

Evaluasi Tekanan Air Pori dan Rembesan Pada Bendungan Panohan

Adib Lathiful Huda¹, Sri Prabandiyani R.W.², Suharyanto³

^{1,2,3} Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro – Semarang - Indonesia
e-mail: adib.geologist@gmail.com. No. 085640416166

ABSTRAK

Salah satu penyebab kegagalan struktur bendungan adalah terjadinya rembesan yang dipicu oleh tingginya tekanan air pori yang terjadi pada tubuh bendungan. Pada Bendungan Panohan, kebocoran rembesan terjadi hingga memotong lereng hilir bendungan yang dapat mengganggu stabilitas tubuh bendungan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi tekanan air pori dan rembesan di tubuh Bendungan Panohan menggunakan metode analisis instrumentasi piezometer dan v-notch yang kemudian dibandingkan dengan analisis metode elemen hingga (*finite element method / FEM*) menggunakan program perangkat lunak SEEP/W. Metode FEM menggunakan parameter desain material selama tahap perencanaan bendungan. Kedua analisis dilakukan pada section C - C Bendungan Panohan menggunakan beberapa variasi ketinggian muka air waduk. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa nilai tekanan air pori dan rembesan pada metode FEM lebih besar dari hasil analisis dengan metode pembacaan instrumentasi pada kondisi muka air minimal dan normal. Kondisi sebaliknya terjadi pada kondisi ketinggian air banjir, yaitu nilai tekanan air pori dan rembesan dari pembacaan instrumentasi lebih besar dari hasil analisis metode FEM. Seiring dengan naiknya ketinggian muka air waduk, terjadi kenaikan nilai tekanan air pori dan rembesan dari kedua hasil analisis. Kondisi rembesan yang terjadi pada Bendungan Panohan saat ini tidak aman pada kondisi muka air banjir, karena memiliki nilai debit rembesan 0,38 ltr/det melebihi dari yang disyaratkan yaitu sebesar 0,35 ltr/det.

Kata kunci : bendungan panohan; tekanan air pori; rembesan; FEM

ABSTRACT

One of the causes of the failure of a dam structure is the occurrence of seepage triggered by high pore water pressure that occurs in the body of the dam. In the Panohan Dam, seepage occurs on the downstream slope of the dam which can disturb the stability of the dam body. The purpose of this research is to evaluate the pore water pressure and seepage in the Panohan Dam body using the piezometer and v-notch instrumentation reading method which is then compared with the finite element (FEM) method using SEEP/W software program. FEM method uses material parameters during the dam planning stage. Both analyses were carried out on the C – C section of the Panohan Dam using several variations of reservoir water level. The comparison results show that pore water pressure in the FEM method is greater than the pore water pressure value based on the piezometer method at the minimum and normal water level conditions. The opposite condition occurs in maximum water level conditions. The seepage value of the v-notch reading is greater than the seepage value from the FEM method. Seepage that occurs in the Panohan Dam is currently unsafe under the maximal water level conditions.

Keywords : panohan dam; pore water pressure; seepage; FEM

1. PENDAHULUAN

Tekanan air pori yang tinggi merupakan salah satu faktor yang dapat mengakibatkan terjadinya rembesan yang memicu terjadinya *piping* dan mengganggu

kestabilan bendungan. Menurut Foster, dkk., (2000), berdasarkan data hingga tahun 1986, keruntuhan bendungan akibat proses *piping* yang melalui badan bendungan mencapai 30,5% dari total kejadian keruntuhan bendungan di seluruh dunia.

Keruntuhan akibat *piping* tersebut paling banyak terjadi pada bendungan tipe *earthfill* atau urugan tanah. Oleh karena itu diperlukan adanya pemantauan dan evaluasi berkala terhadap kondisi tekanan air pori dan rembesan pada suatu bendungan yang biasanya dilakukan menggunakan instrumen piezometer dan v-notch yang terpasang pada tubuh bendungan.

