

Analisis Nilai Lugeon dan *Grout Take* Berdasarkan Hasil *Trial Grouting* pada Sandaran Kanan Bendungan Ameroro untuk Mengidentifikasi Korelasi Nilai Lugeon dengan Kondisi Geologi Batuan Pondasi

Zhafarina Malaha Nasmiarta^{*1}, Suharyanto, Sukamta, Agung Permana²

¹ Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

² Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat
Jl. Balai Kota IV, Pondambea, Kadia, Kota Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia 93115

Abstrak

Pondasi Bendungan Ameroro tersusun dari batuan metamorf sekis yang memiliki sebaran kekar terbuka dengan jarak spasi rata-rata 12,5 cm dan bukaan kekar 1-5 cm. Hal tersebut dapat berpotensi terjadinya rembesan air melalui sela-sela rekahan sehingga diperlukan adanya perbaikan pondasi pada Bendungan Ameroro dengan metode *grouting*. Sebelum dilakukan pekerjaan *grouting*, dilakukan pekerjaan *trial grouting*. Penelitian ini dilakukan untuk melihat korelasi nilai lugeon dengan kondisi geologi batuan pondasi. Metode yang dilakukan adalah uji permeabilitas (uji lugeon). Dari hasil uji lugeon, di lubang pilot, lubang primer dan lubang sekunder menunjukkan bahwa semakin dalam lubang *trial grouting*, nilai lugeon akan semakin kecil sedangkan semakin besar nilai lugeon, *grout take* akan semakin besar. Namun, pada lubang cek terdapat nilai lugeon yang masih tinggi di kedalaman 10 meter yaitu 5,17 – 8,14, di kedalaman 20 – 25 meter juga memiliki nilai yang tinggi yaitu 4,86. Hal ini sesuai dengan peta geologi pada sandaran kanan sedalam 35 meter memiliki struktur batuan yang kurang bagus sehingga memiliki nilai lugeon cukup tinggi dan besar *grout take* tinggi.

Kata kunci: *trial grouting*; nilai lugeon; *grout take*; pondasi bendungan; batuan metamorf

Abstract

[**Title: Analysis of Lugeon and Grout Take Values Based on the Results of Trial Grouting on the Right Abutment of Ameroro Dam**] Foundation of Ameroro Dam dominated by schist metamorphic rock which consist of scattered open. It could potentially cause water seepage through the cracks and it is necessary to repair the foundation of dam using *grouting* method. Before *grouting* is carried out, *trial grouting* is being held. This research was conducted to see the correlation between the lugeon value and the geological condition of the foundation rock. The method that we used in this paper is permeability test (lugeon test). From the results of the lugeon test, in pilot hole, primary hole, and secondary hole it show that the deeper *trial grouting* hole are, the smaller the lugeon value are became and the bigger the lugeon value are, the *grout take* value became higher. Meanwhile in check hole, at 10 metres depth and 20 – 25 metres depth, there were high lugeon values of 5,17 – 8,14 and 4,86 respectively. It concluded that from geology maps on right abutment of Ameroro Dam from 35 metres depth, it has a poor rock structures and contains high lugeon values and high *grout takes*.

Keywords: *trial grouting*; lugeon value; *grout take*; dam foundation; metamorphic rock

^{*}) Penulis Korespondensi.

E-mail: zhafarinamalaha@gmail.com

1. Pendahuluan

Bendungan memiliki banyak manfaat untuk pemenuhan kebutuhan manusia namun memiliki potensi bahaya yang besar jika tidak dilakukan suatu

perencanaan yang matang. (Purwanto, Juwono, & Asmaranto, 2017) Salah satu aspek dalam perencanaan pembangunan suatu bendungan baru adalah memperhatikan dan mengantisipasi agar tidak terjadi kegagalan bendungan saat bendungan telah selesai konstruksi dan beroperasi. Desain konstruksi bendungan harus aman dan layak terhadap kegagalan struktural, kegagalan hidrolis dan kegagalan rembesan (Bendungan, 2015). Salah satu penyebab kegagalan bendungan urugan dapat terjadi akibat adanya internal erosi pada pondasi bendungan (ICOLD, 1995) Internal erosi pada pondasi bendungan dapat terjadi apabila kondisi batuan pondasi bendungan tidak memiliki spesifikasi yang sesuai dengan kriteria rembesan pada pondasi bendungan. Untuk mengurangi resiko apabila terjadi internal erosi pada pondasi maka diperlukan adanya perlakuan perbaikan pondasi bendungan diantaranya yaitu perbaikan pondasi dengan metode *grouting*.

Bendungan Ameroro adalah salah satu bendungan yang saat ini dalam masa konstruksi (per September 2023). Bendungan Ameroro terletak di Kabupaten Konawe Provinsi Sulawesi Tenggara dan direncanakan berfungsi sebagai *multipurpose dam* dengan fungsi air baku, irigasi, pengendalian banjir, PLTS, PLTMH dan pariwisata. Pada pondasi Bendungan Ameroro, struktur batuan pondasi didominasi oleh batuan metamorf sekis. Namun, di sela-sela batuan metamorf sekis tersebut terdapat kekar terbuka yang tersebar dan berspasi jarang-rapat dengan jarak spasi rata-rata 12,5 cm dan bukaan kekar $\pm 1-5$ cm. Dari data geologi batuan tersebut dapat dilihat bahwa adanya kekar terbuka dapat berpotensi adanya rembesan air yang dapat melewati sela-sela rekahan tersebut. Melihat permasalahan tersebut maka diperlukan adanya perbaikan pondasi pada Bendungan Ameroro (Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, 2017).

Berdasarkan data perencanaan Bendungan Ameroro, telah direncanakan untuk melakukan metode perbaikan pondasi dengan metode *grouting*. Metode *grouting* ini sudah cukup banyak dilakukan di bendungan-bendungan yang memerlukan adanya perbaikan pondasi. Salah satu kelebihan dari metode *grouting* adalah mudah dilaksanakan di lapangan dan tidak memerlukan biaya yang besar dibandingkan dengan metode perbaikan pondasi yang lain seperti *secant pile* atau *diaphragm wall*. (R. A. M. Putra, Putra, & Wahono, 2022).

