

ANALISIS EFEKTIVITAS *GROUTING* TIRAI (*CURTAIN GROUTING*) DALAM MENGURANGI REMBESAN PADA SANDARAN KIRI BENDUNGAN BULANGO ULU

* Muhammad Rizki Ismail¹, Indriati Martha Patuti², dan Komang Arya Utama³

*Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo

*Corresponding Author, Received: Jan 2026, Revised: Jun 2026, Accepted: Jul. 2026

ABSTRACT: Rembesan yang terjadi pada fondasi bendungan diakibatkan oleh kondisi struktur geologi batuan yang buruk pada dasar bendungan, sehingga perlu dilakukan perbaikan *grouting* tirai untuk melakukan pengendalian laju rembesan dengan nilai *lugeon* < 3. Bendungan Bulango Ulu merupakan bendungan multifungsi yang dibangun untuk mendukung penyediaan air, irigasi, dan pengendalian banjir di Provinsi Gorontalo. Untuk menjamin keamanan dan kinerja bendungan, diperlukan pengendalian rembesan melalui *grouting* tirai, untuk tercapainya pelaksanaan *grouting* tirai secara maksimal dan efektif perlu dilakukan *trial grouting* guna menentukan jarak efektif antar lubang *grouting* serta analisis efektivitas *grouting* tirai untuk menilai keberhasilannya dalam mengurangi rembesan pada Bendungan Bulango Ulu. Metode yang digunakan meliputi analisis statistik dengan pendekatan *split-spacing* dan persamaan *Cedergren, H.R. (1967)*, analisis menggunakan data sekunder berupa data geologi dan nilai *lugeon* hasil *grouting* tirai. Berdasarkan hasil peninjauan bahwa batuan fondasi tersusun atas diorit bone dan *granodiorit* dengan tingkat pelapukan ringan hingga berat serta nilai rembesan awal berkisar antara 10,13-41,41 *L_u*. Hasil jarak efektif antar lubang *grouting* sebesar 1,5 m terbukti dari nilai efektivitas dengan nilai efektivitas 85,9% (kategori baik) dan *grout take* 24,19 kg/m (kategori rendah). Analisis statistik menunjukkan penurunan nilai *lugeon* yang signifikan dari lubang pilot hingga lubang cek. Hasil dari analisis efektivitas *grouting* menggunakan persamaan *Cedergren* sebesar 89,59% (kategori baik). Berdasarkan analisis efektivitas *grouting* pelaksanaan *grouting* tirai pada Tumpuan Kiri Bendungan Bulango Ulu terbukti efektif dalam mengurangi rembesan pada dasar bendungan.

Kata Kunci: *Grouting* Tirai, Nilai *Lugeon*, Efektivitas *Grouting*, Rembesan Bendungan, Bendungan Bulango Ulu

1. PENDAHULUAN

Bendungan adalah struktur buatan yang dirancang untuk menyimpan sejumlah air di satu tempat sehingga membentuk tampungan air atau waduk [1] Struktur bendungan dirancang agar kedap terhadap rembesan guna mencegah kegagalan struktur. Namun, rembesan sering terjadi pada fondasi bendungan akibat kondisi geologi batuan yang kurang baik, sehingga struktur geologi menjadi faktor utama yang memengaruhi laju rembesan. [2].

Bendungan Bulango Ulu yang berlokasi di Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo, merupakan bendungan multifungsi yang berfungsi untuk irigasi, pengendalian banjir, dan penyediaan air baku. Dalam perencanaannya, bendungan ini bertumpu pada fondasi batuan yang memiliki stabilitas dan daya dukung yang baik. Namun, kajian terhadap rembesan tetap diperlukan untuk memastikan keamanan dan kinerja bendungan. [3]. Berkenaan dengan hal tersebut, dilakukan pengeboran investigasi pada lokasi sandaran kiri untuk mengetahui kondisi geologi dan uji kelulusan air dalam satuan *lugeon*.

Penelitian ini mengevaluasi nilai efektivitas *grouting* tirai dengan membandingkan nilai *lugeon*

sebelum dan sesudah di *grouting*. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi geologi dan zonasi kedalaman untuk menentukan jarak efektif desain *curtain grouting* secara lebih terukur dan kontekstual. Metode *grouting tirai (curtain grouting)* ini diharapkan dapat mengurangi atau meminimalkan rembesan pada bawah permukaan fondasi konstruksi sandaran kiri Bendungan Bulango Ulu [4].

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Penelitian Terdahulu

Grouting tirai yang dilakukan pada fondasi bendungan Tugu dengan metode pelaksanaan *split-spacing* berhasil mengurangi nilai *lugeon* sampai kategori *good* [5], begitu juga pada perbaikan *grouting* tirai fondasi pada bendungan Meninting hasil penelitian menyebutkan bahwa *grouting tirai* di bendungan Meninting menunjukkan efektivitas mencapai 65,1% atau kategori *good* dengan rata-rata injeksi semen sebesar 21,43 kg/m [6].

Penelitian *trial grouting* pada fondasi bendungan utama Ladongi, Kolaka. Tujuan penelitian untuk mengevaluasi besaran nilai *grouting* dipengaruhi oleh struktur geologi sehingga pada bagian tumpuan kiri, tumpuan kanan

river bed bendungan memiliki nilai *lugeon* yang berbeda-beda [7].

