

METODE PEMASANGAN INSTRUMENTASI PENGUKUR TEKANAN PORI (PIEZOMETER) PADA PEMBANGUNAN BENDUNGAN BENER PURWOREJO

Nur Fadhilah Ramadhani^{1*}, Karlina², Lalu Marhayani Kesuma²

¹ Program Studi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta

²Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta

*Email: nurfadhilahramadhani1997@mail.ugm.ac.id

Abstrak

Pembangunan bendungan memerlukan pemantauan geoteknik yang akurat untuk menjamin stabilitas dan keselamatan struktur. Salah satu aspek penting adalah pengukuran tekanan air pori dalam massa tanah, yang dilakukan dengan menggunakan piezometer. Penelitian ini membahas metode pemasangan piezometer kawat getar pada proyek Bendungan Bener di Kabupaten Purworejo serta evaluasi efektivitasnya dalam memantau tekanan air pori. Proses pemasangan dilakukan melalui lubang bor dengan tahapan sistematis, mulai dari persiapan alat hingga instalasi dan pengujian pembacaan awal. Hasil pembacaan dari instrumen menunjukkan bahwa metode pemasangan ini mampu menghasilkan data tekanan air pori yang akurat dan konsisten. Studi ini berkontribusi dalam memberikan acuan teknis untuk implementasi sistem pemantauan geoteknik pada konstruksi bendungan di Indonesia, serta menunjukkan bahwa metode pemasangan yang tepat berperan penting dalam menjamin keandalan data pemantauan geoteknik dan keselamatan bendungan secara keseluruhan.

Kata kunci: Bendungan Bener, keselamatan bendungan, piezometer kawat getar, pemasangan instrumen geoteknik, tekanan air pori

Abstract

Dam construction requires accurate geotechnical monitoring to ensure structural stability and safety. One of the critical aspects is the measurement of pore water pressure within the soil mass, which is conducted using piezometers. This study discusses the installation method of vibrating wire piezometers at the Bener Dam project in Purworejo Regency and evaluates their effectiveness in monitoring pore pressure. The installation was carried out through boreholes in a systematic sequence, from equipment preparation to final installation and initial readings. Instrument readings indicate that this installation method is capable of producing accurate and consistent pore pressure data. This study contributes as a technical reference for implementing geotechnical monitoring systems in dam construction projects in Indonesia and demonstrates that proper installation methods play a crucial role in ensuring reliable monitoring data and the overall safety of dam structures.

Keywords: Bener Dam, dam safety, geotechnical instrumentation installation, pore water pressure, vibrating wire piezometer

1. PENDAHULUAN

Bendungan Bener yang berlokasi di Desa Guntur, Kecamatan Bener, Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah, merupakan salah satu proyek pembangunan infrastruktur sumber daya air dengan fungsi utama untuk penyediaan air baku, irigasi, pengendalian banjir, serta pembangkit listrik tenaga air. Bendungan ini dirancang dengan tipe *Concrete Face Rockfill Dam* (CFRD), yaitu bendungan urugan batu dengan pelindung beton di muka hulu sebagai elemen kedap air.

Tipe CFRD memiliki keunggulan dalam fleksibilitas struktur terhadap deformasi dan kecepatan pelaksanaan konstruksi. Namun demikian, keberhasilan kinerja bendungan jenis ini sangat dipengaruhi oleh kondisi geoteknik, khususnya kestabilan batuan urugan dan interaksi antara plinth, membran beton, serta pondasi. Salah satu aspek paling krusial dalam pemantauan geoteknik adalah tekanan air pori yang terjadi dalam tubuh bendungan maupun pondasinya. Tekanan air pori yang meningkat secara signifikan dapat menjadi indikator potensi rembesan dan berkurangnya kestabilan struktur (Mulyono, 2017).

