



Analisis Rembesan Pada Perencanaan Pembangunan Terhadap Keamanan Bendungan Pidekso, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah

Athik Dina Nashihah¹*, Wahyu Krisna Hidajat¹, Narulita Santi¹

¹Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

Abstrak

Perencanaan pembangunan Bendungan Pidekso di Kabupaten Wonogiri dengan tipe bendungan urugan berkemungkinan gagal. Salah satu kerusakan yang terjadi di Bendungan Pidekso adalah rembesan. Terjadinya rembesan dapat menyebabkan terbentuknya pipa-pipa dalam tanah. Tujuan dari adanya penelitian ini yaitu untuk mengetahui perbedaan debit rembesan sebelum dan sesudah *grouting* serta faktor keamanan *piping*. Metode yang digunakan berupa pengamatan data geologi dan geologi teknik yang dilanjutkan dengan analisis rembesan menggunakan Metode Elemen Hingga/*Finite Element Method (FEM)* dengan *Software Slide 6.0*. Analisis rembesan dilakukan pada kondisi muka air normal dan pada kondisi muka air banjir saat sebelum pelaksanaan *grouting* dan sesudah *grouting*. Debit rembesan sebelum *grouting* pada kondisi muka air normal adalah 3,1533 m³/hari dan kondisi muka air banjir adalah 3,3747 m³/hari dan nilai faktor keamanan *piping* yaitu 1,22 dan 1,83. Penanganan pada pembangunan bendungan dengan cara *grouting* untuk memperbaiki hasil yang diperoleh menjadi lebih aman. Hasil perhitungan menunjukkan debit rembesan setelah dilakukan *grouting* pada kondisi muka air normal adalah 0,66484 m³/hari dan kondisi muka air banjir adalah 0,66873 m³/day. Faktor keamanan *piping* menjadi meningkat pada angka 4,68.

Kata Kunci: Bendungan Pidekso Kabupaten Wonogiri, rembesan, metode elemen hingga, faktor keamanan *piping*, *grouting*.

Abstract

The planning for the Pidekso Dam construction in Wonogiri Regency, with the type of embankment dam, has the possibility of failure. One of the damage occurred in the dam was seepage. Seepage causes the formation of pipes in the soil. This research determines the difference between seepage discharge before and after grouting and safety factors piping. The method used is as geological data observation and engineering geology, and seepage analysis using the Finite Element Method (FEM) with Software Slide 6.0. Seepage analysis in normal and flood water conditions before grouting and after grouting. Debit seepage before grouting conditions of normal water level is 3.1533 m³/ day and the condition of flood water level is 3.3747 m³/day and the value of the safety factor piping is 1.22 and 1.83. Handling in dam construction by grouting is expected to have higher safety factor. Based on calculations, seepage discharge after the grouting on normal water level condition is 0.66484 m³/day and the condition of flood water level is 0.66873 m³/day. The safety factor has piping increased to 4.68.

Keywords: *Pidekso Dam Wonogiri Regency, seepage, finite element method, safety factor piping, grouting.*

*) Korespondensi: athikdinanashihahh@gmail.com

Diajukan : 2 Agustus 2021

Diterima : 4 April 2022

Diterbitkan : 20 April 2022

PENDAHULUAN

Sumberdaya alam di Indonesia yang dapat diperbarui dengan ketersediaan dalam jumlah yang besar berupa air. Upaya peningkatan jumlah tampungan air untuk mendukung pasokan air serta ketahanan pangan. Pemanfaatan air bagi masyarakat dengan pembangunan bendungan berdasarkan fungsinya untuk irigasi, air baku, serta pengendalian banjir. Pengembangan bendungan potensial digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga mikrohidro. Menurut Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2017) pelaksanaan pembangunan bendungan yang salah satunya berada di Provinsi Jawa Tengah yang mendukung target untuk menjadikan lumbung pangan nasional. Terjadinya kegagalan pada bendungan bisa menyebabkan ketidakefektifan fungsi dari bendungan tersebut. Permasalahan pada bendungan yang diakibatkan oleh adanya rembesan ini menempati pada urutan pertama di penilaian kategori resiko penyebab dari kegagalan bendungan (Azdan dan Samekto, 2008). Pembangunan bendungan di Jawa Tengah yang saat ini tengah berlangsung yakni Bendungan Pidekso. Bendungan Pidekso merupakan bendungan tipe urugan dengan inti tegak yang menjadi salah satu bendungan yang pada bulan November 2020 baru saja menyelesaikan pembangunan tahap 1 sehingga diperlukan analisis mengenai keamanan bendungan tersebut supaya saat digunakan dapat berperan secara optimal. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui perbedaan kondisi debit rembesan dan total gradien hidrolik yang terdapat pada Bendungan Pidekso sebelum dan setelah dilakukan *grouting*, serta mengetahui faktor keamanan *piping* bendungan akibat adanya rembesan.

Secara administratif, Bendungan Pidekso terletak di Sungai Bengawan Solo dengan DAS Bengawan Solo terletak pada titik koordinat 110°59'44" Bujur Timur dan 08°02'47" Lintang Selatan, yang terletak pada ketinggian 178 mdpl (Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Wonogiri, 2010).

TINJAUAN PUSTAKA

Bendungan urugan merupakan salah satu jenis bendungan yang pada proses pembangunannya dengan menimbun bahan-bahan berupa batu, kerakal, kerikil, pasir, serta tanah dengan komposisi tertentu dan memiliki fungsi untuk

pengempang atau pengangkat pada permukaan air yang terletak di dalam waduk pada udiknya yang disebut dengan bendungan tipe urugan. Bendungan Pidekso termasuk jenis bendungan urugan zonal dengan inti kedap air tegak atau disebut juga dengan bendungan inti tegak atau disebut *central-core fill type dam* yang merupakan bendungan zonal yang lokasi zona kedap air tersebut pada bagian dalam tubuh bendungan dan berkedudukan vertikal. Inti biasanya terletak pada bidang tengah dari tubuh bendungan. (Sosrodarsono dan Takeda, 2002).

Adanya keruntuhan bendungan yang disebabkan oleh *piping* mempunyai presentase yang besar yang dapat disebabkan akibat adanya rembesan yang terjadi pada bendungan (Brunner, 2010). Adanya kondisi tersebut mengakibatkan butir tanah yang berukuran halus terangkut dan membentuk pipa-pipa yang berada dalam tanah atau *piping*. Rongga dalam tanah ini menyebabkan pondasi pada bangunan mengalami penurunan sehingga mengganggu stabilitas bangunan tersebut (Hadiyatmo, 2002). Pengendalian rembesan pada bendungan salah satunya dengan cara *grouting* atau sementasi yang merupakan salah satu metode untuk perkuatan yang dilakukan pada struktur tanah maupun batuan yang dilakukan dengan menginjeksikan campuran semen serta air menggunakan komposisi perbandingan tertentu kemudian melewati tabung menuju ke dalam tanah supaya campuran semen dapat mengisi rekahan hingga rongga (Anonim, 2017)

