Blend Sains
Jurnal Teknik
https://jurnal.ilmubersama.com/index.php/blendsains

Artikel Penelitian

Analisis Efektivitas Perbaikan Fondasi Tubuh Bendungan Cijurey dengan Metode Grouting terhadap Keamanan Rembesan dan Penurunan Bendungan

Andrew Kolose Tua Lumban Tobing[*], *Ekodjati Tunggulgeni*, *Okri Asfino Putra*, *Sayed Ahmad Fauzan*, *Ricky Harianja*, *Suprayogi*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor 16810, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 08 Juli 2026
Revisi Akhir: 04 Agustus 2026
Diterbitkan *Online*: 20 Oktober 2026

KATA KUNCI

Bendungan
Grouting
Lugeon
Penurunan
Rembesan

KORESPONDENSI (*)

E-mail: drewtobing01@gmail.com

A B S T R A K

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas perbaikan fondasi batuan dasar Bendungan Cijurey pada penampang kritis STA 2+50 menggunakan kombinasi metode *consolidation* dan *curtain grouting*. Evaluasi kuantitatif difokuskan pada dua tujuan utama, yaitu analisis karakteristik hidraulis/keamanan rembesan serta analisis respons mekanis/deformasi struktural bendungan. Metodologi yang digunakan mengintegrasikan uji Lugeon lapangan dengan pemodelan numerik elemen hingga 2D memanfaatkan perangkat lunak SEEP/W untuk aliran rembesan dan SIGMA/W untuk analisis tegangan-regangan. Hasil investigasi hidraulis lapangan menunjukkan tren penurunan nilai Lugeon rata-rata yang signifikan dari 4,98 Lu menjadi 0,15 Lu dengan efisiensi rekayasa mencapai lebih dari 91%. Keberhasilan parameter lapangan ini divalidasi oleh simulasi SEEP/W, di mana sistem *grouting* mampu menekan debit rembesan total hingga mencapai 59% di bawah ambang batas izin ($Q_{ijin} = 2{,}71 \times 10^{-2}$ m^3/s). Intervensi tirai kedap air tersebut juga sukses mendongkrak Faktor Keamanan terhadap erosi internal (*FK Piping*) pada kondisi Muka Air Banjir secara masif dari 2,726 menjadi 6,528, serta mengoptimalkan stabilitas struktur terhadap gaya angkat (*uplift pressure*). Sementara itu, hasil evaluasi respons mekanis menggunakan SIGMA/W membuktikan perbaikan batuan mampu mengendalikan deformasi dengan memangkas penurunan vertikal total (*total settlement*) sebesar lebih dari 50%, yaitu dari 0,467 m menjadi hanya 0,216 m. Nilai deformasi akhir ini berada jauh di bawah batas toleransi aman yang diizinkan sebesar 1,825 m, sehingga mampu mengeliminasi risiko keretakan hidraulik (*hydraulic fracturing*) pada inti bendungan. Secara keseluruhan, integrasi perbaikan fondasi ini terbukti sangat efektif dalam menjamin keselamatan hidraulis dan struktural jangka panjang pada Bendungan Cijurey.

PENDAHULUAN

Bendungan merupakan infrastruktur strategis yang dirancang untuk mereduksi banjir, menyuplai air baku, dan memenuhi kebutuhan irigasi [1]. Bendungan Cijurey yang berlokasi di Kecamatan Cariu, Sukamakmur, dan Tanjungsari, Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat dirancang untuk mereduksi risiko banjir hingga 59,33%, menyuplai air baku sebesar 0,71 m³/s, mengairi irigasi seluas 2.047 hektar, dan menghasilkan energi listrik 1 MW. [2]. Sebagai bendungan tipe urugan, pemenuhan aspek keselamatan terhadap aliran rembesan menjadi prioritas utama struktural [3]. Namun, hasil investigasi geologi teknik menunjukkan bahwa fondasi batuan dasar Bendungan Cijurey memiliki tingkat permeabilitas yang tinggi akibat intensitas rekahan dan adanya zona lemah [2]. Jika tidak diintervensi, rembesan berlebih melalui fondasi batuan ini dapat meningkatkan gradien hidraulis keluar (exit gradient) yang memicu erosi internal (piping) serta menurunkan kekuatan mekanis fondasi [4]. Sebagai langkah mitigasi, diterapkan metode perbaikan fondasi berupa kombinasi consolidation grouting (zona dangkal) dan curtain grouting (tirai kedap air).

https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903 Attribution-ShareAlike 4.0 International Some rights reserved

Di lapangan, keberhasilan injeksi semen ini umumnya dievaluasi secara konvensional melalui parameter penurunan nilai Lugeon [5]. Meski demikian, evaluasi tidak boleh terbatas pada aspek hidraulis semata. Penyumbatan rekahan batuan oleh grouting secara langsung mengubah distribusi tekanan air pori di bawah bendungan. Perubahan tekanan air pori ini berhubungan erat dengan perilaku mekanik struktur karena memengaruhi sebaran tegangan efektif yang mengatur respons deformasi vertikal (settlement) tubuh dan fondasi bendungan [6]. Penurunan vertikal yang tidak seragam atau melebihi ambang batas izin sangat berbahaya karena dapat memicu retak internal (hydraulic fracturing) pada zona inti bendungan urugan [3].

Oleh karena itu, urgensi penelitian ini terletak pada perlunya evaluasi kuantitatif yang komprehensif mengenai interaksi hidro-mekanis tersebut melalui pendekatan metode elemen hingga (FEM) 2D pada penampang kritis STA 2+50. Perangkat lunak SEEP/W digunakan untuk menyimulasikan pola aliran rembesan tunak (steady-state) dan distribusi tekanan air pori, yang hasilnya kemudian diintegrasikan ke dalam SIGMA/W sebagai beban hidraulis untuk menganalisis respons tegangan-regangan serta displacement arah vertikal [7][8]. Melalui komparasi performa antara kondisi pra-grouting, pasca-consolidation grouting, dan pasca-perbaikan menyeluruh, kajian ini diharapkan memberikan validasi ilmiah yang akurat mengenai efektivitas sistem grouting dalam menjaga keamanan struktural Bendungan Cijurey.

Berdasarkan urgensi penelitian yang telah dipaparkan, fokus kajian ini diarahkan pada evaluasi kuantitatif terhadap pengaruh perbaikan fondasi batuan melalui metode grouting terhadap karakteristik hidraulis dan respons mekanis Bendungan Cijurey pada penampang kritis STA 2+50. Secara spesifik, tujuan penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

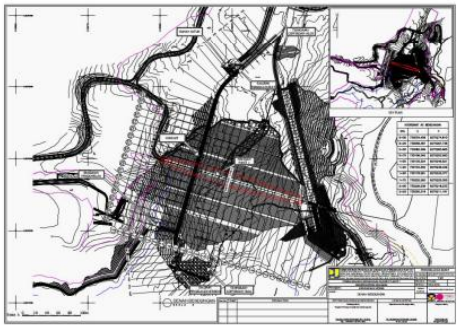
1. Menganalisis efektivitas skenario perbaikan fondasi terhadap perubahan debit rembesan, tingkat Faktor Keamanan (FK) terhadap bahaya erosi internal (piping), dan Faktor Keamanan terhadap gaya angkat berdasarkan pemodelan numerik SEEP/W.
2. Menganalisis respons penurunan (deformasi arah vertikal) yang terjadi pada tubuh dan fondasi bendungan akibat interaksi perubahan tekanan air pori dari hasil pemodelan SIGMA/W

Denah lokasi dan gambaran situasi objek penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 yang diambil menggunakan aplikasi Google Earth Pro.