Untuk memantau tekanan air pori, digunakan alat yang disebut piezometer. Alat ini memungkinkan dilakukannya pemantauan internal terhadap kondisi jenuh tanah atau batuan secara berkala. Beberapa jenis piezometer yang umum digunakan antara lain *standpipe* piezometer, piezometer hidrolik, piezometer pneumatik, dan piezometer kawat getar (*vibrating wire piezometer*). Pada proyek Bendungan Bener, digunakan piezometer kawat getar karena memiliki tingkat akurasi tinggi, daya tahan terhadap kondisi ekstrem, serta mampu melakukan pembacaan digital secara efisien (Bagyo, 2024).

Untuk memilih jenis pisometer yang sesuai dengan kondisi lapangan dan tujuan pengukuran, perlu dilakukan perbandingan karakteristik teknis masing-masing jenis pisometer. Tabel berikut menyajikan perbandingan beberapa jenis pisometer berdasarkan aspek umur pakai, ketelitian, respon alat, biaya, kemudahan pemasangan dan pemeliharaan, hingga kemampuan mengukur tekanan negatif.

Tabel 1. keuntungan dan Keterbatasan Jenis Pisometer

No	Uraian	Jenis Pisometer			
		Pipa Tegak	Hidrolis	Pneumatik	Elektris
1	Umur dalam penggunaan	Lama	Lama	Sedang	Pendek
2	Ketelitian	Sedang	Rendah	Sedang	Tinggi
3	Respon	Lama	Cepat	Sangat Cepat	Sangat Cepat
4	Beaya pemasangan	Sedang	Sedang	Mahal	Mahal
5	Pemasangan	Mudah	Sedang	Rumit	Rumit
6	Pembacaan / pemeliharaan	Mudah	Sedang	Rumit	Mudah
7	Waktu pembacaan	Lama	Sedang	Sedang	Cepat
8	Mengukur tekanan negatif	Tidak	Ya	Tidak	Ya
9	Lain-lain	Mata pisometer dapat tersumbat	Tubing dapat tersumbat	Rentan kelembaban	Sensitif terhadap perubahan temperatur

Pada prinsipnya instrumen geoteknik yang dipasang pada bendungan dan bangunan pelengkapannya harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a) Alat yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang baik dan cukup andal.
- b) Keandalan dan ketahanan alat sangat dipengaruhi oleh harga per unit alat.
- c) Biaya pemeliharaan diupayakan serendah mungkin untuk efisiensi jangka panjang.
- d) Alat dirancang sederhana dan mudah dalam perawatan.
- e) Pemasangan maupun penggantian alat dapat dilakukan dengan mudah, sehingga tidak mengganggu pelaksanaan konstruksi.

Penentuan jumlah, jenis, dan lokasi instrumen pada bendungan hanya dapat dilakukan secara efektif melalui kombinasi antara pengalaman, pertimbangan teknis, dan intuisi. Setiap bendungan urugan memiliki karakteristik dan permasalahan yang khas, sehingga memerlukan pendekatan dan solusi tersendiri dalam pemilihan sistem instrumentasi. Oleh karena itu, dalam merancang sistem instrumentasi bendungan, perlu dianalisis dan dipertimbangkan pengaruh kondisi geoteknik dari tubuh bendungan, fondasi, abutmen, serta tebing di sekitar area genangan waduk.

Pada tahap awal pembangunan Bendungan Bener, telah direncanakan pemasangan sebanyak 20 unit piezometer tipe kawat getar (*vibrating wire piezometer*). Piezometer tersebut terbagi ke dalam dua kelompok utama berdasarkan lokasi pemasangannya, yaitu piezometer pondasi sebanyak 17 unit dan piezometer timbunan sebanyak 3 unit. Dari total tersebut, 12 unit dipasang di area pondasi hulu dan hilir tirai *grouting* (PF-01 hingga PF-06a), 5 unit dipasang di bawah urugan batu pada jalur galian terdalam sepanjang sumbu sungai (PF-07 hingga PF-11), dan 3 unit lainnya dipasang di zona timbunan filter 2A (PE-01 hingga PE-03).