METODOLOGI

Penelitian dilakukan berdasarkan data yang diperoleh dengan mengumpulkan data primer dan sekunder mengenai Bendungan Pidekso, Kabupaten Wonogiri. Tahap pengumpulan data primer dilakukan dengan pengamatan atau observasi lapangan yang bertujuan untuk mendapatkan data geologi yang selanjutnya dapat digunakan pada saat analisis. Pengamatan pada lapangan meliputi pemetaan geologi dan geomorfologi, untuk memperoleh data-data primer yang dibutuhkan. Hasil dari pemetaan geologi berupa persebaran litologi serta struktur geologi. Hasil dari pemetaan geomorfologi berupa satuan bentuklahan di area lokasi Bendungan Pidekso, Kabupaten Wonogiri. Data Geologi dan Geomorfologi serta Data Pemetaan Geologi Teknik. Selanjutnya dilakukan pengamatan lapangan pada kondisi geologi

teknik mengenai kondisi batuan dan tanah di permukaan dengan didukung data pengeboran inti. Data-data tersebut digunakan untuk bahan pembuatan peta geoteknik. Tahap pengumpulan data sekunder yang digunakan untuk melengkapi data primer berupa data pengeboran inti, geolistrik, data teknis dan material permeabilitas. Data pengeboran inti yang meliputi kedalaman batuan serta deskripsi batuan yang diolah menjadi data jenis batuan pada log geolistrik. Data geolistrik dengan lokasi pengambilan data terdapat pada peta persebaran titik geolistrik yang meliputi resistivitas batuan, kedalaman batuan, ketebalan batuan yang diolah menjadi log geolistrik yang ditampilkan dalam penampang geolistrik. Data teknis serta data material permeabilitas berupa data spesifikasi umum dan spesifikasi teknis yang meliputi parameter geoteknik bendungan. Data material permeabilitas berupa data koefisien permeabilitas dari material yang digunakan sesuai pada geometri bendungan. Nilai data teknis dan data material permeabilitas selanjutnya dimasukkan dalam Software Slide 6.0 menggunakan metode elemen hingga yang selanjutnya dilakukan analisis menjadi permodelan rembesan bendungan.

Permeabilitas

Tanah permeabilitas didefinisikan sifat tanah yang mengalirkan air dengan melalui rongga pori (Hardiyatmo, 2002). Parameter desain material bendungan digunakan untuk analisis rembesan bendungan yang diperoleh dari hasil pengujian laboratorium pada tiap material. Parameter yang digunakan dalam analisis yakni berat jenis (γ),

kohesi efektif (c'), sudut geser dalam efektif (ϕ'). Nilai sudut geser dalam serta nilai kohesi diambil dari nilai yang dominan pada beberapa pengujian. Parameter desain material bendungan ditunjukkan pada Tabel 1. Data permeabilitas bendungan digunakan dalam analisis rembesan yang dimasukkan bersamaan dengan data parameter desain material.

Geolistrik

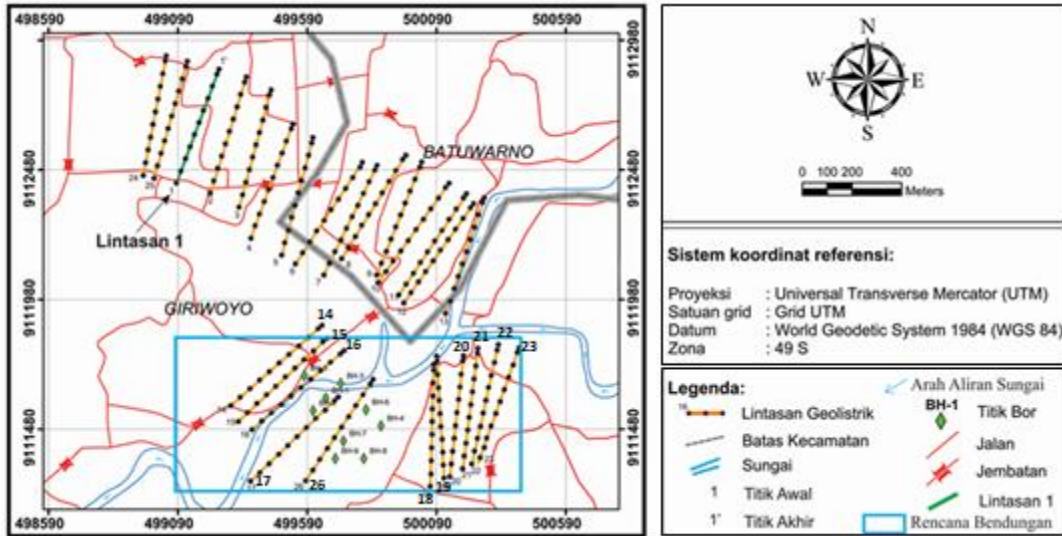
Metode geolistrik memanfaatkan sifat-sifat kelistrikan untuk menginterpretasi karakteristik suatu batuan yang ada di bawah permukaan bumi (Lowrie, 2014). Data geolistrik tersebut kemudian dilakukan pengolahan menggunakan Software RES2DINV yang menunjukkan model resistivitas secara 2 dimensi (2-D) di lapisan bawah permukaan. Interpretasi jenis batuan pada hasil dari penggambaran Software RES2DINV dengan menentukan jumlah maupun nilai resistivitas dari batuan. Adanya perbedaan nilai resistivitas dari tiap batuan dapat digunakan untuk mengetahui keadaan bawah permukaan tanah pada lokasi timbunan tubuh bendungan. Lintasan geolistrik tersebut tersebar di sekitar area bendungan dan bagian hilir bendungan (Gambar 1). Berdasarkan hasil pengolahan geolistrik menggunakan Software RES2DINV terutama pada lintasan area tubuh bendungan yakni lintasan 14 hingga 23 dan lintasan 26.

Pengeboran Inti

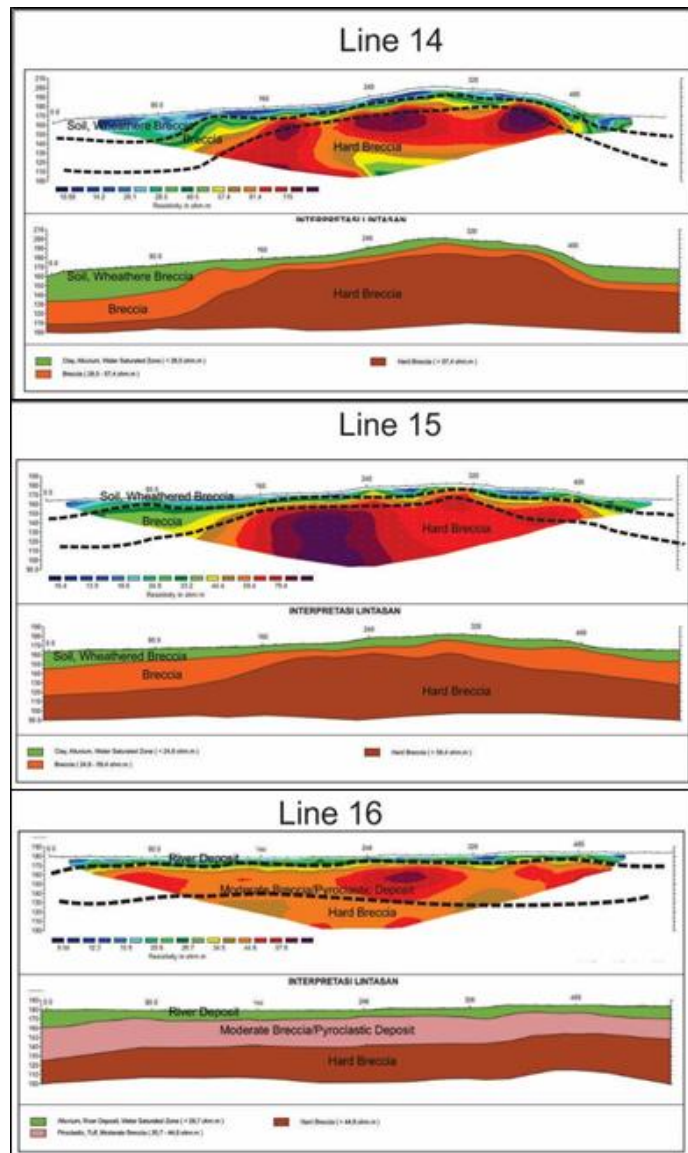
Pengeboran inti dilakukan pada saat sebelum pelaksanaan *grouting*. Manfaat pengeboran inti membantu dalam interpretasi litologi yang berada pada bawah permukaan. Lokasi titik BK terdapat

