JURNAL REKAYASA SIPIL (JRS-UNAND)
Vol. 21 No. 3, Desember 2025
Diterbitkan oleh:
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas (Unand)
ISSN (Print) : 1858-2133
ISSN (Online) : 2477-3484
http://jrs.ft.unand.ac.id

ANALISIS EFEKTIVITAS *TRIAL GROUTING* PADA PONDASI BENDUNGAN CIBEET

DERIS FAISA RALINDRA[1], MUHAMMAD NAUFAL AQILA[2*], REFALDI TJAHYA WINANDA[3], DAFFA ESTUNGKORO[4]

[1]*Teknologi Konstruksi Bangunan Air, Fakultas Vokasi, ITS Surabaya, Jawa Timur*
[2]*Teknologi Konstruksi Bangunan Air, Fakultas Vokasi, ITS Surabaya, Jawa Timur*
[3]*Teknologi Konstruksi Bangunan Air, Fakultas Vokasi, ITS Surabaya, Jawa Timur*
[4]*Teknologi Konstruksi Bangunan Air, Fakultas Vokasi, ITS Surabaya, Jawa Timur*

[*]*Corresponding Author:* naufalaqila074@gmail.com

Naskah diterima: 26 November 2025. Disetujui: 19 Desember 2025. Diterbitkan: 31 Desember 2025

ABSTRAK

Dominasi batuan sedimen dengan intensitas kekar tinggi pada pondasi Bendungan Cibeet menimbulkan risiko kebocoran yang signifikan terhadap stabilitas struktur. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas *Trial Grouting* dalam meningkatkan kekedapan tanah pondasi hingga memenuhi standar Lugeon (Lu < 3). Metode yang diterapkan adalah uji coba injeksi semen sistem *upstage* dengan pola penyempitan jarak (*split-spacing*) melalui tahapan *Pilot, Secondary, Tertiary,* hingga *Check Hole*. Evaluasi ekeftivitas dilakukan dengan membandingkan nilai Lugeon, volume injeksi, dan koefisien permeabilitas (k) sebelum dan sesudah perbaikan. Hasil penelitian menunjukkan penurunan permeabilitas yang drastis dari orde 10^{-4} cm/det menjadi 10^{-6} cm/det, dengan tingkat efektivitas keberhasilan di atas 93% pada seluruh segmen kedalaman. Analisis biaya pelaksanaan mencatatkan anggaran sebesar Rp 133.965.476,04 untuk satu titik uji. Disimpulkan bahwa parameter dan metode *grouting* ini terbukti efektif memperbaiki kualitas pondasi dan layak dijadikan acuan teknis untuk pekerjaan utama.

Kata kunci : Pondasi Bendungan, *Grouting, Lugeon,* Metode *Upstage*, *Split Sapcing*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur sumber daya air memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan air nasional, pengendalian banjir, penyediaan air baku, irigasi, serta pengembangan energi terbarukan. Salah satu proyek strategis tersebut adalah pembangunan Bendungan Cibeet yang berlokasi di Kecamatan Cariu, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat. Bendungan Cibeet memiliki fungsi strategis yang meliputi potensi penyediaan energi listrik melalui pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro sebesar 0,25 W, suplai air baku sebesar 3.770 l/dt, irigasi baru seluas 1.037 ha, dan pengendalian banjir dengan kapasitas reduksu sebesar 297,97 m³/dt. (*Spesifikasi Teknik Bendungan Cibeet*, 2023)

Bendungan memiliki potensi bahaya yang besar, yaitu potensi risiko kerusakan dan kegagalan fungsi, sehingga termasuk ke dalam kategori *heavy construction.* Salah satu bentuk kegagalan bendungan adalah terjadinya rembesan melalui rekahan atau jalur permeabel pada pondasi (*piping*) yang dapat memengaruhi stabilitas bendungan (Setyawati et al., 2018). Oleh karena itu, dalam pembangunan bendungan terdapat beberapa aspek penting yang harus diperhatikan terkait kondisi tanah di bawah dan sekitar tubuh bendungan, yaitu daya dukung tanah harus mampu menahan beban tubuh bendungan, tanah harus memiliki kemampuan yang memadai untuk menghambat filtrasi air, serta memiliki ketahanan terhadap potensi terbentuknya jalur rembesan pada pondasi bendungan (Setyawati et al., 2018) (Xiandong et al, 2024).

Untuk memenuhi persyaratan tersebut, metode *grouting* digunakan sebagai salah satu metode dalam mereduksi rembesan dan memperbaiki daya dukung batuan. Menurut Departemen Pekerjaan Umum (2005), *Grouting* adalah proses injeksi suatu cairan tertentu dengan tekanan kedalam rongga atau pori rekahan dan kekar pada batuan yang dalam waktu tertentu cairan tersebut menjadi padat dan keras secara fisika maupun kimiawi. Pekerjaan *grouting* umumnya meliputi *groutcap, drilling,* dan *waterpressure test* (WPT) (Asy'ari et al., 2023). Serta bertujuan meningkatkan permeabilitas, menambah kuat geser, mengurangi kompresibilitas, dan mengurangi potensi erosi internal terutama pada pondasi alluvial.