Pelaksanaan *grouting* juga dapat meninjau karakteristik batuan pada dasar fondasi bendungan dengan meninjau nilai *lugeon*. Pelaksanaan *grouting* pada Bendungan Bajulmati diketahui bahwa tanah didominasi oleh pasir berkerikil yang memberikan kondisi stabil untuk material *grouting*. Sebaliknya, kedalaman 5-15 meter yang didominasi oleh tufa lapili lapuk kurang ideal untuk *grouting* [8].

2.2 Pertimbangan Geologi dalam Pelaksanaan Grouting

Pelaksanaan *grouting* mengacu pada kondisi atau karakteristik batuan maka dari itu perencana harus memahami secara rinci karakteristik batuan. Karakteristik batuan yang perlu diperhatikan adalah jenis batuan yang dihadapi, jenis keseragaman, penyebaran, ketebalan, serta struktur batumannya [4].

1. Pertimbangan struktur geologi

Melalui klasifikasi ini, dapat diketahui adanya berbagai unsur geologi yang berpengaruh terhadap kestabilan fondasi, seperti keberadaan kekar (*joint*), lipatan (*fold*), sesar (*fault*), maupun ketidakseragaman lapisan (*unconformity*).

2. Rock Quality Designation (RQD)

Metode ini didasarkan dengan menjumlahkan panjang seluruh sampel dengan panjang lebih besar dari 100 mm kemudian dibagi terhadap panjang keseluruhan sampel kemudian dikali 100%, dengan ukuran inti optimal berada pada angka 47,5 mm [9].

2.3 Permeabilitas

Permeabilitas didefinisikan sebagai sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air atau minyak mengalir lewat rongga atau pori. Pori-pori tanah saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya, sehingga air dapat mengalir dari titik dengan energi tinggi ke titik dengan tinggi energi yang lebih rendah [10].

2.4 Grouting

Grouting adalah suatu proses injeksi atau pemasukan cairan dengan tekanan menggunakan perbandingan rasio berat antara semen dan air ke dalam rongga, pori-pori, rekahan, dan retakan batuan sehingga menjadi padat secara fisika maupun kimiawi dalam waktu tertentu [5]. Tujuan perbaikan fondasi dengan metode *grouting* yaitu untuk mengurangi kebocoran air dari waduk melalui rekahan-rekahan pada batuan fondasi, mengurangi tekanan *uplift* atau gaya-gaya angkat yang terjadi pada dasar bendungan, dan meningkatkan daya dukung batuan fondasi.

2.5 Grouting Tirai (Curtain Grouting)

Curtain grouting bertujuan untuk membentuk zona permeabilitas air rendah (*impervious*) atau pembuatan tirai/dinding halang di fondasi bendungan dan bangunan sekitarnya dengan menyuntikkan semen memakai tekanan tertentu ke dalam celah batuan, seperti patahan, retakan, sambungan, dan kontak beton dengan fondasi.

2.6 Trial Grouting

Trial grouting merupakan tahapan awal sebelum dilaksanakan pekerjaan *grouting* tirai karena sebagai acuan dalam pelaksanaan *grouting* tirai. Hasil dari pelaksanaan *trial grouting* ada beberapa hal yang didapatkan seperti kondisi batuan pada fondasi bendungan, pengaturan jarak *grouting* tirai, susunan titik lubang *grouting*, besaran tekanan injeksi *grouting*, dan nilai efektivitas *grouting*.

2.7 Penentuan Tekanan

Perkiraan tekanan maksimum yang digunakan untuk uji kelulusan air tergantung pada kedalaman penyekat yang dites sebesar $(0,23d)$ dengan d adalah kedalaman lubang. Untuk penggunaan variasi tekanan dilakukan pada lubang pilot (*pilot hole*) dan lubang cek (*check hole*) untuk mengetahui karakteristik jenis aliran dengan 5 tahapan pemakaian tekanan yaitu $1/3$, $2/3$, $3/3$, $2/3$, $1/3$ dikalikan tekanan maksimum pada manometer di tiap-tiap tahapan kedalaman lubang [11].

2.8 Metode Pelaksanaan Grouting

Metode pelaksanaan *grouting* adalah suatu metode yang menggambarkan penyelesaian pekerjaan dari awal sampai akhir meliputi tahapan dan cara kerja dari masing-masing jenis kegiatan tahapan pekerjaan *grouting* untuk penyekatan zona-zona di atasnya maupun di bawahnya, agar kedalaman *grouting* yang direncanakan tidak terjadi kebocoran naik ke permukaan melalui dinding lubang bor [12].

Pelaksanaan *grouting* ada beberapa tahap yaitu:

1. Penentuan Pola Grouting

Untuk mendapatkan parameter penyebaran injeksi *grouting* yang efektif dilakukan *grouting test* dengan pola titik *grouting* segitiga sama sisi dengan sudut 60° pola titik segitiga sama sisi.

2. Klasifikasi Besarnya Grout Take

Grout take adalah banyaknya semen yang masuk kedalam lubang dibagi panjang lubang yang di *grouting* dinyatakan dalam kg/m [13]. Klasifikasi tinggi rendahnya *grout take* dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Klasifikasi Besarnya *Grout Take* [13]

Besarnya <i>Grout take</i> (kg/m)	Keterangan
0 - 25	Rendah (<i>low</i>)
26 - 50	Cukup rendah (<i>moderately low</i>)
51 - 100	Cukup (<i>moderate</i>)
101 - 200	Cukup tinggi (<i>moderate high</i>)
201 - 400	Tinggi (<i>high</i>)
> 400	Sangat tinggi (<i>very high</i>)

3. Penyiapan dan penentuan langkah pekerjaan pengeboran titik *grouting* terhadap titik lubang *grouting*. Langkah pengeboran terdiri dari langkah pengeboran berurutan (*series*), pisah-spasi (*split-spacing*), dan lompat katak (*skip and loop*).
4. Metode Pengeboran
Kondisi lokasi pengeboran menentukan pemilihan jenis pengeboran lubang *grouting*. Ada dua metode pengeboran *grouting* yaitu metode *downstage* dan metode *upstage*.