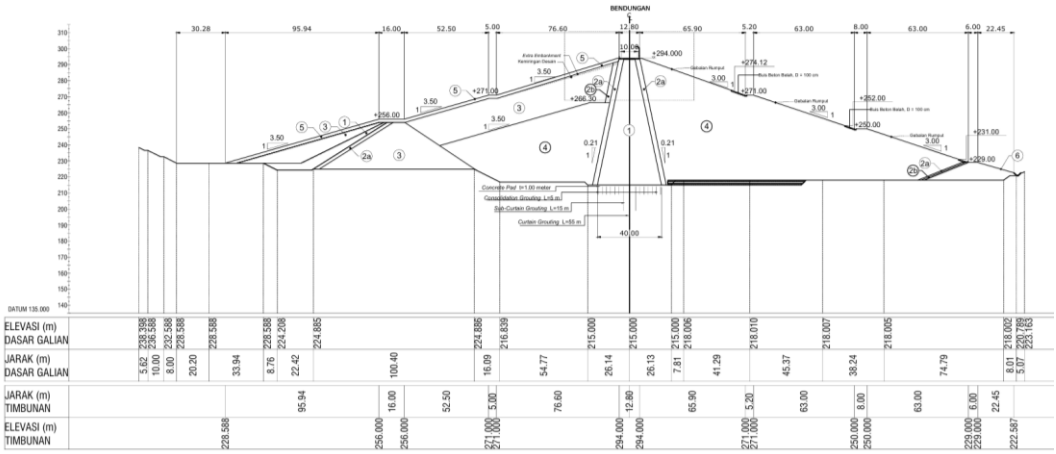
Gambar 1. Lokasi Objek Penelitian

Gambar 2 merupakan *layout* Bendungan Cijurey yang dapat dilihat pada gambar dibawah



Gambar 2. *Layout* Bendungan Cijurey

Pada gambar 3 dapat dilihat geometri objek penelitian



Gambar 3. Geometri Bendungan

METODE PENELITIAN

Studi Literatur

Penelitian ini diawali dengan tahapan studi literatur yang komprehensif guna membangun landasan teoretis yang kuat dan mengidentifikasi kebaruan (novelty) penelitian. Studi literatur difokuskan pada pengkajian regulasi nasional terkini, seperti Standar Nasional Indonesia (SNI) dan pedoman teknis dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), khususnya yang berkaitan dengan kriteria keselamatan bendungan tipe urugan, mekanika batuan fondasi, prinsip aliran rembesan, dan teori konsolidasi tanah. Selain itu, dilakukan penelaahan terhadap berbagai jurnal ilmiah dan laporan teknis hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan perbaikan fondasi menggunakan metode grouting (consolidation dan curtain grouting), guna membandingkan efisiensi rekayasa hidraulik dan respons mekanik struktur yang diperoleh dalam studi ini..

Pengumpulan Data

Prosedur pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis dari instansi terkait, yaitu pihak pengelola proyek Bendungan Cijurey (Balai Besar Wilayah Sungai Citarum). Pendekatan yang digunakan adalah pengumpulan data sekunder yang bersifat terstruktur dan siap olah, sehingga tidak memerlukan penarikan sampel langsung di lapangan (non-populasi dan sampel). Seluruh data teknis dikelompokkan berdasarkan variabel penelitian yang mencakup geometri bendungan, parameter hidraulis, serta parameter geoteknik batuan dasar. Pengumpulan data dibatasi pada area kritis potongan melintang tertinggi bendungan, yaitu pada penampang STA 2+25 hingga STA 2+75, yang menerima distribusi beban struktural paling masif dan memiliki kerentanan geoteknik yang signifikan.

Data Sekunder

Data sekunder yang dikumpulkan dan digunakan sebagai input utama dalam analisis kuantitatif serta pemodelan numerik ini meliputi:

Data Geometri dan Desain Bendungan: Gambar rencana konstruksi (*construction drawing*) potongan melintang tubuh Bendungan Cijurey STA 2+50 yang menunjukkan pembagian zonal material (inti lempung tegak, filter halus, filter kasar, random tanah, random kerikil, *rip-rap*, dan *rock toe*).

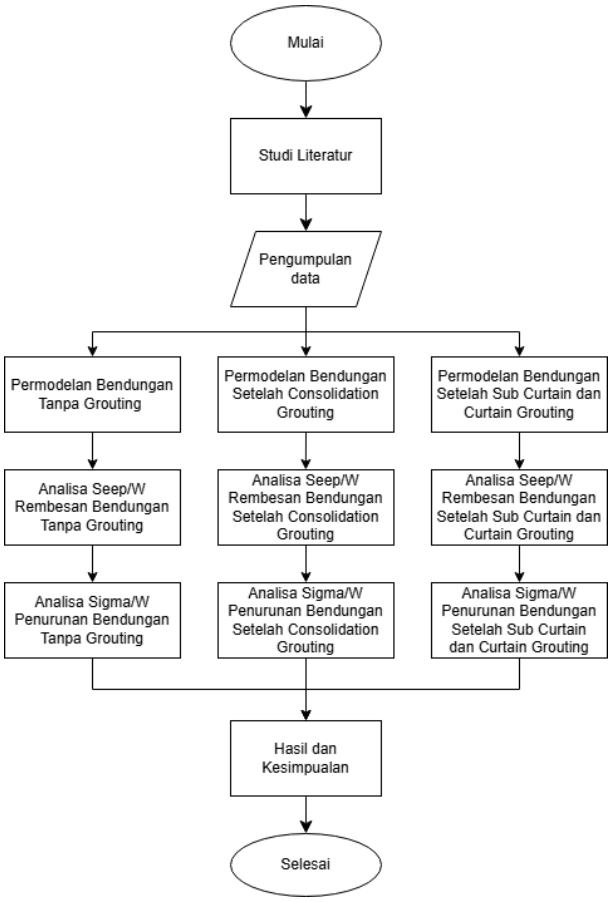
Data Geoteknik dan Investigasi Geologi: Hasil pemboran inti (*core drilling*) dan parameter fisik-mekanis dari setiap zona material bendungan serta formasi batuan fondasi (Batu Lempung Napalan dan Batu Pasir Karbonatan), yang mencakup berat volume material (gamma), nilai kohesi (c), sudut geser dalam (phi), angka pori (e), dan nilai modulus elastisitas (E).

Data Pengujian Hidraulis Lapangan: Laporan pengujian kelulusan air bertekanan (*Water Pressure Test*) berupa nilai Lugeon (Lu) sebelum grouting (*pilot hole*) dan sesudah pelaksanaan grouting (*check hole*) pada area tapak fondasi bendungan.

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903

Data Hidrologi dan Operasional Waduk: Data runtun waktu (*time series*) debit masuk waduk (*inflow*) harian rata-rata selama 30 tahun (1991–2020) untuk menetapkan ambang batas debit rembesan izin (Qijin = 1% dari *inflow* tahunan rata-rata). Selain itu, digunakan data elevasi muka air waduk rancangan yang terdiri dari Muka Air Normal (MAN) pada El. +280,00 m dan Muka Air Banjir (MAB) pada El. +288,07 m.

Data Konfigurasi Grouting: Spesifikasi teknis dimensi perbaikan fondasi, meliputi ketebalan bantalan beton (*concrete pad* = 1,00 m), kedalaman *Consolidation Grouting* (5,00 m), kedalaman *Sub-Curtain Grouting* (15,00 m), dan kedalaman *Curtain Grouting* (55,00 m).



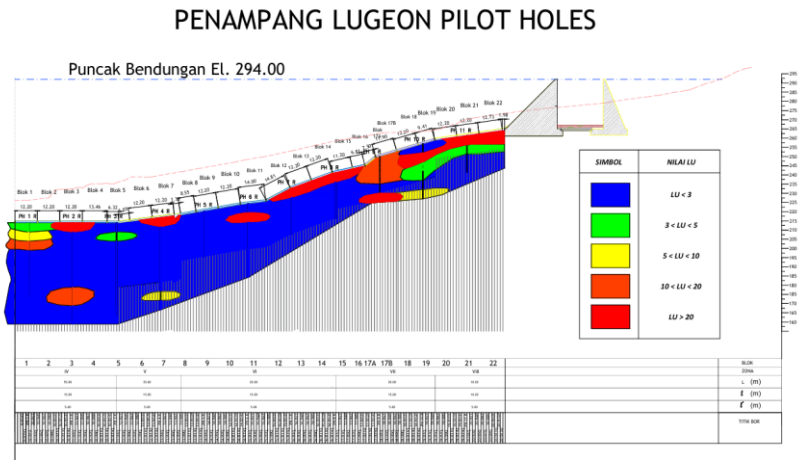
Gambar 4. Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi Geologi Fondasi Bendungan

Secara regional, lokasi Bendungan Cijurey masuk ke dalam Zona Bogor yang dicirikan oleh morfologi perbukitan bergelombang hasil aktivitas tektonik periode Pliosen hingga Pleistosen. Litologi penyusun area fondasi didominasi oleh batuan sedimen laut dalam berumur Tersier yang terdiri atas perselingan batupasir, batulempung, lanau, dan napal. Hasil pemboran inti menunjukkan adanya tanah residu di bagian permukaan serta dijumpai rekahan, kekar (joints), dan tingkat pelapukan yang bervariasi (lapuk ringan hingga kuat) akibat pengaruh tektonik dan proses destressing batuan. Kondisi heterogenitas ini menjadi parameter utama dalam merencanakan metode perbaikan fondasi (grouting).

