

Interpretasi Instrumentasi Piezometer Dalam Rangka Pemantauan Keamanan Bendungan Kedung Ombo

Gerald Guntur P. Siregar*¹, Fajar A. Kurniawan²

^{1,2} Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. Pattimura No. 20 Kebayoran Baru, DKI Jakarta

Submitted : 04, Agustus 2021;

Accepted: 12, September, 2021

Abstrak

Bendungan urugan adalah bendungan yang paling banyak dibangun di dunia terutama di Indonesia. Namun bendungan urugan juga rentan terhadap keruntuhan. Keruntuhan bendungan akibat proses piping yang melalui tubuh bendungan mencapai 30,5% dari total kejadian keruntuhan bendungan di seluruh dunia. Oleh karena itu diperlukan adanya pemantauan dan evaluasi berkala terhadap kondisi tekanan air pori dan rembesan pada suatu bendungan yang biasanya dilakukan menggunakan instrumentasi yang terpasang. Interpretasi instrumentasi pada bendungan urugan tanah yang ada di Indonesia sedikit sekali yang telah dilakukan dimana kondisi ini sangat mengkhawatirkan. Kemungkinan bendungan yang telah berusia tua atau bahkan yang masih baru telah menunjukkan perilaku yang menuju ke arah penurunan keamanan. Kondisi ini dapat dipantau oleh instrumentasi yang ada di bendungan bila diinterpretasikan dengan baik. Bendungan Kedung Ombo sebagai salah satu bendungan urugan yang berusia tua namun memiliki instrumentasi yang cukup lengkap dapat dievaluasi keamanannya terkait dengan tekanan air pori dan garis preatik (garis rembesan). Evaluasi tekanan air pori dilakukan dengan mengumpulkan bacaan piezometer dan fluktuasi muka air waduk dalam rentang waktu beberapa tahun. Hasil penelitian intepretasi bacaan piezometer menunjukkan bahwa secara keseluruhan keamanan bendungan Kedung Ombo masih baik dilihat dari kondisi tekanan air pori. Namun ada beberapa kondisi anomali yang harus diteliti lebih lanjut.

Kata Kunci : bendungan urugan; garis freatik; instrumentasi; piezometer; tekanan air pori

Abstract

The embankment dam is the most widely built dam in the world, especially in Indonesia. However, embankment dams are also prone to collapse. Dam failures due to the piping process through the dam body account for 30.5% of the total dam collapses worldwide. Therefore, it is necessary to periodically monitor and evaluate the condition of pore water pressure and seepage in a dam which is usually carried out using installed

*Corresponding author : gerald.siregar@gmail.com
Another author : fajaraldokokurniawan@gmail.com

instrumentation. Very little has been done on instrumentation interpretation of earthfill dams in Indonesia, which is a very worrying condition. It is possible that old or even new dams have shown behavior that leads to a decrease in safety. This condition can be monitored by instrumentation in the dam if interpreted properly. Kedung Ombo Dam as an old embankment dam but has a fairly complete instrumentation can be evaluated for safety related to pore water pressure and phreatic line (seepage line). Pore water pressure evaluation is carried out by collecting piezometer readings and reservoir water level fluctuations over a period of several years. The results of the research on the interpretation of piezometer readings indicate that the overall safety of the Kedung Ombo dam is still good in terms of pore water pressure conditions. However, there are some anomalous conditions that should be investigated further.

Keywords : *Earthfill Dam; Phreatic Line; Instrumentation; Piezometer; Pore Water Pressure.*

A. 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. et al (1998), 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 (Fell et al. 2015). Oleh karena itu diperlukan adanya pemantauan dan evaluasi berkala terhadap kondisi tekanan air pori dan rembesan pada suatu bendungan yang biasanya dilakukan menggunakan instrumentasi piezometer dan v-notch yang terpasang pada tubuh bendungan (US Army Corps of Engineers, 2004). Interpretasi instrumentasi pada bendungan urugan tanah yang ada di Indonesia sedikit sekali yang telah dilakukan dimana kondisi ini sangat mengkhawatirkan. Kemungkinan bendungan yang telah berusia tua atau bahkan yang masih baru telah menunjukkan perilaku yang menuju ke

arah penurunan keamanan. Kondisi ini dapat dipantau oleh instrumentasi yang ada di bendungan bila diinterpretasikan dengan baik (Prasad & Dixit, 2019).

Pada penelitian ini dilakukan penelitian dengan menganalisis hasil rekaman instrumentasi salah satu bendungan besar di Indonesia yang telah memiliki instrumentasi yang sangat baik. Diharapkan penelitian ini berguna untuk mengetahui apakah bendungan Kedung Ombo memiliki perilaku ke arah tren positif atau negatif. Karena presentase bendungan yang paling banyak dibangun adalah bendungan urugan tanah (*rockfill* dan *earthfill*), maka dipilih pula bendungan urugan tanah yang digunakan sebagai penelitian. Untuk melakukan evaluasi *piping* dan rembesan pada Bendungan Kedungombo, telah dipasang instrumentasi pemantauan bendungan. Jenis instrumentasi yang akan digunakan dalam evaluasi ini adalah instrumentasi piezometer.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Untuk melakukan interpretasi instrumentasi dengan baik, diperlukan pengetahuan bagaimana moda kegagalan

dari bendungan urugan tanah. Tentu saja moda kegagalan dari bendungan sangat beragam, tergantung dari tipe bendungan, usia, jenis fondasi dan material yang digunakan. Moda kegagalan tersebut dipelajari mana yang menghasilkan tipe kegagalan paling mungkin dari bendungan yang ditinjau (Novak et al., 2007). Selain itu dari berbagai moda kegagalan itu secara statistik hanya ada beberapa moda kegagalan yang paling sering ditemui pada bendungan. Dari mode kegagalan pada bendungan yang umum ditemui selanjutnya dapat dilakukan metode monitoring yang sesuai, untuk antisipasi moda kegagalan tersebut. Metode monitoring ini disesuaikan dengan instrumentasi yang ada pada bendungan yang diteliti.

