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

ANALISIS REMBESAN BENDUNGAN KARIAN MENGGUNAKAN PIEZOMETER DAN V-NOTCH PADA FASE *IMPOUNDING*

FAUJI ROHMAN[1*], SRI SANGKAWATI SACHRO[2], HARI NUGROHO[3]

[1] *Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah*
[2] *Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah*
[3] *Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Jawa Tengah*

[*] *Corresponding Author: faujirlasmono@students.undip.ac.id*

Naskah diterima: 20 November 2025. Disetujui: 23 Desember 2025. Diterbitkan: 31 Desember 2025

ABSTRAK

Infiltrasi air melalui tubuh serta fondasi bendungan merupakan penyebab utama keruntuhan struktur hidraulik dengan kontribusi global mencapai 43 persen. Studi ini meneliti karakteristik aliran air bawah tanah di Bendungan Karian selama fase pengisian awal waduk, mulai September 2023 hingga Mei 2025. Pendekatan penelitian mengombinasikan pengukuran debit secara langsung menggunakan ambang *V-notch triangular weir* dan analisis tekanan air pori melalui data *vibrating wire piezometer*. Proses seleksi data diterapkan untuk meniadakan pengaruh aliran permukaan akibat curah hujan. Hasilnya menunjukkan korelasi eksponensial tinggi (R = 0.9428) antara ketinggian muka air dengan debit keluar sistem drainase *toe*, mengikuti persamaan y = 0.1852x - 4.425. Debit *v-notch* meningkat dari 1.40 menjadi 8.04 liter/detik sepanjang periode pengamatan. Analisis spasial piezometer memperlihatkan variasi tekanan air di zona inti dengan koefisien korelasi 0.3817–0.9611 bergantung elevasi dan lokasi. Validasi silang antara pengukuran langsung dan estimasi gradien hidrolik menghasilkan R = 0.9184, menegaskan kesesuaian antarperangkat. Secara keseluruhan, kondisi hidraulik Bendungan Karian masih aman namun sistem drainase memerlukan optimalisasi serta pemantauan lanjutan hingga tercapai kestabilan aliran penuh.

Kata kunci : Bendungan Karian, Infiltrasi air, Piezometer, Ambang v-notch, Tahap pengisian

1. PENDAHULUAN

Kegagalan struktur bendungan merupakan peristiwa katastrofik dengan dampak sosio-ekonomi yang sangat serius bagi komunitas di area hilir. Infiltrasi air melalui media tanah penyusun tubuh dan pondasi bendungan konsisten tercatat sebagai mekanisme utama yang menyebabkan kehancuran struktur, dengan kontribusi mencapai 43 persen dari seluruh insiden kegagalan bendungan yang terdokumentasi di berbagai belahan dunia (Azdan & Samekto, 2008). Survei inventarisasi oleh Komisi Keamanan Bendungan Indonesia terhadap 122 struktur bendungan urugan mengidentifikasi bahwa sekitar 20 persen dari

bendungan tersebut menghadapi potensi risiko nyata terkait dengan perilaku aliran air bawah tanah yang tidak terkontrol (Wulandari & Tjandra, 2018).

Pergerakan air dalam media tanah mengikuti prinsip dasar Hukum Darcy yang menyatakan kecepatan aliran berbanding lurus dengan gradien tekanan hidrostatis dan koefisien permeabilitas material (Nurnawaty et al., 2018). Istilah permeabilitas mengacu pada kemampuan material tanah untuk menghantarkan air, sementara gradien tekanan merefleksikan perbedaan energi potensial antar lokasi dalam medium berpori yang dipengaruhi oleh ketinggian muka air dan kondisi geometri lapisan tanah (Huda et al., 2019). Faktor-faktor determinan yang mengkendalikan perilaku aliran meliputi granulometri butiran, mineralogi komponen *clay*, kadar kepadatan konstruksi, dan heterogenitas permeabilitas diferensial antar zona struktur.

Pengukuran tekanan air pori dengan piezometer memberikan data spasial dan temporal tentang distribusi tekanan hidrostatis, dimana hasil pembacaan terdiri dari tekanan *transducer* dan elevasi sensor (Adamo et al., 2020). Piezometer elektrik dengan teknologi *vibrating wire* mendukung akuisisi dan transmisi data otomatis serta monitoring terintegrasi, walaupun membutuhkan investasi awal dan catu daya yang memadai (Setiawan & Sriyana, 2022). Penempatan piezometer di area transisi berlapis material berbeda memungkinkan deteksi dini anomali aliran yang dapat menjadi indikasi awal potensi kegagalan struktur.

Pengisian awal waduk merupakan fase kritis dalam operasi bendungan. Pada fase ini, zona inti mengalami pembebanan hidrostatik dan proses konsolidasi dengan disipasi tekanan air pori berlebih. Proses ini membutuhkan waktu signifikan hingga zona inti mencapai kondisi *steady-state*. Bendungan Karkheh memerlukan lebih dari 45 hari untuk mencapai kondisi stabil karena material lempung berpermeabilitas rendah dengan konduktivitas hidrolik $1{,}89 \times 10^{-8}$ m/s (Gholami et al., 2011). Rembesan adalah parameter kritis dalam desain bendungan karena 30% kegagalan disebabkan rembesan tidak terkendali, sehingga perbedaan permeabilitas antar zona inti, transisi, dan *shell* sangat menentukan pola aliran dan gradien hidrolik (Mostafa & Zhenzhong, 2021). Secara numerik, zona inti trapesium mampu mengurangi debit rembesan dan menurunkan garis freatik sisi hilir hingga 45% lebih efektif daripada inti vertikal karena jalur aliran yang lebih panjang dan *head loss* lebih besar melalui material impermeabel (Abdel-Kawy et al., 2021). Implikasi desain ini menunjukkan bahwa konfigurasi geometris zona inti dapat dioptimalkan untuk meminimalkan debit rembesan pada kondisi muka air normal.

Erosi internal bendungan urugan terdiri atas empat fase, yaitu inisiasi, berlanjut, progresi, dan keruntuhan; pada dua fase awal, piezometer sangat penting untuk mendeteksi perubahan tekanan air abnormal yang menandakan terbentuknya jalur rembesan preferensial atau kerusakan filter (FEMA, 2015). Persamaan empiris regresi non-linear dapat digunakan sebagai alternatif sederhana untuk analisis numerik, dengan validasi menunjukkan korelasi sangat tinggi pada prediksi debit rembesan (R^2 = 97,3%) dan kedalaman freatik keluar (R^2 = 89,5%) berdasarkan analisis 200 model bendungan (Kidder & Behaya, 2025).

Korelasi antara debit rembesan dan elevasi muka air waduk pada Bendungan Benel awalnya lemah (r = 0,2296), namun menjadi sangat kuat (r = 0,9514) setelah koreksi pengaruh hujan dan *time-lag* per tahun dilakukan (Ardiansyah & Sriyana, 2021). Kondisi rapid *drawdown* pada bendungan urugan dapat meningkatkan tekanan pori di hulu dan menurunkan faktor keamanan lereng secara signifikan, karena penurunan muka air lebih cepat dari disipasi

tekanan dalam zona inti berpermeabilitas rendah (Brandon, 2018). Fenomena ini dapat menyebabkan gradien hidrolik terbalik dan penurunan kekuatan geser lereng hulu, serta memicu erosi internal berupa *piping* melalui mekanisme *suffusion*, *concentrated leak*, dan *backward erosion*, dimana erosi internal menyumbang sekitar 43-46% dari kegagalan bendungan urugan di dunia (Putra et al., 2022). *Piping* akibat erosi internal merupakan penyebab utama kegagalan bendungan urugan dengan kontribusi mencapai 43-46 persen dari total kegagalan bendungan di seluruh dunia.

