



Studi Geologi Bawah Permukaan Menggunakan *Core Logging* Dan *Water Pressure Test*: Studi Kasus Bendungan Lolak Bolaang Mongondow

Nani Mardiani¹, Sri Maryati² , Ronal Hutagalung¹, Muhammad Kasim¹ 

¹Program Studi Teknik Geologi, Universitas Negeri Gorontalo, Jl. Prof. Dr. Ing. B. J. Habibie, Moutong, Tilongkabila, Kabupaten Bone Bolango 96119, Gorontalo, Indonesia

²Jurusan Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Universitas Negeri Gorontalo, Jl. Prof. Dr. Ing. B. J. Habibie, Moutong, Tilongkabila, Kabupaten Bone Bolango 96119, Gorontalo, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 9 December 2020

Accepted: 11 January 2022

Published: 24 January 2022

Keywords:

Bedrock; Core Logging; Dam; Water Pressure Test

Corresponding author:

Sri Maryati

Email: sri.maryati@ung.ac.id

Read online:



Scan this QR code with your smart phone or mobile device to read online.

ABSTRACT

North Sulawesi has one large dam located in Pindol Village, Lolak District. The research objective was to determine the lithology of the bedrock of the dam foundation, rock class, and subsurface permeability of the dam. The method used in this research is core logging analysis and water pressure test. The bedrock foundations of the dam consist of andesite units, shale units, sandstone units which are included in the Sedimentary Facies Tinombo Formation and Volcanic Tinombo Formation. The formations are included in the Eocene to Early Oligocene Eocene and deposited in the deep marine environment. The foundation rock class is predominantly CM class (rather soft and fairly weathered rock), the rock quality of design is poor-medium characterized by the presence of broken cores and easily crushed in some parts. Lolak Dam has 6 permeability zones, namely very high, high, medium, moderate, low, and very low permeability with an average lugeon value of 4.43 liters/minute. The standard of lugeon value for the dam foundation is $Lu < 3$, so it is necessary to repair the drill points on the pilot hole which has a lugeon value of > 3 (low, moderate, medium, high, and very high permeability zones) to increase the capacity foundation rock.

How to cite: Mardiani, N., Maryati, S., Hutagalung, R., & Kasim, M. (2022). Studi Geologi Bawah Permukaan Menggunakan Core Logging Dan Water Pressure Test: Studi Kasus Bendungan Lolak Bolaang Mongondow. *Jambura Geoscience Review*, 4(1), 48-59. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v4i1.8455>

1. PENDAHULUAN

Kondisi bawah permukaan yang kompleks memberikan gambaran karakteristik dari setiap lapisan batuan. Kebutuhan informasi lapisan bawah permukaan sangat meningkat seiring dengan meningkatnya pembangunan (Sastrawan et al., 2020). Informasi lapisan bawah permukaan sebagai bahan kajian pendukung dalam mitigasi bencana geoteknik yang berkaitan dengan daya dukung tanah maupun batuan. Kajian geologi bawah permukaan bendungan dilakukan di area pembangunan Bendungan Lolak, pada batuan dasar fondasi bendungan agar tidak mengalami deformasi dan umur bendungan akan lama. Kajian geologi teknik telah dilakukan dalam analisis geologi teknik dalam perencanaan bendung daerah irigasi Parigi Kabupaten Pangandaran (Irawan & Handiman, 2016). Bendungan Lolak dibangun pada aliran Sungai Lolak salah satunya bermanfaat bagi pemenuhan kebutuhan air irigasi dan air bersih di wilayah Kabupaten Bolaang Mongondow (Balandatu, 2021). Bendungan Lolak diharapkan dapat memenuhi kontinuitas suplai air irigasi terutama pada musim kemarau yang selalu kekeringan dan penyediaan kebutuhan air

bersih bagi masyarakat sekitar bendungan sehingga akan menjadi faktor pendukung kesejahteraan masyarakat yang sangat nyata dalam proses pembangunan di masa depan.

Bendungan Lolak merupakan tipe bendungan zonal dengan inti tegak, zona kedap airnya terletak di dalam bagian tengah tubuh bendungan dengan kedudukan vertikal yang sangat berpotensi mengalami rembesan. Menurut Shirley (1987) dalam Irawan & Handiman (2016), fondasi bendungan harus bertumpu pada batuan dasar yang mempunyai daya dukung baik agar bendungan tidak mengalami deformasi. Berdasarkan Peta Geologi Regional Kotamobagu (Apani & Bachri, 1997), daerah penelitian tersusun oleh dua formasi batuan dari tua ke muda yaitu Formasi Tinombo Fasies Gunungapi dan Formasi Tinombo Fasies Sedimen. Formasi Tinombo Fasies Sedimen (Tets): Serpih dan batupasir dengan sisipan batugamping dan rijang. Serpih kelabu dan merah, getas, sebagian gampingan; rijang mengandung radiolaria. Formasi Tinombo Fasies Gunungapi (Tets): Lava basalt, lava andesit, selingan batupasir hijau, batulanau hijau, sedikit konglomerat, batugamping merah dan kelabu. Satuan ini mempunyai hubungan menjemari dengan Formasi Tinombo Fasies Gunungapi. Ketebalan formasi ini diduga lebih dari 1000 meter dan lingkungan pengendapannya berada di laut dalam.

Formasi Tinombo fasies sedimen menurut Ahlburg (1913) dalam Apani & Bachri (1997), terdiri dari Satuan Serpih dan Batupasir dengan endapan Batugamping. Serpih berwarna abu-abu, merah, rapuh, agak berkapur, radiolaria. Batupasir berupa *greywacke* dan kuarsa, berwarna abu-abu pekat dan hijau, berbutir halus sampai sedang sebagian mengandung pirit. Satuan batuan ini diterobos oleh Granit, Diorit dan Trachyte. Satuan ini berkaitan dengan Formasi Tinombo fasies Gunungapi. Umur Formasi ini Eosen sampai Oligosen Awal dengan ketebalan Formasi ini diperkirakan lebih dari 1000 meter dan berada pada lingkungan pengendapan laut menurut Ratman (1976) dalam Apani & Bachri (1997).

Struktur Geologi pada daerah penelitian berupa struktur sekunder kekar berupa *shear joint dan extension joint*. Pada Peta Geologi Regional Lembar Kotamobagu digambarkan bahwa pada daerah penelitian terdapat struktur geologi berupa sesar normal dengan arah NW-SE yang terbentuk akibat tunjaman ganda dari jalur tunjaman Sulawesi Utara dan lajur tunjaman Sangihe Timur. Daerah penelitian pada umumnya memiliki struktur geologi berupa sesar turun yang terlihat pada Peta Geologi Regional Lembar Kotamobagu (Apani & Bachri, 1997). Hal ini menyebabkan daerah penelitian sangat intensif dengan adanya struktur berupa kekar.