2.9 Bahan/Material *Grouting*

Bahan atau material *grouting* yang digunakan untuk pekerjaan *rim curtain grouting* pada fondasi sandaran kiri Bendungan Bulang Ulu antara lain yaitu air, semen, dan pasir.

2.10 Efektivitas *Grouting* Tirai

Tahapan analisis data secara matematis dalam penelitian ini dengan menggunakan beberapa metode yaitu:

1. Metode Statistik
 - a. Pengelompokan data nilai *lugeon* berdasarkan urutan pelaksanaan yaitu pada lubang pilot, sekunder, tersier dan cek *hole* sesuai zona kedalaman.
 - b. Analisis statistik nilai *lugeon* dari metode *split-spacing*

- 1) Menghitung nilai rerata data:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \rightarrow n : \text{jumlah data.}$$

- 2) Menghitung Standar deviasi (Sn):

$$S_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)} \rightarrow \text{di mana } X_i : \text{nilai tengah ke - } i$$

- 3) Menghitung Jangkauan (Range: R)

$$R = (x_{maks} - x_{min})$$

- 4) Menghitung Koefisien Variasi (KV)

2. Metode Efektivitas *Grouting*

Perhitungan evaluasi *grouting* dengan membandingkan koefisien permeabilitas sebelum dan sesudah *digroutting* mengacu pada persamaan *Cedergren*, H.R. (1967) [4]:

dengan:

E_{efs} : efektivitas *grouting* (%),

K : koefisien permeabilitas sebelum *grouting* (*pilot hole*),

KG : koefisien permeabilitas sesudah *grouting* (*cek hole*).

Kategori Nilai Efektivitas:

> 90 % : *excellent* (baik sekali),

(60 ~ 90) % : *good* (baik),

(30 ~ 60) % : *acceptable* (cukup),

(10 ~ 30) % : *less* (kurang),

< 10 % : *poor* (jelek).

3. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada pada jalan relokasi warga tepatnya pada tumpuan kiri Bendungan Bulango Ulu Desa Tuloa, Kecamatan Bulango Utara, Kabupaten Bone Bolango. Secara *geografis* berada pada koordinat lat. 0.6583616 dan long. 123.0931427. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian [14]

3.2 Metode Analisis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari Balai Wilayah Sungai Sulawesi II meliputi data *rock quality designation* (RQD), *layout grouting* tumpuan kiri, data nilai *lugeon* setiap lubang *grouting*, data nilai *lugeon* pada lubang cek *hole*, dan peta batuan padan tumpuan kiri bendungan.

Langkah-langkah analisis data secara matematis dalam penelitian ini dengan menggunakan beberapa metode yaitu:

1. Metode Statistik

- a. Pengelompokan nilai *lugeon* dan *cement* $KV_{take} = \frac{S_n}{x} \times 100\%$ berdasarkan urutan pelaksanaan

yaitu pada lubang pilot, sekunder, tersier dan cek *hole* sesuai zona kedalaman.

b. Analisis statistik nilai *lugeon* dari metode *spilt – spacing*

1) Menghitung nilai rerata data

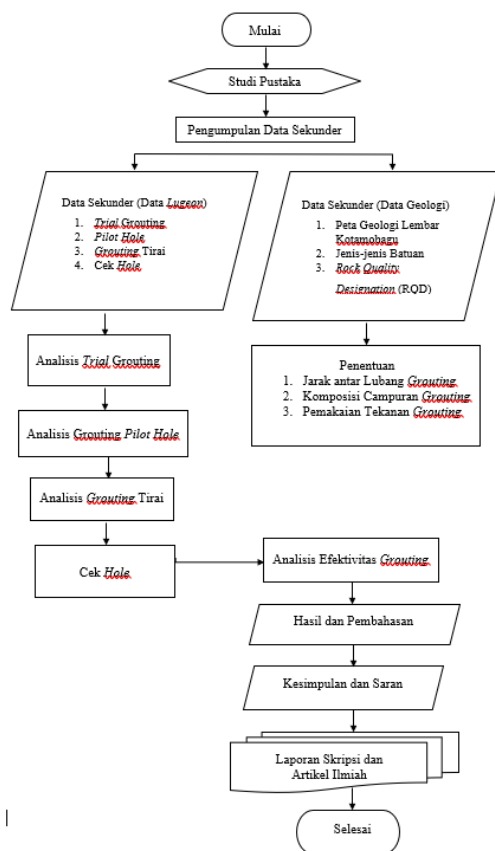
$$E_{efs} = 100 - (KG/K) * 100$$

2) Menghitung standar Deviasi

3) Menghitung jangkauan

4) Menghitung koefisien Variasi

2. Perhitungan evaluasi *grouting* dengan membandingkan koefisien permeabilitas sebelum dan sesudah di *grouting*. Adapun tahapan penelitian ditunjukkan dengan bagan alir yang dijelaskan pada Gambar 2.