Tabel 1. Parameter desain material timbunan Bendungan Pidekso (Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo, 2011).

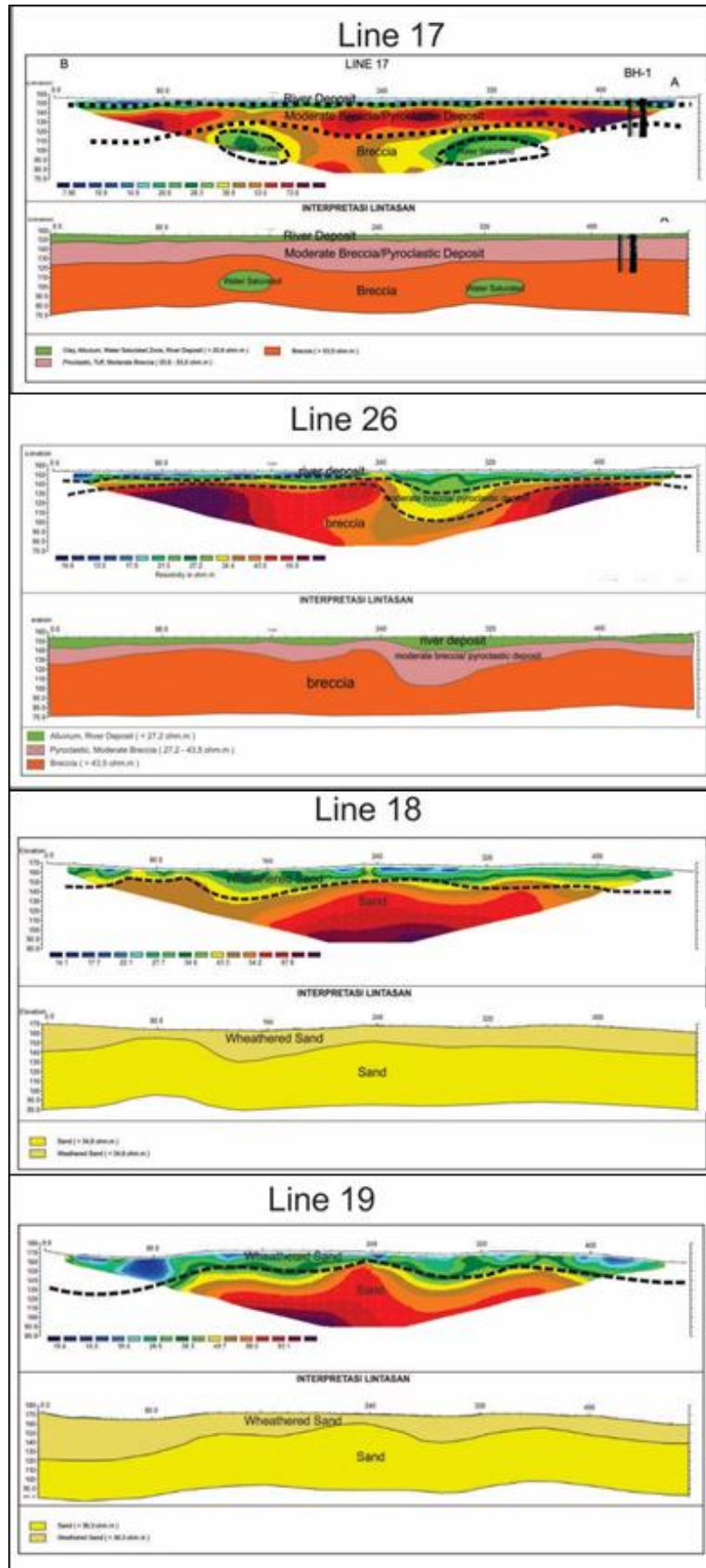
No.	Zona	Material	Berat Vol. Basah	Berat Vol. Jenuh	Tekanan Total		Tekanan Efektif (long term)		Permeabilitas (K) dalam cm/detik
					C _{uu}	ϕ_{uu}	C' _{cu}	ϕ_{cu}	
1	1	Inti kedap	17.357	18.044	115.72	7.75	30	15	1×10^{-7}
2	2	Filter	18.63	19.613	0	35	0	35	5×10^{-5}
3	4 & 4R	Random tanah, dari BA & galian	17.94	18.63	88.26	9.33	25	25	1×10^{-6}
4	5	Random aluvial, dari galian sungai	17.65	18.63	11.474	8	8	30	5×10^{-6}
5	6A	Fondasi (endapan aluvial)	15.69	18.63	9.807	27	7	32	5×10^{-6}
6	6B	Fondasi (endapan piroklastik)	16.18	18.14	19.613	27	10	29	1×10^{-6}
7	6C	Fondasi (tuf breksi atas)	19.61	20.59	39.226	40	40	40	5×10^{-7}
8	6D	Fondasi (tuf breksi bawah)							1×10^{-7}
9	7	Dinding halang beton plastis							1×10^{-7}