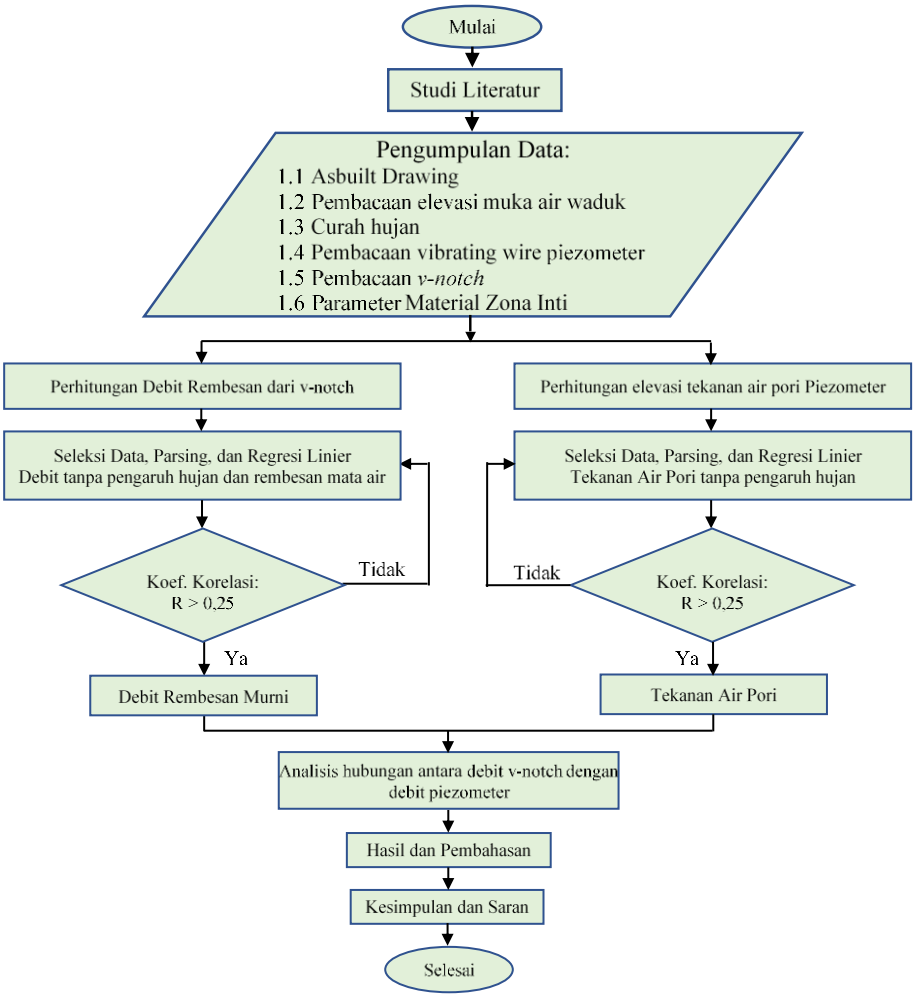
Bendungan Karian adalah bendungan urugan zonal dengan inti kedap air berbahan tanah lempung, memiliki koefisien permeabilitas $1{,}89 \times 10^{-8}$ m/s. Material inti ditempatkan pada kadar air lebih tinggi dari spesifikasi rencana, sehingga perilaku aliran transien selama pengisian waduk (September 2023–Mei 2025) dapat diamati saat terjadi perubahan gradien tekanan akibat fluktuasi tinggi muka air waduk. Risalah sidang teknis Komisi Keamanan Bendungan mencatat potensi debit rembesan fondasi mencapai 10 liter/detik serta gangguan teknis pada sistem pengukuran *v-notch* selama periode konstruksi. Konteks ini memotivasi penyelidikan menyeluruh terhadap pola hubungan antara ketiga variabel utama (elevasi waduk, debit keluar, tekanan air pori) menggunakan dataset terintegrasi dari dua sistem instrumentasi yang saling independen.

Rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu, menentukan hubungan antara elevasi muka air waduk dan debit rembesan *v-notch* di Bendungan Karian, menilai korelasi antara kenaikan muka air waduk dan respons tekanan air pori pada piezometer, dan menganalisis keterkaitan antara debit rembesan hasil pembacaan piezometer dan debit rembesan aktual dari *v-notch* selama tahap *impounding.*

Penelitian ini dimaksudkan untuk menganalisis korelasi antara elevasi muka air waduk dengan tekanan air pori dan debit rembesan yang melewati tubuh Bendungan Karian, serta mengevaluasi pengaruh perubahan muka air terhadap debit rembesan. Tujuan penelitian meliputi, menentukan debit rembesan tubuh bendungan berdasarkan data *v-notch* pada *toe drain*, menentukan tekanan air pori dan debit rembesan melalui zona inti menggunakan data *vibrating wire piezometer*, dan mengevaluasi hubungan antara data debit rembesan hasil piezometer dan hasil pengukuran aktual *v-notch* pada Bendungan Karian.

2. METODE PENELITIAN

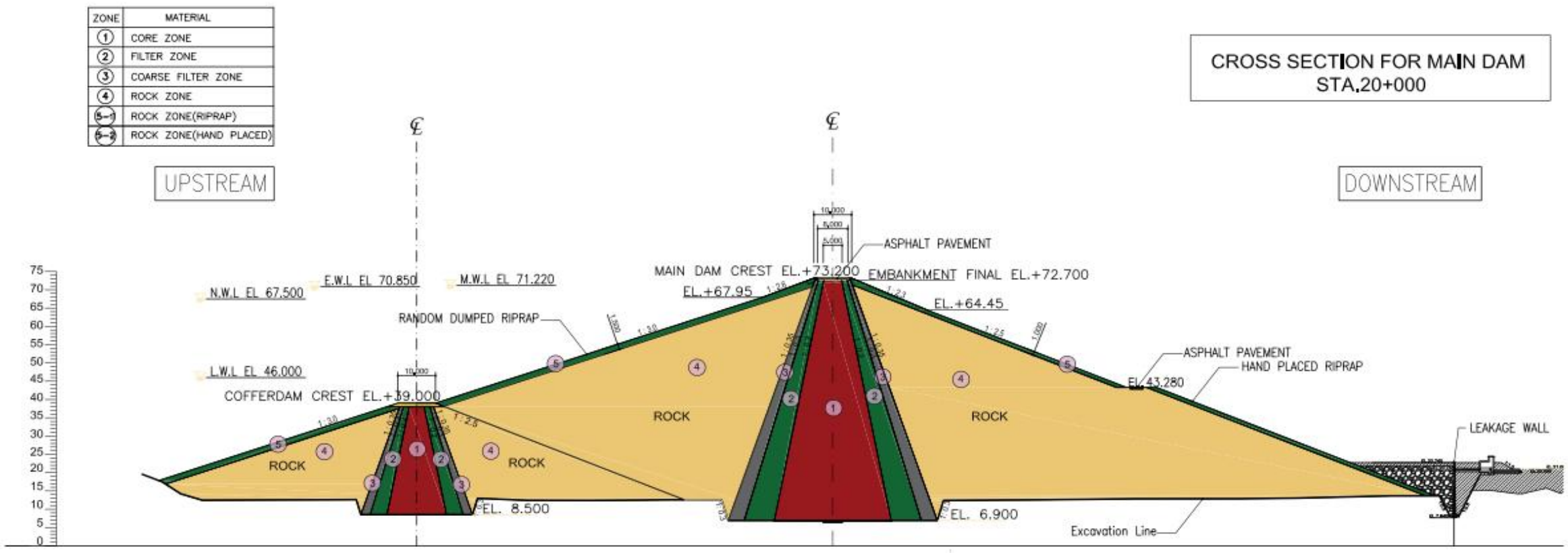
Penelitian ini mengadopsi pendekatan empiris-analitik dengan mengintegrasikan pengukuran lapangan insitu dengan perhitungan berbasis teori medan aliran. Data primer bersumber dari sistem instrumentasi permanen yang terpasang pada struktur bendungan, meliputi pembacaan harian v-notch untuk aliran toe drain, pembacaan piezometer untuk tekanan air pori, dan rekaman ketinggian muka air waduk dari alat pencatat otomatis. Periode pengamatan mencakup dua puluh bulan mulai fase awal pengisian hingga pencapaian ketinggian operasional menengah. Data sekunder diperoleh dari dokumentasi proyek meliputi parameter geoteknik material inti dan hasil penyelidikan geoteknik mendalam pada lokasi fondasi. Sumber data curah hujan berasal dari stasiun meteorologi terdekat untuk keperluan koreksi data. Adapun bagan alir penelitian analisis rembesan pada Bendungan Karian dengan menggunakan data instrumen Piezometer dan V-notch pada fase pengisian awal waduk (impounding) dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