Studi geologi fondasi bawah permukaan bendungan dilakukan secara umum terfokus membahas mengenai sifat keteknikan dan karakteristik fondasi sebagai rekomendasi perbaikan fondasi (Fitriadi, 2018). Oleh karena itu, penelitian kondisi bawah permukaan bendungan menggunakan analisis *core logging* dan analisis *water pressure test*, penting dilakukan. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui litologi batuan dasar fondasi, kelas batuan maupun permeabilitas bawah permukaan bendungan sebagai upaya perbaikan bendungan.

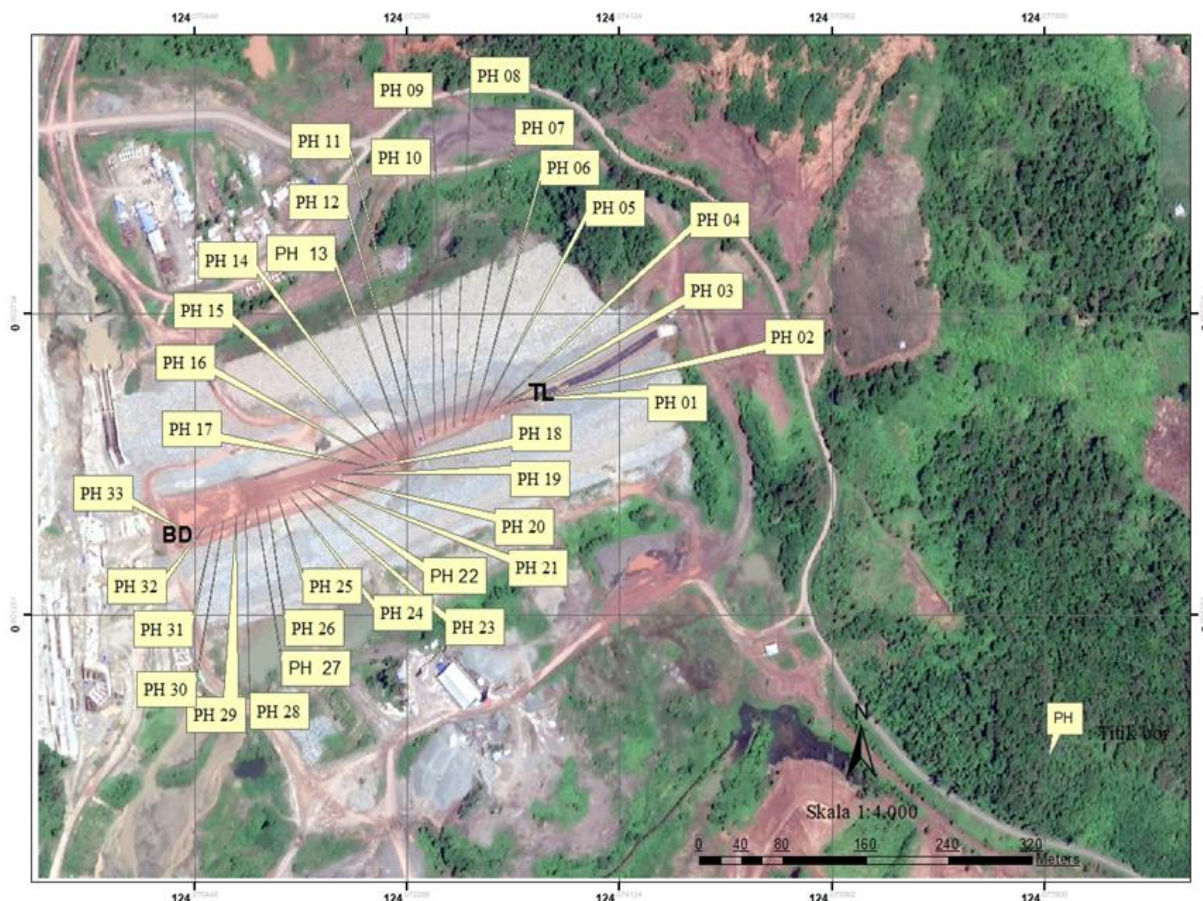
2. METODE

2.1. Lokasi Penelitian

Daerah penelitian secara geografis terletak pada koordinat $0^{\circ} 48' 9.31''$ LU dan $124^{\circ} 4' 19.21''$ BT. Secara administratif, daerah penelitian terletak di Desa Pindol, Kecamatan Lolak, Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara tepatnya berada pada Sungai Lolak pada proyek pembangunan bendungan Lolak. Daerah penelitian berbatasan dengan Laut Sulawesi di bagian utara, Kecamatan Dumoga Tenggara di bagian selatan, Kecamatan Bolaang di bagian timur, Kecamatan Sangtombolang di bagian barat, Kecamatan Lolayan di bagian tenggara, dan Kecamatan Dumoga Utara di bagian barat daya.

2.2. Penentuan Lokasi Pengeboran Inti

Pengeboran inti difokuskan pada area tubuh bendungan yang beresiko tinggi mengalami rembesan, dengan luas area tubuh bendungan $\pm 6.600 \text{ km}^2$. Setiap lokasi pengeboran inti dilakukan pengambilan koordinat pada GPS dan mengkonversinya ke dalam peta. Pengeboran inti dilakukan sebanyak 33 titik pengeboran (*pilot hole*) dengan panjang tubuh bendungan 660 meter dan jarak antar lubang bor 20 meter (Gambar 1). Titik pengeboran inti juga akan digunakan sebagai lokasi uji *water pressure test*. Penentuan titik pengeboran berdasarkan studi awal kelayakan bendungan (*trial grouting*). Studi awal tersebut berupa pengujian kondisi pembebanan pada batuan fondasi



Gambar 1. Peta lokasi pengeboran inti sekaligus pengukuran *water pressure test*

bandungan. Pengujian tersebut bertujuan untuk memperoleh gambaran lebih detail jarak lubang bor dan besarnya tekanan pada saat pengujian *water pressure test*. Kedalaman lubang pengeboran inti ditentukan berdasarkan persamaan $D = 1/3 H + C$, dimana; D adalah kedalaman lubang bor (m); H adalah ketinggian air statis bendungan (m); C adalah konstanta (8-20).