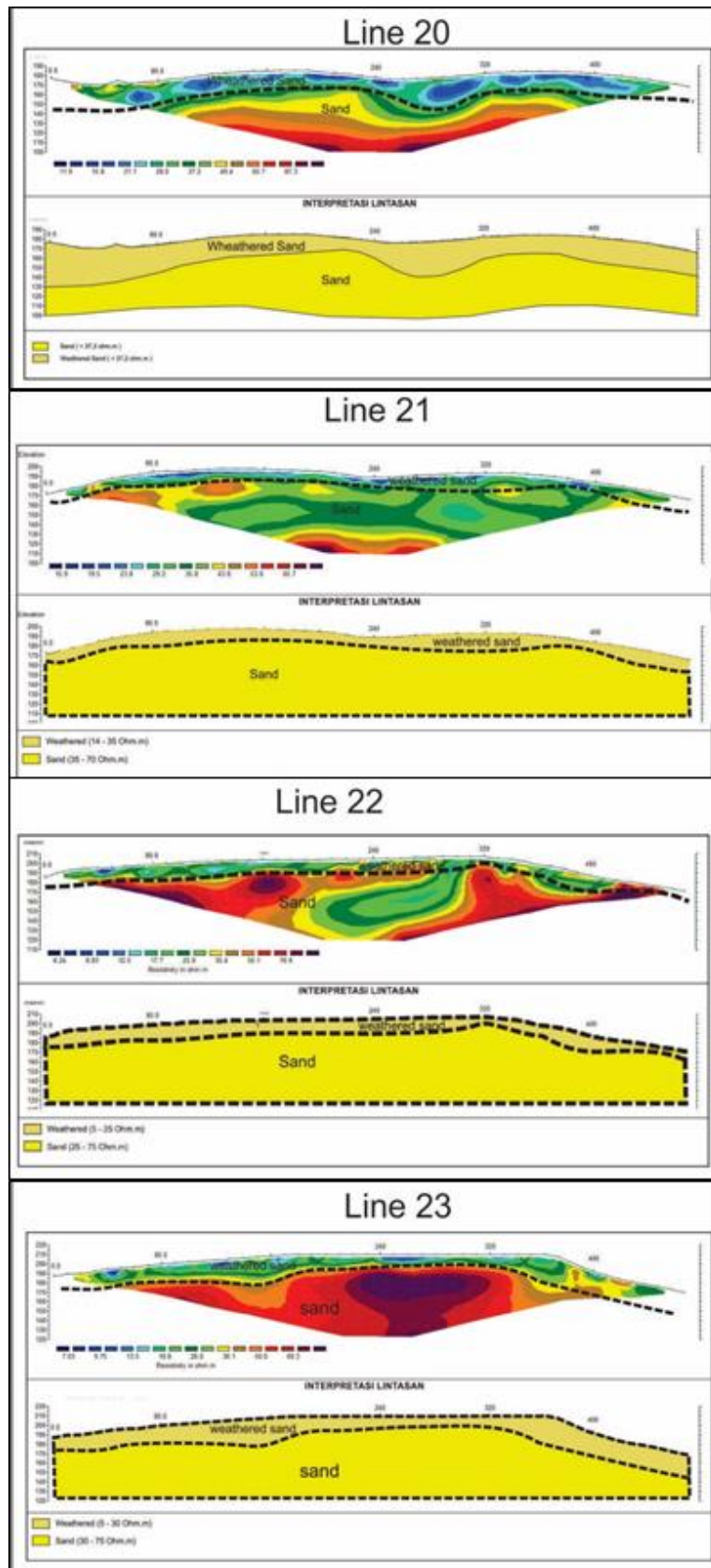
Gambar 1. Peta Desain Survei Lintasan Geolistrik.



Gambar 2. Lintasan Geolistrik 14-16 yang melewati Tubuh Bendungan.



Gambar 3. Lintasan Geolistrik 17, 26, 18, 19 yang melewati Tubuh Bendungan.



Gambar 4. Lintasan geolistrik 20-23 yang melewati tubuh bendungan.

di sekitar area tubuh Bendungan Pidekso. Sampel pengeboran dilakukan hingga kedalaman 40 m. Pelaksanaan pengeboran ini digunakan untuk membantu dalam interpretasi litologi yang berada pada bawah permukaan. Lokasi titik BK terdapat di sekitar area tubuh Bendungan Pidekso.

Software Rocscience Slide2

Software Slide 6.0 mempunyai kemampuan dalam melakukan analisis rembesan airtanah dengan elemen hingga pada kondisi *steady state* ataupun *transient*. Elemen hingga dalam software Slide 6.0 untuk analisis air tanah untuk penentuan dan analisis terkait masalah airtanah dengan memanfaatkan model yang sama pada masalah stabilitas lereng. Permodelan airtanah *steady state* dalam software Slide 6.0 perlu mengaktifkan *Groundwater Method* dalam *Project Settings* menjadi *Steady State FEA*. Metode elemen hingga baik dimanfaatkan pada analisis sistem yang menerus atau kontinu. Berdasar pada beberapa hal yakni bentuk sistem struktur yang *irregular* pada syarat dengan batas yang tidak mempunyai fungsi analisis praktis. Tidak bisa dihitung dengan fungsi sederhana selanjutnya memperoleh permasalahan sederhana dan mempunyai solusi eksak, dimodelkan dengan sistem diskrit (Iskandar, 2014).

Faktor Keamanan Piping

Adanya kecepatan aliran yang meningkat akibat adanya pengurangan tahanan aliran yang terjadi secara berangsur-angsur turun dan menyebabkan erosi butiran yang lebih besar lagi, dan terjadinya pipa-pipa dalam tanah atau disebut *piping* yang menyebabkan keruntuhan pada bendungan tersebut (Hardiyatmo, 2002). Perhitungan yang dilakukan untuk mengetahui bendungan aman terhadap bahaya *piping* dengan persamaan 1, penentuan harga I_c menggunakan persamaan 2.

$$FK_{piping} = \frac{I_c}{I_e} > 4 \quad (\text{persamaan 1})$$

Keterangan:

FK_{piping} minimal = 4, aman (Badan Standarisasi Nasional, 2016)

I_c = gradien hidrolik dari material

I_e = gradien hidrolik debit (gradien keluar maksimum, dapat ditentukan dari jaring arus serta besarnya sama dengan $\Delta h/l$)

$$I_c = \gamma' / \gamma_w = \frac{SG-1}{1+e} \quad (\text{persamaan 2})$$

Keterangan:

γ' = berat volume terapur; γ_w = berat volume air; SG = *specific gravity*; e = *void ratio*/angka porositas

Metode yang digunakan untuk melakukan analisis rembesan bendungan yaitu metode elemen hingga yang dijalankan dalam *Software Slide 6.0*. Perhitungan debit rembesan dilakukan pada 2 kondisi yaitu kondisi muka air normal dan muka air banjir pada saat sebelum dan sesudah *grouting*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Geologi

Kondisi geologi pada Bendungan Pidekso, berdasarkan data yang telah diperoleh melalui pemetaan geologi yang berada di Desa Pidekso, Kecamatan Giriwoyo, Kabupaten Wonogiri, ditemui 6 satuan litologi yang ditunjukkan pada Gambar 5.

1. Endapan Sungai

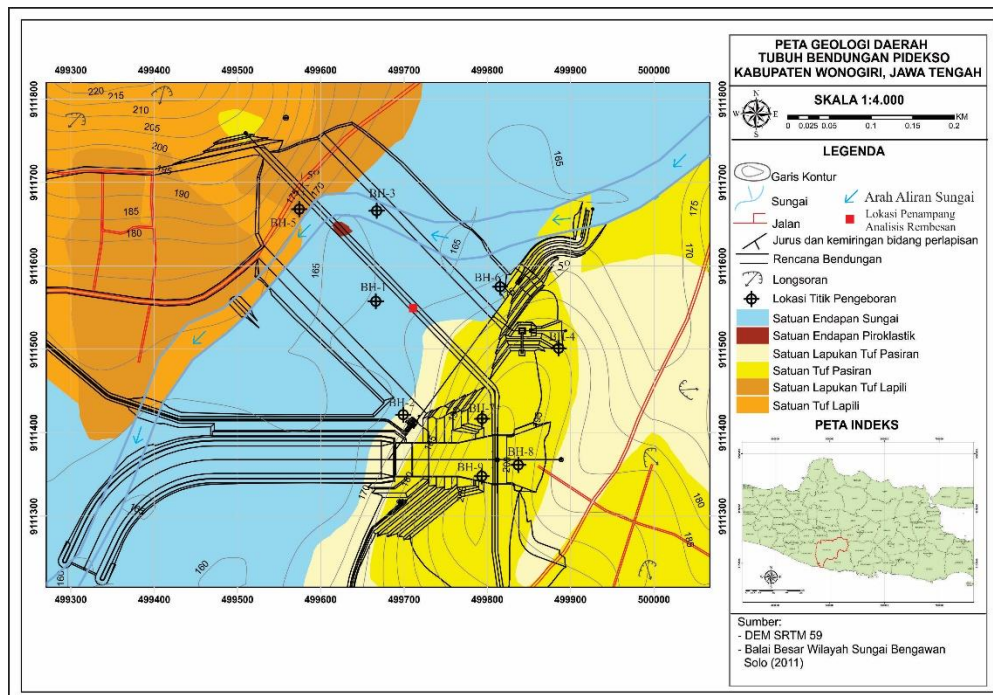
Endapan sungai terdiri dari lempung hingga material yang berukuran bongkah, dengan didominasi oleh batuan beku seperti andesit, diorit, serta material piroklastik, mempunyai bentuk butirnya cenderung agak bundar hingga membundar. Endapan ini dapat ditemui pada dasar sungai dan juga terdapat pada channel bar serta point bar. Terdapat lanau dengan karakteristik warna coklat kekuningan.