Untuk memetakan parameter Lugeon (Lu) awal pada massa batuan dasar pada sandaran kanan Bendungan, dilakukan pengujian Water Pressure Test (WPT) yang diproyeksikan pada profil berikut:



Gambar 5. Penampang Lugeon Pilot Holes Sandaran Kanan Bendungan Cijurey

Geometri Desain Bendungan Cijurey

Bendungan Cijurey direncanakan sebagai bendungan tipe urugan tanah zonal dengan inti tegak (*zoned earthfill dam with central clay core*). Pemilihan tipe struktur ini disesuaikan dengan karakteristik geologi teknik batuan fondasi serta optimalisasi ketersediaan material di sekitar lokasi tapak. Dimensi struktural utama dan kriteria geometris rancangan tubuh bendungan sesuai dengan Gambar 3 disajikan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Parameter Geometri Utama Tubuh Bendungan Cijurey

No	Parameter Geometri	Nilai / Keterangan
1	Tipe Bendungan	Urugan Zonal dengan Inti Tegak
2	Elevasi Puncak Bendungan (Crest)	El. +294,00 m
3	Elevasi Fondasi Terdalam (Base)	El. +215,00 m
4	Tinggi Maksimum Struktural (H)	79,00 m
5	Lebar Puncak Bendungan	12,80 m
6	Kemiringan Lereng Hulu (Upstream Slope)	1 : 3,50
7	Kemiringan Lereng Hilir (Downstream Slope)	1 : 3,00
8	Lebar Dasar Inti Tegak (pada El. +215)	40,00 m
9	Kemiringan Inti Tegak	1 : 0,21 (Hulu & Hilir)

Parameter Desain Material Tubuh Bendungan

Analisis numerik perilaku rembesan (SEEP/W) dan deformasi (SIGMA/W) sangat bergantung pada akurasi parameter geoteknik dari setiap material penyusun tubuh bendungan. Karakteristik sifat fisik dan mekanik material—termasuk berat isi (γ), kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan koefisien permeabilitas (k) untuk zona inti (*core*), filter, serta timbunan (*shell*) yang digunakan sebagai data input pemodelan dirangkum dalam Tabel 2.

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903

Tabel 2. Parameter Material Bendungan Cijurey

No.	Zona	Kepadatan (kN/m³)				Specific Gravity	Angka Pori	Kohesi (kPa)	Sudut Geser (°)	Permeabilitas (cm/dt)	w/c (%)	Young Modulus (kPa)	Compresibility	Poisson Ratio	Shear Modulus (kPa)
		Ydry	Ywet	Ysat	Ysub	Gs	e	C	Ø	k		E	Mv	v	E G = 2(1+v)
1	Material Inti (Clay)	12,8	17,77	17,93	7,93	2,629	1,053	17,41	32,02	4,68E-06	38,83	8048	0,000124254	0,4	2874,2857
2a	Material Filter Halus	15,68	17,14	19,44	9,44	2,817	0,601	0	36	5,98E-03	9,2	10000	0,0001	0,26	3968,254
2b	Material Filter Kasar	17,78	19,11	20,86	10,86	2,746	0,445	0	38	3,50E-02	7,4	10000	0,0001	0,26	3968,254
3	Material Random Kerikil	19,02	19,79	22,05	12,05	2,72	0,443	0	40	1,07E-02	2	70000	1,42857E-05	0,3	26923,077
4	Material Random Tanah	13,82	18,04	18,65	8,65	2,672	0,933	22,64	34	6,03E-05	30	21356	4,68252E-05	0,35	7909,6296
5	Rip-Rap Batu Terpilih	25,8	26,32	26,35	16,35	2,73	0,058	0	45	1,00E-01	18,72	50000	0,00002	0,25	20000
6	Rock Toe	21,46	21,89	23,37	13,37	2,654	0,237	0	45	1,00E-01	18,72	50000	0,00002	0,25	20000
7	Grouting		21,4			2,182	0	20000	25	1,00E-07		23500000	4,25532E-08	0,15	10217391
8	Caping		23,536			2,4	0	20000	40	1,70E-07		23500000	4,25532E-08	0,15	10217391
9	Batu Lempung Napalan	17,93	19,39	21,12	11,12	2,633	0,468	27	29	2,80E-05	38,77	140000	7,14286E-06	0,4	50000
10	Batu Pasir Karbonatan	18,67	19,2	21,6	11,6	2,642	0,121	18,2	32	5,80E-05	5,05	200000	0,000005	0,2	83333,333

Data Kedalaman Lubang Grouting

Sistem perbaikan fondasi pada Bendungan Cijurey dirancang secara berlapis tepat di bawah dasar zona inti kedap air guna membentuk tirai sekat bawah tanah yang komprehensif. Kombinasi metode injeksi dangkal dan dalam ini diterapkan untuk memotong alur rembesan serta meningkatkan kekuatan batuan dasar secara bertahap. Spesifikasi jenis, target kedalaman, dan orientasi lubang *grouting* dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Jenis dan Kedalaman Lubang Grouting

No	Jenis Grouting	Kedalaman Lubang (L)	Posisi
1	*Consolidation Grouting*	5,00 m	Menyebar Horisontal (Area Tapak Inti)
2	*Sub-Curtain Grouting*	15,00 m	Vertikal (Zona Transisi Atas)
3	*Curtain Grouting*	55,00 m	Vertikal (Zona Penetrasi Dalam)

Inflow Tahunan Bendungan

Analisis karakteristik hidrologi berupa debit masuk waduk (*inflow*) menjadi parameter krusial dalam menentukan ambang batas aman debit rembesan izin (Q_{ijin}). Metode yang digunakan untuk menghitung debit inflow adalah metode deterministik FJ.Mock dengan kalibrasi hasil pengukuran debit sesaat untuk melihat kewajaran hasil perhitungan serta menggali infomasi ke masyarakat setempat tentang karakteristik fluktuasi debit di Sungai Cihoe sepanjang tahun [2]. Data runtun waktu (*time series*) fluktuasi *inflow* rata-rata 15 harian serta akumulasi volume tahunan selama periode 30 tahun (1991–2020) secara rinci dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Debit Inflow Rata Rata 15 Harian

No	Tahun	Qinf-rata 15 harian (m³/det)	Qinf-rata 15 harian (Juta m³)	Qinf-rata tahunan (Juta m³)
1	1991	2,37	3,11	74,64
2	1992	3,17	4,16	99,87

No	Tahun	Qinf-rata 15 harian (m^3/det)	Qinf-rata 15 harian (Juta m^3)	Qinf-rata tahunan (Juta m^3)
3	1993	3,15	4,14	99,47
4	1994	2,49	3,27	78,48
5	1995	2,88	3,78	90,68
6	1996	3,24	4,25	102,02
7	1997	2,2	2,89	69,37
8	1998	3,35	4,41	105,8
9	1999	3,4	4,47	107,31
10	2000	3,04	3,99	95,76
11	2001	3,55	4,66	111,9
12	2002	2,53	3,33	79,91
13	2003	2,14	2,81	67,53
14	2004	2,41	3,17	76,05
15	2005	2,86	3,76	90,28
16	2006	2,25	2,95	70,83
17	2007	2,81	3,7	88,69
18	2008	2,81	3,69	88,55
19	2009	3,15	4,15	99,49
20	2010	3,45	4,54	108,95
21	2011	1,93	2,53	60,71
22	2012	1,88	2,48	59,41
23	2013	3,39	4,45	106,87
24	2014	3,35	4,4	105,66
25	2015	2,16	2,83	67,97
26	2016	2,55	3,35	80,43
27	2017	2,65	3,48	83,46
28	2018	2,61	3,42	82,18
29	2019	1,55	2,03	48,83
30	2020	2,01	2,65	63,53
	Average		3,56	85,49
	Minimum		2,03	48,83
	Maximum		4,66	111,9
	Standar Deviasi		0,72	17,22

Volume inflow tahunan rata-rata yang mengalir menuju Bendungan Cijurey tercatat sebesar 85,49 Juta m^3

Elevasi Muka Air Waduk Rancangan

Data elevasi muka air waduk merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan dan analisis bendungan, khususnya dalam kaitannya dengan analisis rembesan, serta evaluasi kinerja fondasi bendungan. Data elevasi Elevasi muka air waduk berfungsi sebagai kondisi batas (*boundary condition*) utama yang menentukan besarnya tekanan hidrostatik dalam pemodelan numerik. Nilai elevasi muka air waduk rancangan untuk kondisi operasi normal dan kondisi ekstrem banjir yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Elevasi Muka Air Waduk Rancangan Bendungan Cijurey