Evaluasi keberhasilan *grouting* pada pondasi bendungan umunya dilakukan melalui pengamatan kehilangan perkolasi atau perubahan nilai lugeon yang menggambarkan porositas batuan sebelum dan setelah *grouting.* Setiap lokasi memiliki karakteristik geologi berbeda, sehingga efektivitas metode *grouting* tidak dapat digeneralisasi. Pada kondisi tersebut memerlukan trial *grouting* sebagai tahap uji untuk memastikan kesesuaian desain *grouting* terhadap kondisi sebenarnya.

Penelitian terdahulu mengenai *grouting* pondasi bendungan umumnya berfokus pada evaluasi teknis berdasarkan perubahan nilai lugeon dan permeabilitas batuan (Asy'ari et al., 2023; Risharnanda et al., 2023). Namun, kajian yang mengaitkan efektivitas *trial grouting* dengan aspek biaya masih terbatas, khususnya pada Bendungan Cibeet.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas trial *grouting* pada Bendungan Cibeet, melalui analisis perubahan volume injeksi *grouting*, nilai lugeon, dan permeabilitas sebagai indikator perbaikan pondasi bendungan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis terkait pelaksanaan *trial grouting* pondasi bendungan dan menyajikan mengenai efektivitas *trial grouting* berupa hubungan antara parameter injeksi grouting dan penurunan permeabilitas batuan.

2. METODE PENELITIAN

Pekerjaan *grouting* pada proyek Bendungan Cibeet Paket 1 bertujuan untuk meningkatkan daya dukung pondasi, mengurangi permeabilitas (kekedapan terhadap air), serta mengisi rekahan atau rongga di batuan dasar pondasi. Sehingga dapat dilakukan percobaan *grouting* terlebih dahulu, sebagai acuan dalam pekerjaan *grouting.*(Departemen Pekerjaan Umum, 2005).

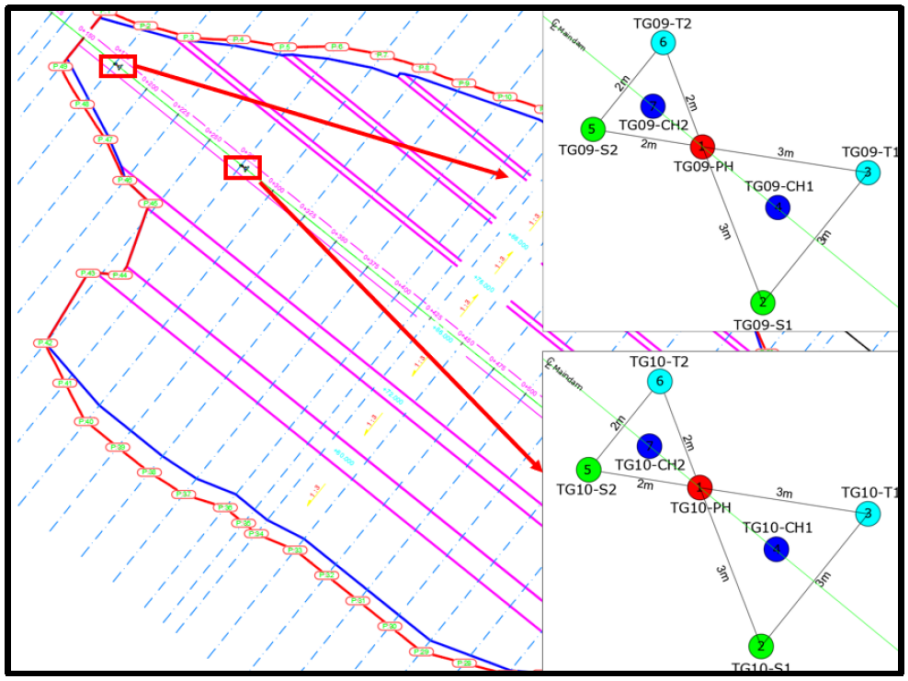
2.1. Tujuan Trial *Grouting*

Trial *grouting* pada bendungan Cibeet paket 1 dilaksanakan untuk mengevaluasi efektivitas metode yang direncanakan. Secara khusus dalam pelaksanaan percobaan *grouting* akan diperoleh data-data untuk menentukan:

1. Jarak dan pola lubang *grouting* yang efektif
2. Kedalaman lubang *grouting* yang efektif
3. Perkiraan kuantitas (volume) bahan grout
4. Tekanan *grouting* yang sesuai
5. Campuran *grouting* yang sesuai
6. Material yang sesuai
7. Kebutuhan alat yang akan digunakan

2.2. Lokasi Percobaan Trial Grouting

Menentukan lokasi *grouting test* berdasarkan pemetaan tapak pondasi bendungan urugan dan loging data core hasil pemboran investigasi geologi tambahan. *Grouting test* pada bendungan sandaran kiri tipe bendungan urugan dilakukan di area STA 0+157 dan STA 1+275. Pemilihan lokasi ini bertujuan agar pengujian dilakukan pada kondisi yang representatif terhadap kondisi terburuk, sehingga parameter pola lubang, jarak antar lubang, tekanan injeksi, dan volume grout yang diperoleh dapat digunakan menjadi dasar pelaksanaan *grouting*.