2. Endapan Piroklastik

Endapan piroklastik mempunyai karakteristik warna abu-abu terang kehijauan, coklat gelap, material tidak terkonsolidasi pelapukan tinggi hingga sedang. Matrik pasir lanau, mengandung mineral kuarsa, tidak terkonsolidasi, bentuk butirnya meruncing. Fragmen berbagai batuan, didominasi batuan vulkanik, bentuk fragmennya meruncing hingga agak meruncing dengan ukuran bongkah.

3. Satuan Lapukan Tuf Pasiran

Tanah hasil pelapukan Tuf Pasiran mempunyai karakteristik warna yang cenderung lebih gelap dibandingkan dengan litologi aslinya yakni berwarna coklat kemerahan dengan ukuran pasir sedang hingga pasir kasar, mempunyai struktur yang masif dengan berbentuk sub rounded.



Gambar 5. Peta Geologi Bendungan Pidekso.

Keterdapatannya cenderung berada di bagian selatan. Konsistensi tanahnya solid dengan kepadatan relatif lepas.

4. Satuan Tuf Pasiran

Satuan Tuf Pasiran mempunyai karakteristik warna abu-abu cerah kekuningan dengan ukuran pasir sedang hingga pasir kasar, mempunyai struktur yang masif. Butirannya berbentuk agak bundar dengan susunan antar butirnya seragam atau disebut sortasi baik dan kemas tertutup. Keterdapatannya litologi ini berada di bagian selatan.

5. Satuan Lapukan Tuf Lapili

Tanah hasil pelapukan Tuf Lapili mempunyai karakteristik warna abu-abu gelap hingga kecoklatan. Ukuran butir pasir halus hingga pasir sedang. Keterdapatannya satuan lapukan lapili tuf di beberapa lokasi yang dekat dengan lapili tuf yang belum mengalami pelapukan. Satuan ini mempunyai konsistensi tanah yang cenderung solid dengan kepadatan relatif yang agak lepas. Tingkat kekerasannya agak lunak dan untuk tingkat kekompakannya cenderung agak lepas.

6. Satuan Tuf Lapili

Satuan tuf lapili mempunyai karakteristik warna abu-abu cerah hingga abu-abu kehijauan berupa material tidak terkonsolidasi, terjadi pelapukan intensitas rendah. Matrik berupa pasir sedang hingga

kasar, bentuk butirnya meruncing hingga agak meruncing, mempunyai susunan antar butir yang tidak seragam atau disebut sortasi buruk dengan kontak yang terbuka (*fabrik*). Fragmen berupa kerakal hingga bongkah, mempunyai bentuk yang agak meruncing.

Penyelidikan yang dilakukan pada lapangan serta analisis laboratorium berguna untuk mengetahui kualitas serta kuantitas material pengisi tubuh bendungan. Litologi pada area sekitar tubuh bendungan ini dimanfaatkan untuk material timbunan yang terdiri dari inti kedap air, filter, random, transisi serta rip-rap. Material filter dan material transisi berasal dari litologi endapan sungai (campuran pasir dan kerikil). Manfaat filter untuk melindungi zona inti sedangkan material transisi untuk melindungi zona random. Material random berasal dari litologi batuan jenis tufa, breksi serta lava dasit (endapan piroklastik) yang tidak dibatasi untuk kualitas batuanya. Material inti digunakan untuk membuat inti kedap air pada tubuh bendungan sehingga digunakan lempung yang bercampur dengan pasir halus hingga kasar dengan dipadatkan sampai kepadatan optimum untuk menghasilkan koefisien permeabilitas yang sangat kecil. Material rip-rap yang berada pada lapisan terluar dari tubuh bendungan berupa tatanan batu kosong yang berfungsi untuk meredam energi ombak/gelombang dari waduk

dapat menyebabkan degradasi material timbunan, sehingga harus berasal dari batu yang kuat dan tahan abrasi.

Geolistrik

Lintasan geolistrik ditunjukkan pada Gambar 2 - 4, diperoleh hasil kenampakan kondisi bawah permukaan. Posisi rembesan diketahui dari nilai resistivitas paling rendah yang ditunjukkan dengan gradasi yang mempunyai warna biru. Hasil dari 11 lintasan geolistrik ditunjukkan pada Gambar 3 menunjukkan potensi rembesan yang berbeda-beda. Potensi rembesan dijumpai pada elevasi antara 160m hingga 185m, yaitu terletak pada litologi yang berada dekat dengan permukaan. Interpretasi posisi rembesan tersebut cenderung terdapat pada bagian hilir tubuh bendungan dengan aliran air yang berasal dari arah timurlaut menuju arah baratdaya.

Pengeboran Inti

Hasil deskripsi sampel pada pengeboran inti titik BK-01 mempunyai litologi pada bawah permukaan dengan tersusun oleh tanah (0-1 m) endapan sungai (1-9 m), endapan piroklastik (9-19,5 m), lapukan tuf lapili (19,5-32,5 m) dan tuf lapili (32,5-40 m). Hasil deskripsi sampel pada pengeboran inti titik BK-02 mempunyai litologi pada bawah permukaan dengan tersusun oleh endapan piroklastik (0-31,2 m), lapukan tuf lapili (31,2-32 m) serta tuf lapili (32-40 m). Hasil deskripsi sampel pada pengeboran inti titik BK-03 mempunyai litologi pada bawah permukaan dengan tersusun endapan sungai (0-14 m), tuf lapili (14-17 m), endapan piroklastik (17-20 m), tuf lapili (20-22 m), endapan piroklastik (22-24,3 m) serta tuf lapili (24,3-40 m).