2.3. Pengeboran Inti

Pengeboran inti dilakukan pada lubang *pilot hole* dengan metode *full coring* secara bertahap per-stage lima meter ke bawah dengan kedalaman bervariasi 15 meter dan sampai 35 meter dengan tujuan untuk mengetahui litologi dan permeabilitas bawah permukaan fondasi bendungan. Deskripsi *coring* berupa pengamatan litologi batuan dasar fondasi, pengamatan kelas batuan dan pengukuran RQD (*rock quality design*). Klasifikasi kelas batuan berdasarkan CRIEPI (1992) atau Masyarakat Jepang Geologi Teknik, dapat dilihat pada Tabel 1. Klasifikasi kualitas masa batuan hasil pengeboran mengacu pada Deere & Deere (1967) yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Pengukuran RQD dilakukan bersamaan dengan pengamatan litologi pada hasil *coring* yang dirangkum dalam *log bor* untuk mempermudah mengetahui litologi sekaligus kualitas batumannya. Penentuan nilai RQD didasarkan pada penghitungan persentase inti terambil yang mempunyai panjang 10 cm atau lebih. Inti terambil yang lunak atau tidak keras tidak perlu dihitung meskipun memiliki panjang lebih dari 10 cm (Siswanto & Anggraini, 2018). Nilai RQD didapatkan dari hasil pengukuran panjang inti bor (*core*) yang diukur langsung di lapangan bersamaan dengan pengamatan dari *core logging* (Pane & Anaperta, 2019). RQD diartikan sebagai:

$$\text{RQD} = \frac{\text{Panjang kekar yang lebih 10 cm}}{\text{Panjang keseluruhan}} \times 100\% \quad (1)$$

2.4. Uji *Water Pressure Test* (WPT)

Uji WPT bertujuan untuk mengetahui besarnya angka Lugeon (Lu) dan koefisien permeabilitas (k) yaitu angka yang menunjukkan jumlah air yang masuk ke dalam formasi batuan sepanjang 1

Tabel 1. Klasifikasi kelas batuan

Kelas	Kondisi singkapan	Kondisi inti pengeboran
CH (<i>class high</i>)	Massa batuan cenderung padat dan relatif masif. Mineral/butiran sedikit melapuk kecuali kuarsa, material lempungan ada pada bidang rekahan/ retakannya, sedikit terkontaminasi limonit, dll. Rekahan/retakan sedikit berkurang dengan pukulan palu keras batuan pecah mengikuti rekahan/ retakannya dan suaranya sedikit kedap.	Batuan keras dan segar, jarak <i>crack</i> (rekahan) lebih besar dari 50 cm, retakan sangat lengket, tidak ada kerusakan atau perubahan warna secara umum, limonit disepanjang sebagian retakan.
CM (<i>class medium</i>)	Massa batuan agak lunak dan cukup lapuk. Mineral/ butiran melunak karena pelapukan, kecuali kuarsa. Material lempungan ada pada bidang rekahan/ retakannya. Batuan terkontaminasi akibat limonit, dll. Rekahan/retakannya agak berkurang, dengan pukulan palu sedang batuan pecah mengikuti rekahan/retakannya dan suaranya agak kedap.	Batuan agak lunak, jarak rekahan sekitar 30 cm, tanah halus dilapisi dengan pembuka.
CL (<i>class low</i>)	Massa batuan lunak. Mineral/ butiran melunak karena pelapukan. Material lempungan ada pada bidang rekahan/ retakannya. Rekahan/retakan menurun, dengan pukulan palu ringan batuan pecah mengikuti rekahan/ retakannya dan suaranya kedap.	Batuan lunak sangat lempungan pada material pasir, jarak rekahan lebih kecil dari 10 cm.
D (<i>decomposer</i>)	Massa batuan sangat lunak. Mineral/ butiran melunak karena pelapukan. Material lempungan ada pada bidang rekahan/ retakannya. Rekahan/ retakannya hampir tidak ada, dengan pukulan palu ringan massa batuan hancur dan suaranya sangat kedap.	Batuan sangat lunak, material sangat lempungan dan berpasir dengan pecahan batuan tercampur dengan baik.

Sumber: CRIEPI (1992)

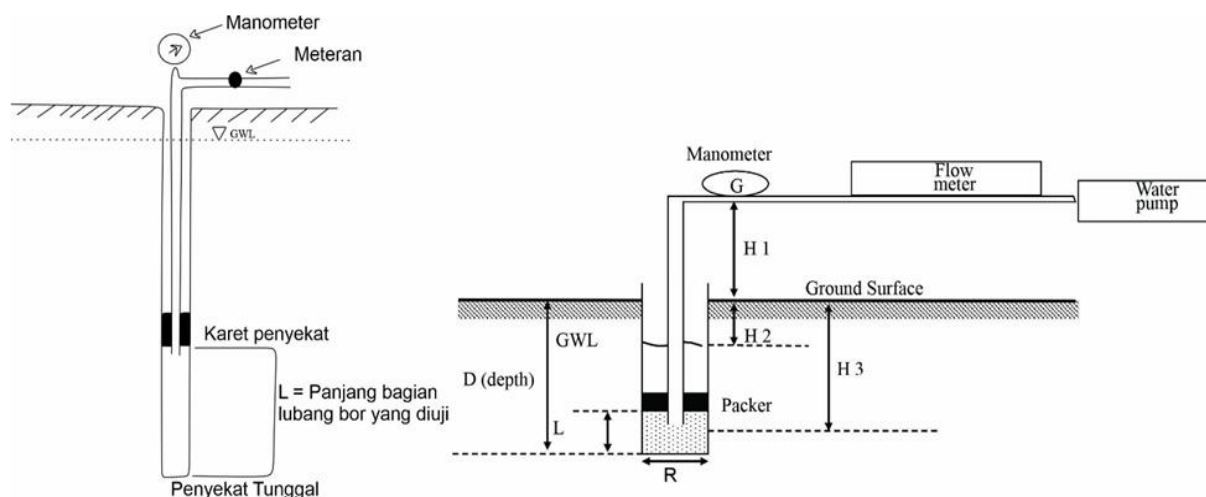
Tabel 2. Kualitas massa batuan

RQD	Kualitas massa batuan
< 25 %	Sangat jelek
25 – 50 %	Jelek
50 – 75 %	Sedang
75 – 90 %	Baik
90 – 100 %	Sangat baik

Sumber: Deere & Deere (1967)

meter selama periode 1 menit, dengan tekanan standar 10 bar (1 bar = 1,0197 kg/cm²). Nilai 1 unit Lugeon (Lu) didefinisikan atas debit air 1 liter per menit di 5 meter lubang bor yang diuji pada tekanan 10 bar. Skema lugeon test dengan *packer* tunggal dapat dilihat pada Gambar 2.

Analisis dan pengolahan data lapangan terdiri dari analisis pengeboran inti, analisis kelas batuan, dan analisis WPT/ lugeon *test*. Pengeboran inti dianalisis dengan cara mencocokkan ciri fisik litologi yang diamati dari hasil data bor. Data yang diperoleh akan menghasilkan penampang geologi berdasarkan hasil pengeboran inti. Nilai RQD yang diperoleh dari data pengukuran digunakan untuk mengetahui kualitas batuan yang akan digunakan sebagai batuan dasar fondasi bendungan. Analisis kelas batuan berdasarkan ciri fisik yang diamati dari data pengeboran inti. Kelas batuan dibagi menjadi 4 kelas menurut klasifikasi CRIEPI (1992) yakni: CH (*class high*), CM (*class medium*), CL (*class low*), dan D (*decomposer*). Pengelompokan kelas batuan akan menghasilkan penampang geologi berdasarkan hasil pengamatan kelas batuan. Analisis WPT/ lugeon *test* untuk mengetahui besarnya nilai lugeon maupun koefisien permeabilitas batuan. Memperoleh nilai Lugeon (Lu) dan koefisien permeabilitas (k) menggunakan Persamaan 2, 3, dan 4.



