



## ANALISIS NUMERIK REMBESAN DAN ANALISIS GEOFISIKA DAM RANU KLAKAH<sup>1</sup>

### SEEPAGE NUMERICAL ANALYSIS AND GEOPHYSICS ANALYSIS OF RANU KLAKAH DAM

Nurrohman Adi Assajjad<sup>a</sup>, Runi Asmaranto<sup>a</sup>, Evi Nur Cahya<sup>a,2</sup>

<sup>a</sup> Departemen Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Jl. MT. Haryono No. 167, Malang, 65145, Indonesia

#### ABSTRAK

Dam Ranu Klakah merupakan bendung lama yang terindikasi terjadi rembesan pada bagian hilirnya. Tujuan dari studi ini adalah menganalisa secara numeris rembesan yang terjadi akibat *piping* pada Dam Ranu Klakah, termasuk potensi lokasi titik rembesan. Analisa geofisika dilakukan untuk dapat melihat secara visual posisi rembesan pada tubuh Dam Ranu Klakah, untuk dapat dilakukan perbaikan secara tepat. Analisa numerik dilakukan dengan bantuan aplikasi Geostudio SEEP/W, sedangkan analisa geofisika dilakukan dengan menggunakan Geolistrik ADMT dan Ground Penetrating Radar yang diujikan pada lokasi penelitian guna menginterpretasi lapisan bawah permukaan. Dari analisa yang dilakukan, didapatkan hasil debit rembesan sebesar  $4,38 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{dt}$ , yang nilainya masih lebih kecil dari debit rembesan yang diizinkan sebesar 1% dari debit rata-rata Sungai yakni sebesar  $0,131 \text{ m}^3/\text{dt}$ . Nilai faktor keamanan terhadap piping untuk kondisi muka air setinggi 5 m yaitu  $5,01 > 4$ , sebagai batas nilai keamanan. Dari hasil analisa geofisika, diketahui zona rembesan terletak pada bangunan pilar penyekat antara pintu pembilas dengan pintu air sekitar jarak 6 – 8 m dari lantai kendaraan pada jembatan di atas pintu, sehingga perbaikan dapat difokuskan pada titik ini. Dengan demikian, rembesan yang terjadi akibat piping pada bagian hilir, masih memenuhi syarat keamanan yang ditetapkan.

*Kata kunci: Geolistrik, Ground Penetrating Radar, piping, rembesan.*

#### ABSTRACT

Ranu Klakah Dam is an old weir that is indicated to have seepage in its downstream section. The purpose of this study is to numerically analyze seepage that occurs due to piping at Ranu Klakah Dam, including the potential location of seepage points. Geophysical analysis was conducted to visually see the seepage position on the body of Ranu Klakah Dam so that appropriate repairs could be made. Numerical analysis was conducted with the help of the Geostudio SEEP/W application, while geophysical analysis was conducted using ADMT geoelectric and ground-penetrating radar tested at the research location to interpret the subsurface layer. From the analysis, we obtained a seepage discharge of  $4.38 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{dt}$ , which is still smaller than the permitted seepage discharge of 1% of the average river discharge of  $0.131 \text{ m}^3/\text{dt}$ . The value of the safety factor for piping in 5 m high water level conditions is  $5.01 > 4$ , which is the limit of the safety value. From the results of the geophysical analysis, it is known that the seepage zone is located at the baffle pillar building between the flushing door and the sluice gate at a distance of about 6–8 m from the vehicle floor on the bridge above the gate, so that repairs can be focused at this point. Thus, seepage that occurs due to piping downstream still meets the established safety requirements.

*Keywords: Geoelectric, Ground Penetrating Radar, piping, seepage.*

<sup>1</sup> Info Artikel: Received: 09 Juni 2024, Accepted: 30 Juni 2024

<sup>2</sup> Corresponding Author: Evi Nur Cahya, [evi\\_nc@ub.ac.id](mailto:evi_nc@ub.ac.id)

## **PENDAHULUAN**

Ranu Klakah Lumajang adalah salah satu danau alami yang terbentuk dari letusan Gunung Lemongan. Ranu Klakah terletak di desa Tegal Randu, Kecamatan Klakah, Kabupaten Lumajang, Jawa Timur. Ranu Klakah dibangun untuk pemenuhan kebutuhan air minum dan air irigasi di beberapa desa. Selain itu, Ranu Klakah juga dimanfaatkan untuk mencari ikan, serta dimanfaatkan sebagai tempat wisata, sehingga memberi dampak positif bagi peningkatan ekonomi masyarakatnya. Oleh karena itu, keberadaan infrastruktur bendung pada Ranu ini harus berfungsi dengan baik dan aman.

Bendung (dam) diharapkan memiliki konstruksi yang aman dan kekuatan pondasi yang mumpuni agar berfungsi sebagaimana mestinya. Keamanan bendung terletak pada kemampuan tubuh bendungan (Arisanto, 2020). Salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam proses perencanaan bendung yaitu terjadinya rembesan, hal itu akan selalu terjadi, namun efeknya dapat diminimalisir. Aliran rembesan yang terjadi dapat menyebabkan erosi internal pada lapisan tanah dibawah pondasi. Aliran tersebut dalam hal tertentu dapat diizinkan pada bendung, namun pada kondisi tertentu dapat menimbulkan terjadinya erosi internal yang menginisiasi terbentuknya *piping* (Putra et al., 2022). *Piping* sering terjadi pada struktur tanah dan batuan yang longgar, artinya terdapat ruang kosong antar partikel sehingga air yang mengalir menjadi lebih cepat (Wang et al., 2017). *Piping* dapat menyebabkan bendungan mengalami penurunan dari posisi awal sehingga dapat mengganggu dari stabilitas serta dapat menyebabkan bendungan mengalami keruntuhan.

Pondasi bendung sebagai penopang tubuh bendung harus memenuhi persyaratan tertentu, apabila pondasi bendung tidak memenuhi persyaratan bisa dilakukan perbaikan pada pondasi sepanjang perbaikan tersebut layak dari segi teknis dan ekonomis (Astuti et al., 2012). Potensi rembesan akan semakin besar terjadi apabila terdapat lapisan tanah yang bervariasi atau tidak seragam artinya setiap lapisan tanah tersebut memiliki nilai permeabilitas yang berbeda, sehingga kecepatan dan besaran aliran rembesan tidak dapat dikontrol dengan baik. Kerusakan yang ditimbulkannya akan melanda daerah pemukiman dan prasarana infrastruktur (Fauzi et al., 2023). Kerusakan yang terjadi pada bendung, bisa terjadi karena hancurnya tanah di bawah bendung, retaknya badan bendung, kerusakan pada lantai bendung, gerusan, dan kerusakan lainnya (Alvianto et al., 2024).

Penggunaan Geolistrik ADMT dan Ground Penetrating Radar dinilai cukup efektif untuk menilai rembesan bendungan dengan mendeteksi kegagalan internal, stratifikasi, anomali, dan pola kandungan air pada bendungan yang pernah ditimbun dengan tanah. Penelitian serupa juga telah dilakukan dalam evaluasi bendungan. Evaluasi geofisik telah dilakukan pada bendungan urugan tanah dengan mengevaluasi struktur dalam bendungan lama di Czech Republic (Zumr et al., 2018). Geoelektrik ADMT dan Ground Penetrating Radar ditinjau untuk memantau rembesan di sekitar bendungan, yang sangat penting untuk mencegah kegagalan dan memastikan stabilitas dengan menilai jalur rembesan dan potensi risikonya (Kayode et al., 2018). Penelitian lain yang dilakukan adalah pengukuran geofisika yang dilakukan di sekitar bendungan air/waduk air yang memasok air minum ke kota Bielsko-Biala, yang dilakukan untuk mendeteksi patahan, zona rekahan, dan area yang dipenuhi dengan breksi secara non-invasif, yang dikenali dengan metode Ground Penetrating Radar (Gołębiowski et al., 2021).

