

ANALISIS REMBESAN PADA BENDUNGAN CENGKLIK MENGGUNAKAN METODE RESISTIVITAS KONFIGURASI SCHLUMBERGER DAN UJI PERMEABILITAS UNTUK MENGHITUNG DEBIT REMBESAN

Fajar Waskito¹⁾, Tony Yulianto¹⁾, Dwiyanto Joko Suprapto²⁾

¹⁾Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

²⁾Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

E-mail : fajarwaskito@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

Resistivity method is one of the geophysical method that used to determine the subsurface structure from the resistivity value. The research uses resistivity method with Schlumberger configuration. The measurement have been done in Cengklik Dam which is located in the Ngargorejo village, Ngemplak districts, Boyolali, Central Java. Cengklik dam is used for irrigation, fish farms and tourism. The conditions of Cengklik dam is awful. There are a lot of cracks on the dam body and a spring appears in the southwest of the dam. So, we assumed that there are seepages on the dam. We get the potential and current value from aquisition and they used to calculate the apparent resistivity. IP2WIN software use to calculate and modeling to get the true resistivity and depth of each layers. Then they used as an input on Progress software to get the 3 dimensional modeling using Rockwork 15 software. The model interpreted with geological information to know the lithology. There is a seepage area on the tuff layer and the discharge seepage obtained by using the Slide 6.0 software. The discharge amount of seepage as $9,4576 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Keywords: resistivity, cracks, springs, seepage, discharge

ABSTRAK

Metode *resistivitas* merupakan salah satu metode geofisika yang dimanfaatkan untuk mengetahui struktur batuan di bawah permukaan bumi dari nilai tahanan jenisnya. Penelitian ini menggunakan metode *resistivitas* dengan konfigurasi *Schlumberger*, pengukuran telah dilakukan di Bendungan Cengklik yang terletak di Desa Margorejo, Kecamatan Ngemplak, Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah. Bendungan Cengklik berfungsi untuk irigasi sawah, tambak ikan dan tempat pariwisata. Namun kondisi Bendungan Cengklik saat ini cukup mengkhawatirkan karena terdapat ratakan-retakan pada tubuh bendungan dan disebelah barat daya bendungan terdapat mata air, sehingga hal tersebut dijadikan indikasi adanya rembesan. Tujuan dilakukan penelitian ini adalah untuk menganalisis lapisan zona rembesan di bendungan tersebut dan menghitung jumlah debit rembesannya. Data hasil pengukuran di lapangan berupa nilai potensial dan arus sehingga dapat digunakan untuk menghitung nilai *resistivitas* semunya. Perhitungan dan pemodelan menggunakan *software IP2WIN* menghasilkan nilai *resistivitas* sebenarnya dan kedalaman setiap lapisan batuan, yang digunakan sebagai nilai masukan pada *software Progress* untuk meperoleh gambaran model 3D dengan menggunakan *software RockWork 15*, hasil model diinterpretasikan lithologi batuannya dengan validasi informasi geologi. Terdapat lapisan zona rembesan pada lapisan tuffa yang jenuh air, dan didapatkan hasil pengukuran debit rembesan dengan menggunakan *software Slide 6.0* sebesar $9,4576 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Kata kunci: *resistivitas*, retakan, mata air, rembesan, debit

PENDAHULUAN

Bendungan adalah konstruksi yang dibangun untuk menahan laju air secara alamiah atau buatan yang nantinya menjadi waduk yang dimaksudkan untuk menyimpan atau menampung air, kemudian air tersebut dimanfaatkan untuk pengairan dan lainnya [10]. Bendungan Cengklik merupakan bendungan peninggalan jaman Belanda yang dibangun di anak Sungai Bengawan Solo

pada tahun 1923-1931, bendungan ini terletak di Desa Margorejo, Kec. Ngemplak, Kab. Boyolali, Jawa Tengah. Bendungan Cengklik dibangun dengan menggunakan konstruksi bendungan tipe urugan tanah homogen, saat ini bendungan mempunyai kapasitas tampungan sebesar 9.773 juta m^3 , dan digunakan sebagai sumber irigasi sawah, tambak ikan dan tempat pariwisata [3].

