



ANALISIS REMBESAN PADA BENDUNGAN SINDANG HEULA MENGUNAKAN METODE *SEEPAGE INDEX* DAN KRITERIA TINGGI BENDUNGAN

SEEPAGE ANALYSIS OF SINDANG HEULA DAM USING SEEPAGE INDEX AND HEIGHT CRITERIA

Fadel Muhammad Patra¹, Suharyanto², Sukamta³

^{1,2,3}Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto Tembalang Kota Semarang Jawa Tengah, 50275, Indonesia

Email: patrafadel@gmail.com

Received: 19 Desember 2026 Revised: 26 Januari 2026 Accepted: 12 Februari 2026 Published: 13 Februari 2026

ABSTRAK

*Rembesan pada bendungan merupakan ancaman serius terhadap keamanan bendungan, dengan 47% kegagalan bendungan disebabkan erosi internal. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kondisi rembesan Bendungan Sindang Heula dengan metode seepage index dan kriteria tinggi bendungan menggunakan data instrumentasi lapangan. Data tekanan air pori dari Embankment Piezometer dan debit rembesan dari V-Notch dikumpulkan selama Januari 2020–Juni 2025. Analisis regresi linier diterapkan pada V-Notch dengan data tersaring curah hujan. Evaluasi menggunakan kriteria tinggi bendungan menunjukkan debit rembesan pada kondisi rendah, normal, dan maksimal masing-masing 0,034, 0,275, dan 0,323 liter/menit/meter, dengan status aman hingga antara (ambang batas ketidakamanan pada 0,56 liter/menit/meter). Metode Seepage Index menghasilkan nilai *QI* sebesar 0,025 (rendah), 0,039 (normal), dan 0,042 (maksimal), jauh di bawah ambang kritis ($QI < 1$). Kedua metode mengkonfirmasi Bendungan Sindang Heula dalam kondisi aman dengan integritas baik dan tidak berisiko terhadap piping atau erosi internal dalam jangka operasional saat ini.*

Kata kunci: *Bendungan Sindang Heula, Gradien Hidraulik, Kriteria Tinggi Bendungan, Rembesan, Seepage Index*

ABSTRACT

*Seepage in dams poses a serious threat to dam safety, with 47% of dam failures caused by internal erosion. This research aims to evaluate seepage conditions of Sindang Heula Dam using Seepage Index method and dam height criteria based on field instrumentation data. Pore water pressure data from Embankment Piezometers and seepage discharge from V-Notch were collected during January 2020–June 2025. Linear regression analysis was applied to V-Notch data with rainfall-filtered. Evaluation using dam height criteria shows seepage discharge at low, normal, and maximum water levels of 0.034, 0.275, and 0.323 liters/minute/meter, respectively, with safe to intermediate status (unsafe threshold at 0.56 liters/minute/meter). Seepage Index method yielded *QI* values of 0.025 (low), 0.039 (normal), and 0.042 (maximum), far below the critical threshold ($QI < 1$). Both methods confirm that Sindang Heula Dam is in safe condition with good structural integrity and poses no risk of piping or internal erosion during current operational periods.*

Keywords: *Dam Height Criteria, Hydraulic Gradient, Seepage, Seepage Index, Sindang Heula Dam*

PENDAHULUAN

Bendungan merupakan infrastruktur hidraulik yang sangat penting bagi kehidupan manusia modern. Struktur ini dirancang untuk berbagai fungsi strategis termasuk penyediaan air baku untuk konsumsi, irigasi pertanian, pengendalian banjir, dan pembangkitan energi terbarukan. Akan tetapi, salah satu tantangan terbesar dalam operasi bendungan adalah masalah rembesan yang dapat mengancam integritas dan stabilitas struktur (Tran dkk., 2020). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sekitar 47% dari semua kegagalan bendungan di dunia disebabkan oleh erosi internal yang dipicu oleh rembesan tidak terkontrol melalui tubuh bendungan (Bashar dkk., 2025). Lebih spesifik lagi, penelitian pada bendungan tua menunjukkan bahwa sekitar 50% dari kegagalan bendungan sebelum tahun 1999 diakibatkan oleh erosi internal, dan zona *interface* antara tanggul urugan dan struktur beton (seperti *spillway*) adalah lokasi yang sangat rentan terhadap retak dan erosi internal. (Yun dkk., 2023).

Rembesan pada tubuh bendungan adalah aliran air yang terus-menerus bergerak dari sisi hulu (zona bertekanan tinggi) menuju sisi hilir (zona bertekanan rendah) melalui material yang bersifat permeabel. Proses ini terjadi akibat adanya perbedaan tekanan hidrostatik antara dua sisi bendungan, sehingga air akan secara alami mengikuti jalur-jalur dengan hambatan permeabilitas terendah. Mekanisme rembesan ini dapat mengangkut partikel-partikel halus dari material tubuh bendungan, yang pada akhirnya dapat menyebabkan terjadinya erosi internal atau *piping* yaitu suatu kondisi dimana lubang atau terusan terbentuk di dalam struktur bendungan dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktur (Peirson dan Fell, 2025). Menurut Nurnawaty dkk. (2018) rembesan pada tubuh bendungan adalah aliran air yang secara terus-menerus bergerak dari sisi hulu menuju sisi hilir melalui material

yang permeabel, baik di tubuh maupun pondasi bendungan. Rembesan dapat dirumuskan sebagai proses perpindahan air melalui material berpori pada tubuh atau pondasi bendungan akibat perbedaan tekanan hidrostatik antara sisi hulu dan hilir. Proses ini dapat mengangkut partikel halus dari tubuh bendungan, yang berpotensi menyebabkan erosi bawah tanah (*piping*) dan mengancam stabilitas bendungan.

Untuk memahami perilaku rembesan pada bendungan, penting untuk mengenal konsep dasar pergerakan air melalui material berpori. Menurut teori klasik dalam mekanika tanah, pergerakan air di bawah permukaan mengikuti Hukum Darcy yang menyatakan bahwa kecepatan aliran air berbanding lurus dengan gradien hidraulik dan koefisien permeabilitas material. Tekanan hidrostatik yang dihasilkan merupakan faktor utama yang mendorong air untuk bergerak menembus tubuh bendungan. Seiring dengan meningkatnya elevasi muka air waduk, tekanan air pori di dalam struktur bendungan juga akan meningkat secara signifikan, yang kemudian mempercepat laju aliran rembesan ke arah hilir (Heitland dan Donaghy, 2021).

Parameter-parameter kunci yang mempengaruhi rembesan menurut Kuntjoro, dkk. (2023) antara lain sebagai berikut.

1. Gradien hidraulik, yaitu rasio antara kehilangan energi hidraulik terhadap jarak aliran,
2. Koefisien permeabilitas material, yang menunjukkan kemudahan air menembus material,
3. Debit rembesan per satuan panjang bendungan yang umumnya diukur dalam liter/menit/meter
4. Luas penampang aliran rembesan di dalam tubuh bendungan.