Prioritas pemasangan diberikan pada piezometer yang berada di area pondasi, khususnya di sekitar tirai *grouting*, karena area ini merupakan bagian yang paling kritis dalam sistem kedap air bendungan tipe CFRD. Fungsi utama tirai *grouting* adalah untuk mengendalikan rembesan air tanah melalui pondasi, dan

efektivitasnya sangat bergantung pada tekanan air pori yang berkembang di sekitarnya. Oleh karena itu, pemantauan tekanan air pori di zona ini sangat penting dilakukan sejak awal, guna memastikan bahwa sistem grouting berfungsi dengan baik dan tidak menimbulkan tekanan berlebih yang dapat mengganggu kestabilan pondasi bendungan. Selain itu, proses konstruksi di area pondasi umumnya diselesaikan terlebih dahulu sebelum timbunan utama dilakukan, sehingga memungkinkan pemasangan instrumen dilakukan lebih awal secara teknis dan logistik.

Sebagai bagian dari proses analisis teknis dalam pemasangan piezometer pada Bendungan Bener, disusun sebuah tabel perencanaan yang memuat data lokasi, elevasi, dan kebutuhan kapasitas sensor untuk setiap titik pemasangan instrumen di area pondasi. Tabel ini memberikan informasi yang terstruktur mengenai koordinat longitudinal (STA), offset dari sumbu bendungan, serta elevasi pemasangan pada masing-masing piezometer. Selain itu, tabel juga mencantumkan estimasi beban tekanan air pori dalam satuan mH₂O dan kPa yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas sensor yang direkomendasikan. Penyusunan tabel ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap piezometer yang dipasang memiliki spesifikasi teknis yang sesuai dengan kondisi tekanan aktual di lapangan, sehingga dapat meminimalkan risiko overpressure dan menjaga keakuratan data pemantauan. Selain berfungsi sebagai dokumen rujukan teknis, tabel ini juga menjadi panduan penting bagi tim pelaksana lapangan dalam proses instalasi dan pengujian alat.

Tabel 2. Titik lokasi dan beban piezometer pondasi dibawah urugan batu.

JENIS INSTRUMEN	LABEL	LOKASI			ELEVASI (+m)	BEBAN SENSOR		Rekomendasi Kapasitas Sensor Kpa
		STA	OFFSET DARI AS BENDUNGAN			mH ₂ O	Kpa	
			U/S (m)	D/S (m)				
Piezometer Pondasi (Vibrating Wire)	PF-07	14 + 15 m.	161		192	68	680	1000
	PF-08	14 + 10m.	81		192	68	680	1000
	PF-09	13 + 00m.	0.00		192	68	680	1000
	PF-10	14 + 00m.		100	192	68	680	1000
	PF-11	11 + 00m.			196	68	680	1000

(sumber: PT.Virama Karya)

Penelitian ini dilakukan berdasarkan pendekatan praktik langsung di proyek pembangunan Bendungan Bener, khususnya pada proses pemasangan instrumen piezometer tipe kawat getar (*vibrating wire piezometer*). Metodologi mencakup tiga tahapan utama, yaitu studi literatur, observasi dan dokumentasi lapangan, serta evaluasi teknis terhadap metode pemasangan.

2.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman dasar tentang prinsip kerja, jenis-jenis piezometer, dan metode instalasi yang sesuai dengan standar teknis. Referensi utama mencakup buku *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance* oleh Dunnycliff (1988), SNI 8462:2017 tentang tata cara pemantauan tekanan air pori, serta modul pelatihan dan pedoman teknis dari Kementerian PUPR (2022).

2.2. Pengamatan Lapangan

Pengamatan langsung dilakukan pada tahap pembangunan bendungan, terutama pada zona pondasi dan timbunan di sekitar tirai grouting. Data yang dikumpulkan meliputi kondisi geologi aktual, perubahan elevasi galian, posisi aktual sensor, serta pengaruh sistem grouting terhadap tekanan air pori.

