

EVALUASI HASIL PERCOBAAN GROUTING PADA FONDASI BENDUNGAN UTAMA LADONGI, KOLAKA TIMUR

KUKUH VIVIAN TRI ADHITAMA¹, IMAM ACHMAD SADISUN¹

1. Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

Sari – Bendungan Ladongi dibangun di atas satuan litologi batuan metamorf sekis mika. Penyelidikan bawah permukaan area fondasi bendungan utama penting dilakukan untuk menentukan keputusan dilakukannya perbaikan massa batuan pada interval tertentu dengan tujuan meningkatkan kekuatan massa batuan serta memperkecil nilai lugeon. *Grouting* (injeksi campuran semen bertekanan) merupakan metode perbaikan fondasi bendungan utama yang sering digunakan, penelitian ini merupakan percobaan awal menguji pola rencana *grouting* yang akan diterapkan. Uji lugeon merupakan bagian dari *grouting* dengan pengujian yang sama setiap interval 5 m, pada penelitian ini sebanyak 112 buah pengujian dilakukan secara *multiple down stage* dengan total kedalaman pengeboran 560 m. Jarak spasi dan penggunaan tekanan maksimum pada saat penginjeksian semen menjadi evaluasi pada percobaan ini terkait dengan efektivitas dan respons batuan terhadap rekah hidraulik maupun dari hasil pengujian kelulusan air. Hasil pengujian menunjukkan pola dan tekanan yang diterapkan sudah efektif untuk tumpuan kiri dan *river-bed* bendungan utama berdasarkan kondisi seluruh kedalaman interval pengujian di CH-01 dan CH-02 tidak memerlukan *grouting*, berbeda dengan tumpuan kanan yang masih memerlukan *grouting* pada lubang CH-03 pada tahapan ketiga dan keempat mengindikasikan pada tumpuan kanan perlu penyesuaian terkait tekanan maksimum yang digunakan. Pada tumpuan kiri dan kanan menunjukkan kondisi rekahan yang relatif besar pada kedalaman antara 10-30 m berdasarkan volume injeksi material semen yang besar sampai dengan 2000 kg dalam sekali penginjeksian. Pelaksanaan *grouting* dapat mengubah pola aliran alami/awal, seperti pada tumpuan kanan pada CH-03 hampir seluruh pola aliran semua tahapan berubah ke pola *dilation* berdasarkan hubungan dari lubang *pilot hole* dengan *check hole*. Pengujian efektivitas menunjukkan pada tumpuan kanan *stage* pengujian kedua sebesar 36,03% (sedang) dan *stage* ketiga sebesar 12,97% (buruk), sehingga perlu penyesuaian ulang terkait *grouting* sekitar area interval tersebut.

Kata kunci: uji air bertekanan, lugeon, *grouting*, sekis mika.

Abstract - *Ladongi Dam is built on a lithological unit of mica schist metamorphic rock. Subsurface investigations of the main dam foundation area are important to determine the decision to make rock mass repairs at certain intervals to increase the strength of the rock mass and reduce the lugeon value. Grouting (injection of pressurized cement mixture) is a method of repairing the foundation of the main dam that is often used, this research is an initial experiment to test the pattern of the grouting plan that will be applied. Lugeon test is part of grouting with the same test every 5 m interval, in this study 112 tests were carried out in multiple down stages with a total drilling depth of 560 m. The spacing and the use of maximum pressure at the time of cement injection were evaluated in this experiment related to the effectiveness and response of rock to hydraulic fracturing and lugeon. The test results show that the pattern and pressure applied are effective for the left abutment and river-bed of the main dam based on the condition of the entire depth of the test interval in CH-01 and CH-02 that does not require grouting, in contrast to the right abutment which still requires grouting in the CH-03 hole. In the third and fourth stages indicate the right abutment needs adjustment regarding the maximum pressure used. The left and right support show relatively large fracture conditions at depths between 10-30 m based on the large volume of cement material injection up to 2000 kg in one injection. The implementation of grouting can change the natural/initial flow pattern, as in the right abutment on the CH-03 almost the entire flow pattern of all stages changes to a dilation pattern based on the relationship of the pilot hole to the check hole. The effectiveness test showed that on the right abutment the second test stage was 36.03% (moderate) and the third stage was 12.97% (poor), so it needed to be re-adjusted regarding grouting around the interval area.*

Keywords: water pressure test, lugeon, *grouting*, mica schist.

1. PENDAHULUAN

Rembesan di bawah permukaan merupakan hal yang menyebabkan ketidakstabilan suatu bangunan di atasnya sehingga menimbulkan

potensi kegagalan infrastruktur bangunan termasuk sebuah bendungan. *Curtain grouting* menjadi teknik remediasi geoteknik yang

sering diaplikasikan pada fondasi dalam pembangunan bendungan ataupun tanggul tanah (*earthen impoundments*) semacamnya (Bryson dkk., 2014; Fan dkk., 2016; Nasmiarta dan Hendrawan, 2016; Sosrodarsono dan Takeda, 1977). Percobaan (*trial*) *grouting* dilakukan pada tahap studi desain rinci proyek dan pada tahap pelaksanaan konstruksi dengan tujuan untuk menguji dan mengevaluasi terkait efektivitas pola, jarak, dan tekanan injeksi *grouting* yang direncanakan (SDA PUPR, 2005). Goodman (1989) menjelaskan bahwa pada sebuah bendungan potensi deformasi terbesar terletak pada bagian fondasi dan *abutment*/tumpuan. Das dan Sobhan, (2014) mengilustrasikan pada sebuah grafik terkait aliran rembesan atau perkolasi pada fondasi bendungan melalui bentuk *flow net*. Adanya aliran bawah permukaan tersebut membuat penyebab tidak stabil pada bendungan utama sehingga harus dilakukan penyelidikan terkait hal tersebut, yakni penyelidikan bawah permukaan dengan metode pengeboran inti yang disertai uji kelulusan air bertekanan (lugeon) dengan standar yang berlaku di Indonesia tercantum pada SNI 2411:2008 (SNI, 2008).

Berhubungan dengan persebaran batuan sekis mika pada lokasi penelitian, bidang foliasi dan kenampakan *vein* kuarsa pada batuan sekis merupakan zona lemah, melakukan metode injeksi fluida bertekanan dapat menyimpulkan kondisi massa batuan area penelitian (Ye dkk., 2020), sehingga Uji Lugeon efektif untuk mengetahui kondisi massa batuan bawah permukaan. SDA PUPR (2005) menjelaskan karakteristik potensi rongga pada batuan metamorf termasuk sekis memiliki tipe rongga bidang datar (foliasi) kecuali metamorf dengan pengaruh pelapukan yang sangat tinggi.

$$Lu = \frac{10 \cdot Q}{p \cdot L} \text{ atau } Lu = \frac{10 \cdot V}{p \cdot L \cdot t} \dots\dots\dots 01$$

dengan:

Q = debit air yang masuk (l^3 /menit) melalui lubang bor berukuran NX yaitu berdiamater 75,7 mm;

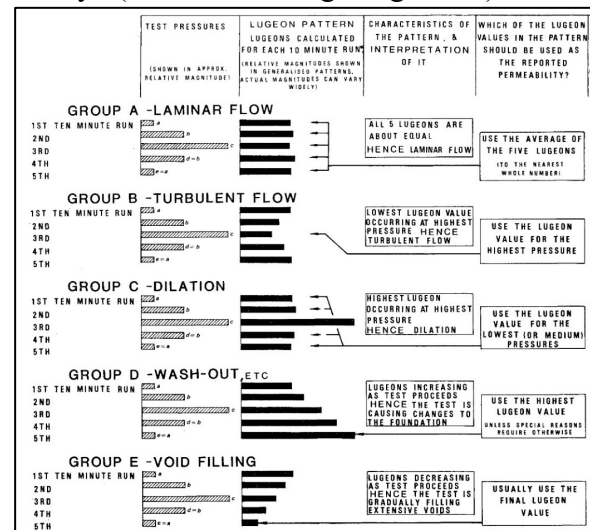
p = tekanan uji, (kg/cm^2); (p = pm+ps dengan pm adalah tekanan manometer dan ps adalah h tinggi tekanan air yang telah dikonversikan ke dalam satuan kg/cm^2),

L = panjang bagian yang diuji (m),

V = volume air yang diinjeksikan, (liter) ke dalam lubang bor berukuran NX, yakni dengan diameter 75,7 mm,

t = waktu (menit).