Garis rembesan yang memotong lereng di hilir bendungan dapat membuat bendungan menjadi tidak aman, karena dapat membawa butir-butir tanah dari lereng. Mulanya, terjadi lubang kecil, lama-lama membesar dan akan terus bergerak menjadi pipa atau terowongan yang dapat menyebabkan keruntuhan, yang disebut dengan peristiwa *piping*. Hal ini dapat menyebabkan stabilitas bendungan terganggu, yang berpotensi mengakibatkan kelongsoran, yang diakibatkan material properties tanah tidak sesuai lagi dengan desainnya dikarenakan tanah jenuh air (*saturated*). Sehingga menyebabkan kepadatan dan tegangan geser (sudut geser dan kohesi) tanah semakin kecil, sehingga kemampuan tanah dalam mengikat antar partikel menjadi berkurang, menjadikan partikel mudah lepas, dengan kata lain partikel tanah menjadi *loose*.

Bendungan Panohan merupakan bendungan tipe urugan zonal inti tegak yang mulai dibangun pada tahun 2005 dan beroperasi pada tahun 2010. Pada Bendungan Panohan terjadi beberapa rembesan yang terletak di beberapa bagian tubuh bendungan, diantaranya memotong lereng bagian hilir bendungan di atas *toe drain*. Kondisi rembesan yang memotong tubuh bendungan di bagian hilir ini berpotensi mengakibatkan *piping* apabila semakin tidak terkendali dan mengganggu

kestabilan bendungan. Untuk itu perlu dilakukan penelitian untuk mengevaluasi kondisi tekanan air pori dan rembesan yang terjadi pada tubuh Bendungan Panohan apakah masih aman dan masih sesuai dengan yang telah direncanakan.

Toleransi terhadap rembesan yang melalui bendungan dapat ditinjau dari tinggi bendungan dan jumlah kuantitas rembesan yang terjadi. Jumlah kuantitas rembesan yang diijinkan ditampilkan pada Tabel 1 (Look, 2007).

Tabel 1. Kriteria Penerimaan Rembesan pada Tubuh Bendungan (Look, 2007)

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

Selain itu, analisis terhadap rembesan yang melewati tubuh bendungan juga dapat diketahui dari index rembesannya (Q_i). Jika $Q_i < 1$, maka rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan masih normal dan tidak menimbulkan kebocoran dan ketidakstabilan pada tubuh bendungan (Novak, dkk., 2001). Persamaan index debit rembesan ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$QI = \frac{q}{1000.A.k.i} \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

- Q_i = *Seepage index* (index debit rembesan)
- q = Debit rembesan melalui tubuh bendungan per satuan lebar (ltr/detik/m)
- A = Luasan elemen dalam satu penampang (m^2)
- k = Koefisien permeabilitas pada inti bendungan (m/det)

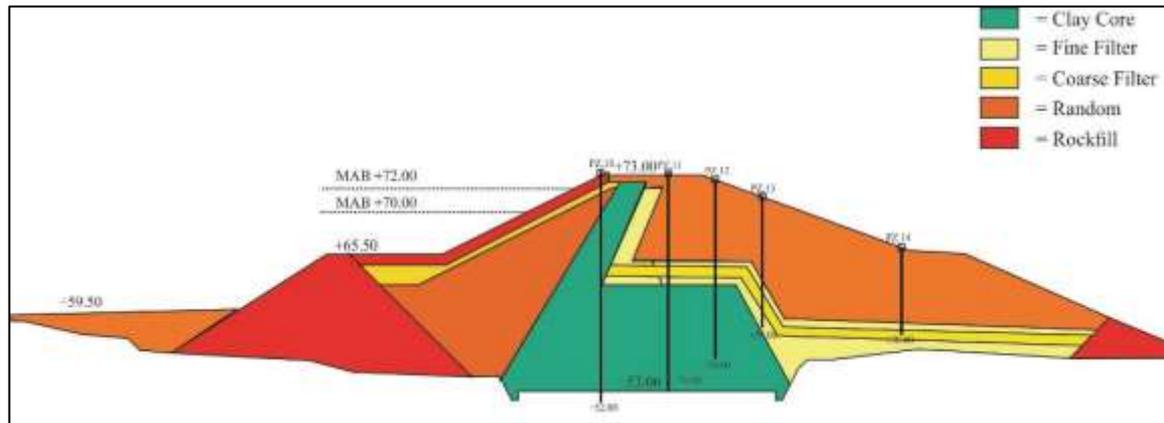
i = Gradien hidraulik yang melewati tubuh bendungan

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini menggunakan metode analisis tekanan air pori dan rembesan berdasarkan pengamatan instrumentasi piezometer dan v-notch yang ada pada tubuh Bendungan Panohan. Selain itu sebagai pembanding adalah analisis tekanan air pori dan rembesan menggunakan metode elemen hingga (SEEP/W) yang menggunakan parameter desain saat pembangunan Bendungan

Panohan. Komparasi kedua hasil analisis ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi tekanan air pori dan rembesan yang terjadi pada tubuh Bendungan Panohan.

