

Pengamatan *Piezometer* dan *Observation Well* Untuk Meningkatkan Keamanan Bendungan (Studi Kasus Pembangunan Bendungan Ladongi)

Piezometer and Observation Well Monitoring for Increasing Dam Safety (Case Study in Ladongi Dam Project)

Jodan Panretta Diwani^{1,a)}, Agung Permana^{2,b)}, Iping Mariandana Alwi^{3,c)}, Riwin Andono^{4,d)} & Haeruddin C. Maddi^{3,c)}

¹⁾BWS Sulawesi IV Kendari, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

²⁾BWS Sulawesi IV Kendari, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

³⁾BWS Sulawesi IV Kendari, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

⁴⁾BWS Sulawesi IV Kendari, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

⁵⁾BWS Sulawesi IV Kendari, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Koresponden : ^{a)}jodandiwani@gmail.com, ^{b)}agung.permana.st.meng@gmail.com

^{c)}ppkbbendunganladongi@gmail.com, ^{d)}r1w1n@yahoo.co.id & ^{e)}her45pu@yahoo.com

ABSTRAK

Bendungan Ladongi terletak di Kabupaten Kolaka Timur Provinsi Sulawesi Tenggara. Bendungan ini merupakan bendungan urugan yang dibangun mulai tahun 2016 dan dijadwalkan selesai tahun 2021. Sampai progres saat ini, bendungan telah dipasang instrumen keamanan bendungan, diantaranya *vibrating wire piezometer* dan *observation well* (OW). Alat tersebut akan digunakan untuk mengamati tekanan air pori dan rembesan yang terjadi pada tubuh bendungan. Meskipun saat ini bendungan masih dalam tahap pembangunan, tetapi alat tersebut sudah terpasang dan dipantau fluktuasinya setiap hari. Alat *vibrating wire piezometer* yang sudah terpasang berjumlah 26 unit dari total 34 unit, terdiri dari 8 unit di lokasi pondasi bendungan dan 18 unit di lokasi timbunan inti bendungan. Berdasarkan pengamatan, semakin tinggi timbunan tubuh bendungan maka semakin bertambah pembacaan tekanan air pori, meskipun penambahannya belum signifikan. Hal tersebut diduga karena bendungan belum digenangi, sehingga pembacaannya masih relatif stabil. Pada pondasi bendungan pembacaan *piezometer* lebih tinggi dibandingkan di tubuh bendungan karena penambahan massa timbunan di atasnya. Alat *observation well* (OW) digunakan untuk mengetahui elevasi muka tanah di sekitar bendungan. Pengamatan saat ini dilakukan untuk mengetahui batas awal elevasi muka air sebelum pengisian awal bendungan. Dari 9 titik OW yang sudah terpasang, elevasi muka air tanah relatif tetap dan hanya naik saat terjadi hujan.

Kata Kunci : bendungan ladongi, elevasi muka air tanah, *piezometer*, *observation well*, tekanan air pori

PENDAHULUAN

Piezometer adalah instrumen yang berfungsi untuk mengukur tekanan air pori pada bendungan. Pada proyek pembangunan Bendungan Ladongi, alat ini dipasang pada pondasi dan timbunan inti tubuh bendungan. Alat *piezometer* yang dipasang berjenis *vibrating wire piezometer*. Alat tersebut menggunakan prinsip kawat getar yang akan mengukur frekuensi akibat adanya tekanan air pori, perubahannya dicatat melalui alat *vibrating wire readout*. *Vibrating wire piezometer* yang dipasang berjumlah 34 unit, terdiri dari 8 unit pada pondasi bendungan dan 26 unit pada inti tubuh bendungan. Sampai saat ini alat yang sudah terpasang berjumlah 8 unit di lokasi pondasi bendungan dan 18 unit di lokasi timbunan inti bendungan, mengikuti penambahan tinggi timbunan tubuh bendungan. Pada pondasi bendungan dipasang alat dengan kapasitas 10 kgf/cm^2 ($100 \text{ m H}_2\text{O}$) sementara di timbunan tubuh bendungan dipasang alat dengan kapasitas 7 kgf/cm^2 ($70 \text{ m H}_2\text{O}$). Pembacaan alat *vibrating wire piezometer* sudah dilaksanakan mulai tanggal 5 Desember 2019. Meskipun alat *vibrating wire piezometer* pada lokasi timbunan belum terpasang 100% karena masih menunggu kenaikan elevasi timbunan, tetapi sudah dapat menggambarkan garis tekanan air pori. Berdasarkan pengamatan, semakin tinggi timbunan inti bendungan maka semakin bertambah pembacaan tekanan air pori pada pondasi bendungan dan pada tubuh bendungan, meskipun penambahannya belum signifikan. Hal tersebut diduga karena bendungan belum digenangi, sehingga pembacaannya masih relatif stabil. Pada pondasi bendungan pembacaan tekanan air pori lebih tinggi dibandingkan pembacaan di tubuh bendungan yang diakibatkan penambahan massa timbunan di atasnya.