2.1. Lokasi Instrumentasi

Sistem V-notch dengan sudut puncak 90 derajat dipasang pada saluran koleksi toe drain di bagian hilir bendungan untuk mengukur seluruh debit aliran air keluar. Sepuluh unit dari dua puluh enam vibrating wire piezometer terpasang di lokasi strategis mencakup: dua unit pada zona fondasi (FP2 dan FP3) pada elevasi -8.10 m, dua unit pada elevasi +10 m (P6 dan P8), dua unit pada elevasi +30 m (P11 dan P13), dua unit pada elevasi +45 m (P16 dan P18), dan dua unit pada elevasi +60 m (P20 dan P22). Penempatan ini dirancang untuk mengkalibrasi evolusi tekanan vertikal dari zona terdalaman hingga zona transisi. Ilustrasi Perletakan Piezometer pada tubuh Bendungan Karian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Ilustrasi Lokasi Titik Instrumentasi pada Penampang Melintang Bendungan Karian

Pembacaan instrumentasi dilakukan secara kontinyu menggunakan sistem akuisisi data otomatis dengan interval harian. Preprocessing data melibatkan dua tahap kritis. Pertama, seleksi data pada kondisi tanpa hujan untuk mengeliminasi aliran permukaan. Kedua, aplikasi teknik parsing untuk mengakomodasi fenomena lag time, yaitu keterlambatan propagasi tekanan melalui medium berpori berpermeabilitas rendah. Lag time ini dapat mencapai beberapa hari bergantung pada jarak radial dari titik piezometer ke sumber tekanan. V-notch triangular weir telah menjadi metode standar pengukuran debit rembesan karena kesederhanaan konstruksi, biaya pemeliharaan rendah, dan sensitivitas tinggi terhadap fluktuasi debit kecil pada rentang operasi 10-300 liter per detik (Lee et al., 2018). Formula klasik perhitungan debit melalui ambang v-notch dengan sudut puncak 90° sesuai dengan Persamaan 1.

$$Q = 1.417 \cdot \left(\frac{h}{100}\right)^{\frac{5}{2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

dimana Q adalah debit volumetrik (m³/s) dan h adalah tinggi muka air v-notch weir (cm), dengan konstanta empiris 1.417 bervariasi tergantung faktor geometri spesifik dan kondisi aliran setempat (Siswanto et al., 2019).

2.2. Metode Analisis Regresi

Analisis regresi linier digunakan untuk tiga hubungan utama: muka waduk terhadap debit v-notch, muka waduk terhadap tekanan piezometer, dan debit piezometer terhadap debit v-notch, dengan penilaian kekuatan korelasi mengacu pada skala interpretasi kekuatan korelasi mengacu pada klasifikasi (Sugiyono, 2013), sesuai dengan Tabel 1.

Tabel 1 Koefisien korelasi

Nilai	Koefisien Korelasi
0,00	Tidak berkolerasi
0,00 - 0,25	Sangat lemah
0,25 - 0,50	cukup
0,50 - 0,75	kuat
0,75 – 0,99	Sangat kuat
1	Berkorelasi sempurna

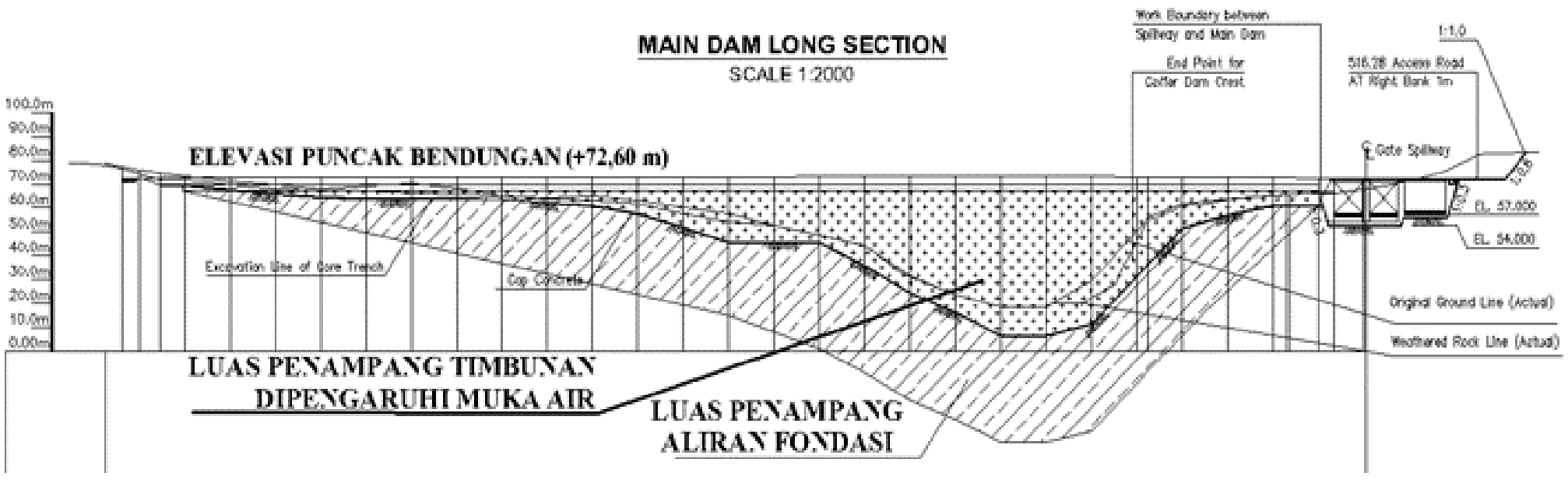
2.3. Estimasi Debit Berbasis Gradien Hidrolik

Debit rembesan yang melewati zona inti dan fondasi dihitung menggunakan persamaan Hukum Darcy seperti pada Persamaan 2

$$Q = k \times i \times A \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots. (2)$$

di mana: Q = debit aliran (m^3/s); k = koefisien permeabilitas material (m/s); i = gradien hidrolik dimensi nol ($\Delta H/L$); A = luas penampang aliran (m^2).