No	Kondisi	Elevasi (m)
1.	Muka Air Normal (MAN)	280.00
2.	Muka Air Banjir (MAB)	288.07

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903

Efektivitas Grouting Berdasarkan Penurunan Nilai Lugeon

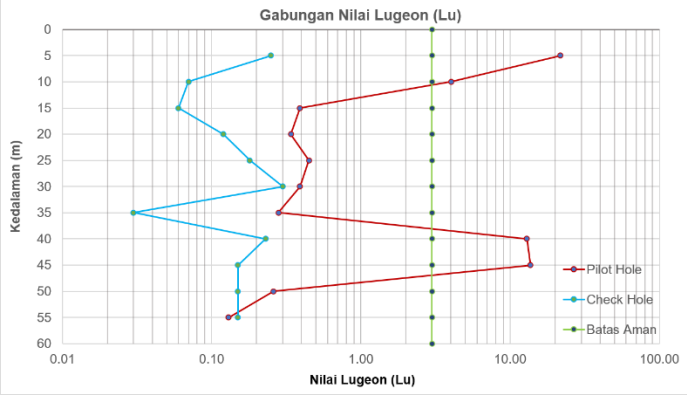
Sebelum melakukan analisis perilaku numerik menggunakan perangkat lunak GeoStudio, dilakukan evaluasi terlebih dahulu terhadap kondisi konduktivitas hidrolis (permeabilitas) riil pada batuan dasar as Bendungan Cijurey zona Main Dam STA 2+50. Evaluasi ini memanfaatkan data sekunder pengujian tekanan air (*Water Pressure Test*/WPT). Secara sistematis, perubahan performa kelulusan air dari tahap awal (*Pilot Hole*) hingga tahap pengujian akhir (*Check Hole*) pada 11 tahapan kedalaman (*stage*) dirangkum dalam Tabel 6.

Tabel 6. Tabel Nilai Hasil Uji Lugion Setelah Pelaksanaan Grouting

Lokasi	Stage	Kedalaman	Pilot Hole	Primary Hole	Secondary Hole	Tertiary Hole	Quarter Hole	Check Hole	Efek Grouting	Remark
		As titik A								
		m	Lugeon	Lugeon	Lugeon	Lugeon	Lugeon	Lugeon	%	
Main dam STA 2+50	1	0 - 5	21,78	8,61	2,10	1,40	0,21	0,25	96,33	Sangat Baik
	2	5 - 10	4,04	0,96	2,32	0,25	0,63	0,07	95,73	Sangat Baik
	3	10 - 15	0,39	0,43	0,49	0,05	0,18	0,06	80,52	-
	4	15 - 20	0,34	0,02	0,10	0,05	0,20	0,12	15,49	-
	5	20 - 25	0,45	0,15	0,04	0,16	0,39	0,18	24,37	-
	6	25 - 30	0,39	0,00	0,90	0,80	0,51	0,30	42,31	-
	7	30 - 35	0,28	0,06	0,11	0,26	0,12	0,03	81,93	-
	8	35 - 40	12,96	0,00	5,60	0,42	0,09	0,23	93,97	Sangat Baik
	9	40 - 45	13,71	1,07	0,87	4,61	0,73	0,15	96,43	Sangat Baik
	10	45 - 50	0,26	1,19	0,95	0,39	0,10	0,15	74,05	-
	11	50 - 55	0,13	2,46	0,23	0,89	0,26	0,15	81,11	-
	Average		4,98	1,36	1,25	0,84	0,31	0,15	91,21	-

Data *Pilot Hole* pada Tabel 6 menunjukkan kondisi sementasi alami batuan sebelum dilakukan perbaikan geoteknik. Berdasarkan standar perencanaan bendungan, batuan fondasi di bawah inti kedap air idealnya memiliki nilai Lugeon ≤ 3 Lu. Namun, data awal mendeteksi adanya zona lolos air yang sangat kritis pada beberapa kedalaman, terutama di Stage 1 (kedalaman 0–5 m) dengan nilai mencapai 21,78 Lu, serta Stage 8 dan 9 (kedalaman 35–45 m) yang berkisar antara 12,96 hingga 13,71 Lu. Tingginya angka Lugeon ini mengonfirmasi keberadaan zona diskontinuitas intensif, seperti kekar terbuka (*open joints*) atau rekahan pada formasi batupasir karbonatan. Fakta tersebut menjadi dasar keputusan teknis dilaksanakannya *curtain grouting* secara masif hingga kedalaman 55 meter demi menutup seluruh jalur rembesan.

Sebagai tahapan akhir jaminan mutu (*quality assurance*), dilakukan pengujian melalui *Check Hole*. Berdasarkan hasil perhitungan total pada Tabel 6, proses pelaksanaan grouting di lokasi ini mencatatkan angka rata-rata efektivitas keseluruhan yang sangat memuaskan, yaitu sebesar 91,21%. Intervensi semen berhasil memangkas nilai Lugeon akhir pada *Check Hole* hingga hanya berkisar antara 0,03 Lu hingga 0,73 Lu, dengan capaian nilai rata-rata keseluruhan sebesar 0,15 Lu. Visualisasi penurunan nilai Lugeon sebelum dan sesudah grouting diberikan pada Gambar 6.



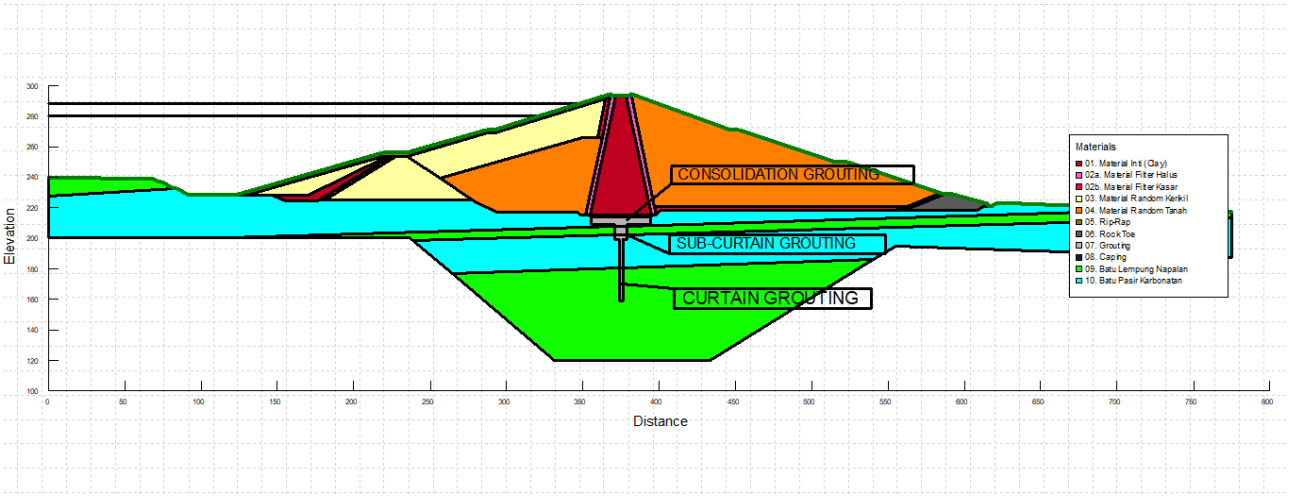
Gambar 6. Grafik Gabungan Nilai Lugeon (Lu) Sebelum dan Sesudah *Grouting* pada Setiap Kedalaman

Secara visual, tren keberhasilan penurunan permeabilitas batuan ini disajikan pada Gambar 6. Melalui grafik gabungan tersebut, terlihat jelas kontras perilaku batuan di mana grafik garis biru (*Check Hole*) secara keseluruhan telah bergeser

dan berada sepenuhnya di sebelah kiri garis hijau yang merepresentasikan ambang batas aman kelulusan air waduk ($<$ 3 Lu). Penurunan grafik yang signifikan ini memberikan bukti empiris bahwa seluruh titik uji telah memenuhi spesifikasi teknis dan massa batuan fondasi Bendungan Cijurey pasca-perbaikan telah berubah karakteristiknya menjadi lapisan yang sangat kedap air.

Hasil pengujian lapangan yang sangat baik ini memberikan landasan ilmiah yang valid untuk analisis pemodelan matematis pada bab selanjutnya menggunakan perangkat lunak SEEP/W dan SIGMA/W. Karena data lapangan membuktikan target desain kedap air ($Lu \leq 3$ Lu) telah terpenuhi secara nyata, maka parameter konduktivitas hidrolis dan modulus deformasi pasca-perbaikan yang dimasukkan ke dalam model elemen hingga bukan lagi sekadar asumsi teoretis ideal, melainkan representasi akurat dari kondisi fisik di lapangan. Oleh karena itu, hasil analisis penurunan dan rembesan pada pemodelan numerik ini dapat dipertanggungjawabkan akurasinya karena memiliki korelasi linear dengan kondisi riil di lapangan.