Sebelum dilakukan pekerjaan *grouting* di lapangan, dilakukan pekerjaan *trial grouting* terlebih dahulu. *Trial grouting* berfungsi untuk menetapkan kriteria *grouting* yang tepat seperti metode *grouting*, urutan *grouting*, tekanan maksimum *grouting* yang diijinkan, campuran dan penyelesaian *grouting*. Hal tersebut dipakai untuk dijadikan pedoman pelaksanaan pekerjaan *grouting* di pondasi bendungan. *Trial grouting*

pada Bendungan Ameroro dilaksanakan di tiga titik yaitu di sandaran kanan, palung sungai (*river bed*) dan sandaran kiri. Namun pada penelitian ini menganalisa hanya pada lokasi sandaran kanan saja dikarenakan pada lokasi sandaran kanan terdapat formasi batuan pondasi yang lebih beragam dan memiliki rongga dan rekahan yang lebih tersebar dibandingkan pada dua lokasi yang lain berdasarkan data perencanaan yang telah dilakukan.

Pada penelitian ini dilakukan analisis terkait nilai lugeon yang dihasilkan dari *trial grouting* apakah sudah sesuai dengan persyaratan dan juga kondisi geologi batuan pondasi bendungan. Selain itu dilakukan analisis *grout take* yang dilakukan pada saat injeksi *grout* saat *trial grouting*, bagaimana korelasi antara *grout take* dan kedalaman lubang saat injeksi *grout*. Pada studi kasus ini diharapkan dapat mengetahui bagaimana korelasi antara nilai lugeon, *grout take*, dan kedalaman lubang saat *trial grouting* dengan kondisi geologi batuan pondasi. Dengan melihat korelasi tersebut kita dapat mengetahui apakah hasil *trial grouting* sudah berhasil dan sesuai dengan kondisi batuan pondasi.

2. Bahan dan Metode

Data yang digunakan pada studi kasus ini adalah data sekunder berupa laporan akhir perencanaan DED Bendungan Ameroro, laporan *trial grouting*, laporan konstruksi terkait metode *grouting* saat konstruksi berjalan, laporan hasil pengujian tanah, denah dan potongan penggambaran pelaksanaan *grouting* di lapangan, dan laporan lainnya yang menunjang penelitian ini.

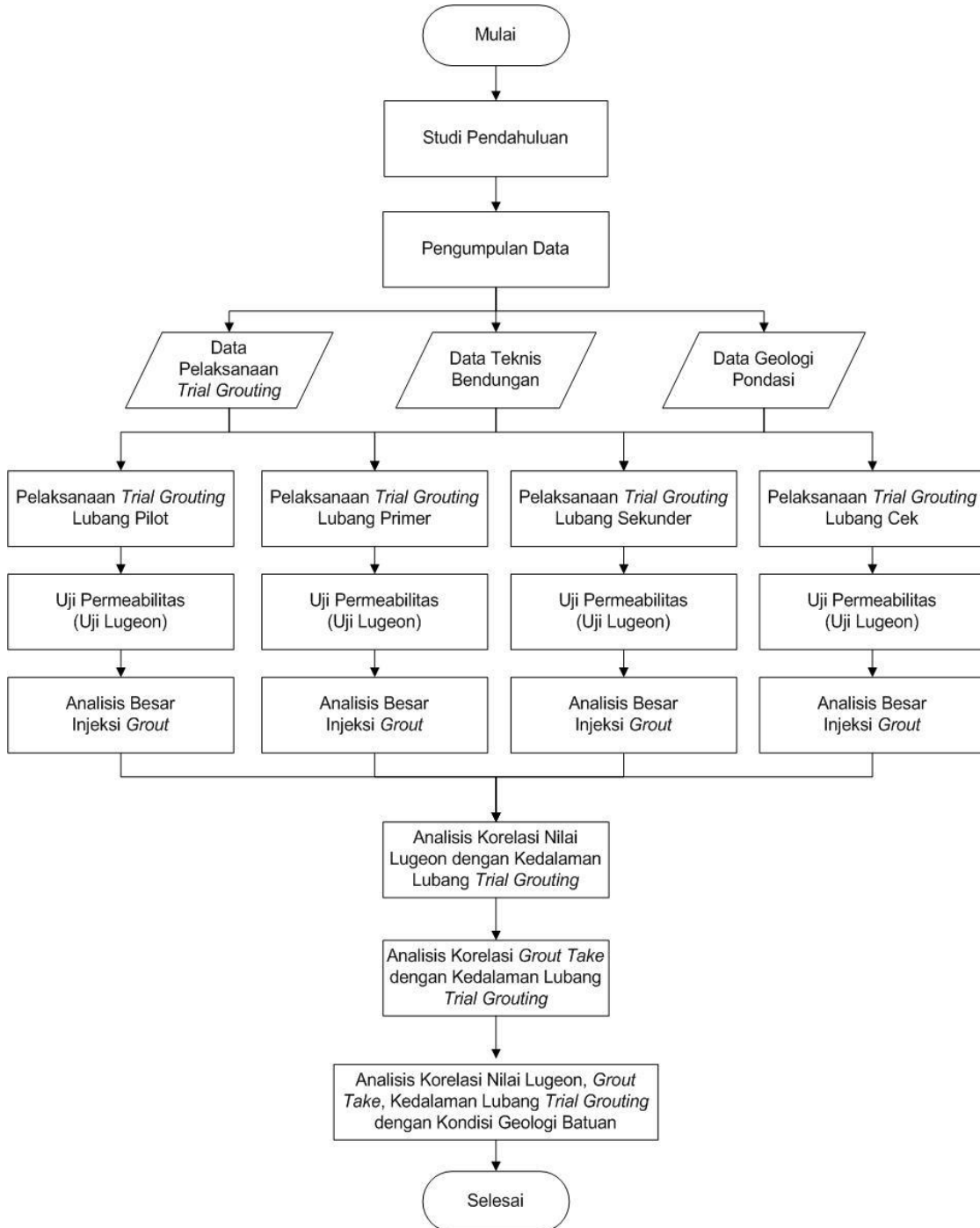
Pengujian *trial grouting* akan dilakukan pada empat titik lubang. Pengujian pada empat lubang tersebut dilakukan secara berurutan dan berakhir pada lubang cek. Lubang cek ini berfungsi sebagai validator dalam melihat angka nilai lugeon apakah telah menunjukkan efektivitas dalam pelaksanaan *trial grouting*. Hasil pada lubang cek juga dapat dijadikan bahan evaluasi dalam penentuan respons batuan terhadap injeksi *grout* yang telah dilakukan agar dapat mencapai hasil optimal dan tetap menjaga kondisi rekahan pondasi bawah permukaan agar tidak semakin tersebar atau melebar (Adhitama & Sadisun, 2021).