Di samping itu, fluktuasi tinggi muka air waduk dan intensitas curah hujan di daerah tangkapan air juga turut

Analisis Rembesan Pada (Patra/ hal. 161-174)

mempengaruhi dinamika tekanan air pori dan kecepatan rembesan dalam material urugan bendungan (Melani dkk., 2024). Karakteristik tanah kohesif dengan permeabilitas rendah pada zona inti bendungan mengakibatkan potensi akumulasi tekanan air pori yang tidak terkontrol. Strategi perbaikan tanah melalui injeksi bahan stabilisasi atau pembekuan dapat secara simultan meningkatkan parameter geoteknik tanah dan mengurangi aliran rembesan, yang pada akhirnya mereduksi tekanan air pori berlebihan dan memastikan stabilitas jangka panjang bendungan (Khairiyah dkk., 2025). Permeabilitas material bendungan memiliki sifat anisotropis, di mana koefisien permeabilitas dalam arah vertikal berbeda dengan arah horizontal. Variasi anisotropis ini secara signifikan mempengaruhi pola aliran rembesan dan distribusi tekanan air pori dalam tubuh bendungan. Pada kondisi hujan atau fluktuasi muka air yang cepat, anisotropis permeabilitas ini menjadi sangat kritis karena dapat menyebabkan konsentrasi aliran air pada zona-zona tertentu dengan daya rembesan lebih tinggi (Zhang dkk., 2025). Perbedaan sifat tanah di berbagai bagian bendungan, terutama dalam hal kemampuan air merembes (permeabilitas), sangat berpengaruh terhadap bagaimana air mengalir dan seberapa besar risiko terjadinya erosi dari dalam (Liang dkk., 2024). Jika ada bagian tanah dengan permeabilitas yang lebih tinggi, air bisa lebih mudah terkonsentrasi di sana, sehingga mempercepat terjadinya erosi dan pembentukan saluran air kecil (*piping*). Karena itu, penting untuk memahami dengan baik bagaimana sifat tanah tersebar agar penilaian terhadap keamanan bendungan bisa lebih tepat dan menyeluruh (Yoshida dkk., 2025). Mekanisme erosi internal pada bendungan dapat terjadi melalui beberapa proses, antara lain *suffusion* (pemindahan partikel gradasi halus), *piping* (pembentukan saluran rembesan), dan *backward erosion*

piping (erosi mundur yang dimulai dari permukaan hilir) (Chi dkk., 2025).

Dalam praktik bendungan modern, terdapat berbagai metode untuk mengevaluasi dan menganalisis rembesan. Metode-metode ini dapat dikategorikan menjadi dua kelompok utama: metode grafis tradisional (*flow net method*) dan metode numerik berbasis komputer. Metode *flow net* adalah teknik analisis rembesan yang relatif sederhana dan telah lama digunakan, akan tetapi metode ini memiliki keterbatasan akurasi ketika diterapkan pada geometri bendungan yang kompleks. Sebaliknya, metode numerik menggunakan perangkat lunak elemen hingga (*finite element method*) yang mampu menangani kondisi geometri rumit dan menghasilkan distribusi tekanan air pori serta aliran rembesan yang lebih detail dan akurat. Penelitian perbandingan antara kedua metode ini menunjukkan bahwa kombinasi dari analisis numerik dan validasi dengan data lapangan memberikan hasil yang paling komprehensif dan dapat diandalkan (Fu dkk., 2024).

Pemantauan rembesan di lapangan dilakukan menggunakan peralatan instrumentasi seperti piezometer untuk mengukur tekanan air pori dan *V-Notch* atau perangkat sejenis untuk mengukur debit rembesan secara langsung. Data dari pengukuran lapangan ini sangat berharga karena memberikan informasi kondisi aktual bendungan dalam operasi normal. Kombinasi antara data instrumentasi lapangan dan analisis numerik memberikan pemahaman holistik tentang perilaku rembesan dan memungkinkan evaluasi yang lebih andal terhadap keamanan bendungan (Putri dkk., 2024).

Untuk menentukan apakah tingkat rembesan pada suatu bendungan masih dalam kondisi aman atau tidak, telah dikembangkan beberapa kriteria penerimaan rembesan. Salah satu kriteria yang paling umum digunakan adalah

kriteria berdasarkan tinggi bendungan yang dikembangkan oleh Look (2007). Kriteria ini menetapkan batas-batas maksimum debit rembesan per meter panjang bendungan berdasarkan kategori ketinggian bendungan. Untuk bendungan dengan ketinggian lebih dari 40 meter, rembesan yang dianggap aman adalah kurang dari 0,28 liter/menit/meter dan lebih dari 0,56 liter/menit/meter. Jika debit rembesan melebihi nilai ini, bendungan dinyatakan tidak aman dan memerlukan tindakan mitigasi segera. Selain kriteria debit rembesan, metode *Seepage Index* (QI) juga menggabungkan beberapa parameter rembesan dalam satu nilai indeks yang dihitung dari perbandingan antara debit rembesan terukur dengan kapasitas rembesan teoritis yang diperkirakan berdasarkan parameter hidrologi dan geoteknik bendungan (Buldan dkk., 2021). Nilai QI yang kurang dari 1 menunjukkan kondisi rembesan yang aman, sedangkan nilai QI yang sama dengan 1 merupakan kondisi batas yang memerlukan pemantauan lebih intensif, dan nilai QI yang lebih besar dari 1 mengindikasikan rembesan dalam kondisi tidak aman dengan potensi risiko tinggi terhadap *piping* dan kegagalan struktur (Alamudi dkk., 2025).

Bendungan Sindang Heula yang berlokasi di DAS Cibanten, Provinsi Banten, memiliki kapasitas tampung sebesar 9,26 juta m³ dengan tinggi bendungan 41 meter. Struktur ini berfungsi dalam penyediaan air baku, irigasi pertanian, serta pengendalian banjir, dan berpotensi dimanfaatkan untuk pembangkit listrik mikrohidro. Sejak tahap pengisian awal pada Desember 2019 hingga saat ini, belum pernah dilakukan inspeksi dan analisis menyeluruh terhadap kondisi rembesan Bendungan Sindang Heula berbasis data instrumentasi lapangan yang sistematis dan komprehensif. Untuk mendukung keandalan operasi bendungan jangka panjang, diperlukan pemantauan rutin terhadap debit rembesan melalui *V-Notch* di bagian hilir yang memberikan

indikator objektif tentang tingkat keamanan bendungan terhadap potensi kebocoran atau rembesan berlebih. Data dari instrumentasi lapangan ini, apabila dianalisis secara sistematis dan dievaluasi berdasarkan kriteria keamanan internasional yang telah terbukti efektif, dapat memberikan informasi berharga tentang kondisi aktual bendungan dan potensi risiko yang dihadapi.

