



**HUBUNGAN ANTARA ELEVASI MUKA AIR WADUK DAN PANJANG
LINTASAN REMBESAN TERHADAP DEBIT REMBESAN PADA BENDUNGAN
URUGAN BATU INTI TEGAK
(STUDI KASUS BENDUNGAN JATIBARANG)**

**THE CORRELATION BETWEEN RESERVOIR WATER LEVEL ELEVATION
AND SEEPAGE PATH LENGTH TO SEEPAGE DISCHARGE OF VERTICAL
ZONED CORE ROCKFILL DAM
(CASE STUDY: JATIBARANG DAM)**

Siswanto^{1,4)*}, Suprpto²⁾, Sri Sangkawati Sachro¹⁾

¹Mahasiswa Magister Rekayasa Bendungan, Universitas Diponegoro, Semarang

²Dosen Politeknik Pekerjaan Umum, Semarang

³Dosen Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Semarang

⁴Dinas PU Sumber Daya Air Provinsi Jawa Timur,

Jl. Gayung Kebonsari No.169, Surabaya, Jawa Timur 60231, Indonesia

E-Mail: siwato@gmail.com

Diterima: 13 Agustus 2019; Direvisi: 8 Desember 2019; Disetujui: 20 Desember 2019

ABSTRACT

Rockfill dams have better stability than homogeneous soil dams. It allows to design the dam more slim with a higher slope. The disadvantage of rockfill dam is in the core zone as an impermeable zone. Zoned vertical core rockfill dam is a combination of various material properties. Geometry and drainage design will affect the seepage and phreatic line properties that occur. Numerical modeling and calculations are used to calculate the seepage profile more accurately. The combination of the parameters of the permeability coefficient (K), reservoir water level (Δh) and the length of the seepage path (L) can be used to determine the relationship between parameters with the same unit. 2D modeling take into account saturated/unsaturated conditions with steady state on each parameter. This study uses the Jatibarang-Indonesia dam as a basic model. The seepage profile at condition K1 ($k = 1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$) is $q/k = -0.0018 (h^2/L)^2 + 1.3496h^2/L + 53.241$ and the seepage profile K2 ($k = 1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$) is $q/k = -0.1521 (h^2/L)^2 + 90.402h^2/L + 5480.2$. This equations can be used to estimate seepage that occurs in a dam of other rock fill zoned vertical core dam based on the permeability coefficient value (K) more practically for all values of Δh and L reviewed.

Keywords: Seepage, Rockfill Dam, Permeability, FEM, Numerical Analysis

ABSTRAK

Bendungan urugan batu mempunyai stabilitas yang lebih baik dibanding bendungan tanah homogen. Sehingga memungkinkan untuk dibuat lebih ramping secara volume. Kelemahan dari bendungan urugan batu terletak pada zona inti yang berfungsi sebagai impermeable zone. Bendungan urugan batu dengan inti zonal merupakan gabungan berbagai sifat material yang dapat menimbulkan perilaku rembesan yang cukup rumit. Desain geometri dan drainase akan mempengaruhi sifat rembesan dan phreatic line yang terjadi. Pemodelan dan perhitungan numeris dapat digunakan untuk menghitung profil rembesan secara lebih akurat. Kombinasi parameter koefisien permeabilitas (k), ketinggian muka air waduk (Δh) dan panjang lintasan rembesan (L) dapat digunakan untuk mengetahui hubungan antar parameter dengan satuan yang sama. Pemodelan 2D dilakukan pada kondisi jenuh/tak jenuh dengan dan kondisi tetap (steady state) pada setiap parameter. Model pada studi ini dilakukan pada bendungan Jatibarang, Indonesia. Profil rembesan pada kondisi K1 ($k = 1 \times 10^{-5} \text{cm/dt}$) adalah $q/k = -0.0018(h^2/L)^2 + 1.3496h^2/L + 53.241$ dan profil rembesan K2 ($k = 1 \times 10^{-7} \text{cm/dt}$) adalah $q/k = -0.1521(h^2/L)^2 + 90.402h^2/L + 5480.2$. Persamaan ini dapat digunakan untuk memperkirakan rembesan yang terjadi pada sebuah bendungan urugan batu zonal inti tegak lainnya berdasarkan nilai koefisien permeabilitas (K) secara lebih praktis untuk semua nilai Δh dan L yang ditinjau.

Kata kunci: Rembesan, Bendungan Urugan Batu, Permeabilitas, FEM, Analisis Numeris

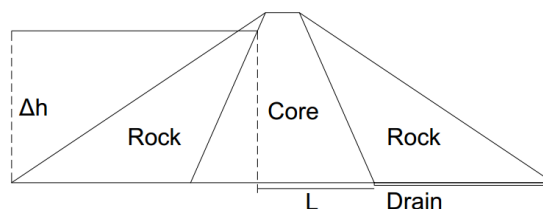
PENDAHULUAN

Permasalahan bendungan yang diakibatkan oleh rembesan menempati urutan pertama dalam penilaian kategori resiko penyebab kegagalan bendungan (Azdan and Samekto 2008). Terdapat enam faktor utama penyebab kegagalan bendungan tipe urugan yaitu: limpasan, rembesan, kebocoran pipa saluran, kerusakan timbunan bagian hulu, stabilitas lereng dan penyebab lainnya (gempa, likuifaksi, sabotase dll). Metode indeks resiko dapat digunakan untuk mengevaluasi keamanan bendungan yang terdiri dari beberapa parameter tersebut (Ishbaev, Pandjaitan, and Rizal 2016).