Gambar 1 menunjukkan respons batuan terhadap perbedaan tekanan yang diterapkan pada saat injeksi air. Hal tersebut bertujuan untuk memperkirakan tekanan maksimal yang akan digunakan saat melakukan injeksi cairan semen agar tidak mengalami rekah hidrolik. Jika melakukan injeksi air dengan tekanan melebihi *critical pressure* batuan maka akan terjadi pemisahan pada *bedding* atau *fissure* tergantung pada tekanan pembebanan di atasnya (Ewert dan Hungsberg, 2018).



Gambar 1. Pola aliran pada uji lugeon (Houlsby, 1976).

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. Pearson dan Money (1977) menjelaskan bahwa dari hasil uji kelulusan air menunjukkan anomali antara aliran terhadap tekanan, kemudian dari grafik uji kelulusan air bertekanan dapat mengidentifikasi deformasi yang terjadi, yakni *plastic* atau *elastic deformation* (Ewert dan Hungsberg, 2018).

Berdasarkan Cendegren (1967) dikutip dalam SDA PUPR (2005) besarnya efektivitas *grouting* ditunjukkan oleh besarnya perubahan

kelulusan air sebelum dan setelah dilakukan *grouting*. Rumus yang diterapkan untuk menentukan efektivitas *grouting*, sebagai berikut:

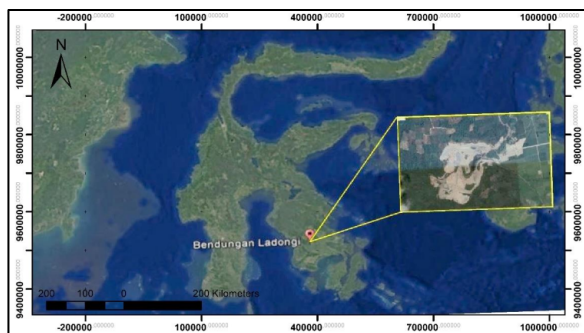
$$Efs = 100 - (Kg/K) \cdot 100 \dots\dots\dots 02$$

dengan:

- Efs = Efektivitas *grouting* dalam persen (%),
- Kg = Kelulusan air sesudah *grouting*,
- K = Kelulusan air sebelum *grouting*.

Hasil dari pengujian kelulusan air dapat digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien permeabilitas (k) maupun lugeon (Lu). Pada penelitian ini pola empat titik diasumsikan *grouting* antar lubang pengujian saling mempengaruhi satu dengan yang lainnya. Nilai Efs menentukan tingkat pengaruh *grouting*, yakni: >90% sangat baik, 60-90% baik, 30-60% sedang, 10-30% kurang, dan <10% buruk.

Gambar 2 menunjukkan lokasi penelitian yang terletak pada Kelurahan Atula di Kecamatan Ladongi, Kabupaten Kolaka Timur, Sulawesi Tenggara, Indonesia, dan secara geografis titik Bendungan Ladongi pada koordinat UTM 376727; 9541277 (*easting*; *northing*) zona 51s, datum WGS-84 1984. Jarak lokasi penelitian dari kota Kendari sejauh 120 km melalui akses jalan poros Unaaha-Pondidaha.

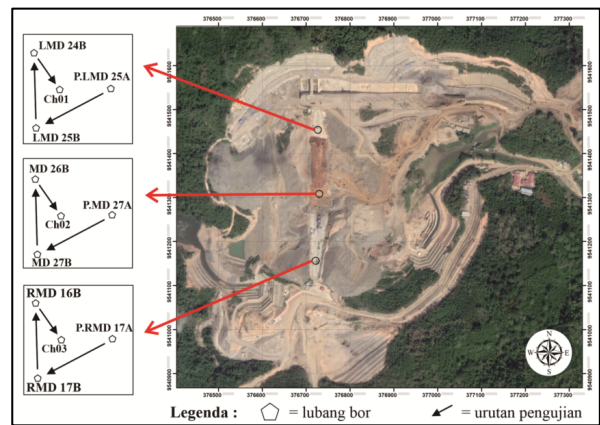


Gambar 2. Lokasi penelitian Bendungan Ladongi.

2. DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer pengeboran yang telah dilakukan sejumlah 12 titik lubang yang dibagi menjadi tiga bagian, yakni tumpuan kiri, tengah bendungan utama, dan tumpuan kanan masing-masing empat titik lubang. Kegiatan

pengeboran pada masing-masing bagian tersebut dengan dua tipe pengeboran, yakni secara *full coring (pilot; check hole)* dan *open hole*. Terkait kedalaman pengeboran (*end of hole*) disesuaikan dengan desain perencanaan, yakni 40 m untuk tumpuan kiri dan kanan dan kedalaman 50 m untuk *river-bed*. Tengah bendungan utama lebih dalam daripada tumpuan kanan dan kiri karena pada bagian ini menerima sekitar 50% lebih beban timbunan material urugan yang diterima pada as bendungan utama. **Gambar 3** menunjukkan rencana pola pelaksanaan percobaan *grouting* dengan bentuk segitiga tertutup, diawali dengan pengeboran *pilot hole*, kemudian dua *open hole*, dan terakhir *check hole* dengan posisi di dalam area ke tiga titik yang sudah diselesaikan.

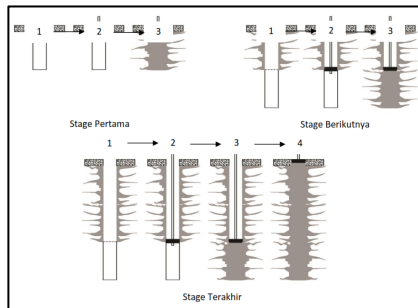


Gambar 3. Titik bor pengujian.

Pengujian empat lubang pada setiap bagian dari bendungan utama dilakukan secara berurutan, khusus *check hole* merupakan sebagai lubang untuk validasi kondisi terakhir nilai koefisien permeabilitas maupun lugeon di antara lubang-lubang tersebut. Dalam hal ini akan menunjukkan perkembangan, hubungan, dan efektivitas dari pelaksanaan *grouting* dengan pola dan jarak yang telah ditetapkan. Hal-hal tersebut menjadi evaluasi juga dalam menentukan bagaimana respons batuan terhadap injeksi fluida bertekanan yang dilakukan dengan tujuan untuk pelaksanaan pekerjaan *grouting* utama (*curtain, sub-curtain, dan blanket*) agar mendapatkan hasil optimal dan tidak merusak terkait kondisi persebaran rekahan bawah permukaan pada area fondasi bendungan utama.

Gambar 4 menunjukkan metode dari proses *grouting* secara *multiple downstage* dari tahapan lubang pertama (kedalaman 0-5 m) sampai dengan target kedalaman dengan kemajuan setiap 5 m. Setelah mencapai target kedalaman, lalu dilakukan penutupan lubang (*plugging*) dengan menggunakan campuran cairan semen dengan pasir (mortar).

Gambar 4. Sketsa rangkaian alat *grouting*.



Pada **Tabel 1** menunjukkan besar nilai lugeon yang diperlukan untuk melakukan *grouting* serta campuran awal yang digunakan dalam proses injeksi, Nonveiller (1989) mencantumkan bahwa pada nilai lugeon >3 memerlukan *grouting*.

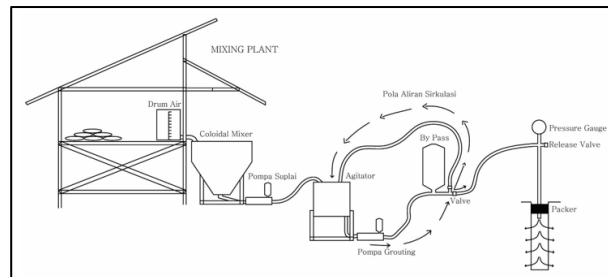
Tabel 1. Nilai lugeon terhadap pelaksanaan *grouting*

Nilai Lugeon Hasil WPT	Campuran Awal
$Lu < 3$	no grouting
$3 \leq Lu < 10$	1 : 4
$10 \leq Lu \leq 50$	1 : 3
$Lu > 50$	1 : 2

Pada tahap *grouting* pada bagian campuran air dan semen terdiri dari beberapa macam campuran dan saat memulai proses injeksi fluida campuran tersebut dimulai yang paling encer (berdasarkan nilai lugeon yang didapat) sampai dengan takaran maksimal tertentu kemudian diganti ke campuran yang lebih kental sampai mendapat kondisi ketika tidak ada lagi atau sangat sedikit campuran yang masuk ke rekahan batuan dalam waktu tertentu yang telah ditetapkan maka proses penginjeksian larutan semen dinyatakan selesai.