Dalam rangka pemantauan keamanan bendungan terkait tekanan air pori, diperlukan instrumentasi yang dipasang pada tubuh bendungan (Claydon et al., 1990). Piezometer adalah instrumentasi yang digunakan untuk mengukur tinggi muka air atau tekanan air pori pada timbunan, pondasi, abutment, tanah, batuan, atau beton (Central Water Commission, 2018). Pemasangan di berbagai titik di pondasi dan timbunan, tergantung pada perilaku bendungan yang diamati, kadang-kadang mungkin perlu untuk memodifikasi desain bendungan selama konstruksi atau menerapkan beberapa tindakan pencegahan tambahan selama operasi untuk memastikan keamanan dan stabilitas bendungan (Mahgerefteh, 1979).

Kontur rembesan atau yang biasanya disebut dengan tekanan air pori berdasarkan bacaan piezometer dapat memprediksi posisi garis freatik. Untuk melakukan pembacaan terhadap tekanan air pori, dilakukan (1) pengumpulan data piezometer pada bendungan beserta waktu pembacaan piezometer dan elevasi reservoir saat pembacaan dilakukan (2)

melakukan konversi pembacaan ke satuan yang sesuai (3) melakukan plotting pada potongan *core dam* dan (4) interpretasi garis aliran (ICODS, 2015). Garis aliran atau garis rembesan yang tidak memotong *core dam* menunjukkan bahwa *chimney drain* atau zona drainase hilir mempunyai kapasitas yang cukup baik (Badan Standardisasi Nasional, 2016). Perlu kiranya untuk dapat menginterpretasikan data tersebut sehingga dapat dianalisa untuk dapat memberikan petunjuk perilaku bendungan, atau kondisi yang membahayakan keamanan bendungan.

C. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini interpretasi tekanan air pori dilakukan dengan melakukan pembacaan pada rentang waktu beberapa tahun. Hal ini digunakan untuk melakukan pengujian bahwa tekanan air pori adalah fungsi dari elevasi reservoir. Pengamatan ini dilakukan dengan mengamati instrumen piezometer bersamaan dengan muka air reservoir. Hasil pencatatan dari instrumen, misalnya tekanan air pori, hanya berupa angka-angka numerik saja. Angka-angka ini dicatat dalam jangka waktu yang lama dan bertahun-tahun. Hal ini mengakibatkan terkumpulnya data dalam jumlah yang banyak.

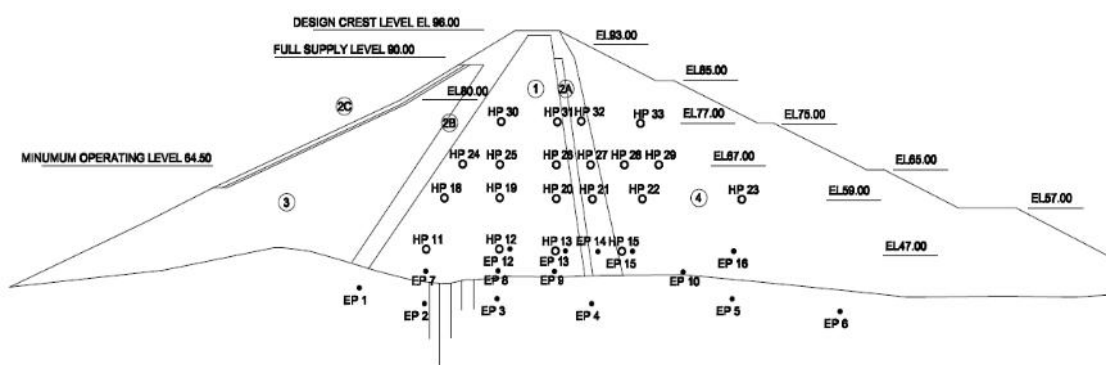
Ada empat section yang terdapat pada tubuh Bendungan Kedung Ombo yakni section A-A, B-B, C-C dan D-D. Namun pada penelitian ini section yang digunakan adalah section B-B (Gambar 1) dengan pertimbangan section ini adalah posisi terdalam tubuh bendungan dan lebih terdapat banyak piezometer dibanding section yang lain (SMEC-Indra Karya, 1989; Purwanto, 2008). Dengan banyaknya piezometer pada section ini maka dapat dilakukan penggambaran garis aliran. Penggambaran garis aliran dilakukan dengan bantuan program

AutoCad 2021. Pengamatan tekanan air pori terhadap pengaruh elevasi tampungan menggunakan prinsip linieritas terhadap elevasi tampungan, yang secara langsung mempengaruhi nilai dari pembacaan tekanan (US Army Corps of Engineers, 1995). Prinsip linearitas adalah bila elevasi tampungan mengalami perubahan satu satuan maka piezometer yang mengukur tekanan air pori akan mengalami perubahan satu satuan. Hal ini dikarenakan konsep tekanan memiliki hubungan linear antara *unit weight* dari air dan juga kedalaman. Tingkat hubungan atau korelasi ditentukan dari interval koefisien (R) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pedoman Untuk Memberikan Interpretasi Terhadap Koefisien Korelasi

No.	Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
1.	0,00 – 0,199	Sangat Rendah
2.	0,20 – 0,399	Rendah
3.	0,40 – 0,599	Sedang
4.	0,60 – 0,799	Kuat
5.	0,80 – 1,000	Sangat Kuat

(Sumber : Sugiyono, 2007)