Kegagalan bendungan akibat rembesan mempunyai frekuensi resiko sebesar 25% dibandingkan akibat dari lima faktor lainnya. Sedangkan jika dilihat dari umur bendungan setelah penggenangan antara 0-100 tahun, presentasi kegagalan terjadi pada umur bendungan 0-5 tahun sebesar 50%. Khusus kegagalan yang diakibatkan oleh rembesan pada kurun waktu 0-5 tahun mempunyai resiko yang juga sebesar 50% (Washington Departemen of Ecology 2005). Oleh karenanya penting untuk melakukan monitoring dan evaluasi keamanan bendungan secara periodik dan intens khususnya bagi bendungan-bendungan muda.

Rembesan pada umumnya sulit untuk diprediksi secara akurat, sehingga diperlukan pendekatan perhitungan bahkan pemodelan fisik untuk memprediksi secara lebih teliti (Suprpto, Husna, and Taufiq 2018). Rembesan pada bendungan tipe urugan batu inti tegak mempunyai karakteristik yang berbeda dengan bendungan urugan tanah homogen. Perhitungan rembesan pada bendungan urugan batu zonal inti tegak merupakan modifikasi dari metode rembesan pada bendungan urugan tanah homogen. Hukum Darcy digunakan sebagai rumusan dasar perhitungan rembesan pada bendungan urugan tanah homogen. Rembesan yang terjadi dipengaruhi oleh koefisien permeabilitas material (K), gradien hidrolis (i) dan ketinggian muka air waduk (Δh) (Wulandari and Tjandra 2019).

Bendungan urugan batu modern terdiri atas 3 bagian zona utama, yaitu shell, transisi dan inti. Transisi terdapat pada bagian hulu dan hilir inti dengan filter. Zona transisi hilir berfungsi sekaligus sebagai *drain*. Outlet dari akumulasi rembesan dapat dibuat pada tumit bendungan ataupun pada tumit zona inti jika bendungan tersebut terdapat gallery (Gambar 1).



Gambar 1 Bendungan urugan batu zonal inti tegak

Permasalahan pada bendungan urugan batu zonal inti tegak dibandingkan dengan bendungan urugan tanah homogen terletak pada banyaknya geometri dan parameter material yang digunakan. Oleh karenanya asumsi untuk perhitungan rembesan pada bendungan tanah homogen lebih sederhana dibandingkan dengan bendungan urugan batu zonal inti tegak. Masing-masing bendungan mempunyai karakteristik dan material properties yang berbeda sehingga diperlukan pemodelan untuk memastikannya (Sari 2016).

Pada artikel ini dibahas tentang hubungan antar parameter rembesan bendungan urugan batu zonal inti tegak. Dengan mengetahui hubungan antar parameter tersebut kita dapat membuat asumsi dan prediksi debit rembesan untuk bendungan yang serupa secara cepat dan lebih sederhana. Hasil persamaan sebagai profil hubungan antara q/k dan $\Delta h^2/L$ merupakan persamaan kuadrat $y=ax^2+bx+c$. Pemodelan tersebut didapatkan menggunakan model matematis pada tipe bendungan urugan tanah homogen sederhana (Giglou, Giglou, and Minaei 2013). Pemodelan matematis harus dilakukan validasi dengan menggunakan model yang sudah ada (model fisik) baik menggunakan model skala laboratorium maupun skala penuh. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan persamaan matematis yang lebih mendekati kondisi sesungguhnya.

METODOLOGI

Debit rembesan (Q) dalam bendungan merupakan fungsi dari K, maka perkiraan ekivalensi penampang dapat diperoleh dari ketinggian muka air waduk (Δh) dan lebar penampang (L). Dengan menghitung $\Delta h/L$, maka akan mendapatkan nilai rerata gradien yang setara. Fungsi gradien tersebut menjadi $\Delta h^2/L$ untuk lebar penampang tertentu. Berdasarkan rumusan ini akan mendapatkan dua fungsi yang digunakan dalam perhitungan, yaitu Q/K dan $\Delta h^2/L$ (Giglou, Giglou, and Minaei 2013).

Dengan menghitung dan membuat perbandingan antara Q/K dan $\Delta h^2/L$ maka didapatkan grafik perbandingan antar parameter rembesan pada sebuah bendungan. Berdasarkan rasio pada grafik yang didapatkan, kita dapat

mencari parameter lainnya pada sembarang nilai yang sudah diketahui.

Rembesan pada bendungan

Pada umumnya analisis rembesan menggunakan metode *flownet* berdasarkan rumusan Casagrande. Garis rembesan pada tubuh bendungan dianggap berbentuk parabola sesuai dengan sudut kemiringan hilir (α). Kemiringan lereng yang digunakan pemodelan ini adalah $1/5$ dan $1/4$ ($\alpha \geq 30^\circ$), maka perhitungan debit rembesan (q) mengikuti persamaan, $q = k \cdot y_0$. Dalam hal ini, q adalah debit rembesan (m/dtk per meter panjang), k adalah koefisien permeabilitas (m/dtk), d adalah jarak antara garis rembesan pada hulu bendungan dengan hilir bendungan (m) dan y_0 adalah kemiringan hidrolis yang dihitung dari jumlah akar kuadrat dari ketinggian muka air (h) dan panjang lintasan rembesan (d) dikurangi panjang lintasan rembesannya.