Gambar 2. Skema *lugeon test* dengan *packer* tunggal (Sumber: BSN, 2008)

Keterangan: D (*depth*) adalah kedalaman sampai ujung *packer* (m); L (*length*) adalah panjang interval lubang yang diuji (m); P0 adalah tekanan pada *manometer* (kg/cm²); H1 adalah jarak *manometer* ke *ground surface* (m); H2 adalah jarak *ground surface* ke *GWL* (m); H3 adalah jarak *ground surface* ke kedalaman titik tengah interval yang diuji (m); R adalah jari-jari lubang bor (m).

$$Lu = \frac{Q \times 10}{P \times L} \quad (2)$$

$$P = P_0 + \left(\frac{\frac{1}{2}L + Depth + H_2}{10} \right) \quad (3)$$

$$k = \frac{Q}{2 \times L \times H} \ln \frac{L}{R} \quad (4)$$

dimana, k adalah permeabilitas koefisien permeabilitas (cm/detik); Q adalah debit yang dibaca pada alat (liter/menit); L adalah panjang *stage* atau panjang interval lubang bor yang diuji (m); R merupakan jari-jari lubang bor (m); P adalah tekanan total (kg/cm²); D adalah kedalaman sampai ujung *packer* (m); H2 adalah jarak *ground surface* ke *GWL* (m); H3 merupakan jarak *ground surface* ke kedalaman titik tengah interval yang diuji (m); H adalah P + H1 (m).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

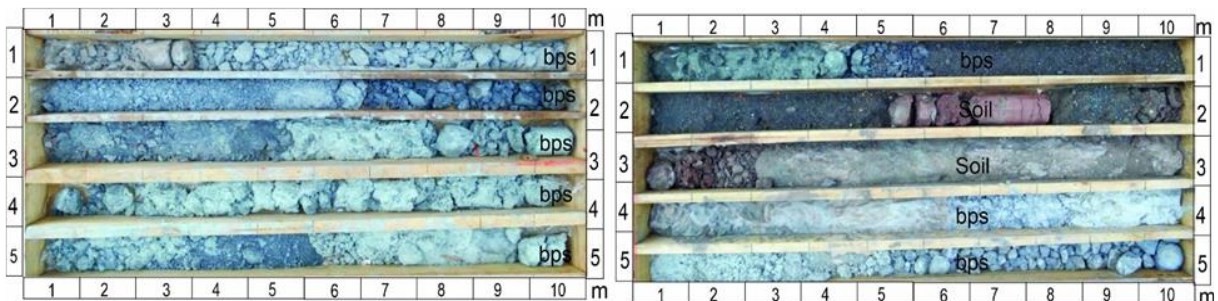
3.1. Pengeboran Inti (*Core Logging*)

Kondisi litologi daerah penelitian terdiri dari *top soil* dengan ketebalan ± 1 meter, endapan sungai berupa lempung, kerikil – kerakal dan bongkah dengan fragmen *bolder* besar berupa lava andesit dan konglomerat dengan ketebalan mencapai 2 meter, lapisan di bawahnya berupa batupasir, serpih dan andesit. Satuan batupasir berada pada timur laut daerah penelitian, batupasir secara megaskopis berwarna hijau terang, struktur masif dan terkekarkan, tekstur: ukuran butir pasir halus – sangat halus, *rounded*, pemilahan baik, kemas tertutup, komposisi: terdapat banyak *vein* yang terisi mineral kalsit. Kenampakan singkapan batupasir pada permukaan bendungan ditampilkan pada Gambar 3. Pengeboran inti pada litologi batupasir terdapat pada PH 01 - PH 05. Hasil pengeboran inti batupasir berwarna hijau terang sampai kecoklatan, struktur masif, tekstur: ukuran butir pasir halus – sangat halus, *rounded*, pemilahan baik, kemas tertutup, komposisi: tidak berfragmen, matriks berupa kalsit, semen karbonatan, serta terdapat material lepas berupa *soil* pada hasil *coring* (Gambar 4). Secara keteknikan batupasir memiliki tekstur getas dan mudah hancur saat dipukul dengan palu.

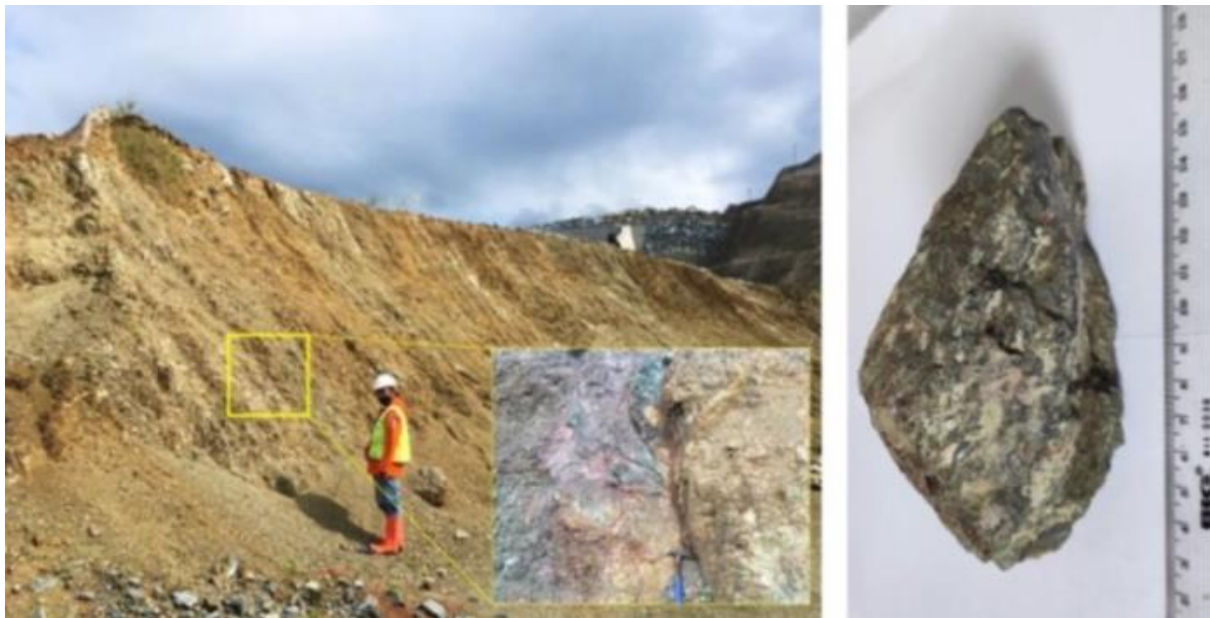
Lapisan kedua berupa satuan serpih yang mendominasi bawah permukaan bendungan. Pada permukaan bendungan secara megaskopis berwarna abu-abu terang, mempunyai struktur menyerpih, tekstur klastik, ukuran butir lempung-lanau, pemilahan baik, porositas baik, kemas tertutup, komposisi tidak berfragmen, matriks berupa kalsit, semen karbonatan. Litologi serpih pada lokasi penelitian berasosiasi dengan batugamping merah, dimana batugamping merah