Selain *piezometer*, alat yang sudah dipasang adalah *observation well* (sumur pengamatan). Sumur pengamatan berfungsi untuk mengetahui elevasi muka air tanah di sekitar bendungan. Alat ini juga dapat mengetahui kondisi rembesan pada bagian bawah pondasi bendungan (selain menggunakan *vibrating wire piezometer*) dengan mengukur perubahan elevasi muka air tanah setelah pengisian bendungan. Pengamatan saat ini dilakukan untuk mengetahui batas awal elevasi muka air sebelum pengisian awal waduk. Penempatan sumur pengamatan berada pada hilir kaki bendungan (*downstream*), tumpuan kiri dan kanan bendungan serta bagian kiri lereng *spillway*. Sumur pengamatan berjumlah 9 titik yang terdiri dari 7 titik pada area *downstream* dan 2 titik di area tebing kiri pelimpah. Dari hasil pengamatan *observation well* yang telah terpasang di 7 lokasi, elevasi muka air mengalami kenaikan hanya saat terjadi hujan. Kondisi waduk belum dilakukan penggenangan sehingga elevasi muka air tanah relatif tetap kecuali saat terjadi hujan.

METODA PENELITIAN

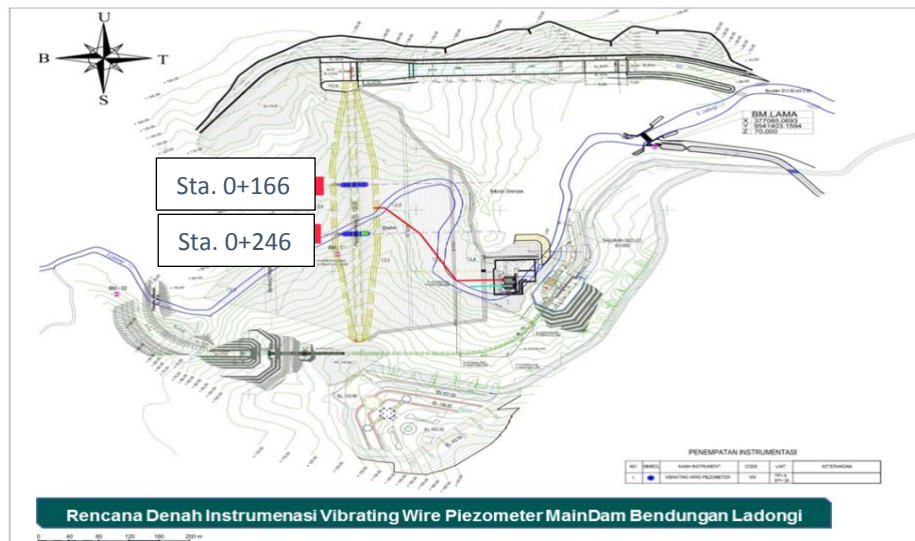
Beberapa tahapan dalam penyusunan makalah ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengumpulan data dan pengamatan di lapangan.
2. Penentuan kapasitas dan material instrumen yang akan dipasang dan disesuaikan dengan spesifikasi yang akan dipasang.
3. Sebelum pemasangan dilakukan kalibrasi alat agar hasilnya lebih akurat.
4. Pemasangan instrumentasi dilakukan sesuai prosedur dan standar yang berlaku.
5. Setelah pemasangan dilakukan pengamatan rutin, membuat rekap data dan menuliskan kesimpulan dari pengamatan yang sudah dilakukan.