Perhitungan rembesan pada bendungan urugan batu inti tegak sangat kompleks. Hal ini dikarenakan banyaknya parameter, seperti kondisi batas dan geometri, sehingga diperlukan alat bantu agar diperoleh hasil yang lebih akurat dan cepat (Sari et al. 2016). Metode yang digunakan dalam perhitungan rembesan ini adalah metode *finite element 2D* pada kondisi *steady state*. *Finite element method* (FEM) digunakan karena dapat lebih diandalkan dibanding metode *limit equilibrium* (Athani et al. 2015).

Pemodelan numeris 2D menggunakan Software Seep/W setidaknya melalui 2 *series model*. Pemodelan pada *series-1* merupakan model awal (*initial*) sedangkan series selanjutnya merupakan *engineered model*. Perubahan dan perbaikan pemodelan dimaksudkan untuk mendapatkan hasil debit rembesan yang mempunyai selisih yang dapat ditoleransi. Rekayasa pemodelan FEM dapat dilakukan terhadap faktor geometri, kondisi batas, *material properties* dan *meshing* (diskritisasi).

Semakin kecil selisih antara debit hasil pemodelan dibandingkan dengan debit terukur, maka dapat dikatakan pemodelan tersebut mempunyai hasil yang lebih baik. Tidak terdapat ketentuan baku berapa selisih debit yang dianggap valid. Tetapi dalam pemodelan ini selisih debit yang kurang dari 25% dianggap sudah cukup baik dan dapat ditoleransi. Profil dan model numeris debit rembesan pada bendungan urugan batu zonal inti tegak dapat dilakukan jika hasil pemodelan sudah dianggap valid.

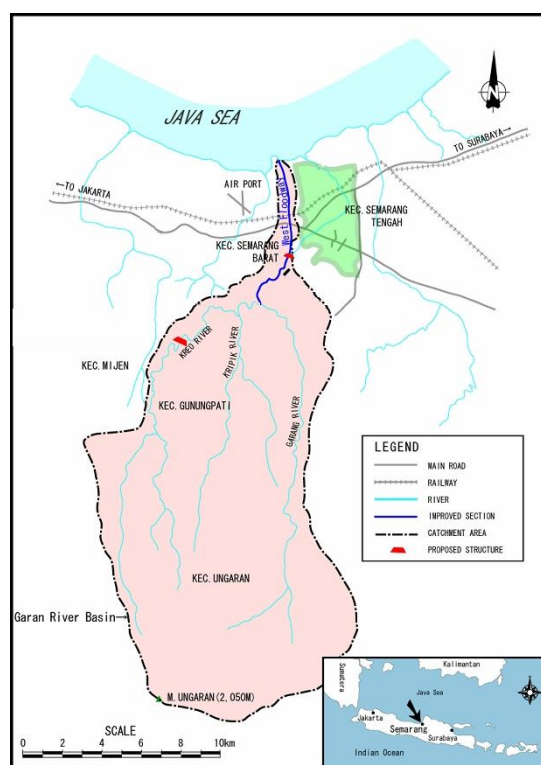
Studi kasus

Bendungan Jatibarang digunakan sebagai model dasar pada penelitian ini (Gambar 2). Bendungan Jatibarang merupakan Bendungan

Urugan Batu Zonal Inti Tegak yang mempunyai tinggi 77m dan panjang 250m. Konstruksi bendungan dengan kapasitas 20,4 juta m³ ini dimulai pada 15 Oktober 2009 dan selesai pada 5 Mei 2014. Sertifikasi operasional didapatkan bendungan ini pada 11 Mei 2015.

Kondisi geologi Jatibarang berada pada daerah sesar dan berpotensi rembesan yang cukup tinggi. Pondasi bendungan (*bedrock*) rata-rata mempunyai nilai $Lugion > 5$, sehingga diperlukan *curtain grouting* (Astuti, Masrevaniah, and Marsudi 2012). Hampir tidak ada bendungan urugan batu di Indonesia tanpa *curtain grouting*, sehingga adanya *curtain grouting* akan dimasukkan dalam pemodelan. Selain itu kondisi material *unsaturated* yang sering kali diabaikan, tetapi dalam penelitian ini diperhitungkan dalam pemodelan.

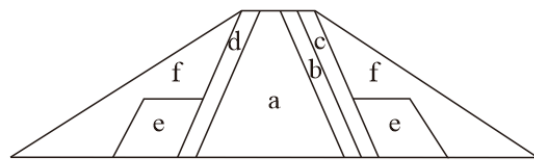
Data instrumen dan *detail engineering design* (DED) digunakan sebagai input analisis pemodelan. Data debit rembesan terukur berdasarkan hasil pembacaan V-Notch dievaluasi untuk mendapatkan data yang valid dan mempunyai hubungan yang kuat antara debit rembesan dan ketinggian muka air waduk. Data ini kemudian dijadikan acuan dan validasi pemodelan numeris dengan metode FEM.



Gambar 2 Lokasi Studi Kasus

Debit hasil pemodelan dapat diterima jika mempunyai selisih sebesar maksimum 25%. Untuk itu diperlukan *adjustment* input parameter agar didapatkan debit hasil pemodelan dengan selisih

yang dapat ditoleransi. Perbaikan pemodelan pada penelitian ini dilakukan dengan memperkecil diskritisasi elemen. Input parameter pemodelan awal terdiri dari material properties dan geometri bendungan (Gambar 3). Kedua parameter dasar tersebut tetap, kecuali parameter yang akan ditinjau yaitu koefisien permeabilitas inti (K) dan panjang lintasan horisontal rembesan (L). Nilai L merupakan fungsi dari kemiringan lereng inti. Parameter dasar yang digunakan berdasarkan desain awal bendungan Jatibarang sesuai dalam Tabel 1.