Dalam beberapa waktu terakhir, Dam Ranu Klakah ditengarai mengalami kebocoran pada bagian hilir yang menunjukkan terjadinya retak yang terjadi pada tubuh bendung. Retakan tersebut bisa disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya faktor geoteknik, struktur,

maupun hidrolis bangunan air. Sekitar 4 (empat) desa (Desa Tegalrandu, Ranupakis, Klakah, dan Kebonan) di Kecamatan Klakah berpotensi mengalami banjir akibat luapan air Ranu Klakah yang merupakan danau terluas dan terbesar di lereng Gunung Lemongan. Selain itu, jembatan yang menjadi akses utama masyarakat Desa Tegalrandu terancam putus dan berdampak besar pada sektor pariwisata dan mata pencaharian warga yang bergantung pada kelestarian danau tersebut. Sejauh ini, belum pernah dilakukan analisa rembesan berkaitan dengan kebocoran yang terjadi pada tubuh Dam Ranu Klakah ini, sehingga studi ini penting untuk dilakukan untuk penyelesaian permasalahan tersebut di atas.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan besarnya rembesan yang terjadi akibat piping pada Dam Ranu Klakah serta memastikan posisinya secara tepat melalui analisa geofisika. Pola aliran dan besarnya rembesan dianalisa ketika kondisi muka air setinggi 5 m, menggunakan *software Geostudio SEEP/W*. Besarnya rembesan akan dibandingkan dengan syarat batas aman sebesar 1% dari debit sungai untuk bisa diberikan justifikasi terkait keamanan dari rembesan yang terjadi. Dari kondisi yang ada saat ini, diharapkan besarnya rembesan masih berada pada batas aman, dan lokasi terjadinya rembesan dapat diketahui secara pasti.

## **BAHAN DAN METODE**

Dam Ranu Klakah terletak di Desa Tegalrandu, Kecamatan Klakah, Kabupaten Lumajang, secara geografis terletak antara  $7^{\circ}59'10.79''\text{LS}$  dan  $113^{\circ}16'6.56''\text{BT}$ . Lokasi studi ini dapat dilihat pada **Gambar 1**. Secara umum kondisi topografi lokasi studi berada pada ketinggian/elevasi + 256 m (data GPS) atau + 236 m (data *Google Earth*) di atas permukaan air laut, di mana Ranu Klakah merupakan salah satu danau alami yang terbentuk dari letusan Gunung Lemongan. Ranu Klakah merupakan danau di lereng Gunung Lemongan yang memiliki luas perairan sekitar 22 Ha dengan kedalaman mencapai 28 m dan mampu mengairi persawahan hingga 620 Ha. Kondisi danau yang masih alami menjadikannya sebagai tempat budidaya ikan dengan KJA (keramba jaring apung) oleh masyarakat sekitar dan juga sebagai daerah pariwisata.



**Gambar 1** Lokasi Dam Ranu Klakah Kabupaten Lumajang Jawa Timur

Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data survei berupa hasil dari aplikasi alat Geolistrik ADMT dan *Ground Penetrating Radar* (GPR), yang dilakukan dengan *scanning* bagian atas tubuh bendung di sekitar daerah yang mengalami rembesan. Data material bendungan dan lapisan tanah bawah bendungan digunakan untuk menghitung nilai permeabilitas ( $k$ ) sebagai salah satu parameter dalam analisa rembesan.

Analisa rembesan itu sendiri dilakukan dengan bantuan *software Geostudio SEEP/W*. Permodelan bendung dilakukan pada kondisi muka air setinggi 5 m, sesuai dengan data tinggi muka air tertinggi. Luaran dari analisa *rembesan* adalah debit filtrasi dan nilai gradien hidraulik. Untuk dapat dikatakan aman terhadap bahaya *piping*, rembesan yang terjadi harus kurang dari 1% debit rata-rata sungai dan faktor keamanan *piping* yang terjadi yaitu harus kurang dari 4 (US Army Corps of Engineers, 1995).

Dalam studi ini, dilakukan analisa numerik untuk mendapatkan besarnya rembesan yang terjadi pada tubuh bendung, dengan bantuan *Geostudio Seep/W*. Analisa geofisika dilakukan dengan mengaplikasikan alat Geolistrik ADMT dan *Ground Penetrating Radar* (GPR) melalui *scanning* pada bagian atas tubuh bendung untuk menunjukkan visualisasi dari lokasi dari titik rembesan dan kedalaman rembesan yang terjadi.

Lapisan tanah pada bendung memiliki nilai permeabilitas yang berbeda-beda, semakin kecil ukuran partikel tanah maka semakin rendah koefisien permeabilitas ( $k$ ) atau kelulusan airnya. Kriteria permeabilitas tanah dapat dilihat pada (**Tabel 1**). Dari nilai permeabilitasnantinya akan diketahui besar debit rembesan yang terjadi pada bendung. Standar yang diizinkan untuk terjadinya rembesan pada bendungan yaitu Jumlah air rembesan dari waduk yang melewati pondasi dan badan bendungan tidak boleh lebih dari 0,05% dari kapasitas air waduk dan jumlah air rembesan yang melewati pondasi dan badan bendungan juga tidak boleh lebih dari 1% dari debit sungai rata-rata yang masuk ke waduk (Kementerian PUPR, 2017).

**Tabel 1** Permeabilitas Tanah

Jenis tanah	Permeabilitas
Kerikil	$> 1$ cm/s
Pasir campur kerikil	$10^{-2} - 1$ cm/s
Pasir halus, lanau, dan lanau lempung	$10^{-5} - 10^{-7}$ cm/s
Lempung dan lanau lempung	$< 10^{-5}$ cm/s

Dalam menentukan rembesan pola rembesan dapat diketahui melalui garis aliran dan garis ekipotensial. Garis aliran merupakan garis yang disebabkan oleh aliran rembesan, sedangkan garis ekipotensial merupakan garis yang emnghubungkan titik tinggi potensial yang sama. Kedua garis ini akan membentuk suatu bidang yang disebut *flownet* dapat dilihat pada (**Gambar 2**). Perhitungan rembesan menggunakan persamaan Darcy sebagai berikut:

$$Q = k \cdot i \cdot A \tag{1}$$

dengan  $Q$  = Volume air ( $m^3/dt$ ),  $k$  = koefisien permeabilitasi,  $i$  = gradien hidraulik,  $A$  = luas penampang yang dilewati.