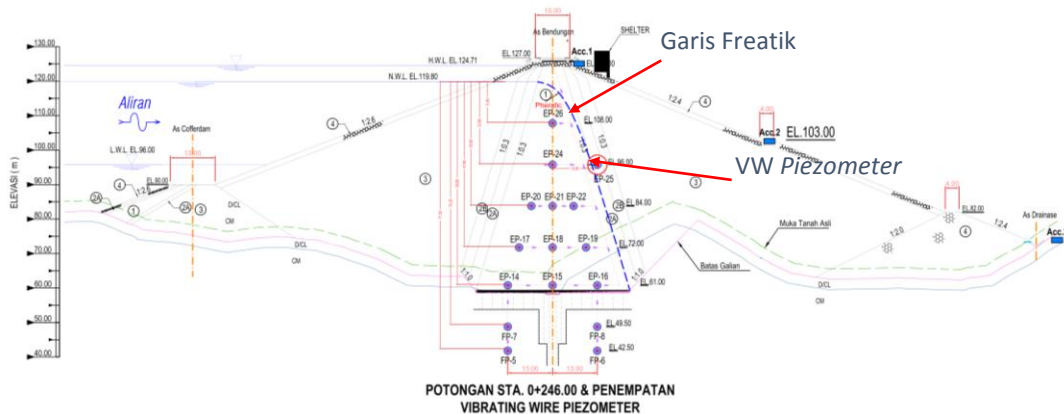


ANALISIS PENELITIAN

- I. *Vibrating Wire Piezometer*
 - a. Penempatan Lokasi Instrumen



Gambar 1. Tampak atas lokasi pemasangan VW *Piezometer* (sumber: gambar DED)



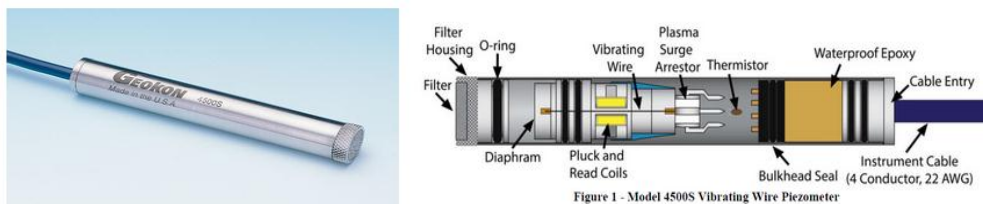
Gambar 2. Garis freatik pada kondisi muka air normal (Elevasi +119.80) dan posisi pemasangan VW *Piezometer* (sumber: gambar shop drawing)

Lokasi pemasangan instrumen *vibrating wire piezometer* disesuaikan dengan perkiraan garis freatik yang mungkin terjadi apabila sudah dilakukan penggenangan. Lokasi pemasangan diantaranya:

- Pada Sta. 0+166, terdiri dari 4 unit di pondasi bendungan dan 13 unit di timbunan tubuh bendungan;
 - Pada Sta. 0+246, terdiri dari 4 unit di pondasi bendungan dan 13 unit timbunan inti tubuh bendungan;
 - Total pemasangan *vibrating wire piezometer* adalah 34 unit.
- b. Penentuan Kapasitas dan Material *Vibrating Wire Piezometer*

Piezometer yang dipilih untuk digunakan adalah jenis *vibrating wire piezometer*. Jenis ini memiliki kelebihan yaitu jarang adanya potensi permasalahan saat instalasi, peka terhadap perubahan suhu, ketepatan pembacaan yang sederhana, relatif tinggi dan cepat.

Piezometer tip yang digunakan pada pondasi (*saturated soil*) yaitu *piezometer tip low air entry*, sedangkan pada timbunan (*unsaturated soil*) digunakan *piezometer tip high air entry*. Pada pondasi bendungan dipasang alat dengan kapasitas 10 kgf/cm² (100 m H₂O) sementara di timbunan tubuh bendungan dipasang alat dengan kapasitas 7 kgf/cm² (70 m H₂O).



Gambar 3. Alat *Vibrating Wire Piezometer* (sumber: spesifikasi material)

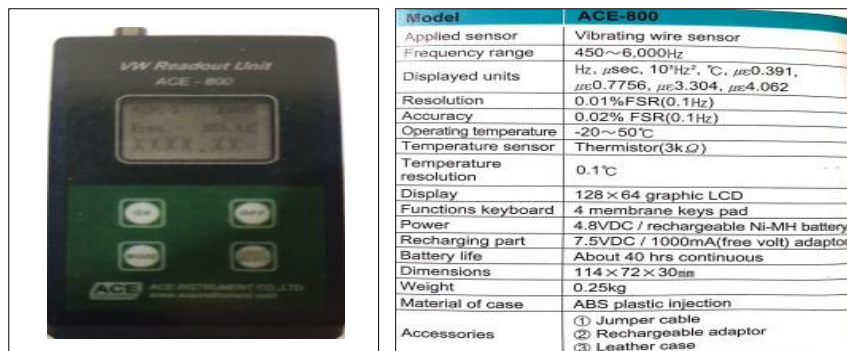
Tabel 1. Kapasitas alat VW *Piezometer* pada Sta.0+166.00 (sumber: hasil analisis)

