

PERILAKU TEKANAN AIR PORI PADA BENDUNGAN BAJULMATI MULAI PENGISIAN HINGGA TAHUN 2020

Rahaman Hakim ARDIANSYAH^{1,2*}, Nofyar Dwi KHURTUMI²

¹Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

²Balai Teknik Bendungan, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, Indonesia

*Email korespondensi: rahmanhakim.a@gmail.com

[diterima: 1 September 2021, disetujui: 26 Agustus 2022]

ABSTRACT

The Bajulmati Dam began initial impounding in 2015 and monitoring of pore water pressure is carried out by measuring pneumatic piezometers installed in the embankment and foundation of the dam. Routine monitoring and good interpretation of the piezometer reading data installed on the dam need to be carried out in order to determine the behavior of the pore water pressure on the dam, so that it can detect early problems that may be occurring, given that pore water pressure can affect the safety of slope stability. The purpose of this study was to obtain the behavior of pore water pressure in the Bajulmati Dam starting from initial impounding until 2020. The behavior of pore water pressure in the Bajulmati Dam was carried out by modeling SEEP/W with transient conditions, then compared with the data from piezometer measurements in the field. The modeling results show that the reservoir water level affects the behavior of the pore water pressure on the embankment dam. Sta 17 there are 13 piezometers but in good condition they can provide readings of 10 piezometers. The pore water pressure values from the modeling results are lower than the piezometers measurements (PP6, PP7, PP10 and PP11) and some are higher (PF2, PP3, PP8 and PP9). The relative error value of pore water pressure is still below 12%, so the difference in value is acceptable.

Key words: Bajulmati Dam, pore water pressure, piezometer, SEEP/W.

INTISARI

Bendungan Bajulmati mulai pengisian awal waduk pada tahun 2015 dan pemantauan tekanan air pori dilakukan dengan pengukuran pisometer pneumatik yang dipasang di dalam tubuh dan pondasi bendungan. Pemantauan rutin dan interpretasi yang baik dari data pembacaan pisometer yang terpasang pada bendungan perlu dilakukan guna mengetahui perilaku tekanan air pori pada bendungan, sehingga dapat mengetahui secara dini masalah yang mungkin sedang terjadi, mengingat bahwa tekanan air pori dapat mempengaruhi keamanan stabilitas lereng. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan perilaku tekanan air pori pada Bendungan Bajulmati mulai dari pengisian awal waduk hingga tahun 2020. Perilaku tekanan air pori pada Bendungan Bajulmati, dilakukan dengan pemodelan SEEP/W kondisi transient, kemudian dibandingkan dengan data hasil pengukuran pisometer di lapangan. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa muka air waduk mempengaruhi perilaku tekanan air pori pada tubuh bendungan. Pada Sta 17 terdapat 13 pisometer namun kondisinya yang masih baik sebanyak 10 pisometer, yaitu PF2, PP3, PP5, PP6, PP7, PP8, PP9, PP10 dan PP11. Nilai tekanan air pori hasil pemodelan ada yang lebih rendah daripada pengukuran pisometer (PP6, PP7, PP10 dan PP11) dan ada yang lebih tinggi (PF2, PP3, PP5, PP8, dan PP9). Nilai *relative error* tekanan air pori dari keduanya masih di bawah 12%, sehingga perbedaan nilai dapat diterima.

Kata kunci: Bendungan Bajulmati, tekanan air pori, pisometer, SEEP/W.

PENDAHULUAN

Bendungan disamping memiliki manfaat yang sangat besar juga menyimpan potensi bahaya yang sangat besar pula yang dapat mengancam kehidupan masyarakat luas di hilir bendungan. Kegagalan (keruntuhan) bendungan dapat menimbulkan banjir besar yang mengakibatkan bencana dahsyat di hilir bendungan berupa jatuhnya korban jiwa, kerugian harta benda dan kerusakan lingkungan (Wijayanti, et al., 2013). Kegagalan bendungan dapat diakibatkan oleh beban luar yang bekerja (seperti tekanan air waduk dan gempa), maupun berat tubuh bendungan itu sendiri yang membebani lapisan-lapisan di bawahnya, serta pondasi. Semakin tinggi suatu bendungan, semakin tinggi juga potensi ketidakstabilan pada lerengnya. Berdasarkan data statistik, kegagalan bendungan di dunia yang diakibatkan oleh ketidakstabilan lereng sebesar 6 % (ICOLD, 2017). Pada beberapa penelitian yang pernah dilakukan mengenai tekanan air pori menunjukkan bahwa stabilitas lereng dipengaruhi oleh tekanan air pori yang ada di dalam tanah atau timbunan (Subiyanti, et al., 2011; Sugianti, 2013).