Kondisi Bendungan Cengklik saat ini sangat mengkhawatirkan, karena mengalami banyak retakan-retakan pada tubuh bendungan. Retakan-retakan pada tubuh bendungan ini diindikasikan sebagai penyebab terjadinya rembesan. Rembesan dapat terjadi karena bangunan tidak dapat menahan beban air, sehingga air tersebut dapat mengalir meresap masuk ke dalam tanah di sekitar bangunan melalui retakan-retakan yang ada. Aliran ini mempunyai pengaruh yang dapat merusak stabilitas bangunan karena terangkatnya bahan - bahan halus sehingga dapat menyebabkan erosi bawah tanah (piping). Jika erosi bawah tanah sudah terjadi, maka terbentuklah lajur rembesan [12].

Di sebelah barat daya bendungan terdapat sebuah mata air, mata air ini memperkuat indikasi adanya rembesan pada bendungan, karena masyarakat sekitar berpendapat bahwa mata air tersebut berasal dari air bendungan. Rembesan tersebut merembes melalui celah-celah batuan dan mengalir sampai mata air. Apabila hal tersebut terus dibiarkan, Bendungan Cengklik bisa saja menjadi kering, ikan-ikan di tambak menjadi mati dan tidak mampu lagi untuk mengairi sawah seluas 1.578 hektar sehingga mempengaruhi perekonomian masyarakat sekitar yang mayoritas adalah petani.

Analisis rembesan pada penelitian ini menggunakan metode resistivitas konfigurasi Schlumberger, dan data bor yang nantinya dilakukan uji tanah untuk menganalisis nilai koefisien permeabilitasnya sehingga dapat diketahui debit rembesannya. Metode resistivitas merupakan salah satu metode geofisika yang memanfaatkan variasi resistivitas yang dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan cairan dalam pori-pori tanah yang sering diasosiasikan sebagai rembesan. Metode resistivitas dilakukan dengan cara menginjeksikan arus ke permukaan bumi kemudian diukur beda potensialnya. Sedangkan dari hasil pengeboran dilakukan pengambilan sample, sample tersebut kemudian dilakukan uji

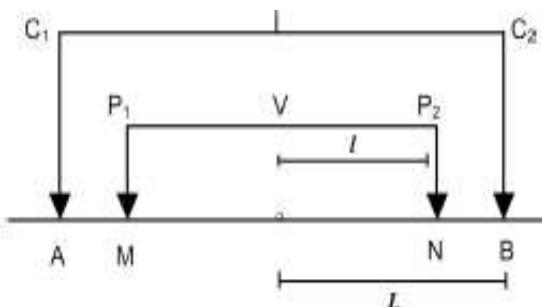
laboratorium dengan metode *Falling Head Permeability Test* untuk menganalisis koefisien permeabilitasnya yang kemudian diolah dan dibuat pemodelan dengan menggunakan Software Slide 6.0, untuk mengetahui nilai debit rembesannya.

DASAR TEORI

Metode Resistivitas

Metode *resistivitas* merupakan salah satu metode geofisika yang mempelajari sifat aliran listrik di dalam bumi dan bagaimana cara mendeteksinya di permukaan bumi. Tujuan dari metode ini adalah untuk memperkirakan sifat kelistrikan medium atau formasi batuan di bawah permukaan [5]. Metode *resistivitas* bekerja dengan pengukuran beda potensial pada titik-titik di permukaan bumi yang diproduksi dengan langsung mengalirkan arus ke bawah permukaan. Hal ini bermanfaat untuk menentukan distribusi *resistivitas* di bawah permukaan dan kemudian digunakan untuk interpretasi material-material yang ada di dalam bumi [8]. Arus dialirkan kedalam bumi melalui dua elektroda arus, dan kemudian respon tersebut diterima oleh dua elektroda potensial.