Sta.0+166.00		Fondasi	100 m H ₂ O	Timbunan			70 m H ₂ O
Fondasi	Elevasi	Ketinggian	Deviasi Kapasitas Piezometer	Timbunan	Elevasi	Ketinggian	Deviasi Kapasitas Piezometer
FP 1 (U/S)	42,5	77,30	22,7	EP 1 (U/S)	61	58,80	11,2
FP 3 (D/S)	49,5	70,30	29,7	EP 2 (AS)	61	58,80	11,2
FP 2 (U/S)	42,5	77,30	22,7	EP 3 (D/S)	61	58,80	11,2
FP 4 (D/S)	49,5	70,30	29,7	EP 4 (U/S)	72	47,80	22,2
El.Muka Air Nomal : 119,80 Keterangan : EP 10 = dilakukan pemasangan pada zona sesar area downstream (sesuai saran KKB)				EP 5 (AS)	72	47,80	22,2
				EP 6 (D/S)	72	47,80	22,2
				EP 7 (U/S)	84	35,80	34,2
				EP 8 (AS)	84	35,80	34,2
				EP 9 (D/S)	84	35,80	34,2
				EP 11 (AS)	96	23,80	46,2
				EP 12 (D/S)	96	23,80	46,2
				EP 13 (AS)	108	11,80	58,2

Tabel 2. Kapasitas alat VW *Piezometer* sesuai pemasangan Sta.0+246.00
(sumber: hasil analisis)

Sta.0+246			100 m H2O				70 m H2O
Fondasi	Elevasi	Ketinggian	Deviasi Kapasitas Piezometer	Timbunan	Elevasi	Ketinggian	Deviasi Kapasitas Piezometer
FP 5 (U/S)	42,5	78,81	21,19	EP 14 (U/S)	61	58,8	11,2
FP 7 (D/S)	49,5	71,05	28,95	EP 15 (AS)	61	58,8	11,2
FP 6 (U/S)	42,5	78,81	21,19	EP 16 (D/S)	61	58,8	11,2
FP 8 (D/S)	49,5	71,05	28,95	EP 17 (U/S)	72	47,8	22,2
El.Muka Air Nomal = 119,80 EP 23 = dilakukan pemasangan pada zona sesar area downstream (sesuai saran KKB)				EP 18 (AS)	72	47,8	22,2
				EP 19 (D/S)	72	47,8	22,2
				EP 20 (U/S)	84	35,8	34,2
				EP 21 (AS)	84	35,8	34,2
				EP 22 (D/S)	84	35,8	34,2
				EP 24 (AS)	96	23,8	46,2
				EP 25 (D/S)	96	23,8	46,2
				EP 26 (AS)	108	11,8	58,2

Dalam pembacaan tekanan air pori sementara saat pekerjaan konstruksi berlangsung digunakan *vibrating wire readout* berfungsi sebagai alat baca tekanan air pori sementara saat pekerjaan konstruksi berlangsung. Prinsip kerja pembacaan tekanan air pori adalah ketika ada tekanan yang masuk melalui filter menekan *vibrating wire* sehingga direspon oleh diafragma dan *vibrating wire readout* akan mencatat frekuensi yang berubah.



Gambar 4. Alat *vibrating wire readout* (sumber: spesifikasi material)

c. Kalibrasi Alat *Vibrating Wire Piezometer*

Sebelum *piezometer* dipasang di lapangan, dilakukan kalibrasi dengan metode *chamber pressure* dan metode celup danau yang dilakukan di Bendungan Ponre–Ponre. Hal ini dilakukan untuk menguji sensitivitas dan ketelitian yang telah mengacu pada data kalibrasi sehingga dapat diketahui apabila terjadi *error* pada setiap alat *piezometer* tersebut.