Gambar 1. Potongan B-B Pada Tubuh Bendungan Kedung Ombo

(SMEC-Indra Karya, 1989)

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

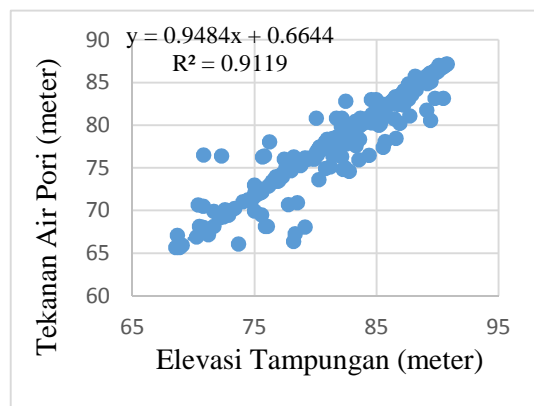
1. Pengolahan Data Piezometer

Untuk membuat kontur rembesan yang dibuat berdasarkan pembacaan piezometer, diperlukan pembacaan dan perhitungan semua piezometer. Ada 2 jenis piezometer yang terpasang pada tubuh dan pondasi Bendungan Kedung Ombo yaitu hydraulic piezometer (HP) dan electric piezometer (EP) yang pengukurannya dilakukan 2 minggu sekali. Data pembacaan piezometer yang masuk dalam proses perhitungan mulai dari tahun 2003 – 2020 termasuk pembacaan muka air waduk. Pengumpulan data piezometer beserta

waktu pembacaan piezometer dan elevasi tampungan menjadi dasar pembuatan garis freatik.

Langkah selanjutnya adalah membuat regresi linear berdasarkan korelasi antara bacaan piezometer dan elevasi tampungan. Hasil regresi linear ini akan membantu mengetahui respon tiap piezometer terhadap perubahan elevasi tampungan. Sebagai contoh dapat dilihat pada Gambar 2 dimana Piezometer EP 1 menunjukkan hubungan linear terhadap fluktuasi muka air waduk dengan tingkat korelasi atau hubungan yang sangat kuat. Grafik pada Gambar 2 menunjukkan regresi linear dan persamaan yang dihitung yaitu elevasi

tampungan pada sumbu “x” dan nilai tekanan air pori (meter) pada sumbu “y”.



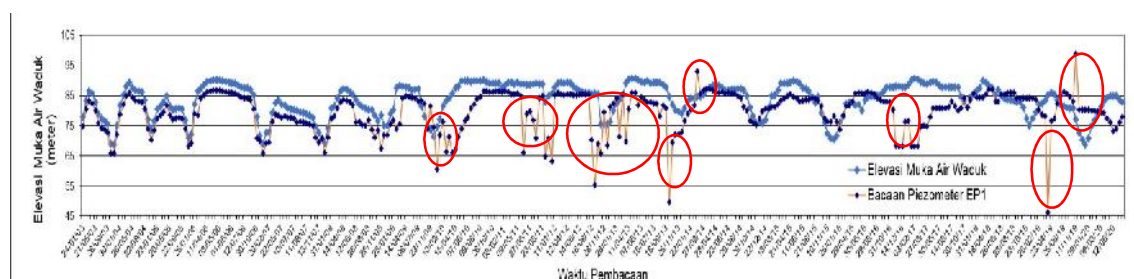
Gambar 2. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 1

Respon masing-masing piezometer terhadap fluktuasi muka air waduk tidak sama. Piezometer yang lokasinya berada di zona inti sebelah hulu cenderung menunjukkan respon linear terhadap fluktuasi muka air waduk. Beberapa piezometer lainnya menunjukkan respon yang beragam seperti (1) respon linear yang tidak nampak (2) memiliki kecenderungan mengalami penurunan secara tiba-tiba dan kemudian kembali normal untuk waktu tertentu, (3) terjadi osilasi atau pergerakan acak dari pembacaan piezometer, pergerakan acak ini cenderung mengakibatkan pembacaan pada tiap-tiap piezometer mengalami

penurunan dan kenaikan secara acak pada instrumen tersebut (4) tidak memberi respon terhadap fluktuasi muka air waduk atau dapat dikatakan bahwa piezometer tersebut memiliki bacaan yang cenderung sama (5) respon linear terhadap fluktuasi muka air waduk mengalami lag atau keterlambatan, karena efek clay pada zona inti dan lain lain.

2. Screening Data Bacaan Piezometer

Dalam penelitian ini, data yang sifatnya anomali dan error tidak diikutsertakan dalam proses regresi linear. Apabila terdapat data yang terindikasi mengalami lag time, maka harus dievaluasi terlebih dahulu dengan teknik parsing setelah itu baru dapat dilakukan regresi linear. Usaha – usaha ini dilakukan untuk memastikan bahwa data -data yang digunakan dalam analisis adalah data yang benar dan mencoba untuk mengetahui karakteristik masing – masing piezometer. Namun apabila usaha – usaha tersebut telah dilakukan dan tetap tidak menunjukkan hubungan yang linear terhadap fluktuasi muka air waduk, maka data tersebut akan tetap dipakai namun dengan catatan bahwa piezometer tersebut harus segera dievaluasi mengapa responnya tidak linear terhadap fluktuasi muka air waduk.