Gambar 3. Kenampakan singkapan batupasir pada permukaan bendungan

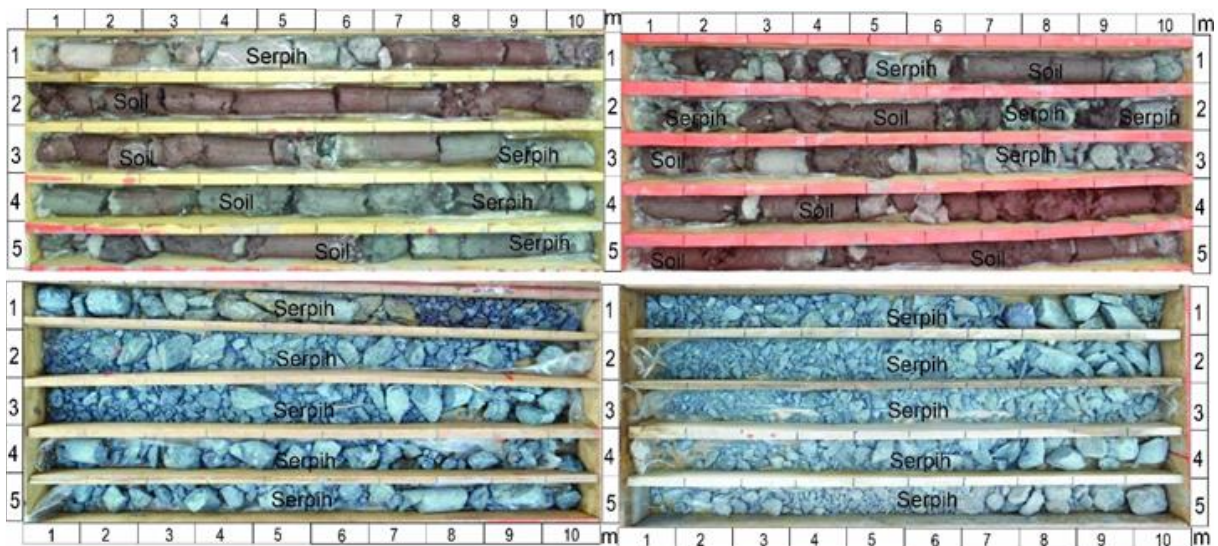


Gambar 4. Hasil pengeboran inti batupasir pada *core box*



Gambar 5. Singkapan serpih dengan sisipan batugamping merah pada lokasi penelitian

sebagai sisipan pada litologi serpih dapat dilihat pada Gambar 5. Bagian bawah permukaan bendungan PH 05 sampai PH 27, batuan serpih memiliki warna abu-abu terang sampai kemerahan, berstruktur laminasi. Memiliki tekstur dengan ukuran butir lempung – lanau, *rounded*, pemilahan baik, porositas buruk, dan kemas tertutup. Komposisi terdiri atas: tidak berfragmen, matriks berupa kalsit, dan semen karbonatan. Hasil pemboran ini litologi serpih sebagian tercampur dengan *soil* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil pengeboran inti batuan serpih pada *corebox*



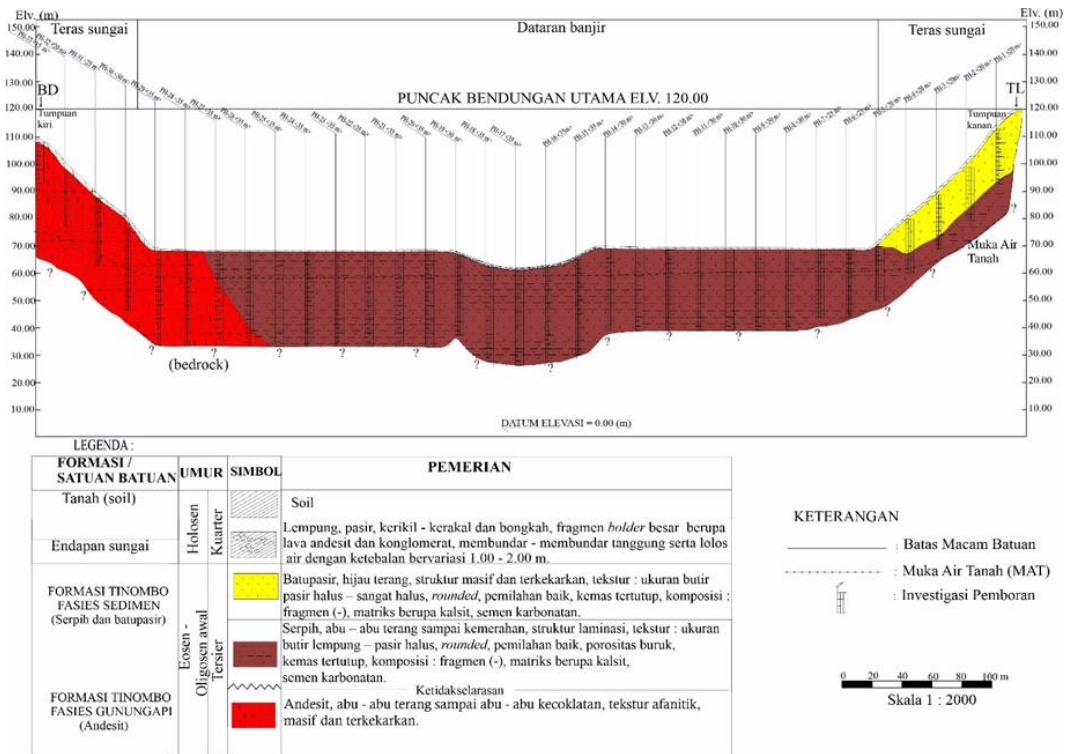
Gambar 7. (a) Singkapan andesit pada tumpuan kanan tubuh bendungan dengan kondisi sudah hancur, (b) Hasil pengeboran batuan andesit pada *core box*

Litologi andesit berada pada bagian barat daya tubuh bendungan pada PH 28 sampai PH 33 secara megaskopis batuan andesit warna *fresh* abu-abu terang, warna lapuk abu-abu kecoklatan, bertekstur afanitik, masif dan terkekarkan. Kenampakan Satuan Andesit pada lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 7a dan 7b. Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Kotamobagu, batuan yang terdapat pada Bendungan Lolak termasuk ke dalam Formasi Tinombo Fasies Sedimen (Tets) berupa batupasir, serpih dan sisipan batugamping merah. Formasi Tinombo Fasies Gunungapi (Tetv) berupa batuan andesit. Umur kedua formasi ini yaitu *Eocene* sampai *Oligocen* Awal. Hubungan stratigrafi antara kedua formasi ini menjemari berdasarkan hasil temuan di lapangan kedua formasi tersebut selang seling. Penampang geologi berdasarkan pengeboran inti pada setiap lubang bor ditampilkan pada Gambar 8.