Bendungan Panohan terletak di daerah Rembang, Jawa Tengah, Indonesia dan merupakan bendungan urugan tanah dan batu dengan inti (*core*) miring, lereng hulu dari inti tersebut dilindungi dengan filter transisi dan zona timbunan batu dengan perlindungan rip-rap. Lereng hilir dari inti juga dilengkapi dengan filter halus kemudian filter transisi dan timbunan random seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Potongan *section C – C* Bendungan Panohan (BBWS Pemali Juana, 2006)

Parameter desain yang digunakan ketika merencanakan Bendungan Panohan yang akan digunakan untuk analisis FEM (SEEP / W) ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Desain Parameter Bendungan Panohan

Deskripsi	k (m/sec)	v_m kN/m ³	c kN/m ²	θ deg
Core (clay)	$5,926 \times 10^{-8}$	16,387	19,033	10,7
Fine Filter	1×10^{-5}	19,300	0	30
Coarse Filter	5×10^{-5}	19,000	0	30
Random	1×10^{-6}	19,50	0	35

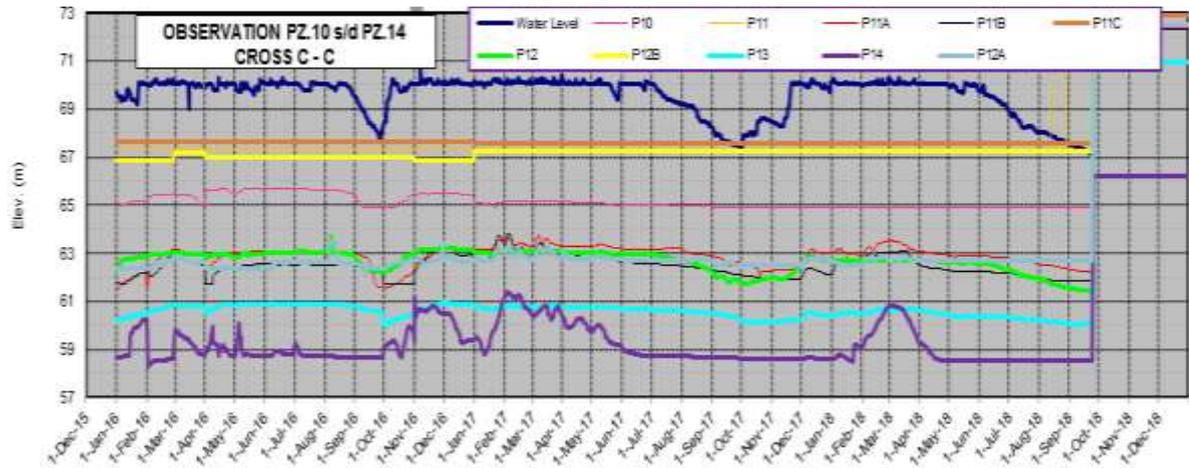
Rockfill	1×10^{-4}	18,500	0	40
Pondasi	5×10^{-7}	20,120	100,00	35

Sumber : (BBWS Pemali Juana, 2006)

Analisis metode elemen hingga (SEEP/W) menggunakan analisis *steady state* pada tiap ketinggian muka air waduk, menghasilkan output nilai tekanan air pori pada setiap titik piezometer dan debit rembesan di hilir bendungan yang kemudian dibandingkan dengan tekanan air pori dan rembesan hasil pembacaan instrumen piezometer dan v-notch. Pada section C - C Bendungan Panohan terpasang 7 piezometer standpipes

(PZ10, PZ11A, PZ11B, PZ12, PZ12A, PZ13, dan PZ14) yang masih aktif dan dilakukan pengukuran harian untuk menentukan nilai tekanan air pori pada titik piezometer. Gambar 2. menunjukkan hasil pengukuran piezometer pada section C - C

dari 1 Januari 2016 hingga 24 September 2018. Gambar 3 menunjukkan hasil pengukuran V-Notch pada hilir Bendungan Panohan dari tanggal 1 Januari 2016 hingga 24 September 2018.