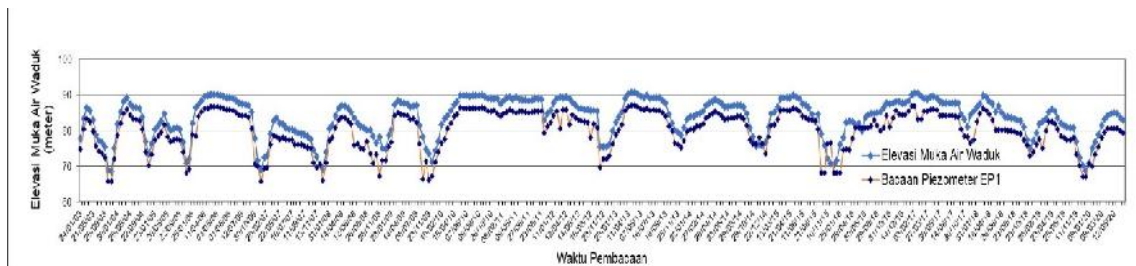
Gambar 3. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 1

Dari hasil analisis regresi linear 37 buah piezometer, tidak semua piezometer menunjukkan respon yang

baik terhadap fluktuasi muka air waduk. EP 1, EP 2, EP 3, EP 12 dan EP 13 cenderung memiliki respon linear terhadap muka air waduk, namun ada

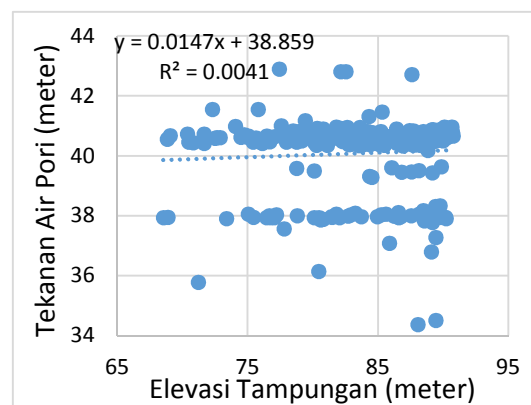
beberapa waktu dimana piezometer tidak memiliki respon linear terhadap elevasi muka air waduk yang mengakibatkan tingkat hubungan linearinya sangat buruk. Sebagai contoh pada Gambar 3 diperlihatkan respon Piezometer EP 1 yang tidak linear (anomali) pada

beberapa waktu. Untuk mencapai kondisi linear, maka data – data anomali diabaikan. Pada Gambar 4 diperlihatkan bagaimana hubungan linearitas yang tercapai sebagai akibat data – data yang bersifat anomali diabaikan pada EP 1.

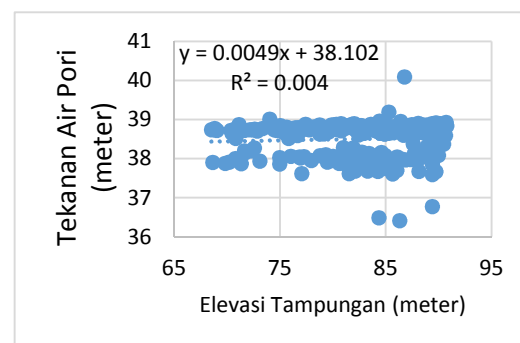


Gambar 4. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 1 setelah data – data yang bersifat anomali diabaikan

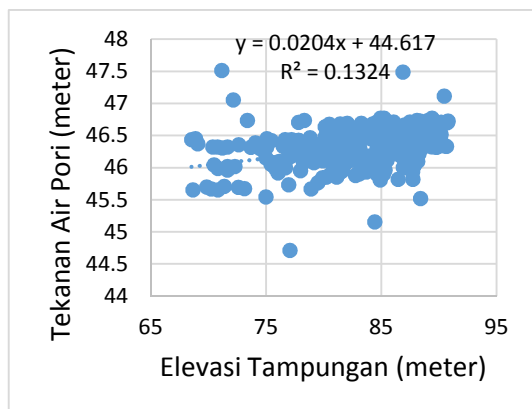
Piezometer EP 4, EP 5, EP 7 dan EP 11 tidak menunjukkan respon sama sekali sehingga tidak masuk dalam proses regresi linear. Data bacaan pada Piezometer EP 9 hanya sampai tahun 2006 namun dalam penelitian tetap masuk dalam proses regresi linear. Piezometer EP 6, EP 10, EP 14, EP 15, EP 16 dan HP 20 menunjukkan respon terhadap fluktuasi muka air waduk cenderung *flat* (Gambar 5 -10), beberapa data mengalami kenaikan dan penurunan yang sangat ekstrim dan tidak linear dengan fluktuasi muka air waduk. Meskipun usaha – usaha seperti menghapus data – data anomali, evaluasi lag time dan parsing telah dilakukan, hubungan linearitas tidak dapat tercapai dan tingkat hubungannya sangat buruk. Seluruh analisis data bacaan piezometer dapat dilihat pada Tabel 2 yang berupa rekapitulasi respon masing – masing piezometer pada potongan B – B tubuh Bendungan Kedung Ombo berikut tindak lanjut analisisnya.



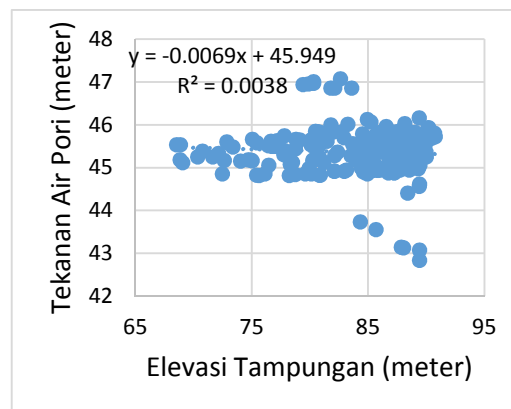
Gambar 5. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 6