Untuk diagram alir dapat dilihat pada Gambar 1. Hal yang pertama dilakukan adalah mengumpulkan data pelaksanaan *trial grouting* yang telah dilakukan di lapangan yaitu pada lubang pilot, lubang pilot, lubang primer, lubang sekunder dan lubang cek. Setelah mendapat data *trial grouting* berikutnya dilakukan analisa uji lugeon dan analisa besar injeksi *grout*. Setelah mendapatkan nilai lugeon dan nilai besar injeksi *grout* pada tiap lubang *trial grouting*, dilakukan Analisa korelasi nilai lugeon dengan kedalaman lubang *trial grouting*, korelasi *grout take* dengan kedalaman lubang *trial grouting*, analisa korelasi nilai.

2.1 Kondisi Batuan Pondasi Bendungan Ameroro

Pada daerah Bendungan Ameroro banyak tersingkap batuan metamorf sekis, yang merupakan batuan tertua di daerah ini. Batuan sekis merupakan batuan metamorf yang terbentuk pada derajat metamorfisme rendah hingga sedang (*low grade metamorphism*) berbentuk lembaran mengkerut,

bergelombang, atau tidak beraturan dalam skala kecil. Komposisi mineral utama penyusunnya berupa mika muskovit dan biotit serta sedikit grafit dan hornblende. Mineral mika bersifat mudah lapuk jika terpapar udara bebas (teroksidasi). Proses terbentuknya batuan sekis ini di pengaruhi oleh tekanan yang lebih dominan dibandingkan dengan pengaruh suhu, sehingga terlihat



Gambar 1. Diagram alir penelitian



Gambar 2. Batuan metamorf sekis dengan struktur foliasi berupa lembaran (Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, 2019)



Gambar 3. Batuan metamorf sekis kekar sedang (Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, 2019)

seperti terlipat lipatan. Untuk batuan metamorf sekis dengan struktur foliasi berupa lembaran dapat dilihat pada Gambar 2.

Struktur geologi yang ditemukan adalah kekar terbuka yang berspasi jarang hingga rapat. Di beberapa tempat kekar telah terisi oleh mineral kuarsa dan berkembang cukup panjang. Umumnya kekar-kekar di daerah sekitar Bendungan Ameroro merupakan kekar-kekar terbuka dengan bukaan kecil hingga sedang. Jarak antar kekar dari jarang hingga rapat. Untuk batuan metamorf sekis kekar sedang dapat dilihat pada Gambar 3.

2.2 Metode Grouting

Metode *grouting* adalah salah satu metode yang dapat dilakukan untuk perbaikan pondasi bendungan. Metode ini menggunakan material tertentu yang diinjeksikan ke dalam celah-celah lapisan batuan pondasi yang nantinya dapat menutup dan mengisi celah batuan agar batuan menjadi lebih massif dan meningkatkan kekedapan batuan (Bendungan, 2015). *Grouting* bertujuan untuk membuat batuan atau tanah menjadi lebih kuat, padat dan dapat menutup ruang kosong yang ada pada sela-sela rekahan batuan. (Hatmoko & Suryadharma, 2020). Jenis material yang digunakan pada metode ini, kedalaman *grouting*, dan jenis metode *grouting* ditentukan oleh bagaimana struktur geologi pondasi dan tipe bendungan.

Beberapa jenis metode *grouting* adalah *Grouting Selimut (Blanket Grouting)*, *Grouting Tirai*, *Grouting Konsolidasi*, *Grouting Semprot*, dan *Grouting Kontak* (PUPR, 2005). Metode *grouting* ini cukup banyak digunakan saat konstruksi bendungan. Di beberapa bendungan dilakukan kombinasi beberapa metode *grouting* yang telah disebut di atas.

2.3. Trial Grouting

Pelaksanaan *trial grouting* dilakukan sebelum pekerjaan *grouting* dilakukan. Pada pelaksanaannya,

kedalaman lubang *trial grouting* belum mempertimbangkan besarnya kecepatan aliran rembesan, filtrasi, uplift dan piping pada tubuh bendungan. Untuk menentukan kedalaman lubang *trial grouting* pada umumnya menggunakan Persamaan 1.

$$D = \frac{1}{3}H + C \quad (1)$$

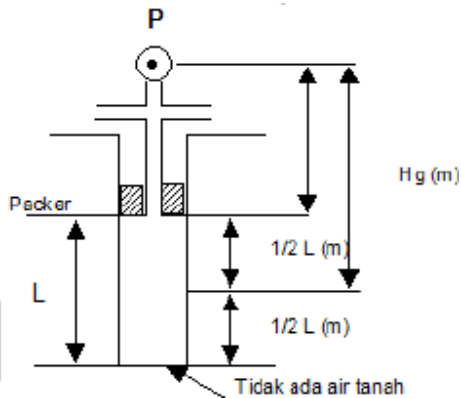
Dimana D adalah kedalaman lubang bor (m), H adalah ketinggian air statis waduk (m), C adalah konstanta (8-20 m) (Sosrodarsono & Takeda, 1977).

Kegunaan *trial grouting* ini adalah untuk memberikan gambaran hal-hal: (1) bahan *grouting* yang akan digunakan; (2) Jarak antar lubang *grouting*; (3) Kedalaman *grouting*; (4) Metode *grouting*; (5) Tekanan injeksi *grouting*; dan (6) Proporsi campuran *grouting*. Melalui *trial grouting* hal-hal tersebut dapat ditentukan sehingga dapat menjadi acuan dalam pelaksanaan *grouting*. Pelaksanaan *trial grouting* dilakukan pada empat titik lubang yaitu: lubang pilot, lubang primer, lubang sekunder, dan lubang cek.