Konfigurasi Schlumberger



Gambar 1 Posisi elektroda arus dan potensial pada Konfigurasi *Schlumberger*

Aturan konfigurasi *Schlumberger* pertama kali diperkenalkan oleh Conrad Schlumberger, di mana jarak elektroda potensial MN dibuat tetap sedangkan jarak

AB yang diubah-ubah. Tetapi pengaruh keterbatasan kepekaan alat ukur, maka ketika jarak AB diubah pada jarak yang relatif besar maka jarak MN hendaknya diubah pula. Pengukuran ini dilakukan dengan membuat variasi posisi elektroda arus (AB) dan elektroda potensial (MN), seperti pada gambar 1.

Dalam konfigurasi *Schlumberger* ini dapat dihitung nilai resistivitas semu (ρ) menggunakan persamaan (1)

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

dengan ΔV adalah beda potensial listrik, I adalah arus listrik dan K adalah faktor geometri dari konfigurasi elektroda yang digunakan di lapangan. Rumusan faktor geometri dapat dituliskan pada persamaan (2)

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}$$

Keunggulan dari konfigurasi *Schlumberger* adalah kemampuannya dapat mendeteksi adanya non-homogenitas lapisan batuan dan dapat mendeteksi lapisan batuan yang cukup dalam [9].

Aliran Air Tanah

Permeabilitas adalah sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air mengalir melewati rongga pori. Tanah termasuk bahan yang permeabel atau berpori sehingga air dapat mengalir melalui pori-pori tanah tersebut, jadi permeabilitas dilukiskan sebagai sifat tanah yang mengalirkan air melalui rongga pori tanah. Di dalam tanah, sifat aliran mungkin laminar atau turbulen [12].

Tahanan terhadap aliran bergantung pada jenis tanah, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, serta bentuk geometri rongga pori. *Total head* (jumlah total tekanan ketika air mengalir) adalah *elevation head* (tekanan akibat ketinggian air) ditambah dengan *pressure head* (tekanan air akibat batuan berpori) dan ditambah dengan *velocity head* (tekanan akibat kecepatan aliran air).

Untuk mengetahui besar tekanan air pori, Teorema Bernoulli dapat diterapkan. Menurut Bernoulli, *Total Head* pada suatu titik dapat dinyatakan oleh persamaan (3)

$$h = z + \frac{P}{\gamma_w} + \frac{\vec{V}^2}{2g}$$

dengan h adalah *total head* (m), P/γ_w adalah *pressure head* (m), P adalah tekanan air (kN/m^2), γ_w adalah berat volume air (kN/m^3), $\vec{V}^2/2g$ adalah *velocity head* dengan satuan meter, \vec{V} adalah kecepatan air (m/det), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), z adalah *elevation head* (m).

Karena kecepatan rembesan di dalam tanah sangat kecil, oleh karena itu tinggi energi kecepatan ($V^2/2g$) dalam suku persamaan Bernoulli dapat diabaikan:

$$h = z + \frac{P}{\gamma_w}$$

Pergerakan air tanah atau yang biasa disebut dengan aliran air tanah terjadi karena adanya perbedaan tinggi antar dua tempat (Δh) sehingga menyebabkan perbedaan tekanan air. Untuk menghitung kecepatan aliran air yang mengalir dapat menggunakan persamaan yang sederhana yaitu Hukum Darcy. Darcy (1956), mengusulkan hubungan antara kecepatan dan gradient hidrolik ($i = \frac{\Delta h}{L}$) seperti pada persamaan (4)

$$\bar{V} = k \frac{\Delta h}{L}$$

Dengan V adalah kecepatan aliran air (m/s), Δh adalah beda tinggi elevasi (m), L adalah jarak aliran air (m), k adalah koefisien permeabilitas (cm/s). Sedangkan besarnya debit rembesan dapat dinyatakan dalam persamaan (5)

$$q = k i A$$

dengan q adalah debit rembesan (m^3/s), k adalah koefisien permeabilitas (cm/s), i adalah gradien hidrolik, dan A adalah luas penampang (m^2).

Menentukan Koefisien Permeabilitas

Untuk menentukan nilai koefisien permeabilitas (k) dapat dilakukan melalui pengujian laboratorium maupun pengujian di lapangan. Pengujian nilai koefisien permeabilitas (k) di laboratorium dapat menggunakan alat permeameter. Terdapat 2 jenis metode yang biasa digunakan dalam menentukan nilai koefisien permeabilitas (k) di laboratorium, yaitu *Constan Head Test* dan *Falling Head Permeability Test*.