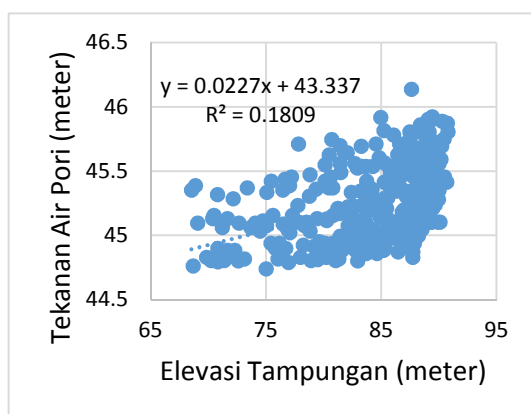
Gambar 6. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 10



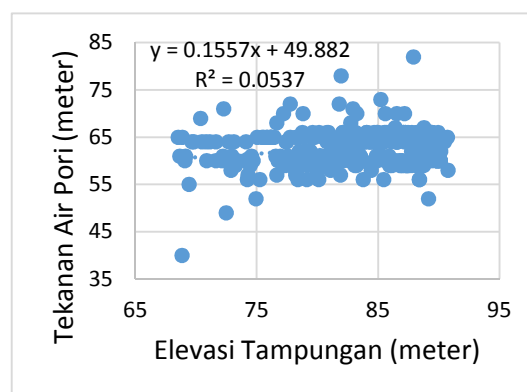
Gambar 7. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 14



Gambar 9. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 16



Gambar 8. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer EP 15



Gambar 10. Hubungan antara tekanan air pori (dalam meter) dan elevasi muka air waduk pada Piezometer HP 20

Tabel 2. Rekapitulasi respon masing – masing piezometer pada potongan B – B tubuh Bendungan Kedung Ombo

No.	Kode Piezometer	Kondisi Respon Data Bacaan Piezometer Terhadap Fluktuasi Muka Air Waduk	Tindak Lanjut
1	EP 1, EP 2, EP 12	cenderung memiliki respon linear terhadap muka air waduk, Namun ada beberapa waktu dimana piezometer tidak memiliki respon linear terhadap pool level.	Data bacaan piezometer yang tidak menunjukkan respon linear dianggap sebagai data anomali. Oleh karena itu data-data anomali tersebut tidak dimasukkan
2	EP 3	Untuk EP 3 terlihat bahwa respon linear	

No.	Kode Piezometer	Kondisi Respon Data Bacaan Piezometer Terhadap Fluktuasi Muka Air Waduk	Tindak Lanjut
		mulai tidak nampak pada 14 April 2008, namun respon EP 3 yang tidak linear sesekali nampak, kemudian hilang lagi	dalam proses regresi linear.
3	EP 4, EP 5, EP 7, EP 11	Data tidak terbaca	Tidak dilakukan regresi linear pada piezometer ini
4	EP 6, EP 10	Respon terhadap fluktuasi muka air waduk cenderung flat, beberapa data mengalami kenaikan dan penurunan yang sangat ekstrim dan tidak linear dengan fluktuasi muka air waduk.	Data bacaan piezometer yang mengalami kenaikan dan penurunan ekstrim tidak dimasukkan dalam proses regresi linear.
5	EP 8	memiliki kecenderungan mengalami penurunan secara tiba-tiba dan kemudian kembali normal untuk waktu tertentu. Terjadi osilasi atau pergerakan acak dari pembacaan piezometer. Pergerakan acak ini cenderung mengakibatkan pembacaan pada tiap-tiap piezometer mengalami penurunan dan kenaikan secara acak pada instrumen tersebut, selanjutnya menuju trend normal.	Pergerakan acak dari pembacaan piezometer tidak dimasukkan dalam proses regresi linear.
6	EP 9	Data bacaan hanya sampai tahun 2006	Semua data dimasukkan dalam proses regresi linear.

No.	Kode Piezometer	Kondisi Respon Data Bacaan Piezometer Terhadap Fluktuasi Muka Air Waduk	Tindak Lanjut
7	EP 13	cenderung memiliki respon linear terhadap muka air waduk, namun responnya tidak sebaik EP 12	Semua data dimasukkan dalam proses regresi linear.
8	EP 14, EP 15	Respon terhadap fluktuasi muka air waduk flat. Namun ada beberapa waktu dimana piezometer tidak memiliki respon linear terhadap pool level.	Data bacaan piezometer yang tidak menunjukkan respon linear dianggap sebagai data anomali. Oleh karena itu data-data anomali tersebut tidak dimasukkan dalam proses regresi linear
9	EP 16	memiliki kecenderungan mengalami penurunan secara tiba-tiba pada tahun 2010 -2011, Terjadi osilasi atau pergerakan acak dari pembacaan piezometer. Pergerakan acak ini cenderung mengakibatkan pembacaan pada tiap-tiap piezometer mengalami penurunan dan kenaikan secara acak pada instrumen tersebut pada tahun 2015-2020.	Pergerakan acak dari pembacaan piezometer tidak dimasukkan dalam proses regresi linear.
10	HP 11, HP 12, HP 13, HP 18,	memiliki respon linear terhadap fluktuasi muka air waduk, untuk seluruh rentang waktu pembacaan	Semua data dimasukkan dalam proses regresi linear.
11	HP 15	tidak memberi respon terhadap fluktuasi muka air waduk, atau dapat dikatakan bahwa	Nilai tekanan air pori yang digunakan pada kondisi muka air banjir dan muka air