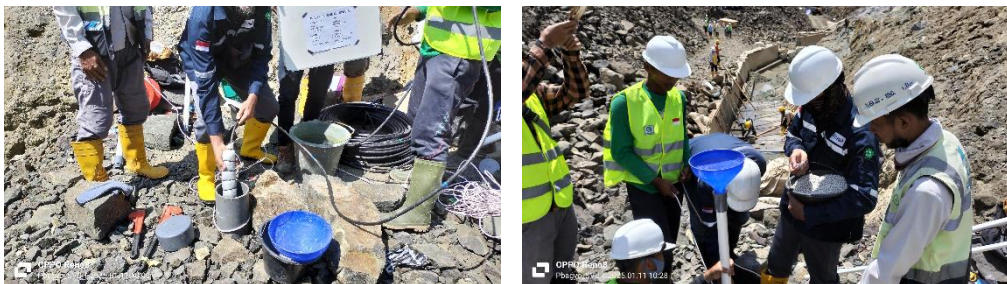
Perubahan kondisi lapangan, seperti kedalaman aktual galian pondasi yang berbeda dari desain awal (+197 m s.d. +203 m), menyebabkan reposisi titik-titik pemasangan piezometer. Penyesuaian ini dilakukan dengan memperhitungkan kapasitas tekanan hidrostatik dan beban kerja maksimum pada setiap sensor.

2.3. Prosedur Pemasangan Piezometer Kawat Getar

Adapun tahapan pemasangan pisometer jenis tertutup ini, adalah sebagai berikut:

- 1) Jentuhkan filter pisometer yang berada di bagian ujung setiap mata pisometer yang harus bebas dari gelembung udara sebelum dipasang. Cara ini dilakukan dengan melepaskan filter dari mata pisometer dan merendamnya dalam tempat yang berisi air mendidih. Karet berbentuk cincin kedap air harus dilepas terlebih dahulu dari tempatnya. Pembacaan awal harus dilaksanakan pada saat ini.

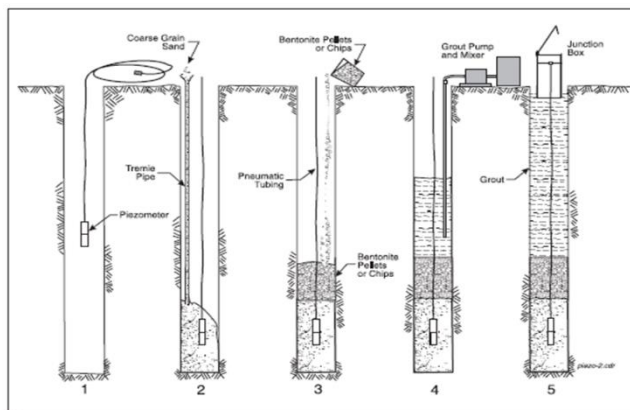
- 2) Pasang kembali karet berbentuk cincin kedap air dan filter dari baja tahan karat pada mata pisometer di dalam air. Masukkan filter ke dalam ember berisi air mendidih yang telah didinginkan. Ember tersebut harus cukup besar sehingga mata pisometer dapat dirakit kembali dan ditempatkan dalam kantong berisi pasir yang terendam air.



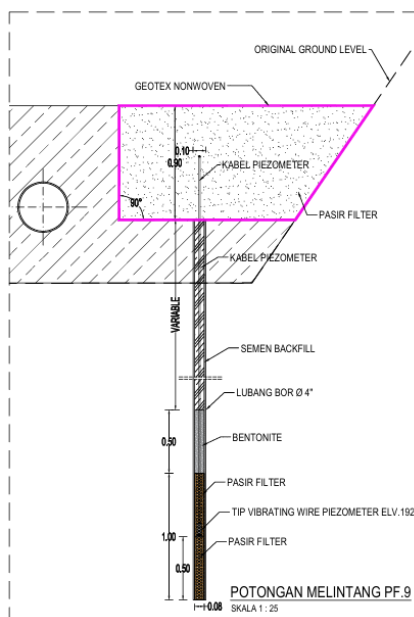
Gambar 4. Pekerjaan instalasi di lubang bor dan *sealing* bentonite.