Jika pembagi garis potensial adalah  $N_d$ , maka:

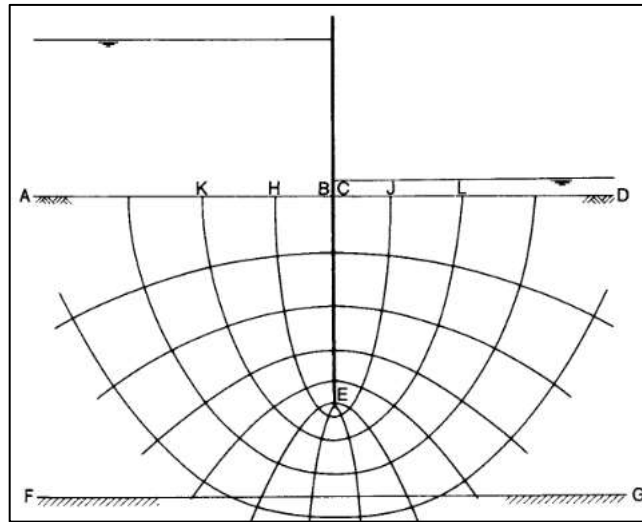
$$\Delta h = \frac{h}{N_d} \tag{2}$$

Jika pembagi garis aliran adalah  $N_f$ , maka:

$$\Delta q = \frac{q}{N_f} \quad (3)$$

Sehingga debit rembesan dari persamaan di atas yaitu:

$$q = \frac{N_f}{N_d} k \cdot h \quad (4)$$



Gambar 2 Garis Flownet (RFCraig, 2004)

Untuk mendapatkan debit rembesan ( $Q$ ) yaitu dengan dikalikan panjang profil memanjang dari bendungan tersebut:

$$Q = q \cdot L \quad (5)$$

dengan  $Q$  = debit rembesan ( $m^3/dt$ ),  $q$  = kapasitas rembesan ( $m^3/dt/m$ ),  $N_f$  = angka pembagi garis aliran,  $N_d$  = angka pembagi garis ekuipotensial,  $k$  = koefisien filtrasi ( $m/dt$ ),  $H$  = tinggi muka air ( $m$ ),  $L$  = Panjang profil memanjang bendungan ( $m$ ).

Rembesan yang terjadi dapat menyebabkan *piping*, nilai keamanan terhadap *piping* yang terjadi harus  $> 4$  (Kementerian PUPR, 2017), dengan persamaan sebagai berikut:

$$FK_{\text{piping}} = \frac{i_c}{i_e} \quad (6)$$

$$i_c = \frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (7)$$

Dengan  $i_c$  = gradien keluaran kritis (tanpa dimensi),  $i_e$  = gradien keluaran dari hasil analisis rembesan atau pembacaan instrumen pizometer (tanpa dimensi),  $\gamma$  = berat isi efektif (terendam) ( $t/m^3$ ),  $\gamma_w$  = berat isi air ( $t/m^3$ ),  $G_s$  = *specific gravity*,  $e$  = angka pori.

### ***Analisa rembesan dengan aplikasi Geostudio SEEP/W***

Analisa rembesan yang dilakukan pada *steady state* dengan kondisi muka air setinggi 5 m. Perhitungan rembesan pada aplikasi berdasarkan hukum *Darcy*. *Output* yang dapat ditampilkan dalam aplikasi ini yaitu kecepatan rembesan, nilai *pore water pressure*, *pressure head*, *flownet*, gradien hidrolik, dan debit rembesan (Correa et al., 2020).

Terdapat dua tipe permodelan material pada aplikasi yaitu *Saturated/Unsaturated* dan *Saturated Only*. Pengaruh deformasi geser  $\Delta_s$  dapat diperoleh dari persamaan:

$$\Delta_s = \frac{f_s VL}{GA} \quad (8)$$

dengan  $f_s$  = faktor bentuk untuk geser,  $V$  = gaya geser,  $G$  = modulus geser, dan  $A$  = luas tampang.

Teknik Geolistrik ADMT (*Automatic Data Measurement Technology*) digunakan untuk investigasi bawah permukaan tanah dengan interpretasi data. Dalam studi ini, Geolistrik ADMT diaplikasikan untuk mengetahui adanya rembesan yang melalui tubuh bendung sebagai salah satu indikasi adanya kebocoran. Perangkat ini digunakan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan berdasarkan konduktivitas listriknya, menentukan ketebalan dan kedalaman masing-masing lapisan, mendeteksi keberadaan dan kedalaman air tanah berdasarkan resistivitasnya (Kearey et al., 2002). Peralatan dan perangkat lunak yang telah dikembangkan sejauh ini, di daerah-daerah dengan kompleksitas geologi bawah permukaan yang sederhana dengan struktur 2 dimensi, mendapatkan perkiraan yang baik untuk penampang geolistrik yang sebenarnya hingga kedalaman antara 100 dan 200 m (Griffiths & Barker, 1993). Penggunaan perangkat Geolistrik ADMT dilakukan dengan mengacu pada ASTM D6431-99 (*Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation*, 2018).

Alat geolistrik ADMT bekerja dengan mengalirkan arus listrik berfrekuensi rendah melalui elektroda non-invasif ke dalam tanah. Arus listrik yang mengalir melalui lapisan material bawah permukaan akan memberikan perbedaan tegangan di antara elektroda, yang kemudian diukur dengan menginjeksikan arus melalui elektroda dan merekam pengukuran tegangan. Metode geolistrik ADMT digunakan untuk mengetahui karakterisasi akuifer (keberadaan air tanah) karena mampu mengidentifikasi resistivitas dan komposisi bawah permukaan secara akurat (Kearey et al., 2002).

Ground Penetrating Radar (GPR) adalah teknik geofisika non-invasif yang mendeteksi diskontinuitas listrik di bawah permukaan dangkal dengan menggunakan pulsa diskrit energi elektromagnetik frekuensi tinggi. Teknik ini telah digunakan secara luas dalam studi sedimentologi untuk merekonstruksi lingkungan pengendapan di masa lalu, membantu penyelidikan hidrogeologi yang memerlukan pendekatan yang berbeda-beda dalam memproses data radar dan teknik interpretasi (Neal, 2004).

Penggunaan perangkat GPR dilakukan dengan mengacu pada ASTM D6432-11, *Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation*, yang merangkum peralatan, prosedur lapangan, dan metode pemrosesan data yang digunakan untuk menginterpretasikan kondisi geologi, serta untuk mengidentifikasi dan memberikan lokasi anomali geologi dan objek buatan manusia dengan metode GPR. GPR menggunakan gelombang EM berdenyut frekuensi tinggi (dari 10 hingga 3000 MHz) untuk memperoleh informasi bawah permukaan. Energi disebarkan ke bawah ke dalam tanah

dari antenna pemancar dan dipantulkan kembali ke antenna penerima dari batas bawah permukaan antara media yang memiliki sifat EM yang berbeda. Sinyal yang dipantulkan direkam untuk menghasilkan pemindaian atau jejak data radar. Biasanya, pemindaian yang diperoleh saat antenna digerakkan di atas permukaan tanah ditempatkan berdampingan untuk menghasilkan profil radar (ASTM D6432-11, Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, 2020).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### *Analisa rembesan dengan aplikasi Geostudio SEEP/W*

Sebelum Analisa numerik dilakukan, dilakukan survei lapangan untuk mendapatkan data debit Sungai dan debit rembesan yang terjadi pada tubuh Dam Ranu Klakah. Dari hasil pengukuran. Dari hasil pengukuran di lokasi studi, didapatkan hasil debit sungai sebesar 13,05 m<sup>3</sup>/dt dan debit pengukuran rembesan sebesar 0,0000828 m<sup>3</sup>/dt dengan kecepatan rata-rata aliran sungai 0,631 m/dt.

Section yang dianalisa yaitu pada *section non overflow* dengan kondisi muka air setinggi 5 m di muka bendung. Lapisan tanah pada pondasi batulempung dengan nilai permeabilitas berbeda serta parameter lainnya dapat dilihat pada (**Tabel 2**) input parameter *software Geostudio*.