Analisis rembesan yang dilakukan Buldan dkk. (2021) menggunakan data pembacaan instrumen piezometer dan *V-Notch* yang terpasang pada tubuh Bendungan Kedungombo. Analisis dilakukan dengan seleksi data harian rembesan tanpa pengaruh hujan, analisis regresi antara elevasi muka air waduk dan debit rembesan, serta evaluasi *Seepage Index* (QI). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tekanan air pori dan debit rembesan berada dalam batas aman, dengan nilai QI mencapai 0,09 pada elevasi muka air banjir maksimum (+95 m), masih jauh di bawah ambang aman $QI < 1$.

Analisis serupa juga dilakukan pada Bendungan Jatibarang oleh Setyadi dkk.(2023). Hasil analisis rembesan terhadap kriteria tinggi bendungan, rembesan tergolong tidak aman karena mempunyai debit lebih besar dari 0,28 lt/mnt/m (7,497 lt/mnt/m). Dari kriteria *Seepage Index*, rembesan masih dalam batas aman karena menghasilkan nilai QI kurang dari 1 (0,848). Hasil simulasi stabilitas pada kondisi statis maupun gempa menghasilkan nilai angka aman diatas angka aman rendah sehingga Bendungan Jatibarang tergolong aman.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi rembesan dan mengevaluasi tingkat keamanan tubuh Bendungan Sindang Heula melalui interpretasi data instrumentasi lapangan yang komprehensif. Data yang dianalisis mencakup *V-Notch* selama periode Januari

Analisis Rembesan Pada (Patra/ hal. 161-174)

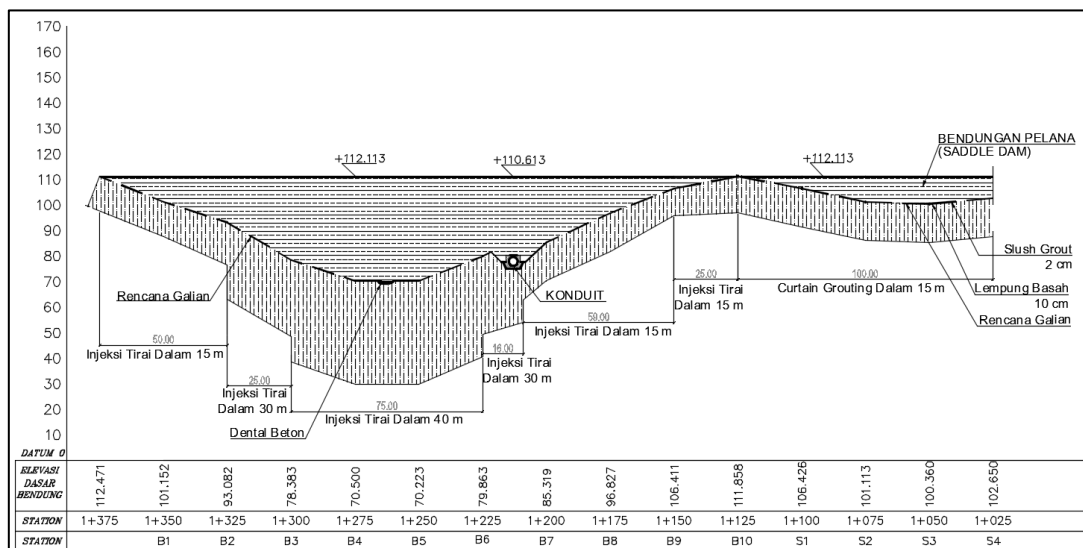
2020 hingga Juni 2025. Metode penelitian menggunakan analisis regresi linier untuk evaluasi rembesan berdasarkan kriteria tinggi bendungan serta metode *Seepage Index*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar teknis yang kuat dalam pengambilan keputusan terkait pemeliharaan dan pengendalian rembesan guna memastikan keamanan operasional bendungan secara berkelanjutan dan optimal.

METODE

1. Lokasi dan Pengumpulan Data

Penelitian ini berlokasi di Bendungan Sindang Heula, Desa Sindang Heula,

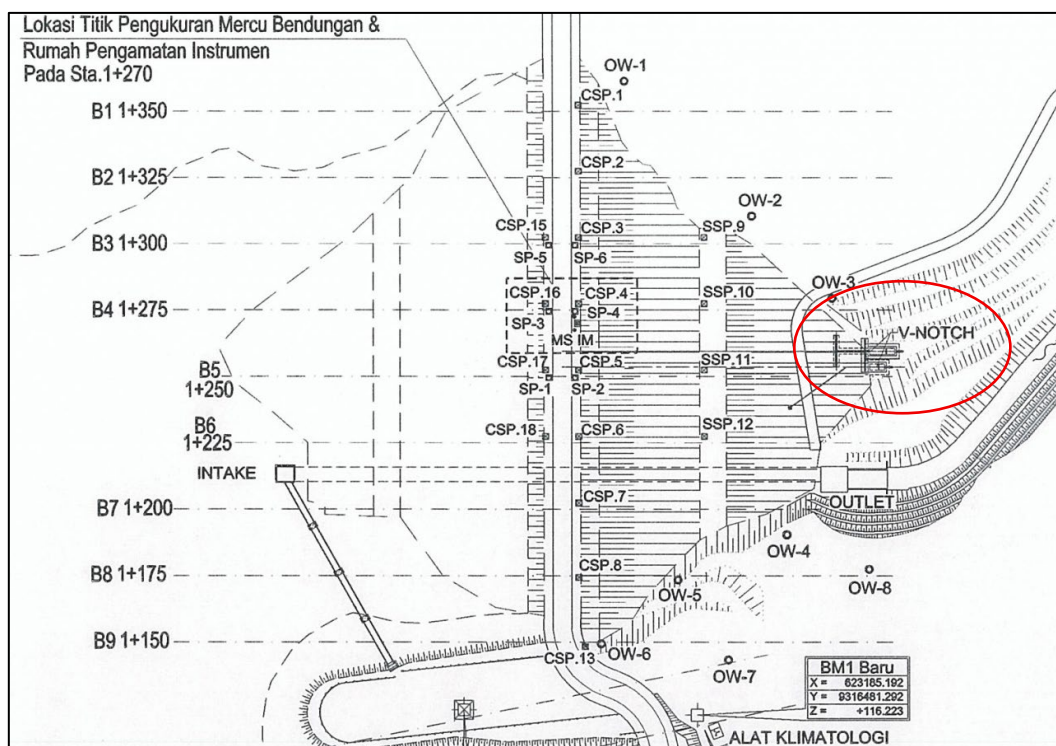
Kecamatan Pabuaran, Kabupaten Serang, Provinsi Banten, pada koordinat 106°6'52" BT dan 6°10'52,4" LS. Bendungan Sindang Heula merupakan bendungan urugan zonal dengan inti tegak, memiliki tinggi 41 m dan panjang puncak 250 m. Data teknis yang digunakan dalam penelitian ini mencakup geometri bendungan serta nilai koefisien permeabilitas (*k*) material inti, yang diperoleh dari Laporan Akhir Supervisi Pembangunan Sindang Heula (2018) dan dokumen *As Built Drawing* (2018). Potongan memanjang Bendungan Sindang Heula disajikan pada Gambar 1 sebagai acuan geometri dalam analisis.