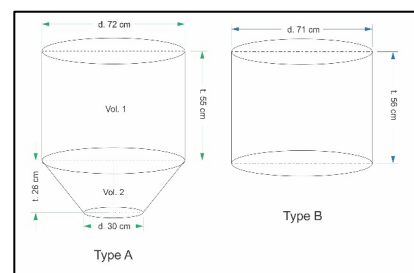
Gambar 5 merupakan rangkaian alat yang digunakan dalam pelaksanaan proses *grouting*, seperti mesin pompa, agitator, manometer,

koloidal *mixer*, dan alat *packer*.



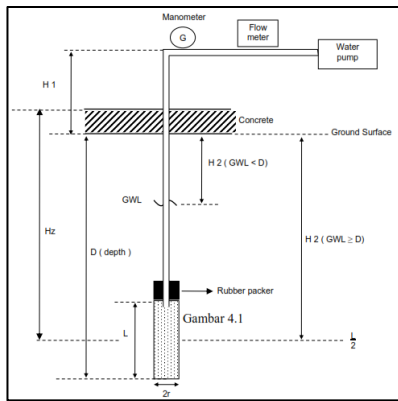
Gambar 5. Langkah urutan pelaksanaan *multiple down stage*.

Gambar 6 merupakan tempat penampungan campuran semen dari *coloidal mixer*, pada setiap selesai injeksi campuran *grouting* diperlukan data mengenai campuran injeksi pada tahapan lubang *grouting*. Alat yang digunakan pada Proyek Pembangunan Bendungan Ladongi salah satunya *Automatic Recorder* jenis Kohren Optiflux 2000, alat tersebut secara komputerisasi mencatat masuknya campuran pada saat *grouting*. Tetapi pada saat pelaksanaan *trial grouting* penggunaan alat tersebut sering terkendala karena alat jenis tersebut rentan terhadap kerusakan kelistrikan, maka dari itu sebagai alternatif terhadap kondisi tersebut dilakukan perhitungan volume campuran yang masuk secara manual dengan prinsip pengamatan dan perhitungan terhadap penurunan campuran pada Agitator dengan detail dimensi **Gambar 6**.



Gambar 6. Dimensi agitator yang digunakan.

Gambar 7 menggambarkan rangkaian dalam pengujian lugeon, pada penelitian ini menggunakan jenis alat *packer* tipe tunggal. Pada *check hole* dilakukan *multiple water pressure test* (uji lugeon) dengan beberapa penerapan tekanan injeksi yang berbeda, sedangkan untuk *open hole* hanya melakukan *single test* saat pengujian.



Gambar 7. Skema uji lugeon dengan alat packer tunggal.

Penentuan tekanan maksimum yang akan digunakan menjadi hal penting karena merupakan faktor dominan dalam pengujian lugeon. Pada penelitian ini merupakan tahap/evaluasi awal sebelum dilaksanakannya *grouting* bendungan utama secara detail, sehingga penentuan tekanan maksimal berdasarkan kondisi umum ($0,23 \times$ kedalaman lubang uji), dan juga berdasarkan evaluasi dari konsultan pengawas (*engineering judgement*).

Pada penelitian ini ditentukan pemakaian tekanan maksimum seperti pada **Tabel 2**. Jumlah debit air yang masuk dan tekanan yang digunakan menjadi acuan penting dalam pelaksanaan pengujian ini, sehingga pada pengujian ini mendapatkan nilai lugeon, dan kondisi/respons batuan terhadap injeksi fluida dengan penerapan nilai tekanan tertentu.

Tabel 2. Penggunaan tekanan maksimum setiap tahapan percobaan *grouting* (dokumen kontraktor)

STAGE	KEDALAMAN (m)	PANJANG INTERVAL (m)	P MAX WATER TEST (Kg/cm ²)	TEKANAN WATER PRESSURE TEST (Kg/cm ²)						
				P.1	P.2	P.3	P.4	P.5	P.6	P.7
1	0 - 5	5,0	1	0,33	0,67	1	0,67	0,33		
2	5 - 10	5,0	2	0,67	1,33	2	1,33	0,67		
3	10 - 15	5,0	3,5	1	2	3,5	2	1		
4	15 - 20	5,0	4,5	1,5	3	4,5	3	1,5		
5	20 - 25	5,0	5,5	2	3,5	5,5	3,5	2		
6	25 - 30	5,0	7	1,75	3,5	5	7	5	3,5	1,75
7	30 - 35	5,0	8	2	4	6	8	6	4	2
8	35 - 40	5,0	8	2	4	6	8	6	4	2
9	40 - 45	5,0	8	2	4	6	8	6	4	2
10	45 - 50	5,0	8	2	4	6	8	6	4	2
11	50 - 55	5,0	8	2	4	6	8	6	4	2
12	55 - 60	5,0	8	2	4	6	8	6	4	2

Setelah melakukan semua pengujian pada setiap tahapan kedalaman maka beberapa parameter penting seperti nilai lugeon, pola

aliran, volume campuran injeksi (*grout take*), dan tekanan aktual pada proses *grouting*. Khusus pada pola aliran hanya pada *pilot hole* dan *check hole*, karena dibutuhkan pembacaan nilai lugeon dalam beberapa variasi tekanan yang berbeda untuk membaca sensitivitas respons batuan terhadap fluida yang diinjeksikan dengan tekanan. Analisis data akan menggunakan metode perbandingan data melalui grafik dan selanjutnya melakukan interpretasi berdasarkan detail yang didapatkan dan diolah.

3. HASIL DAN ANALISIS

Pada bab ini menjelaskan hasil pengujian setiap 5 m kedalaman (tahapan/ *stage*) mendapatkan nilai lugeon untuk menentukan perlu dilakukan injeksi campuran semen (*grouting*) atau tidak, kemudian berdasarkan nilai lugeon digunakan untuk memilih komposisi campuran awal, dan dilanjutkan pergantian campuran berdasarkan respons massa batuan terhadap viskositas campuran (debit dan waktu). Pada pembahasan digunakan singkatan untuk menunjukkan macam pola aliran, yakni Tr (*turbulent*), Lm (*laminar*), VF (*void filling*), WO (*washout*), dan Dl (*dilation*).

Pada **Tabel 3** menunjukkan hasil dari penelitian pada area tumpuan kiri bendungan utama dengan kedalaman pengeboran 40 m setiap lubang. Nomor lubang yang telah dilakukan secara berurutan pada area tumpuan kiri antara lain P.LMD 25A (*pilot hole*), LMD 25B (*open hole*), LMD 24B (*open hole*), dan kemudian CH-01 (*check hole*).

Pada P.LMD 25A kedalaman yang memerlukan injeksi *grouting*, yakni pada kedalaman 0-5 m (tahapan pertama) dan kedalaman 10-15 m (tahapan ketiga). Pada kedalaman tahapan pertama injeksi campuran semen dan air dimulai dengan 1: 2 (semen: air) sebanyak 926,8 liter selama 37 menit, kemudian menggunakan campuran 1:1 sebesar 526,9 selama 35 menit, dan selanjutnya mengganti campuran 1:0.8 sampai fluida semen tidak dapat masuk lagi selama 10 menit terakhir. Didapatkan waktu total injeksi campuran semen selama 119 menit dengan

tekanan konstan pada 1 kg/cm².

Selanjutnya melakukan injeksi campuran semen pada kedalaman tahapan ketiga dengan komposisi awal 1:3 selama 57 menit dengan volume campuran sebesar 1658,7 liter, kemudian dilanjutkan perubahan campuran 1:2 selama 37 menit dengan volume campuran

sebesar 1158,7 liter, kemudian menggunakan campuran 1:1 selama 21 menit dengan jumlah volume sebesar 658,7 liter, dan terakhir menggunakan campuran 1:0.8 selama 18 menit dengan volume injeksi sebesar 558,7 liter serta dapat mencapai tekanan 3,5 kg/cm² secara konstan dengan akumulasi waktu 133 menit.