Gambar 2. Hasil pengukuran piezometer pada section C – C



Gambar 3. Hasil pengukuran V-Notch pada Bendungan Panohan

Analisis tekanan air pori dan rembesan pada Bendungan Panohan dilakukan pada beberapa kondisi muka air waduk, yaitu pada kondisi muka air waduk minimal (+67,10 m dan +68,50 m), kondisi muka air waduk normal (+70,00 m) dan kondisi muka air waduk banjir

(+70,30 m). Data yang sesuai dengan kondisi muka air waduk yang digunakan dalam analisis adalah data pembacaan pada tanggal 24 September 2018 (+67,10 m), 12 Juli 2018 (+68,50 m), 17 Januari 2018 (+70,00 m) dan 11 Maret 2017 (+70,30 m).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Tekanan Air Pori

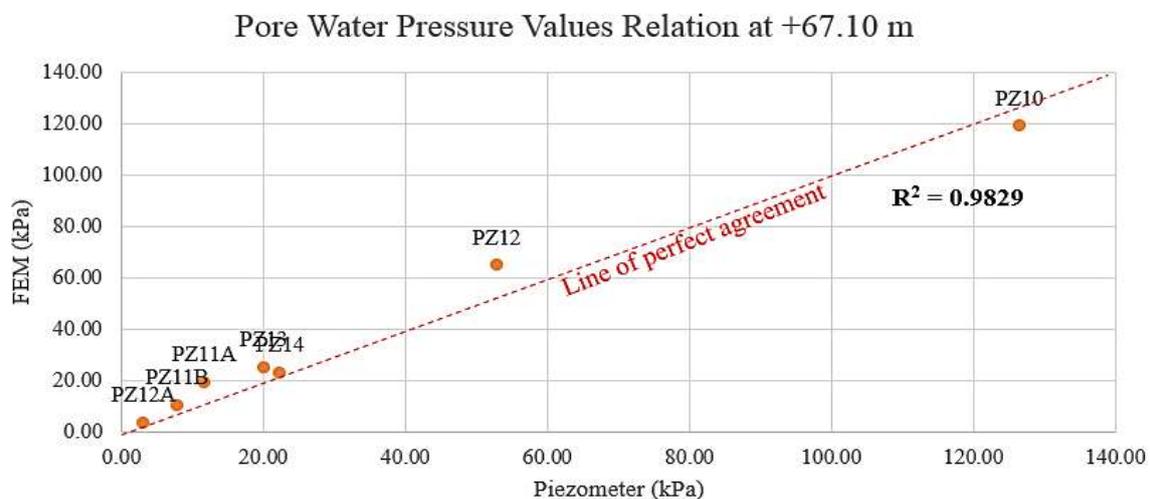
Hasil analisis tekanan air pori di kondisi level air reservoir +67,10 m ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil analisis tekanan pori piezometer pada kondisi +67.10 m

Code PZ	Elv. Tip (m)	Dip Meter (m)	PWP PZ (mH ₂ O)	PWP PZ (KPa)	PWP FEM (KPa)	Deviasi (KPa)
PZ10	52,00	7,47	12,89	126,45	119,22	-7,23
PZ11A	61,00	10,12	1,19	11,67	19,64	7,97
PZ11B	61,88	9,64	0,80	7,85	10,74	2,89
PZ12	56,00	9,57	5,39	52,83	65,06	12,23
PZ12A	62,40	9,77	0,32	3,14	3,75	0,61
PZ13	58,00	10,91	2,05	20,06	25,22	5,16
PZ14	58,00	5,92	2,28	22,35	23,24	0,89

Hasil perbandingan yang telah diperoleh dapat dikatakan bahwa secara dominan tekanan air pori yang diukur dengan piezometer masih di bawah nilai tekanan air pori dari analisis FEM. Hanya ada satu titik piezometer yang memiliki nilai tekanan air pori lebih besar dari yang direncanakan, yaitu pada titik PZ10 yang

memiliki penyimpangan -7,23 KPa. Hubungan antara nilai tekanan air pori piezometer dan FEM ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai tekanan air pori dari kedua analisis memiliki hubungan yang sangat kuat karena memiliki koefisien korelasi $r = 0,991$.