Gradien hidrolik ditentukan dari selisih head tekanan terukur antara pasangan piezometer yang dipasang sejajar pada jarak lateral tertentu, dibagi dengan spacing horizontal antar piezometer. Luas penampang aliran dievaluasi berdasarkan geometri tubuh bendungan dan lokasi piezometer sesuai dengan Gambar 3.



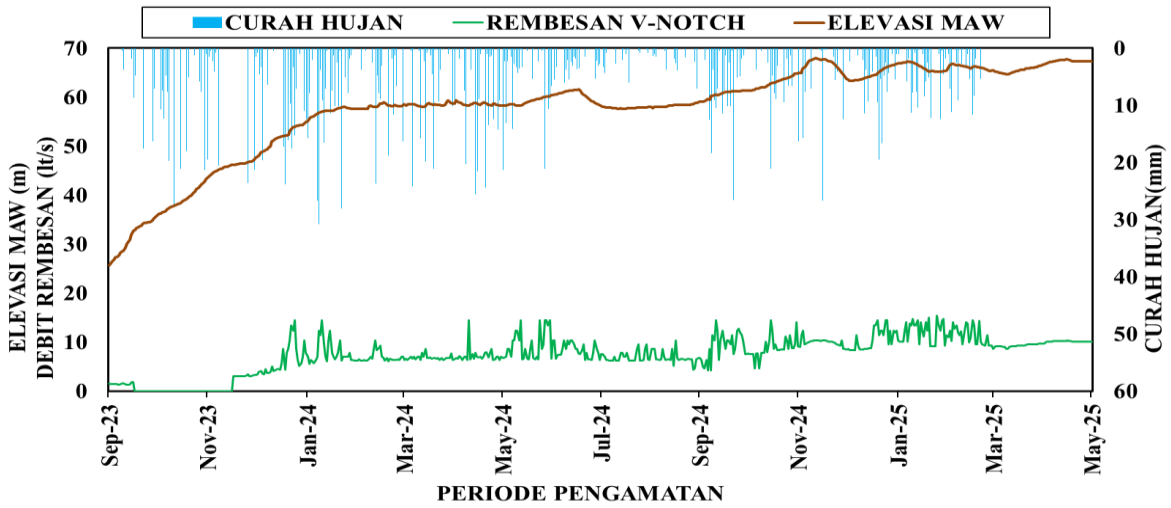
Gambar 3. Luas Seksi Memanjang Tubuh Bendungan dan Grouting Fondasi Bendungan Karian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data *v-notch* dan piezometer dianalisis hanya pada hari tanpa hujan untuk memastikan rembesan berasal dari *reservoir*, dengan data terpengaruh hujan dipisahkan melalui parsing, dan hubungan antar variabel diuji dengan regresi linier (Sugiyono, 2013).

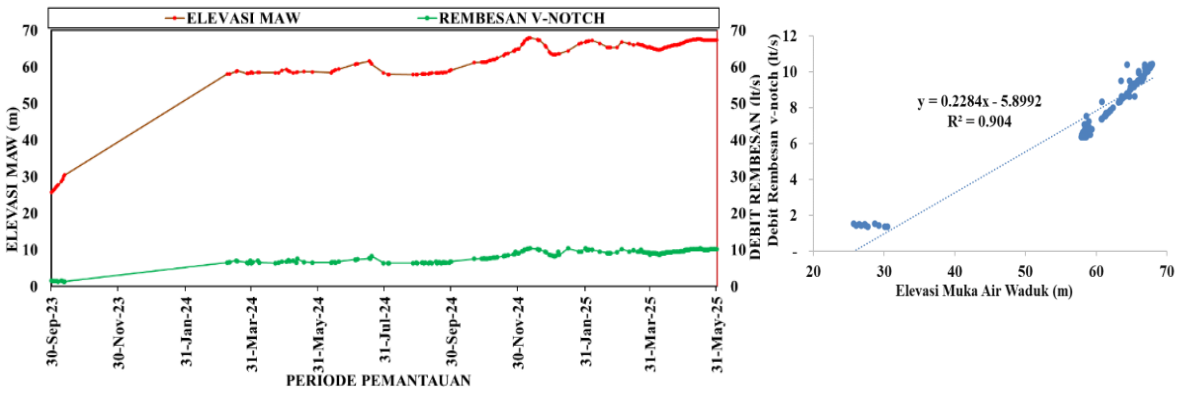
3.1. Analisis Debit Rembesan Berdasarkan Data Instrumen V-Notch

Analisis debit rembesan Bendungan Karian menggunakan instrumen *v-notch* dilakukan dengan menyeleksi data pada periode tanpa curah hujan untuk mendapatkan angka rembesan murni dari *reservoir*. Meskipun hanya satu unit *v-notch* yang berfungsi dan drainase belum optimal, data debit yang telah disesuaikan dengan pengaruh elevasi muka air waduk dan curah hujan dianalisis menggunakan regresi linier, sehingga diperoleh persamaan korelasi antara elevasi muka air dan debit rembesan selama fase *impounding*. Pertama dilakukan analisis intergrasi antara nilai debit dari *v-notch* dengan elevasi muka air waduk dan data curah hujan untuk kuantifikasi besaran rembesan dari tubuh bendungan seperti dapat dilihat pada Gambar 4.



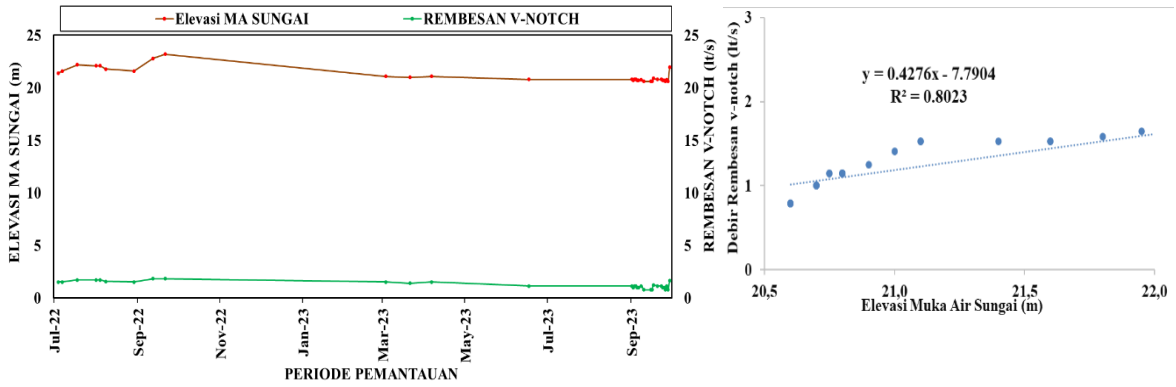
Gambar 4. *Plotting* Elevasi Muka Air Waduk, Debit V-Notch, dan Curah Hujan pada Bendungan Karian

Data debit *v-notch* yang telah diseleksi tanpa pengaruh hujan dan dilakukan regresi linier untuk memperoleh persamaan korelasi antara elevasi muka air waduk dan debit rembesan pada bendungan selama fase *impounding* yaitu dari Tanggal 30 September 2023 hingga 31 Mei 2025. Hasil *plotting* dan analisis regresi pada tahapan *impounding* disajikan pada Gambar 5. Sehingga diperoleh nilai regresi (R) sebesar 0,904 dengan kriteria hubungan sangat kuat. Untuk mencari debit rembesan murni tanpa pengaruh rembesan dari mata air maka akan dicari debit rembesan tanpa pengaruh kenaikan muka air waduk yang tercatat sebelum pelaksanaan *impounding*.