Tekanan air pori merupakan terjadinya kehilangan tinggi tekanan (*head*) dan tekanan air di lokasi tertentu yang bekerja secara seragam disemua bidang saat air bergerak melalui pori-pori di dalam tanah, batu, atau beton serta melalui retakan, sambungan, dan celah (FEMA, 2015). Tekanan air pori diukur terhadap tekanan atmosfer, dan besarnya tekanan pori pada tekanan di atmosfer nilainya nol. Hal tersebut didefinisikan sebagai batas permukaan air tanah atau garis freatik. Di bawah permukaan air tanah diasumsikan kondisi tanah jenuh sempurna meskipun kemungkinan besar ada sejumlah udara yang masuk ke dalam pori-pori yang dapat menyebabkan derajat kejenuhan akan sedikit di bawah seratus persen. Di bawah muka air tanah, air pori dapat menjadi statis, yang mana tekanan hidrostatik bergantung pada kedalaman, atau dapat mengalir melalui lapisan

tanah di bawah gradien hidraulik tertentu (Tanchev, 2014). Berdasarkan teori *Bernoulli*, tekanan air pori (u) dapat dihitung dengan perkalian antara *total head* (h) dan berat volume air (γ_w). Perilaku tekanan air pori dapat ditunjukkan dengan bentuk kontur tekanan air pori. Tekanan air pori yang terukur dapat diinterpretasikan berupa kontur yang menghubungkan dengan nilai tekanan yang sama.

Hubungan tekanan air pori terhadap angka keamanan dapat digambarkan berupa semakin meningkatnya tekanan air pori maka dapat menyebabkan tegangan efektif tanah mengalami penurunan sehingga angka keamanan mengalami penurunan (Wulandari, et al., 2018). Selain itu, tekanan air pori pada tubuh bendungan, pondasi atau tumpuan dapat menyebabkan erosi internal yang bahkan dapat berkembang menjadi keruntuhan. (FEMA, 2015). Beberapa kondisi analisis struktur bendungan mempunyai komplektisitas yang cukup tinggi sehingga jika menggunakan analisis secara manual mempunyai tingkat kesulitan dan kerumitan yang tinggi. Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, banyak diciptakan program yang digunakan dalam pemodelan analisis struktur bendungan yang bertujuan untuk mempermudah dalam melakukan analisis. Beberapa penelitian yang pernah dilakukan menunjukkan bahwa kondisi tekanan air pori pada bendungan dapat diperoleh dari hasil analisis rembesan menggunakan program SEEP/W (Dharmayasa, et al., 2014; Hasani, et al., 2013; Subiyanti, et al., 2011). Chen, et al. (2016) melakukan penelitian berupa analisis rembesan selama pengisian awal waduk pada Bendungan Jinping I dengan kondisi *transient*. Gofar, et al. (2006) menjelaskan bahwa analisis *transient* atau aliran tidak tetap didefinisikan sebagai analisis yang terkait dengan waktu karena perubahan kondisi secara spasial dan temporal suatu lingkungan.

Dari penjelasan di atas menunjukkan bahwa tekanan air pori merupakan parameter

yang perlu dipertimbangkan dalam keamanan stabilitas dan dapat berpotensi menyebabkan erosi internal, sehingga penting dilakukan pemantauan. Tekanan air pori pada tubuh bendungan dan pondasi biasanya dipantau menggunakan pisometer. Pemantauan yang rutin dan interpretasi yang tepat dari tekanan air pori diharapkan masalah mengenai stabilitas dan kejadian erosi dapat diketahui (Fontanella, et al., 2012). Tujuan penelitian ini untuk mendapatkan perilaku tekanan air pori di dalam tubuh bendungan dan pondasinya dengan menggunakan pemodelan SEEP/W dari proses awal pengisian awal hingga operasi awal yang kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran pisometer di lapangan.

METODE PENELITIAN

Studi Kasus

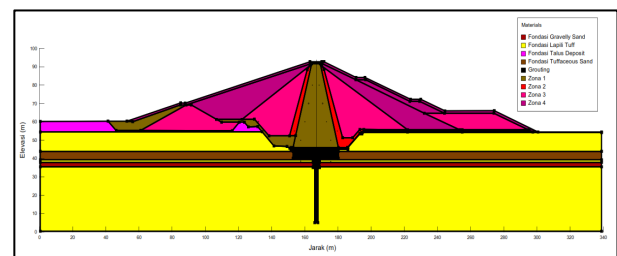
Studi kasus dalam penelitian ini pada Bendungan Bajulmati. Secara administratif, lokasi bendungan berada di dua kabupaten, yaitu di Desa Watukebo, Kecamatan Wongsorejo, Kabupaten Banyuwangi dan Kecamatan Wonorejo, Kabupaten Situbondo. Tinggi bendungan mencapai 46,8 m dengan elevasi puncak bendungan pada EL.+91,8 m. Volume tampungan total yang terbentuk akibat adanya bendungan sebesar 10 juta m³ yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan air berupa mengairi irigasi seluas 1.800 ha dan air baku sebesar 180 lt/detik. Selesai konstruksi pada tahun 2015 dan tanggal 1 Desember 2015 mulai dilaksanakan pengisian awal waduk hingga melimpas melalui mercu pelimpah pada tanggal 3 Januari 2017. Untuk memantau tekanan air pori, pada tubuh bendungan dan pondasi telah dipasang pisometer pneumatik pada 3 *cross section* dan masing-masing *cross section* terdiri dari 13 buah pisometer.