Tabel 3. Hasil Kalibrasi *piezometer* dengan metode celup danau terhadap nilai regresi linear R^2

No. Piezometer	Pembacaan	Nilai Regresi Linear R^2
FP - 1	Naik	0,9999
	Turun	0,9999
FP - 2	Naik	0,9997
	Turun	0,9997
FP - 3	Naik	0,9998
	Turun	0,9998
FP - 4	Naik	0,9995
	Turun	0,9995
FP - 5	Naik	0,9994
	Turun	0,9994
FP - 6	Naik	0,9999
	Turun	0,9999
FP - 7	Naik	1,0000
	Turun	1,0000
FP - 8	Naik	0,9997
	Turun	0,9997
EP - 1	Naik	0,9999
	Turun	0,9999
EP - 2	Naik	0,9997
	Turun	0,9997
EP - 3	Naik	0,9997
	Turun	0,9997
EP - 4	Naik	0,9998
	Turun	0,9998

(sumber: hasil analisis)

Tabel 4. Hasil Kalibrasi *piezometer* dengan metode chamber terhadap nilai regresi linear R^2

No. Piezometer	Pembacaan	Nilai Regresi Linear R^2
FP -1	Naik	0,9996
	Turun	0,9993
FP -2	Naik	0,9996
	Turun	0,9997
FP -3	Naik	0,9999
	Turun	0,9999
FP -4	Naik	0,9999
	Turun	0,9997
FP -5	Naik	0,9996
	Turun	0,9995
FP -6	Naik	0,9995
	Turun	0,9996
FP -7	Naik	0,9995
	Turun	0,9995
FP -8	Naik	0,9992
	Turun	0,9998
EP -1	Naik	0,9995
	Turun	0,9975
EP -2	Naik	0,9997
	Turun	0,9999

(sumber: hasil analisis)

Tabel diatas menunjukan nilai regresi *linear* R^2 terhadap alat *piezometer* yang telah terkalibrasi pada *chamber* dan celup danau. Nilai regresi linear R^2 sudah mendekati nilai $R^2=1$ sehingga sensitivitas dan ketelitiannya memenuhi syarat pada *piezometer* tersebut.



Gambar 5. Kalibrasi VW *Piezometer* dengan Metode *Chamber* (sumber: dokumentasi lapangan)



Gambar 6. Kalibrasi VW *Piezometer* dengan Metode Celup Danau (sumber: dokumentasi lapangan)

d. Pemasangan Alat *Piezometer*

Instalasi *vibrating wire piezometer* di timbunan tanah dilakukan dengan metode pemboran tangan (*hand auger*) sedalam ± 1 m. Sebelum dipasang, dilakukan kalibrasi *chamber* pada alat supaya pembacaan lebih akurat.

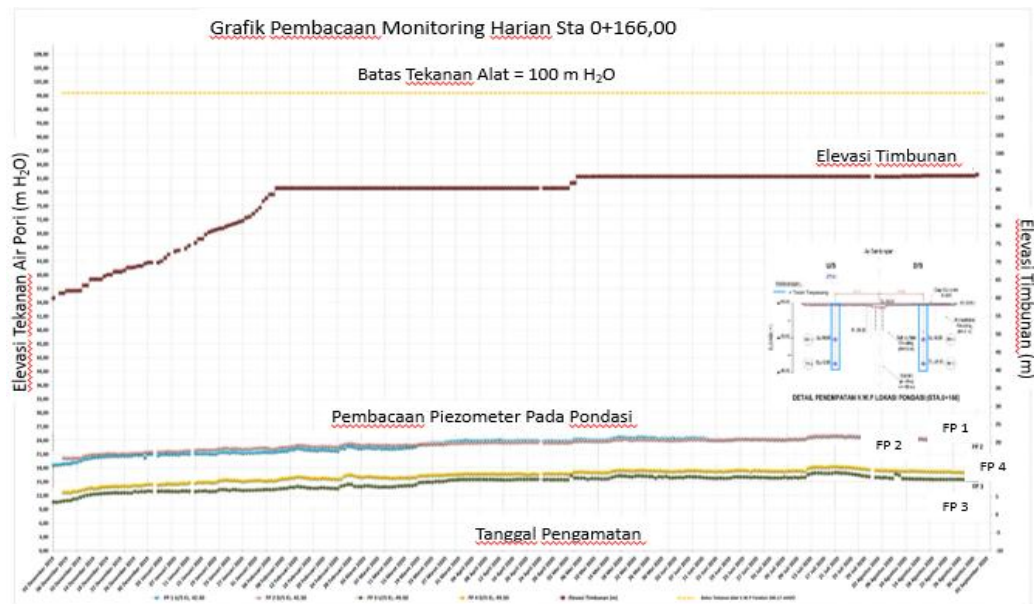


Gambar 7. Dokumentasi pemasangan *piezometer* pada lokasi tubuh bendungan (sumber: dokumentasi lapangan)

