



## **Pengaruh Kepadatan Zona Inti Bendungan Karian Terhadap Tekanan Air Pori pada Tahap *Impounding***

**Fauji Rohman\*, Sri Sangkawati Sachro, Hari Nugroho**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

\*) Email corresponding author: [faujirlasmono@students.undip.ac.id](mailto:faujirlasmono@students.undip.ac.id)

Received: 23 November 2025 Revised: 27 Juli 2026 Accepted: 6 Agustus 2026

### **Abstract**

*This study analyzes the relationship between core zone density and pore water pressure development during the initial impoundment phase of the Karian Reservoir in Lebak Regency, Banten. This zoned embankment dam features a vertical clay core compacted using a wet compaction method from elevations +6.90 m to +28.0 m, followed by dry compaction for the overlying layers up to the core crest. Field and laboratory quality control data (September 2018–February 2022) were evaluated alongside piezometer data from four elevations (–8 m, 10 m, 30 m, 45 m) recorded during the impoundment period (October 2023–May 2025). The core material exhibited a water content of 44.0–60.0%, a dry unit weight of 1.025–1.178 t/m<sup>3</sup>, and a permeability coefficient of  $6.05 \times 10^{-9}$ – $3.11 \times 10^{-9}$  m/s, demonstrating strong inter-parameter correlations. Analyses of excess pore water pressure ( $\Delta U$ ) and the pore pressure ratio ( $R_u$ ) revealed development patterns consistent with theoretical predictions;  $R_u$  values below 0.5 indicated stable conditions free from hydraulic instability. Negative pore pressures at upper elevations (–294 to –441 kPa) indicated incomplete saturation, while an effective filter and drainage system accelerated pore pressure dissipation and maintained the dam's integrity. The study confirms that controlling water content and density through wet compaction is effective in maintaining pore pressure stability within a tropical climate characterized by high rainfall.*

**Keywords:** Zoned earthfill dam, core density, pore water pressure, impounding stage, vibrating wire piezomete.

### **Abstrak**

*Studi ini menganalisis hubungan antara kepadatan zona inti dan perkembangan tekanan air pori selama tahap pengisian awal Waduk Karian di Kabupaten Lebak, Banten. Bendungan urugan zona ini memiliki inti lempung vertikal yang dipadatkan menggunakan metode pemadatan basah dari elevasi +6,90 m hingga +28,0 m, diikuti oleh pemadatan kering untuk lapisan di atasnya hingga puncak inti. Data pengendalian mutu lapangan dan laboratorium (September 2018–Februari 2022) dievaluasi bersama data piezometer dari empat elevasi (–8 m, 10 m, 30 m, 45 m) yang tercatat selama periode pengisian waduk (Oktober 2023–Mei 2025). Material inti menunjukkan kadar air 44,0–60,0%, berat isi kering 1,025–1,178 t/m<sup>3</sup>, dan koefisien permeabilitas  $6,05 \times 10^{-9}$ – $3,11 \times 10^{-9}$  m/s, yang memperlihatkan korelasi kuat antarparameter. Analisis terhadap tekanan air pori berlebih ( $\Delta U$ ) dan rasio tekanan pori ( $R_u$ ) mengungkapkan pola perkembangan yang konsisten dengan prediksi teoretis; nilai  $R_u$  di bawah 0,5 mengindikasikan kondisi stabil yang bebas dari ketidakstabilan hidrolis. Tekanan pori negatif pada elevasi atas (–294 hingga –441 kPa) menunjukkan kejenuhan yang belum sempurna, sementara sistem filter dan drainase yang efektif mempercepat disipasi tekanan pori dan menjaga integritas bendungan. Studi ini mengonfirmasi bahwa pengendalian kadar air dan kepadatan melalui pemadatan basah efektif dalam menjaga stabilitas tekanan pori di iklim tropis dengan curah hujan tinggi.*

**Kata kunci:** Bendungan urugan zonasi, kepadatan inti, tekanan air pori, tahap pengisian, piezometer kawat getar

## Pendahuluan

Dalam pembangunan bendungan, tipe struktur sangat dipengaruhi oleh kondisi geoteknik setempat serta ketersediaan material lokal. Material dari endapan aluvial, teras sungai, dan batuan vulkanik sering digunakan sebagai inti atau zona penunjang karena mudah diperoleh dan ekonomis. Material inti harus memiliki plastisitas tinggi, permeabilitas rendah, serta kepadatan kering optimal untuk menjaga stabilitas tubuh bendungan dan mencegah rembesan air (Lachgueur *et al.*, 2021). Pada Bendungan Wadaslintang, metode *wet core* diterapkan karena curah hujan tinggi membuat pemadatan konvensional sulit, dengan material inti dijaga kadar airnya di atas nilai *Optimum Moisture Content* (OMC) agar pemadatan tetap efektif (Kerkes, 1998). Teknik ini terbukti berhasil sebagaimana diterapkan pada Bendungan Monasavu di Fiji yang menggunakan material berplastisitas tinggi dan permeabilitas rendah (Knight, 1986).

Pemadatan tanah lempung dengan kadar air tinggi pada inti bendungan berdampak nyata pada sifat hidromekanis material. Kondisi kadar air yang tinggi dan permeabilitas rendah menghasilkan tekanan air pori substansial selama konstruksi, dengan kekuatan geser awal sangat rendah. Material basah akibat pemadatan dengan sistem *wet of optimum* memperlihatkan struktur lebih homogen dan pori-pori kecil, tetapi menjadi lebih mudah mengalami penurunan dan proses konsolidasi berlangsung lebih lama. Hubungan antara *matric suction* (hisapan matriks) dan kekuatan geser didasarkan atas konsep tegangan efektif, sehingga perubahan kadar air saat pemadatan sangat mempengaruhi daya dukung dan stabilitas jangka panjang bendungan.

Studi mengenai perubahan tekanan air pori dan faktor keamanan lereng pada Bendungan Jatigede selama *impounding* menghasilkan temuan bahwa faktor keamanan lereng hulu mengalami penurunan dari 2,11 menjadi 1,94, meski nilai tersebut tetap di atas batas minimum sesuai SNI 8064:2016 (Minmahddun *et al.*, 2019). Desain zonasi material serta penggunaan lapisan kedap sangat efektif dalam menjaga kestabilan bendungan.

Penerapan metode dan penyesuaian kebijakan konstruksi di Bendungan Karian merujuk pada kesuksesan praktik di Bendungan Jatigede, dengan material zona inti berasal dari *borrow area* yang disimpan terlebih dahulu di *stockpile* untuk menurunkan kadar air alami sebelum dilakukan penghamparan dan pemadatan. Tujuan prosedur ini adalah untuk memastikan nilai derajat kepadatan

melebihi 95% dapat tercapai sebagaimana yang disyaratkan kontrak.

Metode pemadatan basah (*wet compaction*) memungkinkan pemadatan material zona inti pada kadar air 2-3% di atas OMC dengan permeabilitas homogen, meskipun menghasilkan kepadatan awal lebih rendah dari konvensional (Rönnqvist *et al.*, 2023). Kepadatan zona inti minimum adalah 93,8-94,4% dari maksimum *dry density* menghasilkan permeabilitas stabil  $1,2 \times 10^{-7}$  hingga  $5,1 \times 10^{-8}$  m/s, namun defisiensi pemadatan menyebabkan *suffusion* dan *internal erosion* (Silva *et al.*, 2017).