Data pengujian menunjukkan tren penurunan nilai Lugeon yang konsisten dari tahapan Pilot Hole hingga Check Hole pada STA 2+50. Penurunan nilai Lugeon ini merepresentasikan reduksi koefisien permeabilitas batuan dasar, yang secara langsung memperkecil debit rembesan melewati fondasi bendungan. Guna memvalidasi dampak penurunan permeabilitas tersebut terhadap kontrol rembesan, dilakukan analisis pemodelan numerik aliran dua dimensi menggunakan perangkat lunak SEEP/W GeoStudio versi 2024. Penampang STA 2+50 dipilih sebagai area tinjauan karena memiliki kedalaman *curtain grouting* maksimum dan beban hidrostatik tertinggi dari dasar bendungan, sehingga merepresentasikan kondisi paling kritis pada struktur. Untuk memberikan gambaran tentang geometri bendungan dan material yang ditunjukkan secara detail pada Gambar 7.



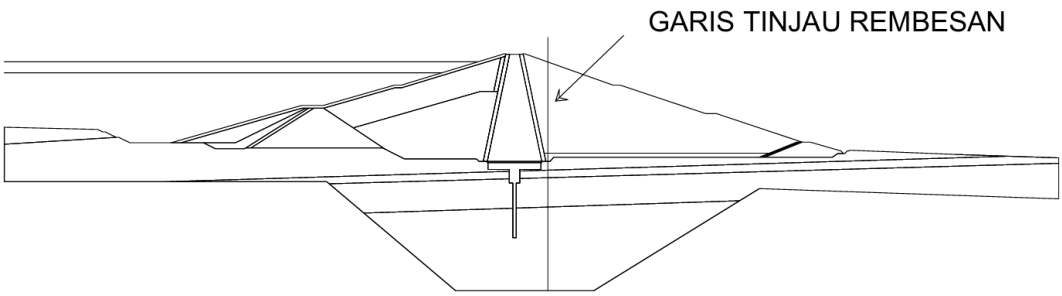
Gambar 7. Tampak Pemodelan Bendungan

Debit Rembesan Bendungan

Pemodelan dilakukan dengan geometri sesuai Gambar 3 dan input material sesuai Tabel 2 yang disesuaikan berbagai kondisi perbaikan fondasi yaitu 1) tanpa grouting, 2) dengan Consolidation Grouting saja, dan 3) dengan Curtain dan Sub-Curtain Grouting dan juga pada 2 kondisi muka air yaitu muka air normal dan muka air banjir.

Sebelum melakukan analisis kuantitatif terhadap debit rembesan yang terjadi pada berbagai skenario, ditetapkan garis tinjauan rembesan (*flux section*) yang tepat pada model geometri bendungan di SEEP/W. Penempatan garis tinjauan ini dilakukan secara vertikal di daerah hilir tepat setelah zona inti kedap air (*core*) bendungan, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 8.

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903



Gambar 8. Garis Tinjau Rembesan

Penempatan garis tinjauan rembesan (*flux section*) secara vertikal di daerah hilir tepat setelah inti bendungan (*core*) bertujuan untuk menangkap total akumulasi aliran air secara akurat, baik yang menembus tubuh inti maupun yang menerobos batuan fondasi. Lokasi langsung di belakang zona inti dan tirai *grouting* ini memberikan data seketika mengenai efektivitas serta persentase reduksi debit air yang berhasil dilakukan oleh elemen proteksi yang ada pada bendungan tersebut.

Sesuai dengan kriteria desain keamanan bendungan, ambang batas debit izin Qijin ditetapkan secara ketat sebesar 1% dari *inflow* tahunan rata-rata [5]. Konversi matematis dari nilai total volume tahunan menjadi debit aliran kontinu m^3/s dilakukan untuk menyelaraskan satuan parameter dengan output analisis numerik pada perangkat lunak rembesan pada perhitungan berikut

$$\text{Debit Inflow Rata-Rata} = \frac{85{,}49 \times 10^6\ \text{m}^3}{31.536.000\ \text{det}} \approx 2{,}71\ \text{m}^3/\text{s}$$

Melalui hasil kalkulasi konversi tersebut, maka ketetapan nilai batas aman Qijin sebesar 1% untuk menguji keandalan perbaikan fondasi Tubuh Bendungan Cijurey diperoleh sebesar:

$$Q_{\text{ijin}} = 1\% \times 2{,}71\ \text{m}^3/\text{det} = 2{,}71 \times 10^{-2}\ \text{m}^3/\text{s}$$

Angka batas ini menjamin bahwa kehilangan air waduk akibat permeabilitas batuan fondasi tidak akan mengganggu fungsi utama bendungan dalam memenuhi target pemanfaatan air di hilir.

Dari hasil kalkulasi dalam berbagai kondisi dapat diprediksi nilai rembesan bendungan yang terjadi pada beberapa kondisi, hasilnya dapat dilihat pada tabel di bawah ini

Tabel 7. Hasil Perhitungan Nilai Debit Rembesan Bendungan Cijurey (SEEP/W)

Kondisi Muka Air	Kondisi Grouting	Debit rembesan (q)	Debit Rembesan x Bentang Bendungan	Q ijin	Ket	Persentase Efektivitas
		$m^3/s/m$	m^3/s	m^3/s		%
Muka Air Normal (El +280)	Tanpa Grouting	$6{,}390 \times 10^{-5}$	$3{,}994 \times 10^{-2}$	$2{,}71 \times 10^{-2}$	Tidak Aman	-
	Dengan Konsolidasi Grouting	$5{,}008 \times 10^{-5}$	$3{,}130 \times 10^{-2}$	$2{,}71 \times 10^{-2}$	Tidak Aman	21,626
	Dengan Curtain dan Consolidasi Grouting	$2{,}628 \times 10^{-5}$	$1{,}643 \times 10^{-2}$	$2{,}71 \times 10^{-2}$	Aman	58,868
Muka Air Banjir (El +288.07)	Tanpa Grouting	$7{,}356 \times 10^{-5}$	$4{,}598 \times 10^{-2}$	$2{,}71 \times 10^{-2}$	Tidak Aman	-
	Dengan Konsolidasi Grouting	$5{,}697 \times 10^{-5}$	$3{,}561 \times 10^{-2}$	$2{,}71 \times 10^{-2}$	Tidak Aman	22,553

Kondisi Muka Air	Kondisi Grouting	Debit rembesan (q)	Debit Rembesan x Bentang Bendungan	Q ijin	Ket	Persentase Efektivitas
		$m^3/s/m$	m^3/s	m^3/s		%
	Dengan Curtain dan Consolidasi Grouting	$3{,}010 \times 10^{-5}$	$1{,}881 \times 10^{-2}$	$2{,}71 \times 10^{-2}$	Aman	59,082

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan SEEP/W yang disajikan pada tabel di atas, evaluasi keamanan hidraulik dilakukan pada dua skenario kritis: Muka Air Normal (El+280) dan Muka Air Banjir (El+288.07). Nilai debit rembesan per meter lari ($m^3/s/m$) yang diperoleh dari *output* SEEP/W kemudian dikalikan dengan total bentang bendungan sepanjang 625 meter untuk mendapatkan nilai debit rembesan total bendungan (Q_{total} dalam satuan m^3/s). Nilai Q_{total} ini menjadi parameter utama untuk dikomparasikan langsung dengan ambang batas debit izin (Q_{ijin}) sebesar $2{,}71 \times 10^{-2}$ m^3/s.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi bendungan tanpa *grouting* maupun hanya dengan konsolidasi *grouting* menghasilkan debit rembesan yang melebihi batas aman ($Q_{\text{total}} > Q_{\text{ijin}}$), sehingga dikategorikan "Tidak Aman" terhadap risiko kehilangan air berlebih. Keamanan struktur baru tercapai secara optimal ketika diterapkan kombinasi metode tirai injeksi (*Grout Curtain*) dan konsolidasi *grouting*.

Pada kondisi Muka Air Normal dengan proteksi kombinasi tersebut, debit rembesan total berhasil ditekan hingga $1{,}643 \times 10^{-2}$ m^3/s (mereduksi rembesan sebesar 58,868%). Sementara itu, pada kondisi Muka Air Banjir, debit total mampu diredam hingga $1{,}881 \times 10^{-2}$ m^3/s dengan persentase penurunan mencapai 59,082%. Karena nilai debit akhir pada kedua skenario tersebut telah berada di bawah Q_{ijin}, maka sistem fondasi bendungan pasca-penerapan *curtain & consolidation grouting* dinyatakan memenuhi syarat keamanan hidraulik (Aman).