Gambar 2 Bagan Alir

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Investigasi Geologi Regional Daerah Penelitian

Gorontalo yang berada di Lengan Utara Sulawesi merupakan bagian dari jalur magmatik *West–North Sulawesi Volcano–Plutonic Arc*, yang terbentuk akibat interaksi Lempeng Eurasia, Australia, dan Pasifik. Wilayah ini didominasi batuan vulkanik, plutonik, dan sedimen yang mencerminkan sejarah subduksi, aktivitas magmatik, serta proses pengangkatan. Struktur geologinya dipengaruhi oleh sesar naik, sesar geser,

dan *block faulting* yang membentuk bentang alam serta jalur mineralisasi. Kondisi tektonik dan magmatik yang masih aktif menyebabkan Gorontalo rentan terhadap gempa, longsor, dan perubahan garis pantai. Oleh karena itu, pemahaman geologi wilayah ini penting untuk pemetaan, eksplorasi sumber daya, perencanaan tata ruang, dan mitigasi bencana. [15]

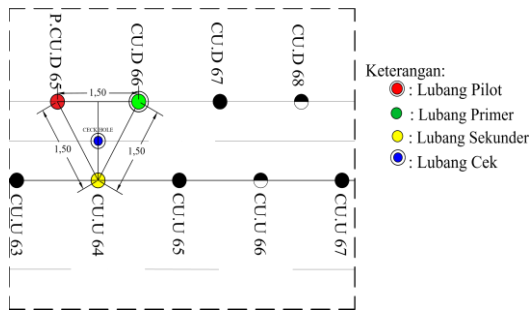
4.2 Analisis Batuan pada Tumpuan Sandaran Kiri

Pada tumpuan sandaran kiri dilakukan pengeboran pada titik P.CU.D-65 dari hasil pengeboran didapat hasil yang dapat dideskripsikan sebagai berikut:

1. Batuan penyusun dan sifat-sifat fisiknya
 - a. Pada kedalaman 0,00 meter sampai kedalaman 9,00 meter merupakan tmb diorit bone (tmb) dengan spesifikasi batuan diorit lapuk kuat, dengan karakteristik abu-abu kecoklatan, pasir kerikil, sebagian mineral masih tampak jelas, mudah dihancurkan dengan jari, material hasil pelapukan batuan diorit [16].
 - b. Pada kedalaman 9,00 meter sampai kedalaman 15,00 meter merupakan diorit bone (tmb) dengan spesifikasi batuan diorit lapuk sedang, abu-abu, kekar terbuka > 5 mm, permukaan kekar kasar, spasi kekar rapat, sebagian kekar teroksidasi, sedikit nyaring saat dilakukan "hammering", sebagian batuan hancur saat dilakukan pengeboran, dip kekar/kemiringan batuan 10°-45°/
 - c. Pada kedalaman 15,00 meter sampai kedalaman 35,00 meter merupakan diorit bone (tmb) dengan spesifikasi batuan diorit lapuk ringan dan berkontak langsung dengan *granodiorit* lapuk ringan pada kedalaman 31,90 m-34,00 m, yang memiliki karakteristik abu-abu, kekar terbuka 1-5 mm, permukaan kekar kasar, spasi kekar rapat-jarang, bidang kekar terisi mineral plagioklas (keras), nyaring saat dilakukan "hammering", dip kekar/kemiringan batuan 8°-70°.
2. Memiliki nilai *rock quality designation* rata-rata dengan kedalaman 40 m yaitu 49,5 % dalam kategori peringkat kelas "buruk".
3. Nilai *lugeon* yang didapat dari pekerjaan *water pressure test* (WPT) antara L_u 10,13 s/d L_u 41,41 sehingga syarat $L_u < 3$ belum terpenuhi. Hasil dari pengeboran digunakan sebagai acuan dalam menentukan jarak, tekanan wpt dan perilaku pada perencanaan dan pelaksanaan *trial grouting*.

4.3 Trial Grouting

Pelaksanaan *trial grouting* dilakukan dengan susunan lubang bentuk segitiga sama sisi menggunakan jarak antar lubang bervariasi untuk menentukan jarak yang paling efektif. Proses *trial grouting* pada bendungan Bulango Ulu dilakukan dengan jarak uji coba 1,5 m antar titik lubang, 1,3 m jarak antar lajur dan 0,65 m jarak lajur dengan as. Denah pelaksanaan *trial grouting* dapat dilihat pada Gambar 3.



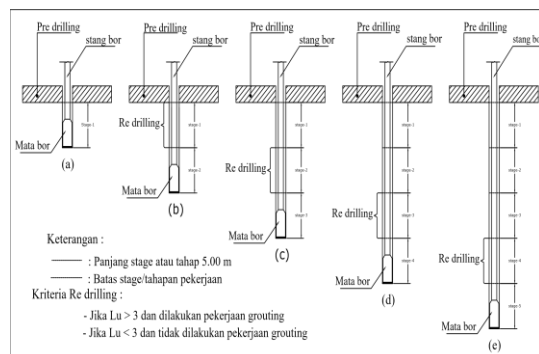
Gambar 3 Denah *Trial Grouting* Bendungan Bulango Ulu [17]

Metode pelaksanaan *trial grouting* terdiri dari beberapa pekerjaan yang dilakukan yaitu:

1. Pekerjaan pengeboran
2. Pekerjaan *water pressure test* (WPT)
3. Pekerjaan injeksi semen *grouting*

4.4 Pekerjaan Pengeboran (Drilling)

Pekerjaan pengeboran *trial grouting* dikerjakan pada lubang pilot dengan metode *downstage*. Penggunaan metode *downstage* pada pengeboran lubang *grouting* dikarenakan kondisi batuan yang buruk mengacu pada nilai *rock quality designation* batuan. Setelah proses *drilling* pada lubang pilot dilanjutkan pada lubang primer, lubang sekunder, dan lubang cek *hole* dengan metode pengeboran *downstage*. Kedalaman pengeboran setiap lubang *grouting* memiliki kedalaman lubang sekitar 40 m yang terdiri dari 8 *stage* dengan panjang tiap-tiap *stage* 5 m. Ilustrasi pengeboran pada setiap *stage* dapat diperhatikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Ilustrasi *Drilling* pada Setiap Lubang *Grouting* [5]

4.5 Pekerjaan Injeksi *Trial Grouting*

Pelaksanaan injeksi memerlukan bahan atau material yang sesuai spesifikasi dengan komposisi campuran bahan yang ditetapkan oleh perencana dengan prosedur pergantian campuran dan tekanan sesuai kaidah yang berlaku. Berikut ini merupakan penjelasan prosedur injeksi *trial grouting* pada tumpuan kiri bendungan Bulango Ulu.

1. Material Campuran *Grouting*

Semen dan air merupakan bahan utama untuk pekerjaan *grouting* dalam perbaikan batuan, dalam proses ini semen yang digunakan adalah semen *conch* OPC tipe 1 karena memiliki ukuran butiran yang sangat halus sehingga memudahkan *slurry* semen dalam mengisi rongga-rongga dan celah-celah pada batuan. Material pasir juga terkadang digunakan pada kasus tertentu seperti terjadinya *waterlose* (kehilangan air). Pasir yang digunakan merupakan pasir dengan *modulus* rata-rata kehalusan butiran pasir antara 2,20 s/d 2,60.

2. Perbandingan Campuran Material *Trial Grouting*

Pekerjaan *water pressure test* pada *stage* yang dituju telah selesai, hasil perhitungan nilai *lugeon* (L_u) untuk selanjutnya digunakan untuk menentukan perbandingan campuran *grouting*. Perbandingan campuran yang digunakan dimulai dari campuran yang encer ke campuran yang kental, berdasarkan perbandingan rasio berat antara semen (C) dengan air (W). Komposisi campuran awal bahan *grouting* yang digunakan untuk pekerjaan injeksi *grouting* dari campuran yang encer ke campuran yang kental terhadap nilai *lugeon* (L_u) ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hubungan Nilai *Lugeon* dan Komposisi Campuran Awal *Grouting* [17]

Hasil WPT	Komposisi Campuran Awal <i>Grouting</i> C:W
$L_u < 3.0$	tidak digroutting
$3.0 \leq L_u \leq 20$	1:10
$L_u > 20$	1:5

3. Pergantian campuran material *grouting*
Saat proses pekerjaan *grouting* berlangsung, volume campuran (liter/*stage*) dan tekanan tidak dapat bertambah ke tekanan yang diharuskan maka perbandingan campuran bahan semen *grouting* mengalami pergantian dari campuran yang encer ke campuran yang kental. Pergantian campuran bahan semen *grouting* dari campuran yang encer ke campuran yang kental sebagai

berikut: C : W = 1 : 10 → 1 : 5 → 1 : 3 → 1 : 2 → 1 : 1 → 1 : 0.6 → mortar. Pergantian campuran bahan *grouting* dari campuran yang

4.6 Water Pressure Test (WPT)

Pekerjaan *water pressure test* (WPT) dilakukan setelah pengeboran dan pencucian. Lubang yang selesai dikerjakan pada tiap *stage* kemudian dilakukan pengukuran muka air tanah yang

encer ke campuran yang kental pada saat proses injeksi *grouting* berlangsung.

kemudian dikonversi ke satuan tekanan kg/cm² sebagai akibat penambahan tekanan gravitasi atau tinggi hidrostatik. Kemudian *packer* dilanjutkan pemasangan penyekat dengan kuat tanpa celah. Penggunaan tekanan (WPT) pada *grouting* tirai bendungan Bulango Ulu dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Penggunaan Tekanan *Water Pressure Test* (WPT) *Grouting* Tirai [17]

No. Stage	Kedalaman (m)	Single Test (kg/m ²)	Multi Pressure Test				
			P.1 (kg/m ²)	P.2 (kg/m ²)	P.3 (kg/m ²)	P.4 (kg/m ²)	P.5 (kg/m ²)
1	0,00-5,00	2,00	0,70	1,30	2,00	1,30	0,70
2	5,00-10,00	3,00	1,00	2,00	3,00	2,00	1,00
3	10,00-15,00	5,00	1,70	3,30	5,00	3,30	1,70
4	15,00-20,00	7,00	2,30	4,70	7,00	4,70	2,30
5	20,00-25,00	10,00	3,30	6,70	10,00	6,70	3,30
6	25,00-30,00	13,00	4,30	8,70	13,00	8,70	4,30
7	30,00-35,00	16,00	5,30	10,70	16,00	10,70	5,30
8	35,00-40,00	16,00	5,30	10,70	16,00	10,70	5,30

Pekerjaan (WPT) dilakukan dengan injeksi air bersih menggunakan pompa tekan selama 10 menit pada tekanan yang telah ditetapkan dan dilakukan pencatatan setiap menitnya pada tiap-tiap tekanan [11].