Pengerjaan *trial grouting* dilakukan secara bertahap dari lubang pilot lalu dilanjutkan lubang primer dan sekunder lalu diakhiri pada lubang cek. Untuk tahap pengerjaan masing-masing lubang dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6

2.4. Uji Permeabilitas (Uji Lugeon)

Uji permeabilitas pada penelitian ini menggunakan metode *Packer Test*. *Packer test* merupakan metoda pengujian permeabilitas dengan prinsip *close-end* atau tertutup. *Packer* merupakan suatu peralatan yang dapat digunakan untuk membentuk suatu sistem penyekat di dalam lubang bor, sehingga dapat membatasi bagian-bagian tanah/batuan yang akan diuji. Syarat dapat dilakukannya *packer test* adalah lapisan yang diuji merupakan formasi batuan yang kompak dan



Gambar 4. Uji Lugeon (Badan Standardisasi Nasional, 2008)

padat. Adapun tujuan dari metode pengujian ini adalah untuk memperoleh konduktivitas hidraulik dan nilai Lugeon. Beberapa pengertian yang berkaitan dengan metode pengujian ini : (1) sifat lulus air batu atau tanah adalah kemampuan batu atau tanah mengalirkan air melalui rongga antar butir dan atau diskontinuitas; (2) diskontinuitas adalah bidang atau celah yang menyebabkan batu bersifat tidak menerus, antara lain berupa perlapisan, kekar, dan sesar; (3) koefisien kelulusan air (k) adalah angka yang menunjukkan kemampuan batu atau tanah mengalirkan air dan dinyatakan dalam satuan panjang dibagi satuan waktu (cm/detik); (4) satu Lugeon (1 Lu) adalah banyaknya air dalam liter per menit yang masuk ke dalam batu atau tanah melalui lubang bor sepanjang satu meter dengan tekanan 10 bar (1 bar = 1,0197 kg/cm²) (Syaeful, 2013).

Dalam melakukan uji permeabilitas ada dua tahap yang harus dilakukan yaitu perhitungan koefisien kelulusan air dan perhitungan nilai lugeon

2.4.1 Perhitungan Koefisien Kelulusan Air (k)

Rumus yang digunakan dalam perhitungan koefisien kelulusan air (k) tergantung pada panjang bagian tanah atau batuan yang diuji (L), dapat dilihat pada

Persamaan 2 dan Persamaan 3 (Asy’ari, Hidayatullah, Lestari.S, Kahar, & Kristiyono, 2021).

Untuk $L \geq 10r$ dapat menggunakan Persamaan 2

$$k = \frac{Q}{2\pi L h} \ln\left(\frac{L}{r}\right) \tag{2}$$

Untuk $10r > L \geq 10r$ dapat menggunakan Persamaan 3

$$k = \frac{Q}{2\pi L h} \sinh^{-1}\left(\frac{L}{2r}\right) \tag{3}$$

dengan k adalah koefisien kelulusan air, Q adalah debit air yang masuk, L adalah panjang lubang bor yang diuji, r adalah jari-jari lubang bor dan h adalah hp tambah hs (hp adalah tinggi air yang diperoleh dari konversi pembacaan manometer dan hs adalah tinggi tekanan air)

2.4.2 Perhitungan Nilai Lugeon

Perhitungan nilai Lugeon menggunakan Persamaan 4 atau Persamaan 5 dengan ilustrasi seperti pada Gambar 4 (R. S. Putra, 2019).

$$Lu = \frac{10.Q}{p.L} \tag{4}$$

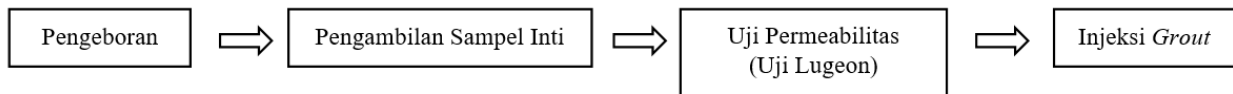
atau

$$Lu = \frac{10.V}{p.L.t} \tag{5}$$

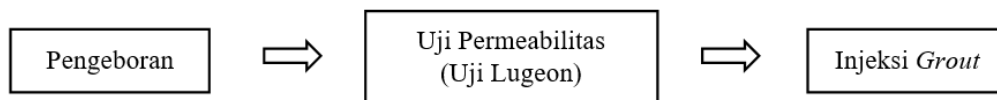
Dimana Lu adalah nilai lugeon, Q adalah debit air yang masuk (liter/menit) melalui lubang bor, p adalah tekanan uji (kg/cm²), p didapat dari pm + ps dimana pm adalah tekanan manometer dan ps adalah tinggi tekanan air yang dikonversikan ke dalam satuan kg/cm², L adalah panjang bagian yang diuji, V adalah volume air yang diinjeksikan (liter) ke lubang bor, t adalah waktu (menit).

2.4.3 Penentuan Nilai Lugeon

Perhitungan uji kelulusan air dengan menggunakan tekanan yang bervariasi dapat menghasilkan nilai Lugeon yang berbeda, tergantung pada kondisi aliran air yang terjadi dalam tanah atau batuan yang diuji. Penentuan nilai Lugeon dilakukan dengan melihat Tabel 1.



Gambar 5. Urutan kerja trial grouting di tiap lubang pilot dan lubang cek (Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, 2022)



Gambar 6. Urutan kerja trial grouting di tiap lubang primer dan lubang sekunder (Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, 2022)

Tabel 1. Penentuan jenis aliran dan nilai Lugeon (Badan Standarisasi Nasional, 2008)

No	Urutan Pengaliran	Skala Tekanan	Skala Nilai Lugeon	Penentuan Jenis Aliran	Pemilihan Nilai Lugeon
1	Aliran I			Nilai lugeon yang hampir sama (Aliran Laminer)	Nilai rata-rata
	Aliran II				
	Aliran III				
	Aliran IV				
	Aliran V				
2	Aliran I			Nilai lugeon terkecil terjadi pada tekanan tertinggi (Aliran Turbulen)	Nilai lugeon terkecil pada tekanan tertinggi
	Aliran II				
	Aliran III				
	Aliran IV				
	Aliran V				
3	Aliran I			Nilai lugeon yang tertinggi terjadi pada tekanan tertinggi (Aliran Dilasi)	Nilai lugeon dari nilai lugeon yang terkecil dari tekanan yang terencdah
	Aliran II				
	Aliran III				
	Aliran IV				
	Aliran V				
4	Aliran I			Nilai lugeon meningkat sesuai dengan pengaliran (Aliran Pengikisan)	Nilai lugeon yang tertinggi
	Aliran II				
	Aliran III				
	Aliran IV				
	Aliran V				
5	Aliran I			Nilai lugeon menurun sesuai dengan tahapan pengaliran (Aliran Penyumbatan)	Nilai lugeon yang terkecil. Biasanya terjadi pada akhir pengaliran/aliran
	Aliran II				
	Aliran III				
	Aliran IV				
	Aliran V				