Faktor Keamanan Piping pada Hilir Bendungan

Evaluasi keamanan fondasi bendungan terhadap bahaya erosi buluh (*piping*) dilakukan dengan membandingkan nilai gradien hidraulik kritis (i_{cr}) terhadap gradien hidraulik maksimum yang terjadi akibat aliran rembesan (i). Faktor keamanan terhadap bahaya *piping* (FK) dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$FK = \frac{i_{cr}}{i}$$

Gradient hidrolik yang akan ditinjau pada penelitian ini yaitu pada bagian hilir bendungan guna mengevaluasi keamanan terhadap bahaya piping yang terjadi pada tubuh bendungan. Material pada titik tinjau gradien hidrolik berupa Filter Kasar dengan karakteristik sebagai berikut :

$Gs \quad = 2.746$
$e \quad = 0.445$
$icr \quad = (Gs - 1)/(1 + e)$
$\quad = 1.2083$

Nilai i_{cr} yang diperoleh dari karakteristik Filter Kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah sebesar 1.208. sedangkan nilai i merupakan nilai maksimum gradien hidrolik yang didapat dari simulasi pada SEEP/W

Merujuk pada standar teknis perencanaan bendungan, nilai ambang batas faktor keamanan minimum yang dipersyaratkan untuk mencegah terjadinya fenomena *piping* pada kaki hilir adalah sebesar $FK \geq 4{,}0$ [9]. Jika nilai FK berada di bawah 4,0, maka struktur fondasi berada dalam kondisi kritis dan dikategorikan tidak aman.

Hasil analisis numerik dan perhitungan indeks keamanan *piping* pada fondasi Main Dam disajikan pada Tabel 8. di bawah ini:

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903

Tabel 8. Rekapitulasi Faktor Keamanan terhadap Bahaya Piping

Kondisi Muka Air	Kondisi Grouting	icr	Max Gradient Hydraulik (i)	FK Piping	icr/i ≥ 4	Efektivitas (%)
Muka Air Normal (El +280)	Tanpa Grouting	1,208	0,393	3,077	Tidak Aman	-
	Dengan Konsolidasi Grouting	1,208	0,380	3,184	Tidak Aman	3,478
	Dengan Curtain dan Consolidasi Grouting	1,208	0,168	7,182	Aman	133,403
Muka Air Banjir (El +288.07)	Tanpa Grouting	1,208	0,443	2,726	Tidak Aman	-
	Dengan Konsolidasi Grouting	1,208	0,429	2,816	Tidak Aman	3,286
	Dengan Curtain dan Consolidasi Grouting	1,208	0,185	6,528	Aman	139,438

Berdasarkan Tabel di atas, nilai gradien kritis (i_{cr}) tanah dasar adalah konstan sebesar 1,208. Pada kondisi awal Tanpa *Grouting* dan opsi Dengan *Consolidation Grouting*, nilai gradien hidraulik maksimum (i) yang terjadi di kaki hilir masih sangat tinggi, berkisar antara 0,380 hingga 0,443. Tingginya gradien hidraulik tersebut menyebabkan nilai Faktor Keamanan (*FK Piping*) hanya berkisar antara 2,726 hingga 3,184. Karena nilai tersebut belum memenuhi kriteria minimum $FK \geq 4{,}0$, maka kedua kondisi ini dinyatakan "Tidak Aman" karena berisiko tinggi mengalami kegagalan hidraulik akibat erosi internal tanah.

Peningkatan keamanan struktur yang signifikan tercapai setelah fondasi bendungan diberikan proteksi berupa kombinasi *Curtain* dan *Consolidation Grouting*. Metode tirai injeksi ini berhasil mereduksi gradien hidraulik maksimum secara drastis hingga mencapai 0,168 pada Muka Air Normal dan 0,185 pada Muka Air Banjir.

Penurunan gradien hidraulik tersebut secara langsung mendongkrak nilai Faktor Keamanan (FK) struktural secara masif, di mana pada kondisi Muka Air Normal (El+280) nilai *FK* melonjak menjadi 7,182 (meningkat sebesar 133,403%), dan pada kondisi Muka Air Banjir (El+288.07) meningkat menjadi 6,528 (meningkat sebesar 139,438%). Mengingat nilai Faktor Keamanan pada skenario kombinasi *Curtain* dan *Consolidasi Grouting* di kedua kondisi muka air tersebut telah melampaui ambang batas minimum syarat keamanan yang dipersyaratkan ($FK \geq 4{,}0$), maka sistem proteksi aliran rembesan pada kaki hilir bendungan dinyatakan telah memenuhi seluruh aspek persyaratan teknis hidraulik dan berada dalam kondisi "Aman" dari bahaya kegagalan *piping*.

Faktor Keamanan terhadap Gaya Angkat (Uplift Pressure)

Evaluasi keamanan stabilitas bendungan terhadap tekanan ke atas (*uplift pressure*) pada dasar struktur dianalisis dengan membandingkan tegangan total vertikal batuan atau struktur penahan terhadap tekanan air pori yang bekerja. Nilai Faktor Keamanan terhadap gaya angkat (SF_{uplift}) dihitung menggunakan rumus stabilitas berikut:

$$SF_{\text{uplift}} = \frac{\sigma_y}{u}$$

Di mana σ_y adalah tegangan total vertikal (*Y Total Stress*) yang diperoleh dari hasil pemodelan elemen hingga SIGMA/W, sedangkan u menyatakan tekanan air pori (*Tekanan Air Pori*) pada titik tinjauan yang sama. Merujuk pada standar teknis perencanaan keamanan bendungan, ambang batas minimum untuk stabilitas gaya angkat ini ditetapkan sebesar $SF_{\text{uplift}} \geq$

2,0 [9]. Kondisi di mana nilai rasio berada di bawah batas tersebut mengindikasikan risiko terjadinya kegagalan struktur akibat gaya apung air yang berlebih.

Hasil perhitungan indeks stabilitas gaya angkat pada fondasi Main Dam disajikan pada Tabel 9 di bawah ini:

Tabel 9. Rekapitulasi Perhitungan Faktor Keamanan Terhadap Gaya Angkat

Kondisi Muka Air	Kondisi Grouting	Y Total Stress	Tekanan Air Pori	Y Total Stress / Takanan Air Pori	SF Uplift ≥ 2	Persentase Efektivitas
		kPa	kPa	SF Uplift	Ket	%
Muka Air Normal (El +280)	Tanpa Grouting	1119,640	416,263	2,690	Aman	-
	Dengan Konsolidasi Grouting	1113,030	392,837	2,833	Aman	5,338
	Dengan Curtain dan Consolidasi Grouting	1101,320	324,990	3,389	Aman	25,989
Muka Air Banjir (El +288.07)	Tanpa Grouting	1122,240	470,086	2,387	Aman	-
	Dengan Konsolidasi Grouting	1117,260	443,331	2,520	Aman	5,564
	Dengan Curtain dan Consolidasi Grouting	1101,320	369,109	2,984	Aman	24,983

Berdasarkan analisis data pada Tabel di atas, seluruh skenario pengujian mulai dari kondisi *Tanpa Grouting*, *Dengan Konsolidasi Grouting*, hingga kombinasi *Curtain dan Konsolidasi Grouting* secara konsisten menghasilkan nilai Faktor Keamanan yang memenuhi kriteria minimum ($SF_{\text{uplift}} \geq 2{,}0$), sehingga seluruhnya dikategorikan "Aman". Meskipun begitu efektivitas proteksi injeksi semen terlihat nyata pada kemampuannya mereduksi tekanan air pori secara signifikan.

Penerapan kombinasi metode *Curtain* dan *Consolidasi Grouting* mampu memotong tekanan air pori dasar secara masif menjadi 324,990 kPa pada Muka Air Normal dan 369,109 kPa pada Muka Air Banjir. Reduksi tekanan air pori ini secara langsung meningkatkan nilai stabilitas struktural, di mana pada kondisi Muka Air Normal (El+280) nilai SF_{uplift} meningkat menjadi 3,389 (naik sebesar 25,989%), dan pada skenario Muka Air Banjir (El+288.07) melonjak menjadi 2,984 (naik sebesar 24,983%). Dengan demikian, integrasi sistem tirai dan konsolidasi *grouting* terbukti sangat andal dalam menekan risiko *uplift pressure* serta menjamin stabilitas struktural fondasi bendungan pada tingkat keamanan yang optimal.