Gambar 1. Potongan Memanjang Tubuh Bendungan (BBWS Cidanau Ciujung Cidurian, 2018)

Selain data teknis, penelitian ini menggunakan data instrumentasi dan hidrologi untuk mendukung evaluasi rembesan. Data gradien hidraulik diperoleh dari penelitian sebelumnya oleh penulis (Patra dkk., 2025) yang selanjutnya dimanfaatkan dalam analisis rembesan

menggunakan metode *Seepage Index*. Data debit rembesan dikumpulkan dari pengukuran *V-Notch* di hilir bendungan pada periode Januari 2020 hingga Juni 2025, dengan lokasi *V-Notch* diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah peletakan V- Notch pada hilir bendungan (BBWS Cidanau Ciujung Cidurian, 2018)

Sebagai data pendukung, elevasi muka air waduk dan curah hujan harian periode Januari 2020 hingga Juni 2025 diperoleh dari Unit Pengelola Bendungan Sindang Heula, BBWS Cidanau Ciujung Cidurian

2. Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dari penyusunan data *time series* yang mencakup waktu pengamatan, curah hujan, elevasi muka air waduk, dan debit rembesan. Data kemudian ditata dalam format tabel dan dilakukan penyaringan (*filtering*) untuk

menghilangkan pengaruh curah hujan agar diperoleh nilai rembesan murni yang merepresentasikan kondisi operasi bendungan secara lebih objektif. Selanjutnya, hubungan antara elevasi muka air waduk dan debit rembesan dianalisis menggunakan regresi linier sederhana berbentuk $y = mx + c$, dengan evaluasi rembesan dilakukan pada kondisi muka air rendah, normal dan maksimum berdasarkan kriteria penerimaan rembesan menurut Look (2007) sesuai tinggi bendungan yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria Penerimaan Rembesan Berdasarkan Tinggi Bendungan

Tinggi Bendungan (m)	Rembesan : Liter/ hari/ meter (Liter/ menit/ meter)	
	OK	Tidak OK
< 5	< 25 (0,02)	> 50 (0,03)
5 – 10	< 50 (0,03)	> 100 (0,07)
10 – 20	< 100 (0,07)	> 200 (0,14)
20 – 40	< 200 (0,14)	> 400 (0,28)
> 40	< 400 (0,28)	> 800 (0,56)

Pada tahap berikutnya, penilaian rembesan juga dilakukan menggunakan

metode *Seepage Index* (Novak, 2008) dengan terlebih dahulu menghitung debit

Analisis Rembesan Pada (Patra/ hal. 161-174)

rembesan (q), gradien hidraulik (i) serta koefisien permeabilitas (k) material inti bendungan berdasarkan data teknis. Luas penampang aliran rembesan (A) ditentukan dari potongan berdasarkan elevasi muka air waduk yang dianalisis melalui pengukuran pada *AutoCAD*. Setelah semua parameter tersebut diperoleh, dilakukan penerapan Persamaan (1) untuk menghitung nilai *Seepage Index* dan mengevaluasi apakah tingkat rembesan yang terjadi masih berada dalam batas aman.

$$QI = \frac{q}{1000 \times A \times k \times i} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana:

- QI = Indeks rembesan (*Seepage Index*)
- q = Debit rembesan per satuan panjang bendungan (lt/detik/m)
- A = Luas penampang aliran (m^2)
- k = Koefisien permeabilitas inti bendungan (m/detik)
- i = Gradien hidraulik

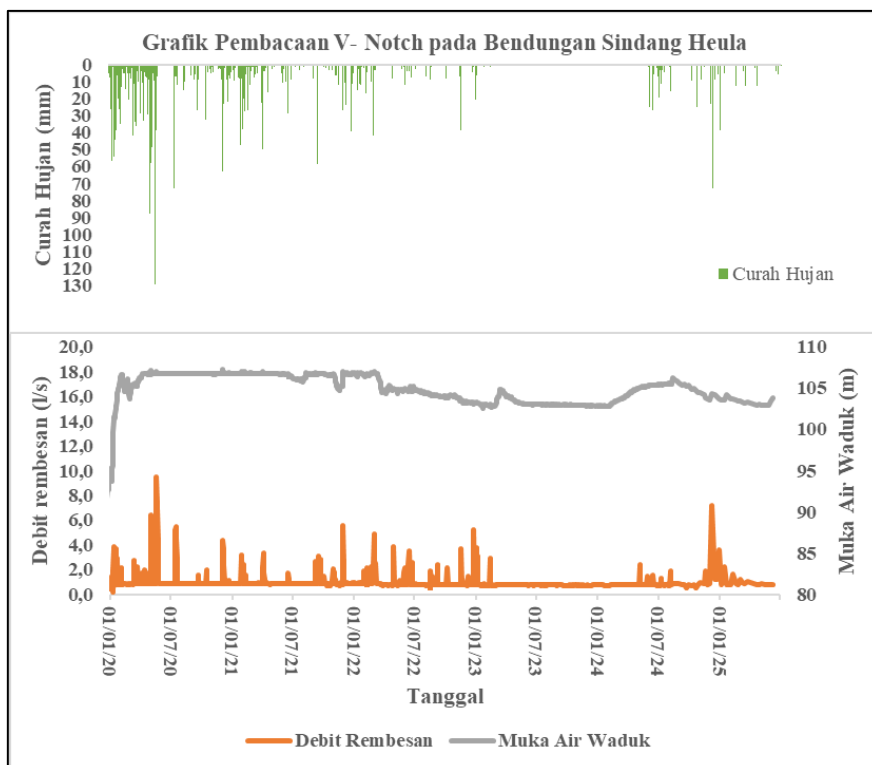
Kriteria penerimaan untuk *Seepage Index* ditetapkan berdasarkan nilai QI , di mana kondisi rembesan dengan nilai $QI < 1$ dikategorikan aman karena debit rembesan masih berada dalam batas wajar dan tidak berpengaruh terhadap stabilitas bendungan. Nilai $QI = 1$ menunjukkan kondisi batas yang memerlukan pemantauan lebih lanjut terhadap potensi peningkatan rembesan. Sementara itu, apabila $QI > 1$, kondisi

rembesan diklasifikasikan tidak aman karena berpotensi menimbulkan kegagalan struktur seperti terjadinya *piping* pada tubuh bendungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kriteria Penerimaan Rembesan berdasarkan Tinggi Bendungan