No.	Kode Piezometer	Kondisi Respon Data Bacaan Piezometer Terhadap Fluktuasi Muka Air Waduk	Tindak Lanjut
		piezometer tersebut memiliki bacaan yang cenderung sama.	normal adalah sama yaitu = 21 kPa.
12	HP 19	Respon linear pada pembacaan HP 19 terhadap pool level mengalami lag, atau keterlambatan, karena efek clay core zona 1. Hal ini dapat diamati dengan jelas pada puncak penurunan pool level 23 Desember 2009, namun penurunan HP 19 tercapai pada 11 Februari 2010.	Karena terjadi lag (keterlambatan bacaan selama kurang lebih 2 bulan), maka bacaan piezometer pada tanggal 11 Februari 2010 ditarik ke tanggal 23 Desember 2009. Semua data dimasukkan dalam proses regresi linear.
13	HP 20	Memiliki respon namun kecil terhadap fluktuasi muka air waduk. Kondisi ini kemungkinan diakibatkan oleh stabilnya tekanan air pori pada piezometer tersebut	Semua data dimasukkan dalam proses regresi linear.
14	HP 21	tidak memberi respon terhadap fluktuasi muka air waduk, atau dapat dikatakan bahwa piezometer tersebut memiliki bacaan yang cenderung sama.	Nilai tekanan air pori yang digunakan pada kondisi muka air banjir dan muka air normal adalah sama yaitu = 5 kPa.
15	HP 22, HP 23, HP 26, HP 27, HP 28	tidak memberi respon terhadap fluktuasi muka air waduk, atau dapat dikatakan bahwa piezometer tersebut memiliki bacaan yang cenderung sama. Hal ini karena letak dari piezometer yang berada di downstream shoulder, dimana garis freatik	Nilai tekanan air pori yang digunakan pada kondisi muka air banjir dan muka air normal adalah sama (HP 22 = 5 kPa, HP 23 = 6 kPa, HP 26 = 50 kPa, HP 27 = 5 kPa (MAN) & 6 (MAB), HP 28 = 5 Kpa).

No.	Kode Piezometer	Kondisi Respon Data Bacaan Piezometer Terhadap Fluktuasi Muka Air Waduk	Tindak Lanjut
16	HP 24, HP 25	telah mengalami penurunan drastis setelah halangi oleh chimney drain. memiliki respon linear terhadap fluktuasi muka air waduk, untuk seluruh rentang waktu pembacaan walaupun pengaruhnya kecil. Hal ini karena posisi piezometer berada di core sebelah hulu.	Semua data dimasukkan dalam proses regresi linear.
17	HP 29, HP 30, HP 31, HP 32, HP 33	tidak memberi respon terhadap fluktuasi muka air waduk, atau dapat dikatakan bahwa piezometer tersebut memiliki bacaan yang cenderung sama.	Nilai tekanan air pori yang digunakan pada kondisi muka air banjir dan muka air normal adalah sama (HP 29 = 4 kPa (MAN) & 5 kPa (MAB), HP 30 = 55 kPa, HP 31 = 5 kPa, HP 32 = -3 kPa, HP 33 = 3 Kpa).

3. Penggambaran Kontur Rembesan

Dari hasil persamaan regresi linear, maka nilai tekanan air pori pada elevasi muka air tertentu terutama pada elevasi yang lebih tinggi yang belum tercapai dapat dihitung. Sebagai contoh dalam penelitian ini elevasi yang ditinjau adalah EL.+92.00 dan EL.+94.47 dimana kedua elevasi ini sudah masuk ke dalam level tampungan banjir. Contoh perhitungan pada Piezometer EP 1 dimana persamaan regresinya berdasarkan hasil perhitungan adalah $y=0,9484x + 0,6644$. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai tekanan air pori pada EL.+92 = 87.91 meter dan pada EL.+94.47 = 90.26 meter. Dikarenakan penggambaran kontur

dilakukan dalam bentuk pressure head dan dalam satuan kPa, maka nilai tekanan air pori yang masih dalam satuan meter harus dikonversi ke dalam satuan kPa. Dibutuhkan nilai *zero frequency*, *gauge factor* dan *gauge elevation* pada masing-masing piezometer yang ditinjau agar dapat mengkonversi satuan meter menjadi kPa (Olsen & Stephens, 2016).

Dengan persamaan U/S water level = $((zero\ frequency - frequency) \times gauge\ factor)/9.81) + gauge\ elevation$ dan untuk mengkonversi ke satuan kPa dengan menggunakan persamaan $kPa = (zero\ frequency - frequency) \times gauge\ factor$, maka didapat nilai tekanan air pori EP 1 pada El.+92 = 550 kPa dan pada EL.+94.47 = 573 kPa dengan nilai *zero*

frequency = 9.178, *gauge factor* = 0.153 dan *gauge elevation* = 31,891 meter. Hasil ekstrapolasi semua piezometer pada Potongan B-B pada EL.+92.00 dan EL.+94.47 dapat dilihat pada Tabel 3.

Penggambaran kontur rembesan menggunakan bantuan Program AutoCad 2021 dapat dilihat pada Gambar 11 dan Gambar 12 dimana semua bacaan piezometer pada potongan B-B

dihubungkan. Pada beberapa lokasi terdapat dua piezometer dengan tipe berbeda yaitu hidraulic piezometer (HP) dan electric piezometer (EP) yang saling berdampingan. Pembacaan kedua piezometer yang saling berdampingan ini menunjukkan nilai yang berbeda jauh (lihat nilai EP dan HP 12, 13, dan 15 pada Tabel 3) sehingga untuk membuat kontur rembesan, salah satu nilai piezometer harus dihilangkan.