- Ket:
 a: Impervious
 b: Fine Filter
 c: Down Stream Coarse Filter
 d: Up Stream Coarse Filter
 e: Inner Pervious
 f: Outer Pervious
 g: Bed Rock

Gambar 3 Susunan material pada Bendungan Jatibarang

Dalam Gambar 3 volume terbesar material bendungan adalah *rockfill* (urugan batu). Zona ini merupakan zona lolos air (*pervious*). Dikarenakan alasan *workability* dan stabilitas bendungan, maka dibuat dua jenis zona yaitu *Inner Pervious* dan *Outer Pervious*. Material utama kedua zona ini adalah batuan, perbedaannya terletak pada ukuran. Dimana *inner pervious zone* mempunyai ukuran batuan yang lebih kecil dibanding *outer pervious zone*. Pemodelan menganggap bahwa kedua zona ini merupakan urugan batu sehingga tidak ada tekanan air pori.

Tabel 1 Parameter dasar pemodelan

No	Parameter	Unit	Impervious	Fine Filter	DS Coarse Filter	US Coarse Filter	Inner Pervious	Outer Pervious	Bedrock
1	Spesific gravity (<i>G_s</i>)		26.27	25.30	24.91	25.10	24.91	24.91	23.81
2	Berat Volume Kering (<i>γ_{dry}</i>)	kN/m ³	18.34	18.24	18.83	20.40	18.83	18.83	20.12
3	<i>γ_{sat}</i>	kN/m ³	21.48	20.99	21.18	22.26	21.80	21.18	21.82
4	<i>γ_{wet}</i>	kN/m ³	20.69	18.63	19.02	20.69	19.20	19.20	20.12
5	Kohesi (<i>c</i>)	KN/m ²	9.81	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	680
6	Sudut geser dalam (<i>φ</i>)	°	25	35	35	35	42	42	55
7	Angka pori (<i>e</i>)	-	0.923	0.390	0.390	0.390	0.325	0.325	
8	Water content (<i>w</i>)	-	15.50%	2.00%	2.00%	2.00%	1.00%	1.00%	
9	Koefisien	cm/dt	1x10 ⁻⁵	3x10 ⁻³	1x10 ⁻²	1x10 ⁻²			2.7x10 ⁻⁴

Koefisien permeabilitas yang digunakan pemodelan sesuai dalam spesifikasi dan potensial terdapat dalam borrow area. Dimana $k_1=1 \times 10^{-5}$ dan $k_2=1 \times 10^{-7}$. Pada kasus ini perencanaan awal bendungan Jatibarang menggunakan koefisien permeabilitas pada K1, sedangkan nilai k_2 merupakan nilai batas terkecil yang potensial didapatkan pada *borrow area*.

Panjang lintasan horisontal rembesan L1 berdasarkan kemiringan lereng inti 1/5, dan L2 berdasarkan kemiringan lereng inti 1/4. Perencanaan Bendungan Jatibarang menggunakan kemiringan lereng 1/5 pada zona inti. Pemodelan tidak menggunakan kemiringan >1/4 dikarenakan hal tersebut tidak bersesuaian dengan tujuan utama dari pemilihan type bendungan. Dimana keunggulan bendungan urugan batu terletak pada stabilitas, sehingga dua jenis kemiringan tersebut dianggap sudah cukup mewakili kebanyakan bendungan urugan batu di Indonesia. Berdasarkan asumsi parameter tersebut tersebut pemodelan dapat dilakukan dengan kombinasi tiga parameter (

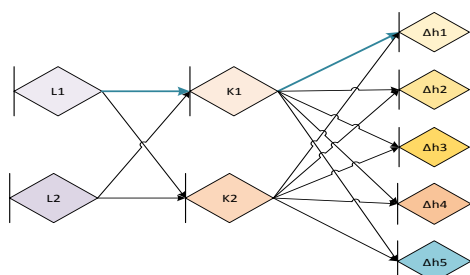
Gambar 4).

Desain elevasi muka air banjir pada Bendungan Jatibarang berada pada +151,8m atau pada ketinggian muka air 71,8m dari dasar elevasi pondasi bendungan (+80). Berdasarkan data tersebut, ketinggian muka air waduk disimulasikan mulai pada elevasi +30m dari dasar bendungan. Perhitungan dilakukan tiap perbedaan +10m sampai pada elevasi +70. Sehingga perhitungan dilakukan pada elevasi muka air waduk +30, +40, +50, +60 dan +70. Hasil Kombinasi dari ketiga parameter tersebut akan menghasilkan 20 data baru (

Tabel 2).

permeabilitas

(Sumber: CTI Engineering International, 2008)



Gambar 4 Kombinasi parameter pemodelan

Tabel 2 Kombinasi parameter pemodelan

Parameter	Nilai	Satuan
K1	1x10 ⁻⁵	cm/dt
K2	1x10 ⁻⁷	cm/dt
L1	1/5	
L2	1/4	
Δh1	30	m
Δh2	40	m
Δh3	50	m
Δh4	60	m
Δh5	70	m

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jumlah elemen menentukan akurasi perhitungan, namun tidak ada ketentuan baku

berapa jumlah minimum diskritisasi elemen yang harus digunakan. Dalam manual GeoStudio, jumlah elemen antara 800-2000 dianggap sudah cukup untuk menyelesaikan sebuah pemodelan sederhana.