Constan Head Test merupakan metode untuk menentukan nilai koefisien permeabilitas (k) pada tanah yang permeabilitasnya tinggi, yaitu berkisar $k > 10^{-3}$ cm/s. Sedangkan *Falling Head Permeability Test* merupakan metode untuk menentukan nilai koefisien permeabilitas (k) pada tanah yang permeabilitasnya rendah, yaitu berkisar $k < 10^{-3}$ cm/s.

Pengujian tanah di laboratorium menggunakan sample kecil yang diambil di lapangan, yang terkadang tidak dapat mewakili tanah secara keseluruhan. Tanah di lapangan umumnya anisotropis, berlapis-lapis dan tidak homogen. Sehingga untuk proyek dalam skala besar, perlu adanya pengujian nilai koefisien permeabilitas secara langsung di lapangan [11].

Mata Air

Mata air adalah sumber air yang muncul dengan sendirinya ke permukaan bumi dari dalam tanah. Sumber dari aliran airnya berasal dari air tanah yang mengalami patahan sehingga muncul ke permukaan. Aliran ini dapat bersumber dari air tanah dangkal maupun dari air tanah dalam [2].

METODE PENELITIAN

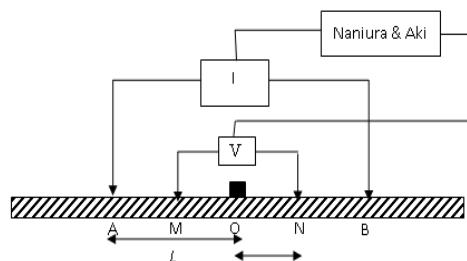
Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada daerah Bendungan Cengklik yang terletak di Desa Ngargorejo, Kecamatan Ngemplak, Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah.

Pengukuran resistivitas dilakukan sebanyak 12 titik, dan pengeboran dilakukan sebanyak 1 titik. Pengukuran dengan menggunakan metode resistivitas ini menggunakan konfigurasi *Schlumberger*. Di sebelah barat daya bendungan terdapat sebuah mata air yang mengalir, yang kemudian dijadikan indikasi adanya rembesan pada tubuh Bendungan Cengklik. Oleh karena itu, untuk mengetahui apakah mata air tersebut berasal dari rembesan atau bukan, maka titik-titik pengukuran resistivitas dan pengeboran diletakkan di antara tubuh bendungan dengan mata air tersebut. Kondisi daerah pengambilan data berada di sekitar pemukiman, sawah, jalan, sungai, dan kebun.

Akuisisi Data

Dari beberapa konfigurasi metode resistivitas yang ada, dalam penelitian ini akan digunakan konfigurasi *Schlumberger*. Lebar jarak AB menentukan jangkauan kedalaman metode resistivitas. Ketika perbandingan jarak antara elektroda arus dengan elektroda potensial terlalu besar, elektroda harus digeser, jika tidak maka beda potensial yang terukur akan sangat kecil [1]. Pada penelitian ini bentangan titik pengukuran yang dilakukan sepanjang 100 m. Dan untuk menganalisis permeabilitas tanah pada daerah penelitian, maka dilakukan pengambilan sample tanah dengan cara bor yang kemudian dianalisis di laboratorium.



Gambar 2 Skema akuisisi data metode resistivitas konfigurasi *Schlumberger*

Pengolahan Data

Dalam penelitian ini terdapat dua jenis data hasil akuisisi di lokasi penelitian, yaitu data resistivitas dan data bor. Data resistivitas yang didapatkan dari hasil pengukuran di

lokasi penelitian diolah menggunakan Software Microsoft Excel untuk mendapatkan nilai Rho Apparent (Ra), kemudian nilai tersebut diolah dengan menggunakan Software IP2WIN, parameter yang dimasukan dalam Software IP2WIN ini adalah nilai AB/2, MN dan Ra. Hasil dari pengolahan data menggunakan Software IP2WIN adalah nilai resistivitas dan kedalaman pada setiap lapisan batuan. Nilai resistivitas dan kedalaman pada setiap lapisan batuan tersebut kemudian dimasukan kedalam Software RockWork 15, untuk menampilkan pemodelan 3D.