Tabel 2. Tahapan tekanan lubang pilot dan lubang cek (Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, 2022)

Tahapan (Stages)	Kedalaman (m)	Tahapan Tekanan (kgf/cm ²)							
1	0-5	1,0	1,5	2,5	3,0	2,5	1,5	1,0	
2	5-10	1,0	2,0	3,0	4,0	3,0	2,0	1,0	
3	10-15	1,0	2,0	3,0	4,0	3,0	2,0	1,0	
4	15-20	1,5	2,5	4,0	5,0	4,0	2,5	1,5	
5	20-25	1,5	2,5	4,0	5,0	4,0	2,5	1,5	
6	25-30	2,0	3,5	5,5	7,0	5,5	3,5	2,0	
7	30-35	2,0	3,5	5,5	7,0	5,5	3,5	2,0	
8	35-40	2,5	4,5	7,0	9,0	7,0	4,5	2,5	
9	40-45	2,5	4,5	7,0	9,0	7,0	4,5	2,5	
10	45-50	3,0	5,5	8,5	11,0	8,5	5,5	3,0	
11	50-55	3,0	5,5	8,5	11,0	8,5	5,5	3,0	

Yang pertama dilakukan adalah menghitung nilai lugeon pada tiap pengaliran saat uji permeabilitas. Dari seluruh aliran tersebut dibuat skala nilai lugeon. Skala nilai lugeon yang telah dibuat dan dipetakan dapat dicocokkan dengan jenis aliran yang sesuai. Setelah menemukan jenis aliran yang sesuai maka dapat ditentukan nilai lugeon berdasarkan tabel pemilihan nilai lugeon.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pelaksanaan Trial Grouting Lubang Pilot

Pelaksanaan *trial grouting* pada lubang pilot memiliki tiga tahap yaitu tahap pengeboran, tahap uji permeabilitas atau uji lugeon dan tahap injeksi *grout*.

3.1.1 Pengeboran

Lubang pilot dapat digunakan sebagai lubang pendahuluan untuk mengetahui kondisi geologi pondasi

sebelum dilakukan *grouting*. Pekerjaan pemboran dilakukan adalah pemboran lubang inti dengan lubang bor jenis coring untuk lubang pilot dan lubang cek. Kedalaman pengeboran adalah 55 meter. Diameter lubang pemboran ini tidak boleh lebih kecil dari 55 mm maupun lebih besar dari 87 mm.

3.1.2 Uji Permeabilitas (Uji Lugeon)

Untuk lubang pilot dan lubang cek dilakukan multi tes 7 tahapan lalu pada lubang yang tidak mengambil sampel (lubang primer dan lubang sekunder) hanya dilakukan sekali pengujian tekanan air dengan 1 tahapan tekanan maksimum selama 10 menit. Nilai lugeon dapat dipergunakan untuk menilai kondisi batuan dan permeabilitas sebelum maupun sesudah *grouting*.

Tabel tahapan tekanan yang dilakukan pada lubang pilot dan lubang cek dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 3. Hasil Uji Lugeon Lubang Pilot (Hasil Analisis 2023)

P.RMD-1	
Kedalaman (m)	Lugeon
0-5	40,64
5-10	14,98
10-15	9,96
15-20	6,83
20-25	4,16
25-30	6,84
30-35	1,96
35-40	1,28
40-45	1,79
45-50	1,47
50-55	2,18

Tabel 4. Tahapan Tekanan Lubang Primer dan Lubang Sekunder (Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari, 2022)

Tahapan (Stages)	Kedalaman (m)	Tahapan Tekanan (kgf/cm ²)
1	0-5	3,0
2	5-10	4,0
3	10-15	4,0
4	15-20	5,0
5	20-25	5,0
6	25-30	7,0
7	30-35	7,0
8	35-40	9,0
9	40-45	9,0
10	45-50	11,0
11	50-55	11,0

Untuk hasil uji lugeon pada lubang pilot di sandaran kanan bendungan dapat dilihat pada Tabel 3.

Untuk nilai lugeon pada lubang pilot, semakin dalam lubang, nilai lugeon semakin kecil. Nilai lugeon kecil atau nilai lugeon < 3 maka tidak diperlukan adanya tindakan *grouting*. Berdasarkan Tabel 3, *grouting* dapat dihentikan setelah kedalaman 30 meter.

3.2. Pelaksanaan Trial Grouting Lubang Primer dan Lubang Sekunder

Pelaksanaan *trial grouting* pada lubang primer dan lubang sekunder memiliki tahap yang sama dengan tahap pada lubang pilot

3.2.1 Pengeboran

Lubang primer dan sekunder dilakukan pengeboran tanpa pengambilan sampel inti batuan. Pengeboran pada lubang primer dan sekunder ini menggunakan jenis open hole dengan kedalaman 55 meter dan diameter lubang tidak boleh kurang dari 45 mm.

3.2.2 Uji Permeabilitas (Uji Lugeon)

Pada Tabel 4 dapat dilihat tabel tekanan untuk lubang primer dan lubang sekunder hanya terdiri dari satu tahapan saja. Untuk kedalaman tiap tahapan atau stages memiliki interval kedalaman yang sama dengan pengujian tekanan pada lubang pilot. Sama seperti pengujian pada lubang pilot, tekanan yang diinjeksikan semakin dalam tekanan juga semakin tinggi untuk mencapai kedalaman yang dituju. Untuk hasil uji lugeon lubang primer dapat dilihat pada Tabel 5, dan hasil uji lugeon pada lubang sekunder pada Tabel 6

Hasil uji lugeon pada lubang sekunder hampir sama dengan hasil lugeon pada lubang primer, nilai lugeon juga mengalami pengurangan jika lubang semakin dalam. Pada Tabel 6 dapat dilihat bahwa nilai lugeon < 3 berada pada kedalaman 25 meter – 55 meter sehingga pekerjaan *grouting* dapat dihentikan pada kedalaman tersebut. Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa semakin dalam, nilai lugeon juga semakin kecil. Pada lubang primer ini, *grouting* dapat dihentikan juga sudah mencapai kedalaman kurang lebih 25 meter.