**Tabel 2** Input Parameter *Software Geostudio*

Zona	Karakteristik bahan	Permeabilitas (k) (m/dt)
1 Tanah Pasir	Clay	0,005
2 Tanah Lempung	Sand	1x10 <sup>-8</sup>
3 Tubuh Bendungan	Concrete	1,2x10 <sup>-12</sup>

Sesuai dari Pedoman Grouting Untuk Bendungan Tahun 2005 diketahui nilai kapasitas debit rembesan yang terjadi pada pondasi dan tubuh bendungan harus 1% rata-rata debit sungai sehingga diketahui sebagai berikut (Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, 2005):

Q sungai rata-rata (Q<sub>80%</sub>) yaitu 13,050 m<sup>3</sup>/dt dan 1% dari Q sungai rata-rata 1% x Q<sub>sungai</sub> rata-rata didapatkan 1% x 13,050 = 0,131 m<sup>3</sup>/dt, dapat dilihat pada (**Gambar 3**).

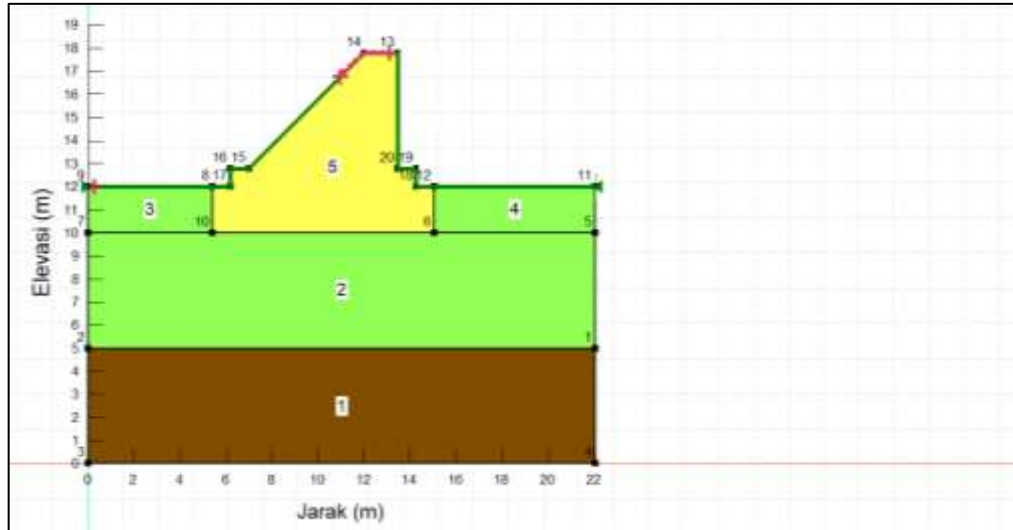
### *Analisa rembesan dengan aplikasi Geostudio SEEP/W*

Dari analisa yang telah dilakukan diketahui tinggi total tekan pada area pondasi dan bendungan yaitu antara 0 - 5 m ditunjukkan pada (**Gambar 4**).

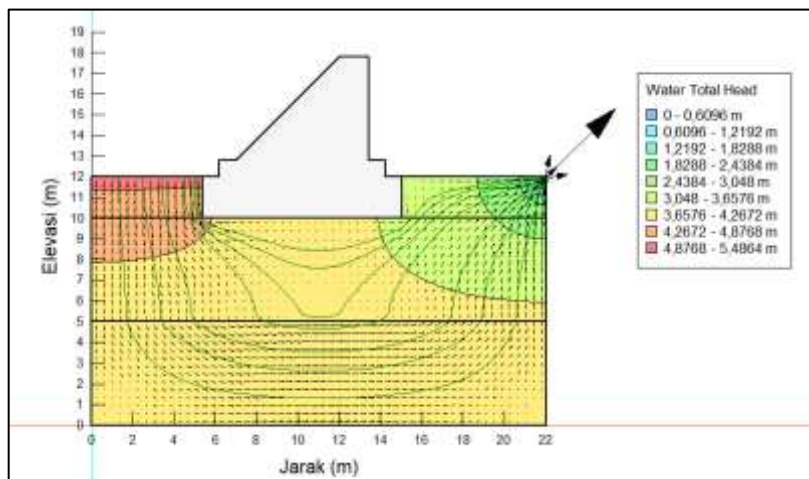
Adanya garis ekipotensial dan garis aliran pada hasil analisa menunjukkan adanya pergerakan aliran air dari hulu menuju hilir, hal ini juga sesuai dengan arah rembesannya. Perbedaan warna yang terjadi pada analisa secara umum merupakan indikasi bahwa terjadi perbedaan tegangan yang diterima pada setiap area tersebut, dimana pada bagian hulu menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian hilir.

Secara umum pada analisa *Geostudio SEEP/W* memiliki konsep yaitu warna merah menunjukkan bagian yang mengalami tegangan yang paling besar, sedangkan untuk warna biru menunjukkan bagian yang mengalami tegangan yang paling kecil.





Gambar 3 Section Non Overflow Dam Ranu Klakah



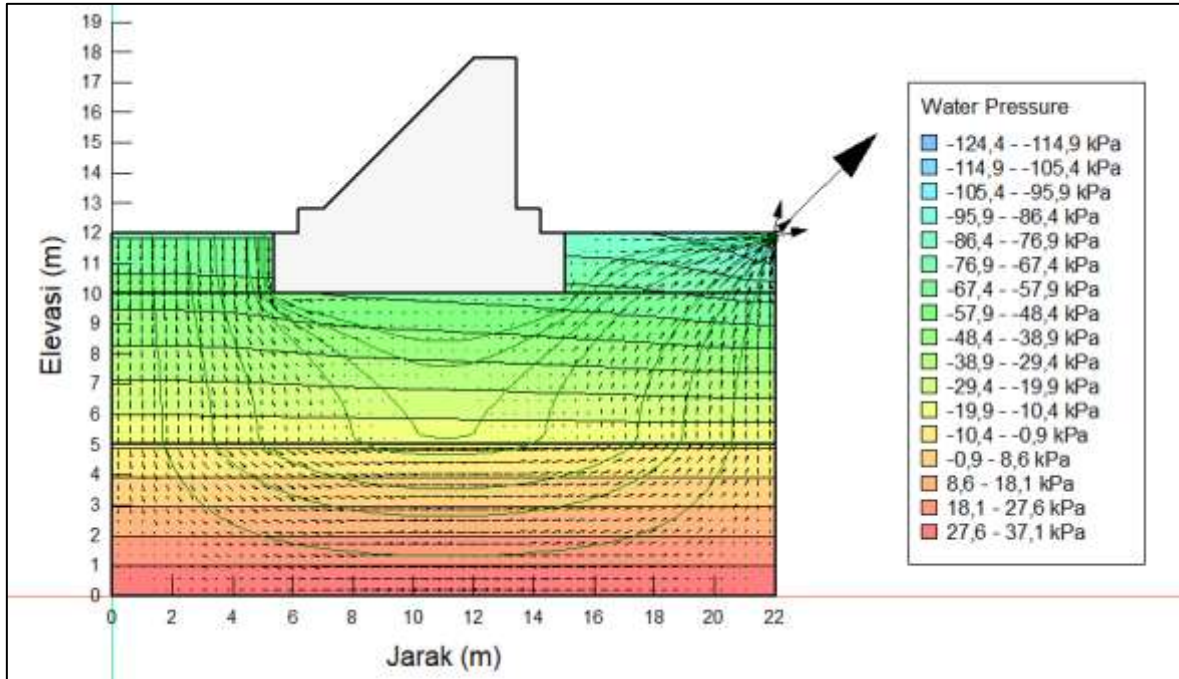
Gambar 4 Tinggi Tekan Total (Total Head) Dam Ranu Klakah

Tekanan air pori pada bawah pondasi bendung yang terjadi dapat dilihat pada **Gambar 5**, dengan kisaran tekanan air yaitu antara 0 – 38 kPa yang berarti air menekan ke tubuh bendungan dan tanah.