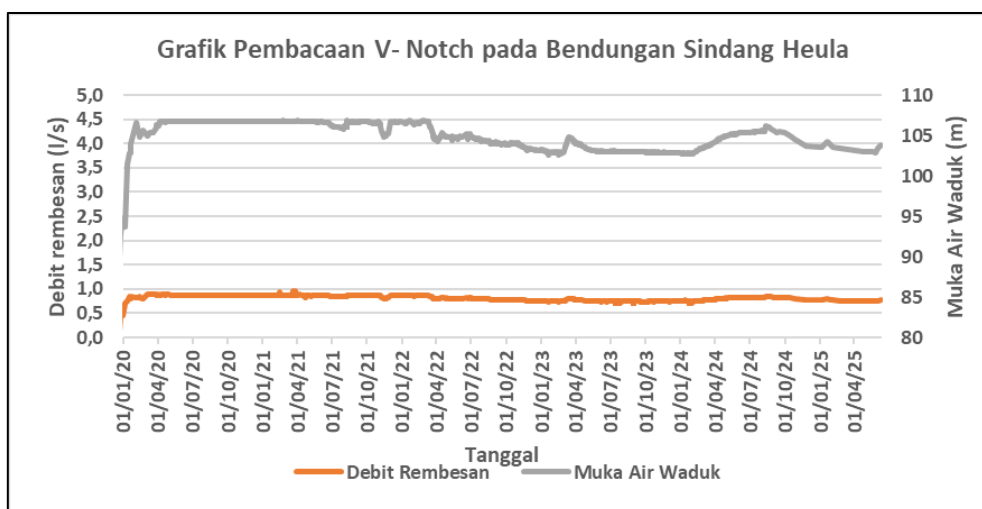
Berdasarkan analisis grafik pembacaan *V-Notch* rembesan pada Bendungan Sindang Heula, pengamatan menunjukkan pola rembesan yang bervariasi secara signifikan sepanjang periode Januari 2020 hingga Juni 2025. Data debit rembesan (orange) dan elevasi muka air waduk (abu-abu) menunjukkan korelasi yang kuat dengan pola curah hujan (hijau) tersebut. Fluktuasi rembesan ini mencerminkan respons hidrologi bendungan terhadap masukan air dari curah hujan yang diterjemahkan melalui peningkatan tinggi muka air. Pola ini mengkonfirmasi bahwa kontrol utama rembesan pada bendungan adalah elevasi muka air waduk, dimana tingkat rembesan meningkat dengan bertambahnya tekanan hidrostatik. Variabilitas debit rembesan yang terukur melalui *V-Notch* menunjukkan sistem drainase dan struktur bendungan masih berfungsi dengan baik dalam merespon perubahan kondisi hidrologi. Gambar 3 menampilkan grafik pembacaan *V-Notch* yang dipengaruhi oleh curah hujan.



Gambar 3. Grafik Pembacaan V- Notch yang Terpengaruh Curah Hujan.

Sedangkan, grafik pembacaan *V-Notch* tanpa pengaruh hujan di Bendungan

Sindang Heula ditunjukkan pada Gambar 4 sebagai berikut.



Gambar 4. Grafik Pembacaan V- Notch tanpa Pengaruh Curah Hujan.

Proses eliminasi data yang terpengaruh curah hujan pada pembacaan *V-Notch* dilakukan untuk memperoleh data rembesan yang lebih murni serta menghindari pembacaan yang keliru atau anomali. Setelah eliminasi tersebut, koefisien determinasi yang didapat

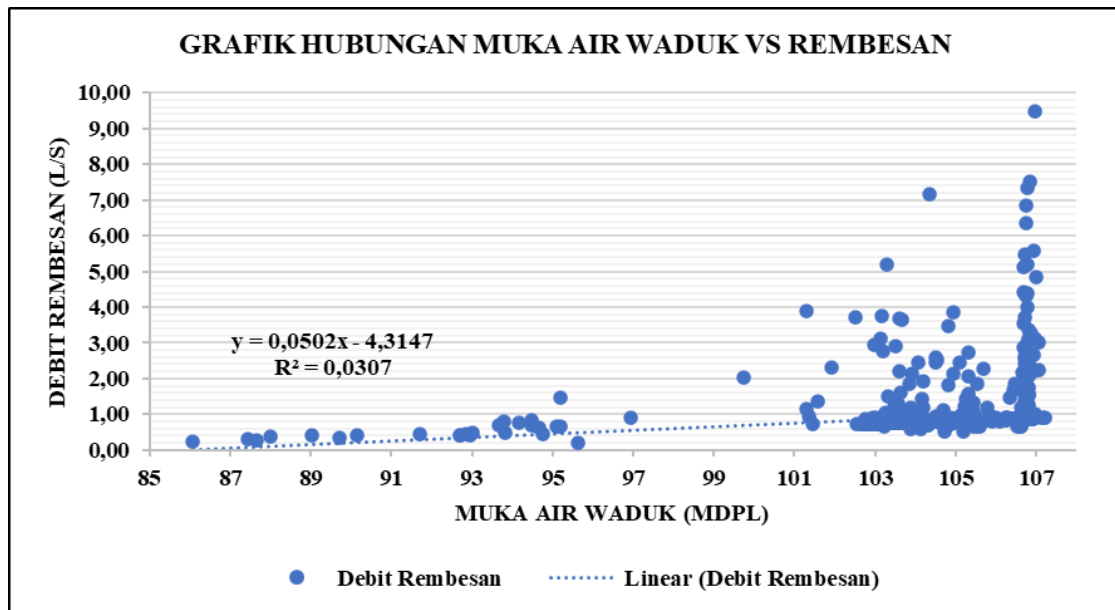
menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan hasil sebelum eliminasi, sehingga data yang telah dipilah lebih akurat merepresentasikan hubungan antara rembesan dan muka air waduk yang sesungguhnya (Sugiyono, 2017). Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan adanya

Analisis Rembesan Pada (Patra/ hal. 161-174)

peningkatan koefisien determinasi (R^2) hubungan muka air waduk dengan *V-Notch*, dari 0,0307 (sangat rendah) menjadi 0,9493 (sangat baik) yang menandakan perbaikan hubungan statistik antara rembesan dan muka air waduk setelah faktor curah hujan dihilangkan dari analisis. Dengan demikian, penghilangan efek curah hujan memainkan

peran penting dalam menghasilkan data yang lebih konsisten dan layak dilanjutkan ke analisis berikutnya.