Pemodelan dan analisa numeris pada penelitian ini menggunakan software Seep/W dari GeoStudio, dan digunakan mesh dengan ukuran 5m elemen untuk seluruh pemodelan. Pada prinsipnya semakin banyak node/elemen maka kalkulasi akan semakin akurat, tetapi perhitungan yang berlebihan juga tidak disarankan.

Seluruh kombinasi parameter dihitung menggunakan analisa numeris 2D yang menghasilkan 20 pemodelan yang berbeda. Perbedaan tersebut berasal dari perubahan koefisien permeabilitas (*k*), kemiringan lereng yang direpresentasikan dengan *L* dan perubahan ketinggian muka air waduk (*Δh*). Hasil pemodelan finite element 2D Seep/W berupa total flux (*q*) per meter lebar yang ditinjau.

Profil rembesan dapat diketahui dengan menghitung rasio *q/k* dan *Δh²/L* pada masing-masing parameter percobaan. Hasil selengkapnya dapat dilihat dalam Tabel 3. Berdasarkan data tersebut dapat dibuat grafik hubungan antara *q/k* dan *Δh²/L*.

Tabel 3 Hasil perhitungan pada pemodelan awal (series-1)

No	Δh m	Elevasi +m	q-Flux* m3/hari/m	q/k	Δh ² /L	Ket
1	30	110	0.34764	40.2	31.6	
2	40	120	0.53746	62.2	60.5	
3	50	130	0.76687	88.8	102.3	L1K1
4	60	140	1.04380	120.8	160.4	
5	70	150	1.38560	160.4	239.7	
6	30	110	0.24621	2849.7	31.6	
7	40	120	0.32696	3784.3	60.5	
8	50	130	0.40811	4723.5	102.3	L1K2
9	60	140	0.48973	5668.2	160.4	
10	70	150	0.57201	6620.5	239.7	
11	30	110	0.29770	34.5	26.0	
12	40	120	0.45845	53.1	49.8	
13	50	130	0.65889	76.3	84.3	L2K1
14	60	140	0.89344	103.4	132.6	
15	70	150	1.16920	135.3	198.9	
16	30	110	0.22611	2617.0	26.0	
17	40	120	0.30005	3472.8	49.8	
18	50	130	0.37440	4333.3	84.3	L2K2
19	60	140	0.44911	5198.0	132.6	

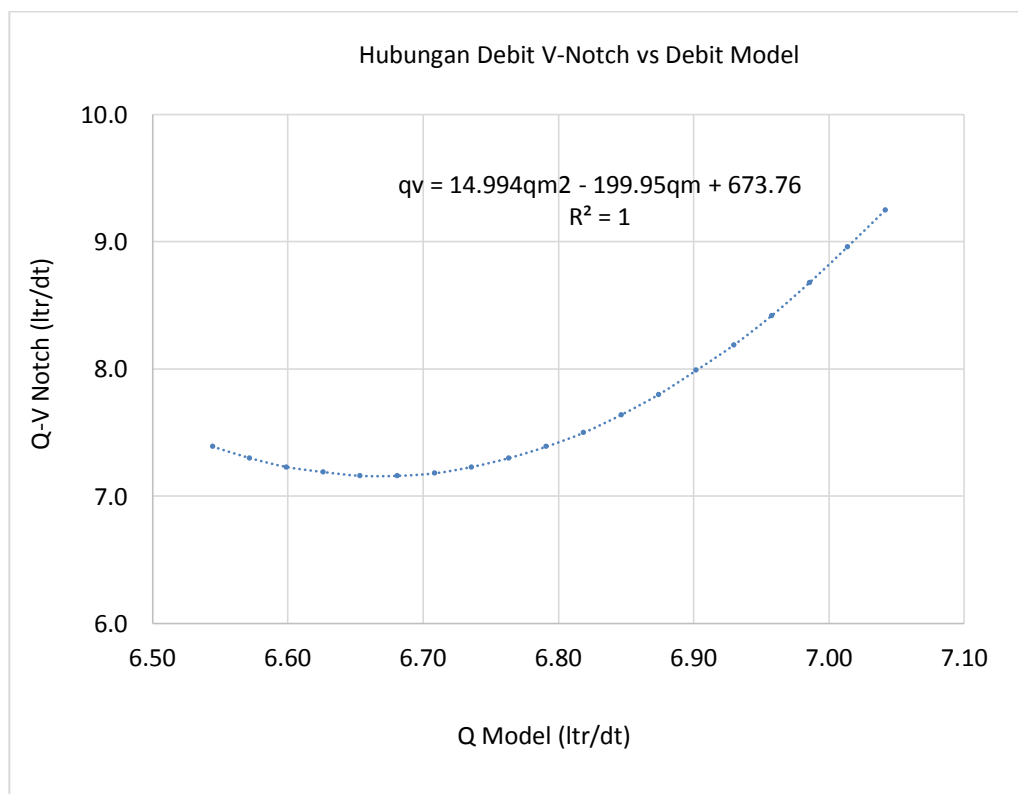
Validasi pemodelan

Debit hasil pemodelan berbeda dengan hasil pengukuran di lapangan (Gambar 5). Perbedaan ini dapat terjadi dikarenakan adanya perbedaan asumsi dan juga kondisi lapangan yang dinamis (Dharmayasa, Redana, and Suwarsa Putra 2014), maka dilakukan pengujian berdasarkan *trend* pada masing-masing perhitungan. Validasi model dilakukan untuk mengetahui seberapa akurat hasil yang dihasilkan oleh model dengan hasil pengukuran V-Notch (Arshad and Babar 2014).