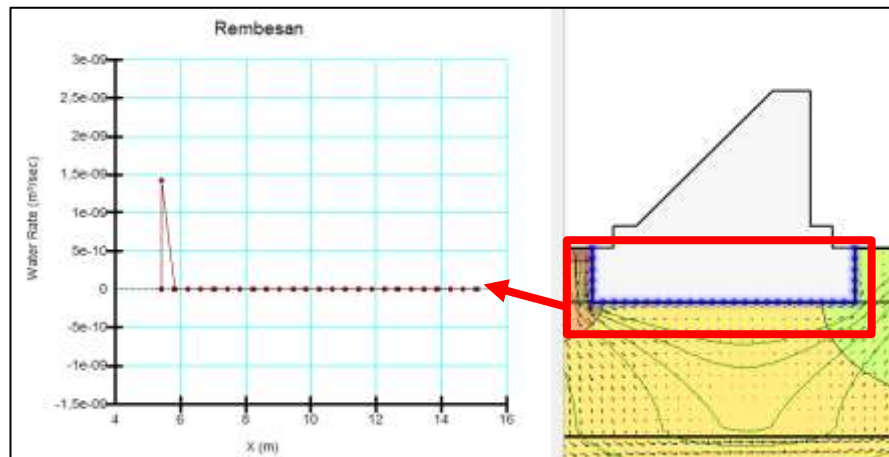
Bagian pondasi pada *Software Geostudio SEEP/W* dianggap sebagai material *impermeable* karena nilai permeabilitas yang dimiliki rendah, dapat dibuktikan pada (**Gambar 6**) di mana dalam grafik menunjukkan nilai rembesan mengarah ke nilai 0 artinya tidak terjadi rembesan.

Untuk melakukan kontrol terhadap rembesan, maka nilai debit filtrasi dikalikan dengan panjang bendungan untuk menyamakan satuan dan mendapatkan nilai yang sesuai dengan debit rembesan yang diizinkan. Dari hasil diatas, dapat diketahui bahwa rembesan yang terjadi pada lapisan bawah pondasi memiliki nilai yang diizinkan, artinya bendungan aman terhadap rembesan yang terjadi (**Tabel 3**).





**Gambar 5** Tekanan air pori (*Pore water pressure*) pada Dam Ranu Klakah



**Gambar 6** Rembesan pada Tubuh Bendungan

**Tabel 3** Debit Rembesan Dam Ranu Klakah

Kondisi muka air	Debit filtrasi (q) (m <sup>3</sup> /dt/m)	Panjang Bendungan (m)	Q <sub>rembesan</sub> (m <sup>3</sup> /dt)	Q <sub>izin</sub> (m <sup>3</sup> /dt)	Keterangan
Muka air setinggi 5 m	1,42 x 10 <sup>-9</sup>	7,95	1,13 x 10 <sup>-8</sup>	0,131	<b>Aman</b>
Muka air setinggi 5 m	1,42 x 10 <sup>-9</sup>	30,77	4,38 x 10 <sup>-8</sup>	0,131	<b>Aman</b>

**Keamanan Terhadap Piping**

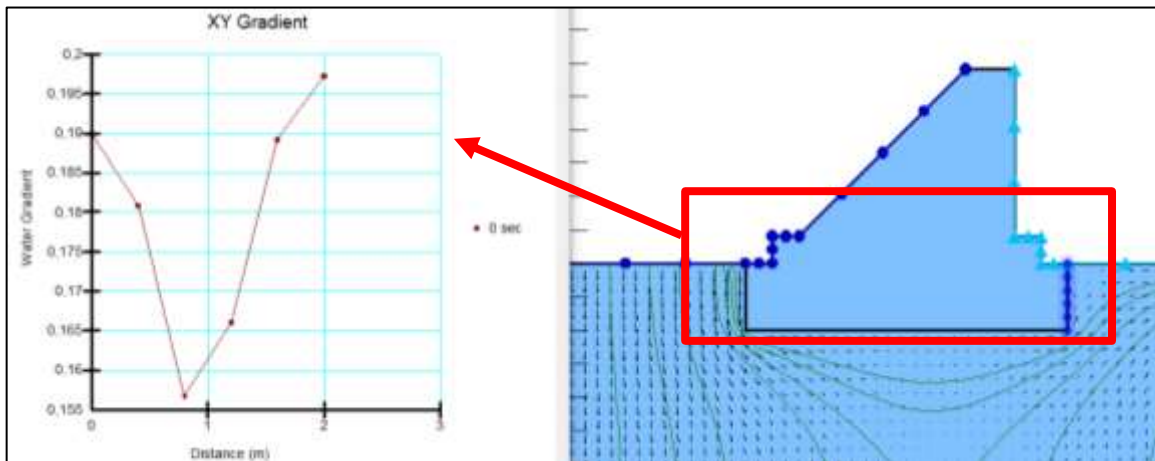
Dari hasil running aplikasi Geostudio SEEP/W juga mendapatkan nilai gradien hidrolik. Pemeriksaan terhadap *piping* dilakukan dengan melihat nilai dari gradien maksimum yang keluar dari analisa *Geostudio SEEP/W* (**Gambar 7**).

Karakteristik batuan tanah lempung, *Specific gravity* ( $G_s$ ) = 2,65, nilai  $e$  didapatkan 0,6, nilai  $i_{cr}$  didapatkan  $\frac{G_s-1}{1+e} = \frac{2,58-1}{1+0,6} = 0.987$ , di mana dari gradien hidraulik hasil analisa dengan *software Geostudio SEEP/W* dapat diketahui nilai yang maksimal (**Tabel 4**).

Pada kondisi muka air normal dan muka air banjir tanpa dinding diafragma didapatkan nilai *piping* dengan kondisi muka air setinggi 5 m, maksimum gradien hidraulik yang keluar nilai  $i = 0,197$ , faktor keamanan *piping*,  $i_{cr}/i = 0,987/0,197$  menghasilkan  $5,01 > 4$  dinyatakan aman terhadap *piping*.