Hasil dari pengeboran didapatkan nilai resistivitas batuan pada setiap lapisan dengan kedalaman tertentu, sehingga dapat diketahui lapisan batuan apa saja yang terdapat pada lokasi penelitian. Kemudian didapatkan pula sample batuan setiap lapisan pada kedalaman tertentu yang disimpan dalam peti-peti sample, setelah itu dikukuhkan uji laboratorium pada sample tersebut dengan metode *Falling Head Permeability* untuk menganalisis permeabilitasnya dengan mendapatkan nilai k (kepadatan) dari hasil uji laboratorium tersebut. Dari hasil analisis permeabilitas dengan nilai k tersebut kemudian diolah kembali dan dimodelkan dengan menggunakan Software Slide 6.0, sehingga didapatkan nilai debit rembesan pada lokasi penelitian.

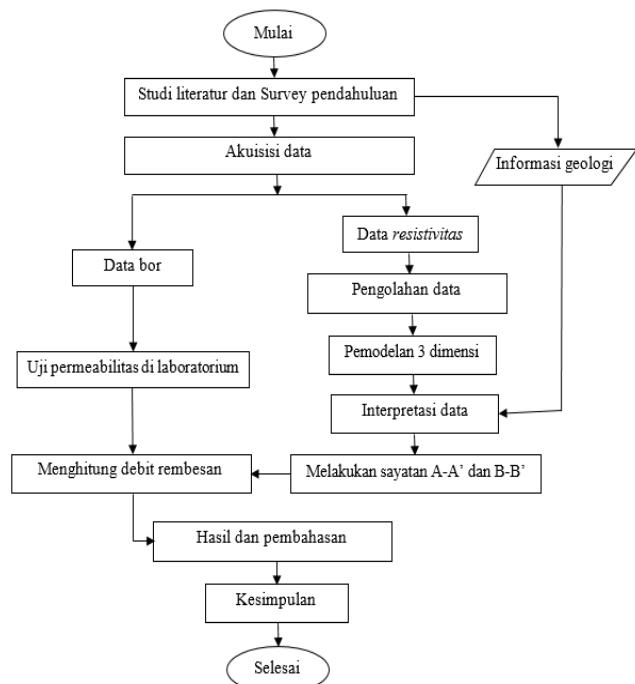
Interpretasi Data

Pada tahapan ini hasil output yang dihasilkan oleh Software Progress berupa *resistivity log* nilai resistivitas setiap lapisan dan kedalamannya dimodelkan dengan menggunakan Software RockWork 15, sehingga didapatkan pemodelan 3 dimensi kondisi bawah permukaan. Kemudian dari hasil pemodelan lapisan batuan bawah permukaan ini akan terlihat apakah terdapat lapisan batuan yang dapat diindikasikan sebagai zona rembesan pada Bendungan Cengklik, dan apakah zona rembesan tersebut sampai pada mata air yang berada di sebelah

barat daya bendungan tersebut. Sedangkan output dari Software Slide 6.0 digunakan untuk menginterpretasikan seberapa besar kemungkinan debit rembesan yang keluar dari tubuh bendungan.

Diagram Alir Penelitian

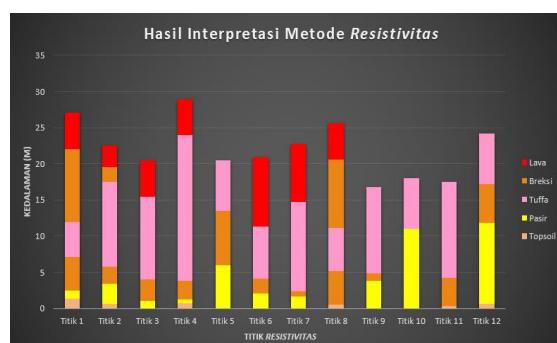
Alur dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir di gambar 3.