Lempung residual kaya haloisit menunjukkan kepadatan kering rendah 0,48-1,08 t/m<sup>3</sup> dengan porositas tinggi dan permeabilitas sangat rendah  $3 \times 10^{-9}$  hingga  $1,1 \times 10^{-7}$  m/s (Moon, 2016). Mineral haloisit pada *borrow area* Bendungan Karian memerlukan pengendalian kepadatan ketat, peningkatan kepadatan kering dari 1,14 t/m<sup>3</sup> menjadi 1,24 t/m<sup>3</sup> melalui *improved compaction* meminimalkan risiko *hydraulic fracture* (Hidayat *et al.*, 2016).

Zona inti berkepadatan 1,82 t/m<sup>3</sup> dipadatkan pada kadar air 2% di atas OMC menghasilkan rasio tekanan air pori (*Ru*) sangat tinggi 0,95-1,03 dengan laju disipasi rendah selama dua dekade pasca konstruksi (Nazari & Soroush, 2021). Material zona inti *wet core* dengan kadar air alami 59,2% dan kepadatan rendah menunjukkan *stress distribution* hampir isotropis dengan *settlement* jangka panjang lebih besar dan risiko *hydraulic fracture* lebih rendah (Ghanooni *et al.*, 2023).

Derajat pemadatan mempengaruhi kurva karakteristik air tanah (SWCC) dimana *air-entry value* (AEV) meningkat seiring peningkatan kepadatan, mengindikasikan material lebih padat membutuhkan hisapan lebih tinggi untuk mengeluarkan air (Li *et al.*, 2025). Model Van Genuchten memberikan akurasi prediksi lebih baik ( $R^2 > 0,95$ ) menangkap hubungan nonlinier antara kepadatan, tekanan air pori, dan perkembangan *matric suction* selama fase *impounding*. Peningkatan energi pemadatan 35% menghasilkan peningkatan kepadatan kering 3,7-5% dan penurunan kadar air optimum 9,5%, dengan kontur *isosuction* menunjukkan perilaku dual bergantung struktur mikro (Lachgueur *et al.*, 2021).

Pengalaman di Bendungan Monasavu membuktikan bahwa zona inti dengan kepadatan kering 0,86 t/m<sup>3</sup> (87% MDD) yang dipadatkan pada kadar air alami 76% tetap mampu mempertahankan tegangan efektif positif di seluruh titik selama *impounding*, dengan syarat monitoring intensif dan pengendalian konstruksi dilaksanakan secara cermat (Knight,

1986). Evaluasi keamanan bendungan urugan berpusat pada pengukuran tekanan air pori dan tekanan total tanah menggunakan berbagai tipe piezometer, dimana akurasi sangat bergantung pada prosedur pemasangan dan kualitas manufaktur (Adamo *et al.*, 2020). Penerapan sistem *monitoring* otomatis berbasis data *logger real-time* memungkinkan deteksi dini kondisi kritis, meskipun *time lag respons* dipengaruhi oleh jarak piezometer terhadap *reservoir* dan konduktivitas hidrolik material inti (Setyadi *et al.*, 2023). Pada Bendungan Jatibarang, piezometer sisi hulu mencatat *response time* 14–41 hari dengan tekanan lebih tinggi, sedangkan sisi hilir membutuhkan 25–61 hari, menggambarkan disipasi tekanan secara bertahap melalui zona filter. Fase konsolidasi zona inti berlangsung sekitar 5 tahun selama tahap konstruksi awal dengan tekanan air pori maksimum di tahun-tahun pertama, setelah periode konsolidasi, tekanan air pori dikontrol sepenuhnya fluktuasi Muka Air Waduk (MAW) bukan pemadatan (Gholami *et al.*, 2011).

Korelasi  $R^2=0,9834$  (Geostudio) dan 0,9863 (Plaxis) antara nilai observasi piezometer dan prediksi numerik menunjukkan *agreement* sangat baik, membuktikan pentingnya pengendalian kepadatan zona inti menjamin permeabilitas homogen mencegah tekanan air pori lokal anomali (Beiranvand & Komasi, 2019). Kadar air asli material zona inti umumnya lebih tinggi dari kadar air optimum ( $w_n \geq OMC+2\%$ ), namun plastisitas indeks sering lebih besar dari 40% dari standar optimal menyulitkan pemadatan (Affandi, 2014). Pengendalian ketat kadar air, gradasi material, dan tingkat pemadatan zona inti disertai verifikasi permeabilitas laboratorium sangat kritis mencegah perkembangan tekanan air pori berlebih yang mengganggu keamanan bendungan.

Zona inti Bendungan Logung menunjukkan koefisien permeabilitas  $2,48 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  dengan validasi permeabilitas melalui analisa gradasi menggunakan rumus Hazen dan Kozeny-Carman menunjukkan konsistensi pengujian laboratorium (Putri *et al.*, 2017). Material dengan mineralogi *montmorillonite* tinggi sangat responsif perubahan kadar air; pemadatan pada sisi basah menghasilkan struktur *dispersed* stabil meminimalkan potensi pengembangan dan tekanan air pori berlebih (Wirendanu *et al.*, 2014). Tekanan air pori dapat diprediksi dan dikontrol melalui kombinasi pengendalian kepadatan konstruksi, desain filter-drainase tepat, serta monitoring intensif piezometer menjaga distribusi tekanan aman (Fell *et al.*, 2015).

Pemilihan tipe piezometer harus mempertimbangkan permeabilitas material zona inti mempengaruhi *lag time respons*, dimana material *impervious*

( $k < 10^{-8} \text{ m/s}$ ) menghasilkan *lag time* berbulan-bulan pada *open standpipe* (Prasad & Dixit, 2020). Penurunan *time lag* dari 50 hari menjadi mendekati nol hari mengindikasikan pembukaan progresif retakan dan peningkatan permeabilitas akibat kepadatan material defisien, membuktikan bahwa pengendalian kepadatan zona inti sangat kritis mencegah perkembangan *hydraulic fracturing* yang akseleratif (Thepjunthra *et al.*, 2025).

Berdasarkan uraian di atas, terdapat kebutuhan mendesak untuk mengevaluasi secara komprehensif hubungan antara nilai kepadatan, kadar air, dan permeabilitas pada zona inti Bendungan Karian yang menerapkan dua metode pemadatan berbeda, yaitu *wet compaction* pada lapisan bawah (hingga elevasi 28 m) dan *dry compaction* pada lapisan atas. Evaluasi ini menjadi penting karena material lempung plastisitas tinggi (MH) dengan kadar air alami 1–20% di atas OMC yang digunakan di Bendungan Karian memiliki karakteristik spesifik yang belum pernah dievaluasi secara menyeluruh dalam konteks respons hidromekanis selama *impounding* di kondisi tropis Kabupaten Lebak. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menggabungkan data *quality control* konstruksi (kepadatan, kadar air, permeabilitas) dengan hasil monitoring piezometer selama 20 bulan pada empat elevasi, sehingga menghasilkan dataset pertama yang secara kuantitatif memetakan pengaruh kepadatan zona inti terhadap perkembangan tekanan air pori dan implikasinya terhadap keamanan bendungan urugan zonal tropis Indonesia.