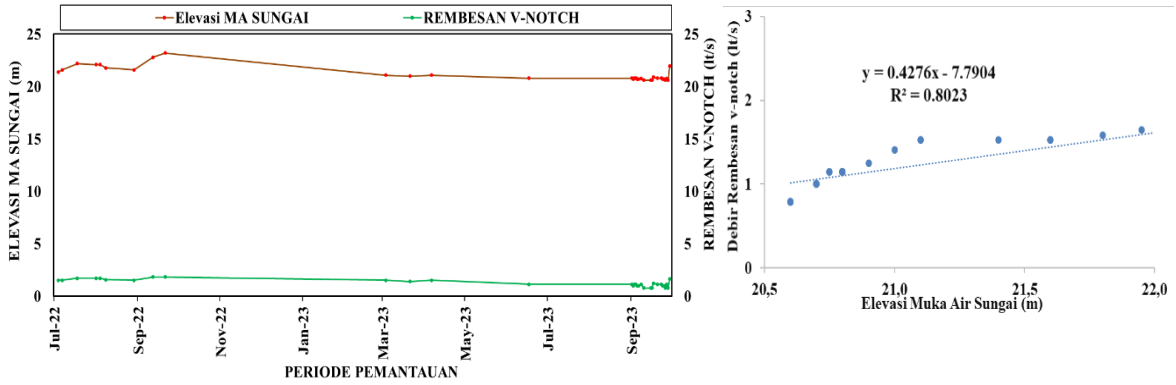
Gambar 5. *Plotting* Elevasi Muka Air Waduk dan Debit *V-Notch* tanpa Pengaruh Hujan serta Regresinya

Analisis korelasi terhadap hubungan elevasi muka air dan debit rembesan tanpa pengaruh muka air waduk diperoleh nilai regresi (R) sebesar 0,8023 dengan kriteria hubungan sangat kuat dengan debit rembesan (y) dan elevasi muka air sungai (x) adalah 0,4276(x)-7.7904 seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. *Plotting* Elevasi Muka Air Sungai dan Debit V-Notch tanpa Pengaruh Hujan serta Regresinya

Berdasarkan analisis korelasi dan beberapa pendekatan diatas diperoleh nilai hubungan antara elevasi muka air waduk dengan debit rembesan aktual pada bendungan tahapan impounding (Tanggal 30 september 2023 sampai dengan 31 Mei 2025). Data v-notch yang telah melalui proses seleksi dan parsing tanpa pengaruh hujan diplot terhadap elevasi muka waduk selama dua puluh bulan pengamatan seperti dilihat pada Gambar 7.

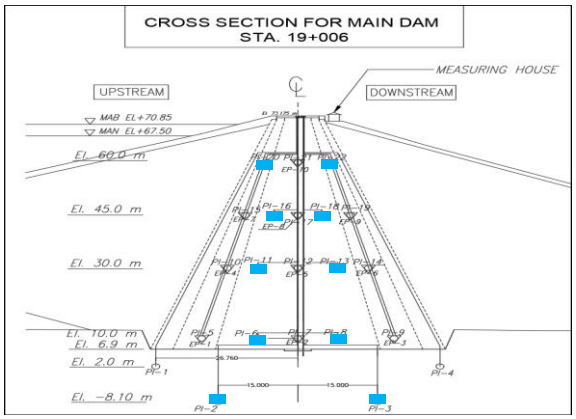


Gambar 7. *Plotting* Elevasi Muka Air Waduk dan Debit V-Notch aktual serta Regresinya

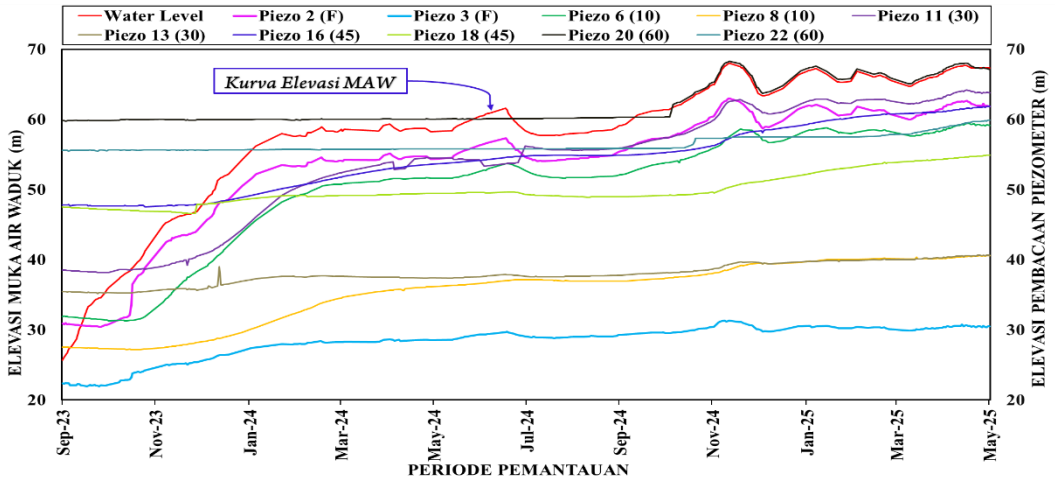
Analisis regresi linier menghasilkan persamaan y = 0,1852x - 4,425 dengan koefisien determinasi R^2 = 0,9428. Hasil ini menunjukkan bahwa 94,28% variabilitas debit dapat dijelaskan oleh kenaikan elevasi waduk. Nilai R yang mendekati kesempurnaan ini mengkonfirmasi stabilitas hubungan linier dan validitas model prediktif untuk aplikasi operasional. Interpretasi fisik dari *slope* regresi sebesar 0.1852 berarti setiap kenaikan elevasi muka waduk sebesar satu meter mengakibatkan peningkatan debit keluar sebesar 0.1852 liter/detik. *Intercept* negatif (-4.425 liter/detik) mencerminkan komponen debit *baseline* yang berasal dari mata air natural dan rembesan fondasi yang independen dari fluktuasi ketinggian waduk. Debit dari fase pengamatan menunjukkan tren monoton meningkat dari 1.40 liter/detik pada bulan pertama (Oktober 2023) hingga 8.04 liter/detik pada bulan terakhir (Mei 2025), mengikuti lintasan yang dikoreografikan oleh program pengisian bertahap.

3.2. Analisis Tekanan Pori Instrumen Piezometer

Pengamatan tekanan air pori melalui Piezometer pada tubuh bendungan dilakukan dengan cara memasangkan hasil pembacaan piezometer selama periode impounding terhadap elevasi muka air waduk, kemudian dilakukan regresi untuk mendapatkan nilai korelasi antara elevasi muka air waduk dengan nilai tekanan air pori pada masing-masing piezometer yang diamati. Data pencatatan piezometer yang dipakai dalam analisis ini adalah data pencatatan Piezometer selama periode impounding yaitu dari 30 September 2023 sampai dengan 1 Mei 2025 pada beberapa piezometer yang terdapat di zona fondasi, zona inti, dan zona transisi (FP2, FP3, P6, P8, P11, P13, P16, P18, P20, dan P22). Layout pemasangan piezometer pada tubuh bendungan dilihat dari potongan melintang tubuh bendungan ditampilkan pada Gambar 8. Hasil pembacaan piezometer selama masa impounding dipasangkan dengan data kenaikan muka air waduk ditampilkan pada Gambar 9.