Gambar 3 Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Interpretasi Data Resistivitas Setiap Titik Pengukuran

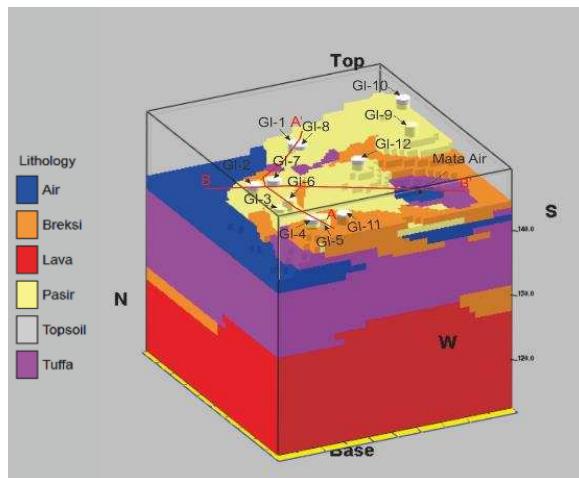


Gambar 4 Interpretasi lapisan batuan setiap titik pengukuran

Dari hasil interpretasi tersebut didapatkan bahwa sebagian besar lapisan batuan di daerah pengukuran titik geolistrik terdiri dari lapisan topsoil, pasir, breksi, tuffa, dan lava.

Pemodelan Lapisan Batuan 3D

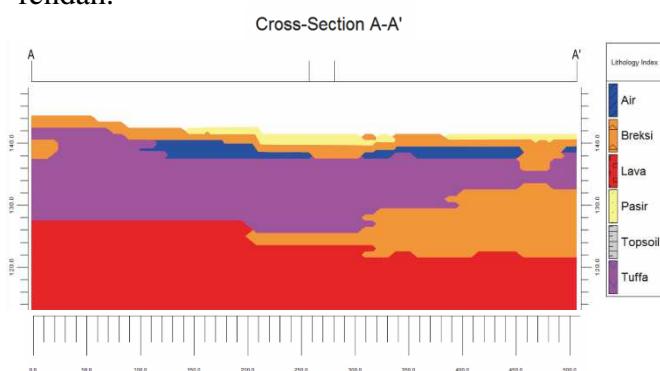
Hasil interpretasi lapisan batuan dari data *resistivitas* dengan metode *schlumberger*, kemudian dibuat pemodelan 3 dimensi dengan menggunakan *Software RockWork 15*. Pemodelan ini dilakukan untuk mengkorelasikan titik pengukuran satu dengan titik pengukuran yang lainnya. Hasil pemodelan 3 dimensi dari data *resistivitas* tersebut dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5 Pemodelan lapisan batuan 3D

Dari gambar 5 dapat terlihat bahwa terdapat lapisan zona rembesan air yang diinterpretasikan berada pada lapisan batuan tuffa, lapisan batuan tuffa ini diinterpretasikan basah karena memiliki nilai resistivitas yang rendah. Gambar 6 merupakan hasil cross-section atau potongan pada tepi bendungan dari A-A' yang ditandai dengan garis warna merah (pada gambar 5). Pada gambar tersebut dapat diinterpretasikan bahwa air merembes melalui lapisan pasir, karakteristik pasir yang memiliki porositas dan permeabilitas yang tinggi membuat air terus merembes melalui lapisan di bawahnya, yaitu lapisan batuan breksi. Batuan breksi merupakan batuan sedimen yang berasal dari