Gambar 4. Hubungan nilai tekanan air pori pada kondisi MAW +67.10 m

Hasil perbandingan tekanan air pori pada kondisi MAW +68,50 m dan +70,00 m memiliki hasil yang hampir sama dengan kondisi MAW +67,10 m, yaitu dominan nilai tekanan air pori pada pengukuran piezometer masih lebih kecil dari nilai tekanan air pori

dalam analisis FEM, kecuali untuk titik PZ14 di hilir bendungan yang memiliki nilai tekanan pori piezometer yang lebih besar dari analisis FEM. Hasil-hasil ini dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Hasil analisis tekanan air pori piezometer pada kondisi +68,50 m

Code PZ	Elv. Tip (m)	Dip Meter (m)	PWP PZ (mH ₂ O)	PWP PZ (KPa)	PWP FEM (KPa)	Deviasi (KPa)
PZ10	52,00	7,47	12,89	126,45	127,23	0,78
PZ11A	61,00	9,60	1,71	16,78	21,92	5,14
PZ11B	61,88	9,55	0,89	8,73	12,52	3,79
PZ12	56,00	8,82	6,14	60,18	69,12	8,94
PZ12A	62,40	9,65	0,44	4,32	4,72	0,40
PZ13	58,00	10,68	2,28	22,32	25,75	3,43
PZ14	58,00	5,75	2,45	24,01	23,51	-0,50

Tabel 5. Hasil analisis tekanan air pori pada kondisi MAW +70,00 m

Code PZ	Elv. Tip (m)	Dip Meter (m)	PWP PZ (mH ₂ O)	PWP PZ (KPa)	PWP FEM (KPa)	Deviation (KPa)
PZ10	52,00	7,44	12,92	126,75	135,80	9,05
PZ11A	61,00	9,35	1,96	19,23	24,12	4,89
PZ11B	61,88	9,49	0,95	9,32	14,15	4,83
PZ12	56,00	8,24	6,72	65,87	73,41	7,54
PZ12A	62,40	9,55	0,54	5,30	5,68	0,38
PZ13	58,00	10,43	2,53	24,77	26,30	1,53
PZ14	58,00	5,68	2,52	24,70	23,76	-0,94

Berbeda dengan hasil perbandingan sebelumnya, pada kondisi muka air banjir +70,30 m menunjukkan bahwa secara dominan nilai tekanan air pori dalam pembacaan piezometer lebih tinggi daripada hasil analisis FEM seperti yang ditunjukkan

pada Tabel 6. Pada titik PZ11B, PZ12A, PZ13, dan PZ14 memiliki nilai deviasi negatif yang berarti bahwa nilai tekanan air pori pada titik tersebut telah melebihi yang direncanakan sebelumnya.

Tabel 6. Hasil analisis tekanan air pori pada kondisi MAW +70,30 m

Code PZ	Elv. Tip (m)	Dip Meter (m)	PWP PZ (mH ₂ O)	PWP PZ (KPa)	PWP FEM (KPa)	Deviasi (KPa)
PZ10	52,00	7,16	13,20	129,49	137,51	8,02
PZ11A	61,00	8,93	2,38	23,35	24,56	1,21
PZ11B	61,88	8,96	1,48	14,52	14,48	-0,04
PZ12	56,00	7,90	7,06	69,21	74,26	5,05
PZ12A	62,40	9,35	0,74	7,26	5,87	-1,39
PZ13	58,00	10,19	2,77	27,12	26,41	-0,71
PZ14	58,00	5,50	2,70	26,47	23,81	-2,66

Secara konsisten pada titik PZ14 di hilir bendungan memiliki nilai tekanan air pori piezometer yang lebih besar dari hasil analisis FEM. Hal ini menunjukkan bahwa pada titik ini terjadi akumulasi debit rembesan yang besar yang menyebabkan peningkatan nilai tekanan air pori dan garis freatik bendungan yang memicu terjadinya rembesan yang memotong hilir Bendungan Panohan.

Keseluruhan komparasi nilai tekanan air pori yang telah dilakukan dapat dikatakan bahwa hasil analisis pembacaan piezometer dapat lebih besar dari hasil analisis numerik, ataupun dapat juga lebih kecil dari hasil analisis numerik. Nilai hasil analisis numerik yang lebih besar dari pada pengamatan lapangan sesuai dengan penelitian Akhtarpour, dkk., (2015) pada Bendungan Masjid-E-Soleyman, bahwa hasil tekanan air pori yang dianalisis secara numerik (dengan pemodelan PLAXIS) memiliki nilai yang lebih besar dari pada hasil pada pengamatan sebenarnya dengan menggunakan piezometer. Pada penelitian Akhtarpour, dkk., (2015) tersebut, deviasi yang terjadi cukup besar mencapai 88% yang diukur pada saat pengisian pertama bendungan dimana nilai tekanan air pori numerikal adalah 956 kPa, sedangkan tekanan air pori pengamatan piezometer adalah sebesar 509 kPa. Pada penelitian Undayani (2016) yang