Tabel 5. Hasil uji Lugeon Lubang Primer (Hasil Analisis 2023)

RMD-1 (Primer)	
Kedalaman (m)	Lugeon
0-5	38,58
5-10	29,88
10-15	18,54
15-20	7,13
20-25	5,38
25-30	2,69
30-35	2,52
35-40	1,81
40-45	1,49
45-50	2,54
50-55	2,59

Tabel 6. Hasil Uji Lugeon Lubang Sekunder

RMD-1 (Sekunder)	
Kedalaman (m)	Lugeon
0-5	52,42
5-10	15,8
10-15	12,95
15-20	6,00
20-25	3,84
25-30	2,99
30-35	1,87
35-40	1,28
40-45	0,82
45-50	1,49
50-55	1,85

Tabel 7. Hasil *Grout Take* Lubang Primer (Hasil Analisis 2023)

RMD-1 (Primer)		
Kedalaman (m)	Lugeon	<i>Grout take</i> (kg/m)
0-5	38,58	156,54
5-10	29,88	283,09
10-15	18,54	129,49
15-20	7,13	34,66
20-25	5,38	13,52
25-30	2,69	0,00
30-35	2,52	0,00
35-40	1,81	0,00
40-45	1,49	0,00
45-50	2,54	0,00
50-55	2,59	0,00

Tabel 8. Hasil *Grout Take* Lubang Sekunder (Hasil Analisis 2023)

RMD-1 (Sekunder)		
Kedalaman (m)	Lugeon	<i>Grout take</i> (kg/m)
0-5	52,42	235,93
5-10	15,8	38,83
10-15	12,95	41,85
15-20	6,00	29,08
20-25	3,84	6,97
25-30	2,99	0,00
30-35	1,87	0,00
35-40	1,28	0,00
40-45	0,82	0,00
45-50	1,49	0,00
50-55	1,85	0,00

3.2.3 Injeksi Grout

Seperti pada tahap *trial grouting* di lubang pilot, setelah dilakukan uji permeabilitas untuk mengetahui nilai lugeon, dilakukan injeksi *grout* pada lubang primer dan sekunder. Tabel 7 dan Tabel 8 menunjukkan hasil *grout take* pada lubang primer dan sekunder.

Grout take pada lubang primer ini memiliki karakter yang hampir sama dengan *grout take* pada lubang pilot yaitu semakin dalam lubang *grouting* maka *grout take* semakin kecil karena nilai lugeon juga semakin kecil. Dapat dilihat pada Tabel 7, injeksi *grout* berhenti pada kedalaman 25-55 meter dikarenakan nilai lugeon sudah < 3 sehingga tidak memerlukan adanya injeksi *grout*. *Grout take* dengan nilai terbesar pada lubang primer berada pada kedalaman 5-10 meter. Hal ini disebabkan adanya rongga atau rekahan batuan yang cukup tersebar pada kedalaman tersebut.

Pada lubang sekunder, hasil *grout take* memiliki tren hasil yang hampir sama dengan lubang primer yaitu

injeksi *grout* berhenti pada kedalaman 20-55 meter dimana nilai lugeon semakin kecil jika kedalaman *grout* semakin dalam. Untuk lubang sekunder, nilai *grout take* terbesar berada pada kedalaman 0-5 meter dengan besar *grout take* sebesar 235,93 kg/m. Hal ini disebabkan kondisi batuan pondasi pada kedalaman tersebut adalah jenis batuan/tanah alluvial dimana memiliki struktur batuan yang kurang massif.

3.3 Pelaksanaan Trial Grouting Lubang Cek

Pelaksanaan *trial grouting* pada lubang cek memiliki tahap yang sama dengan tahap pada lubang-lubang sebelumnya.

3.3.1 Pengeboran

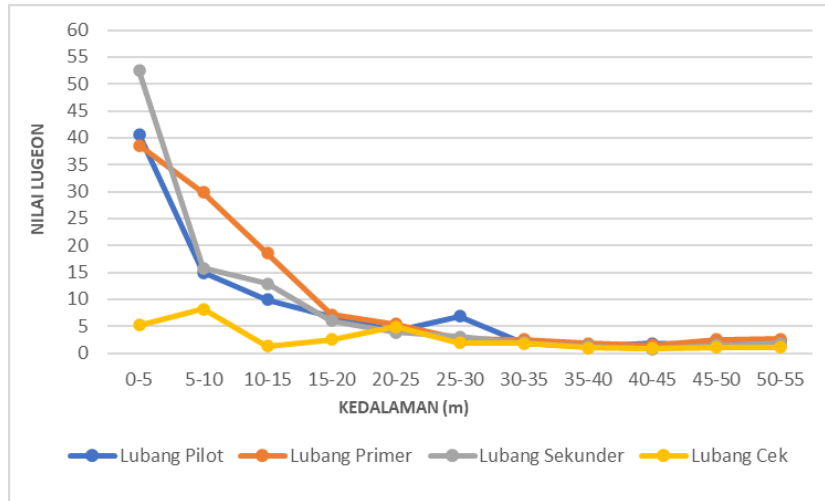
Lubang cek dapat digunakan sebagai lubang pengecekan untuk mengetahui efektifitas penyebaran injeksi semen. Pekerjaan pemboran dilakukan adalah pemboran lubang inti dengan lubang bor jenis coring untuk lubang pilot dan lubang cek. Kedalaman

Tabel 9. Hasil Uji Lugeon Lubang Cek (Hasil Analisis 2023)

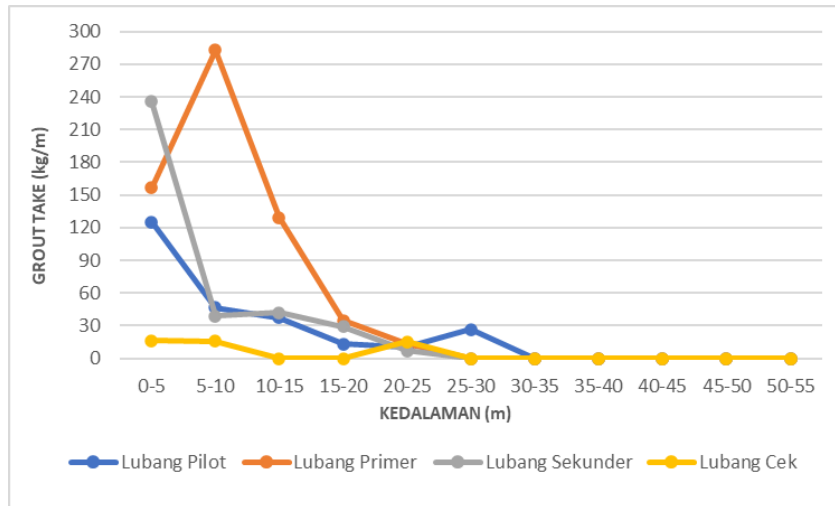
CH.RMD-1	
Kedalaman (m)	Lugeon
0-5	5,17
5-10	8,14
10-15	1,31
15-20	2,50
20-25	4,86
25-30	1,93
30-35	1,79
35-40	0,98
40-45	0,89
45-50	1,05
50-55	1,06