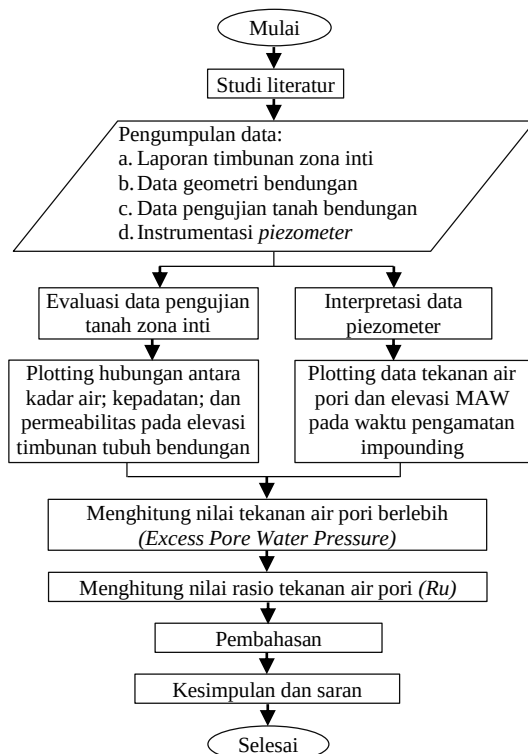
Penerapan metode dan penyesuaian kebijakan konstruksi di Bendungan Karian juga dilakukan merujuk pada kesuksesan praktik di Bendungan Jatigede. Bendungan Karian adalah bendungan urugan zonal setinggi 65,6 meter dengan zona inti vertikal tanah lempung basah berplastisitas tinggi yang menjadi fokus kajian pengendalian tekanan air pori selama *impounding* di iklim tropis bercurah hujan tinggi. Untuk memperoleh derajat kepadatan minimal 95% sesuai kontrak, material inti dari *borrow area* dengan kadar air tinggi disimpan di *stockpile* terlebih dahulu untuk menurunkan kadar air sebelum dilaksanakan penghamparan. Melalui evaluasi terhadap data *quality control* selama pemadatan dan *impounding*, dapat diamati bagaimana respons material dan dampaknya terhadap keamanan serta integritas struktur bendungan, sehingga penyempurnaan metode pelaksanaan dapat terus dilakukan secara berkelanjutan.

Permasalahan penelitian fokus pada hubungan antara nilai kepadatan, kadar air, dan permeabilitas pada zona inti Bendungan Karian serta per-

kembangan tekanan air pori selama *impounding*. Secara khusus, tujuan penelitian mencakup; (1) penentuan hubungan antara kadar air, permeabilitas, dan kepadatan kering material zona inti Bendungan Karian saat selesai konstruksi (2) pencarian nilai tekanan air pori pada elevasi MAW berdasarkan pembacaan instrumentasi *vibrating wire piezometer* selama masa *impounding* dan (3) analisis pengaruh kepadatan zona inti terhadap perkembangan tekanan air pori dan stabilitas bendungan selama fase *impounding*.

## Metode

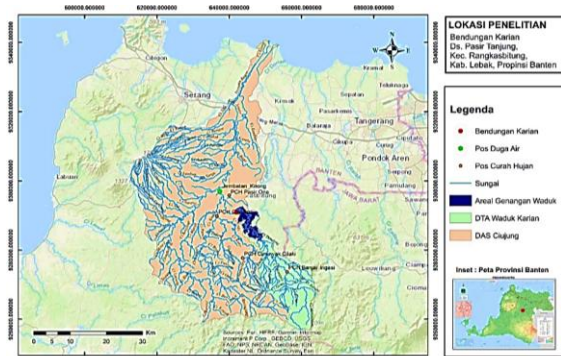
Secara keseluruhan, tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Penelitian dilaksanakan di Bendungan Karian yang terletak di Sungai Ciberang, Desa Pasirtanjung, Kecamatan Rangkasbitung, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten, pada koordinat 5°50'00,00" LS dan 105°48'00,00" BT Lokasi Bendungan Karian dapat dilihat pada Gambar 2. Bendungan Karian merupakan struktur urugan batu zonal dengan inti tegak dengan tinggi 65,6 m, panjang puncak 515 m, lebar puncak 10 m, dan volume tampungan total 314 juta m<sup>3</sup>.



**Gambar 1. Bagan alir penelitian**

Gambar *layout* pembangunan Bendungan Karian, potongan melintang dan pembagian zonasi material pada tubuh Bendungan Karian dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Data *quality control* zona inti bendungan dalam penelitian ini dikumpulkan selama fase konstruksi (September 2018 sampai

dengan Februari 2022) dan data tekanan air pori beserta elevasi MAW diperoleh selama fase *impounding* dari Oktober 2023 hingga Mei 2025. Material utama yang dianalisis dalam penelitian ini adalah material zona inti Bendungan Karian yang berasal dari *borrow area* Gunung Alung. Material zona inti diklasifikasikan sebagai tanah lempung dengan plastisitas sedang hingga tinggi dengan indeks plastisitas berkisar 26,21-61,16, kadar air alami antara 39,73-80,20%, dan koefisien permeabilitas berkisar  $6,05 \times 10^{-9}$  sampai  $3,11 \times 10^{-9}$  m/s.



**Gambar 2. Lokasi Bendungan Karian di Kabupaten Lebak**

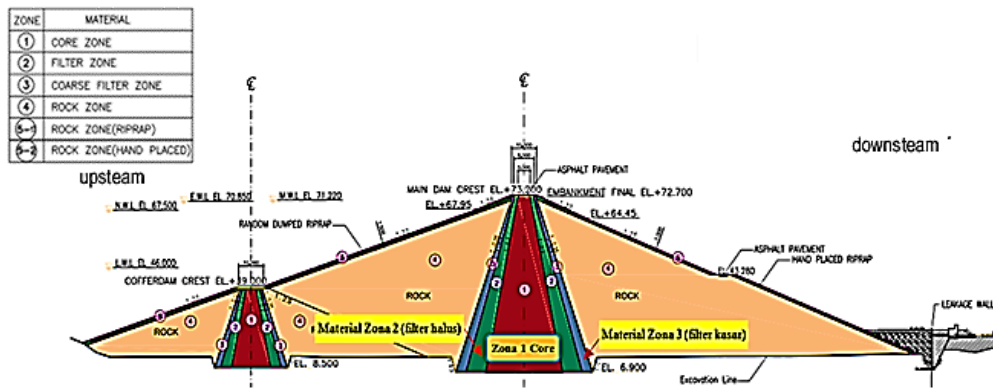
Sumber: (BBWS Cidanau Ciujung Cidurian, 2024)



**Gambar 3. Layout Pembangunan Bendungan Karian**

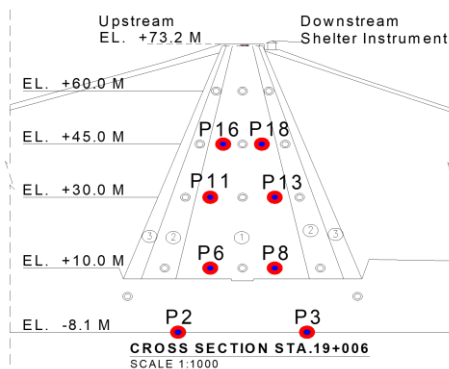
Sumber: (BBWS Cidanau Ciujung Cidurian, 2024)

Peralatan instrumentasi yang digunakan untuk monitoring tekanan air pori yaitu *Vibrating wire piezometer* (VWP) dengan sistem akuisisi data berkabel listrik untuk pengukuran tekanan akustik-elektrik. Total 8 unit *vibrating wire piezometer* akan dianalisis dari 22 unit yang terpasang pada Bendungan Karian, terdiri dari 2 unit pada fondasi (FP<sub>x</sub>) dan 6 unit pada zona inti tubuh bendungan utama (P<sub>x</sub>). Tata letak instrumen *Vibrating Wire Piezometer* pada tubuh Bendungan Karian dapat dilihat pada Gambar 5. Data parameter material yang digunakan untuk analisis perhitungan berasal dari hasil pengujian lapangan pada saat pelaksanaan.