membandingkan nilai tekanan air pori menggunakan PLAXIS dan data piezometer pada Bendungan Sermo juga menghasilkan tekanan air pori pada permodelan numerik yang lebih besar daripada data pembacaan piezometer, dimana tekanan air pori pada perhitungan numerik menghasilkan nilai 58,903 KPa dan tekanan air pori menunjukkan nilai 49,603 KPa pada elevasi muka air waduk +136,73 meter.

Hasil perbandingan yang beragam juga terjadi pada hasil penelitian Keyvanipour, dkk., (2013) pada Bendungan Sirjan dengan menggunakan PLAXIS dimana model yang digunakan adalah Mohr-Coulomb, bahwa nilai tekanan pori yang diamati pada dua piezometer ada yang lebih besar dan ada yang lebih rendah dari pada hasil analisis dengan PLAXIS, meskipun hasil secara numerikal secara umum lebih besar dari pada pengamatan lapangan. Begitu pula dengan Morton, dkk., (2008) dengan hasil bahwa nilai tekanan pori piezometer ada yang lebih besar dan ada yang lebih kecil terhadap hasil analisis.

3.2. Analisis Rembesan

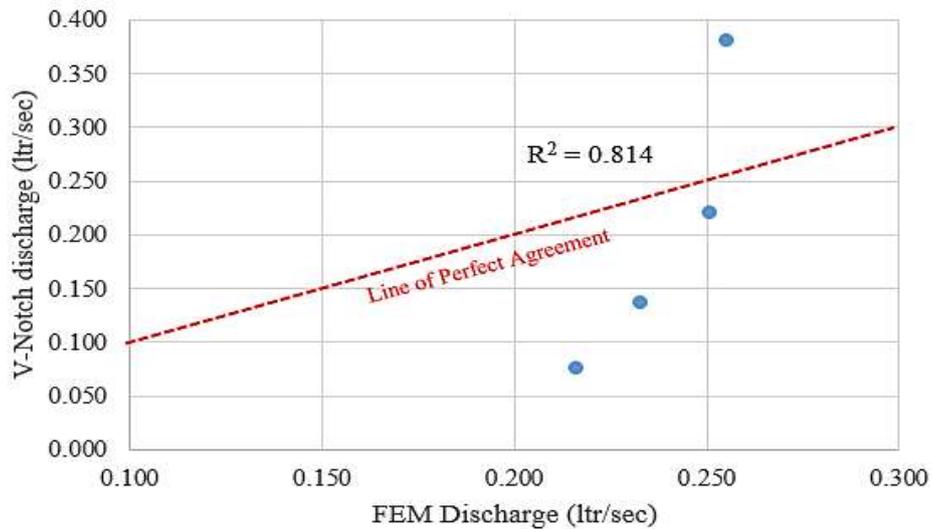
Hasil pengukuran rembesan pada v-notch dan analisis FEM dapat ditunjukkan pada Tabel 7. Debit rembesan diukur pada semua kondisi permukaan air waduk.

Tabel 7. Hasil analisis rembesan pada semua kondisi muka air waduk

No	Kondisi Operasi		FEM		V-Notch	
	Tanggal	MAW (m)	(m ³ /det)	(ltr/sdet)	(m ³ /det)	(ltr/det)
1	24-Sep-18	67,10	2,16E-04	0,216	7,67E-05	0,077
2	12-Jul-18	68,50	2,33E-04	0,233	1,38E-04	0,138
3	17-Jan-18	70,00	2,51E-04	0,251	2,20E-04	0,220
4	11-Mar-17	70,30	2,55E-04	0,255	3,81E-04	0,381

Hasil kedua analisis dapat kita temukan hubungan antara nilai debit rembesan dari analisis FEM dan analisis v-notch seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Secara keseluruhan, nilai debit rembesan v-notch lebih kecil dari nilai debit rembesan FEM, kecuali