Tabel 10. Hasil *Grout Take* Lubang Cek (Hasil Analisis 2023)

CH.RMD-1		
Kedalaman (m)	Lugeon	<i>Grout take</i> (kg/m)
0-5	5,17	16,26
5-10	8,14	15,77
10-15	1,31	0,00
15-20	2,50	0,00
20-25	4,86	15,26
25-30	1,93	0,00
30-35	1,79	0,00
35-40	0,98	0,00
40-45	0,89	0,00
45-50	1,05	0,00
50-55	1,06	0,00



Gambar 7. Grafik Korelasi antara nilai Lugeon dengan kedalaman lubang Trial Grouting (Hasil Analisis 2023)



Gambar 8. Korelasi antara besar Grout Take dengan kedalaman lubang Trial Grouting (Hasil Analisis 2023)

pengeboran adalah 55 meter. Diameter lubang pemboran ini tidak boleh lebih kecil dari 55 mm maupun lebih besar dari 87 mm. Lubang cek memiliki spesifikasi teknis sama dengan lubang pilot meliputi metode pemboran dan diameter lubang.

3.3.2 Uji Permeabilitas (Uji Lugeon)

Uji permeabilitas pada lubang cek memiliki konfigurasi yang sama dengan lubang pilot yaitu dilakukan dengan multi tes 7 tahapan tekanan masing-masing selama 10 menit dengan tujuan untuk mendapatkan pola aliran lugeon. Tabel tahapan tekanan yang dilakukan sama seperti pada lubang pilot, dapat dilihat pada Tabel 2.

Untuk nilai lugeon pada lubang cek seperti yang terlihat pada Tabel 9 di beberapa kedalaman memiliki nilai lugeon yang lebih kecil dibanding dengan nilai lugeon pada lubang pilot, lubang primer dan lubang

sekunder. Namun, pada kedalaman 10 meter dari permukaan nilai lugeon masih tinggi yaitu masing-masing bernilai 5,17 dan 8,14. Selain itu, di kedalaman 20-25 meter juga memiliki nilai lugeon yang cukup tinggi yaitu 4,86. Hal ini mengindikasikan bahwa pekerjaan trial grouting kurang sesuai dan membutuhkan adanya tambahan pekerjaan grouting karena masih terdapat nilai lugeon > 3 dimana nilai lugeon > 3 harus dilakukan grouting.

3.3.3 Injeksi Grout

Sama seperti pada lubang pilot, lubang primer dan lubang sekunder, setelah dilakukan uji permeabilitas dan telah diketahui nilai lugeon maka selanjutnya dilakukan injeksi grout. Tabel 10 menunjukkan hasil grout take pada lubang cek.

Hasil grout take pada lubang cek ini mengidentifikasi bahwa hasil trial grouting yang

dilakukan pada lubang-lubang sebelumnya sudah memiliki hasil yang baik dan sesuai atau belum. Dapat dilihat pada Tabel 11 nilai *grout take* kg/m memiliki nilai paling kecil dibandingkan dengan lubang-lubang yang lain.

Hal ini terjadi karena rongga-rongga pada batuan telah terisi oleh *grout* yang telah diinjeksikan pada lubang-lubang sebelumnya. Namun dapat dilihat bahwa hanya di beberapa kedalaman saja injeksi *grout* dilaksanakan pada lubang cek ini karena masih terdapat beberapa hasil nilai lugeon > 3 .

3.4 Korelasi Antara Nilai Lugeon dengan Kedalaman Lubang *Trial Grouting*

Telah dianalisa sebelumnya bahwa nilai lugeon yang didapat dari uji permeabilitas memiliki keterkaitan dengan kedalaman lubang *trial grouting*. Hasil nilai lugeon bergantung pada kondisi geologi batuan pondasi bendungan. Kondisi geologi batuan pondasi juga tidak memiliki pola tertentu sehingga kondisi geologi batuan yang kurang baik dapat tersebar di berbagai kedalaman

Dari grafik pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa rata-rata semakin dalam lubang maka nilai lugeon akan semakin kecil. Lubang pilot, lubang primer dan lubang sekunder memiliki tren nilai lugeon yang hampir sama dimana diawali dengan nilai lugeon di atas 30 untuk kedalaman < 5 meter lalu nilai lugeon semakin mengecil seiring dengan bertambahnya kedalaman lubang. Untuk lubang cek memiliki nilai lugeon paling kecil dibandingkan lubang yang lain, namun ada beberapa titik kedalaman nilai lugeon masih > 3 sehingga membutuhkan *grouting* tambahan.

3.5 Korelasi Antara Besar *Grout Take* dengan Kedalaman Lubang *Trial Grouting*

Pada analisa yang telah dilakukan sebelumnya, telah diketahui berapa *grout take* yang terjadi pada tiap lubang *trial grouting* di tiap masing-masing kedalaman. Besarnya jumlah *grout take* pada tiap lubang di tiap kedalaman bergantung pada kondisi batuan pondasi pada lubang tersebut. Kondisi batuan pondasi dapat diketahui dengan nilai lugeon. Semakin besar nilai lugeon maka kondisi batuan semakin kurang bagus atau batuan yang semakin lolos air.

Dapat dilihat pada Gambar 8, grafik korelasi *grout take* dengan kedalaman lubang memiliki tren grafik yang hampir sama dengan grafik korelasi nilai lugeon dengan kedalaman. Hal ini terjadi karena semakin besar nilai lugeon maka membutuhkan *grout take* yang cukup besar untuk mengisi celah-celah batuan dimana batuan dengan nilai lugeon besar adalah batuan yang kurang masif dan gampang meloloskan air. Namun di beberapa kedalaman yaitu kedalaman 5-10 meter, besar *grout take* cukup besar. Hal ini mungkin terjadi apabila kondisi batuan memiliki celah-celah batuan yang cukup banyak sehingga membutuhkan *grout take* yang besar. Untuk besar *grout take* pada lubang cek pada kedalaman 25-55 meter adalah

0 dikarenakan kondisi batuan cukup bagus dan memiliki nilai lugeon < 3 sehingga tidak membutuhkan adanya injeksi *grout*.