Gambar 4. Potongan melintang STA 20+000 dan pembagian zonasi material pada tubuh Bendungan Karian

Sumber: (BBWS Cidanau Ciuju Cidurian, 2024)



Gambar 5. Cross section vibrating wire piezometer pada tubuh Bendungan Karian yang ditinjau

Sumber: (BBWS Cidanau Ciuju Cidurian, 2024)

Pengolahan data dilakukan dengan pendekatan analitik mengintegrasikan data *quality control* lapangan dan laboratorium selama fase konstruksi dengan hasil pembacaan instrumentasi geoteknik selama fase *impounding* melalui dua tahapan utama. Evaluasi karakteristik material zona inti dilaksanakan menggunakan pengujian lapangan yang mencakup pengukuran kadar air dengan metode *oven dry*, pengukuran kepadatan kering dengan metode *Sand-Cone* sesuai ASTM D 1556, dan pengukuran koefisien permeabilitas menggunakan metode *Falling Head*, serta pengujian laboratorium meliputi analisis sifat fisik material tanah (*specific gravity*, batas cair, batas plastis, indeks plastisitas), dan sifat mekanis (uji *standart proctor* dan uji triaksial terkonsolidasi tak terdrainase/CU). Hasil pengujian kemudian diplot dalam grafik hubungan elevasi timbunan terhadap kadar air, kepadatan kering, dan koefisien permeabilitas untuk identifikasi tren dan variabilitas material.

Monitoring tekanan air pori berdasarkan data *vibrating wire piezometer* yang dipasang vertikal

pada empat elevasi berbeda (–8 m, 10 m, 30 m, dan 45 m) pada tubuh bendungan pada sisi hulu dan hilir zona inti bendungan untuk analisis komparatif distribusi tekanan. Pembacaan dilakukan secara kontinu mulai dari Oktober 2023 hingga Mei 2025 dengan frekuensi harian pada periode awal pengisian dan berkala pada kondisi stabil, dengan data tekanan air pori direkam otomatis melalui sistem akuisisi data berkabel dan dikorelasikan terhadap data elevasi MAW dari *Automatic Water Level Record* (AWLR) dan *Peil Schaale*.

Analisis tekanan air pori berlebih (*excess pore water pressure*,  $\Delta U$ ) dihitung menggunakan Persamaan 1.  $\Delta U$  adalah *excess pore water pressure* (kPa),  $U_{\text{terukur}}$  adalah tekanan air pori dari piezometer (kPa) dan  $U_0$  adalah tekanan hidrostatik (kPa). Tekanan hidrostatik dihitung dengan Persamaan 2, dengan  $\gamma_{\text{air}}$  adalah berat isi air (9.81 kN/m<sup>3</sup>) dan  $h_{\text{air}}$  adalah tinggi kolom air di atas piezometer (m).

$$\Delta U = U_{\text{terukur}} - U_0 \quad (1)$$

$$U_0 = \gamma_{\text{air}} \times h_{\text{air}} \quad (2)$$

Rasio tekanan air pori ( $R_u$ ) dihitung menggunakan Persamaan 3. Jika posisi piezometer di bawah permukaan muka air (misal *reservoir* atau air tanah), maka Tegangan vertikal dihitung dengan Persamaan 4.

$$r_u = \frac{u}{\sigma} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma = \sum_i^n \gamma_i \cdot h_i + \gamma_{\text{air}} \cdot h_{\text{air}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

Dimana,  $r_u$  adalah rasio tekanan air pori dari piezometer,  $u$  adalah tekanan air pori dari piezometer (kPa) dan  $\sigma$  adalah tegangan vertikal total di lokasi piezometer pada lapisan (kPa),  $\gamma_i$  adalah berat satuan tiap lapisan tanah (t/m<sup>3</sup>), dan  $h_i$  adalah ketebalan tiap lapisan tanah (m).

Nilai  $r_u$  meningkat mendekati kondisi kritis atas kehilangan kekuatan geser (Esmaeili-Zadeh & Lashkar-Ara, 2025). Nilai  $r_u$  digunakan dalam

analisis stabilitas lereng untuk memperkirakan pengaruh tekanan air pori terhadap faktor keamanan. Studi di Eyvashan Dam menunjukkan nilai maksimum  $ru = 0,53$  di hulu dan  $0,18$  di hilir, keduanya menunjukkan stabilitas aman dengan disipasi tekanan seimbang (Komasi & Beiranvand, 2019). Pedoman lapangan menyarankan ambang batas nilai rasio tekanan air pori yang lebih besar dari  $0,6$  ( $ru > 0,6$ ) memerlukan penyelidikan tambahan dan pengurangan beban hidrolik. Strategi remediasi meliputi drainase tambahan, penurunan MAW, atau perbaikan zona inti dengan *grouting* seperti terlihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. Rentang nilai rasio tekanan air pori dan level risikonya**

| No. | Rasio PWP (Ru)         | Level risiko | Tindak lanjut                                                           |
|-----|------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1.  | $Ru < 0,3$             | normal       | Monitoring rutin                                                        |
| 2.  | $0,3 \leq ru \leq 0,6$ | waspada      | Monitoring intens                                                       |
| 3.  | $Ru > 0,6$             | kritis       | Evaluasi teknis tambahan dan kurangi beban air, perkuat sistem drainase |

Sumber: (Kolbadi *et al.*, 2021)

Studi Bendungan Balaroud di Iran mencatat nilai maksimum PWPR sebesar  $0,517$ , di bawah ambang kritis  $0,521$ , sehingga kondisi tetap aman dan stabil. PWPR menurun selama penimbunan lalu meningkat saat permukaan air naik. Instrumentasi menunjukkan konstruksi tidak berdampak signifikan terhadap kestabilan, tanpa indikasi *hydraulic fracturing*, likuifaksi, atau erosi internal. (Esmaeili-Zadeh & Lashkar-Ara, 2025).

## Hasil dan Pembahasan

### Karakteristik material zona inti Bendungan Karian

Evaluasi material inti menunjukkan terdapat korelasi terbalik antara kadar air dan kepadatan kering material, mencerminkan efek konsolidasi dan beban timbunan pada zona inti. Pada elevasi rendah ( $-8\text{m}$  hingga  $28\text{m}$ ), kadar air berkisar  $55\text{--}60\%$ , sedangkan pada elevasi menengah hingga puncak ( $29\text{--}72\text{ m}$ ) menurun menjadi  $45\text{--}50\%$ . Distribusi ini dipengaruhi oleh drainase gravitasi, peningkatan evaporasi akibat paparan atmosfer, dan mutu pemadatan yang lebih baik di bagian atas.