Tabel 3. Data tumpuan kiri

Tahapan	Kedalaman (m)	Nama Lubang									Efektivitas Grouting (%)	
		P.LMD 25A			LMD 25B		LMD 24B		CH-01			
		Lugeon	Grout Take (Lt)	Tipe Aliran	Lugeon	Grout Take (Lt)	Lugeon	Grout Take (Lt)	Lugeon	Grout Take (Lt)		Tipe Aliran
1	0-5	125.01	1774.20	Tr	26.13	523.40	128.67	508.10	2.38	0.00	Tr	98.10
2	5-10	0.59	0.00	DI	49.15	734.30	60.42	1187.50	1.71	0.00	Tr	-
3	10-15	10.23	4034.90	DI	41.64	1780.10	48.27	535.30	0.02	0.00	VF	99.80
4	15-20	0.27	0.00	DI	2.84	0.00	4.99	628.80	0.81	0.00	VF	-
5	20-25	0.67	0.00	DI	2.34	0.00	1.93	0.00	2.06	0.00	DI	-
6	25-30	0.69	0.00	VF	0.90	0.00	2.83	0.00	0.33	0.00	DI	-
7	30-35	0.02	0.00	VF	1.01	0.00	0.34	0.00	0.09	0.00	VF	-
8	35-40	0.66	0.00	DI	1.17	0.00	0.32	0.00	0.37	0.00	VF	-
9	40-45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	45-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Volume injeksi maksimal telah dicapai sehingga proses injeksi dihentikan dan perlu dilakukan *re-grouting* kembali pada tahapan kedalaman 10-15 m.

LMD 25B berdasarkan uji lugeon kedalaman yang perlu *grouting* antara lain tahapan kedalaman satu (0-5 m), dua (5-10 m), dan tiga (10-15 m). Pada tahapan pertama dimulai dengan injeksi campuran 1:3 selama 90 menit dengan volume campuran sebesar 434,2 liter masih terdapat laju campuran ke dalam batuan, sehingga dilanjutkan dengan campuran 1:2 sampai tidak ada kenampakan laju campuran semen masuk ke batuan selama 10 menit terakhir. Proses injeksi pada tahapan kedalaman ini berlangsung selama 136 menit dengan tekanan 1 kg/cm². Pada pengujian tahapan kedua injeksi campuran semen seluruhnya menggunakan campuran 1:3 dengan volume injeksi pada 53 menit awal sejumlah 718,5 liter, dan kemudian stabil dengan tekanan 2 kg/cm² sampai akhir pengujian pada menit 83. Pada injeksi tahapan ketiga dimulai campuran 1:3 dengan volume 487,62 liter hanya mampu mencapai tekanan 2 kg/cm² selama 9 menit, kemudian menggunakan komposisi 1:2 sejumlah 579,3 liter hanya mampu mencapai 2,5 kg/cm² dalam 23 menit, kemudian campuran 1:1 sejumlah 658,7 liter, dan selesai pada campuran 1:0.8 dengan tekanan stabil di 3,5 kg/cm². Total waktu 97 menit untuk menyelesaikan tahapan ini.

Selanjutnya untuk lubang LMD 24B berdasarkan uji lugeon pada tahapan pertama sampai keempat memerlukan injeksi campuran semen. Pada tahapan pertama injeksi sepenuhnya menggunakan komposisi 1:2 dan dapat stabil di tekanan 1 kg/cm² dalam waktu 69 menit. Kemudian injeksi pada tahapan kedua diawali dengan campuran semen 1:2 selama 87 menit dengan volume sebesar 1158,7 liter, kemudian menggunakan campuran 1:1 sampai selesai dengan total waktu 126 menit dalam tekanan stabil di 2 kg/cm². Pada tahapan ketiga injeksi dimulai campuran 1:3 selama 90 menit dengan volume 454,1 liter, kemudian selesai dengan campuran 1:2 dengan total waktu 140 menit dalam tekanan stabil di 3,5 kg/cm². Pada tahapan keempat dimulai injeksi dengan campuran 1:4 selama 90 menit, kemudian selesai dengan campuran 1:3 dengan waktu total 191 menit dalam tekanan yang stabil di 4,5 kg/cm². Kesimpulan dari efektivitas *grouting* di tumpuan kiri berdasarkan selisih perubahan nilai kelulusan air yang dilakukan *grouting* di *pilot hole* dan terhadap *check hole* pada kedalaman 0-5 m sebesar 98,10 % dan pada kedalaman 10-15 m 99,98 % tergolong sangat baik dalam efektivitas *grouting*nya.

Pada **Tabel 4** menunjukkan hasil dari penelitian pada area tengah bendungan utama dengan kedalaman pengeboran 50 m setiap lubangnya. Nomor lubang yang telah dilakukan secara berurutan pada area tumpuan kiri, antara lain P.LMD 27A (*pilot hole*), LMD 27B (*open hole*), LMD 26B (*open hole*), dan

CH-02 (*checkhole*). Pada P.MD 27A kedalaman yang memerlukan injeksi *grouting*, yakni pada kedalaman 0-5 m (tahapannya satu) dan kedalaman 5-10 m (tahapannya kedua). Pada tahapan pertama injeksi dimulai campuran 1:3 selama 14 menit dengan volume 497,6 liter, kemudian menggunakan komposisi 1:2 selama 24 menit dengan volume 463,4 liter, lalu menggunakan campuran 1:1 selama 37 menit dengan volume 526,9 liter, dan selanjutnya mengganti campuran 1:0,8 dengan volume 558,7 liter dalam tekanan konstan 1 kg/cm² berakhir karena terjadi kendala (kebocoran permukaan sekitar dan teknis alat packer) sehingga diperlukan *re-grouting* pada tahapan

ini. Pada tahapan kedua injeksi hanya menggunakan campuran 1:3 dengan volume 58 menit awal sebesar 888,3 liter, tahapan ini selesai dalam waktu 88 menit dengan tekanan stabil di 2 kg/cm².

MD 27B berdasarkan uji lugeon kedalaman yang perlu *grouting* antara lain tahapan kedalaman satu (0-5 m), dua (5-10 m), dan tiga (10-15 m). Pada tahapan pertama injeksi dimulai campuran 1:2 selama 12 menit dengan volume 463,4 liter, kemudian menggunakan campuran 1:1 sampai dengan selesai waktu total 57 menit dalam tekanan stabil di 1 kg/cm².

Tabel 4. Data tengah bendungan utama (*river-bed*)

Tahapan	Kedalaman (m)	Nama Lubang											Efektivitas Grouting (%)
		P.MD 27A			MD 27B		MD 26B		CH-02				
		Lugeon	Grout Take (Lt)	Tipe Aliran	Lugeon	Grout Take (Lt)	Lugeon	Grout Take (Lt)	Lugeon	Grout Take (Lt)	Tipe Aliran		
1	0-5	22.56	2046.80	Tr	64.58	667.50	21.79	343.30	0.00	0.00	DI	100.00	
2	5-10	10.14	904.10	VF	6.85	560.50	17.11	359.00	1.94	0.00	Tr	71.68	
3	10-15	1.71	0.00	DI	6.51	309.00	0.69	0.00	0.40	0.00	Tr	-	
4	15-20	0.85	0.00	DI	2.56	0.00	1.02	0.00	0.76	0.00	Tr	-	
5	20-25	0.00	0.00	VF	0.55	0.00	1.06	0.00	0.00	0.00	DI	-	
6	25-30	0.21	0.00	VF	1.70	0.00	0.56	0.00	0.01	0.00	VF	-	
7	30-35	0.00	0.00	DI	0.62	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	DI	-	
8	35-40	0.25	0.00	Lm	0.51	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	DI	-	
9	40-45	0.32	0.00	Lm	0.47	0.00	0.88	0.00	0.01	0.00	Lm	-	
10	45-50	0.30	0.00	Lm	0.75	0.00	0.73	0.00	0.01	0.00	DI	-	

Pada tahapan kedua injeksi hanya menggunakan campuran 1:4 dengan volume 544,68 liter pada 39 menit awal, dan selesai dalam waktu total 57 menit dalam tekanan stabil di 2 kg/cm². Pada tahapan ketiga hanya memerlukan campuran 1:4 untuk menyelesaikan proses injeksi, pada 34 menit awal memasukkan 281,3 liter campuran dan selesai dengan waktu total 64 menit dalam tekanan stabil di 3,5 kg/cm².