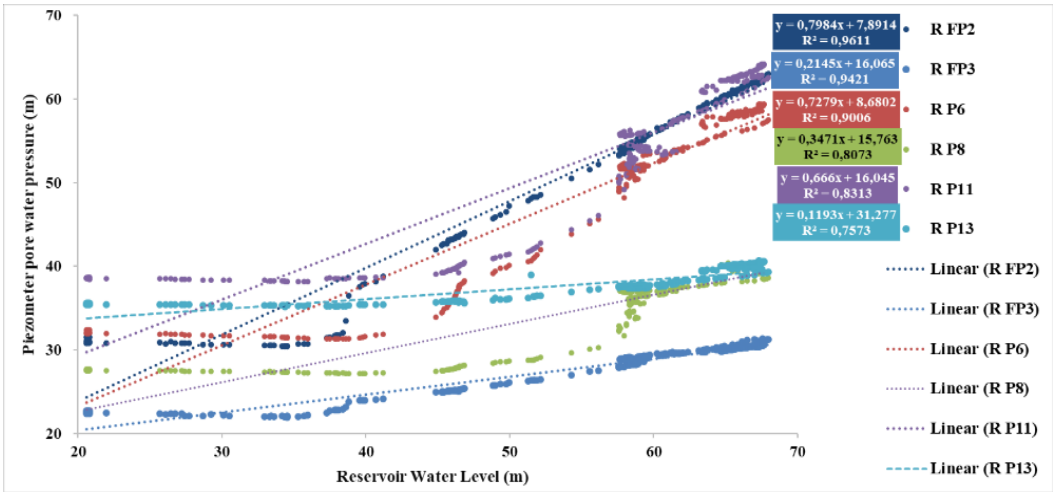


Gambar 8. *Layout Vibrating Wire Piezometer* dalam tubuh Bendungan Karian yang akan dianalisis

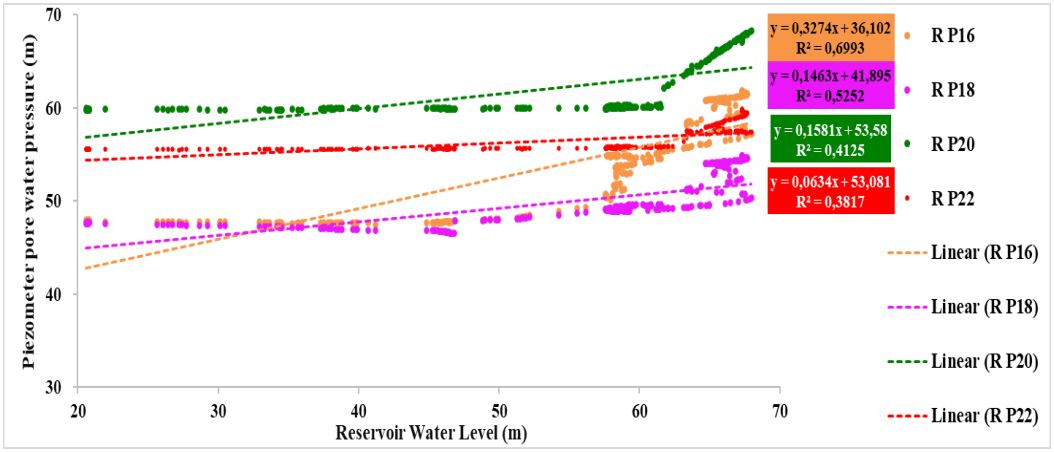


Gambar 9. *Plotting* hubungan elevasi m.a.w dengan elevasi piezometer tanpa pengaruh hujan

Kemudian data tersebut dilakukan analisis regresi untuk mendapatkan persamaan regresi yang menggambarkan hubungan antara elevasi muka air waduk dan tekanan air pori yang terjadi pada tubuh Bendungan Karian. Hasil regresi dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Regresi linier pada piezometer fondasi dan piezometer elevasi -8m s.d. elevasi +30m



Gambar 11. Regresi linier piezometer elevasi +45m dan piezometer elevasi +60m

Rekapitulasi hubungan korelasi masing-masing instrumen Piezometer terangkum dalam Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Rekapitulasi Korelasi Data Piezometer

No.	Kode *Piezometer*	Elevasi Pemasangan	Lokasi	Nilai R	Korelasi
1.	FP2	-8,10 m	fondasi hulu	0.9611	sangat kuat
2.	FP3	-8,10 m	fondasi hilir	0.9421	sangat kuat
3.	P6	+10,00 m	zona inti hulu	0.9006	sangat kuat
4.	P8	+10,00 m	zona inti hilir	0.8073	sangat kuat
5.	P11	+30,00 m	zona inti hulu	0.8313	sangat kuat
6.	P13	+30,00 m	zona inti hilir	0.7573	sangat kuat
7.	P16	+45,00 m	zona inti hulu	0.6993	kuat
8.	P18	+45,00 m	zona inti hilir	0.5252	kuat
9.	P20	+60,00 m	zona transisi hulu	0.4125	cukup
10.	P22	+60,00 m	zona transisi hilir	0.3817	cukup

Analisis regresi pembacaan piezometer di sepuluh titik menunjukkan korelasi sangat kuat pada zona fondasi (FP2 dan FP3) dengan R = 0,9421–0,9611, menandakan respons tekanan

air pori yang cepat dan proporsional terhadap kenaikan elevasi air waduk. Pada zona tubuh bendungan elevasi rendah (+10 m hingga +30 m), korelasi juga kuat (R = 0,7573–0,9006), sedangkan pada elevasi tinggi (+45 m hingga +60 m), kekuatan korelasi menurun progresif (R = 0,3817–0,6993). Pola ini konsisten dengan jalur rembesan utama yang lebih dominan di dekat pondasi, sementara zona atas mengalami tekanan yang lebih teredam dan tertunda akibat permeabilitas rendah dan jarak radial lebih besar dari sumber tekanan. Fenomena *pressure lag* di zona elevasi tinggi merepresentasikan penyebaran sinyal tekanan yang tertunda akibat sifat material dan posisi yang jauh dari sumber utama beban, sesuai dengan analisis *lag time* pada data terkoordinasi. Debit rembesan dihitung berdasarkan data tekanan air pori piezometer di berbagai elevasi dengan korelasi terhadap muka air waduk. Gradien hidrolik ditentukan dari selisih *head* antara piezometer dan jarak horizontal di tiap pasangan pengamatan (lihat Tabel 3), kemudian debit rembesan dihitung menggunakan hukum Darcy sesuai data pada Tabel 4.