**Tabel 4** Gradien Hidraulik Bendungan

Distance (m)	Water Gradient
0,00	0,190
0,40	0,181
0,80	0,157
1,20	0,166
1,60	0,189
2,00	0,197
maksimal	0,197

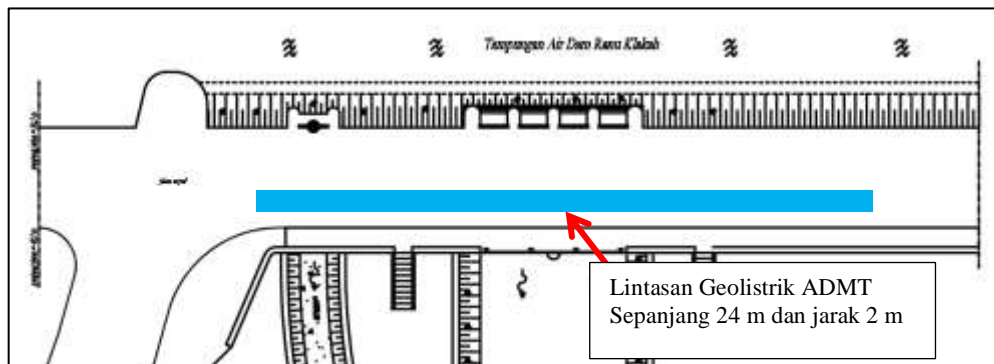


**Gambar 7** Gradien Hidraulik Dam Ranu Klakah

**Pengukuran Hasil Geolistrik ADMT**

Pengukuran Geolistrik ADMT dan Ground Penetration Radar dilakukan untuk mendapatkan visualisasi yang menjelaskan posisi dan kedalaman dari titik rembesan yang terjadi pada tubuh Dam Ranu Klakah. Pengukuran Geolistrik ADMT dilaksanakan di atas bangunan Dam Ranu Klakah di sepanjang jalan dengan lintasan sepanjang 24 m (titik 0 meter di sisi

kanan bangunan pintu pembilas). Teknis kegiatan pengukuran dengan alat Geolistrik ADMT yaitu yang pertama penentuan lintasan untuk mendeteksi zona rembesan di sisi jalan kanan hilir Dam Ranu Klakah, yang kedua melakukan pengukuran pajang lintasan sisi utara mendapatkan panjang 24 m, yang ketiga penentuan jarak spasi pengukuran yang diukur 2 m dapat dilihat pada (**Gambar 8**), yang keempat pembacaan hasil Geolistrik ADMT gradasi warna dari pengukuran menggambarkan kondisi di bawah permukaan bangunan dapat dilihat pada (**Gambar 9**).



**Gambar 8** Ilustrasi Pengukuran Geolistrik ADMT

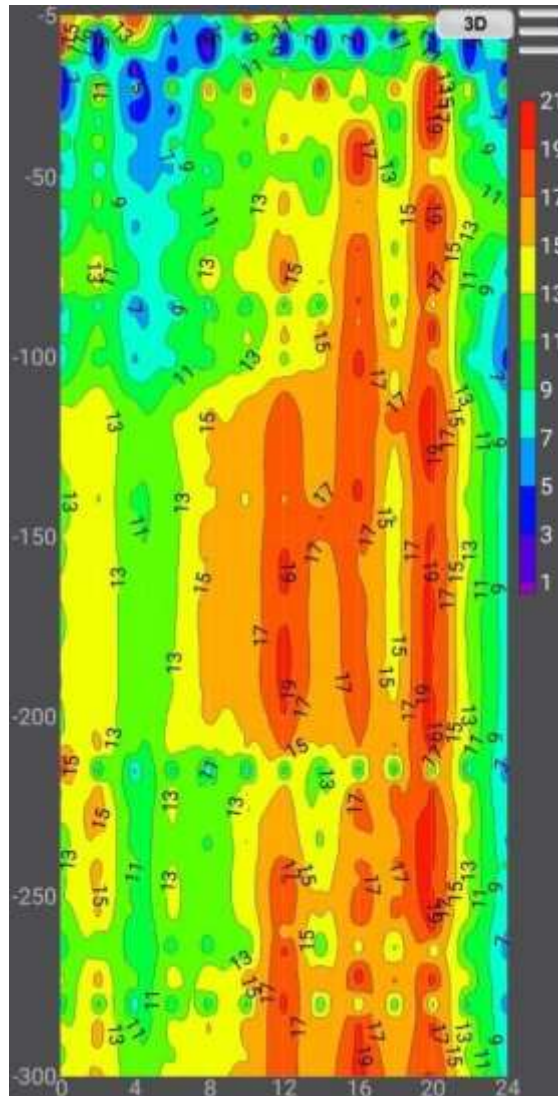
Dari hasil pengukuran geolistrik ADMT dapat digambarkan kondisi bawah permukaan sepanjang bangunan DAM Ranu Klakah hingga kedalaman 300 meter.

- Pada jarak 6 – 8 m berwarna biru yang menunjukkan adanya anomali sebagai titik rembesan air.
- Warna biru tersebut menerus secara vertikal hingga kedalaman 50 meter. Letak setiap pintu dapat dibuktikan dengan warna biru tetapi tidak menerus dari permukaan.

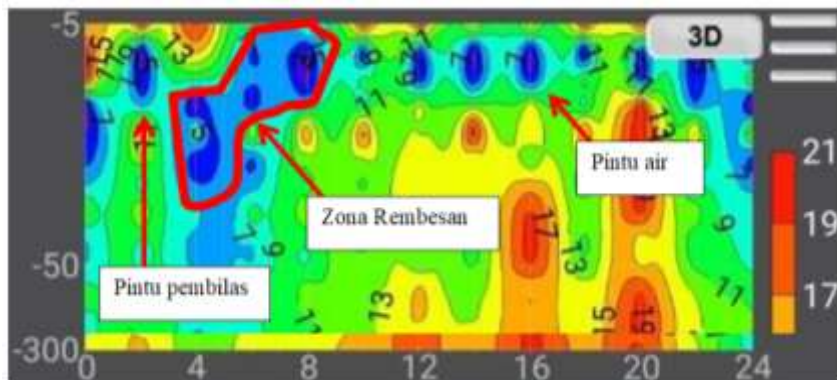
Zona rembesan hasil pengukuran Geolistrik ADMT terletak pada bangunan pilar penyekat antara pintu pembilas dengan pintu air sisi paling kanan dengan estimasi jarak 6 – 8 m dari titik nol pengukuran, dapat dilihat pada (**Gambar 10**).

### **Ground Penetrating Radar (GPR)**

Spesifikasi yang digunakan pengukuran zona rembesan Dam Ranu Klakah yaitu memakai antenna AB-90 OKO dengan frekuensi 90 MHz dan daya 8 Watt, memiliki kedalaman sounding 16 – 18 m (bisa dipaksa sampai 30 m namun terdapat *noise*), serta resolusi alat 0,5 m (ukuran benda minimal yang dideteksi) dengan dimensi alat (P×L×T) 2270 × 1075 × 350 mm. Pengukuran zona rembesan bangunan DAM Ranu Klakah menggunakan GPR (Ground Penetrating Radar) dapat dilihat pada (**Gambar 11**).