Pemodelan SEEP/W

Analisis perilaku tekanan air pori dilakukan dengan pemodelan menggunakan program GeoStudio 2007, khususnya SEEP/W. Analisis SEEP/W menggunakan kondisi

transient dengan kondisi awal (*initial*) tekanan air pori sesuai data bacaan pisometer pneumatik sebelum pengisian awal waduk. *Initial* tekanan air pori menggunakan metode *spatial function pressure head* yang tersedia dalam program tersebut. Dalam penelitian ini, pemodelan dibuat berdasarkan *cross section* Sta 16 karena pada lokasi tersebut terdapat *horizontal drain*. Pada Sta tersebut tidak terdapat pisometer sehingga data tekanan air pori menggunakan bacaan pisometer dari Sta terdekat yang mewakili, yaitu Sta 17.

Gambar 1 menunjukkan potongan melintang tubuh bendungan dalam analisis SEEP/W yang dibuat dengan menggunakan data teknis dan gambar terbangun sesuai dengan Laporan Akhir Pelaksanaan Konstruksi Pekerjaan Supervisi Konstruksi Penyelesaian Pembangunan Waduk Bajulmati oleh PT. Indra Karya (Persero) tahun 2015. Masing-masing warna menunjukkan zonasi timbunan dan jenis lapisan pondasi yang mempunyai nilai parameter berbeda. Zona 1 ditunjukkan dengan warna coklat yang berfungsi sebagai bagian kedap air. Zona 2 ditunjukkan dengan warna merah sebagai filter. Zona 3 ditunjukkan dengan warna merah muda dan zona 4 ditunjukkan dengan warna ungu berupa urugan batu. Bagian pondasi dibedakan menjadi 4 lapisan batuan, yaitu *Gravely Sand* (coklat kemerahan), *Lapili Tuff* (kuning), *Talus Deposit* (merah muda terang), dan *Tuffaceous Sand* (coklat).



Gambar 1. Potongan melintang tubuh bendungan dalam analisis SEEP/W

Penelitian ini menggunakan parameter dalam pemodelan SEEP/W terdiri dari porositas (n), koefisien permeabilitas (k), dan modulus elastisitas (E). Nilai parameter yang

digunakan berdasarkan Laporan Akhir Pelaksanaan Konstruksi Pekerjaan Supervisi Konstruksi Penyelesaian Pembangunan Waduk Bajulmati oleh PT. Indra Karya (Persero) tahun 2015 dan penelitian yang pernah dilakukan oleh Nanda dan Hamdhan (2016). Tabel 1 menunjukkan parameter material tubuh dan pondasi bendungan.

Tabel 1. Parameter material tubuh dan pondasi bendungan

Zona	Material	n	k (cm/detik)	E (kN/m ²)
1	Clay	0,475	$1,01 \times 10^{-07}$	40.000
2	Filter	0,372	$2,2 \times 10^{-02}$	250.000
3	Soft Rock	0,824	$4,56 \times 10^{-04}$	250.000
4	Coarse Rock	0,385	$1,5 \times 10^{-01}$	250.000
Pondasi	Gravelly sand	0,372	$2,2 \times 10^{-02}$	150.000
Pondasi	Lapilly Tuff	0,824	$1,09 \times 10^{-03}$	250.000
Pondasi	Talus Deposit	0,343	$1,2 \times 10^{-05}$	30.000
Pondasi	Tuffaceous Sand	0,497	$8,5 \times 10^{-05}$	30.000

Data Pengukuran Instrumen

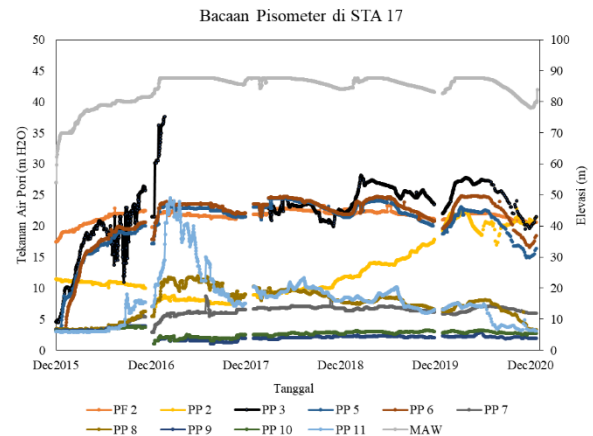
Data bacaan instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data pengukuran elevasi muka air waduk dan pisometer pneumatik. Data pengukuran diperoleh dari SNVT Pembangunan Bendungan BBWS Brantas. Data elevasi muka air waduk yang digunakan dalam penelitian ini dimulai dari pengisian awal waduk yaitu 1 Desember 2015 hingga 31 Desember 2020. Elevasi muka air waduk digunakan untuk memodelkan kenaikan air waduk selama pengisian hingga tahun 2020 sebagaimana disajikan pada Gambar 2.