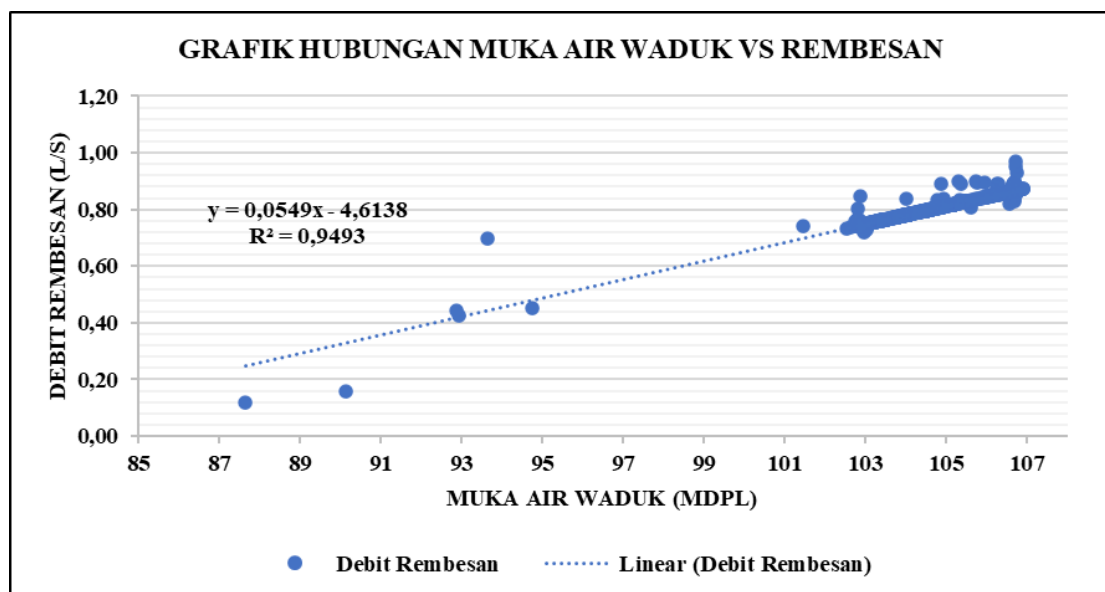
Grafik regresi linier pada *V-Notch* yang terpengaruh curah hujan ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 5. Grafik Regresi Linier pada *V-Notch* yang Terpengaruh Curah Hujan

Grafik regresi linier pada *V-Notch* tanpa terpengaruh curah hujan

ditunjukkan pada Gambar 5 sebagai berikut.



Gambar 6. Grafik Regresi Linier pada *V-Notch* tanpa Pengaruh Curah Hujan

Analisis Rembesan Pada (Patra/ hal. 1-14)

Fungsi regresi $y = 0,0549x - 4,6138$ yang diperoleh dari grafik pada Gambar 6 dapat dipakai untuk memperkirakan besarnya debit rembesan di muka air operasi rendah, normal dan maksimal pada bendungan. Sesuai kriteria penerimaan debit rembesan berdasarkan tinggi bendungan yang tertera pada Tabel 1,

dimana tinggi bendungan Sindang Heula (41 m) dan panjang 250 m masuk ke kategori lebih dari 40 m dengan nilai rembesan yang diizinkan kurang dari 0,28 liter/ menit/ meter dan tidak lebih dari 0,56 liter/ menit/ meter. Kriteria penerimaan debit rembesan Sindang Heula berdasarkan tinggi bendungan ditunjukkan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Kriteria Penerimaan Debit Rembesan Bendungan Sindang Heula berdasarkan Tinggi Bendungan

Muka Air Operasi	Elevasi (mdpl)	Debit (l/dtk)	Debit (l/min)	Debit dibagi panjang bendungan (l/min/m)	Keterangan
Rendah	86,613	0,140	8,396	0,034	Aman
Normal	106,613	1,238	74,258	0,275	Aman
Maksimal	108,613	1,347	80,844	0,323	Antara

Berdasarkan Tabel 2, kondisi keamanan Bendungan Sindang Heula menunjukkan variasi signifikan debit rembesan pada tiga elevasi operasi yang berbeda, di mana pada kondisi muka air rendah (86,613 mdpl) tercatat intensitas debit sebesar 0,034 l/min/m yang dikategorikan "aman", sedangkan pada elevasi normal (106,613 mdpl) intensitas debit meningkat menjadi 0,275 l/min/m yang masih tergolong "aman", kemudian pada kondisi muka air maksimal (108,613 mdpl) mencapai intensitas 0,323 l/min/m sehingga masuk kategori "antara" yang memerlukan pemantauan berkala, namun demikian klasifikasi "antara" tersebut masih dapat diterima secara teknis mengingat intensitas rembesan jauh berada di bawah ambang batas ketidakamanan maksimal 0,56 l/min/m yang ditetapkan untuk bendungan dengan tinggi lebih dari 40 meter sebagaimana ketinggian Sindang Heula yang mencapai 41,6 meter, sehingga kondisi rembesan tetap dalam batas toleransi teknis dan dapat dikendalikan melalui pemantauan rutin serta sistem drainase yang berfungsi optimal, dengan catatan bahwa kategori "antara" tetap dinyatakan aman untuk operasional

bendungan selama dilaksanakan pengawasan intensif terhadap V-Notch dan pola distribusi rembesan di sepanjang tubuh bendungan secara berkelanjutan.

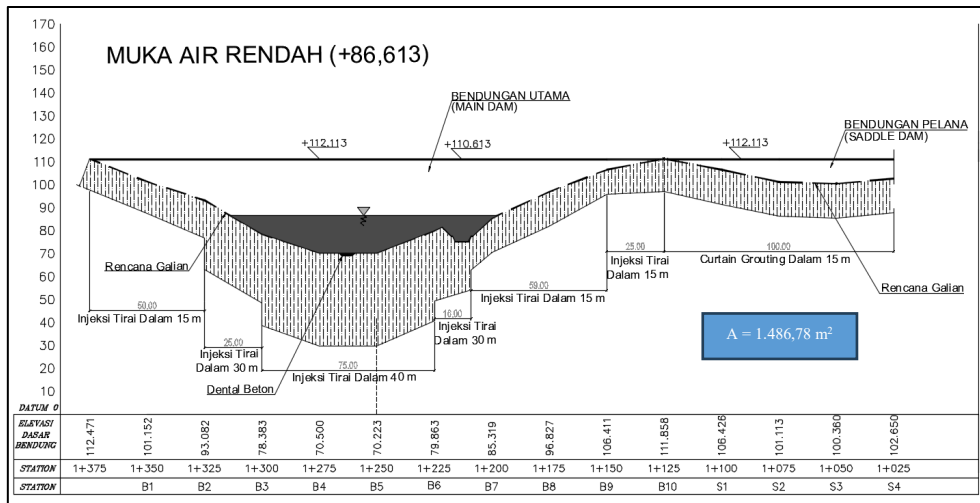
2. Evaluasi Debit Rembesan dengan Metode *Seepage Index*