Pada pemodelan pertama ini didapatkan rata-rata selisih debit (Δq) dengan hasil pembacaan V-Notch sebesar 0,58 kali. Perbaikan model diperlukan agar selisih debit rembesan antara model dengan hasil bacaan tidak terlalu jauh.

Modifikasi model dilakukan terhadap jumlah elemen/node yang digunakan. Pada pemodelan sebelumnya ukuran elemen 5m dan menghasilkan 1462 node dan 1395 elemen. Diskritisasi pemodelan ditingkatkan dengan cara memperkecil ukuran elemen menjadi 1m dari sebelumnya 5m, sehingga menghasilkan 32901 node dan 32638 elemen.

Grafik hubungan antara debit berdasarkan pemodelan dengan hasil pengukuran v-notch pada gambar 5 mempunyai nilai $R^2=1$. Hasil tersebut menunjukkan korelasi antara model dan pengukuran cukup baik. Perbedaan hasil perhitungan (Δq) sebelumnya rata-rata sebesar 0,58 kali menjadi 0,12 kali (Tabel 4).



Gambar 5 Hubungan Debit V-Notch vs Debit Model

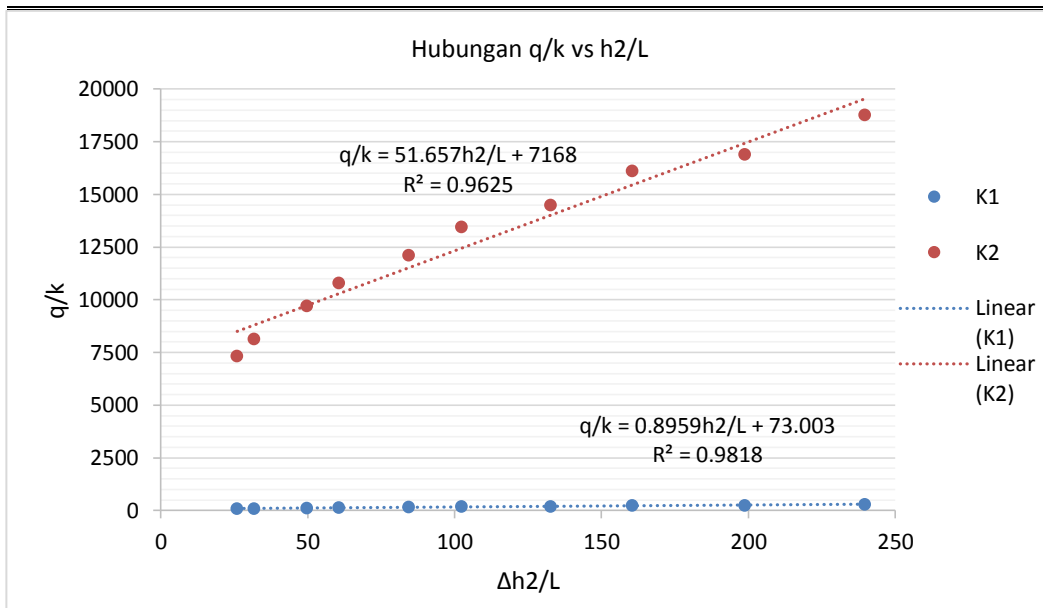
Tabel 4 Perbedaan hasil perhitungan debit pada model awal dan perbaikan model

TMA (+m)	Q V-Notch (ltr/dt)	Q Series-1 (ltr/dt)	Perbedaan	Q Series-2 (ltr/dt)	Perbedaan
146.40	7.39	3.06	0.59	6.54	0.14
146.60	7.30	3.08	0.58	6.57	0.15
146.80	7.23	3.10	0.57	6.60	0.16
147.00	7.19	3.12	0.57	6.63	0.17
147.20	7.16	3.14	0.56	6.65	0.17
147.40	7.16	3.16	0.56	6.68	0.18
147.60	7.18	3.18	0.56	6.71	0.19
147.80	7.23	3.20	0.56	6.74	0.20
148.00	7.30	3.22	0.56	6.76	0.20
148.20	7.39	3.24	0.56	6.79	0.21
148.40	7.50	3.26	0.57	6.82	0.22
148.60	7.64	3.28	0.57	6.85	0.22
148.80	7.80	3.30	0.58	6.87	0.23
149.00	7.99	3.32	0.59	6.90	0.24
149.20	8.19	3.34	0.59	6.93	0.24
149.40	8.42	3.36	0.60	6.96	0.25
149.60	8.68	3.38	0.61	6.99	0.26
149.80	8.96	3.40	0.62	7.01	0.26
150.00	9.25	3.42	0.63	7.04	0.27