Data bacaan pisometer penumatik digunakan sebagai *initial* tekanan air pori. Bacaan tersebut sebelum pengisian awal pada tanggal 30 November 2015 sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai *initial* tekanan air pori

No. Pisometer	Nilai Tekanan Air Pori (mH ₂ O)	No. Pisometer	Nilai Tekanan Air Pori (mH ₂ O)
PF2	17,5	PP7	3,2
PP2	11,5	PP8	3,4
PP3	5	PP9	3,3
PP5	3,4	PP10	3,1
PP6	3,4	PP11	3,1

Selain itu, data pisometer pneumatik juga digunakan sebagai komparasi dengan hasil model SEEP/W berupa bacaan mulai 1 Desember 2015 hingga 31 Desember 2020. Dari 13 pisometer pada Sta 17 hanya 10 buah yang kondisinya masih memberikan bacaan sebagaimana disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil pengukuran pisometer Sta. 17

Validasi Pemodelan

Arshad dan Babar (2014) melakukan validasi hasil model rembesan terhadap hasil pembacaan pisometer menggunakan *relative error*. Nilai yang digunakan dalam perhitungan berupa elevasi bacaan tekanan air pori dari pisometer (H_o) dan pemodelan (H_s) dalam satuan meter. Perhitungan dapat dilakukan sesuai dengan Persamaan (1)

$$\text{relative error} = \frac{(H_o - H_s)}{H_o} \times 100\% \quad (1)$$

Ariansyah, et al. (2013) menyebutkan dalam penelitiannya bahwa kesalahan antara pemodelan dan pengamatan besarnya kurang dari 12% masih dianggap baik, sehingga dapat diterima.

HASIL DAN PEMBAHASAN

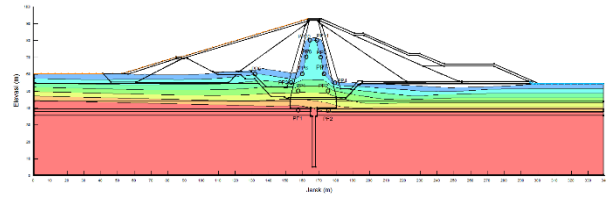
Hasil Pemodelan SEEP/W

Gambar 3 menunjukkan kontur tekanan air pori pada Bendungan Bajulmati sebelum waduk dilakukan pengisian awal waduk. Kontur tekanan air pori dibuat berdasarkan data hasil pengukuran pisometer. Kontur dalam

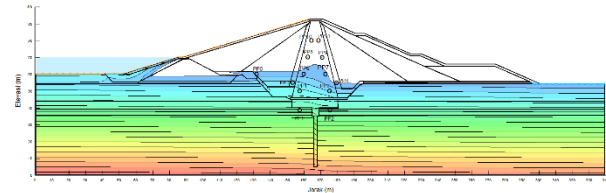
gambar hasil pemodelan berupa garis-garis dengan warna gradasi menunjukkan nilai tekanan air pori. Kontur paling atas merupakan garis rembesan yang mempunyai nilai tekanan air pori sebesar 0 mH₂O. Bagian warna putih pada timbunan menunjukkan kondisi tidak jenuh (*unsaturated*), sedangkan warna gradasi menunjukkan kondisi jenuh (*saturated*). Setiap garis kontur mempunyai kelipatan nilai tekanan air pori sebesar 3 mH₂O.

Sebelum pengisian awal telah terdapat bacaan pada pisometer. Bacaan tekanan air pori di dalam tubuh bendungan diperkirakan berasal dari kandungan kadar air dalam timbunan saat pelaksanaan penimbunan dan pemadatan, sedangkan di dalam pondasi dipengaruhi oleh adanya muka air tanah. Pada awal pengisian waduk saat muka air masih rendah, tekanan air pori yang berada di Zona 1 mengalami penurunan akibat adanya proses disipasi. Kondisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4 dimana elevasi muka air waduk berada pada +69,90 m. Rembesan yang terjadi belum mencapai Zona 1 dan kontur tekanan air pori yang terjadi pada saat pengisian waduk hari ke-23 mengalami penurunan karena belum terdapat pengaruh rembesan dari muka air waduk.