Evaluasi debit rembesan menjadi langkah penting yang dilakukan setelah nilai prediksi rembesan pada kondisi muka air operasi diperoleh, dengan mengaplikasikan metode *Seepage Index* untuk menganalisisnya. Gradien hidraulik (i) dari hasil analisis sebelumnya mencapai 0,32 pada muka air rendah, 0,60 pada muka air normal dan 0,63 pada muka air maksimal (Patra dkk., 2025). Koefisien permeabilitas inti bendungan (k) diketahui sebesar $4,67 \times 10^{-8}$ m/detik dan luas penampang aliran (A) bervariasi bergantung pada kondisi elevasi air: 1.486,78 m² pada muka air rendah, 4.587,59 m² pada muka air normal, dan 4.843,51 m² pada muka air maksimal. Data luas penampang aliran tersebut diukur dengan memanfaatkan fungsi *list* pada *software AutoCAD* untuk memastikan akurasi pengukuran geometris. Gambar 7 hingga Gambar 9 menampilkan

Analisis Rembesan Pada (Patra/ hal. 161-174)

luas aliran penampang (A) dari tiap muka air operasi.

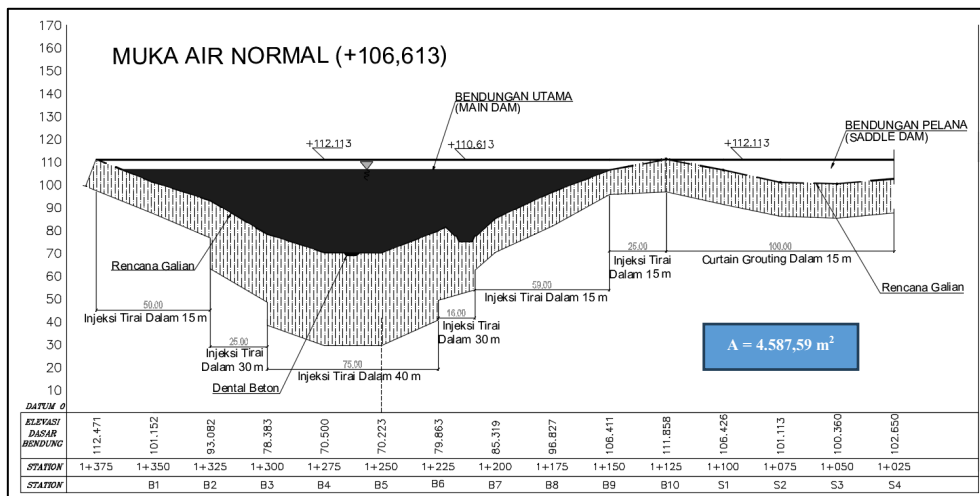
Gambar 7 menunjukkan luas penampang aliran pada muka air rendah.



Gambar 7. Luas Penampang Aliran pada Muka Air Rendah (+86,613 mdpl)

Berikutnya, luas penampang aliran pada muka air normal ditunjukkan

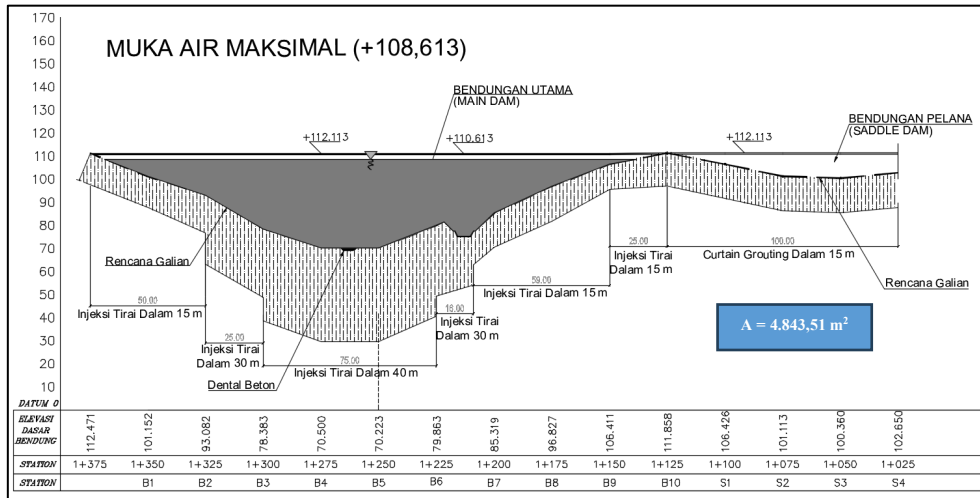
pada Gambar 8 sebagai berikut.



Gambar 8. Luas Penampang Aliran pada Muka Air Normal (+106,613 mdpl)

Sedangkan, luas penampang aliran pada muka air normal ditunjukkan

pada Gambar 9 sebagai berikut.



Gambar 9. Luas Penampang Aliran pada Muka Air Maksimal (+108,613 mdpl)

Hal selanjutnya yang dilakukan adalah menghitung nilai *Seepage Index* dari tiap muka air operasi dengan menggunakan

Persamaan 1. Rekapitulasi perhitungan ditunjukkan pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Rekapitulasi Perhitungan *Seepage Index* pada Bendungan Sindang Heula

Muka Air Waduk (mdpl)	Debit Rembesan q (ltr/dtk/m)	Luas Penampang Aliran A (m ²)	Koefisien Permeabilitas k (m/dtk)	Gradien Hidraulik i	<i>Seepage Index</i> QI	Keterangan
86,613	0,00056	1.486,78	$4,67 \times 10^{-8}$	0,32	0,025	aman
106,613	0,00496	4.587,59	$4,67 \times 10^{-8}$	0,60	0,039	aman
108,613	0,00600	4.843,51	$4,67 \times 10^{-8}$	0,63	0,042	aman

Nilai *Seepage Index* (QI) yang dihasilkan dari Tabel 3 seluruhnya masih berada pada kisaran sangat kecil sehingga aliran rembesan yang terjadi relatif rendah dan tidak berpotensi menimbulkan piping maupun instabilitas internal, apalagi dengan koefisien permeabilitas bendungan yang konstan sangat kecil $4,67 \times 10^{-8}$ m/dtk dan gradien hidraulik 0,32–0,63 yang masih di bawah batas kritis, sehingga dapat diinterpretasikan bahwa kondisi rembesan Bendungan Sindang Heula pada saat operasi dinilai aman untuk ketiga variasi muka air tersebut. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa perubahan elevasi muka air waduk menyebabkan peningkatan

QI yang sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya di beberapa bendungan lain yaitu di Bendungan Kedung Ombo yang menunjukkan peningkatan nilai QI dari 0,09 pada elevasi reservoir 80 mdpl menjadi 0,21 pada elevasi 91,08 mdpl (Buldan dkk., 2021) dan di Bendungan Jatibarang (Indonesia) yang menunjukkan peningkatan nilai QI dari 0,362 pada elevasi reservoir 149,61 mdpl menjadi 0,470 pada elevasi 151,76 mdpl (Setyadi dkk., 2023).