Kepadatan kering meningkat dari  $1,05\text{ t/m}^3$  di elevasi bawah menjadi  $1,15\text{--}1,20\text{ t/m}^3$  di puncak, menunjukkan pencapaian  $95\text{--}99\%$  dari kepadatan maksimum desain dan telah memenuhi spesifikasi teknis. Tabel 2 menunjukkan variasi karakteristik

material pada berbagai elevasi, sedangkan visualisasi tren perubahan parameter dapat diamati pada Gambar 6. Pola distribusi karakteristik material zona inti terjadi akibat mekanisme *self-consolidation*, dimana elevasi rendah menerima tekanan *overburden* maksimum sehingga volume pori menurun namun kadar air tetap tinggi karena hambatan drainase. Sebaliknya, elevasi tinggi dengan tekanan *overburden* minimal memungkinkan drainase dan evaporasi lebih besar sehingga kadar air menurun. Nilai permeabilitas lapangan turun dari  $3,0\text{--}3,5 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$  di dasar menjadi  $1,0\text{--}3,0 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$  pada elevasi tinggi, menunjukkan peningkatan mutu kompaksi dan perbaikan gradasi. Seluruh nilai permeabilitas memenuhi kriteria desain zona inti bendungan urugan, yaitu  $k < 1 \times 10^{-5}\text{ cm/s}$ , sehingga fungsi impermeabilitas tercapai secara optimal.

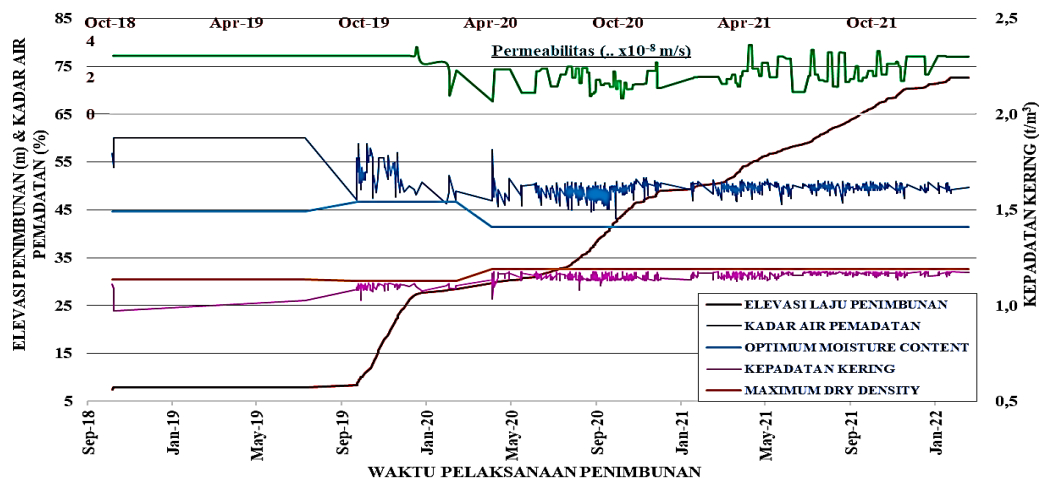
**Tabel 2. Variasi karakteristik material zona inti Bendungan Karian sesuai elevasi**

| Elevasi (m) | Kadar air (%) | Kepadatan kering ( $\text{t/m}^3$ ) | Permeabilitas (m/s)   |
|-------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------|
| +8 Dasar    | 60,00         | 1,03                                | $3,18 \times 10^{-8}$ |
| +10         | 51,69         | 1,08                                | $3,18 \times 10^{-8}$ |
| +20         | 52,17         | 1,11                                | $3,18 \times 10^{-8}$ |
| +30         | 46,66         | 1,15                                | $2,45 \times 10^{-8}$ |
| +40         | 48,93         | 1,15                                | $1,68 \times 10^{-8}$ |
| +46 MAR     | 49,48         | 1,14                                | $1,62 \times 10^{-8}$ |
| +50         | 50,43         | 1,15                                | $2,02 \times 10^{-8}$ |
| +60         | 49,31         | 1,17                                | $2,17 \times 10^{-8}$ |
| +67,5 MAN   | 49,87         | 1,17                                | $2,95 \times 10^{-8}$ |
| +70         | 49,47         | 1,16                                | $1,82 \times 10^{-8}$ |
| +72,5 Top   | 49,08         | 1,17                                | $3,14 \times 10^{-8}$ |

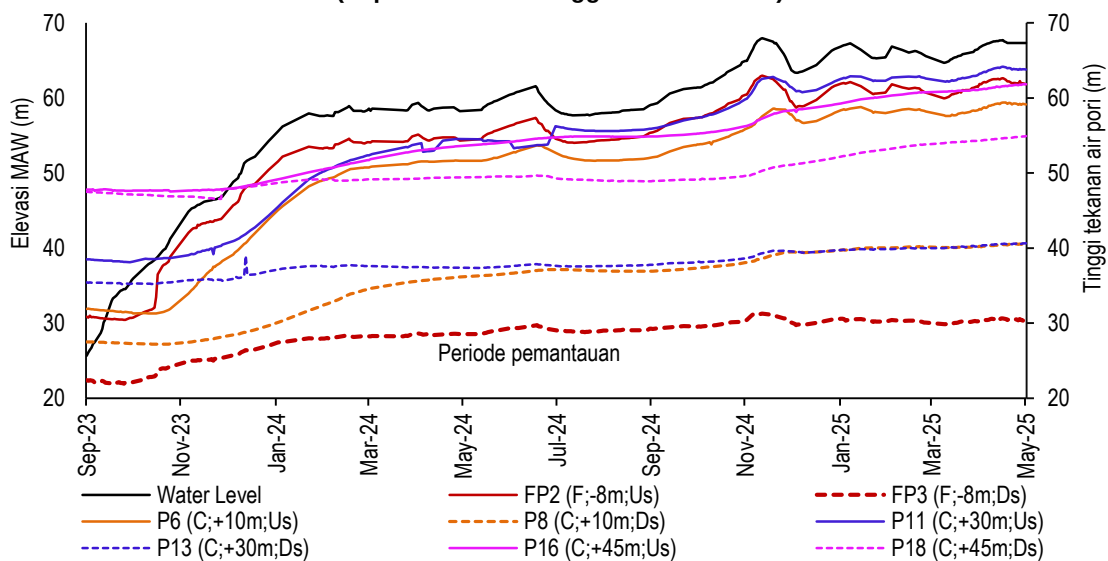
Sumber: (BBWS Cidanau Ciujung Cidurian, 2024)

Hubungan antara kepadatan, kadar air, dan permeabilitas diperoleh dari Tabel 2 dan Gambar 7 sangat krusial dalam mekanika tanah tak jenuh, dimana permeabilitas dipengaruhi oleh derajat kejenuhan serta distribusi air dalam pori-pori. Persamaan (1) hingga (4) yang telah ditetapkan pada bagian metode menjadi dasar analisis kuantitatif dalam menginterpretasikan data pada Tabel 3: nilai  $\Delta U$  dihitung menggunakan Persamaan (1) dan (2), sedang nilai  $Ru$  dihitung menggunakan Persamaan (3) dan (4).

Material yang dipadatkan dengan kadar air tinggi menghasilkan struktur partikel lebih terbuka dan perkolasi air yang terbatas namun stabil. Sebaliknya, material kering cenderung memiliki potensi jalur permeabilitas lebih tinggi akibat pori diisi udara. Pada zona inti Bendungan Karian, metode pemadatan basah dengan kepadatan tinggi menghasilkan material yang optimal dalam aspek ketahanan terhadap rembesan dan fraktur hidrolik.