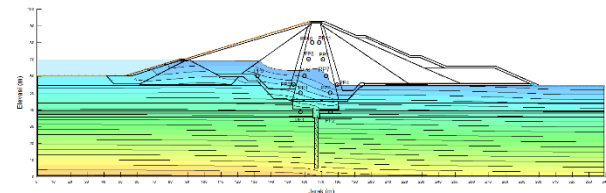
Seiring dengan naiknya muka air waduk pada elevasi +70,08 m, tekanan air pori pada Zona 4 sisi hulu lebih cepat naik atau mendekati sama dengan elevasi muka air waduk. Bentuk tekanan air pori semakin ke arah Zona 1 semakin menurun sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Hal tersebut dipengaruhi oleh nilai permeabilitas material timbunan tubuh bendungan. Zona timbunan yang mempunyai nilai permeabilitas besar maka nilai tekanan air pori cepat terpengaruh dengan kenaikan muka air waduk. Demikian sebaliknya jika nilai permeabilitasnya semakin kecil maka pengaruh kenaikan muka air waduk semakin melambat.



Gambar 3. Kontur *initial* tekanan air pori pada pemodelan

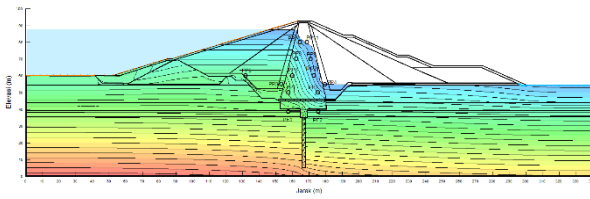


Gambar 4. Kontur tekanan air pori pada hari ke-23 dari awal pengisian

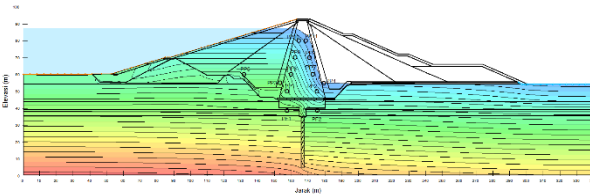


Gambar 5. Kontur tekanan air pori pada hari ke-62 dari awal pengisian

Gambar 6 menunjukkan kontur tekanan air pori pada elevasi muka air waduk mencapai elevasi muka air normal. Dari gambar tersebut memperlihatkan pada saat elevasi muka air waduk mencapai muka air normal (+87,6 m) pada tanggal 13 Januari 2017 atau 410 hari dari pengisian awal waduk, kontur tekanan air pori menunjukkan timbunan Zona 1 belum terjadi jenuh sempurna. Hal ini ditunjukkan dari bentuk permukaan kontur tekanan air pori pada Zona 1 yang belum memenuhi bentuk melengkung (hiperbola). Timbunan pada Zona 1 menunjukkan kondisi telah terjadi jenuh sempurna setelah hari ke 764 dari awal pengisian waduk atau pembacaan pada tanggal 2 Januari 2018 sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7. Hasil rembesan dari pemodelan sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Ardiansyah, et al. (2014) yaitu garis rembesan dalam Zona inti berupa garis lengkung sesuai dengan metode *Casagrande*.

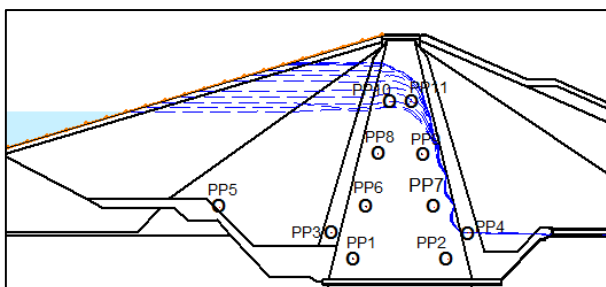


Gambar 6. Kontur tekanan air pori pada awal melimpas melalui pelimpah



Gambar 7. Kontur tekanan air pori pada Zona 1 telah jenuh sempurna akibat pengaruh muka air normal

Permukaan waduk pernah mengalami penurunan hingga terendah selama awal operasi di tahun 2020, yaitu mulai tanggal 5 Juni hingga 7 Desember. Penurunan waduk terjadi dari elevasi +87,60 m hingga ke elevasi +78,06 m dalam kurun waktu 6 bulan. Gambar 8 menunjukkan kondisi garis rembesan terhadap penurunan muka air waduk. Saat muka air waduk mengalami penurunan, kontur tekanan air pori yang ditunjukkan dengan garis rembesan juga mengalami penurunan. Penurunan muka air waduk dengan rata-rata harian sebesar 5,2 cm, menunjukkan pada Zona 1 terdapat keterlambatan penurunan tekanan air pori terhadap penurunan muka air waduk walaupun nilainya kecil.



Gambar 8. Kondisi garis rembesan pada saat muka air waduk mengalami penurunan

Pengaruh muka air waduk terhadap kondisi tekanan air pori sesuai dengan hasil pengujian laboratorium yang pernah dilakukan, menunjukkan bahwa setiap bertambah tinggi muka air waduk maka tekanan air pori semakin meningkat, begitu pula sebaliknya semakin

rendah muka air waduk maka tekanan air pori semakin menurun (Nurnawaty, et al., 2018).