Analisis Debit Rembesan

Penampang tubuh bendungan yang digunakan dalam analisis berada pada STA 180 dengan membandingkan pada kondisi muka air normal dengan kondisi muka air banjir. Berdasarkan perhitungan debit rembesan pada kondisi muka air normal (Gambar 6) dan kondisi muka air banjir (Gambar 7) maka diperoleh rata-rata debit rembesan pada Bendungan Pidekso yakni:

$$\begin{aligned} Q \text{ Muka Air Normal} &= 3,65 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik} \\ &= 12,045 \text{ l/detik} \\ Q \text{ Muka Air Banjir} &= 3,91 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{detik} \\ &= 12,903 \text{ l/detik} \\ \Delta Q &= 12,474 \text{ l/detik} \end{aligned}$$

Volume rembesan bendungan per hari harus mempunyai nilai yang lebih kecil dari 0,05% dari volume tampungan total Bendungan Pidekso yaitu 12,585 m³/hari atau 146 l/detik. Nilai perbandingan menunjukkan total rata-rata debit rembesan yang terjadi sebesar 12,474 l/detik yakni lebih kecil dari jumlah yang diizinkan.

Analisa pola aliran berdasarkan software Slide 6.0 menunjukkan bahwa aliran rembesan terjadi pada pondasi dengan adanya indikasi yang dapat menjadi *piping* pada bagian lereng hilir tubuh bendungan. Nilai gradien hidraulik debit berdasarkan analisa Slide 6.0 pada kondisi muka air normal sebelum *grouting* 0,45 sedangkan pada kondisi muka air banjir sebelum *grouting* 0,3. Hasil analisis setelah dilakukan *grouting* menunjukkan nilai gradien hidraulik menjadi 0,2. Dari rumus persamaan tersebut dapat diketahui nilai faktor keamanan dari *piping* di tubuh Bendungan Pidekso yakni sebagai berikut:

1. Sebelum *grouting*

a. Kondisi Muka Air Normal

$$I_c = \frac{SG-1}{1+e} = \frac{2,61-1}{1+1,93} = 0,549$$

$$FK_{piping} = \frac{I_c}{I_e} = \frac{0,549}{0,45} = 1,22 (< 4, \text{ tidak aman})$$

b. Kondisi Muka Air Banjir

$$I_c = \frac{SG-1}{1+e} = \frac{2,61-1}{1+1,93} = 0,549$$

$$FK_{piping} = \frac{I_c}{I_e} = \frac{0,549}{0,3} = 1,83 (< 4, \text{ tidak aman})$$

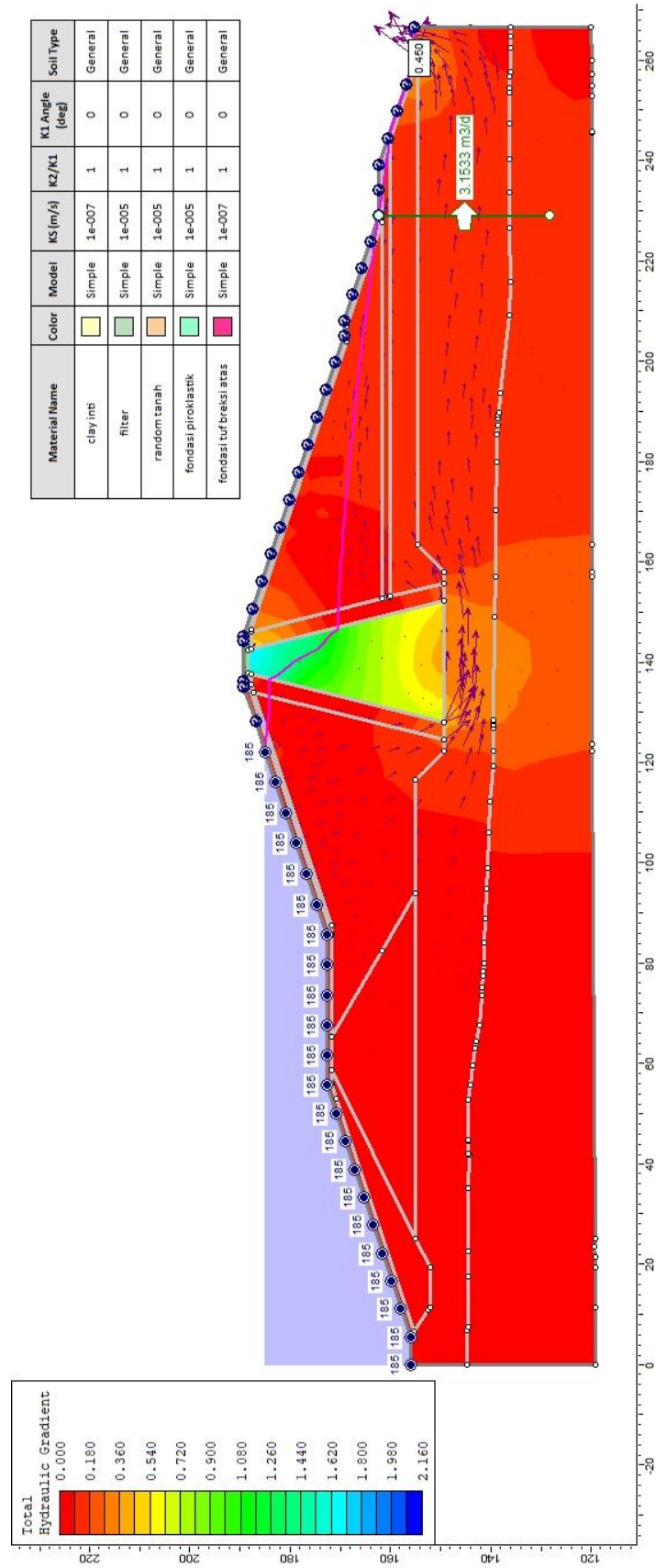
2. Setelah *grouting*

$$I_c = \frac{SG-1}{1+e} = \frac{2,63-1}{1+0,74} = 0,936$$

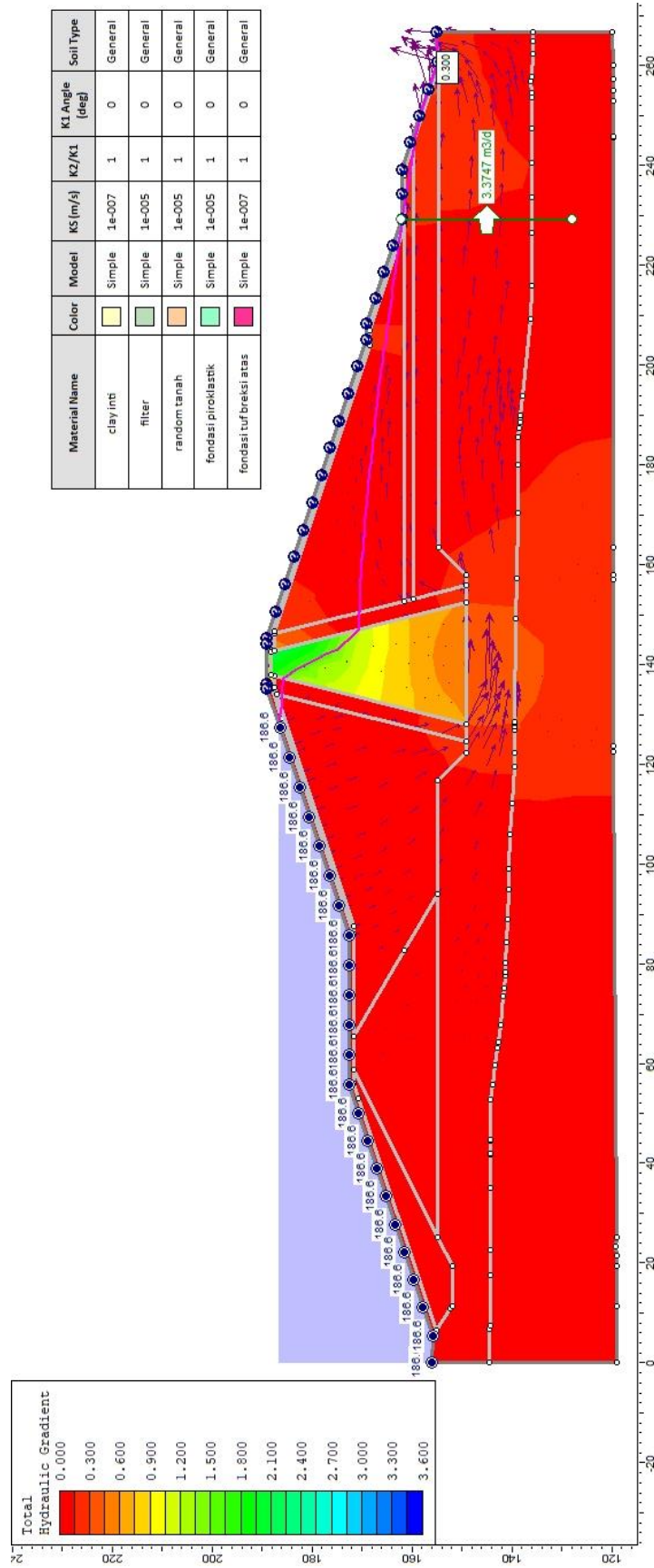
$$FK_{piping} = \frac{I_c}{I_e} = \frac{0,936}{0,2} = 4,68 (> 4, \text{ aman})$$