Tabel 3. Nilai Tekanan Air Pori Pada Tiap Titik Piezometer Potongan B-B

Kode Alat	Persamaan Hubungan Elevasi (m) vs Pressure Head (kPa)	Pressure head (kPa) pada El. +92	Pressure head (kPa) pada El. +94.47
EP 1	$y = 0.9484x + 0.6644$	550	573
EP 2	$y = 0.7791x + 11.7340$	499	518
EP 3	$y = 0.4753x + 22.846$	330	342
EP 6	$y = 0.0147x + 38.859$	71	71
EP 8	$y = 0.2266x + 45.642$	281	287
EP 9	$y = 0.0695x + 54.722$	220	222
EP 10	$y = 0.0049x + 38.102$	10	10
EP 12	$y = 0.2669x + 49.585$	262	268
EP 13	$y = 0.1408x + 51.844$	173	176
EP 14	$y = 0.0204x + 44.617$	-7	-6
EP 15	$y = 0.0227x + 43.337$	-13	-13
EP 16	$y = -0.0069x + 45.949$	-16	-17
HP 11	$y = 7.5845x - 265.86$	432	451
HP 12	$y = 3.0493x + 34.913$	316	323
HP 13	$y = 1.5706x + 92.966$	238	241
HP 15	21	21	21
HP 18	$y = 2.9498x - 31.244$	240	247
HP 19	$y = 1.2484x + 77.116$	192	195
HP 20	$y = 0.1557x + 49.882$	64	65
HP 21	5	5	5
HP 22	5	5	5
HP 23	6	6	6
HP 24	$y = 1.7628x + 14.735$	177	181
HP 25	$y = 0.9126x + 72.281$	156	159
HP 26	$y = 0.2349x + 36.866$	50	50
HP 27	$y = 0.1446x - 7.8697$	5	6
HP 28	$y = 0.1305x - 7.4539$	5	5
HP 29	$y = 0.1549x - 9.8353$	4	5
HP 30	55	55	55
HP 31	5	5	5
HP 32	-3	-3	-3
HP 33	3	3	3

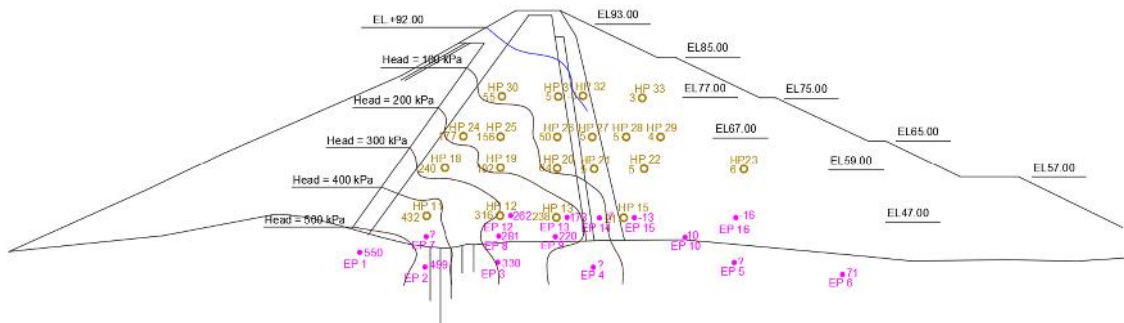
Kontur yang ditampilkan pada Gambar 11 dan 12 terlihat tidak mulus seperti jika dimodelkan dalam *finite*

element method. Hal ini dapat dimaklumi mengingatkan material timbunan yang digunakan selama masa konstruksi tidak seragam dan pemadatan selama masa

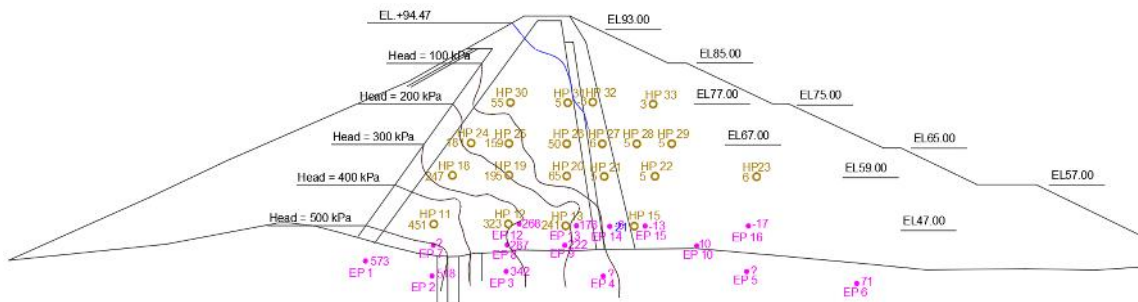
konstruksi juga tidak merata pada semua daerah. Selain itu, dari kontur yang ditampilkan dapat dilihat bahwa rembesan juga terjadi pada pondasi dimana kemungkinan nilai lugeon pada pondasi tidak terlalu besar atau dapat dikatakan kemungkinan terdapat *discontinuity* batuan (Adamo et al., 2020). Nilai Lugeon merupakan parameter fisik terbaik untuk menyatakan status *discontinuity* atau kekar pada pondasi bendungan (Ajalloeian et al., 2012). Kriteria nilai lugeon pada pondasi

bendungan yang diijinkan biasanya diatas 5 LU (satuan lugeon) (Rugaba, 2019).

Hasil penggambaran kontur rembesan pada elevasi muka air yang lebih tinggi yaitu EL.+92.00 dan EL.+94.47 menunjukkan kondisi tekanan air pori pada tubuh Bendungan Kedung Ombo masih aman. Hal ini dapat dilihat pada garis rembesan dan garis freatik yang tidak memotong zona inti dimana ini berarti keberadaan dan kapasitas *chimney drain* masih sangat baik.