Tabel 3. Perhitungan Gradien Hidrolik Berdasarkan Data Pembacaan Piezometer Oktober 2023

No.	Tanggal Pengamatan	water level	Piezometer fondasi		Piezometer tubuh bendungan							
			P2	P3	P6	P8	P11	P13	P16	P18	P20	P22
1.	1-Oct-23	26.08	30.74	22.31	31.92	27.50	38.50	35.40	47.81	47.48	59.83	55.58
2.	5-Oct-23	27.44	30.78	22.11	31.81	27.48	38.42	35.40	47.63	47.42	59.84	55.59
3.	10-Oct-23	29.25	30.67	22.33	31.73	27.44	38.37	35.37	47.78	47.37	59.83	55.60
4.	16-Oct-23	32.95	30.54	21.98	31.63	27.39	38.31	35.33	47.76	47.31	59.83	55.61
5.	21-Oct-23	34.17	30.47	22.14	31.53	27.36	38.23	35.33	47.68	47.25	59.83	55.60
6.	25-Oct-23	34.55	30.44	22.09	31.49	27.32	38.17	35.29	47.63	47.17	59.82	55.61
7.	30-Oct-23	35.95	30.73	22.17	31.30	27.29	38.18	35.29	47.66	47.13	59.82	55.62
Tinggi bacaan rata-rata			30.65	22.15	31.65	27.41	38.31	35.34	47.72	47.32	59.83	55.57
Beda Elevasi Pembacaan (Δh)			8.50		4.24		2.97		0.41		4.26	
Jarak Antar Piezometer (L)			30.00		15.00		15.00		9.00		12.25	
Gradien Hidraulik (ie)			0.28		0.28		0.20		0.05		0.35	

Tabel 4. Perhitungan Debit Rembesan Bulanan Berdasarkan Data Pembacaan Piezometer

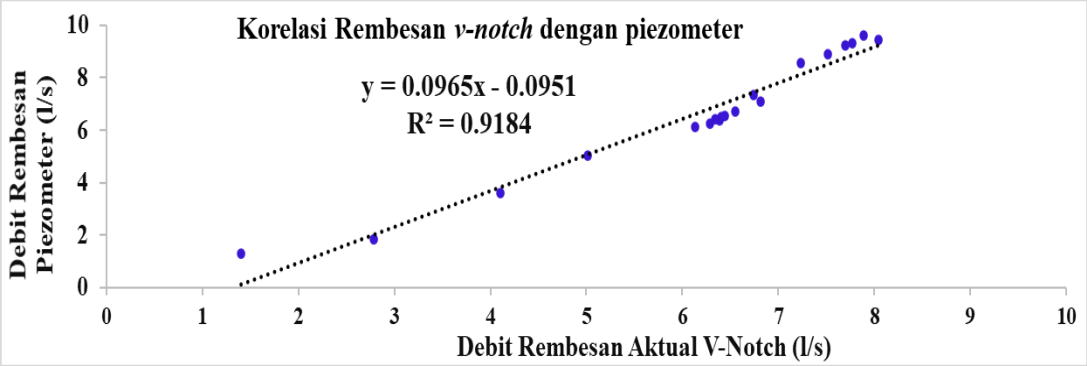
No.	Periode	*Foundation piezometer*				*Dam body piezometer*				$Q_{seepage}$
		k	i_e	A	Q	k	i_e	A	Q	
		m/s		m^2	lt/s	m/s		m^2	lt/s	lt/s
1.	Oktober 2023	6×10^{-7}	0,28	7.521,85	1,28	$1,89 \times 10^{-8}$	0,22	2.192,30	0,01	1,29
2.	November 2023	6×10^{-7}	0,38	8.169,42	1,85	$1,89 \times 10^{-8}$	0,23	2.970,17	0,01	1,86
3.	Desember 2023	6×10^{-7}	0,60	9.946,36	3,60	$1,89 \times 10^{-8}$	0,32	3.904,10	0,02	3,63
4.	Januari 2024	6×10^{-7}	0,71	11.749,51	5,02	$1,89 \times 10^{-8}$	0,38	5.453,61	0,04	5,06
5.	Februari 2024	6×10^{-7}	0,83	12.225,28	6,11	$1,89 \times 10^{-8}$	0,56	6.270,26	0,07	6,18
6.	Maret 2024	6×10^{-7}	0,86	12.477,83	6,41	$1,89 \times 10^{-8}$	0,65	6.670,23	0,08	6,49
7.	April 2024	6×10^{-7}	0,87	12.496,20	6,49	$1,89 \times 10^{-8}$	0,70	6.698,52	0,09	6,58
8.	Mei 2024	6×10^{-7}	0,87	12.506,98	6,53	$1,89 \times 10^{-8}$	0,73	6.757,34	0,09	6,63
9.	Juni 2024	6×10^{-7}	0,88	12.679,50	6,71	$1,89 \times 10^{-8}$	0,75	7.075,56	0,10	6,81
10.	Juli 2024	6×10^{-7}	0,90	13.642,84	7,34	$1,89 \times 10^{-8}$	0,76	7.419,66	0,11	7,45
11.	Agustus 2024	6×10^{-7}	0,84	12.338,18	6,24	$1,89 \times 10^{-8}$	0,80	6.531,09	0,10	6,33
12.	September 2024	6×10^{-7}	0,85	12.461,89	6,39	$1,89 \times 10^{-8}$	0,80	6.701,29	0,10	6,49
13.	Oktober 2024	6×10^{-7}	0,91	12.951,78	7,07	$1,89 \times 10^{-8}$	0,84	7.379,62	0,12	7,19
14.	November 2024	6×10^{-7}	0,96	14.839,36	8,55	$1,89 \times 10^{-8}$	0,93	8.690,22	0,15	8,70

15.	Desember 2024	6×10^{-7}	1,03	15.631,70	9,63	$1,89 \times 10^{-8}$	1,08	10.093,30	0,21	9,83
16.	Januari 2025	6×10^{-7}	0,99	14.955,27	8,90	$1,89 \times 10^{-8}$	1,01	9.790,05	0,19	9,08
17.	Februari 2025	6×10^{-7}	1,03	16.208,89	10,03	$1,89 \times 10^{-8}$	1,07	9.743,59	0,20	10,22
18.	Maret 2025	6×10^{-7}	1,03	15.059,24	9,30	$1,89 \times 10^{-8}$	1,05	9.551,50	0,19	9,49
19.	April 2025	6×10^{-7}	1,02	15.046,71	9,23	$1,89 \times 10^{-8}$	1,02	9.393,76	0,18	9,41
20.	Mei 2025	6×10^{-7}	1.06	14897.79	9.45	1.89×10^{-8}	1.06	9,959.14	0.20	9,64

Keterangan: k = koefisien permeabilitas (m/s); i_e = gradien hidrolik; A = luas penampang aliran (m^2); Q = debit rembesan (lt/s)

3.3. Hubungan Antara Debit Rembesan Piezometer Dan V-Notch

Hasil perhitungan debit rembesan aktual dari *v-notch* dan piezometer Bendungan Karian disajikan pada Tabel 5. Hubungan antara muka air waduk dan debit rembesan zona inti pada *v-notch* bersifat linear. Debit hasil perhitungan gradien hidrolik piezometer dengan Hukum Darcy dibandingkan dengan debit aktual *v-notch* secara bulanan menunjukkan korelasi linear positif (R^2 = 0,9184), dengan tren pola dan respons serupa meski besaran debit piezometer pada 3 bulan awal lebih kecil dari debit aktual *v-notch,* namun seiring berjalan waktu penggenangan material mengalami proses penjenuhan sehingga debit Piezometer pada bulan-bulan berikutnya menjadi lebih besar dari debit *v-notch* dapat lihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Korelasi debit rembesan aktual dari *v-notch* dengan debit rembesan piezometer

Tingginya korelasi silang memvalidasi filosofi desain untuk mengintegrasikan dua teknologi pengukuran independen. Ketika satu sistem mengalami gangguan teknis atau *loss of signal*, data dari sistem alternatif dapat memberikan perkiraan yang masuk akal untuk tujuan manajemen dan peringatan dini. Ini *particularly* penting pada Bendungan Karian mengingat historis gangguan teknis pada sistem *v-notch* selama fase konstruksi.

