
	2	26	9, 81	16,19	1,65	0,21	7,86
	3	26	9,81	16,19	1,65	0,20	8,25
	4	26	9,81	16,19	1,65	0,36	4,58
Muka air banjir	1	26	9,81	16,19	1,65	0,34	4,85
	2	26	9,81	16,19	1,65	0,20	8,25
	3	26	9,81	16,19	1,65	0,20	8,25
	4	26	9,81	16,19	1,65	0,28	5,89

*Unit weight fondasi bendungan (breksi vulkanik)

Sebagai perbandingan, analisis bahaya *piping* dilakukan menggunakan pendekatan empiris dengan menghitung nilai WCR menggunakan Persamaan 4. Pada bendungan ini panjang lintasan horizontal diukur sepanjang fondasi bendungan. Adapun panjang lintasan vertikal adalah kedalaman tirai sementasi pada sisi hulu dan hilir. Perhitungan nilai WCR pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air banjir dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan nilai WCR

Kondisi	L_h (m)	L_v (m)	L_w (m)	H_1-H_2 (m)	WCR
Muka air minimum	519,63	180	353,21	75	4,71
Muka air normal	519,63	180	353,21	105	3,36
Muka air banjir	519,63	180	353,21	107	3,30

Modulus elastisitas fondasi bendungan adalah 10^6 kPa dan tergolong dalam batuan cadas [9] sehingga nilai WCR minimum dari jenis batuan tersebut adalah 1 [8]. Nilai WCR hasil perhitungan lebih besar dari nilai WCR minimum yang dipersyaratkan menunjukkan bendungan aman terhadap bahaya *piping*.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga dan persamaan empiris, dapat disimpulkan bahwa bendungan aman terhadap bahaya *piping*. Pada tubuh bendungan adanya pembagian zona berupa inti tegak dengan permeabilitas rendah menyebabkan aliran rembesan pada kondisi muka air minimum, muka air normal dan muka air banjir tidak merubah secara signifikan kondisi tekanan air pori disisi hilir bendungan. Adapun pada fondasi bendungan, adanya tirai sementasi didasar as bendungan sedalam 90 m menyebabkan panjang jalur lintasan air menuju hilir semakin besar menyebabkan nilai gradien hidrolis keluar mengecil sehingga meningkatkan nilai faktor aman terhadap bahaya *piping*. Pendekatan empiris dengan menghitung WCR dapat dijadikan sebagai acuan awal dalam menilai potensi *piping* sebelum dianalisis lebih lanjut karena memberikan hasil yang tidak begitu berbeda dari perhitungan menggunakan metode elemen hingga. Meskipun aman terhadap bahaya *piping*, kontrol rembesan dengan pemasangan instrumentasi tetap perlu dilakukan untuk memastikan keamanan bendungan selama bendungan tersebut beroperasi.

Daftar Pustaka

- [1] M. A. H. Pramudawati, M. I. Tanjung, and R. Ghafara, "Penilaian Risiko Keamanan Bendungan Di Jawa Timur," *J. Tek. Hidraul.*, vol. 11, no. 2, pp. 93–102, 2020, doi: 10.32679/jth.v11i2.631.
- [2] Z. Wang, "Numerical three-dimensional modeling of earthen dam piping failure," *Water Sci. Eng.*, pp. 1–11, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.09.008>.
- [3] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 1*, 6th ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2012.
- [4] BSN, *SNI 8065: Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2016.
- [5] L. F. Harza, "Uplift and Seepage under Dams in Sand," *Trans. ASCE*, vol. 100, 1935.
- [6] Midas GTS NX, "User Manual," 2020. <https://globalsupport.midasuser.com/helpdesk/KB/View/32636343-midas-gts-nx-manuals-and-tutorials> (accessed Oct. 27, 2023).
- [7] C. Andreea, "Unsaturated Slope Stability and Seepage Analysis of a Dam," *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 93–98, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.278>.
- [8] E. W. Lane, "Security from Under Seepage, Masonry Dam on Earth Foundation," *Trans. ASCE*, vol. 100, 1935.
- [9] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1996.