Selanjutnya untuk lubang MD 26B berdasarkan uji lugeon pada tahapan pertama dan kedua memerlukan injeksi campuran semen. Pada tahapan pertama hanya menggunakan campuran 1:3 dengan volume injeksi pada 39 menit awal sebesar 331,3 liter dan proses injeksi selesai dengan waktu total 69 menit dalam tekanan stabil di 1 kg/cm². Pada tahapan kedua injeksi dimulai dan diakhiri dengan campuran 1:3 dengan volume injeksi sebesar 331,3 liter pada 25 menit awal, dan selesai dengan waktu total 55 menit dalam tekanan stabil di 2 kg/cm². Kesimpulan dari efektivitas *grouting* di *river-bed* berdasarkan selisih perubahan nilai kelulusan air yang dilakukan *grouting* di *pilot hole* dan terhadap

check hole pada kedalaman 0-5 m sebesar 100,00 % (sangat baik) dan pada kedalaman 5-10 m sebesar 71,68 % (baik) dalam efektivitas *grouting*nya.

Pada **Tabel 5** menunjukkan hasil dari penelitian pada area tumpuan kanan bendungan utama dengan kedalaman pengeboran 40 m setiap lubangnya. Nomor lubang yang telah dilakukan secara berurutan pada area tumpuan kiri antara lain P.LMD 17A (*pilot hole*), LMD 17B (*open hole*), LMD 16B (*open hole*), dan kemudian CH-03 (*checkhole*).

Pada P.RMD 17A kedalaman yang memerlukan injeksi *grouting*, yakni pada tahapan kedalaman pertama sampai dengan kelima. Injeksi tahapan pertama hanya berlangsung selama 26 menit dengan campuran 1:4 injeksi sebesar 591,5 liter, dan hanya dapat mencapai tekanan 0,7 kg/cm² karena mengalami kebocoran yang tidak bisa diatasi sehingga diperlukan *grouting* pada tahapan ini.

Tahapan kedua dimulai dengan campuran 1:3 dengan volume injeksi 1484,5 liter pada 78

menit awal dan selesai dengan total waktu 108 menit dalam tekanan stabil di 2 kg/cm². Pada tahapan ketiga dimulai dengan injeksi campuran 1:4 selama 90 menit dengan volume 423,3 liter, lalu menggunakan campuran 1:4 sampai selesai dengan waktu total 118 menit dalam tekanan stabil di 3,5 kg/cm².

Pada tahapan keempat dimulai dengan campuran 1:3 sebanyak 497,6 liter dalam 9 menit awal (tekanan hanya 1,5 kg/cm²),

kemudian menggunakan campuran 1:2 sebesar 579,3 liter dalam 11 menit (tekanan hanya 2 kg/cm²), lalu menggunakan campuran 1:1 dengan besar volume 526,9 liter (tekanan hanya 3 kg/cm²), dan selesai dengan campuran 1:0,8 dalam waktu total 70 menit dalam tekanan stabil di 4,5 kg/cm².

Tahapan kelima hanya membutuhkan campuran 1:4 dengan volume injeksi 56 menit awal sebesar 1426,4 liter dan selesai dengan waktu total 86 menit di tekanan stabil 5,5 kg/cm².

Tabel 5. Data tumpuan kanan

Tahapan	Kedalaman (m)	Nama Lubang									Efektivitas Grouting (%)	
		P.RMD 17A			RMD 17B		RMD 16B		CH-03			
		Lugeon	Grout Take (Lt)	Tipe Aliran	Lugeon	Grout Take (Lt)	Lugeon	Grout Take (Lt)	Lugeon	Grout Take (Lt)		Tipe Aliran
1	0-5	8.29	591.50	VF	106.61	877.40	65.42	618.70	0.48	0.00	VF	94.21
2	5-10	3.58	1496.70	Tr	19.13	311.20	3.95	383.40	2.29	0.00	DI	36.03
3	10-15	4.55	496.40	DI	14.52	247.10	6.99	177.90	3.96	970.30	DI	12.97
4	15-20	31.66	1995.90	Tr	23.08	1107.40	31.53	1870.80	6.99	522.20	DI	77.92
5	20-25	5.01	1446.80	DI	9.57	2731.00	13.17	1193.50	1.40	0.00	DI	72.06
6	25-30	0.75	0.00	DI	2.11	0.00	9.19	543.50	1.05	0.00	DI	-
7	30-35	0.97	0.00	DI	1.81	0.00	2.34	0.00	1.53	0.00	DI	-
8	35-40	0.67	0.00	DI	1.51	0.00	2.15	0.00	1.18	0.00	DI	-
9	40-45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	45-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

RMD 17B berdasarkan uji lugeon kedalaman yang perlu *grouting* antara lain tahapan pertama sampai dengan kelima. Pada tahapan pertama dimulai dengan campuran 1:2 selama 90 menit injeksi sebesar 793,9 liter, kemudian dilanjutkan dengan campuran 1:1 sampai selesai dengan total waktu 130 menit dalam tekanan stabil di 1 kg/cm². Pada tahapan kedua hanya memerlukan campuran 1:3 dengan besar volume injeksi 40 menit awal sebesar 294,9 liter dan proses selesai dalam waktu total 70 menit dalam tekanan stabil di 2 kg/cm². Pada tahapan ketiga hanya memerlukan campuran 1:3 dengan besar volume 234,9 liter dalam 16 menit awal dan proses injeksi selesai dengan waktu total 46 menit dalam tekanan stabil di 3,5 kg/cm². Pada tahapan keempat injeksi dimulai menggunakan campuran 1:3 pada 10 menit awal dengan volume 497,6 liter (tekanan hanya 2 kg/cm²), kemudian menggunakan campuran 1:2 selama 11 menit dengan volume sebesar 463,4 liter (tekanan hanya 4 kg/cm²), dan terakhir menggunakan campuran 1:1 didapat tekanan target 4,5 kg/cm² dengan waktu total penyelesaian 65 menit. Pada tahapan kelima diawali campuran semen 1:4 dengan volume sebesar 863,4 liter pada 38 menit awal, pada menit ke 47 campuran diubah menjadi 1:3, dan sampai proses injeksi selesai dengan waktu total 121 menit dalam tekanan stabil di 5,5 kg/cm².

Selanjutnya untuk lubang RMD 16B berdasarkan uji lugeon pada tahapan pertama dan keenam memerlukan injeksi campuran semen. Pada tahapan pertama injeksi hanya memerlukan campuran 1:2 dengan volume pada 37 menit awal sebesar 598,4 liter dan selesai dalam waktu total 67 menit dengan tekanan stabil di 1 kg/cm². Pada tahapan kedua hanya memerlukan campuran 1:4 dengan volume sebesar 351,2 liter dalam 87 menit awal dan selesai dengan waktu total 116 menit dalam tekanan stabil di 2 kg/cm². Pada tahapan ketiga selesai menggunakan campuran 1:4 dengan besar volume 167,5 liter pada 15 menit awal dan selesai dalam waktu total 45 menit dalam tekanan stabil di 3,5 kg/cm². Pada tahapan keempat injeksi diawali campuran 1:3 dengan besar volume 497,6 liter pada 8 menit awal (tekanan 2 kg/cm²), kemudian dengan campuran 1:1 pada 9 menit sebesar 463,4 liter (tekanan 3,5 kg/cm²) setelahnya, dan selesai dengan campuran 1:0,8 dengan waktu total 67 menit dalam tekanan 4,5 kg/cm². Pada tahapan kelima injeksi selesai hanya menggunakan campuran 1:3 dengan volume injeksi sebesar 1181,3 liter pada 60 menit awal dan selesai dalam waktu total 90 menit dalam tekanan stabil di 5,5 kg/cm². Pada tahapan keenam injeksi hanya memerlukan campuran 1:4 dengan besar volume 533,29 liter pada 30 menit awal dan

selesai dengan waktu total 60 menit dalam tekanan stabil di 7 kg/cm^2 .

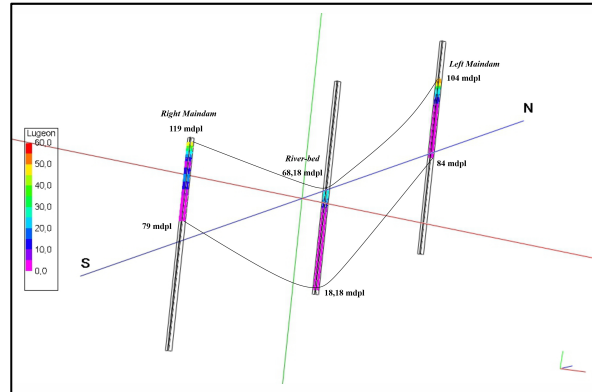
Lubang CH-03 ternyata masih membutuhkan *grouting* pada tahapan ketiga dan keempat berdasarkan nilai lugeon. Pada tahapan ketiga injeksi terselesaikan menggunakan campuran 1:4 dengan volume sebesar 954 liter pada 52 menit awal dan selesai dalam waktu total 82 menit dengan tekanan stabil di $3,5 \text{ kg/cm}^2$. Pada tahapan keempat hanya menggunakan campuran 1:4 untuk menyelesaikan injeksi dengan besar volume 497,8 liter pada 28 menit awal dan selesai dalam waktu total 58 menit dengan tekanan stabil di $4,5 \text{ kg/cm}^2$.