3.6 Korelasi Hubungan Nilai Lugeon, *Grout Take*, dan Kedalaman Lubang Saat *Trial Grouting* dengan Kondisi Geologi Batuan Pondasi

Setelah melihat dan menganalisa hubungan antara nilai lugeon, *grout take* dan kedalaman lubang *trial grouting*, dapat disimpulkan bahwa nilai lugeon pada sandaran kanan Bendungan Ameroro memiliki nilai lugeon yang semakin kecil jika mencapai kedalaman 30-55 meter. Begitu pula dengan besar *grout take* akan semakin kecil atau sedikit jika mencapai kedalaman 30-55 meter dikarenakan pada kedalaman tersebut nilai lugeon sudah < 3 sehingga tidak memerlukan adanya injeksi *grout*.

Menurut Gurocak & Alemdag (2012), permeabilitas batuan yang dapat dilihat dari nilai lugeon, dipengaruhi oleh banyaknya rekahan, sambungan, patahan pada batuan dimana lokasi uji dilakukan. Selain itu, kekompakan dan kekasaran batuan juga mempengaruhi nilai lugeon.. Jika disandingkan dengan peta melintang geologi sandaran kanan Bendungan Ameroro bahwa pada elevasi +120.00 hingga elevasi +85.00 memiliki struktur batuan yang kurang bagus karena tingkat pelapukan tinggi dan memiliki banyak rekahan sehingga memiliki nilai lugeon cukup tinggi dan besar *grout take* tinggi. Kedalaman struktur batuan dengan pelapukan tinggi berada pada kedalaman hingga 35 meter.

4. Kesimpulan

Dari hasil uji lugeon didapatkan bahwa semakin dalam lubang *trial grouting*, nilai lugeon akan semakin kecil. Semakin besar nilai lugeon, *grout take* akan semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin besar nilai lugeon maka membutuhkan *grout take* yang cukup besar untuk mengisi celah-celah batuan dimana batuan dengan nilai lugeon besar adalah batuan yang kurang masif dan gampang meloloskan air. Pada sandaran kanan elevasi +120.00 hingga elevasi +85.00 memiliki struktur batuan yang kurang bagus karena tingkat pelapukan tinggi sehingga memiliki nilai lugeon cukup tinggi dan besar *grout take* tinggi. Kedalaman struktur batuan dengan pelapukan tinggi berada pada kedalaman hingga 35 meter. Tidak hanya itu, kondisi rekahan pada sandaran kanan juga cukup tersebar. Hal ini sesuai dengan hasil *trial grouting* yang telah dilakukan.

Diharapkan penelitian ini dapat menggunakan data yang lebih komprehensif dan mencerminkan kondisi lapangan sehingga ketika menganalisa nilai lugeon dan besar *grout take* agar lebih mudah dan memberikan hasil yang tepat. Lalu untuk menganalisa korelasi nilai lugeon dan kondisi geologi setempat juga memerlukan analisa

RQD (*Rock Quality Designation*) batuan agar mendapatkan hasil yang lebih sesuai

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari yang telah membantu terkait data-data penelitian dan memberi arahan serta masukan agar penelitian ini dapat selesai dan berguna untuk instansi terkait, dan kepada semua pihak berkaitan yang membantu dalam pengerjaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Adhitama, K. V. T., & Sadisun, I. A. (2021). Evaluasi Hasil Percobaan Grouting pada Fondasi Bendungan Utama Ladongi, Kolaka Timur. *Bulletin Of Geology*, 5(4).
- Asy'ari, M. A., Hidayatullah, R., Lestari, S. D., Kahar, S. B., & Kristiyono, M. (2021). Pengaruh Grouting Terhadap Nilai Lugeon Pada Batuan Dasar Pondasi Bendungan Tapin. *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, 5(2), 103–116. <https://doi.org/10.31961/gradasi.v5i2.1186>
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *Cara uji kelulusan air bertekanan di lapangan*.
- Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari. (2017). *Laporan Akhir Pekerjaan Detail Engineering Design (DED) Bendungan Ameroro*.
- Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari. (2019). *Laporan Pengajuan Sertifikasi Bendungan Ameroro*.
- Balai Wilayah Sungai Sulawesi IV Kendari. (2022). *Laporan Trial Grouting (Sandaran Kanan) Bendungan Ameroro*.
- Bendungan, B. K. (2015). *Pedoman Kriteria Umum Desain Bendungan*. Jakarta: Balai Keamanan Nasional.
- Gurocak, Z., & Alemdag, S. (2012). Assessment of permeability and injection depth at the Atasu dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(2), 221–229. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0400-9>
- Hatmoko, J., & Suryadharma, H. (2020). Teknologi Perbaikan Tanah. *Penerbit Andi, Yogyakarta*.
- ICOLD, J. (1995). *Bulletin 99: Dam Failures—Statistical Analysis*. ICOLD Paris.
- PUPR, K. (2005). *Pedoman Grouting untuk Bendungan*.
- Purwanto, P. I., Juwono, P. T., & Asmaranto, R. (2017). Analisa Keruntuhan Bendungan Tugu Kabupaten Trenggalek. *Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering*, 8(2), 222–230.
- Putra, R. A. M., Putra, A. D., & Wahono, E. P. (2022). Analisis Rembesan Terhadap Bahaya Piping pada Bendungan Way Sekampung. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(3). Retrieved from <https://www.ojs.serambimekkah.ac.id/jse/article/view/4452>
- Putra, R. S. (2019). Analisis efektifitas pekerjaan grouting pada saddle dam I di proyek bandungan serbaguna karian, Kecamatan Rangkasbitung, Kabupaten Lebak, Provinsi Banten. *SKRIPSI-2018*. Retrieved from http://repository.trisakti.ac.id/usaktiana/index.php/home/detail/detail_koleksi/9/SKR/penerbit/0000000000000096137/9
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1977). *Bendungan Type Urugan*. PT Pradnya Paramita, Jakarta.
- Syaeful, H. (2013). *Penentuan Koefisien Hidraulik pada Tapak NSD, Serpong, Berdasarkan Metoda Uji Permeabilitas In-Situ*. 34(1).