Gambar 11. Kontur rembesan pada Potongan B-B pada kondisi EL.+92.00



Gambar 12. Kontur rembesan pada Potongan B-B pada kondisi EL.+94.47

E. KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data instrumentasi piezometer, tidak semua piezometer memiliki respon yang baik terhadap fluktuasi muka air waduk. Piezometer yang dipasang di bagian hulu zona inti menunjukkan respon yang sangat baik dilihat dari hubungan linear antara tekanan air pori dan muka air

waduk. Beberapa piezometer yang dipasang di bagian tengah zona inti menunjukkan respon yang tidak terlalu baik. Beberapa diantaranya tidak menunjukkan hubungan yang linear antara tekanan air pori dan muka air waduk. Namun ada 1 buah piezometer yaitu piezometer EP 19 yang hubungan linearitas nya cukup baik setelah dilakukan analisis lag time. Kondisi ini merupakan kondisi yang wajar mengingat

rembesan yang melalui timbunan membutuhkan waktu sehingga piezometer tidak langsung merespon. Pada zona inti bagian hilir termasuk pada badan downstream, hampir semua piezometer tidak menunjukkan respon yang baik. Sebagian besar menunjukkan respon yang flat pada semua elevasi muka air waduk. Terlepas dari berbagai hasil analisis, hasil penggambaran kontur rembesan pada elevasi muka air yang lebih tinggi yaitu EL.+92.00 dan EL.+94.47 menunjukkan kondisi tekanan air pori pada tubuh Bendungan Kedung Ombo masih aman. Hal ini dapat dilihat pada garis rembesan dan garis freatik yang tidak memotong zona inti dimana ini berarti keberadaan dan kapasitas *chimney drain* masih sangat baik.

2. Saran

Berdasarkan hasil analisis data instrumentasi piezometer dimana tidak semua piezometer menunjukkan respon yang baik, maka dalam penelitian ini peneliti menyampaikan saran – saran sebagai berikut (1) Respon beberapa piezometer yang tidak linier terhadap perubahan elevasi tampungan harus diteliti lebih lanjut agar interpretasi tekanan air pori lebih baik, (2) Tendensi kenaikan tekanan air pori terhadap waktu yang tidak dialami pada beberapa piezometer harus diteliti lebih lanjut, (3) Beberapa penurunan tekanan air pori yang mengindikasikan perubahan flow yang mendadak tetap harus diwaspadai sehingga pemantauan terhadap perubahan flow aliran harus lebih intens untuk memastikan perubahan flow dari aliran tersebut tidak berakibat buruk terhadap keamanan bendungan, (4) Data – data yang bersifat anomali hendaknya diteliti lebih lanjut karena data – data tersebut dapat mengindikasikan banyak persepsi seperti performa piezometer yang sudah menurun, terjadinya penyumbatan akibat material yang terbawa ke dalam zona inti, dan lain –

lain, (5) Piezometer yang sudah mengalami kerusakan harus diperbaiki agar interpretasi yang dilakukan dapat lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada pemberi dana penelitian atau donatur dalam hal ini adalah Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat .

DAFTAR PUSTAKA

- Ajalloeian, R., Habibi, V., Sharifipour, M., & Azimian, A. (2012). Evaluation Engineering Geology Properties of Jamishan Dam Site with Emphasis on Its Groutability. *EJGE*, 17, 2777–2793.
- Adamo, N., Ansari, N.A., Sissakian, V., Laue, J., Knutsson, S. (2020). Dam Safety Problems Related to Seepage. *Journal of Earth Science and Geotechnical Engineering*, 10(6), 41-78.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 8065:2016 Metode Analisis dan Cara Pengendalian Rembesan Air untuk Bendungan Tipe Urugan* (Badan Standardisasi Nasional (ed.)).
- Central Water Commission. (2018). *Manual for Rehabilitation of Large Dams*. New Delhi: India Government.
- Claydon, J.R., Stevens, I.M., Moffat, A.I.B., Tyler, N. (1990, September 12-15), The Embankment Dam. In *Six Conference of The Bristish Dam Society*. Nottingham, England. Retrieved from <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/book/10.1680/ted.16477>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., Foster, M. (2015)

- Geotechnical Engineering of Dams* (2nd edition). Rotterdam: CRC Press/Balkema.
- Foster, M. A. & Fell, R. & Spannagle, M. & University of New South Wales. School of Civil and Environmental Engineering. (1998). *Analysis of embankment dam incidents*. Sydney: University of New South Wales
- ICODS. (2015). *Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion*. Washington DC: Federal Emergency Management Agency.
- Mahgerefteh, K. (1979). *Seepage and Stability Analysis of Earth Dam* (Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1979). Accessed from <http://hdl.handle.net/10919/64487>
- Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). Hydraulic structures. In *Hydraulic Structures* (4th editio). Taylor & Francis e-Library, 2006. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47331-3>
- Olsen, R.S & Stephens, I.J. (2016), Relearning How to Look at Piezometric Data for Seepage Evaluation. In *USSD 2016 annual conference*. Denver, USA. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/319206472_relearning_hiw_to_look_at_piezometric_data_for_seepage_evaluation
- Prasad, R. & Dixit, M. (2019). Instrumentation and Monitoring of Dams and Reservoirs. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6(10), 63-67.
- Purwanto. (2008). *Waduk Kedungombo, Latar Belakang dan Sistem Instrumentasi Pemantauannya*. Semarang: BBWS Pemali Juana.
- Rugaba, N. A. (2019). Foundation treatment of Isimba Hydropower Project. In D. Kalumba (Ed.), *Proceedings of the 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 785–788). Auspices of the ISSMGE. <https://www.issmge.org/publications/online-library%0AThis>
- SMEC - Indra Karya. (1989). *Kedungombo Dam Project Construction Supervision, Completion Report*. Semarang: BBWS Pemali Juana.
- Sugiyono. (2007) *Statistika Untuk Penelitian* (Cetakan ke 12). Bandung: Alfabeta.
- US Army Corps of Engineers. (1995). *Instrumentation of Embankment Dam and Levees*. Washington DC: US Army Corps of Engineers.
- US Army Corps of Engineers. (2004). *General Design and Construction Consideration for Earth and Rockfill Dams*. Washington DC: US Army Corps of Engineers.



© 2021 Siklus Jurnal Teknik Sipil All rights reserved. This is an open access article distributed under the terms of the CC BY Licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)