Kesimpulan dari efektivitas *grouting* di tumpuan kanan berdasarkan selisih perubahan nilai kelulusan air yang dilakukan *grouting* di *pilot hole* dan terhadap *check hole* pada kedalaman 0-5 m sebesar 94,21 % (sangat baik), kedalaman 5-10 m sebesar 36,03 (sedang), kedalaman 10-15 m (kurang), dan pada kedalaman 15-25 m (baik) terkait efektivitas *grouting*nya. Terkait hasil *check hole* kedalaman 10-20 m masih membutuhkan *check hole*, maka diperlukan penyesuaian penggunaan tekanan maksimal pada interval kedalaman tersebut.

4. DISKUSI

Setelah mengumpulkan data lapangan kemudian menggabungkan pada satu grafik yang dapat menunjukkan hubungan dari parameter nilai uji lugeon dan jumlah volume fluida campuran semen dan air injeksi ke dalam massa batuan. Pada **Gambar 9, 10, dan 11**

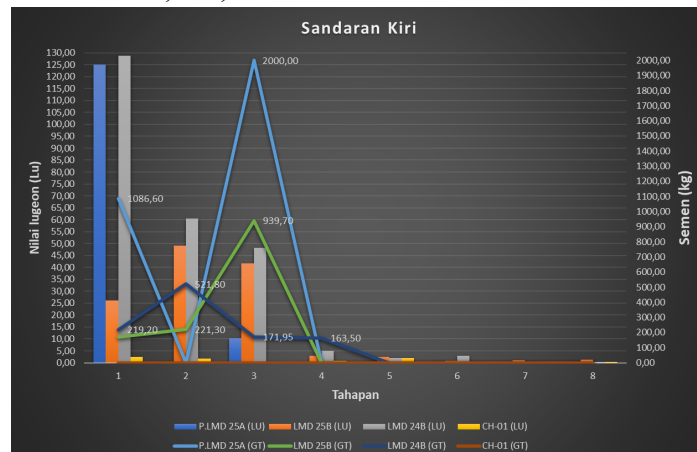
menunjukkan perkembangan nilai lugeon pada grafik kolom dan besar massa semen injeksi pada grafik garis. Pada **Gambar 8** menunjukkan hasil dari pengujian lugeon pada setiap bagian dari bendungan utama, yakni tumpuan kanan, tumpuan kiri, dan *river-bed*.



Gambar 8. Kenampakan persebaran vertikal pengujian lugeon di as Bendungan Ladongi.

4.1 Tumpuan Kiri

Pada tumpuan kiri merupakan bagian utara bagian dari bendungan yang berhubungan langsung dengan struktur bangunan pelimpah (*spillway*). Pada **Gambar 9** hasil pengujian pada beberapa titik pengeboran secara berurutan di tumpuan kiri. Pada tahapan pertama (kedalaman 0-5 m) titik P.LMD 25A berhubungan secara langsung dengan LMD 25B berdasarkan urutan pengerjaan *grouting* kedua titik memiliki respons yang sama dengan menunjukkan penurunan nilai lugeon dan injeksi semen, sedangkan pada LMD 24B memiliki sistem berbeda.



Gambar 9. Pola perubahan dari nilai lugeon dan injeksi semen pada lubang-lubang pengeboran di tumpuan kiri.

Pada data CH-01 menunjukkan pola aliran *void filling* yang mengindikasikan terdapat kondisi massa batuan yang tidak stabil.

Pada tahapan kedua (kedalaman 5-10 m) memiliki sistem yang berbeda, diperkirakan semua titik pada tahapan tersebut tidak berhubungan secara langsung, terutama untuk LMD 25B dan LMD 24B arah diskontinuitas rekahan cenderung ke arah luar pola titik *grouting*. Volume injeksi kedua titik tersebut konsisten bertambah besar daripada tahapan sebelumnya.

Pada tahapan ketiga (kedalaman 10-15 m) pada titik P.LMD 25A terdapat anomali, yakni dengan nilai lugeon yang cenderung kecil membutuhkan injeksi semen yang banyak, hal tersebut mengindikasikan adanya banyaknya pengaruh rekahan pada tahapan ini di P.LMD 25A atau karena perbedaan viskositas saat uji lugeon, atau kemungkinan saat *grouting* memberi dampak pengikisan (*washout*) sehingga rekahan lebih terbuka. Berdasarkan grafik injeksi semen pada tahapan ini diperkirakan LMD 25B dan 24B berhubungan secara langsung.

Pada tahapan keempat (kedalaman 15-20 m) diperkirakan LMD 25B masih berhubungan dengan tahapan sebelumnya.

Secara umum kondisi bawah permukaan pada daerah tumpuan kiri dibutuhkan perbaikan massa batuan pada kedalaman 0-20 m, terutama pada kedalaman 15 m yang diperkirakan terdapat rekahan yang cukup

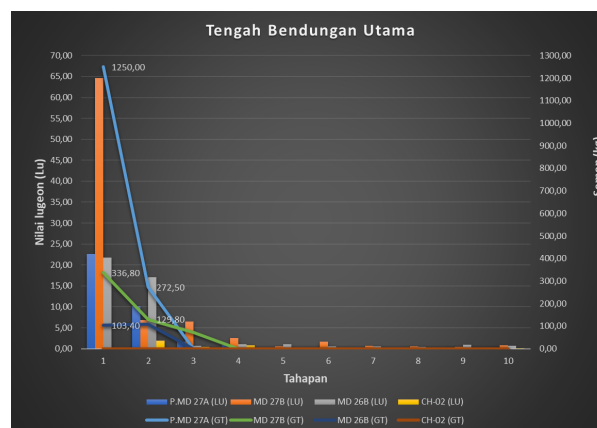
besar/terhubung secara luas persebarannya dengan kemungkinan mengarah ke utara bendungan (bagian rencana pembangunan pelimpah/*spillway*), dan diindikasikan pada pengujian *grouting* terselesaikan tidak dengan berhentinya laju campuran injeksi tetapi karena telah mencapai volume injeksi maksimum.

4.2 Tengah Bendungan Utama (*river-bed*)

Bagian tengah bendungan utama ini merupakan bagian dari bendungan yang memiliki elevasi yang paling rendah dan berhubungan langsung posisinya dengan sungai.

Pada **Gambar 10** hasil pengujian pada beberapa titik pengeboran secara berurutan di tengah bendungan utama. Pada tahapan pertama (kedalaman 0-5 m) titik P.MD 27A meski didapatkan nilai lugeon yang tidak terlalu besar tetapi berdasarkan pola aliran termasuk *turbulent* sehingga mengindikasikan zona lemah/banyak rekahan, terbukti memerlukan injeksi semen yang banyak. Diperkirakan nilai lugeon yang besar pada MD 27B akibat pengaruh injeksi titik sebelumnya. MD 26B diperkirakan memiliki sistem yang sendiri karena tidak terpengaruh terhadap dua proses *grouting* sebelumnya.

Pada tahapan kedua (kedalaman 5-10 m) terlihat P.MD 27A dengan MD 27B memiliki hubungan dalam sistem diskontinuitas berdasarkan perubahan nilai lugeon dan volume injeksi yang selaras berkurang. Sedangkan untuk MD 26B memiliki sistem lain.



Gambar 10. Pola perubahan dari nilai lugeon dan injeksi semen pada lubang-lubang pengeboran di tengah bendungan utama.

Pada tahapan ketiga (kedalaman 10-15 m) grouting hanya dilakukan pada MD 27B dengan kemungkinan rekahan dengan sistem yang berbeda/arah keluar pola pengujian.

Secara umum kondisi bawah permukaan pada tengah bendungan utama bagus, hanya perlu dilakukan *grouting* pada kedalaman 0-15 m dengan volume injeksi yang sedikit, terkecuali pada P.MD 27A karena pengaruh dekat permukaan dan kondisi batuan cenderung banyak rekahan.