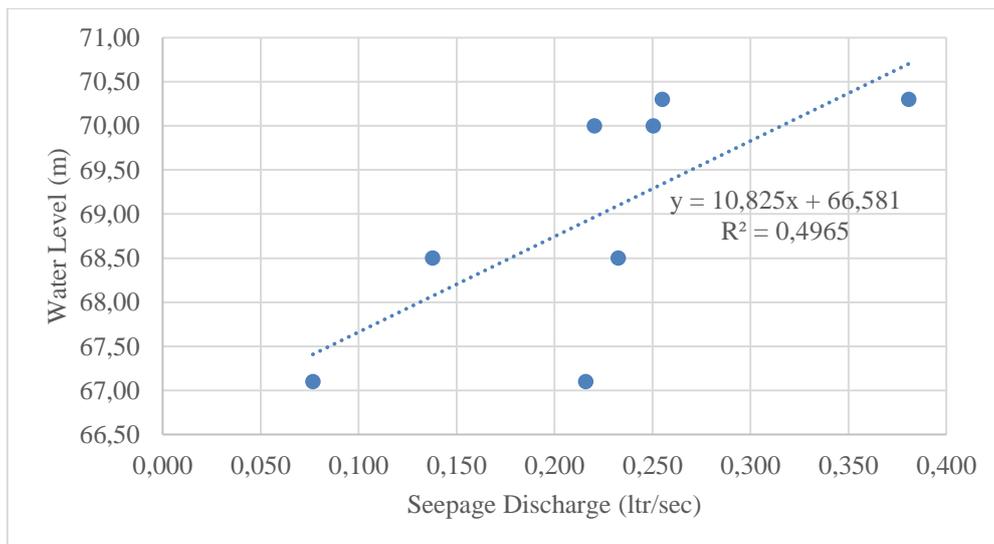
dalam kondisi muka air banjir (+70,30 m), debit v-notch lebih besar dari debit FEM yang ditunjukkan pada titik di atas *line of perfect agreement*. Hubungan antara kedua hasil analisis sangat kuat karena memiliki koefisien korelasi $R = 0,902$.



Gambar 5. Hubungan nilai debit rembesan hasil analisis FEM dan V-Notch

Dapat ditentukan hubungan antara nilai debit rembesan dengan ketinggian muka air dari hasil analisis yang didapatkan, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6. Nilai debit rembesan dari dua hasil analisis bersama-sama secara dominan mempengaruhi permukaan air

waduk dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,496$. Hubungan antara kedua variabel kuat, dengan koefisien korelasi $r = 0,704$. Seiring dengan kenaikan muka air waduk, terjadi peningkatan hasil debit rembesan dari kedua analisis yang telah dilakukan.



Gambar 6. Hubungan antara debit rembesan FEM dan V-Notch

Jika dikategorikan berdasarkan Look (2007), Bendungan Panohan memiliki ketinggian bendungan 19 meter, sehingga masuk dalam kategori bendungan dengan ketinggian 10-20 meter. Dalam kisaran tinggi ini, batas aman dari debit yang diizinkan kurang dari 0,175 ltr / detik. Sedangkan batas tidak aman pada ketinggian ini lebih besar dari 0,35 ltr / detik. Berdasarkan debit aktual dari pembacaan v-notch dan rembesan di lereng hilir Bendungan Panohan pada ketinggian air banjir (+70,30 m), nilai debit rembesan yang dihasilkan adalah 0,381 liter/detik. Jadi jika dikategorikan berdasarkan Look (2007), debit rembesan yang terjadi di Bendungan Panohan berada dalam kondisi yang tidak aman, karena melebihi batas aman 0,35 ltr / detik. Sedangkan berdasarkan Novak, dkk., (2001), kondisi permukaan air waduk secara keseluruhan memiliki nilai indeks rembesan (QI) < 1, sehingga kondisi rembesan yang terjadi di Bendungan Panohan saat ini dalam kondisi aman dan memiliki tidak ada potensi kebocoran atau *piping*.

4. KESIMPULAN

Perbandingan nilai tekanan air pori yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa nilai tekanan air pori berdasarkan analisis FEM (SEEP/W) dapat lebih besar atau lebih kecil dari pengukuran tekanan air pori piezometer. Di Bendungan Panohan sendiri, pada kondisi muka air minimal dan normal, dominan nilai tekanan air pori berdasarkan analisis SEEP/W masih lebih besar dari nilai tekanan air pori yang dihasilkan dari pengukuran piezometer, tetapi sebaliknya yang terjadi pada kondisi muka air banjir. Hal ini disebabkan oleh kebocoran yang terjadi pada lereng hilir Bendungan Panohan yang ditunjukkan oleh tekanan air pori yang tinggi pada titik PZ14 yang berada pada hilir bendungan.