Komparasi SEEP/W dengan Pisometer

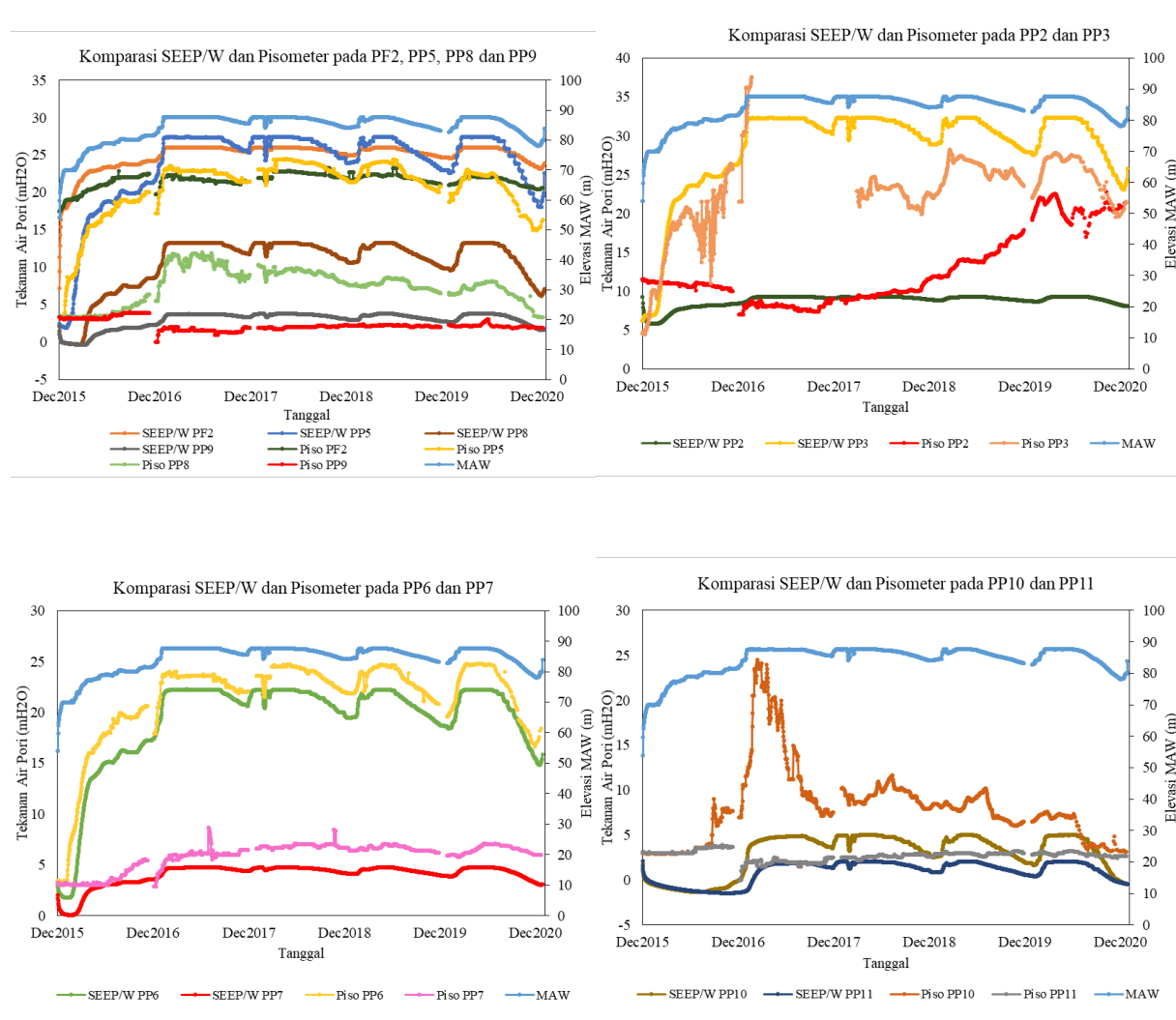
Pada Gambar 9 menunjukkan *trend* tekanan air pori mengikuti fluktuasi muka air waduk. Saat elevasi muka air waduk naik maka nilai tekanan air pori meningkat sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya. Hasil komparasi tekanan air pori antara SEEP/W dan pisometer menunjukkan *trend* yang sama, tetapi nilai tekanan air porinya terdapat perbedaan.