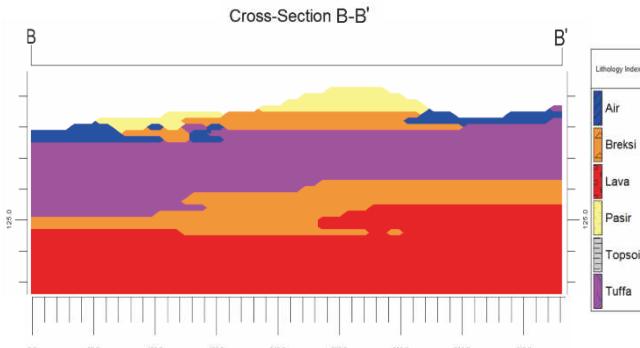
lapukan batuan beku vulkanik yang memiliki butiran kasar dan bersifat permeable, sehingga dapat meloloskan air rembesan menuju lapisan batuan di bawahnya yaitu batuan tuffa. Batuan tuffa merupakan batuan yang bersifat porous yaitu memiliki banyak pori-pori sehingga dapat menyerap air, namun batuan tuffa ini tidak dapat meloloskan air dalam jumlah yang berarti karena pori-pori pada batuan tuffa tidak saling berhubungan, hal tersebut yang menyebabkan batuan tuffa menjadi basah dan memiliki resistivitas yang rendah.



Gambar 6 Hasil Cross-section pada tepi bendungan dari A-A'

Lapisan batuan tuffa yang basah menyebar dari bendungan sampai mata air, hal tersebut ditunjukkan pada gambar 7, gambar penampang tersebut merupakan hasil cross-section lapisan batuan dari B-B' yang ditandai dengan garis warna merah (pada gambar 5). Penyebaran lapisan batuan tuffa yang basah dari bendungan sampai mata air mengindikasikan bahwa terdapat hubungan antara keduanya sehingga dapat diinterpretasikan bahwa air bendungan yang merembes, keluar melalui mata air di sebelah barat daya bendungan tersebut. Air yang merembes kemudian tersimpan pada lapisan batuan tuffa menjadi air tanah, ketika lapisan batuan tuffa tersebut sudah jenuh terhadap air, secara alami air tanah akan tertekan dan naik kepermukaan melalui retakan atau celah pada lapisan batuan di atasnya. Namun mata air yang muncul pada permukaan tersebut tidak hanya berasal dari rembesan air bendungan saja, air yang terdapat pada mata air tersebut

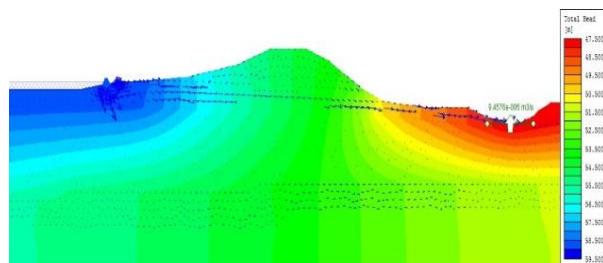
merupakan akumulasi dari air bendungan dan air hujan atau air meteorik yang menyatu menjadi sebuah akuifer, kemudian tertekan dan menyebabkan air tersebut naik kepermukaan. Hasil penampang cross-section B-B' digunakan sebagai model dasar untuk interpretasi perhitungan debit rembesan dengan menggunakan software Slide 6.0.



Gambar 7 Hasil Cross-section bendungan sampai mata air dari B-B'

Analisis Debit Rembesan Menggunakan Software Slide 6.0

Hasil dari penampang *cross-section* B-B' kemudian dijadikan model dasar untuk dibuat pemodelan penampang lapisan batuan pada *software* Slide 6.0. Kemudian memasukan nilai koefisien permeabilitas batuan dari setiap lapisan batuannya, sehingga dapat dihitung debit rembesan dengan menggunakan *software* Slide 6.0 seperti pada gambar 4.16. Pada gambar tersebut dapat terlihat bahwa air rembesan mengalir dari *total head* yang tinggi menuju *total head* yang rendah, dan didapatkan hasil perhitungan analisis debit rembesan dari *Software* Slide 6.0 sebesar $Q = 9,4576 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ atau sama dengan $Q = 0,094576 \text{ L/s}$, berarti dalam satu jam saja air rembesan mengalir sebesar 340,4736 L. *Total Head* merupakan tinggi energi elevasi ditambah dengan tinggi energi tekanan.