- 3) Bawa pisometer beserta ember yang berisi air tersebut ke lokasi pemasangan. Lakukan persiapan di dekat lubang bor yang telah dibuat, antara lain: kabel-kabel pisometer, pasir saring, bentonite pellet, dll.
- 4) Bersihkan dinding lubang bor dari kotoran tanah hasil pengeboran. Ukur elevasi muka air di dalam lubang bor. Pengukuran ini penting dilakukan untuk memeriksa bahwa pisometer yang ditempatkan pada posisi dan elevasi tertentu di dalam lubang bor mempunyai tekanan air yang tingginya sama dengan elevasi muka air di dalam lubang bor.
- 5) Tempatkan kantong kain ke dalam ember yang berisi air dingin, selanjutnya tempatkan bahan pasir pengisi ke dalam kantong kain kasa dan ikat dengan kuat. Seluruh unit ini harus terendam dalam air hingga siap untuk dipasang ke dalam lubang.
- 6) Berhubung setiap pisometer memiliki kalibrasi yang berbeda-beda, maka posisi dan elevasi setiap pemasangan pisometer memiliki kondisi yang sangat penting. Karena itu nomor seri dari "transduser" harus dicatat sebelumnya.
- 7) Apabila dasar lubang bor telah mencapai kedalaman 30 cm di bawah rencana elevasi penempatan pisometer, pipa lindung harus dipasang pada lubang bor. Selanjutnya pasir bergradasi yang jenuh air diisikan ke dalam dasar lubang bor setinggi 30 cm menggunakan pipa tremie dan padatkan dengan batang pemadat sambil mengangkat pipa lindung setinggi 30 cm.
- 8) Yang harus diperhatikan selama pemasangan pisometer, adalah ketepatan pemasangan pisometer pada elevasi yang direncanakan, sehingga ketebalan jenis material pengisi dan elevasi pisometer yang benar dapat dimonitor termasuk adanya tanah bekas pengeboran di dalam lubang bor. Untuk mengecek hal tersebut selama pemasangan, harus digunakan batang pengukur kedalaman pengisian material yang biasanya terdiri dari kawat dan pemberat diujungnya. Pengukuran yang harus dilakukan adalah: kedalaman dasar lubang, pengisian pasir saring yang dipadatkan, pemasangan sekat bentonit yang telah diselesaikan dan pemasangan elevasi mata pisometer berikutnya di dalam lubang.
- 9) Mata pisometer yang telah dirangkai dimasukkan ke dalam lubang bor sesuai dengan kedalaman yang diinginkan setelah dilakukan pembacaan awal. Pembacaan tersebut harus menunjukkan tekanan air yang sama dengan elevasi muka air di dalam lubang bor. Bila tidak sama, berarti pisometer tidak berfungsi baik, bila perlu lakukan penggantian pisometer. Ingat data yang salah akan berpengaruh terhadap pembacaan-pembacaan berikutnya.
- 10) Bila penempatan dan uji coba berhasil, pemasangan dilanjutkan. Di antara elevasi pisometer-pisometer yang berbeda di dalam lubang bor (bila di dalam satu lubang dipasang lebih dari satu pisometer), bahan pengisi terdiri dari semen grout yang terdiri dari campuran semen dengan pasir harus dimasukkan ke dalam lubang bor. Semen *grout* harus digunakan hanya pada pengisian kembali pada material timbunan dan harus menggunakan pipa lindung.
- 11) Pada elevasi pisometer yang paling atas, pemasangan harus berada 150 cm di atas bentonit kedap air untuk memisahkan pisometer di bagian bawahnya.