4.3 Tumpuan Kanan

Pada bagian tumpuan kanan di Bendungan Ladongi ini terletak bagian selatan bendungan dan area ini berhubungan langsung dengan pembuatan terowongan (*river diversion*).

Pada **Gambar 11** menunjukkan hubungan yang kompleks pada kedalaman 15-25 m antara keempat lubang pengeboran (P.RMD 17A, RMD 17B, RMD 16B, dan CH-03) yang telah dilakukan uji lugeon dan injeksi *grouting*.

Pada tahapan pertama (kedalaman 0-5 m) diperkirakan RMD 17B dan 16B memiliki hubungan dalam sistem rekahan, berbeda dengan P. RMD 17A. Hal tersebut berdasarkan nilai lugeon dan injeksi semen yang selaras berkurang.

Pada tahapan kedua (kedalaman 5-10 m) berdasarkan sistem persebaran rekahan dengan dasar perilaku fluida injeksi masih cenderung sama dengan tahapan pertama.

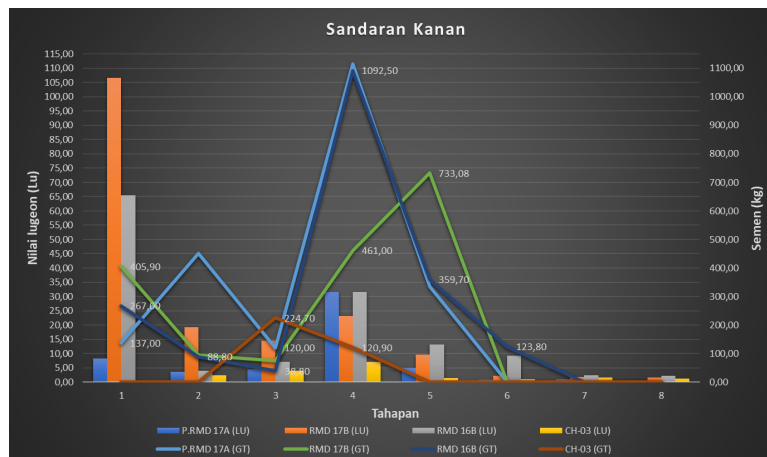
Tetapi pada tahapan kedua ini nilai injeksi semen di P.RMD 17A cenderung besar. Antara RMD 17B dan 16B memiliki selisih 15 nilai (lugeon) tetapi jumlah semen injeksi hampir sama (93,8 kg dan 88,8 kg).

Pada tahapan ketiga (kedalaman 10-15 m) RMD 17B dan 16B memiliki sistem rekahan yang sama, berbeda dengan P.RMD 17B.

Tetapi dari jumlah semen injeksi selisih dari ketiga lubang tersebut tidak terlalu jauh. Hal yang menarik pada tahapan ini CH-03 perlu dilakukan *grouting* dan volume injeksi lebih besar daripada ketiga lubang lainnya.

Pada tahapan keempat (kedalaman 15-20 m) menunjukkan anomali, yakni jumlah injeksi semen yang sangat banyak. Kondisi tersebut menunjukkan pada P.RMD 17B dan RMD 16B memiliki nilai lugeon dan besar semen injeksi yang hampir sama. Sehingga pada tahapan ini diperkirakan dominasi arah rekahan ke luar pola dari titik P.RMD 17B dan RMD 16B. Ditinjau dari detail waktu proses injeksi P.RMD 17B pada campuran 1:3 sampai 1:1 tidak bisa mendapatkan tekanan target sebesar $4,5 \text{ kg/cm}^2$. Hal tersebut mengindikasikan terdapat kondisi rekahan yang kompleks, ditunjukkan juga pola aliran *turbulent* pada pengujian lugeon, dan sistem tersebut diperkirakan sama pada RMD 16B.

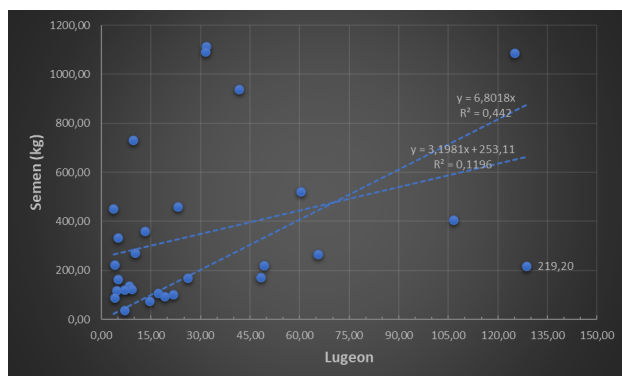
Pada tahapan kelima (kedalaman 20-25 m) diperkirakan masih memiliki sistem yang sama antara P.RMD 17A dan RMD 16B, terlihat dari nilai lugeon dan besar injeksi semen yang



Gambar 11. Pola perubahan dari nilai lugeon dan injeksi semen pada lubang-lubang pengeboran di tumpuan kiri.

selaras berkurang pada keduanya. Berbeda dengan LMD 17B yang menunjukkan injeksi semen yang besar pada tahapan ini.

Berdasarkan **Gambar 12** menunjukkan hubungan antara besar nilai lugeon dengan banyaknya jumlah semen (kg) injeksi dan hasilnya hanya mendapatkan R^2 sebesar 0,119 dan 0,442 (*intercept*), hal tersebut mengindikasikan bahwa terdapat banyak faktor yang mempengaruhi nilai lugeon. Pada pengujian lugeon memiliki sifat yang fleksibel karena menggunakan fluida dengan viskositas rendah, berbeda pada *grouting* dengan fluida yang lebih kental. Perbedaan viskositas tersebut menjadi faktor lain yang mempengaruhi kondisi/respons massa batuan terhadap fluida injeksi. Sebagai contoh pada titik P.LMD 25A pada tahapan ketiga berdasarkan nilai lugeon didapatkan sebesar 10.23, tetapi membutuhkan volume injeksi campuran yang besar sejumlah 4034 liter (semen 2000 kg).



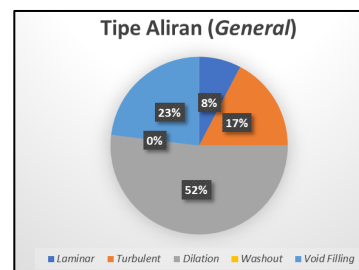
Gambar 12. Hubungan nilai lugeon terhadap jumlah injeksi semen.

Persebaran data pada **Gambar 12** dapat diinterpretasikan semakin tinggi nilai lugeon semakin kompleks respons yang ditunjukkan massa batuan (banyak faktor) dan pada kondisi ideal diperkirakan faktor densitas yang dipengaruhi kedalaman (beban statis/*overburden*) juga mempengaruhi variasi nilai lugeon terhadap *grouting*. Semakin besar nilai lugeon maka semakin dinamis respons massa batuan, jika ditinjau dari pola aliran nilai lugeon besar identik dengan pola *turbulent* berdasarkan pengamatan pada data lokasi

penelitian. Pada pembahasan ini disimpulkan bahwa adanya perbedaan viskositas pada saat pengujian lugeon dan injeksi *grouting* mengakibatkan perbedaan respons massa batuan pada kedua proses tersebut.

4.4 Pola Aliran Secara Umum

Data pola aliran berdasarkan uji lugeon pada Bendungan Ladongi di tahap percobaan *grouting* (*trial grouting*) ini didapatkan sejumlah 52 data yang didapatkan dari *pilot hole* dan *check hole*. **Gambar 13** menunjukkan persentase pengaruh dari beberapa macam pola aliran pada bagian lokasi penelitian didominasi oleh pola aliran *dilation* sebesar 52%, sedangkan untuk pola aliran *washout* tidak didapatkan pada pengujian yang telah dilakukan pada lokasi penelitian. Data tersebut merupakan kondisi secara umum dari semua lubang *full coring*, perlu diingat massa batuan pada *checkhole* dianggap sudah mengalami pengaruh/perubahan dari pengujian lugeon dan injeksi campuran semen bertekanan, berbeda dengan data pola aliran pada *pilot hole* yang dianggap masih mewakili kondisi alami dari massa batuan yang diuji.



Gambar 13. Persentase persebaran pola aliran.