Gambar 9 menunjukkan nilai tekanan air pori pada PP2, PP3, PP5, PP8 dan PP9 mempunyai nilai hasil pemodelan lebih tinggi daripada bacaan pisometer. Nilai tekanan air pori pada PP6, PP7, PP10 dan PP11 mempunyai nilai hasil pemodelan lebih rendah daripada bacaan pisometer. Untuk nilai tekanan air pori PP2 menunjukkan *trend* yang tidak sama antara hasil pemodelan dan bacaan pisometer. Hal ini dimungkinkan pisometer tersebut *error* sehingga nilai bacaan pisometer yang dihasilkan kurang bagus. Meskipun pisometer PP2 masih dapat memberikan bacaan, namun *trend* bacaan tidak sesuai dengan kondisi muka air waduk. Untuk bacaan pisometer PP3 dan PP10 pada pembacaan awal menunjukkan datanya kurang bagus, sehingga *trend* nilai tekanan air pori dengan hasil pemodelan tidak sama. Namun, pada pembacaan awal operasi menunjukkan *trend* bacaan pisometer kembali sesuai dengan kondisi muka air waduk, sehingga *trend* nilai tekanan air pori sesuai dengan hasil pemodelan.

Hasil komparasi yang telah dilakukan dapat dikatakan bahwa terdapat nilai tekanan air pori hasil pemodelan lebih tinggi dan lebih rendah daripada bacaan pisometer. Nilai tekanan air pori dari hasil pemodelan yang diperoleh lebih tinggi daripada bacaan pisometer sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Sari, et al. (2015) pada Bendungan Sermo. Hasil komparasi nilai tekanan air pori yang beragam sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Huda, et

al. (2019) pada Bendungan Panohan yang diperoleh nilai tekanan air pori dari hasil

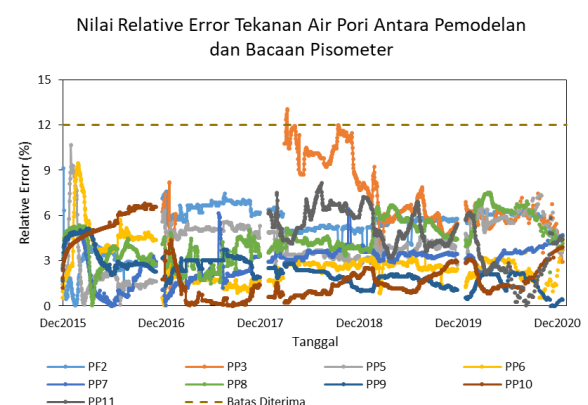
pemodelan ada yang lebih tinggi dan ada yang lebih rendah daripada bacaan pisometer.



Gambar 9. Komparasi tekanan air pori antara SEEP/W dan Pisometer

Selisih nilai tekanan air pori antara hasil pemodelan dan bacaan pisometer dilakukan analisis dengan *relative error* sesuai dengan persamaan (1). Elevasi tekanan air pori dihitung dengan menjumlah antara nilai tekanan air pori dan elevasi pisometer terpasang. Nilai *relative error* pada masing-masing pisometer disajikan pada Gambar 10.

Nilai tekanan air pori dari bacaan pisometer PP3 dan PP11 tidak semuanya digunakan dalam perhitungan. Data yang digunakan mulai dari bacaan yang menunjukkan *trend* sesuai dengan kondisi muka air waduk. Garis putus-putus merupakan batas kriteria dapat diterima sebesar 12%.



Gambar 10. Nilai *relative error* pada masing-masing pisometer

Tabel 3. Nilai maksimum, rata-rata dan median dari perhitungan *relative error*

No. Pisometer	<i>Relative Error (%)</i>		
	Nilai Maksimum	Nilai Rata-rata	Nilai Median
PF2	9,14	5,15	5,60
PP3	13,06	7,27	6,40
PP5	10,70	3,95	3,92
PP6	9,47	2,81	2,68
PP7	6,42	2,84	3,19
PP8	7,52	4,29	4,21
PP9	5,12	2,36	2,29
PP10	6,81	2,22	1,47
PP11	8,16	4,90	4,88

Pada Gambar 10 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa secara keseluruhan perbedaan nilai tekanan air pori dari hasil pemodelan dan bacaan pisometer masih di bawah 12%, sehingga nilai tekanan air pori dari hasil pemodelan dapat diterima.

Tekanan air pori yang terbaca pada pisometer maupun dari pemodelan menunjukkan bahwa pisometer yang berada di bagian hulu lebih besar daripada pisometer yang di bagian hilirnya. Selain itu, *trend* pada pisometer bagian hulu lebih menyerupai *trend* muka air waduk. Kondisi ini sesuai dengan penelitian Jung, et al. (2015) pada salah satu bendungan di Amerika Serikat, yang mana pisometer bagian hulu nilainya lebih besar dan lokasinya yang terdekat dengan waduk sehingga lebih responsif terhadap fluktuasi muka air waduk.

KESIMPULAN

Dari analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa perilaku tekanan air pori pada Bendungan Bajulmati dipengaruhi oleh fluktuasi muka air waduk. Berdasarkan komparasi menunjukkan tekanan air pori dari pemodelan dan bacaan pisometer terdapat perbedaan nilai, namun perbedaan nilai tersebut masih dibawah 12% sehingga masih dalam kondisi dapat diterima. Pemodelan SEEP/W pada Bendungan Bajulmati dengan menggunakan parameter material terpasang belum dapat memberikan nilai tekanan air pori yang sama persis dengan hasil pengukuran di

lapangan yang menggunakan pisometer. Hasil pemodelan SEEP/W perlu dilakukan kalibrasi agar nilai tekanan air pori lebih mendekati dengan hasil pengukuran di lapangan. Pengukuran pisometer perlu dilakukan secara periodik dan rutin agar data bacaan dapat digunakan untuk mengkorelasikan dengan fluktuasi muka air waduk.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada pihak BBWS Brantas yang telah menyediakan data mengenai Bendungan Bajulmati.