Nilai debit rembesan aktual yang terjadi di Bendungan Panohan berdasarkan pengukuran v-notch menunjukkan nilai yang lebih besar dari analisis FEM pada kondisi ketinggian air banjir (+70,30 m). Berdasarkan Look (2007), kondisi nilai rembesan di Bendungan Panohan saat ini berada dalam kondisi yang tidak aman pada kondisi muka air banjir, sedangkan menurut (Novak, dkk., 2001), kondisi debit rembesan yang saat ini terjadi masih dalam batas aman.

Ketika terjadi kenaikan permukaan air waduk, nilai tekanan air pori dan rembesan meningkat dari kedua analisis yang dilakukan. Hubungan antara hasil analisis instrumentasi bendungan dengan analisis FEM sangat kuat karena memiliki nilai koefisien korelasi antara 0,8 - 1,0. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan metode FEM untuk mengevaluasi tekanan air pori dan rembesan masih sangat relevan.

Kebocoran rembesan yang saat ini terjadi di Bendungan Panohan perlu diatasi sebelum semakin membesar dan menyebabkan *piping* yang dapat mengganggu stabilitas bendungan. Salah satu cara untuk mengatasi ini adalah dengan menambahkan tanggul (berm) pada lereng hilir bendungan sehingga dapat menutupi kebocoran saat ini. Sedangkan untuk penanganan bagian hulu, dengan menambahkan lapisan kedap air (*clay* atau beton) pada bagian hulu bendungan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- 1) Akhtarpour, A., Soroush, A., Salari, M. (2015). Pore Water Pressure Development and Dissipation in Core of Masjed-E-Soleyman Rockfill Dam. Hydropower'15", Stavanger, Norway, 15-16 Juni 2015.
- 2) BBWS Pemali Juana. (2006). Laporan Supervisi Pelaksanaan Pembangunan

- Bendungan Panohan. Semarang : Kementerian PU.
- 3) Bowles, J.E. (1989). Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah). Diterjemahkan oleh Hainim J.K. Jakarta : Erlangga.
 - 4) Das, B. M. (1995). Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis). Jilid 1 cetakan ke-3. Diterjemahkan oleh Noor Endah Mochtar dan Indra Surya B. Mochtar. Jakarta : Erlangga.
 - 5) Foster, M. Fell, R & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. Kanada : Canadian Geotechnical Journal, 37(5), 1000-1024.
 - 6) Look, B.G. (2007). Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables. Taylor & Francis Group: London, 200; 293; 301 p.
 - 7) Morton, K.L., Muresan, M.C., Debswana, F.R. (2008). Importance of Pore Pressure Monitoring in High Walls. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 225 – 238.
 - 8) Keyvanipour, M., Moharrampour, M., Ranjbar, M.K. (2013). An Evaluation and Comparison of Sirjan's Embankment Behavior with Instrumentation Data and Software PLAXIS. Industrial Science, Vol.1, Issue.1, Okt.2013, 1 – 7.
 - 9) Soedibyo. (1987). Teknik Bendungan, Jakarta: Pradnya Paramita.
 - 10) Triatmodjo, B. (1993). Hidraulika I. Beta Offset: Yogyakarta, 202-206 p.
 - 11) US Army Corps of Engineers. (1993). EM 1110-2-1901. Seepage Analysis and Control For Dams, Washington. 4-21-24; 6-1-5; 8-1-10 p.
 - 12) US Army Corps of Engineers. (1995). EM 1110-2-1908. Instrumentation of Embankment Dam and Levees. Washington.
 - 13) US Army Corps of Engineers. (2004). EM 1110-2-2300. General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams, Washington. 2-3-6 p.
 - 14) Undayani, C.S. (2016). Analisis Tekanan Air Pori Menggunakan Metode Elemen Hingga Dengan Permodelan Mohr-Coulomb Pada Plaxis. Konferensi Nasional Teknik Sipil 10. Semarang : Universitas Atma Jaya.
 - 15) Wesley, L.D. (1973). Mekanika Tanah. diterjemahkan oleh A.M. Luthfi. Bandung : Badan Penerbit Pustaka Umum.