Gambar 6. Tren karakteristik material zona inti Bendungan Karian sesuai elevasi timbunan (September 2018 hingga Februari 2022)



Gambar 7. Perkembangan tekanan air pori sisi hulu dan hilir terhadap kenaikan MAW Bendungan Karian (Oktober 2023 – Mei 2025)

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi signifikan mengenai performa zona inti lempung pada bendungan urugan di wilayah tropis basah. *Wet compaction* terbukti efektif mencegah *hydraulic fracturing* karena material yang dipadatkan pada sisi basah menghasilkan struktur *dispersed* yang homogen dengan *matric suction* rendah, sehingga gradien tekanan yang memicu retakan tidak dapat berkembang (Ghanooni *et al.*, 2023; Knight, 1986). Temuan ini memperkuat latar belakang penelitian yang menjadi dasar kajian ini, khususnya mengenai efektivitas metode *wet compaction* pada bendungan di wilayah bercurah hujan tinggi seperti yang dilaporkan oleh Kerkes (1998) dan Rönnqvist *et al.* (2023). Lebih lanjut, hasil penelitian ini selaras dengan observasi di Bendungan Wadaslintang dan Monasavu, sekaligus melengkapi kekurangan data empiris spesifik untuk

material lempung tropis Indonesia yang mengandung mineral haloisit (Hidayat *et al.*, 2016; Moon, 2016). Temuan ini mengkonfirmasi pentingnya homogenitas dan impermeabilitas material inti, khususnya di lingkungan tropis dengan curah hujan tinggi seperti di Kabupaten Lebak.

#### Perkembangan tekanan air pori selama fase *impounding*

Monitoring tekanan air pori menggunakan vibrating wire piezometer selama *impounding* dari Oktober 2023 hingga Mei 2025 mengungkapkan pola perkembangan tekanan yang konsisten dengan prediksi teori aliran air jenuh satu dimensi, namun dengan pengaruh signifikan dari heterogenitas material dan efek redistribusi tegangan (Gambar 7).

**Tabel 3. Nilai *Excess pore water pressure* ( $\Delta U$ ) dan perkembangan rasio tekanan air pori ( $R_u$ ) ditinjau dari sisi hulu pada berbagai elevasi MAW**

| Elevasi MAW | Piezometer Elv. -8 m |        |            |       | Piezometer Elv. +10 m |        |            |       | Piezometer Elv. +30 m |        |            |       | Piezometer Elv. +45 m |        |            |       |
|-------------|----------------------|--------|------------|-------|-----------------------|--------|------------|-------|-----------------------|--------|------------|-------|-----------------------|--------|------------|-------|
|             | $U_t$                | $U_0$  | $\Delta U$ | $R_u$ | $U_t$                 | $U_0$  | $\Delta U$ | $R_u$ | $U_t$                 | $U_0$  | $\Delta U$ | $R_u$ | $U_t$                 | $U_0$  | $\Delta U$ | $R_u$ |
| (m)         | (kpa)                | (kpa)  | (kpa)      | -     | (kpa)                 | (kpa)  | (kpa)      | -     | (kpa)                 | (kpa)  | (kpa)      | -     | (kpa)                 | (kpa)  | (kpa)      | -     |
| +30         | 361,70               | 300,22 | 61,48      | 0,36  | 212,96                | 311,13 | -98,17     | 0,26  | 81,80                 | 376,13 | -294,33    | 0,17  | 27,72                 | 469,18 | -441,46    | 0,06  |
| +40         | 433,01               | 371,55 | 61,46      | 0,40  | 212,96                | 311,13 | -98,17     | 0,23  | 81,80                 | 376,13 | -294,33    | 0,15  | 27,72                 | 469,18 | -441,46    | 0,07  |
| +50         | 524,58               | 463,15 | 61,42      | 0,44  | 295,40                | 393,61 | -98,20     | 0,29  | 111,01                | 405,35 | -294,34    | 0,16  | 30,67                 | 472,13 | -441,46    | 0,08  |
| +60         | 617,16               | 555,77 | 61,39      | 0,48  | 420,33                | 518,58 | -98,25     | 0,38  | 259,56                | 553,95 | -294,39    | 0,33  | 97,86                 | 539,35 | -441,48    | 0,21  |
| +67,5       | 674,61               | 613,24 | 61,37      | 0,50  | 482,06                | 580,33 | -98,27     | 0,41  | 333,01                | 627,42 | -294,41    | 0,39  | 160,91                | 602,42 | -441,50    | 0,30  |

**Tabel 4. Analisis komparatif kondisi tekanan air pori pada berbagai elevasi piezometer**

| Parameter material         | Elevasi piezometer yang ditinjau (Sta. 19+006) |                   |                    |                     | Interpretasi                       |
|----------------------------|------------------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------|
|                            | Fondasi (-8 m)                                 | Elevasi (10 m)    | Elevasi (30 m)     | Elevasi (45 m)      |                                    |
| Excess pore pressure (kPa) | +61,37 s.d +61,48                              | -98,17 s.d -98,27 | -294,41s.d -294,33 | -441,50 s.d -441,46 | Saturasi menurun ke atas           |
| Kondisi material           | Jenuh penuh                                    | Jenuh sebagian    | Jenuh sebagian     | Jenuh sebagian      | <i>Matric suction</i> dominan atas |
| $R_u$ maksimum             | 0,50                                           | 0,41              | 0,39               | 0,30                | Tegangan efektif meningkat ke atas |
| Potensi kegagalan          | Batas aman                                     | Aman              | Sangat aman        | Sangat aman         | Margin keamanan besar              |

Data menunjukkan bahwa semua piezometer merespons kenaikan MAW secara proporsional tanpa keterlambatan signifikan, yang mengindikasikan kemampuan zona inti dalam mentransmisikan tekanan hidrostatik secara relatif cepat ke berbagai elevasi. Respons piezometer tetap cepat meski permeabilitas rendah ( $10^{-8}$  m/s) karena transmisi tekanan air pori berlangsung melalui medium yang kontinyu, berbeda dengan aliran volumetrik air. Tekanan merambat secara efisien melalui air pori, sehingga redistribusi tekanan terjadi lebih cepat daripada pergerakan air aktual dalam media berpori jenuh maupun tak jenuh. Nilai  $\Delta U$  dan  $R_u$  dihitung berdasarkan Persamaan 1 sampai Persamaan 4 yang telah diuraikan pada bagian metode, di mana  $\Delta U$  merupakan selisih antara tekanan air pori terukur ( $U_{\text{terukur}}$ ) dan tekanan hidrostatik ( $U_0$ ), sedangkan  $R_u$  merupakan rasio antara tekanan air pori terhadap tegangan vertikal total di lokasi piezometer. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 3.

Analisis data instrumentasi yang disajikan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa pada elevasi tinggi (30 m dan 45 m), nilai *excess pore water pressure* ( $\Delta U$ ) terukur berada pada rentang negatif, yaitu -294 hingga -441 kPa, dengan nilai  $R_u$  yang juga rendah. Temuan ini mengonfirmasi bahwa sebagian besar material inti di zona tersebut berada dalam kondisi tak jenuh, sebagaimana ditegaskan pula oleh

rendahnya perkembangan tekanan air pori relatif terhadap MAW. Pola  $\Delta U$  negatif ini sangat konsisten dengan teori mekanika tanah tak jenuh, di mana tekanan matrik atau matrik *suction* tidak hanya meningkatkan kekuatan geser tanah, tetapi juga menandakan keberhasilan sistem drainase internal (*chimney drain* dan *toe drain*) dalam mempertahankan kondisi *partial saturation*, sekalipun terjadi kenaikan MAW secara signifikan.