REFERENSI

- Ardiansyah, R. H., Sobriyah, Wahyudi, A. H., 2014. Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Debit Rembesan Menggunakan Model SEEP/W (Studi Kasus di Bendungan Benel, Kabupaten Jembrana, Bali). *Matriks Teknik Sipil*, 3(2): 471-476
- Ariansyah, G. B., Sobriyah, Wahyudi, A. H., 2013. Analisis Tinggi Muka Air Waduk Wonogiri Berdasarkan Data Hujan Jam-jaman. *Matriks Teknik Sipil*, 4(1): 446-453.
- Arshad, I., Babar, M. M., 2014. Comparison of SEEP/W Simulations with Field Observations for Seepage Analysis through an Earthen Dam (Case Study: Hub Dam - Pakistan). *International Journal of Research (IJR)*, 1(7), 57-70.
- Chen, Y., Hong, J., Tang, S., Zhou, C., 2016. Characterization of Transient Groundwater Flow Through a High Arch Dam Foundation During Reservoir Impounding. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(4), 462-471.
- Dharmayasa, I. P., Redana, I. W., Putra, T. G., 2014. Analisis Keamanan Lereng Bendungan Utama pada Bendungan Benel di Kabupaten Jembrana. *Jurnal Spektran*, 2(2): 68-77.

- FEMA, 2015. *Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion*. US. Departement of Homeland Security, Washington.
- Fontanella, E., Pagano, L., Desideri, A., 2012. Actual and Nominal Pore Water Pressure Distribution in Earth Dams. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(-): 2485-2494
- Gofar, N., Lee, L. M., Asof, M., 2006. Transient Seepage And Slope Stability Analysis For Rainfall-Induced Landslide: A Case Study. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 18(1): 1-13.
- Hasani, H., Mamizadeh, J., Karimi, H., 2013. Stability of Slope and Seepage Analysis in Earth Fills Dams Using Numerical Model (Case Study: Ilam DAM-Iran). *World Applied Sciences Journal*, 21(9): 1398-1402.
- Huda, A.L., Wardani, S.P.R., Suharyanto, 2019. Evaluasi Tekanan Air Pori dan Rembesan Pada Bendungan Panohan. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, 4(2): 102-111.
- ICOLD, 2017. *Bulletin 164: Internal Erosion of Existing, Levees and Dikes, and their Foundations*. International Commission on Large Dams, Paris.
- Jung, I., Berges, M., Garrett, J. H., Poczos, B., 2015. Exploration and evaluation of AR, MPCA and KL anomaly detection techniques to embankment dam piezometer data. *Advanced Engineering Informatics*, 29(4): 902-917.
- Nurnawaty, Suhardiman, Ihwan, 2018. Analisis Rembesan pada Bendungan Tipe Urugan (Uji Simulasi Lab). *Jurnal Teknik Hidro*, 11(1): 12-22.
- PT. Indra Karya (Persero), 2015. *Laporan Akhir Pelaksanaan Konstruksi Pekerjaan Supervisi Konstruksi Penyelesaian Pembangunan Waduk Bajulmati*. Balai Besar Wilayah Sungai Brantas, Surabaya.
- Sari, U. S., Wardani, S. P. R., Suharyanto, Partono, W., 2016. Analisis Tekanan Air Pori Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Pemodelan Mohr-Coulomb pada Plaxis. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 10*. Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 675-683.
- Subiyanti, H., Rifa'i, A., Jayadi, R., 2011. Analisis Kelongsoran Lereng Akibat Pengaruh Tekanan Air Pori di Saluran Induk Kalibawang Kulonprogo. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, 14(1): 15-25.
- Sugianti, K., 2013. Pengaruh Muka Air Tanah Terhadap Kestabilan Lereng Pada Ruas Jalan Raya Cadaspangeran, Sumedang. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, 22(2): 105-125.
- Tanchev, L., 2014. *Dams and Appurtenant Hydraulic Structures*, 2nd ed. CRC Press, EH Leiden.
- Wijayanti, P., Suprpto, M., Saido, A. P., 2013. Analisis keruntuhan bendungan pacal. *Matriks Teknik Sipil*, 4(1), 488-495.
- Wulandari, P. S., Tjandra, D., 2018. Analisis Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Stabilitas Lereng Waduk Dengan Menggunakan Program Plaxis 2D. *Media Komunikasi Teknik Sipil*. 24(2): 113-121.