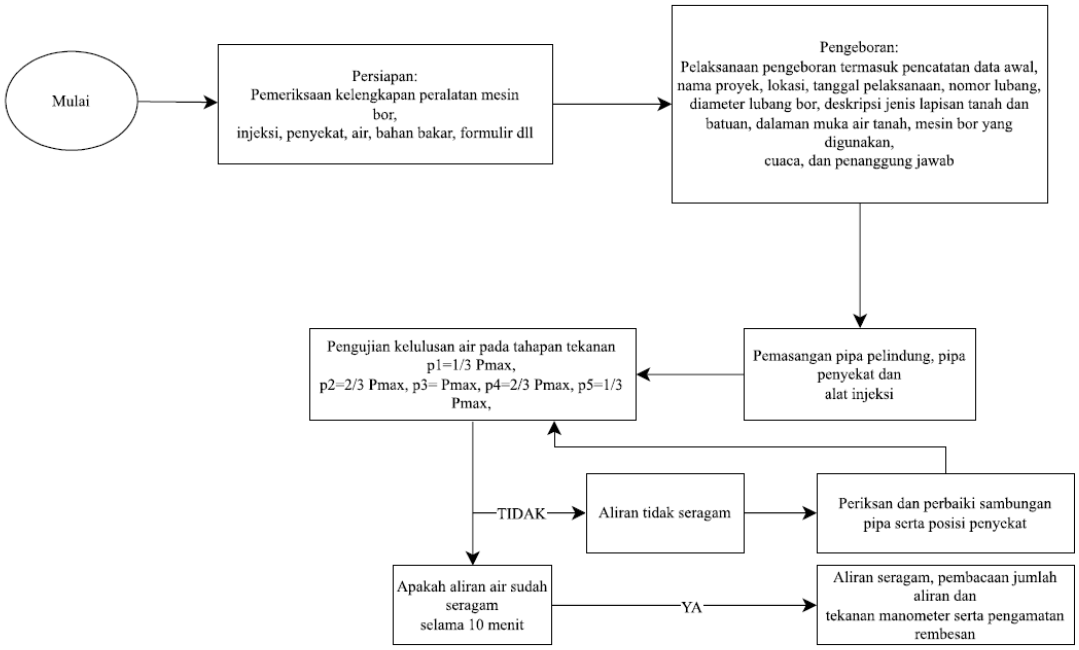
Gambar 1 Lokasi Percobaan Trial *Grouting*
(**Sumber**: Gambar DED Trial *Grouting* Bendungan Cibeet 2025)

Pada percobaan *grouting* memiliki pola percobaan yang terdiri dari lubang primer (*pilot hole*), lubang sekunder (*secondary hole*), lubang tersier (*tersier hole*), dan lubang cek (*check hole*) seperti pada **Gambar 1**

Evaluasi percobaan *grouting* dianalisis dari hasil *water pressure test* dari *check hole*, apabila hasil tes mendapatkan nilai lugeon <3, berarti jarak lubang trial sudah tepat, akan tetapi jika didapat nilai lugeon >3, maka jarak lubang percobaan *grouting* harus diperkecil dengan membagi segitiga sama sisi tadi menjadi dua, sehingga membentuk segitiga sama sisi baru yang lebih kecil. (Metode Pelaksanaan Trial Grouting Bendungan Cibeet, 2025)

2.3. Metode Pelaksanaan Trial Grouting

Menurut (Metode Pelaksanaan Trial Grouting Bendungan Cibeet, 2025), pelaksanaan percobaan *grouting* meliputi tahapan persiapan, pengerjaan inti yang terdiri dari pemboran lubang *grouting*, pencucian lubang bor, pemasangan packer, water pressure test, injeksi semen, dan penutupan lubang *grouting*. Dengan diagram alir pelaksanaan sebagai berikut:



Gambar 2 Tahapan Pelaksanaan Percobaan *Grouting*

1. Tahapan persiapan

Sebelum pengujian dilakukan, seluruh peralatan bor, unit injeksi, serta pompa diperiksa untuk memastikan kondisinya layak pakai. Pemeriksaan meliputi kesiapan bahan bakar, air pembilas, dan alat ukur muka air tanah. Area sekitar titik bor dibersihkan dan diratakan agar mesin bor dan pompa dapat dipasang dengan stabil. Setelah itu, rangkaian mesin bor dirakit bersama selang-selang air dan landasan mesin, sehingga proses pengeboran dapat berjalan aman dan efektif.

2. Pencucian Lubang (*Flushing*)

Setelah pengeboran per-stage (5 m) selesai, lubang dibersihkan menggunakan air bersih dengan cara penginjeksian selama ffl10 menit. Tahap flushing ini bertujuan mengeluarkan cutting, serpihan batuan, dan material sisa pengeboran yang dapat menyumbat rekahan atau pori batuan. Jika kondisi lubang masih kotor, waktu pembilasan diperpanjang hingga aliran air menunjukkan kondisi bersih. (Departemen Pekerjaan Umum, 2005)

3. Pemasangan *Packer*

Packer digunakan untuk menutup sebagian lubang bor sehingga tekanan air atau *grout* dapat diuji pada zona tertentu saja. Pemasangan packer dapat dilakukan secara mekanis atau *pneumatik*. Pada metode mekanis, packer dikembangkan dengan memutar *capstan* sehingga karet mengembang dan menempel pada dinding *borehole*. Pada metode *pneumatik*, karet dikembangkan dengan udara bertekanan atau nitrogen. Pada kedua metode, packer dipasang rapat agar uji tekanan tidak bocor. (Departemen Pekerjaan Umum, 2005)

4. *Water Pressure Test* (WPT)

Tekanan maksimum WPT pada Bendungan Cibeet disesuaikan dengan karakteristik batu pasir berlanau yang memiliki tingkat kekerasan sedang. Tekanan referensi digunakan 3 kg/cm² untuk kedalaman 0–5 m, dan setiap penambahan kedalaman 5 m ditambah 0,5 kg/cm². Jika formasi batuan berubah, tekanan disesuaikan dengan kekuatannya.