Dengan demikian, data pada Tabel 3 tidak hanya mendukung uraian fenomenologis, tetapi juga memperkuat validitas argumentasi mengenai stabilitas dan performa zona inti bendungan urugan. Sebaliknya, pada elevasi fondasi (-8 m), nilai  $\Delta U$  positif stabil berkisar 61,37 kPa hingga 61,48 kPa pada sisi hulu, mengindikasikan bahwa zona fondasi telah mencapai kondisi jenuh penuh dan mengalami tekanan air pori berlebih. Nilai  $R_u$  pada fondasi menunjukkan peningkatan linear dari 0,36 pada MAW 30 m menjadi 0,50 pada MAW 67,5 m.

Nilai  $R_u$  sebesar 0,5 pada fondasi bendungan urugan masih dinyatakan aman menurut pedoman desain bendungan urugan di Indonesia, keamanan terhadap rembesan dan tekanan air pori dievaluasi melalui faktor keamanan terhadap gradien kritis dan rasio tekanan pori ( $R_u$ ), yang harus dijaga agar tidak berkembang menuju kondisi hidraulik kritis (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Kestabilan angka

ini, tanpa tren peningkatan progresif menuju ambang kritis  $>0,6$ , mengindikasikan tercapainya kesetimbangan antara tekanan air masuk dari hulu dan disipasi efektif melalui sistem drainase ke hilir. Analisis komparatif mengenai kondisi tekanan air pori pada berbagai elevasi piezometer dapat dilihat pada Tabel 4.

Temuan mengenai perbandingan tekanan sisi hulu dan sisi hilir memberikan wawasan penting tentang gradien hidrolik dan efektivitas sistem drainase. Pada semua elevasi, tekanan sisi hulu lebih tinggi dibandingkan sisi hilir dengan perbedaan yang semakin signifikan seiring peningkatan MAW. Pola ini mengkonfirmasi bahwa gradien hidrolik bekerja dari hulu ke hilir sesuai dengan prinsip aliran rembesan, zona inti berfungsi sebagai barrier impermeabel yang efektif menghalangi aliran langsung, dan filter serta drainase *downstream* berperan efektif dalam disipasi tekanan air pori. Fenomena ini secara saintifik menunjukkan bahwa desain sistem zonasi Bendungan Karian dengan penempatan zona filter dan drainase yang tepat telah mencapai fungsi yang direncanakan sesuai disain.

#### Analisis risiko *hydraulic fracturing* dan stabilitas struktur

Risiko *hydraulic fracturing* atau fraktur hidrolik adalah fenomena dimana tekanan air pori lokal yang ekstrem tinggi melebihi tegangan normal efektif dapat menyebabkan retak pada tubuh bendungan. Evaluasi terhadap risiko ini dilakukan dengan membandingkan rasio tekanan air pori  $R_u$  terhadap nilai batas kritis. Data penelitian menunjukkan bahwa nilai  $R_u$  di semua lokasi piezometer tetap berada di bawah 0,5, jauh dari batas kritis 0,6 yang ditetapkan dalam standar internasional, sehingga potensi *hydraulic fracturing* sangat rendah.

Pada elevasi tinggi di Bendungan Karian, nilai  $\Delta U$  negatif justru menjadi indikator keamanan krusial. Tekanan negatif ini menandakan adanya *matric suction* pada material inti lempung berindeks plastisitas tinggi (17,38–35,39). Dalam mekanika tanah tidak jenuh, *matric suction* tersebut menghasilkan kontribusi kohesi tambahan yang signifikan, sehingga meningkatkan kuat geser material melebihi kondisi jenuh. Dengan demikian, kondisi tidak jenuh parsial justru merupakan faktor menguntungkan yang memperkuat stabilitas zona inti bendungan (Suryadi, 2018).

Analisis temporal saat *impounding* parameter  $R_u$  menunjukkan bahwa tidak terjadi akumulasi tekanan air pori yang progresif. Hal ini membuktikan kinerja optimal sistem drainase dan filter. Kenaikan nilai  $R_u$  fondasi dari 0,36 menjadi

0,50 diiringi dengan laju peningkatannya yang melambat, mengindikasikan tercapainya kondisi kesetimbangan. Dalam kondisi ini, tekanan air pori telah stabil meskipun muka air naik, membuktikan sistem drainase telah setara dengan tekanan dari hulu.

Secara keseluruhan, hasil analisis tekanan air pori menunjukkan bahwa Bendungan Karian selama fase *impounding* berada dalam kondisi operasional yang aman dengan margin keamanan yang memadai. Kestabilan tekanan air pori, distribusi vertikal yang sesuai prediksi, dan efektivitas sistem drainase dalam mendisipasi tekanan membuktikan bahwa desain dan pelaksanaan konstruksi zona inti telah berhasil. Kontrol kepadatan dan kadar air material yang ketat selama konstruksi, dikombinasikan dengan penempatan sistem drainase yang optimal, telah menghasilkan zona inti yang mampu mengendalikan perkembangan tekanan air pori sesuai dengan prediksi desain dan standar keamanan internasional.

Hasil penelitian mengkonfirmasi hubungan kuat antara kadar air, kepadatan kering, dan permeabilitas zona inti Bendungan Karian sesuai dengan Tabel 2. Pada kadar air rata-rata 50,64%, material zona inti Bendungan Karian mencapai kepadatan kering 1,03–1,17 t/m<sup>3</sup> dengan derajat kepadatan di atas 96%. Hasilnya, permeabilitas lapangan yang sangat rendah, yakni  $(1,62\text{--}3,18) \times 10^{-8}$  m/s, terbukti efektif menekan rembesan. Namun demikian, nilai-nilai tersebut akan menjadi lebih baik dan akurat apabila dilakukan validasi lebih lanjut, baik melalui pengujian laboratorium tambahan maupun simulasi numerik yang menggunakan data *as-built* secara lengkap.

Monitoring *vibrating wire piezometer* selama 20 bulan masa *impounding* menunjukkan performa material yang konsisten. Tekanan air pori berlebihan di fondasi bernilai positif, sementara di zona inti tinggi bernilai negatif, mengindikasikan tidak ada saturasi berlebihan. Dengan rasio tekanan air pori di bawah 0,5 di seluruh elevasi, tegangan efektif terjaga dan risiko *hydraulic fracturing* dapat diabaikan, sehingga stabilitas bendungan terjamin. Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dengan melengkapi *gap* literatur mengenai performa zona inti lempung pada bendungan urugan di wilayah tropis basah melalui monitoring piezometer selama 20 bulan *impounding*. Berbeda dari studi terdahulu yang terbatas pada aspek teoritis atau simulasi numerik, riset Bendungan Karian menyajikan data kuantitatif empiris spesifik menunjukkan bahwa tekanan air pori tetap terkontrol di bawah 0,5 dengan desain filter-drainase yang optimal, dan membuktikan *wet compaction* efektif mencegah *hydraulic fracturing*.

Temuan ini selaras dengan kajian Kerkes (1998) dan Rönqvist *et al.* (2023) yang menegaskan bahwa pemadatan pada sisi basah menghasilkan permeabilitas homogen dan resistensi terhadap retakan hidraulik. Di sisi lain, hasil ini juga melengkapi temuan Hidayat *et al.* (2016) mengenai perlunya pengendalian kepadatan ketat pada material haloisit, serta mempertegas relevansi penggunaan *vibrating wire piezometer* untuk monitoring *real-time* sebagaimana disarankan oleh Adamo *et al.* (2020) dan Setyadi *et al.* (2023). Temuan ini mengkonfirmasi bahwa pengelolaan kepadatan material dan kontrol kadar air ketat mampu memastikan stabilitas zona inti pada kondisi tropis intensitas hujan tinggi, menjadikan riset ini sebagai acuan *best practice* konstruksi bendungan urugan lempung di Indonesia.

## Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa kepadatan zona inti sangat berpengaruh terhadap tekanan air pori di Bendungan Karian selama *impounding*. Material dengan kadar air rata-rata 50,64% menghasilkan kepadatan kering 1,03–1,17 t/m<sup>3</sup>, derajat kepadatan 96,83–97,08%, dan koefisien permeabilitas lapangan hasil uji *falling head* sebesar 1,62–3,18×10<sup>-8</sup> m/s, memastikan zona inti tetap impermeabel. Meskipun demikian, validasi lebih lanjut melalui simulasi numerik atau pengujian tambahan direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi nilai-nilai tersebut. Monitoring selama 20 bulan menggunakan *vibrating wire piezometer* menunjukkan *excess pore water pressure* terkendali, baik di fondasi (61,37–61,48 kPa) maupun zona inti tinggi (–294,32 hingga –441,50 kPa), serta rasio Ru di bawah 0,5 pada seluruh elevasi monitoring. Sistem drainase dan filter berjalan efektif, namun monitoring jangka panjang fondasi dan evaluasi erosi internal tetap direkomendasikan.

## Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan artikel ini, khususnya kepada Balai Besar Wilayah Sungai Cidanau Ciujung Cidurian, Segenap Dosen dan Karyawan Program Magister Retrofitting dan Instrumentasi Keamanan Bendungan serta rekan-rekan Mahasiswa Magister Superspesialis MRIKB Universitas Diponegoro Angkatan V Tahun 2024.

## Daftar Pustaka

Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 145–202.

<https://doi.org/10.47260/jesge/1115>

Affandi, D. (2014). Kriteria Material Konstruksi untuk Bendungan Urugan (Studi Kasus Bendungan Sindangheula). *Jurnal Teknik Hidraulik*, Vol. 5, 2, 165–180.

Beiranvand, B., & Komasi, M. (2019). Monitoring and numerical analysis of pore water pressure changes Eyvashan dam during the first dewatering period. In *Journal of Applied Research in Water and Wastewater* (Vol. 11, Issue 1).

Esmaeili-Zadeh, S., & Lashkar-Ara, B. (2025). Evaluating the behavior of the Balaroud earth fill dam during impoundment in the final construction stage. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 12(1), 64–80.

<https://doi.org/10.22126/arww.2025.11254.1344>

Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., & Foster, M. (2015). *Geotechnical Engineering of Dams* (2nd ed.). CRC Press/Balkema.

Ghanooni, M. S., Jahanandish, M., & Jalili, J. (2023). Investigation of Construction Methods of Wet core Earth Dams in Wet Climates.

Gholami, A., Razavi, B., & Porehkar, M. (2011). Corresponding Author Investigation on Pore Water Pressure in Core of Karkheh Dam. *Advances in Environmental Biology*, 5(8), 2417–2421.

Hidayat, N., Sanjaya Sutikno, D. K. B. H., & Hee Jung, S. (2016). Improvement of core material containing Halloysite at the Karian Dam Embankment. Seminar Nasional KNIBB 2016, Sub Tema-5 : Hambatan Teknis dan Non Teknis dalam Pelaksanaan Konstruksi Bendungan.

Kerkes, D. J. (1998). Lessons Learned from the Analysis of a Wet core Dam. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 12, 406–409.

<https://scholarsmine.mst.edu/icchgehttps://scholarsmine.mst.edu/icchge/4icchge/4icchge-session02/12>

Knight, D. J. (1986). Geotechnical properties and behaviour of the Monasavu halloysite clay, Fiji. *Clay Minerals*, 21(3), 311–332.

<https://doi.org/10.1180/claymin.1986.021.3.05>

Kolbadi, S. M. S., Mirtaheeri, M., Mirzabozorg, H., & Ardebili, M. A. H. (2021). Stability Survey of Boostan earth Dams Using Instrumentation Data.

Komasi, M., & Beiranvand, B. (2019). Study of Hydraulic Failure Mechanism in the Core of Eyvashan Earth Dam with the Effect of Pore Water

Pressure and Arching Article info. *Journal of Stress Analysis*, 4(2).

<https://doi.org/10.22084/jrstan.2020.20022.1110>

Lachgueur, K., Abou-Bekr, N., Taibi, S., & Fleureau, J. M. (2021). Effects of compaction and suction on the hydromechanical properties of a dam core clay. *Transportation Geotechnics*, 27.

<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100498>

Li, X., Li, K., Jiao, X., Chi, Y., & Yue, X. (2025). Effect of compaction degree on the soil-water characteristic curve of dam impervious soil: model comparison and microstructural analysis. *Frontiers in Earth Science*, 13.

<https://doi.org/10.3389/feart.2025.1640718>

Minmahddun, A., Fathani, T. F., & Faris, F. (2019). Determination of Stability During First Impounding in Jatigede Earth Dam. *Journal of Applied Geology*, 3(2), 1. <https://doi.org/10.22146/jag.48592>

Moon, V. (2016). Halloysite behaving badly: geomechanics and slope behaviour of halloysite-rich soils. *Clay Minerals*, 51(3), 517–528.

<https://doi.org/10.1180/claymin.2016.051.3.09>

Nazari, A., & Soroush, A. (2021). Behavior of a High Rockfill Dam with Clay Core during nineteen years of Observation. In *Symposium on Sustainable Development of Dams and River Basins* (Vol. 24, p. 27th).

Prasad, R., & Dixit, M. (2020). Performance Monitoring Of Dams through Piezometers - A Case Study. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7. [www.ijeas.org](http://www.ijeas.org)

Putri, V. S., Rangga, F., Hardiyati, S., & Wikan, S. K. (2017). Analisa Permeabilitas Zona Inti Dan Zona Filter Bendungan Logung (Vol. 6, Issue 2). <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkts>

Rönnqvist, H., Pålhorstorp, T., & Gustavsson, D. (2023). A Revisit to the Swedish Wet Compaction Method—A Case Study of the Burvattnet Dam Reconstruction. *Open Journal of Civil Engineering*, 13(02), 282–291.

<https://doi.org/10.4236/ojce.2023.132021>

Setyadi, A., Suharyanto, S., & Edhisono, S. (2023). Analisis Respon Tekanan Air Pori Terhadap MAW Pada Bendungan Jatibarang. Bentang: *Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 11(1), 67–80. <https://doi.org/10.33558/bentang.v11i1.5666>

Silva, I., Lindblom, J., Viklander, P., & Laue, J. (2017). Assessment of internal erosion in the glacial till core of a Swedish dam.

Suryadi, A. (2018). Pengaruh matric suction terhadap parameter geser tanah lempung tak jenuh dan implikasinya terhadap stabilitas lereng. *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 23(2), 85–94.

Thepjunthra, W., Mairaing, W., Jinakulwipat, M., Chalermpornchai, T., & Kunsuwan, B. (2025). Piezometer Time-Lag and Pore Pressure Ratio for Identification of Dam Internal Erosion. *Civil Engineering Journal (Iran)*, 11(3), 1162–1179. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-03-019>

Wirendanu, L. A. T., Hoesain, I. M., & Sulistyowati, T. (2014). Pengaruh Tingkat Kepadatan dan Kadar Air Terhadap Potensi Mengembang pada Tanah Lempung Ekspansif di Lombok Tengah. *Spektrum Sipil*, ISSN 1858-4896.