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa Bendungan Sindang Heula berada dalam

Analisis Rembesan Pada (Patra/ hal. 161-174)

kondisi aman dari ancaman rembesan. Berdasarkan kriteria penerimaan tinggi bendungan (ketinggian > 40 m), pada kondisi muka air rendah hingga maksimal debit rembesan terjadi pada 0,034, 0,275 dan 0,323 liter/menit/meter. Evaluasi menggunakan metode *Seepage Index* menunjukkan nilai QI sebesar 0,025 pada muka air rendah, 0,039 pada kondisi muka air normal dan 0,042 pada kondisi muka air maksimal, jauh di bawah ambang kritis (QI < 1), mengindikasikan struktur bendungan memiliki integritas baik dan kemampuan optimal dalam menahan tekanan hidrostatik tanpa risiko erosi internal atau *piping*.

Saran yang direkomendasikan dari penelitian ini ditujukan kepada berbagai pihak yang berkepentingan. Pengelola bendungan sebaiknya melanjutkan pemantauan rutin pembacaan *V-Notch* dengan interval konsisten untuk mendeteksi dini perubahan perilaku rembesan yang tidak normal. Penulis dapat mengembangkan analisis lebih lanjut dengan metode numerik dan mempertimbangkan faktor-faktor tambahan seperti konsolidasi dan curah hujan ekstrem. Pembuat kebijakan diusulkan melakukan audit keselamatan bendungan secara berkala untuk menjamin keandalan operasional bendungan dalam jangka panjang dan mendukung fungsinya secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Alamudi, W. F., Nurtjahjaningtyas, I., dan Wicaksono, L. A. (2025). Stability Analysis of Replacement Material in Dam Body at Meninting Dam. *Rekayasa Sipil*, 19(1), 39–47.

Bashar, N. A. M., Zainol, M. R. R. M. A., Aziz, M. S. A., Mazlan, A. Z. A., Zawawi, M. H., dan Manan, T. S. A. (2025). Comprehensive Review on Sustainable Dam Infrastructure: Issues and Challenges, Factors Causing Dam Failure and Future Direction in a

Globally Changing Climate. *Pertanika Journals Science & Technology*, 33(3), 1387–1412.

BBWS Cidanau Ciujung Cidurian. (2018). *As Built Drawing Pembangunan Bendungan Sindang Heula, Kab. Serang, Prov. Banten*.

Buldan, R., Suharyanto, Najib, dan Sadono, K. W. (2021). Analisis Rembesan terhadap Keamanan Bendungan Kedung Ombo di Grobogan Jawa Tengah. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 12(2), 79-92.

Chi, F., Carvajal, C., Breul, P., dan Peyras, L. (2025). Reliability Analysis of Backward Erosion Piping in an Embankment Dam Considering the Spatial Variability of Soil Properties. *Scientific Reports*, 15(1), 23974.

Fu, B., Pei, J., dan Ji, H. (2024). Numerical simulation of three-dimensional seepage field in a tailing pond under multiple operating conditions. *Scientific Reports*, 14(28027), 1-17.

Heitland, J dan Donaghy, H. (2021). *Seepage and Stability Modeling Guidance for Embankment Dams*. Denver: AECOM.

Khairiyah, M., Agoes, H. F., dan Hayati, F. (2025). Penilaian Kinerja Fisik Sungai Pahari sebagai Upaya Perbaikan Badan Sungai. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 66-75.

Kuntjoro, Aryananda, B., dan Khoiri, M. (2023). Seepage Analysis on the Embankment Body Zonal Type Dam in Bagong East Java Indonesia. *International Journal of Research - GRANTHAALAYAH*, 11(12), 32-43.

Liang, L., Tian, D., dan Li, Z. (2024). Internal Erosion Process and its Influence Factors in Widely Graded Loose Soils Due to Rainfall Infiltration. *Frontiers in Earth Science*, 12.

- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London: Taylor & Francis.
- Melani, A., Yusup, M. I., Sari, F. A., dan Ariwi, N. P. (2024). Analisis Rembesan dan Stabilitas Bendungan Margatiga dengan Metode Elemen Hingga Model 2D Menggunakan Software Plaxis CE V20. *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, 6(2), 172–184.
- Nurnawaty, Suhardiman, dan Ihwan. (2018). Analisis Rembesan pada Bendungan Tipe Urugan. *Jurnal Teknik Hidro*, 11(1), 12-22.
- Patra, F. M., Suharyanto, dan Sukamta. (2025). Integrated of Pore Water Pressure, Hydraulic Gradient and Time Lag for Early Warning System at Sindang Heula Dam. *UKaRsT*, 9(2), 122–137.
- Peirson, W. L., dan Fell, R. (2025). Downstream Filter Control of Flow in Cracks in Embankment Dam Cores. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 30, 1–21.
- Putri, F. L., Listiawan, Y., dan Hendarmawan. (2024). Volumetrik Rembesan dalam Perencanaan Pembangunan Tubuh Bendungan Kolam Retensi X (Studi Kasus: Das Sanggai, IKN). *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 22(2), 173–182.
- Setyadi, A., Suharyanto, dan Edhisono, S. (2023). Analisis Respon Tekanan Air Pori terhadap Muka Air Waduk pada Bendungan Jatibarang. *BENTANG: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 11(1), .
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Bandung: CV. Alfabeta Bandung.
- Tran, D. Q., Nishimura, S., Senge, M., dan Nishiyama, T. (2020). Risk of Embankment Dam Failure from Viewpoint of Hydraulic Fracturing: Statistics, Mechanism, and Measures. *Reviews in Agricultural Science*, 8, 216-229.
- Yoshida, H., Nakashima, K., dan Kawai, K. (2025). Effects of Heterogeneous Spatial Permeability of River Embankments on Seepage Behavior. *International Journal of GEOMATE*, 28(129), 97–104.
- Yun, T., Butler, K. E., dan MacQuarrie, K. T. B. (2023). Investigation of Seepage Near the Interface Between an Embankment Dam and A Concrete Structure: Monitoring and Modelling of Seasonal Temperature Trends. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(4), 453–470.
- Zhang, C., Qin, M., Hong, L., dan Qi, Y. (2025). Seepage and Stability Analysis of Fractured Soil Slope Considering Permeability Anisotropy. *Scientific Reports*, 15(11059), 1-11.