Penurunan (Displacement Arah Vertikal) Bendungan

Analisis deformasi fondasi bendungan akibat beban struktur dan tekanan air dilakukan untuk mengevaluasi besarnya penurunan (*displacement* arah vertikal) yang terjadi. Komponen penurunan total fondasi bendungan terdiri atas dua parameter utama yang dihitung berdasarkan pendekatan mekanika tanah:

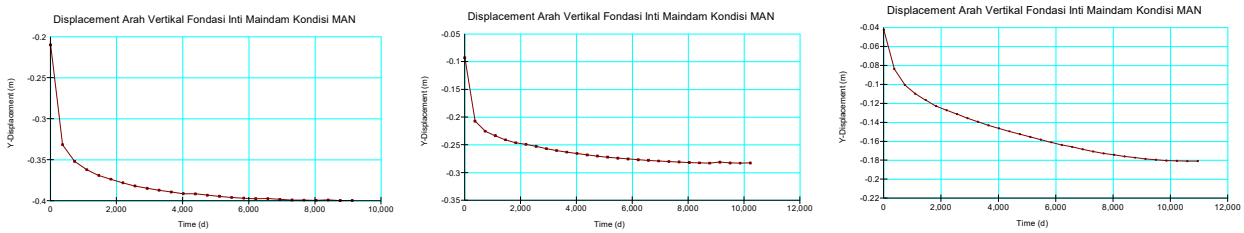
Penurunan Sesaat (*Immediate Settlement* - S_i), terjadi seketika setelah beban bekerja tanpa adanya perubahan kadar air, yang dirumuskan secara analitis menggunakan teori elastisitas [10]

Penurunan Total (*Total Settlement* - S_t), merupakan akumulasi dari penurunan sesaat dan penurunan konsolidasi primer seiring dengan disipasi tekanan air pori berlebih ($S_t = S_i + S_c$) [10].

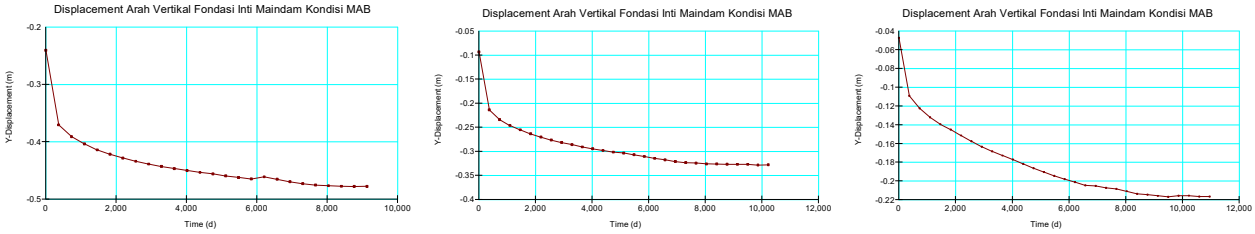
 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903

Dalam pemodelan numerik elemen hingga (aplikasi SIGMA/W atau GeoStudio), nilai penurunan sesaat diperoleh dari *output displacement* langsung pasca-konstruksi selesai dieksekusi, sedangkan penurunan total didapatkan setelah kondisi aliran rembesan jangka panjang (*steady-state seepage*) dan pembebanan hidrostatik penuh bekerja pada tubuh bendungan. Nilai batas aman penurunan vertikal maksimum yang diizinkan untuk fondasi ini adalah 50% dari nilai free board. Nilai free board adalah sebesar 3,65 m sehingga 50 % dari free Board adalah senilai 182,5 cm [11]. berikut akan ditampilakan grafik hasil analisis penurunan menggunakan SIGMA/W

Gambar 10. Kondisi Muka Air Normal a) Tanpa Grouting b) Dengan Consolidation Grouting c) Dengan Sub-Curtain dan Curtain Grouting



Gambar 11. Kondisi Muka Air Banjir a) Tanpa Grouting b) Dengan Consolidation Grouting c) Dengan Sub-Curtain dan Curtain Grouting



Hasil simulasi numerik besarnya *displacement* vertikal (penurunan) pada fondasi bendungan disajikan pada Tabel di bawah ini:

Tabel 10. Rekapitulasi Perhitungan Displacement Arah Vertikal Bendungan

Penurunan (Displacement Arah Vertikal)	**Muka Air**	**Batas Aman Penurunan (cm)**	**Kondisi *Grouting***		
			Tanpa *Grouting* (cm)	**Dengan *Consolidation Grouting* (cm)**	**Dengan *Curtain* dan *Consolidasi Grouting* (cm)**
Penurunan Sesaat	Normal	182,5	20,983	9,272	4,222
	Banjir	182,5	24,033	9,307	4,721
Penurunan Total	Normal	182,5	39,955	28,241	18,079
	Banjir	182,5	47,742	32,816	21,642

Berdasarkan Tabel di atas, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *displacement* vertikal baik penurunan sesaat maupun penurunan total pada skenario Muka Air Normal dan Muka Air Banjir secara keseluruhan berada jauh di bawah Batas Aman Penurunan yang ditentukan (< 182,5 cm). Kondisi ini mengonfirmasi bahwa fondasi bendungan memiliki kekakuan struktural yang sangat baik dan aman dari risiko penurunan berlebih (*excessive settlement*).

Meskipun semua skenario dinyatakan aman, perbaikan tanah melalui metode *grouting* terbukti memberikan kontribusi besar dalam mereduksi deformasi batuan dasar. Pada kondisi *Tanpa Grouting* di skenario Muka Air Banjir, penurunan total maksimum tercatat sebesar 46,742 cm pada tahun ke 25. Namun, setelah diterapkan kombinasi *Curtain dan Konsolidasi Grouting*, nilai penurunan total pada skenario yang sama berhasil dipangkas secara signifikan hingga menjadi 21,642 cm pada tahun ke 30.

Reduksi deformasi ini terjadi karena injeksi semen (*grout*) berhasil mengisi rongga-rongga batuan, meningkatkan modulus elastisitas (E) massa batuan fondasi, serta menekan tekanan air pori. Secara keseluruhan, aplikasi kombinasi

tirai dan konsolidasi *grouting* mampu memperkecil penurunan vertikal total hingga lebih dari 50%, sehingga secara efektif meningkatkan stabilitas jangka panjang dan meminimalkan risiko retak hidraulik (*hydraulic fracturing*) pada tubuh bendungan.

Implikasi Rekayasa Grouting terhadap Keselamatan Bendungan

Secara hidraulik, penurunan drastis nilai Lugeon rata-rata dari 4,98 Lu menjadi 0,15 Lu (efisiensi rata rata >91%) mengonfirmasi terbentuknya tirai kedap air (*grout curtain*) yang homogen di bawah fondasi bendungan. Penyumbatan rekahan batuan ini secara geometris memperpanjang jalur aliran rembesan (*flow path*) di bawah tubuh bendungan. Berdasarkan hukum Darcy, perpanjangan lintasan aliran dengan gradien energi yang sama secara otomatis menurunkan gradien hidraulik dan mengendalikan volume air yang meloloskan diri.

Implikasi langsung dari intervensi rekayasa ini secara komprehensif mengamankan bendungan dari tiga risiko kegagalan hidraulik utama, yaitu:

1. Keamanan Terhadap Debit Rembesan (Seepage Discharge), *curtain grouting* berfungsi memotong jalur aliran sehingga menurunkan koefisien permeabilitas (k) massa batuan secara ekstrem. Hasil simulasi SEEP/W membuktikan efektivitas kontrol aliran ini, di mana sistem *grouting* mampu menekan debit rembesan total (Q) hingga mengalami penurunan sebesar lebih dari 59% dari $4{,}598 \times 10^{-2}$ m^3/s saat tanpa perbaikan fondasi menjadi $1{,}881 \times 10^{-2}$ m^3/s dalam kondisi muka air banjir. Penurunan debit ini memastikan volume kehilangan air waduk berada jauh di bawah ambang batas izin yang ditentukan, sehingga keandalan fungsi bendungan sebagai penyedia air jangka panjang tetap terjaga tanpa mengganggu stabilitas struktur.
2. Keamanan Terhadap Erosi Buluh (Piping), terjadinya reduksi gradien hidraulik luar (*exit gradient*) pada hilir dari 0,443 (kondisi kritis) menjadi hanya 0,185 sukses mendongkrak Faktor Keamanan terhadap erosi buluh (*FK Piping*) melonjak secara masif menjadi 6,528 pada kondisi muka air banjir. Sehingga perbaikan fondasi menggunakan *Curtain* dan *Consolidasi grouting* efektif meningkatkan FK piping sebesar lebih dari 139%. Angka ini memenuhi standar minimum nasional ($FK \geq 4{,}0$), yang berarti risiko hanyutnya partikel tanah fondasi akibat hantaran arus air bawah tanah telah berhasil dieliminasi.
3. Keamanan Terhadap Uplift Pressure: Perpanjangan *flow path* oleh tirai injeksi bertindak sebagai penghalang tekanan (*pressure barrier*), sehingga terjadi disipasi tekanan air pori yang masif di hilir tirai. Tekanan air pori dasar mampu ditekan dari 470,086 kPa menjadi 369,109 kPa pada muka air banjit, yang secara langsung menstabilkan gaya angkat struktural dengan peningkatan *Safety Factor* (SF_{uplift}) mencapai 2,984 (aman dari batas minimum $SF \geq 2{,}0$).