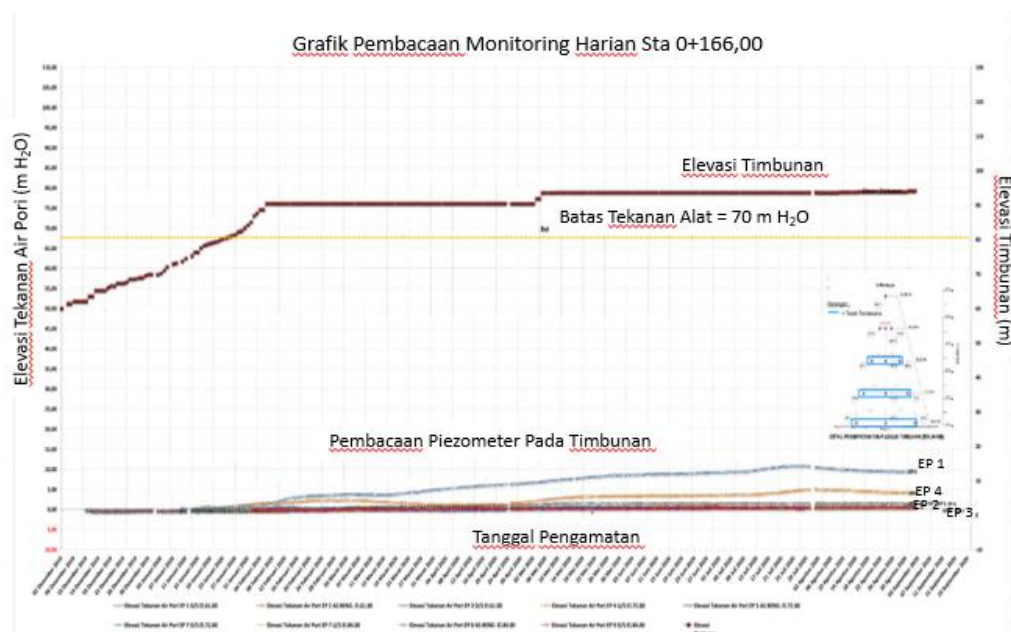
e. Monitoring *Piezometer* Pada Pondasi Bendungan

Pembacaan alat *vibrating wire piezometer* dilaksanakan mulai 05 Desember 2019 dimana alat pada lokasi pondasi bendungan sudah terpasang semua namun alat pada lokasi

timbunan belum terpasang 100%. *Piezometer* yang terpasang sudah dapat menggambarkan garis tekanan air pori. Pembacaan dilakukan saat konstruksi dengan menggunakan alat *vibrating wire readout*.



Gambar 8. Pembacaan monitoring harian *vibrating wire piezometer* pada pondasi Sta.+166.00 (sumber: hasil analisis)



Gambar 9. Pembacaan monitoring harian *vibrating wire piezometer* pada timbunan inti Sta. 0+166.00 (sumber: hasil analisis)

Berdasarkan data dan hasil *plotting* alat *vibrating wire piezometer* pada lokasi pondasi bendungan dan timbunan tubuh bendungan menunjukkan:

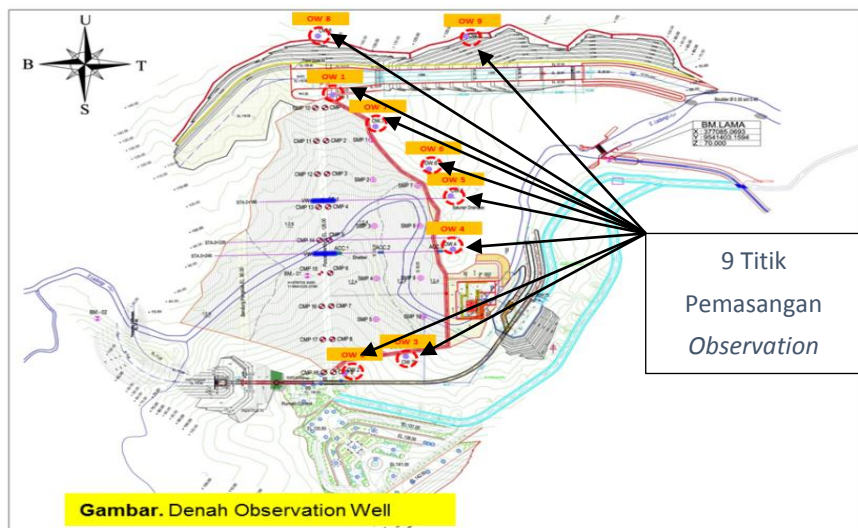
- Semakin tinggi timbunan inti maka semakin besar pula pembacaan tekanan air porinya.
- Kedalaman pemasangan *piezometer* mempengaruhi tingginya tekanan air pori.
- Kondisi cuaca mempengaruhi tekanan air pori, terutama saat terjadi hujan.