WPT dilakukan 7 kali percobaan pada setiap stage, dengan pola tekanan bertahap mulai dari 25% tekanan maksimum, kemudian 50%, 75%, hingga mencapai tekanan penuh, lalu diturunkan kembali menjadi 75%, 50%, dan terakhir 25%. Variasi tekanan ini digunakan untuk menilai permeabilitas batuan melalui nilai Lugeon serta stabilitas aliran air terhadap perubahan tekanan (Departemen Pekerjaan Umum, 2005).

5. Percobaan *Grouting*

Grouting dibuat dari campuran semen Portland dan air dengan kondisi air bersih dan bebas dari asam mintak, alkali, garam zat organik atau zat-zat lain yang bisa mengganggu. Percobaan *grouting* bisa dilakukan dengan dua cara yaitu metode *up stage grouting* atau *down stage grouting*. Jika lapisan tidak terjadi keruntuhan ketika pemboran maka menggunakan cara *up stage*. Apabila terjadi keruntuhan ketika pemboran maka menggunakan metode *down stage*.

6. Evaluasi *trial grouting*

Evaluasi hasil *trial grouting* dengan mengamati kehilangan perkolasi atau perubahan nilai lugoedari lubang *pilot hole* hingga *tertiary hole*. Apabila hasil WPT mendapatkan nilai lugeon <3, berarti jarak lubang trial sudah tepat, namun jika nilai lugeon >2 maka jarak lubang perobaan *grouting* harus diperkecil dengan membagi segitiga sama sisi menjadi dua, sehingga membentuk segitiga sama sisi baru yang lebih kecil.

2.4. Metode Pelaksanaan Trial Grouting

Uji kelulusan air bertekanan dianalisis dengan diagram alir pada Gambar 3. Persamaan mencari nilai lugeon koefisien permeabilitas pada kondisi lubang bor tidak runtuh sebagai berikut:

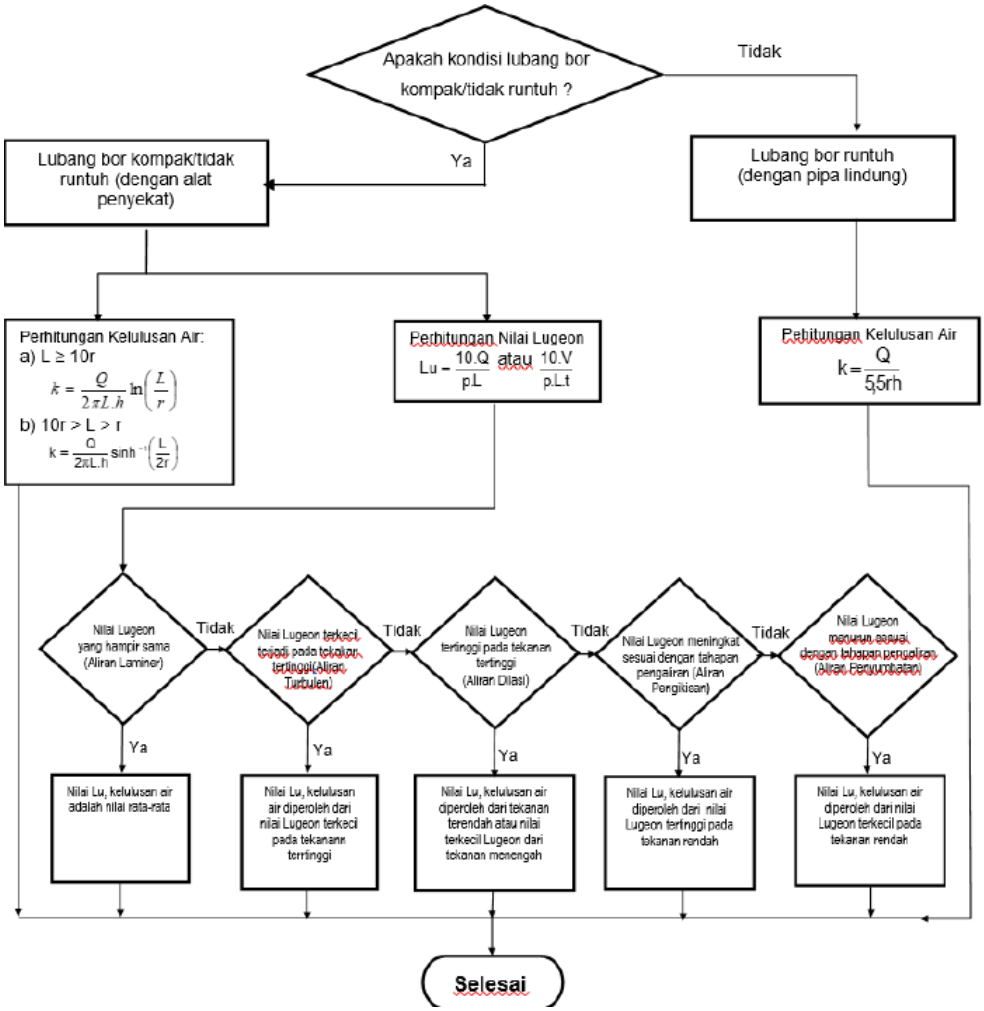
$$Lu = \frac{10Q}{p.L} \quad (1)$$

Keterangan:

Lu = nilai lugeon
L = kedalaman pengujian (cm)
p = tekanan pengujian (kg/cm²)

$$L \geq 10r$$
$$k = \frac{Q}{2\pi L.h} \ln\left(\frac{L}{r}\right) \quad (2)$$

Keterangan:
K = koefisien permeabilitas (cm/dt)
Q = rata-rata debit injeksi (cm³/dt)
L = kedalaman pengujian (cm)
h = konversi tekanan ke tinggi (m)
r = jari-jari lubang (cm)



Gambar 3 Bagan Alur Uji Kelulusan Air Bertekanan

Menurut (Sri Widowati, 2021), Untuk menentukan jarak dan kedalaman efektif *grouting* dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Efs = 100 - \frac{Kg}{K} \times 100 \quad (3)$$

Keterangan:
Efs = Efektivitas *grouting* dalam persen (%)
Kg = Kelulusan air sesudah *grouting*
K = Kelulusan air sebelum *grouting*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Trial Grouting

Data berikut (Tabel 1-4) merupakan hasil dari uji coba *grouting* yang telah dilakukan melalui empat tahapan pengeboran dan injeksi secara berurutan, yaitu: *Pilot Hole* (PH), *Secondary Hole* (S1), *Tersier Hole* (T1), dan diakhiri dengan *Check Hole* (CH). Data yang disajikan dalam tabel berikut merupakan ringkasan parameter yang diukur selama pelaksanaan uji coba *grouting* di lapangan. Data ini mencakup volume atau laju aliran *grout* yang diserap (Q dalam cm^3/det) dan tekanan injeksi (P dalam kg/cm^2) untuk setiap segmen kedalaman dan setiap tahapan pengeboran.

Tabel 1 Hasil *Water Pressure Test Pilot Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Kedalaman (m)
1	TG12-PH	89.00	1.568	0-5
2	TG12-PH	480.33	1.81	5-10
3	TG12-PH	485.67	2.757	10-15
4	TG12-PH	25.17	3.954	15-20

(**Sumber**: Pembacaan *Trial* di Lapangan)

Tabel 2 Hasil *Water Pressure Test Secondary Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Kedalaman (m)
1	TG12-S1	228.17	1.582	0-5
2	TG12-S1	143.67	1.47	5-10
3	TG12-S1	94.00	2.22	10-15

(**Sumber**: Pembacaan *Trial* di Lapangan)

Tabel 3 Hasil *Water Pressure Tersier Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Kedalaman (m)
1	TG12-T1	66.67	1.91	0-5
2	TG12-T1	108.00	2.333	5-10
3	TG12-T1	1.67	2.2	10-15

(**Sumber**: Pembacaan *Trial* di Lapangan)

Tabel 4 Hasil *Water Pressure Test Check Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Kedalaman (m)
1	TG12-CH	6.500	0.96	0-5
2	TG12-CH	2.167	1.48	5-10
3	TG12-CH	2.833	2.2	10-15

(**Sumber**: Pembacaan *Trial* di Lapangan)

3.2. Analisis Trial Grouting

Uji coba *grouting* lapangan dianalisis secara kuantitatif (Tabel 5-8) berdasarkan Nilai *Lugeon* (**pers. 1**), volume Injeksi *Grouting* (serapan) dari data lapangan, dan Koefisien Permeabilitas (**pers. 2**) . Data ini disajikan berurutan melalui tahapan Pilot Hole (PH), Secondary Hole (S1), dan Tersier Hole (T1). Tujuan utama adalah mengamati bagaimana efek perubahan kekedapan tanah dari kondisi awal hingga kondisi akhir dengan menggunakan parameter tersebut.

Tabel 5 Hasil Analisis *Trial* pada *Pilot Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Nilai Lugeon	Grouting (kg)	*k* (cm/det)
1	TG12-PH	89.00	1.568	13.37	953.83	1.19E-04
2	TG12-PH	480.33	1.81	33.06	3264.18	2.80E-04
3	TG12-PH	485.67	2.757	19.88	1948.71	1.82E-04
4	TG12-PH	25.17	3.954	0.67	*NO GROUT*	6.64E-06

Tabel 6 Hasil Analisis *Trial* pada *Secondary Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Nilai Lugeon	Grouting (kg)	*k* (cm/det)
1	TG12-S1	228.17	1.582	34.48	520.27	2.34E-04
2	TG12-S1	143.67	1.47	1.63	578.05	9.54E-05
3	TG12-S1	94.00	2.22	1.84	3362.92	4.01E-05