Di sisi lain, implikasi rekayasa *grouting* ini juga memberikan dampak positif ganda (*multi-benefit*) terhadap aspek geoteknik dan deformasi struktural bendungan. Injeksi bubur semen bertekanan ke dalam kekar batuan meningkatkan densitas, kerapatan, serta Modulus Elastisitas (E) massa batuan fondasi secara signifikan. Peningkatan kekakuan (*stiffness*) fondasi ini secara mekanis membatasi pergerakan tanah akibat beban statis tubuh bendungan maupun beban hidrostatik air waduk.

Berdasarkan hasil pemodelan deformasi pada SIGMA/W, penurunan total jangka panjang (*total settlement*) pada kondisi Muka Air Banjir berhasil dikendalikan dan dipangkas lebih dari 50%, yaitu dari 47,742 cm (tanpa mitigasi) menjadi hanya 21,642 cm setelah proteksi penuh. Penurunan akhir sebesar 21,642 cm ini berada jauh di bawah ambang batas aman penurunan vertikal yang diizinkan (182,5 cm). Keberhasilan dalam membatasi deformasi fondasi ini sangat krusial karena memastikan tinggi jagaan bebas (*freeboard*) bendungan tetap terjaga dengan aman di atas batas toleransi 50%, sekaligus mengeliminasi risiko keretakan hidraulik (*hydraulic fracturing*) pada inti bendungan yang dapat memicu keruntuhan katastropik..

Secara keseluruhan, visualisasi reduksi Lugeon pada lapangan terbukti selaras dengan pemodelan numerik SEEP/W dan SIGMA/W. Intervensi rekayasa *grouting* ini secara komprehensif telah mengubah fondasi *Main Dam* STA 2+50 yang semula lulus air dan deformatif, menjadi sebuah sistem fondasi yang kokoh, kedap air, serta memiliki tingkat keselamatan hidraulik dan struktural yang sangat tinggi.

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.1903

KESIMPULAN DAN SARAN

Efektivitas perbaikan fondasi batuan melalui metode *grouting* (kombinasi *curtain* dan *consolidation grouting*) terbukti sangat tinggi dalam mengendalikan karakteristik hidraulis bendungan. Efektivitas ini ditunjukkan secara empiris oleh penurunan nilai Lugeon rata-rata yang masif dari 4,98 Lu menjadi hanya 0,15 Lu, dengan tingkat efisiensi rekayasa mencapai lebih dari 95%. Keselarasan parameter lapangan ini divalidasi oleh simulasi SEEP/W, di mana efektivitas tirai kedap air mampu menekan debit rembesan total hingga berada di bawah ambang batas izin ($Q_{ijin} = 2{,}71 \times 10^{-2}$ m^3/s). Selain itu, efektivitas kontrol aliran ini sukses mereduksi gradien hidraulik maksimum di kaki hilir secara drastis dari 0,443 menjadi 0,185, sehingga mendongkrak Faktor Keamanan terhadap erosi internal (*FK Piping*) dari kondisi kritis 2,726 menjadi 6,528 (memenuhi syarat $FK \geq 4{,}0$), serta efektif dalam mengoptimalkan stabilitas struktur terhadap gaya angkat (*uplift pressure*) sebesar lebih dari 24%.

Efektivitas mekanis dari sistem *grouting* pasca-perubahan distribusi tekanan air pori memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kontrol deformasi struktural Bendungan Cijurey. Hasil pemodelan numerik dengan SIGMA/W membuktikan efektivitas perbaikan batuan dasar dalam meningkatkan densitas dan modulus elastisitas, yang mampu memangkas penurunan vertikal total jangka panjang (*total settlement*) pada kondisi Muka Air Banjir sebesar lebih dari 50%, yaitu dari 0,467 m menjadi hanya 0,216 m. Nilai deformasi akhir sebesar 0,216 m tersebut berada jauh di bawah ambang batas toleransi aman yang diizinkan sebesar 1,825 m. Hal ini menegaskan efektivitas metode penanganan dalam meminimalkan risiko penurunan berlebih, menjaga tinggi jagaan bebas (*freeboard*), serta mengeliminasi potensi keretakan hidraulik (*hydraulic fracturing*) pada inti bendungan.

Untuk menjaga keselamatan bendungan dalam jangka panjang, disarankan untuk melakukan pemantauan instrumen rembesan (*piezometer*) dan patok geser deformasi di lapangan secara rutin guna mengevaluasi konsistensi efektivitas tirai kedap air (*grout curtain*) secara berkala. Selain itu, pendekatan analisis numerik terintegrasi (SEEP/W dan SIGMA/W) perlu diaplikasikan pada penampang kritis bendungan lainnya untuk memperoleh validasi keselamatan hidro-mekanis yang menyeluruh di seluruh area tapak Bendungan Cijurey.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kementerian Pekerjaan Umum, “Pentingnya Infrastruktur SDA Untuk Ketahanan Pangan Nasional,” Kementian Pekerjaan Umum, 2025.

[2] Balai Besar Wilayah Sungai Citarum, *Laporan Akhir Reviu Desain Bendungan Cijurey Kapupaten Bogor*. Balai besar Wilayah Sungai Citarum, 2024.

[3] R. Fell, P. MacGregor, D. Stapledon, and G. Bell, *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd editio. CRC Press, 2015. doi: 10.1201/NOE0415364409.

[4] H. R. Cedergren, *Seepage, Drainage, And Flow Nets*, Third Ed. John Wiley & Son, 1989.

[5] Dirjen SDA Departemen Pekerjaan Umum, “Pedoman Grouting Untuk Bendungan,” 2005, *Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Sumber Daya Air*. [Online]. Available: http://222.124.202.167/balai_bendungan/file/19) PEDOMAN. GROUTING UNTUK BENDUNGAN.pdf

[6] Soedibyo, *Teknik Bendungan*. Jakarta: Pranandya Paramita, 2003.

[7] Geoslope Internasional Ltd, *Seepage Modeling with SEEP /W*, no. February. GEO-SLOPE International, 2013.

[8] Geoslope Internasional Ltd, “Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W,” 2012, *GEO-SLOPE International*.

[9] Badan Standardisasi Nasional, “Metode analisis dan cara pengendalian rembesan air untuk bendungan tipe urugan,” 2016, *Badan Standarisasi Nasional*. [Online]. Available: www.bsn.go.id

[10] B. M. Das, “Mekanika Tanah 1,” 1995.

[11] Departemen Pemukiman Dan Prasarana Wilayah, “Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa,” 2004, *Departemen Pemukiman Dan Prasarana Wilayah*.

[12] Badan Standardisasi Nasional. (2015). Tata Cara Desain Tubuh Bendungan Urugan (SNI 8062-2015). In Badan Nasional Indonesia. http://sispk.bsn.go.id/SNI/DetailSNI/9964

[13] Bureau of Indian Standards (BIS). (1993). *IS 11293-2 (1993): Guidelines for the Design of Grout Curtains, Part 2: Masonry and Concrete Gravity Dams*. Bureau of Indian Standards (BIS).

[14] Hardiyatmo, H. C. (2003). *Mekanika Tanah II* (3rd Ed). Gadjah Mada University Press.

[15] International Society for Rock Mechanics. (1978). *Rock Characterization Testing And Monitoring*. Pergamon Press.

[16] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. (2015). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 27/PRT/M/2015 tentang Bendungan*.
[17] Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1976). *Hidrologi Untuk Pengairan*.
[18] USBR. (2001). *Geology Field Manual: Chapter 17 – Water Testing for Permeability*. In Test. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
[19] B. M. Das, Principles of Foundation Engineering, 7th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2011.
[20] U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, *Design of Small Dams*, 3rd ed. Denver, CO, USA: U.S. Government Printing Office, 1987