2. Observation Well (OW)

a. Penempatan Lokasi *Observation Well*

Lokasi *observation well* (sumur pengamatan) ada pada sebelah hilir kaki bendungan (*downstream*), tumpuan kiri bendungan, tumpuan kanan bendungan, tebing kiri *spillway* (pelimpah). *Observation well* berfungsi untuk mengamati kondisi tinggi muka air tanah. Lokasi pemasangan *observation well* diantaranya:

- Area *downstream*: 7 titik
- Tebing kiri *spillway*: 2 titik
- Jumlah total pemasangan OW: 9 titik



Gambar 10. Peta pemasangan *observation well* (sumber: gambar *shop drawing*)

b. Spesifikasi *Observation Well*

Material *piezometer tip observation well* memakai *filter tip ceramic* dengan diameter 40 mm.

Model	4650	
Water level meter	Power	9VDC(6F22) battery 1 no
	Range	50m 100m 200m 300m 350m 500m
	Weight	2.5kg 4.5kg 8kg 10kg 12kg 15kg
	Dimensions	152(W) × 278(L) × 282(H)mm 400(W) × 400(L) × 400(H)mm or below
	Tape Resolution	1mm
	Tape Precision	ISO first grade
	Probe O.D	STD : Ø20mm, Optional : 14mm
	Frame	Stainless steel pipe
	Probe	Stainless steel pipe
	Material	ABS resin
Filter tip	Tape	Polyethylene coated steel tape
	Functions	<ul style="list-style-type: none"> • Mounted a knob for adjustment of sensitivity • Mounted TEST switch • Mounted ON/OFF switch
	Material	Polyethylene filter or ceramic filter
	Density	50 µm
Filter tip	Dimensions	Ø39 × 365mm (Ø30 × Ø38 for stand pipe)



Gambar 11. Spesifikasi *piezometer tip observation well* (sumber: spesifikasi material)



Gambar 12. Alat *water level meter* dan pengukuran di lapangan (sumber: dokumentasi lapangan)

Pengukuran tinggi muka air tanah dilakukan dengan memasukkan *probe* dari alat *water level meter* ke dalam lubang pada *observation well*. *Probe* dimasukkan sampai terdengar bunyi dari alat tersebut yang menunjukkan ujung alat sudah menemui permukaan air. Pembacaan dilakukan dengan melihat pita ukur dari alat *water level meter*. Perhitungan elevasi muka air tanah dengan cara mengurangi elevasi *surface* dengan pembacaan kedalaman *water level meter*.

c. Pemasangan *Observation Well* (OW)

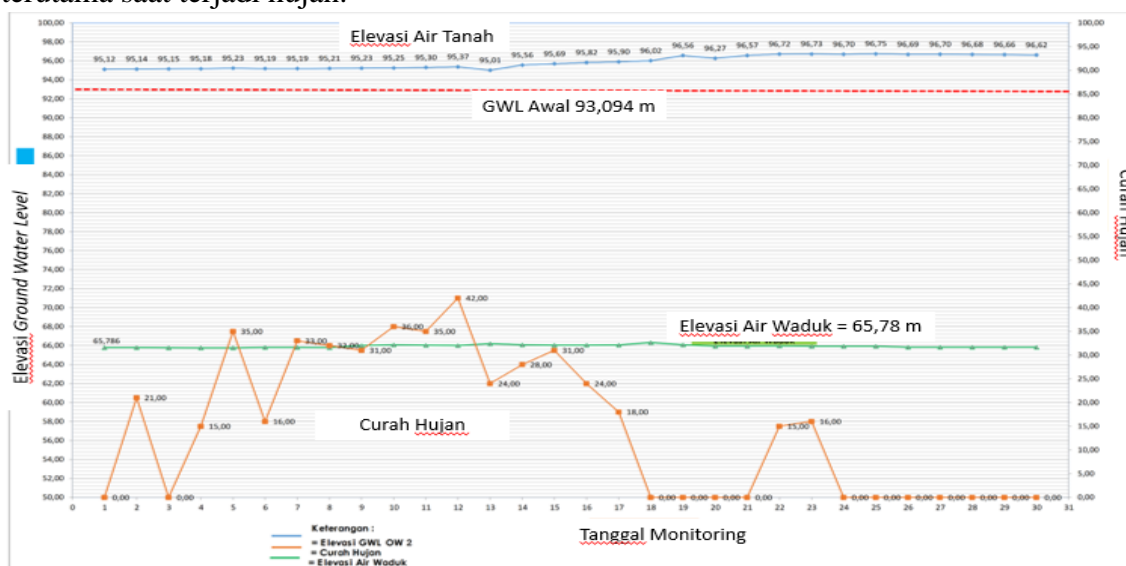
Pemasangan dilakukan dengan mengebor lubang sumur dan memberikan perkuatan di sampingnya serta melakukan pengecekan muka air tanah.