Berdasarkan Hardiyatmo (2017) bahwa nilai pada faktor keamanan dari bangunan air merupakan perbandingan nilai gradien hidrolis kritis dengan gradien keluar maksimum harus lebih besar dari 4. Hasil dari perhitungan faktor keamanan *piping* di atas, diketahui bahwa faktor keamanan *piping* tubuh Bendungan Pidekso sebelum dilakukan *grouting* yaitu tidak aman. Faktor keamanan *piping* tubuh Bendungan setelah dilakukan *grouting* yaitu aman.

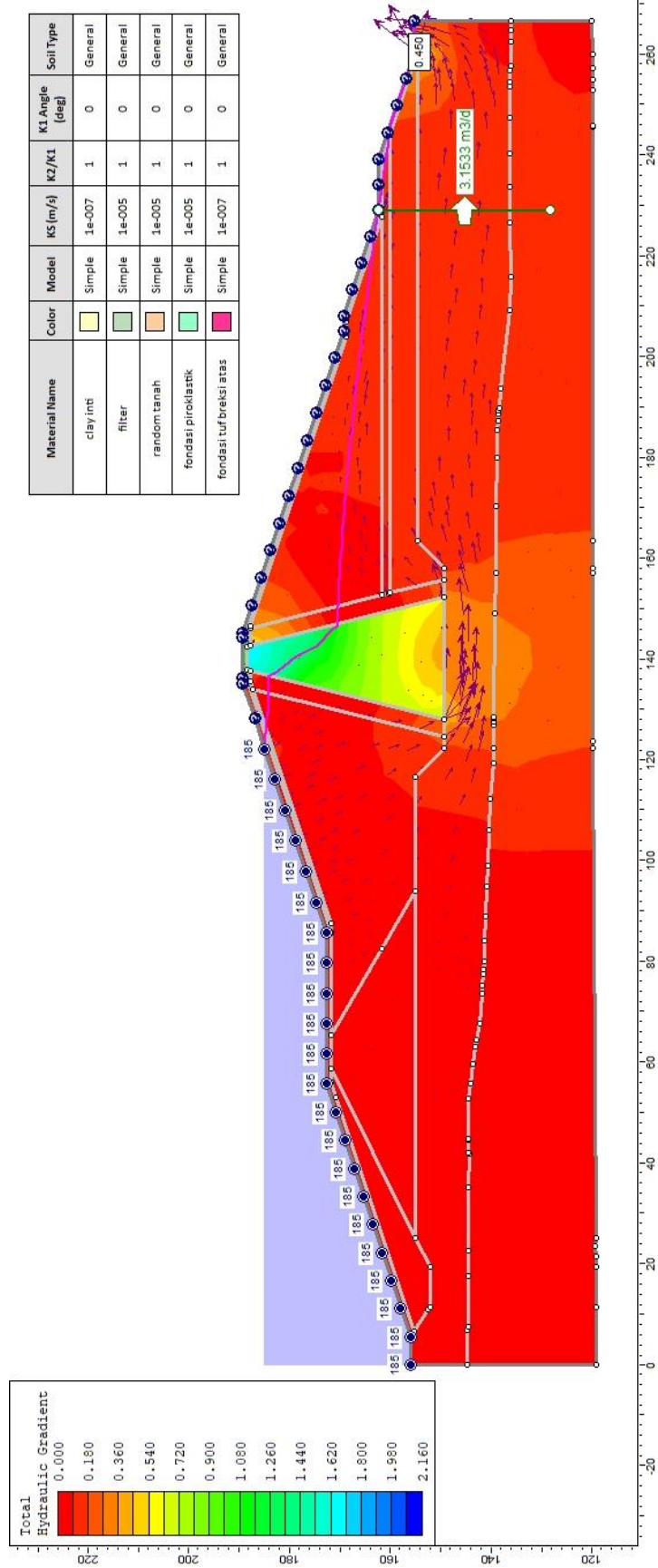
Bagian dasar lereng hilir tubuh bendungan terdapat adanya lapisan pondasi tuf lapili dengan permeabilitas 1×10^{-5} m/detik dan lapisan pondasi tuf pasir dengan permeabilitas 1×10^{-7} m/detik. Lapisan pondasi tersebut dapat menghambat aliran air dari lapisan filter di bagian hilir dan hulu zona inti untuk melindungi zona inti apabila terjadi aliran rembesan menuju arah hulu.