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut nilai *lugeon* (L_u) dan nilai permeabilitas air (k) pada lubang P.CU.D 65 *stage-1* ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4 Nilai *Lugeon* Stage 1

Tekanan WPT (P_0)	Debit Injeksi (Q)	Tekanan Uji (P)	Nilai <i>Lugeon</i> (L_u)
(kg/cm ²)	(liter/menit)	$P = P_0 + P_s$ (kg/cm ²)	$L_u = (10.Q)/(P.L)$
1,00	5,15	1,132	9,10
2,00	12,25	1,732	14,15
3,00	35,30	2,432	29,03
2,00	19,60	1,732	22,63
1,00	12,20	1,132	21,55
Rata-rata			19,29

Tabel 5. Nilai Permeabilitas Air Stage 1

Tekanan WPT (P_0)	Tinggi (h)	Debit Injeksi (Q)	Permeabilitas Air (k)
(kg/cm ²)	$h = h_p + h_s$ (cm)	(cm ³ /det.)	$k = Q/(2.π.L.h)$ $ln (L/h)$ (cm/det)
0,70	1132	85,83	$1,18 \times 10^{-4}$
1,30	1732	204,17	$1,83 \times 10^{-4}$
2,00	2432	588,33	$3,79 \times 10^{-4}$
1,30	1732	326,67	$2,93 \times 10^{-4}$
0,70	1132	203,33	$2,79 \times 10^{-4}$
Rata-rata			$1,83 \times 10^{-4}$

Penentuan jenis aliran dan nilai *lugeon* berdasarkan perhitungan tersebut dengan kesimpulan sebagai berikut:

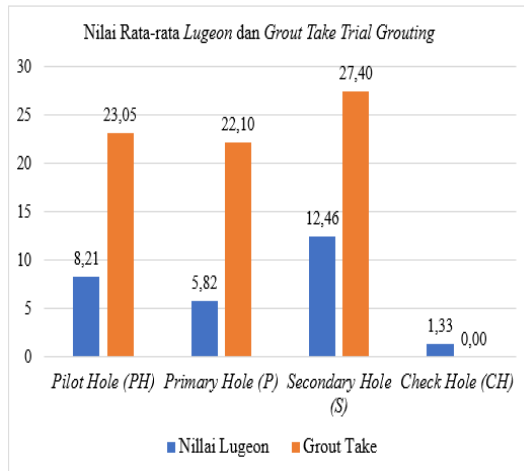
1. Nilai *lugeon* yang tertinggi terjadi pada tekanan tertinggi maka jenis aliran dilasi.
2. Pemilihan nilai *lugeon* dengan jenis aliran dilasi diambil pada nilai *lugeon* yang terkecil dari tekanan yang terendah yaitu $L_u = 9,10$ dengan $k = 1,83 \times 10^{-4}$ cm/det.

4.7 Analisis Pengaruh *Trial Grouting*

Metode analisis pada pekerjaan *trial grouting* hanya menggunakan metode *Cedergren.H.R* (1967) dikarenakan keterbatasan jumlah data sehingga metode statistik kurang efektif bila digunakan. Untuk menganalisis *grouting* tirai secara keseluruhan menggunakan metode statistik dan metode *Cedergren.H.R* (1967) untuk mengetahui keberhasilan *grouting* sebelum dan sesudah *digroutting* dalam [5].

Analisis mutu pekerjaan *trial grouting* dilakukan dengan metode efektivitas *grouting* yang besarnya pengaruh *grouting* terhadap kelulusan air batuan sebelum dan sesudah dilakukan *grouting* dinyatakan dalam persen (%). Hasil pelaksanaan *trial grouting* pada *grouting* tirai pada tumpuan kiri bendungan Bulango Ulu didapat pada tes *lugeon* di lubang pilot (P.CU.D-65) berkisar antara $L_u = 0,22$ s/d $L_u = 41,41$ setelah dilakukan *grouting* pada lubang pilot, primer dan sekunder, kemudian dilakukan tes *lugeon* pada lubang cek (CH.GT-1), nilai *lugeon* mengecil antara $L_u = 0,13$ s/d $L_u : 2,67$, lebih kecil dari $L_u : 3$ artinya sudah sesuai *lugeon* yang ditargetkan. Total bahan material semen yang diserap sebesar 2.902,23 kg dengan total panjang pengeboran 45 m, sehingga didapat *grout take* rata-

rata sebesar 24,19 kg/m masuk kategori cukup (*moderate*) dengan nilai rata-rata *lugeon* dan rata-rata *grout take* pada setiap jenis lubang. Grafik perbandingan nilai *lugeon* dan *grout take* pada setiap lubang *trial grouting* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Nilai Rata-rata *Lugeon* dan *Grout Take* *Trial Grouting*

4.8 Analisis Efektivitas *Grouting* Tirai

Hasil dari analisis pekerjaan *trial grouting* didapat nilai efektivitas *grouting* 85,9 % (baik), dari analisis tersebut selanjutnya dijadikan acuan untuk pola *grouting* (*grouting pattern*). Panjang bentangan pekerjaan *grouting* tirai pada tumpuan kiri bendungan Bulango Ulu yaitu 123,66 m dengan 164 titik lubang dan jarak antar titik lubang pengeboran 1,5 m.