- 12) Seluruh urutan pemasangan kemudian diulang untuk setiap elevasi mata pisometer yang dipasang melalui lubang bor. Setelah bagian atas semen bentonit dipadatkan, seluruh kawat yang telah digunakan dalam pemasangan pisometer ini dilepas dan lubang diisi kembali dengan campuran semen dan pasir dengan perbandingan 1 : 3. Setelah selesai pengisian kembali lubang bor, pipa pelindung kemudian ditarik keluar.
- 13) Setelah pemasangan semua mata pisometer selesai, lakukan pembacaan kembali, cek terhadap posisi/level muka air tanah yang ada.



Gambar 5. Pemasangan pisometer sistem tertutup melalui lubang bor. (sumber: Dunicliff, 1998)



Gambar 6. Pemasangan pisometer pada pembangunan Bendungan Bener. (Sumber: Gambar Kerja Kontraktor Paket 3 Bendungan Bener)

2.4. Pengumpulan Data Tekanan Pori

Data dikumpulkan menggunakan pembacaan digital dari terminal piezometer. Pembacaan dilakukan secara berkala dan hasilnya dianalisis untuk memantau fluktuasi tekanan air pori seiring waktu.



Gambar 7. Gambar pemasangan kawat getar dengan alat baca.



Gambar 8. Gambar pembacaan alat baca pisometer dan pengumpulan data hasil pembacaan.
(sumber: data hasil lapangan)

➤ Perhitungan

Ada 2 cara perhitungan tekanan pori pada pisometer elektrik yang tersambung dengan readout unit yaitu perhitungan dengan menggunakan persamaan linear (Linier Unit) dan perhitungan dengan menggunakan persamaan polinomial.

Rumus Linear : $E = G(R0 - R1)$

dengan:

E = tekanan pori

G = linear gauge factor sensor piezometer dari pabrik

R0 = pembacaan tanpa tekanan (*zero reading*)

R1 = pembacaan saat pengukuran

Rumus Polimomial : $E = AR1^2 + BR1 + C$
 $C = -(AR0^2 - BR0)$

dengan:

E = tekanan pori

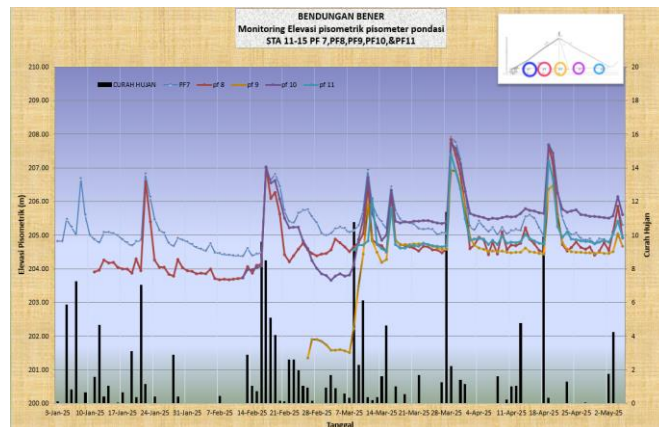
A,B,dan C = factor konstante kalibrasi pabrik

R0 = pembacaan tanpa beban (harus diulang dilapangan)

R1 = hasil pembacaan

3. HASIL STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

Studi kasus dilakukan pada pemasangan dan pemantauan 5 unit piezometer kawat getar (*vibrating wire piezometer*) yang terpasang di area pondasi Bendungan Bener, yaitu pada STA 11 hingga STA 14. Instrumen dipasang pada elevasi tetap +192 m dengan variasi *offset* dari as bendungan, baik di sisi hulu maupun hilir. Pemilihan lokasi ini berdasarkan evaluasi teknis yang menunjukkan adanya kebutuhan pemantauan tekanan air pori secara intensif di zona pondasi, khususnya di sekitar tirai *grouting* dan area jalur sungai bekas alur aliran.



Gambar 9. Grafik hasil analisa piezometer terhadap elevasi piezometrik. (sumber: PT.Virama Karya)

3.1. Interpretasi Elevasi Piezometrik

Grafik elevasi piezometrik menunjukkan pola peningkatan signifikan setelah hujan lebat, yang mengindikasikan adanya infiltrasi air ke dalam massa tanah. Setelah itu, nilai cenderung menurun secara perlahan, menunjukkan sistem drainase dan daya serap tanah bekerja dengan baik.