Tabel 7 Hasil Analisis *Trial* pada *Tersier Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Nilai Lugeon	Grouting (kg)	*k* (cm/det)
1	TG12-T1	66.67	1.91	5.24	661.98	7.27E-05
2	TG12-T1	108.00	2.333	5.15	1705.94	5.21E-05
3	TG12-T1	1.67	2.2	0.09	*NO GROUT*	7.19E-07

Tabel 8 Hasil Analisis *Trial* pada *Check Hole*

Stage	Nama Titik	*Q* (cm^3/det)	*P* (kg/cm^2)	Nilai Lugeon	Grouting (kg)
1	TG12-CH	6.500	0.96	1.16	9.26E-06
2	TG12-CH	2.167	1.48	0.18	1.43E-06
3	TG12-CH	2.833	2.2	0.15	1.22E-06

3.3. Analisis Trial Grouting

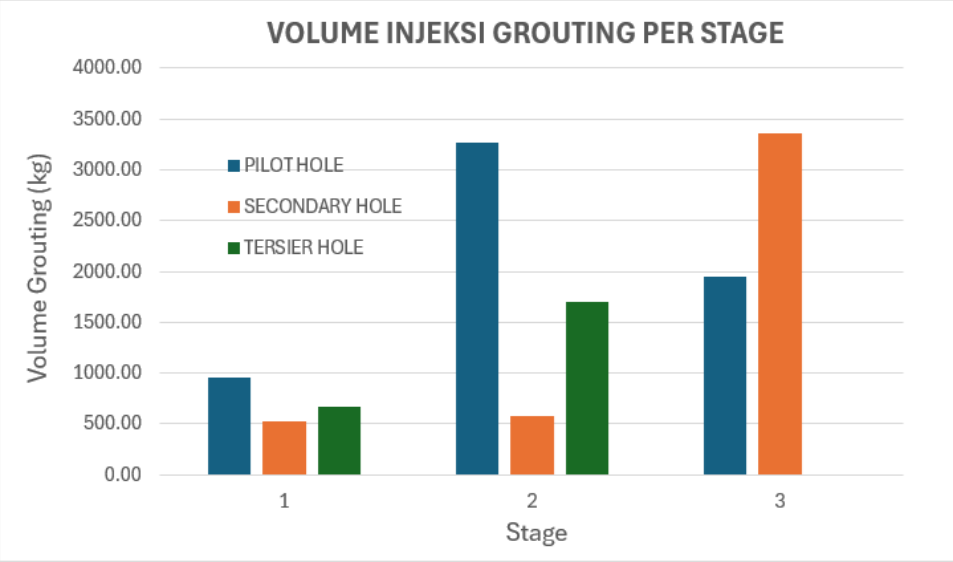
Evaluasi efektivitas *grouting* disajikan melalui perbandingan permeabilitas sebelum *grouting* (diambil dari data rata-rata *Pilot Hole, Secondary Hole, Tersier Hole*) dengan permeabilitas setelah *grouting* (diambil dari data *Check Hole*). Perbandingan ini diukur dalam persentase efektivitas (%) melalui **pers. 3** dan faktor penurunan (*X* Kali).

Tabel 9 Hasil Analisis Efektivitas Trial Grouting

Kedalaman (m)	Permeabilitas Sebelum Grouting (cm/det)	Permeabilitas Setelah Grouting (cm/det)	Efektivitas (%)	Keterangan
0-5	1.4191E-04	9.26E-06	93.48%	15.3 Kali
5-10	1.4235E-04	1.43E-06	99.00%	99.8 Kali
10-15	7.414E-05	1.22E-06	98.35%	60.6 Kali

(**Sumber**: Hasil Analisis Sendiri dan BOQ)

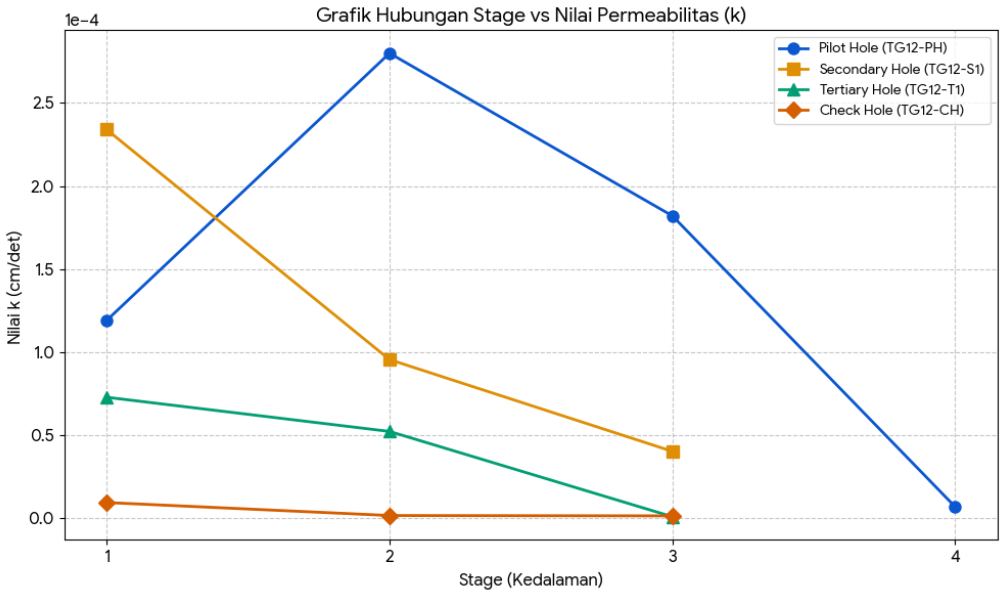
Pada Tabel 9, hasil paling efektif terlihat pada segmen kedalaman 5-10 meter, di mana permeabilitas berhasil diturunkan sebesar 99.00% atau hampir 100 kali lipat dari kondisi awal. Segmen kedalaman lainnya juga menunjukkan efektivitas yang sangat tinggi, di atas 93%. Konsistensi efektivitas yang dicapai di semua segmen kedalaman ini membuktikan bahwa metode dan parameter *grouting* yang digunakan telah optimal dan efektif. Berikut merupakan grafik hasil analisis efektivitas dari t*rial grouting*.