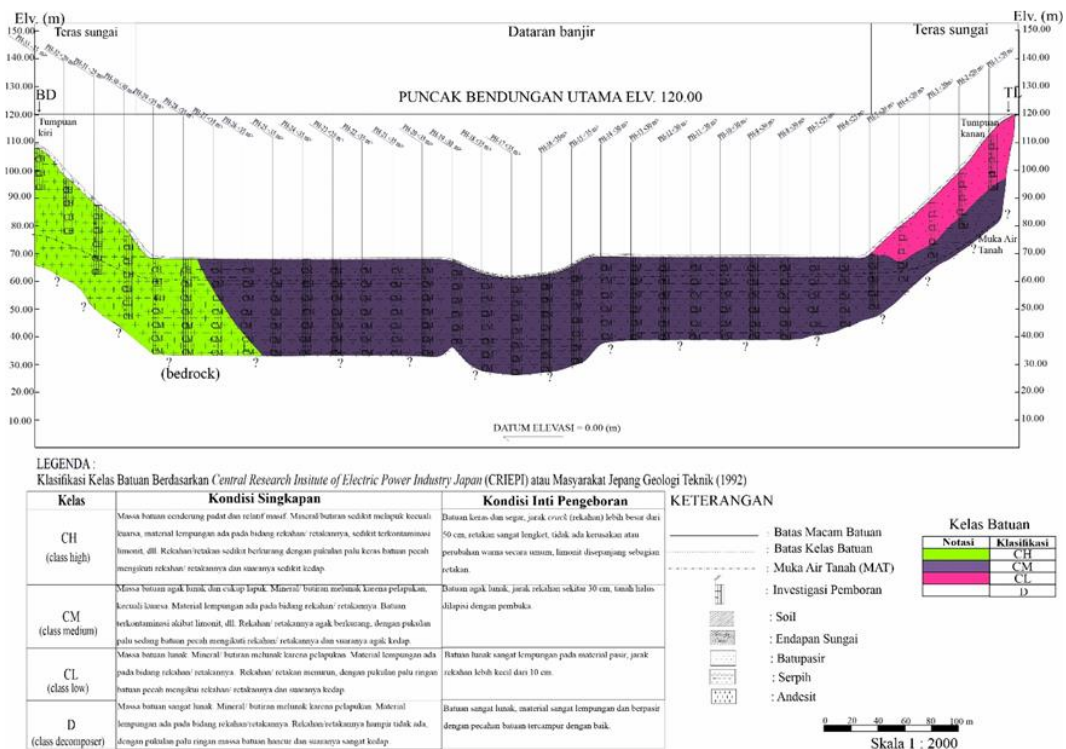
3.2. Kelas Batuan

Hasil pengamatan kelas batuan berdasarkan CRIEPI (1992) ditemukan bahwa, di lokasi penelitian terbagi menjadi 3 kelas batuan. Kelas batuan CL berada pada timur laut tubuh bendungan litologi batupasir, dengan ciri batuan lunak, butiran melunak karena pelapukan, kohesi rekahan/retakan berkurang, dipukul palu ringan batuan pecah mengikuti rekahan/retakannya, terdapat material lempung pada bidang rekahan/retakannya dan dipukul palu suaranya kedap.

Kelas batuan CM mendominasi daerah penelitian ditemukan pada litologi batu serpih, dengan ciri batuan agak lunak, butiran melunak karena pelapukan dan batuan pecah mengikuti rekahan/retakannya dipukul palu sedang. Kelas batuan CH berada pada barat daya lokasi penelitian, umumnya ditemukan pada litologi batuan andesit, dengan ciri batuan masif dan padat dan dipukul palu keras batuan pecah mengikuti rekahan/retakannya dan suaranya sedikit kedap (Gambar 9).



Gambar 8. Penampang geologi berdasarkan pengeboran inti



Gambar 9. Penampang geologi berdasarkan kelas batuan

Lokasi penelitian memiliki nilai RQD bervariasi dan nilai rata-rata RQD diperoleh 25-55 % (jelek - sedang) ditandai dengan adanya hasil *coring* putus-putus. Berdasarkan hasil pengeboran dapat diketahui fondasi batuan termasuk dalam kepadatan batuan kelas CM. Selain itu, terdapat sebagian kelas CL dan CH. Kelas batuan untuk fondasi bendungan harus berada pada kelas batuan yang baik. Namun, di lokasi penelitian kelas batuan CH memiliki kualitas batuan jelek - sedang (Gambar 9). Oleh karena itu, perlu dilakukan *treatment* pada semua kelas batuan CL, CM, dan CH meningkatkan daya dukung batuan.