Gambar 8 Analisis debit rembesan dengan menggunakan Software Slide 6.0

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan untuk menganalisis hubungan rembesan Bendungan Cengklik dengan mata air yang berada di sekitarnya menggunakan metode resistivitas konfigurasi Schlumberger, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada hasil pemodelan 3 dimensi diperoleh bahwa lapisan batuan disekitar Bendungan Cengklik terdiri dari batuan topsoil, pasir, breksi, tuffa, dan lava, hal ini sesuai dengan formasi geologi di daerah tersebut. Zona rembesan berada pada lapisan batuan pasir dan breksi yang memiliki permeabilitas yang tinggi, hal tersebut ditandai dengan lapisan batuan tuffa yang berada dibawahnya basah atau jenuh dengan air karena memiliki nilai resistivitas yang rendah.
2. Hasil dari analisis debit rembesan pada Bendungan Cengklik menggunakan Software Slide 6.0 dengan nilai masukan berupa nilai koefisien permeabilitas dari setiap lapisan batuan, didapatkan nilai debit rembesan tersebut sebesar $9,4576 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ atau setara dengan $Q = 0,094576 \text{ L/s}$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alile, O. M., W.A Molindo, dan M.A Nwachokor. 2007. *Evaluation of Soil Profile on Aquifer Layer of Three Location in Edo State*. International Journal of Physical Sciences. Vol. 2, No. 9, hal. 249-253, Benson Idahosa University.

- [2] Arthana, I. W., 2006, *Studi Kualitas Air Danau Beratan, Buyan dan Tamblingan di Bedugul Bali*, Jurnal Ilmu Lingkungan Ecotrophic, vol. 1, no. 2, hal. 34-38, Program Studi Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Udayana.
- [3] Balai PSDA Bengawan Solo, 14 agustus 2016, *Informasi Waduk Cengklik*, http://bpsda-solo.jatengprov.go.id/index.php?do=w_cengklik.
- [4] Broto, S. dan Afifah, R.S., 2008, *Pengolahan Data Geolistrik dengan Metode Schlumberger*, Teknik, Vol. 29, No. 2, Hal. 120-128. Universitas Diponegoro.
- [5] Darmawan, S., Harmoko, U., dan Widada, S., 2014, *Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Schlumberger di Area Panasbumi Desa Diwak dan Derekan Kecamatan Bergas Kabupaten Semarang*, Youngster Physic Journal, Vol. 3, No. 2, hal. 159-164, Universitas Diponegoro.
- [6] Hendrajaya, L., 1990, *Pengukuran Resistivitas Bumi pada Satu Titik di Medium Tak Hingga*, Laboratorium Fisika Bumi ITB, Bandung.
- [7] Minarto, E., 2012, *Pemodelan Inversi Data Geolistrik untuk Menentukan Struktur Perlapisan Bawah permukaan Daerah Panas bumi Mataloko*, FMIPA ITS, Surabaya.
- [8] Munaji, Imam, S., dan Lutfinur, I., 2013, *Penentuan Tahanan Jenis Batuan Andesit Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Schlumberger (Studi Kasus Desa Polosiri)*, Jurnal Fisika, Vol. 3, No.2, hal. 117-121, Universitas Negeri Semarang.
- [9] Nurhidayah, 2013, *Aplikasi Metode Geolistrik untuk Mengetahui Pencemaran Limbah Pabrik di Sekitar Sungai di Daerah Genuk*, Skripsi, Jurusan Fisika Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang, Semarang.
- [10] Pitoyo, A. dan Wirianto, 2002, *Produktifitas Primer Perairan Waduk Cengklik Boyolali*, BIODIVERSITAS, Vol. 1, No. 3, hal. 189-195. Jurusan Biologi FMIPA UNS.
- [11] Santosa, B., Suprapto, H., Suryadi, H.S., 1998, *Mekanika Tanah lanjutan*, Gunadarma, Jakarta.
- [12] Sukirman, Sarino dan Hakki, H., 2014, *Analisis Rembesan pada Bendung Tipe Urugan melalui Uji Hidrolik di Laboratorium Hidro FT UNSRI*, Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan, Vol.2, No.2, hal. 1-7, Universitas Sriwijaya.
- [13] Surono, Toha, B. dan Sudarno I., 1992, *Peta Geologi Lembar Surakarta – Girintoro Jawa*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- [14] Telford, M.W., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A., 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, USA.