**Gambar 9** Hasil Pengukuran Geolistrik ADMT



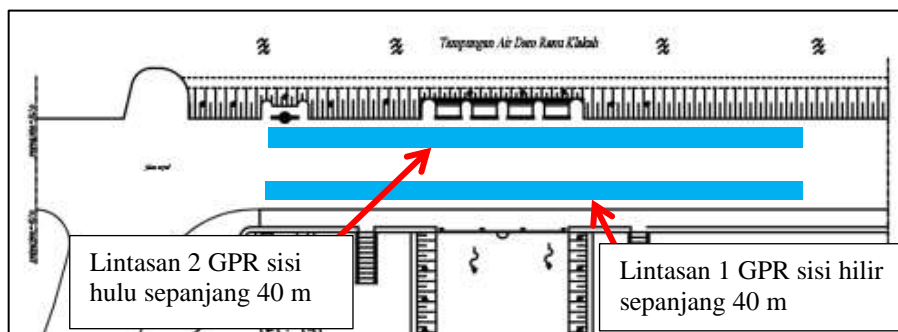
**Gambar 10** Zona rembesan hasil Geolistrik ADMT





**Gambar 11** Perakitan Alat GPR dan pengukuran Zona Rembesan Dam Ranu Klakah

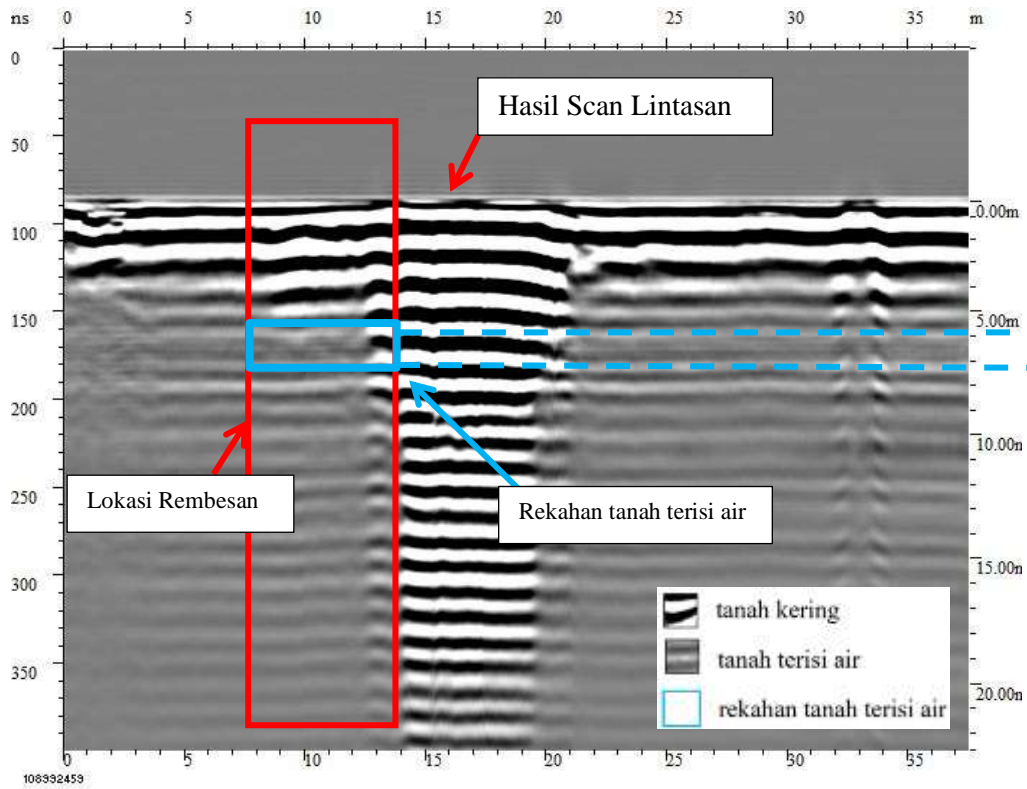
Lintasan pertama membentang dari utara ke selatan sepanjang 40 m sisi hilir bangunan Dam Ranu Klakah, lintasan kedua membentang dari utara ke selatan 40 m sisi hulu bangunan Dam Ranu Klakah, bisa dilihat pada (**Gambar 12**).



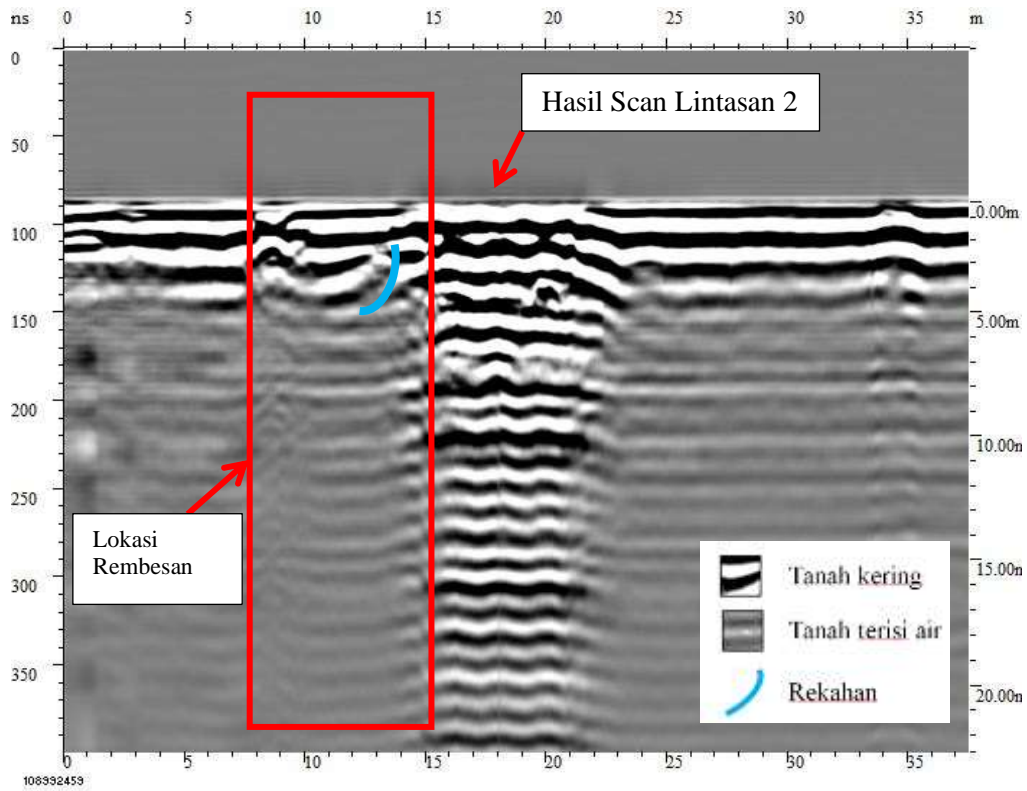
**Gambar 12** Layout Lintasan alat *Ground Penetrating Radar*

Secara keseluruhan pada (**Gambar 13**) merupakan hasil scan alat *Ground Penetrating Radar* untuk lintasan 1, dengan penjelasan 0 – 5 m dari permukaan tanah berupa tanah kering, 5 – 23 m tanah yang terisi air, 6 – 7 m pola radargram tidak mulus, hal ini dapat diartikan terdapat diskontinuitas tanah yang bisa diinterpretasikan sebagai rekahan tanah terisi air karena posisi berada di bawah batas muka air maka posisi rekahan bisa kurang dari 6 m.

Dari hasil scan lintasan 2 menggunakan alat *Ground Penetrating Radar* hasil scan lintasan 2 sama seperti lintasan 1 yang terbagi menjadi 2 (dua) domain, yaitu domain tanah kering dan domain tanah berisi air. Perbatasan antara bagian tanah kering dan basah menunjukkan adanya diskontinuitas pada pola radargram yang diinterpretasikan sebagai rekahan. Bentuk rekahan diestimasi sedikit melengkung memanjang sampai 4,5 – 5 m. Rekahan bagian hulu bisa ditemukan pada kedalaman 2 – 3 m berjarak  $\pm 1,7 - 2$  m dari dinding pintu air, dapat dilihat pada (**Gambar 14**).