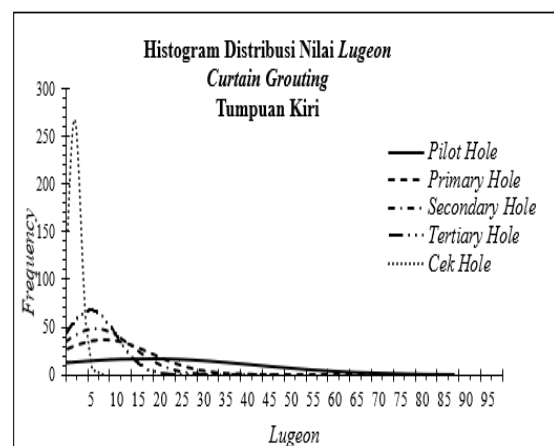
1. Metode Statistik

Berdasarkan hasil pengelompokan data didapat pada *grouting* tirai nilai tes *lugeon* di lubang pilot berkisar antara L_u :1,45 s/d L_u : 45,87. Setelah dilakukan *grouting* pada lubang pilot, primer, sekunder, dan tersier kemudian dilakukan tes *lugeon* pada lubang cek nilai *lugeon* mengecil antara L_u : 1,72 s/d L_u : 2,78, lebih kecil dari L_u : 3 artinya nilai *lugeon* yang didapat sesudah pekerjaan *grouting* sesuai yang ditargetkan sedangkan Total bahan material semen yang diserap sebesar 160.662,85 kg dengan total panjang pengeboran 5.408 m, sehingga didapat *grout take* rata-rata sebesar 29,71 kg/m, dapat dikategorikan cukup rendah (*moderately low*). Hasil analisis efektivitas *grouting* tirai metode statistik dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Analisis Statistik Nilai *Lugeon* Metode *Split Spacing Grouting* Tirai.

Uraian	Lubang Pilot	Lubang Primer	Lubang Sekunder	Lubang Tersier	Lubang Cek
Nilai rata-rata <i>Lugeon</i> (L_u)	18,81	8,73	6,91	5,7	1,93
Standart Deviasi (L_u)	24,45	10,8	8,39	5,89	1,49
Range	0,00 - 18,81 = 65%	0,00 - 8,73 = 70%	0,00 - 6,91 = 67,46%	0,00 - 5,70 = 64,39%	0,00 - 1,93 = 67,57%
Nilai (L_u) dengan Range 0 s/d 10	55%	73,04%	76,98%	81,99%	100%

Hasil dari analisis tersebut dapat diperhatikan bahwa semakin kecil koefisien variasi yang didapat, populasi data semakin homogen (seragam) sedangkan semakin besar koefisien variasi maka data semakin heterogen (bervariasi) sehingga analisis statistik dari nilai rata-rata *lugeon* didapat lubang pilot (18,81 L_u), lubang primer (8,73 L_u), lubang sekunder (6,91 L_u), lubang tersier (5,7 L_u) dan lubang cek (1,93 L_u) maka dapat disimpulkan metode *grouting* tirai *split spacing* efektif karena menunjukkan penurunan signifikan pada setiap prosedur pekerjaan *grouting* serta dapat diperhatikan juga pada grafik distribusi nilai *lugeon* pada setiap langkah-langkah pekerjaan *grouting* tirai semakin mengecil nilai *lugeon*. Grafik histogram distribusi *grouting* tirai atau *curtain grouting* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Histogram Distribusi Nilai *Lugeon* *Grouting* Tirai

2. Metode Efektivitas Grouting Cendergren H.R (1997)

Analisis mutu dari hasil pekerjaan *grouting* dilakukan dengan menggunakan metode efektivitas *grouting*, dimana besarnya efektivitas *grouting* ditunjukkan oleh besarnya pengaruh *grouting* terhadap kelulusan air (permeabilitas air) batuan sebelum dilakukan *grouting*, dinyatakan dalam persen (%). Cendergren (1967) menyebutkan bahwa efektivitas *grouting* 90% apabila permeabilitas air sebelum di *grouting* (k) adalah 100 berubah menjadi permeabilitas air sesudah di *grouting* (KG) sebesar 10, atau $KG = 0,1$. Pekerjaan rim *grouting* tirai sepanjang 123,66 m terdapat 5 titik lubang Pilot dan 12 titik lubang cek (cek *hole*) tiap-tiap lubang terdapat 5 tahapan (*stage*) dengan ke dalam rata-rata 5 m setiap *stage*. Berdasarkan hasil perhitungan efektivitas *grouting* dengan menggunakan metode Cendergren, H.R. 1967 didapatkan nilai efektivitas *grouting* yaitu 89,59 % sehingga masuk dalam kategori baik (*good*).

4.9 Pembahasan Analisis Efektivitas Grouting Tirai

Penelitian ini, proses pengeboran titik *grouting* menggunakan metode *split spacing*, sebagaimana diterapkan pula pada penelitian Supriono, dkk. (2022). Metode ini memberikan acuan yang jelas mengenai urutan dan pembagian lubang bor, sehingga pola nilai *lugeon* pada setiap tahap *grouting* dapat diamati secara sistematis. Hasil pengujian menunjukkan pola yang konsisten, yaitu nilai *lugeon* lubang pilot lebih besar dibandingkan lubang primer, sekunder, dan tersier. Pola ini mencerminkan bahwa setiap tahap *grouting* secara bertahap mampu menutup rekahan batuan yang tersisa pada tahap sebelumnya. Selain itu, nilai *lugeon* juga menunjukkan kecenderungan semakin dalam lubang semakin kecil nilai *lugeon* yang mengindikasikan bahwa rekahan batuan semakin berkurang dan kondisi batuan cenderung lebih masif.