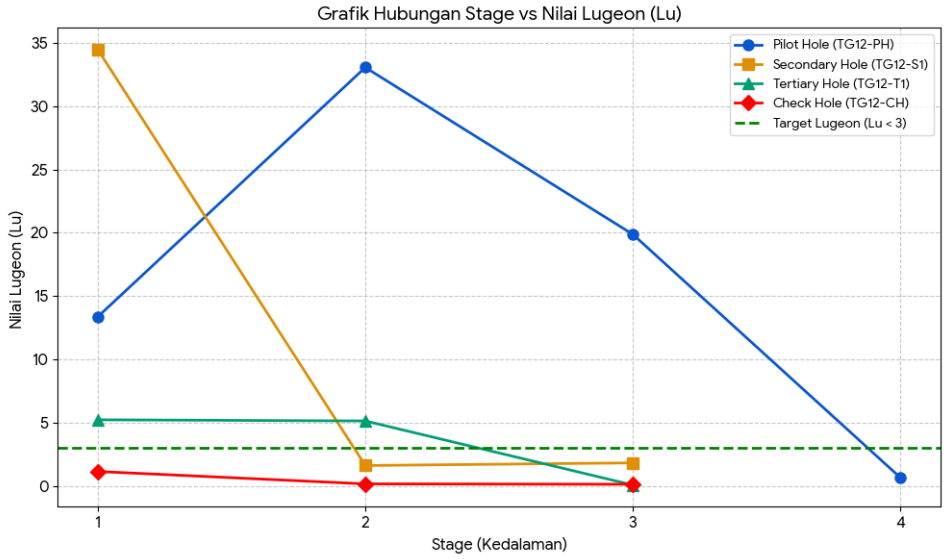
Gambar 4 Volume Injeksi Grouting per *Stage*

Grafik volume injeksi *grouting* per *stage* (Gambar 4) menunjukkan injeksi material *grout* di setiap tahapan. Pada *stage* 2 (5-10 m), injeksi pada *Pilot Hole* tergolong tinggi (3.250 kg), mengindikasikan zona yang sangat permeabel di awal. Pada injeksi *Tersier Hole* kembali tinggi (1.700 kg), menandakan bahwa sebaran injeksi *Pilot Hole* mengarah ke tengah (*Check Hole*). Sementara itu, pada *stage* 3 (10-15 m), *Secondary Hole* juga menunjukkan injeksi yang tinggi (3.350 kg). Hal ini menandakan bahwa sebaran injeksi *Pilot Hole* mengarah ke tengah (*Check Hole*).

Grafik Koefisien Permeabilitas (k) pada Gambar 5 membuktikan bahwa terjadi reduksi kekedapan tanah dari masing-masing stage secara berurutan karena efek *grouting*. Tahap *Check Hole* (CH) memiliki nilai permeabilitas yang terkecil di semua *stage*. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh *grouting* menyebar dengan efektif dan efesien.



Gambar 5 Hubungan *Stage* dengan Nilai Permeabilitas (k)



Gambar 4 Hubungan *Stage* dengan Nilai *Lugeon* (Lu)

Hasil evaluasi *Trial Grouting* pada STA 0+157 menunjukkan tingkat efektivitas yang sangat tinggi, dengan capaian reduksi permeabilitas rata-rata di atas 93% dan nilai akhir Lugeon pada *Check Hole* rata-rata di bawah 1,16 Lu. Jika dikomparasikan dengan studi kasus bendungan urugan lainnya di Indonesia, hasil ini tergolong dalam kategori "Sangat Baik".

Sebagai perbandingan, penelitian Alchaq Stahbani et al. (2020) pada Bendungan Beringin Sila mencatatkan efektivitas perbaikan pondasi sebesar 90,15% - 91,2% menggunakan metode serupa. Sementara itu, studi Asy'ari et al. (2021) pada Bendungan Tapin menunjukkan efektivitas grouting rata-rata sebesar 74,38%, yang dikategorikan "Baik". Penelitian Widiarso et al. (2023) pada Bendungan Randugunting menghasilkan efektivitas *curtain grouting* pada kisaran 70,62% hingga 88,34%.