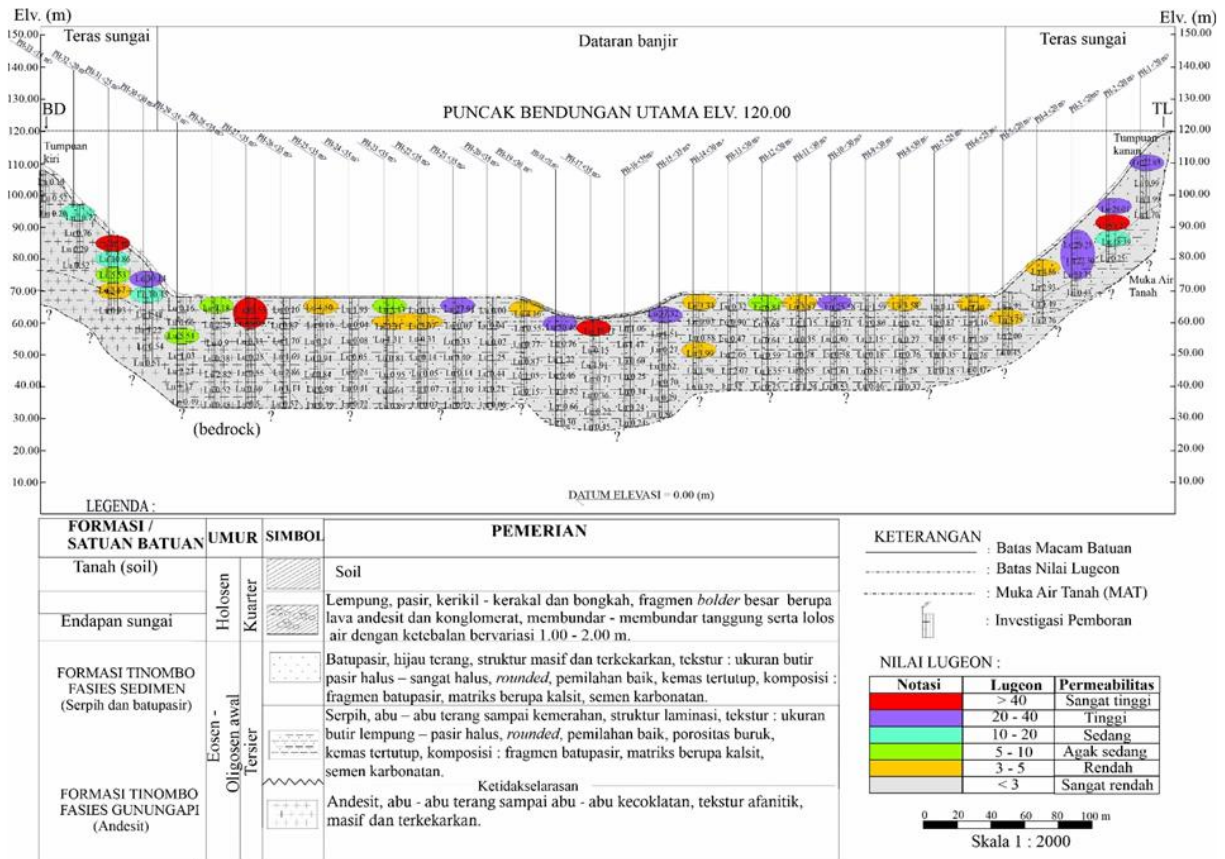
3.3. Nilai Lugeon

Batuan dasar fondasi bendungan memiliki nilai lugeon bervariasi setiap kedalaman lubang bor dan ditinjau dari klasifikasi nilai lugeon pada Bendungan Lolak, daerah penelitian dibagi menjadi 6 zona permeabilitas yang didapatkan dari pengukuran WPT yaitu zona permeabilitas sangat tinggi nilai lugeon >40 liter/menit, permeabilitas tinggi nilai lugeon 20-40 liter/menit, permeabilitas sedang nilai lugeon 10-20 liter/menit, permeabilitas agak sedang nilai lugeon 5-10 liter/menit, permeabilitas rendah nilai lugeon 3-5 liter/menit, dan permeabilitas sangat rendah yang dengan nilai lugeon <3 liter/menit. Pengukuran WPT daerah tubuh bendungan, diperoleh nilai rata-rata Lu 4.43 liter/menit, serta didominasi nilai lugeon <3 yang menunjukkan satuan andesit, satuan serpih, dan satuan batupasir. Digunakan sebagai batuan dasar fondasi bendungan memiliki permeabilitas rendah, hal ini didukung dengan adanya batuan dasar fondasi bendungan didominasi oleh kelas batuan CM massa batuan agak lunak.

Hasil pengamatan penampang geologi berdasarkan nilai lugeon diperoleh beberapa lokasi bor memiliki permeabilitas sangat tinggi masuk dalam zona pertama yaitu pada PH 02, PH 17, PH 27 dan PH 31 yang ditandai dengan warna merah pada penampang. PH 02 didapatkan nilai lugeon 94.22 liter/menit dengan litologi batupasir pada kedalaman 6-10 meter (Tabel 3). Hasil pengeboran inti batupasir pada PH 02 memiliki kondisi hancur dan mudah meloloskan air sehingga memiliki permeabilitas sangat tinggi. PH 17 litologi berupa serpih, memiliki nilai lugeon 45.71 liter/menit pada kedalaman 1-5 meter. PH 27 memiliki nilai lugeon 89.53 liter/menit, litologi berupa serpih dengan kondisi batuan sudah hancur dilihat dari data pengeboran inti dan pada PH 31 memiliki nilai lugeon 46.46 liter/menit pada kedalaman 1-5 meter (Tabel 3).

Tabel 3. Hasil pengukuran WPT pada pilot hole

PH	Lu	PH	Lu	PH	Lu	PH	Lu	PH	Lu	PH	Lu	PH	Lu
01	22.8	08	0.35	13	0.64	17	0.24	21	27.91	25	4.50	29	0.16
	0.99		0.18		0.59		45.71		0.07		0.16		0.66
	1.99		3.58		1.55		0.15		0.33		0.24		5.54
	1.70		0.42		0.75		1.91		0.40		0.94		1.03
02	28.01	09	0.27	14	0.90	18	0.71	22	0.14	26	0.84	30	2.23
	94.22		0.76		0.47		0.36		1.10		0.98		1.17
	18.39		0.28		2.05		0.22		0.73		0.39		0.49
	0.25		0.37		2.07		0.45		0.18		0.10		30.14
03	29.23	10	1.59	15	0.32	19	30.46	23	3.07	27	0.87	31	10.45
	22.30		0.86		3.34		0.76		0.31		1.70		1.48
	23.35		1.15		0.03		1.22		0.14		1.69		1.22
	0.43		0.18		0.58		0.46		0.05		2.86		0.54
04	4.86	11	0.51	16	3.39	20	0.52	24	0.07	28	1.14	33	0.51
	2.93		0.46		1.50		0.66		0.07		0.57		46.46
	1.49		25.58		0.32		0.30		5.43		89.53		10.86
	2.76		0.71		37.52		4.16		3.31		68.09		5.53
05	1.95	12	0.40	16	1.51	19	0.55	23	1.31	27	0.33	32	3.67
	3.75		0.38		0.27		0.77		0.81		0.25		0.99
	2.00		1.61		0.62		0.87		0.95		0.05		10.77
	0.45		0.53		0.70		1.05		0.64		0.69		0.76
06	4.40	13	3.87	16	0.29	20	0.15	24	0.89	28	0.5	33	0.29
	1.16		1.15		0.56		0.00		1.93		7.18		0.52
	1.20		0.35		1.06		0.04		0.04		2.29		0.19
	0.76		0.78		1.47		0.02		0.08		0.9		0.52
07	0.45	14	0.55	16	0.60	19	1.25	23	0.05	27	0.38	32	0.20
	0.11		1.24		0.25		0.44		0.24		2.84		
	0.87		6.84		0.34		0.21		0.41		0.52		
	0.45		0.68		0.24		0.06		0.22		0.40		



Gambar 10. Penampang geologi berdasarkan nilai lugeon

Zona kedua memiliki permeabilitas tinggi terdapat pada PH 01, PH 02, PH 03, PH 10, PH 15, PH 18, PH 21, dan PH 30, dapat dilihat dengan warna ungu pada penampang. Ditemukan pada litologi batupasir, serpih dan andesit. Zona ketiga memiliki permeabilitas sedang terdapat pada PH 02, PH 30, PH 31, dan PH 32, ditemukan pada litologi batupasir dan didominasi oleh litologi andesit, yang ditandai dengan warna biru pada penampang. Zona keempat memiliki permeabilitas sedang berada pada PH 12, PH 23, PH 28, PH 29, dan PH 31, ditemukan pada litologi serpih dan andesit, yang ditandai warna hijau pada penampang. Zona kelima memiliki permeabilitas rendah, terdapat pada PH 04, PH 05, PH 06, PH 08, PH 11, PH 14, PH 19, PH 22, PH 23, PH 25, dan PH 31. Terdapat pada ketiga litologi batupasir, serpih dan andesit pada penampang ditandai dengan warna kuning. Zona terakhir memiliki nilai lugeon <3 permeabilitas sangat rendah dan ditemukan di semua titik pengeboran, pada penampang ditandai dengan warna abu-abu.