3.2. Interpretasi Tekanan Pori

Hasil pembacaan tekanan pori menunjukkan bahwa respon piezometer terhadap hujan intens cukup signifikan, di mana terjadi lonjakan tekanan pori sesaat setelah hujan lebat, diikuti penurunan secara bertahap beberapa hari setelahnya. Fenomena ini tercermin dari grafik elevasi piezometrik yang memperlihatkan puncak saat kejadian hujan, kemudian kembali stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem drainase internal dan efek dari tirai grouting bekerja secara efektif dalam mereduksi tekanan air pori.

Selain itu, pola fluktuasi tekanan pori menunjukkan tidak adanya akumulasi tekanan yang bersifat kronis, sehingga dapat disimpulkan bahwa stabilitas pondasi bendungan masih dalam kondisi aman pada tahap konstruksi saat ini. Metode pemasangan yang sesuai prosedur, serta penjuanan filter sebelum instalasi, terbukti mendukung akurasi pembacaan sensor. Keberadaan instrumen ini sangat membantu tim teknis dalam melakukan deteksi dini terhadap perubahan kondisi geoteknik yang berpotensi mengganggu kestabilan struktur bendungan.

3.3. Efektivitas Piezometer Kawat Getar

Pemasangan piezometer kawat getar pada Bendungan Bener dilakukan menggunakan metode tertutup melalui lubang bor, dengan tahapan sistematis mulai dari penjuanan filter, pengeboran, pemasangan sensor, pengisian material pelindung, hingga pembacaan awal di lapangan. Setiap sensor dipasang pada elevasi dan lokasi yang telah dirancang berdasarkan evaluasi kondisi geoteknik aktual, dengan perlindungan kabel dan sambungan agar tidak terganggu selama pekerjaan konstruksi berlangsung. Metode ini terbukti efektif diterapkan karena sesuai dengan karakteristik bendungan tipe CFRD yang membutuhkan pemantauan tekanan air pori secara tepat dan kontinu, terutama di area pondasi yang rawan rembesan.

Berdasarkan hasil pembacaan lima piezometer pondasi (PF-07 s.d. PF-11) yang terpasang pada elevasi tetap +192 m, instrumen berhasil merekam fluktuasi tekanan air pori yang berkorelasi dengan peristiwa hujan intens. Data menunjukkan adanya lonjakan tekanan air pori sesaat setelah hujan lebat, yang kemudian menurun secara bertahap, menandakan bahwa sistem drainase internal dan fungsi tirai grouting bekerja efektif. Hasil ini menegaskan bahwa metode pemasangan yang tepat memberikan hasil pengukuran yang stabil, akurat, dan responsif terhadap dinamika kondisi lapangan.

Efektivitas alat juga ditunjukkan oleh karakteristik teknis piezometer kawat getar itu sendiri. Alat ini memiliki beberapa keunggulan, yaitu tahan terhadap pembekuan, tidak terpengaruh oleh panjang kabel, mampu memberikan respon cepat terhadap perubahan tekanan, serta dapat mengukur tekanan air pori negatif. Seluruh fitur tersebut terbukti mendukung akurasi pembacaan, terutama di area pondasi dengan tekanan tinggi dan lingkungan lembap. Kombinasi antara metode pemasangan yang sesuai dan pemilihan jenis instrumen yang tepat menjadikan sistem pemantauan tekanan pori di Bendungan Bener sebagai rujukan praktik yang layak diterapkan pada proyek bendungan urugan lainnya.

4. KESIMPULAN

Metode pemasangan piezometer kawat getar pada proyek pembangunan Bendungan Bener telah dilaksanakan secara sistematis melalui tahapan penjujukan filter, pengeboran lubang, pemasangan sensor, isolasi vertikal, serta kalibrasi awal sebelum pengambilan data. Metode ini terbukti efektif dalam menghasilkan data tekanan air pori yang akurat, stabil, dan dapat diandalkan untuk mendeteksi perubahan kondisi geoteknik pada area pondasi.