Hal ini mengindikasikan bahwa metode *upstage* dengan pola *split-spacing* (Pilot-Sekunder-Tersier) yang diterapkan di Bendungan Cibeet memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan rata-rata proyek sejenis. Tingginya angka efektivitas ini (>93%) kemungkinan besar dipengaruhi oleh keberhasilan penetrasi semen pada zona retakan mikro di kedalaman 5–10 meter, yang terkonfirmasi oleh penurunan drastis nilai permeabilitas dari orde 10^{-4} ke 10^{-6} cm/det. Nilai akhir Lu < 1,16 juga jauh melampaui standar keamanan umum untuk bendungan urugan yang mensyaratkan Lu < 3.

3.4. Analisis Biaya Trial Grouting pada STA 0+157

Analisis biaya uji coba *grouting* ini bertujuan untuk mengestimasikan keseluruhan anggaran yang dikeluarkan selama pelaksanaan pekerjaan lapangan. Berikut merupakan hasil dari analisis biaya dari *Trial Grouting* metode *upstage* pada STA 0+157.

Tabel 10 Analisis Biaya *Trial Grouting* STA 0+157

No	Uraian	Volume		Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
		Trial	Satuan		
1	Pengeboran lubang :				
	0 m - 10 m	40	m	Rp 1,116,385.71	Rp 44,655,428.40
	10 m - 20 m	25	m	Rp 1,267,563.07	Rp 31,689,076.70
2	Water Pressure Test	16	kali	Rp 629,563.75	Rp 10,073,019.98
3	Lugeon Test	65	m	Rp 200,000.00	Rp 13,000,000.00
4	Grouting dan Operator	12,9	ton	Rp 2,658,375.07	Rp 34,547,950.96
		TOTAL			Rp 133,965,476.04

Berdasarkan perhitungan di atas, total biaya yang dikeluarkan untuk seluruh rangkaian uji coba *grouting* adalah Rp 133,965,476.04.

4. KESIMPULAN

Secara teknis, *Trial Grouting* dengan metode *upstage* pada STA 0+157 terbukti sangat efektif, ditandai dengan penurunan permeabilitas yang signifikan dari orde 10-4 cm/det menjadi 10-6 cm/det dan capaian nilai Lugeon akhir rata-rata di bawah 1,16 Lu, jauh melampaui standar keamanan desain (Lu < 3). Tingkat keberhasilan yang mencapai di atas 93% pada seluruh segmen kedalaman mengonfirmasi bahwa pola *split-spacing* (Pilot-Sekunder-Tersier) mampu menutup rekahan batuan sedimen secara optimal, dengan biaya pelaksanaan sebesar Rp 133.965.476,04 yang dapat dijadikan acuan estimasi anggaran pelaksanaan. Sebagai rekomendasi implementasi proyek, parameter tekanan injeksi dan *mix design* yang telah teruji direkomendasikan menjadi acuan standar pelaksanaan pekerjaan Bendungan Utama., dengan pengawasan khusus pada zona kedalaman 5–10 meter yang memiliki serapan material tertinggi. Penerapan pola pengeboran yang sama akan menjamin efisiensi biaya tanpa mengurangi kualitas kekedapan, yang krusial untuk mencegah risiko *piping* serta menjaga keberlanjutan fungsi bendungan sebagai pengendali banjir dan penyedia air baku dalam jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

Alchaq Stahbani, I. R., Sastra Wibawa, I. G., & Made Parwita, I. G. L. (2020). Metode Pelaksanaan Dan Efektivitas Perbaikan Pondasi Dengan Metode Grouting Studi Kasus: Proyek Pembangunan Bendungan Beringin Sila Paket Ii (Desa Tengah, Kecamatan

Utan, Kabupaten Sumbawa, Nusa Tenggara Barat).

Asy'ari, M. A., Hidayatullah, R., & Lestari, D. (2021). Pengaruh Grouting Terhadap Nilai Lugeon Pada Batuan Dasar Pondasi Bendungan Tapin.

Asy'ari, M. Z. M., Budinetro, H. S., & Narayana, A. (2023). Kondisi Pondasi Bendungan Jragung Sebelum Dan Setelah Grouting Dan Analisis Perbandingan Biaya Pekerjaan Grouting Metode Downstage Dan Upstage. Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil Ums, 293–301.

Departemen Pekerjaan Umum. (2005). Pedoman Grouting Untuk Bendungan.

Liu, X., Gu, Y., Wang, S., Lu, Q., & Wang, H. (2024). Experimental seepage analysis of piping failure in homogeneous earth dams. *China Rural Water Resources and Hydropower, 2024*(6), 166–173. https://doi.org/10.12396/znsd.231643

Metode Pelaksanaan Trial Grouting Bendungan Cibeet. (2025).

Setyawati, H., Najib, N., & Hidayatillah, A. S. (2018). Analisis Rembesan Pada Perencanaan Pembangunan Bendungan Logung, Kabupaten Kudus, Jawa Tengah. Jurnal Geosains Dan Teknologi, 1(3), 99–106.

Spesifikasi Teknik Bendungan Cibeet. (2023).

Sri Widowati, Y. (2021). Perencanaan Grouting Pada Proyek Pembangunan Bendungan Cipanas.

Widiarso, D. A., Firman, T., & Marin, J. (2023). *Curtain Grouting Effectivity Analysis On Foundation Rocks In Blocks 37-40 In The Body Of Randugunting Dam, Blora Regency, Central* Java. *E3s Web Of Conferences, 448.* Https://Doi.Org/10.1051/E3sconf/202344803039