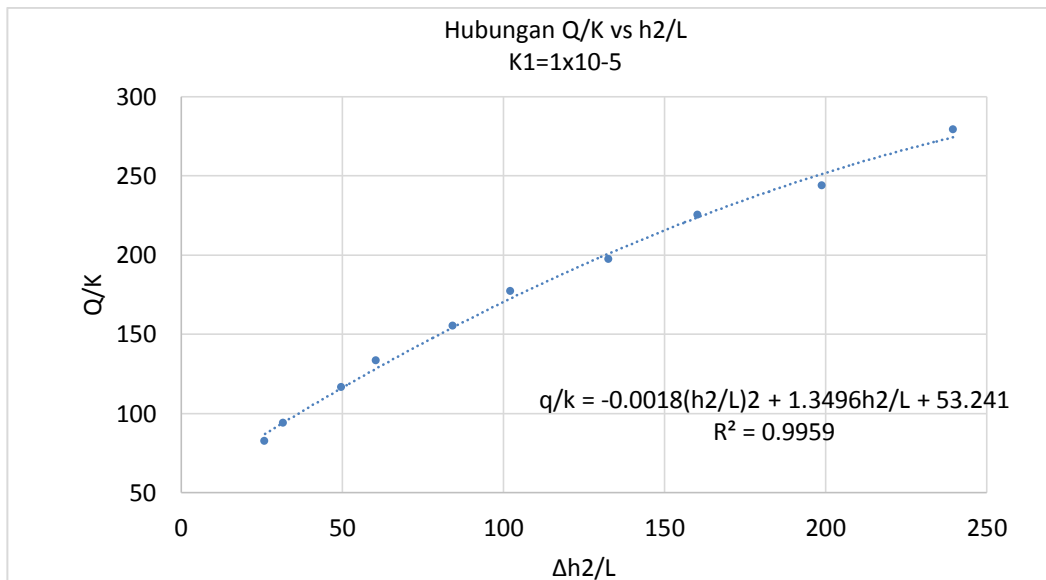
Tabel 5 Hasil perhitungan pada pemodelan koreksi (series-2)

No	Δh m	Elevasi +m	K cm/dt	L m	Q-Flux* m ³ /hari/m	Q/K	$\Delta h^2/L$	Q Total ltr/dtk	Ket
1	30	110	1x10 ⁻⁵	28	0.81	93.94	31.65	2.35	
2	40	120	1x10 ⁻⁵	26	1.15	133.32	60.51	3.33	
3	50	130	1x10 ⁻⁵	24	1.53	177.00	102.29	4.43	L1K1
4	60	140	1x10 ⁻⁵	22	1.95	225.21	160.43	5.63	
5	70	150	1x10 ⁻⁵	20	2.41	279.05	239.73	6.98	
6	30	110	1x10 ⁻⁷	28	0.70	8139.12	31.65	2.03	
7	40	120	1x10 ⁻⁷	26	0.93	10790.51	60.51	2.70	
8	50	130	1x10 ⁻⁷	24	1.16	13446.76	102.29	3.36	L1K2
9	60	140	1x10 ⁻⁷	22	1.39	16106.48	160.43	4.03	
10	70	150	1x10 ⁻⁷	20	1.62	18771.99	239.73	4.69	
11	30	110	1x10 ⁻⁵	35	0.71	82.42	25.98	2.06	
12	40	120	1x10 ⁻⁵	32	1.01	116.53	49.78	2.91	
13	50	130	1x10 ⁻⁵	30	1.34	154.95	84.35	3.87	L2K1
14	60	140	1x10 ⁻⁵	27	1.70	197.07	132.65	4.93	
15	70	150	1x10 ⁻⁵	25	2.11	243.70	198.86	6.09	
16	30	110	1x10 ⁻⁷	35	0.63	7327.20	25.98	1.83	
17	40	120	1x10 ⁻⁷	32	0.84	9713.19	49.78	2.43	L2K2
18	50	130	1x10 ⁻⁷	30	1.05	12103.01	84.35	3.03	

19	60	140	1x10 ⁻⁷	27	1.25	14497.69	132.65	3.62
20	70	150	1x10 ⁻⁷	25	1.46	16895.83	198.86	4.22



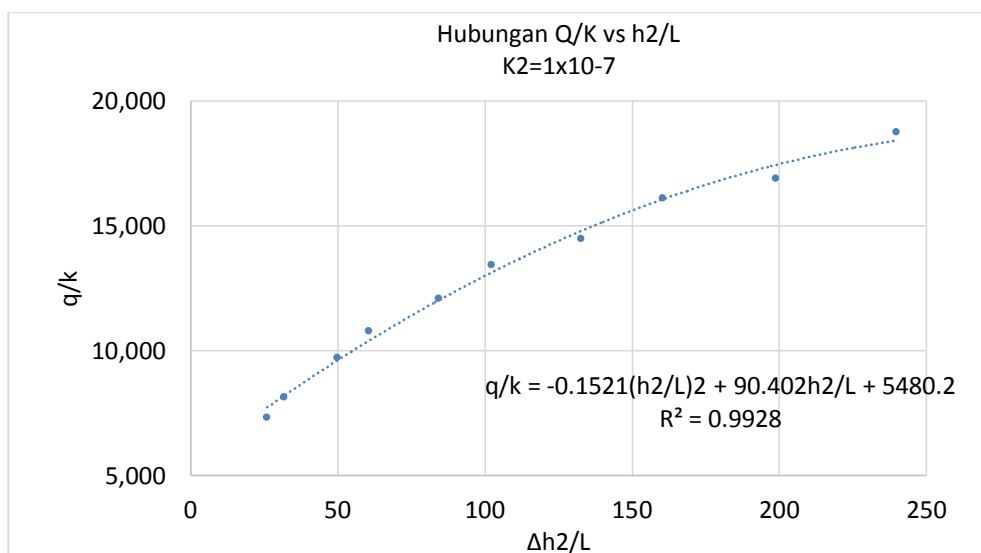
Gambar 6 Grafik hubungan q/k dan Δh²/L



Gambar 7 Grafik regresi polinomial K1

Berdasarkan pemodelan series-2 (koreksi) yang sudah divalidasi, maka dapat dibuat grafik hubungan antara q/k dan $\Delta h^2/L$, yang menghasilkan dua kurva yang berbeda yaitu K1 dan K2 (Gambar 6). Dua kurva yang terbentuk masing-masing mempunyai koefisien korelasi (R^2) 0,9818 dan 0,9625. Perbedaan kurva yang cukup besar terjadi akibat nilai koefisien permeabilitas menghasilkan debit rembesan yang signifikan. Nilai aksis pada dua kurva pada Gambar 6 mempunyai perbedaan *range* yang cukup jauh, maka