Gambar 13 Hasil Scan Alat GPR Lintasan 1



Gambar 14 Hasil Scan Alat GPR Lintasan 2

Kesimpulan dari analisa dengan alat GPR yaitu untuk mengetahui area potensi rembesan pada kedalaman 2 – 3 m berjarak  $\pm 1,7 - 2$  m dari dinding pintu air, yang disebabkan oleh rekahan pada struktur bangunan ataupun lapisan tanah yang tersedia.

Hasil yang didapatkan pada analisa numerik, diverifikasi dengan hasil pengukuran di lapangan. Dari hasil analisa, diketahui bahwa rembesan yang terjadi dalam pengukuran lapangan adalah lebih besar dari hasil debit rembesan dalam perhitungan, yang merupakan kondisi ideal suatu bendung. Hal ini menunjukkan terjadinya rembesan pada tubuh Dam Ranu Klakah. Akan tetapi keduanya menunjukkan nilai debit yang lebih kecil dari 1% debit sungai yakni sebesar  $0,1305 \text{ m}^3/\text{dt}$  sebagai syarat keamanan terhadap rembesan, sehingga dapat disimpulkan bahwa rembesan yang terjadi pada Dam Ranu Klakah masih dalam batas aman.

Hasil pengukuran dengan perangkat Geolistrik ADMT dan Ground Penetrating Radar (GPR) menunjukkan adanya kesesuaian dengan hasil yang telah dilakukan pada perbandingan pengukuran debit rembesan di lapangan dan perhitungan numeriknya, di mana dapat dibuktikan adanya rembesan pada Dam Ranu Klakah. Letak titik rembesan secara jelas ditunjukkan pada kedua hasil perangkat tersebut, di mananya keduanya menunjukkan lokasi yang sama terkait posisi titik rembesan pada tubuh Dam Ranu Klakah.

Salah satu keterbatasan dari hasil penelitian ini adalah terbatasnya data terkait bendung eksisting yang merupakan bendung lama, seperti tidak adanya gambar teknis dan data terdahulu terkait tubuh bendung. Hal ini menyebabkan data masukan merupakan asumsi berdasarkan pengukuran struktur bendung dan pengukuran debit di lapangan. Ketersediaan gambar teknis akan dapat memberikan Gambaran yang jelas dan sesuai dalam perbandingan hasil perhitungan.

## **KESIMPULAN**

Penelitian ini ditujukan untuk menentukan besarnya rembesan yang terjadi akibat piping pada Dam Ranu Klakah secara numerik dengan bantuan aplikasi Geostudio SEEP/W serta memastikan posisinya secara tepat melalui analisis geofisika dengan menggunakan perangkat Geolistrik ADMT dan Ground Penetrating Radar (GPR).

Berdasarkan hasil analisis numerik, debit rembesan yang terjadi pada tubuh bendung untuk kondisi muka air setinggi 5 m dan hasil pengukuran debit di lapangan menunjukkan debit rembesan yang nilainya lebih kecil dari 1% debit sungai yaitu  $0,131 \text{ m}^3/\text{dt}$ , yang menunjukkan bahwa bendung aman terhadap rembesan. Meski demikian, diketahui bahwa besarnya debit rembesan dari pengukuran lebih besar dari debit rembesan hasil Analisa numerik yang merupakan kondisi ideal bendung, sehingga disimpulkan bahwa terjadi rembesan pada tubuh Dam Ranu Klakah.

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dengan alat Geolistrik ADMT estimasi zona rembesan terletak pada bangunan pilar penyekat antara pintu pembilas dengan pintu air sisi paling kanan dengan estimasi kedalaman 6 – 8 m dari lantai kendaraan pada jembatan di atas bendung dan pada jarak  $\pm 2$  m dari pintu air. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dengan alat GPR (*ground penetrating radar*) menunjukkan estimasi zona rembesan pada sisi kiri jalan pada kedalaman 6 – 7 m terdapat rekahan tanah terisi air, dan pada posisi  $\pm 1,7 - 2$  m dari dinding pintu air, kedalaman 2 – 3 m. Kedua hasil visualisasi ini menunjukkan hasil yang sama terkait posisi rembesan yang terjadi pada badan bendung.



Dari hasil di atas, dengan adanya rembesan pada tubuh bendung, perbaikan perlu dilakukan untuk menghindari perluasan dari lebar lubang rembesan yang ada. Pemasangan *sheetpile* pada muka bendung atau injeksi mortar beton pada tubuh bendung bisa menjadi alternatif penyelesaian yang perlu dikaji lebih lanjut efektivitasnya dalam studi pengembangan penelitian ini.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Alvianto, H. G., Runi Asmaranto, & Andre Primantyo H. (2024). Analisa Stabilitas Bendung Penggung Kecamatan Wonosegoro Kabupaten Boyolali. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 4(1), 1129–1139. <https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2024.004.01.095>
- Arisanto, P. (2020). Perbaikan Rembesan dengan Dinding Halang pada Tubuh Bendungan. *Jurnal CIVILLA*, 5(1).
- ASTM D6431-99, Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation (2018).
- ASTM D6432-11, Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation (2020).
- Astuti, Y., Masrevaniah, A., & Marsudi, S. (2012). Analisa Rembesan Bendungan Bajulmati terhadap Bahaya Piping untuk Perencanaan Perbaikan Pondasi. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 3(1).
- Correa, E., Patrick, S., & Bochnak, L. (2020). *Design of RCC gravity dam and FEM modelling in GeoStudio-Longtan dam*.
- Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. (2005). *Pedoman Gouting Untuk Bendungan*.
- Fauzi, D. A., Marsudi, S., & Cahya, E. N. (2023). Analisa Rembesan Terhadap Terjadinya Piping pada Bendungan Cijurey Kabupaten Bogor Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 3(2).
- Gołębowski, T., Piwakowski, B., Ćwiklik, M., & Bojarski, A. (2021). Application of Combined Geophysical Methods for the Examination of a Water Dam Subsoil. *Water*, 13(21), 2981. <https://doi.org/10.3390/w13212981>
- Griffiths, D. H., & Barker, R. D. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29(3), 211–226. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(93\)90005-J](https://doi.org/10.1016/0926-9851(93)90005-J)
- Kayode, O. T., Odukoya, A. M., Adagunodo, T. A., & Adeniji, A. A. (2018). Monitoring of seepages around dams using geophysical methods: a brief review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 173, 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/173/1/012026>
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration* (3rd ed.). Blackwell Science Ltd.
- Kementerian PUPR, B. P. S. D. M. (2017). *38277\_13. Analisa Stabilitas Bendungan - Perhitungan Stabilitas Lereng2 bulak balik OK*.
- Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66(3), 261–330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>
- Putra, R. A. M., Putra, A. D., & Wahono, E. P. (2022). Analisis Rembesan Terhadap Bahaya Piping pada Bendungan Way Sekampung. *Serambi Engineering*, VII(3).
- RFCraig. (2004). *Craig's Soil Mechanics, Seventh edition*.
- US Army Corps of Engineers. (1995). *Gravity Dam Design ENGINEER MANUAL*.

- Wang, Y., Li, C., Zhou, X., & Wei, X. (2017). Seepage piping evolution characteristics in bimsoils-An experimental study. *Water (Switzerland)*, 9(7).  
<https://doi.org/10.3390/w9070458>
- Zumr, D., David, V., Krása, J., & Nedvěd, J. (2018). Geophysical Evaluation of the Inner Structure of a Historical Earth-Filled Dam. *EWaS3 2018*, 664.  
<https://doi.org/10.3390/proceedings2110664>