Hasil pembacaan piezometer menunjukkan respons yang baik terhadap peristiwa lingkungan, seperti hujan intens, di mana lonjakan tekanan air pori dapat terekam secara real-time dan kembali menurun secara bertahap. Hal ini menandakan bahwa sistem monitoring berjalan optimal dan mendukung fungsi pengendalian rembesan melalui tirai *grouting*.

Piezometer kawat getar yang digunakan memiliki keunggulan teknis seperti tahan terhadap pembekuan, mampu mengukur tekanan negatif, tidak terpengaruh panjang kabel, serta memiliki respons cepat terhadap perubahan tekanan. Kombinasi antara metode pemasangan yang tepat dan spesifikasi alat yang sesuai membuktikan bahwa sistem instrumentasi ini layak dijadikan acuan dalam pelaksanaan pemantauan geoteknik pada proyek bendungan tipe urugan, khususnya CFRD.

UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, Puji Syukur Kepada Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan makalah ini dengan baik. Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua atas segala doa, dukungan serta semangat yang tiada henti dalam setiap langkah perjalanan pendidikan ini,

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Balai Besar Wilayah Sungai Serayu Opak (BBWS SO) yang telah memberikan izin, dukungan, dan kesempatan untuk melakukan pengamatan serta pengumpulan data di proyek pembangunan Bendungan Bener.

Tak lupa, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh rekan-rekan Tim Supervisi Pembangunan Bendungan Bener di lapangan atas kerja sama, bantuan, dan kebersamaan selama pelaksanaan kegiatan pengambilan data. Semoga segala kebaikan yang diberikan menjadi amal yang bernilai di sisi Allah SWT.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Dosen Pembimbing Lapangan dan Dosen Pembimbing, yang telah memberikan bimbingan dan arahnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Dunncliff, John, with assistance of Green, Gordon E., (1988), *Geotechnical Instrumentation For Monitoring Field Performance*. A Wiley-Interscience publication.
- T.Cruz.Paulo, Materin.Bayardo, Freitas.Manoel, (2007), *Concrete Face Rockfill Dams*, CRC Press-Publication
- Mulyono, Joko, (2017), *Konsepsi Keamanan Bendungan Dalam Pembangunan Dan Pengelolaan Bendungan*. Badan Standarisasi Nasional, (2017), SNI 8462:2017, *Tata Cara Pemantauan Tekanan Air Pori Pada Tanah Dengan Menggunakan Alat Piezometer Pneumatik*.
- Badan Standarisasi Nasional, (2020), SNI 3432:2020, *Tata Cara Penetapan Banjir Desain Dan Kapasitas Pelimpah Untuk Bendungan*.
- Kepala Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, (2017,) Modul 02, *Modul Kebijakan Dalam Pengembangan Bendungan Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar*, Bandung.
- Kepala Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, (2017), Modul 04, *Modul Kebijakan Dalam Pengembangan Bendungan Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar*, Bandung.
- Kep Men Permukiman dan Prasarana Wilayah, (2024), Nomor : 360/KPTS/M/2024, *Instrumentasi Tubuh Bendungan Tipe Urugan dan Tanggul*.
- Kementrian PUPR, Modul 2, (2022), *Bimbingan Teknis Pemeriksaan Besar, Evaluasi Instrumentasi*.
- Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, (2023), Nomor 7 Tahun 2023, *Tentang Perubahan Kedua Atas Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Nomor 27/PRT/M/2015 Tentang Bendungan*.
- Bagyo,Prpto, (2024), *Instrumentasi Keamanan Bendungan*, Yogyakarta.
- PT. Virama Karya, (2025), *Justifikasi Teknik Penyesuaian Kapasitas (Range) Instrumentasi Piezometer*.
- PT. Virama Karya, *As Plan Drawing*, Gambar Perencanaan Bendungan Bener Purworejo.