diperlukan analisa regresi secara terpisah. Perbedaan kurva ini disebabkan karena pengaruh variabel koefisien permeabilitas (k) yang sangat menentukan profil/kurva korelasi terhadap rembesan. Berkebalikan dengan panjang lintasan (L), variabel elevasi muka air waduk (h) mempunyai korelasi positif secara eksponensial terhadap volume rembesan yang terjadi. Hubungan antara q , k , h dan L secara lebih detail pada masing-masing kurva K1 dan K2 dapat dilihat dalam (Gambar 7 dan Gambar 8).



Gambar 8 Grafik regresi polinomial K2

Grafik karakteristik rembesan dapat digunakan untuk memprediksi rembesan pada sembarang nilai Δh dan L dengan memilih kurva yang sesuai nilai koefisien permeabilitas (K_1 dan K_2). Grafik yang dihasilkan untuk profil rembesan K_1 adalah $q/k = -0.0018(h^2/L)^2 + 1.3496h^2/L + 53.241$ dan profil rembesan K_2 adalah, $q/k = -0.1521(h^2/L)^2 + 90.402h^2/L + 5480.2$.

KESIMPULAN

Koreksi pemodelan dengan cara memperkecil ukuran elemen (meshing) dalam komputasi FEM dapat memperbaiki hasil pemodelan cukup signifikan. Sehingga hasil pemodelan mempunyai simpangan yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil pengukuran instrumen. Simpangan debit (ΔQ) pemodelan awal sebesar 0,58 kali sedangkan simpangan debit setelah dilakukan koreksi model sebesar 0,12 kali. Hasil pemodelan ini telah dilakukan validasi dengan hasil bacaan V-Notch pada Bendungan Jatibarang yang menghasilkan koefien korelasi (R^2) >0.8.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada BPSDM Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat telah memberikan support atas penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Arshad, Imran, and Muhammed Muneer Babar. 2014. "Finite Element Analysis of Seepage through an Earthen Dam by Using Geo-Slope (SEEP/W) Software." *International Journal of Research* 1(8): 619–34.

<http://edupediapublications.org/journals/index.php/ijr/article/view/532>.

Astuti, Yuli, Aniek Masrevariah, and Suwanto Marsudi. 2012. "Analisa Rembesan Bendungan Bajulmati Terhadap Bahaya Piping Untuk Perencanaan Perbaikan Pondasi." *Jurnal Teknik Pengairan* 3(Mei 2012): 51–60. <https://jurnalpengairan.ub.ac.id/index.php/jtp/article/view/147>.

Athani, Shivakumar S., Shivamant, C.H. Solanki, and G.R. Dodagoudar. 2015. "Seepage and Stability Analyses of Earth Dam Using Finite Element Method." *Aquatic Procedia* 4(Icwrcoe): 876–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.110>.

Azdan, M Donny, and Candra R Samekto. 2008. "Kritisnya Kondisi Bendungan Di Indonesia." In *Seminar Nasional Bendungan Besar Indonesia*, Surabaya.

CTI Engineering International. 2008. *Design Review Report Jatibarang Multipurpose Dam*. Semarang.

Dharmayasa, I G. N. Putu, I W. Redana, and Tjok Gde Suwarsa Putra. 2014. "Analisis Keamanan Lereng Bendungan Utama Pada Bendungan Benel Di Kabupaten Jembrana." *Jurnal Spektran* 2(Juli): 68–77. <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jsn/article/view/9597>.

Giglou, Abolfazl Nazari, Taher Nazari Giglou, and Afshar Minaei. 2013. "Seepage through Earth Dam." *Life Science* 10(2s)(2013): 1–4.

Ishbaev, Avazbek, Nora H Pandjaitan, and Erizal Erizal. 2016. "Evaluation of Jatiluhur Dam Safety Based on Risk Index Tools." *Journal of Natural*

- Resources and Environmental Management* 4(2): 111–18.
- Sari, Undayani Cita. 2016. "Kajian Pengaruh Tekanan Air Pori Terhadap Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Sermo." Universitas Diponegoro.
- Sari, Undayani Cita, Sri Prabandiyani Retno Wardani, Suharyanto, and Windu Partono. 2016. "Analisis Tekanan Air Pori Menggunakan Metode Elemen Hingga Dengan Pemodelan Mohr-Coulomb Pada Plaxis." In *Konferensi Nasional Teknik Sipil 10*, Yogyakarta, 675–83.
- Suprpto, Abdullah Husna, and Ahmad Taufiq. 2018. "Under Seepage Analysis Deduced by Multiple Methods: Instrumentation, Modeling, and Hydrogeochemistry, in Kreceng Dam, Cilegon, Indonesia." In *Seminar Pembangunan Dan Pengeloaan Bendungan 2018*, Batam: KNI BB, 1–10.
- Washington Departemen of Ecology. 2005. *Dam Safety Guidelines*. Washington D.C.
- Wulandari, Paravita Sri, and Daniel Tjandra. 2019. "Analisis Pengaruh Fluktuasi Muka Air Waduk Terhadap Stabilitas Lereng Waduk Dengan Menggunakan Program Plaxis 2D." *Media Komunikasi Teknik Sipil* 24(2): 113–21.