Bendungan Bulango Ulu, nilai efektivitas *grouting* yang diperoleh mencapai 88,02%, dengan kategori baik dan nilai *grout take* rata-rata sebesar 29,71 kg/m, yang menunjukkan tingkat penyerapan material *grout* yang cukup optimal oleh batuan. Tinggi rendahnya efektivitas *grouting* sangat bergantung pada kondisi geologi setempat, sehingga nilai efektivitas di setiap lokasi dapat berbeda. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Kurdiawan, dkk. (2023) yang melaporkan nilai efektivitas sebesar 65,10%, juga berkategori baik, namun dengan *grout take* rata-rata 21,93 kg/m. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa struktur

geologi, tingkat rekahan, dan kondisi batuan memiliki pengaruh besar terhadap kebutuhan *grout* dan keberhasilan proses *grouting* secara keseluruhan

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian maka kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Analisis efektivitas *trial grouting* menunjukkan jarak titik efektif antar lubang *grouting* sebesar 1,5 m dengan analisis efektivitas *trial grouting* yaitu 85,9 % kategori baik (*good*) dan *grout take* rata-rata sebesar 24,1 kg/m kategori cukup rendah (*moderately low*).
2. Analisis efektivitas *grouting* tirai menggunakan metode statistik *split-spacing* menunjukkan penurunan nilai *lugeon* pada setiap tahapan pekerjaan *grouting* tirai dan hasil analisis efektivitas *grouting* tirai metode Cendergren H.R. (1967) menunjukkan efektivitas sebesar 88,02% dengan kategori baik (*good*).

SARAN

Beberapa saran yang perlu diperhatikan penelitian ini di antaranya:

1. Perlunya peninjauan yang lebih spesifik pada perencanaan *trial grouting* agar jarak antar titik lubang *grouting* lebih efektif.
2. Perlunya keahlian yang baik kepada pekerja agar pada proses pekerjaan *grouting* dapat terlaksana dengan baik dan efektif.

6. REFERENCES

- [1] H. Setyawati, N. Najib dan Hidayatillah, "Analisa Rembesan pada Pencanaan Pembangunan Bendungan Logung Kabupaten Kudus, Jawa Tengah," J. Geosains dan Teknol, vol. 1, no. 3, pp. 99-106, 2018.
- [2] Z. Li, H. Liu, Z. Dun, L. Ren dan J. Fang, "Grouting Effect on Grouting Effect on Shear and Seepage Assessment," Construction and building, vol. 242, pp. 118-131, 2020.
- [3] M. J. A. Saputra, A. P. Permana dan N. Akase, "Analisis Tipe Gerakan Tanah pada Lereng Bendungan Bulango Ulu Kabupaten Bone Bolango Menggunakan Metode Kinematika," PADURAKSA, vol. 12, no. 2, pp. 244-249, 2023.
- [4] SDA PUPR, Pedoman Grouting Untuk Bendungan, 1 penyunt., Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Sumber Daya Air Direktorat Sungai, Danau, dan Waduk, 2005.
- [5] Supriono, A. I. Candra dan Y. C. Poernomo, "Curtain Grouting To Reduce Seepage Foundation Access Road To The Top Of The Dam At Tugu Dam," Ukarst, vol. 6(1), pp. 88-101, 2022.

- [6] U. Kurdiawan , Y. Saadi dan Muhajirah, "Curtain Grouting Test on Volcanic Breccia Foudation as an Effort to Assess the Effectiveness of Grouting Case Studi Construction of Mininting Dam," *JIST*, vol. 4, no. 12, pp. 2462-2468, 2023..
- [7] K. V. Adhitama dan I. A. Sadisun, "Evaluasi Hasil Percobaan Grouting pada Fondasi Bendungan Utama Ladongi, Kolaka Timur," *Bulletin of Geology*, vol. 5, no. 4, pp. 806-819, 2021.
- [8] B. Risharnanda, S. A. Primantyo dan R. Asmaranto, "Evaluation of Dam Foundation's Grouting Efficiency Based on Lugeon Values," *Civil Engineering and Architecture* , vol. 11, no. 5A, pp. 3230-3241, 2023.
- [9] ASTM, "Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core," American Standard Testing and Material, Amerika, 2006.
- [10] R. Afiri, S. Gabi, K. Bouzelha dan R. Tabou, "Evaluating Permeability and Groutability of Souk Tleta Dam Site Based on Lugeon Tests, RQD, SPI and Trial Grouting," *Journal of Materials and Engeneering Structures*, vol. 7, no. 3, pp. 339-357, 2020.
- [11] Badan Standardisasi Nasional Indonesi, "SNI 2411 Cara Uji Kelulusan Air Bertekanan di Lapangan," Jakarta, 2008.
- [12] M. A. Asy'ari, R. Hidayatullah, D. Lestari, S. B. Kahar dan M. Kristiyono, "Pengaruh Grouting Pengaruh Grouting Batuan Dasar Pondasi Bendungan Tapin," *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 103-116, 2021.
- [13] I. Soedibyo, *Teknik Bendungan*, II penyunt., Jakarta: PT. Pradya Paramita, 2003.
- [14] Google Limited Liability Company, "Google Earth," 2024. [Online]. Available: <https://earth.google.com>. [Diakses 17 Desember 2025].
- [15] A. Sompotan, *Struktur Geologi Sulawesi*, I penyunt., Bandung: Perpustakaan Institut Teknologi Bandung, 2012.
- [16] T. Apandi dan S. Bachri, "Peta Geologi Lembar Kotamobagu, Sulawesi, Skala 1:250000," Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1997.
- [17] Balai Wilayah Sungai Sulawesi II, "Pelaksanaan Pekerjaan Bendungan Bulango Ulu," BWS Sulawesi II, Gorontalo, 2022.

Copyright © Composite Journal. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors.