Gambar 13. Pemasangan *observation well* (sumber: dokumentasi lapangan)

d. Monitoring *Observation Well*

Observation well (OW) pada 7 lokasi dilakukan untuk mengetahui elevasi muka air tanah pada daerah *downstream* bendungan dan lereng tanah asli pada lokasi *spillway*. Dari alat ini juga dapat diketahui kondisi rembesan pada bagian bawah pondasi bendungan (selain melalui *vibrating wire piezometer*) dengan mengetahui perubahan elevasi muka air tanah setelah pengisian bendungan. Berdasarkan data dan hasil *plotting* alat *observation well* menunjukkan bahwa kondisi cuaca mempengaruhi kenaikan elevasi muka air tanah, terutama saat terjadi hujan.



Gambar 14. Grafik pembacaan monitoring *observation well* (sumber: hasil analisis)

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini, antara lain:

1. Semakin tinggi timbunan inti bendungan maka semakin bertambah pembacaan tekanan air pori pada *piezometer* pondasi bendungan dan pada tubuh bendungan.
2. Meskipun ada penambahan pembacaan *piezometer*, tetapi tekanan air pori masih relatif stabil karena bendungan belum digenangi.
3. Pada pondasi bendungan pembacaan tekanan air pori lebih tinggi dibandingkan pembacaan di tubuh bendungan yang diakibatkan penambahan massa timbunan diatasnya.
4. Pembacaan elevasi muka air tanah pada *observation well* masih relatif stabil karena bendungan masih belum digenangi.
5. Tinggi muka air tanah bertambah hanya saat terjadi hujan.

Adapun saran dari penelitian ini, antara lain:

1. Instrumen yang terpasang masih dalam kondisi baik saat tahap konstruksi sehingga perlu dijaga kondisi kedepannya.
2. Pengamatan harus dilakukan saat konstruksi (sekarang), dilanjutkan saat nanti tahap penggenangan dan saat sudah beroperasinya bendungan.

CATATAN.

Ucapan terima kasih saya sampaikan sedalam-dalamnya kepada:

- 1) Agung Permana, S.T., M.Eng, selaku PPK Bendungan I yang telah memberi saya kesempatan dan arahan terkait paper yang saya buat;
- 2) Anwar Sanusi, ST., dan Makmur, ST., dari konsultan PT. Binatama Wirawredha (JO)– PT. Arga Pasca Rencana yang telah membantu menyediakan data dan memberi petunjuk terkait paper yang saya buat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Carlina Soetjiono dan Najoran, Th.F. (2004), "Pedoman Uji Mutu Konstruksi Tubuh Bendungan Tipe Urugan". Pd M-01-2004-A, Balitbang, Dep. Kimpraswil 2004.
- [2] Mudjihardjo, Djoko (2006). Fenomena Perilaku Tekanan Air Pori Bendungan PB. Soedirman Jawa Tengah. JSDA. 2006; 2(3)
- [3] Najoran, Th.F. dan Carlina Soetjiono (2004). "Pedoman Instrumentasi Tubuh Bendungan Tipe Unigan dan Tanggul", Pd T-08-2004-A, Balitbang, Dep. Kimpraswil 2004.
- [4] Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi (2017). "Modul Instrumentasi Bendungan Urugan Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar", BPSDM, Kementerian PUPR
- [5] Soedibyo (1993). Teknik Bendungan. Pradnya Paramita. Jakarta.
- [6] Sosrodarsono, S, dan Takeda K (1977). *Bendungan Tipe Urugan*. Penerbit Pradnya Paramita Jakarta 1977.