Data yang menunjukkan tidak adanya pola aliran *washout* menunjukkan bahwa tekanan yang diaplikasikan terhadap massa batuan tidak merusak kondisi batuan yang ada, tetapi ada kemungkinan juga untuk mencapai hasil *grouting* yang optimal dapat ditambahkan nilai tekanan maksimal supaya persebaran (*sealing*) dari campuran semen dapat secara optimal terdistribusi di rekahan dan porositas massa batuan. Adanya dominasi pola aliran *dilation* menunjukkan adanya kemampuan elastis batuan karena berdasarkan grafik kondisi

perubahan porositas/rekahan mengikuti dari besarnya tekanan fluida yang digunakan, perubahan nilai lugeon dan tekanan bersifat linier saat tekanan ditambahkan dan dikurangkan.

Pada **Tabel 6** merupakan tabel dari perubahan pola aliran sebelum dan setelah dilakukan penginjeksian campuran semen bertekanan di sekitar lubang uji, diasumsikan pada kondisi alami/awal pola aliran pada setiap tahapan (*stage*) di *pilot hole* sama dengan ketiga lubang lainnya karena dianggap masih berdekatan jaraknya.

Tabel 6. Hubungan pola aliran dari lubang pilot terhadap *check hole*

Tahapan	Sandaran Kiri		Tengah Bendungan Utama		Sandaran Kanan	
	<i>Pilot</i>	<i>Checkhole</i>	<i>Pilot</i>	<i>Checkhole</i>	<i>Pilot</i>	<i>Checkhole</i>
1	Tr	Tr	Tr	DI	VF	VF
2	DI	Tr	VF	Tr	Tr	DI
3	DI	VF	DI	Tr	DI	DI
4	DI	VF	DI	Tr	Tr	DI
5	DI	DI	VF	DI	DI	DI
6	VF	DI	VF	VF	DI	DI
7	VF	VF	DI	DI	DI	DI
8	DI	VF	Lm	DI	DI	DI
9	-	-	Lm	Lm	-	-
10	-	-	Lm	DI	-	-

Dari tabel tersebut menunjukkan persebaran pola aliran *turbulent* dominan pada daerah dekat permukaan dan diperkirakan kondisinya massa batuan buruk dengan bukti pada **Tabel 1, 2, dan 3** tahapan (*stage*) yang dinyatakan perlu tindakan *grouting* ($Lu > 3$) memiliki volume injeksi campuran semen yang besar. Sedangkan untuk persebaran pola aliran *laminar* pada area penelitian didapatkan pada elevasi yang dalam, contoh di bagian dasar di lubang P.MD 27A dan CH-02, diperkirakan massa batuan yang bagus sehingga mampu menahan nilai lugeon dan porositas secara konstan terhadap perbedaan tekanan yang digunakan. Pola aliran *laminar* identik dengan nilai lugeon yang kecil pada penelitian ini. Berdasarkan pada **Tabel 6** menunjukkan adanya kecenderungan perubahan pola aliran setelah dilakukan uji lugeon dan penginjeksian campuran semen menjadi *dilation*.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan beberapa analisis data yang dikumpulkan, dapat disimpulkan bahwa :

- Pada kondisi normal tanpa adanya pengaruh besar struktur geologi terhadap nilai porositas massa batuan, nilai lugeon dari elevasi permukaan ke dasar elevasi target bawah permukaan akan menunjukkan pengurangan nilai lugeon secara gradual seperti pada bagian tengah bendungan utama (*river bed*), sedangkan pada tumpuan kanan dan kiri mengalami anomali terkait perubahan nilai volume injeksi campuran semen yang diperkirakan adanya pengaruh struktur geologi yang kompleks pada kedalaman 10-20 m di bawah permukaan.
- Secara umum area yang paling banyak menginjeksi semen adalah tumpuan kanan, yakni sebesar 6242,4 kg, berdasarkan lubang pengeboran P.RMD 17A melakukan injeksi semen sebesar 2158,1 kg, dan tahapan yang membutuhkan injeksi semen terbesar pada P.LMD 25A tahapan ketiga dengan jumlah 2000 kg semen.
- Berdasarkan detail penginjeksian semen terdapat beberapa tahapan yang tidak bisa mencapai tekanan (p_{max}) sehingga perlu pergantian campuran yang lebih kental, yakni pada LMD 25B tahapan satu, dua, dan tiga. Kemudian P.RMD 17A pada tahapan satu, dan empat. Kemudian pada RMD 17B pada tahapan keempat. Hal tersebut menunjukkan keterdapatannya ukuran *joint aperture* yang besar.
- Berdasarkan dari pengujian lugeon yang memiliki pola aliran *turbulent* dan memerlukan tindakan *grouting* (lugeon > 3) memiliki kecenderungan membutuhkan injeksi semen yang banyak.
- Pola aliran *dilation* mendominasi pada lokasi penelitian, terutama pengamatan pada perubahan pola aliran di *pilot hole* dengan *check hole*.
- Pada *pilot hole* kedalaman 0-5 m memiliki kecenderungan membutuhkan injeksi semen banyak karena berpotensi besar adanya kebocoran permukaan (karena banyak rekahan atau pengaruh *uplift*).
- Efektivitas pola *grouting* yang digunakan pada tumpuan kanan diperlukan penyesuaian seperti menaikkan tekanan maksimum atau melakukan perubahan

jarak antara titik *grouting* agar lebih dekat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Agung Permana, S.T., M.Eng. sebagai Pejabat Pembuat Komitmen (PPK) dari BWS Sulawesi IV Kendari, bapak Herdy Setiawan, S.T. sebagai Kepala Proyek (kontraktor Utama Karya dan Bumi Karsa, KSO), serta tim konsultan supervisi dari proyek pembangunan Bendungan Ladongi, dan teman-teman yang telah memberikan dukungan baik secara substansial maupun moral dalam pembuatan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bryson, L. S., Ortiz, R., dan Leandre, J. (2014): *Effects of a Grout Curtain on Hydraulic and Electrical Conductivity in a Laboratory-Scale Seepage Model*. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.314>.
- Das, B. M., dan Sobhan, K. (2014): *Principles of Geotechnical Engineering, SI Edition*, Cengage Learning.
- Ewert, F.-K., dan Hungsberg, U. (2018): *Rock Grouting at Dam Sites*, 234.
- Fan, G., Zhong, D., Yan, F., dan Yue, P. (2016): A hybrid fuzzy evaluation method for curtain grouting efficiency assessment based on an AHP method extended by D numbers, *Expert Systems with Applications*, **44**, 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.09.006>
- Goodman, R. E. (1989): *Introduction to Rock Mechanics* (2nd Edition), John Wiley & Son, Canada, 289.
- Houlsby, A. C. (1976): Routine Interpretation of The Lugeon Water Test, *Q. Jl Eng Geology*, **9**, 303–313.
- Nonveiller, E. (1989): Grouting theory and practice E. Nonveiller, *Engineering Geology*, **ISBN 0-444**, 250. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(91\)90022-d](https://doi.org/10.1016/0013-7952(91)90022-d)
- Pearson, R., dan Money, M. S. (1977): Improvement in the Lugeon or Packertest Permeability test, *Q. Jl Eng Geology*, **10**, 221–239.
- SDA PUPR (2005): *Pedoman Grouting Untuk Bendungan*, Jakarta, 298.
- SNI (2008): *Cara Uji Kelulusan Air Bertekanan di Lapangan* (SNI 2411-2008), Indonesia, 27.
- Sosrodarsono, S., dan Takeda, K. (1977): *Bendungan Tipe Urugan* (Edisi ke-2), PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 326.
- Ye, Z., Ghassemi, A., dan Kneafsey, T. (2020): Deformation, failure and permeability evolution of sealed fractures/foliations in EGS collab poorman schist, *54th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*.

Daftar Pustaka dari Situs Internet:

- Nasmiarta, Z. M., dan Hendrawan, A. P. (2016): Analisa Stabilitas tubuh bendungan pada Perencanaan Bendungan Ladongi Kabupaten Kolaka Timur Sulawesi Tenggara, *Teknik Pengairan - Universitas Brawijaya*, diperoleh dari internet: <http://pengairan.ub.ac.id/s1/wp-content/uploads/2016/01/Analisa-Stabilitas-Tubuh-Bendungan-Pada-Perencanaan-Tubuh-Bendungan-Ladongi-Kabupaten-Kolaka-Timur-Sulawesi-Tenggara-Zhafarina-Malaha-Nasmiarta-125060400111045.pdf>, 9.