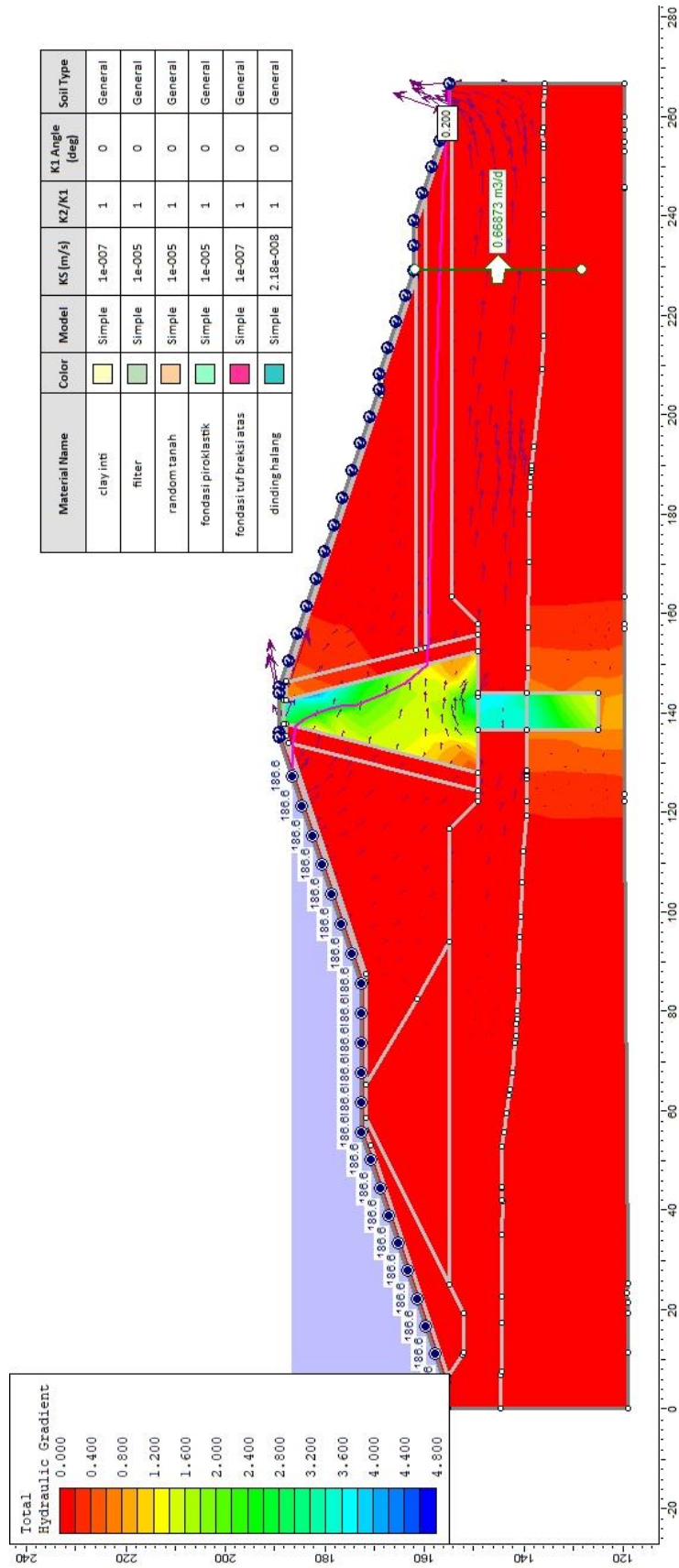
Gambar 6. Permodelan Rembesan pada Kondisi Muka Air Normal sebelum grouting.



Gambar 7. Permodelan Rembesan pada Kondisi Muka Air Banjir sebelum grouting.



Gambar 8. Permodelan Rembesan pada Kondisi Muka Air Normal sesudah *grouting*.



Gambar 9. Permodelan Rembesan pada Kondisi Muka Air Banjir sesudah *grouting*.

Tabel 2. Hasil perbandingan analisis rembesan.

Hasil	Sebelum <i>Grouting</i>	Setelah <i>Grouting</i>
Nilai <i>specific gravity</i>	2,61	2,63
Nilai e	1,93	0,74
Debit rembesan kondisi muka air normal	3,1533 m ³ /hari	0,66484 m ³ /hari
Debit rembesan kondisi muka air banjir	3,3747 m ³ /hari	0,66873 m ³ /hari
Gradien hidrolik material	0,549	0,936
Gradien hidrolik debit	0,45	0,2
FK	1,22	4,68

Rekomendasi

Pada lokasi penelitian di Bendungan Pidekso, metode yang direkomendasikan untuk mengatasi permasalahan tersebut yakni *grouting*. Perhitungan kedalaman *grouting* tubuh bendungan dengan rumus: $D = (1/3 H + C)$ dimana, D = kedalaman lubang bor (m), H = ketinggian air Pseudostatis (m), C = konstanta (8-20).

$$\begin{aligned} D &= 1/3 H + C \\ &= 1/3(44 \text{ m}) + 8 \\ &= 14,6 + 8 \text{ m} \\ &= 22,67 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D &= 1/3 H + C \\ &= 1/3(44 \text{ m}) + 20\text{m} \\ &= (14,6 + 20)\text{m} \\ &= 34,67 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan dari perhitungan maka

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan dan analisis pada lokasi rencana Bendungan Pidekso, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah disimpulkan bahwa debit rembesan pada Bendungan Pidekso setelah dilakukan *grouting* pada kondisi muka air normal yaitu dari 3,1533 m³/day menjadi 0,66484 m³/hari atau $7,69 \times 10^{-6}$ m³/detik terjadi pengurangan sebesar 2,48846 m³/hari. Pada kondisi muka air banjir yaitu dari 3,3747 m³/hari menjadi 0,66873 m³/hari atau $7,74 \times 10^{-6}$ m³/detik terjadi pengurangan sebesar 2,70597 m³/hari. Faktor keamanan *piping* sebelum *grouting* yaitu 1,22 dan setelah *grouting* meningkat menjadi 4,68. Hasil yang diperoleh sudah lebih dari standar nilai faktor keamanan *piping* yaitu 4, bendungan dinyatakan aman dari bahaya *piping*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penulisan hasil penelitian ini terutama dosen pembimbing dari Universitas Diponegoro.

kedalaman *grouting* pada Bendungan Pidekso yaitu sekitar 30 m dari dasar bendungan. Debit rembesan pada kondisi muka air normal ditunjukkan Gambar 8, yaitu dari 3,1533 m³/hari menjadi 0,66484 m³/hari atau $7,69 \times 10^{-6}$ m³/detik dan pada kondisi muka air banjir yang ditunjukkan pada Gambar 9 dari 3,3747 m³/hari menjadi 0,66873 m³/hari atau $7,74 \times 10^{-6}$ m³/detik. Berdasarkan hasil perhitungan faktor keamanan *piping* tersebut, bahwa pada Bendungan Pidekso nilai faktor keamanan setelah dilakukan *grouting* yakni meningkat. Hal tersebut menunjukkan bahwa tubuh bendungan Pidekso aman dari bahaya *piping*. Hasil perbandingan analisis rembesan ditunjukkan pada Tabel 2.

DAFTAR PUSTAKA

- Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi, 2017. *Ketentuan Praktis Pengujian Tanah Jembatan*, Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar, Kementerian PUPR. Bandung: Badan Pengembangan Sumber Daya Air.
- Azdan, M.D., Samekto, C.. (2008, 2-3 Juli). *Kritisnya Kondisi Bendungan di Indonesia* [presentasi paper]. Seminar Nasional Bendungan Besar Indonesia, Surabaya.
- Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Wonogiri. 2010. Peta Administrasi Kabupaten Wonogiri. Diakses melalui http://sippa.ciptakarya.pu.go.id/sippa_online/ pada Januari 2021.
- Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. 2011. Detail Desain Bendungan Pidekso di Kabupaten Wonogiri. Konsultan: PT. Virama Karya (Persero).
- Brunner, G.W. 2010. *HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual*. USACE, Institute for Water Resources,

- Hidrologic Engineering Center. Davis
Hardiyatmo, H. C. 2002. *Mekanika Tanah 1*.
Yogyakarta: Gajah Mada University Press..
Iskandar, P. 2014. *Metode Elemen Hingga: Teori
dan Konsep Dasar*. Makassar: John Hi-Tech
Mediatama.
Lowrie, W. 2014. *Fundamental of Geophysics
(2nd Edition)*. Cambridge: Cambridge
University Press.