Berdasarkan Tabel 5. Struktur Bendungan Karian beroperasi dalam kondisi aman dengan debit maksimal 10.22 liter/detik (Februari 2025) yang masih jauh di bawah ambang desain kritis. Distribusi tekanan air pori menunjukkan pola teratur dan konsisten tanpa indikasi mekanisme kegagalan internal seperti internal erosion, piping, atau deformasi diferensial signifikan. Sistem drainase fondasi dengan koefisien permeabilitas 6×10^{-7} m/s memiliki kapasitas kolektif yang memadai. Namun demikian, tiga aspek memerlukan perhatian berkelanjutan: (1) gangguan operasional v-notch akibat presipitasi memerlukan penyempurnaan desain drainase lokal; (2) lag time signifikan pada piezometer elevasi tinggi mengindikasikan aliran preferensial melalui jalur-jalur spesifik yang perlu diidentifikasi; (3)

kondisi steady-state belum tercapai sempurna pada akhir periode pengamatan, sehingga monitoring perpanjangan diperlukan.

Tabel 5. Hasil perhitungan debit rembesan aktual dari *v-notch* dan debit rembesan piezometer

No.	Periode (bulan)	Debit Rembesan *v-notch* (l/s)	Debit rembesan piezometer (l/s)
1.	Oktober 2023	1.40	1,29
2.	November 2023	2.78	1,86
3.	Desember 2023	4.11	3,63
4.	Januari 2024	5.01	5,06
5.	Februari 2024	6.13	6,18
6.	Maret 2024	6.34	6,49
7.	April 2024	6.41	6,58
8.	Mei 2024	6.44	6,63
9.	Juni 2024	6.55	6,81
10.	Juli 2024	6.75	7,45
11.	Agustus 2024	6.28	6,33
12.	September 2024	6.39	6,49
13.	Oktober 2024	6.82	7,19
14.	November 2024	7.23	8,70
15.	Desember 2024	7.88	9,83
16.	Januari 2025	7.52	9,08
17.	Februari 2025	7.84	10,22
18.	Maret 2025	7.77	9,49
19.	April 2025	7.70	9,41
20.	Mei 2025	8.04	9,64

Penelitian ini menutup celah metodologis dalam analisis rembesan bendungan urugan zonal inti tegak pada fase *impounding* yang belum banyak dikaji, khususnya terkait integrasi data piezometer dan *v-notch* dengan mempertimbangkan pengaruh hujan serta disfungsi sistem drainase. Pendekatan baru melalui metode *parsing* data dan regresi linier memungkinkan pemisahan data terpengaruh hujan serta penyesuaian *lag time* antara elevasi waduk dan respons instrumen, menghasilkan korelasi tinggi antara muka air waduk dan debit rembesan murni. Validasi silang antara piezometer dan *v-notch* menunjukkan hubungan kuat dan dapat digunakan untuk estimasi data hilang, menghasilkan persamaan empiris spesifik yang aplikatif bagi prediksi operasional. Temuan ini juga menegaskan perbedaan respons antar elevasi piezometer dan memberikan dasar untuk evaluasi kondisi *steady-state* serta pengembangan sistem peringatan dini keamanan bendungan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan hubungan yang sangat erat antara ketinggian muka waduk dan debit rembesan pada Bendungan Karian. Hubungan tersebut dapat dimodelkan dengan akurasi tinggi menggunakan regresi linier sederhana (R^2 = 0,9428). Integrasi data *v-notch* dan piezometer memberikan validasi silang yang kuat (R = 0,9184). Kedua instrumen terbukti saling melengkapi dalam sistem monitoring bendungan. Kondisi keamanan struktur dievaluasi sebagai berada dalam kategori terkendali, meskipun optimalisasi sistem drainase dan perpanjangan monitoring jangka panjang tetap direkomendasikan untuk memastikan keselamatan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Abdel-Kawy, A. O., Aboulatta, N. M., & El-Molla, D. A. (2021). Effects of core characteristics on seepage through earth dams. *Water Practice and Technology*, *16*(4), 1248–1264. https://doi.org/10.2166/wpt.2021.053

Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 145–202. https://doi.org/10.47260/jesge/1115

Ardiansyah, R. H., & Sriyana, I. (2021). Evaluasi Debit Rembesan dari Data Bacaan V-notch pada Bendungan Benel. *Wahana TEKNIK SIPIL*, *26*(2), 209–221.

Azdan, & Samekto. (2008). *Kritisnya Kondisi Bendungan di Indonesia* .

Brandon, T. L. (2018). Soil Compressibility in Transient Unsaturated Seepage Analyses. *Canadian Geotechnical Journal*, *51*(8), 249–260. https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0255

FEMA. (2015). *Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management*.

Gholami, A., Razavi, B., & Parehkar, M. (2011). Corresponding Author Investigation on Pore Water Pressure in Core of Karkheh Dam. *Advances in Environmental Biology*, *5*(8), 2417–2421.

Huda, A. L., Wardani, S. P. R., & Suharyanto, S. (2019). Evaluasi Tekanan Air Pori dan Rembesan Pada Bendungan Panohan. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, *4*(2), 26. https://doi.org/10.33366/rekabuana.v4i2.1372

Kidder, W. A., & Behaya, S. A. (2025). Seepage Analysis Equations for Zoned Earth Fill Dams with an Inclined Core. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, *12*(1), 253–267. https://doi.org/10.18280/mmep.120126

Lee, J.-W., Kim, J., & Kang, G.-C. (2018). Seepage Behavior of Earth Dams Considering Rainfall Effects. *Advances in Civil Engineering*, *2018*(1). https://doi.org/10.1155/2018/8727126

Mostafa, M. M., & Zhenzhong, S. (2021). *A Review on Analysis of Seepage in Zoned Earth Dams*.

Nurnawaty, Suhardiman, & Ihwan. (2018). *Analisis Rembesan Pada Bendungan Tipe Urugan (Uji Simulasi Lab)*.

Putra, R. A. M., Putra, A. D., & Wahono, E. P. (2022). Jurnal Aplikasi Teknik Sipil Analisis Rembesan Terhadap Bahaya Piping Pada Bendungan Way Sekampung. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil Volume 20, Nomor 4, November 2022*, *20*(4).

Setiawan, F., & Sriyana, I. (2022). *Interpretasi Tekanan Air Pori sebagai Dasar Pemeliharaan Piezometer di Bendungan Sermo*.

Siswanto, S., Suprapto, S., & Sachro, S. S. (2019). Estimasi dan Evaluasi Debit Rembesan pada Bendungan Urugan Batu Zonal Inti Tegak. *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, *4*(2), 53. https://doi.org/10.33366/rekabuana.v4i2.1424

Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*.

Wulandari, P. S., & Tjandra, D. (2018). Analisis Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk terhadap Stabilitas Lereng Waduk Dengan Menggunakan Program Plaxis 2D. In *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 24, Issue 2).