Besarnya nilai lugeon pada lokasi penelitian selain dipengaruhi oleh litologi dan kelas batuan juga dipengaruhi oleh adanya permeabilitas batuan berupa porositas primer (pori batuan) terbentuk secara alami pada batupasir dan serpih dan porositas sekunder (kekar) pada batuan serpih dan batuan andesit. Hal ini mendukung hasil pengamatan pada peta geologi regional yang memiliki arah tegasan relatif sama. Kekar tersebut memotong kekar lain dan dapat diinterpretasikan bahwa gaya dari pembentukan kekar tersebut merupakan aktivitas tektonik yang lebih muda. Hal inilah yang menyebabkan besarnya nilai lugeon yang bervariasi pada setiap lubang bor batupasir, serpih maupun andesit. Hasil korelasi nilai lugeon pada semua lubang bor didapatkan rangkuman permeabilitas atau nilai lugeon batuan pada daerah penelitian yang dapat dilihat pada penampang geologi berdasarkan nilai lugeon (Gambar 10).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin ke dalam lubang bor, tingkat kepadatan lapisan semakin padat. Hal ini dikarenakan lapisan yang berada di bawahnya mengalami kompaksi akibat pembebanan lapisan di atasnya (*overburden*). Kompaksi ditandai dengan adanya nilai koefisien permeabilitas atau nilai lugeon semakin ke dalam lubang bor nilainya semakin kecil. Sesuai dengan standar nilai lugeon yang diizinkan untuk fondasi bendungan yaitu $Lu < 3$ (Fitriadi, 2018), maka perlu dilakukan perbaikan fondasi berupa *grouting*. Perbaikan dilakukan dengan injeksi semen

dengan tekanan tertentu pada zona permeabilitas rendah sampai sangat tinggi. Hal ini ditandai dengan warna kuning, hijau, biru, ungu, dan merah. Penampang lugeon untuk penurunan nilai lugeon batuan fondasi bendungan, dapat meningkatkan daya dukung batuan dasar fondasi bendungan.

Batuan dasar fondasi Bendungan Lolak memiliki kekuatan dan ketahanan yang baik. Akan tetapi pada bagian atas permukaan sangat rentan mengalami pelapukan apabila terekspos oleh udara dan air secara terus menerus terutama pada bagian atas dekat permukaan bendungan. Batuan dasar fondasi bendungan memiliki struktur geologi (kekar) dan pelapukan yang *intens* sehingga rawan mengalami rembesan (*piping*). Kekar atau celah dalam batuan terjadi secara alami dan karena pengaruh galian membentuk rembesan air yang menyebabkan deformasi pada bendungan di bawah tekanan beban. Oleh karena itu, dilakukan perbaikan pada fondasi batuan dasar bendungan dengan *grouting* dengan mengisi bukaan batuan berupa kekar, celah maupun retakan dengan semen di bawah tekanan pada setiap kedalaman lubang bor. Kapasitas semen yang digunakan sesuai dengan hasil pengukuran *water pressure test* untuk menjaga batuan fondasi tidak rusak, sehingga dapat mengurangi intensitas aliran rembesan air dari muka bendungan (daerah genangan bendungan). Oleh karena itu, metode *core logging* dan *water pressure test* yang digunakan dalam penelitian sebagai studi geologi fondasi bawah permukaan bendungan secara keteknikan penting dilakukan mengetahui karakteristik setiap lapisan fondasi bawah permukaan sebagai upaya perbaikan untuk meningkatkan daya dukung bendungan.

4. KESIMPULAN

Litologi batuan dasar fondasi Bendungan Lolak bertumpu pada Satuan Batupasir, Satuan Serpih dan Satuan Andesit. Kelas batuan yang berkembang pada daerah penelitian didominasi oleh kelas batuan CM (*class medium*) massa batuan agak lunak. Bendungan Lolak memiliki 6 zona permeabilitas yaitu sangat tinggi, tinggi, sedang, agak sedang, rendah dan sangat rendah dengan rata-rata nilai lugeon adalah Lu 4.43 dan memiliki permeabilitas yang rendah. Standar nilai lugeon yang diizinkan oleh Bendungan Loak adalah Lu <3 sehingga perlu dilakukan perbaikan untuk meningkatkan daya dukung batuan fondasi.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Balai Wilayah Sungai Sulawesi -1 Manado dan PT Indra karya yang telah banyak membantu dalam penelitian di wilayah proyek pembangunan Bendungan Lolak.

6. REFERENSI

- Apandi, & Bachri, S. (1997). *Peta Geologi Lembar Kotamubagu Sulawesi*. Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi. Bandung.
- Balandatu, N. (2021). Dampak Pembangunan Bendungan Lolak Terhadap Kehidupan Masyarakat di Kecamatan Lolak Kabupaten Bolaang Mongondow. *Jurnal Governance* 1,(2). 1-9.
- [BSN] Badan Standarisasi Nasional. (2008). SNI 2411:2008. *Cara Uji Kelulusan Air Bertekanan di Lapangan*. Jakarta. Badan Sandarisasi Nasional.
- [CRIEPI] Central Research Insitute of Electric Power Industry. (1992). *CRIEPI Rock Mass Classification, Standar For Geological Investigation of Dam Fondations For Dam Design*. Central Research Insitute of Electric Power Industry Japan.
- Deere D.U., & Deere D.W. (1967). *Rock Quality Designation (RQD) Index*. Departement of the Army, U.S. Corps of Enggineers. Washington DC.
- Fitriadi, R. (2018). Geologi dan Investigasi Pondasi Bendungan Mila, Desa Rababaka, Kecamatan Woja, Kabupaten Dompu, Provinsi Nusa Tenggara Barat. Skripsi. UPN Veteran:Yogyakarta.
- Irawan, P., & Handiman, I. (2016). Analisa Geologi Teknik Dalam Perencanaan Bendung Daerah Irigasi Parigi Kabupaten Pangandaran. *Jurnal Siliwangi Seri Sains dan Teknologi*, 2(2). 143-148.

- Pane, R.A., & Anaperta, Y.M (2019). Karakterisasi Massa Batuan dan Analisis Kestabilan Lereng Untuk Evaluasi Geometri Lereng di Pit Barat Tambang Terbuka PT. AICJ (Allied Indo Coal Jaya) Kota Sawahlunto Provinsi Sumatera Barat. *Bina Tambang*
- Sastrawan, F. D., Arisalwadi, M., & Rahmania, R. (2020). Identifikasi Lapisan Bawah Permukaan Berdasarkan Data Resistivitas 2 Dimensi. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 6(2), 99-105.
- Siswanto, S., & Anggraini, D. (2018). Perbandingan Klasifikasi Massa Batuan Kuantitatif. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 1(2), 67-73.