

## Analisis Pengaruh Kedalaman Saluran Pengarah Aliran Pada Pelimpah (*Spillway*) Dengan Pemodelan Numerik

Reszha Pahlavi Ali<sup>1,\*</sup>, Wasis Wardoyo<sup>1</sup>, Mahendra Andiek Maulana<sup>1</sup>

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [reszha.pahlavi@gmail.com](mailto:reszha.pahlavi@gmail.com)

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	19 Juni 2022	<i>Design of side spillway caused helicoidal flow. The flow increases the hydrodynamic load on the spillway structure. To prevent this condition, the flow direction channel must be designed with a maximum flow speed of 4 meters/second. Design of the depth flow guide channel is considered to control the flow velocity that occurs so this research is carried out on its influence. In this study, numerical modeling was carried out because it has advantages, time efficiency and research costs. Numerical modeling using the OpenFOAM program because it is an opensource program. Data that required are dimensions, discharge, and water level of previous studies. This study aims to obtain model sensitivity parameters, analyze numerical models of experimental models based on water level profiles, analyze the relationship between the ratio of dam depth and the depth of the flow direction channel to its hydraulic parameters. The results show that the numerical model with OpenFOAM has good performance. That matter indicated by the average RMSE value for each simulation, which is 0.996 and the NASH coefficient value is 0.074. The most sensitive parameter is the mesh density. The ratio (H/P) affects the water level profile above the crest. If the ratio (H/P) getting smaller, then the decrease of water level getting bigger. If the ratio (H/P) getting bigger, then the decrease of water level getting smaller.</i>
Diperbaiki	25 Juli 2022	
Disetujui	25 Juli 2022	

*Keywords: Flow guide channel, flow direction channel, spillway, numerical modelling, OpenFOAM.*

Kata kunci: saluran pengarah aliran, pelimpah, pemodelan numerik, OpenFOAM.

### Abstrak

Desain pelimpah samping berpotensi menimbulkan aliran helicoidal. Aliran tersebut berpotensi meningkatkan beban hidrodinamis pada struktur pelimpah. Untuk mencegah hal tersebut maka saluran pengarah aliran harus didesain kecepatan alirannya maksimal 4 meter/detik. Desain kedalaman saluran pengarah aliran dianggap mampu mengendalikan kecepatan aliran yang terjadi sehingga perlu dilakukan penelitian dari pengaruhnya. Pada penelitian ini dilakukan dengan pemodelan numerik karena memiliki kelebihan yaitu efisiensi waktu dan biaya penelitian. Pemodelan numerik menggunakan program *OpenFOAM* karena merupakan program opensource. Data yang dibutuhkan yaitu dimensi, debit, dan tinggi muka air penelitian sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh parameter sensitivitas model, menganalisis model numerik terhadap model eksperimen berdasarkan profil muka air, menganalisis hubungan antara rasio kedalaman bendungan dan kedalaman saluran pengarah aliran terhadap parameter hidrauliknya. Didapatkan hasil bahwa model numerik dengan *OpenFOAM* memiliki performa yang baik. Hal tersebut ditunjukkan oleh rata-rata nilai RMSE untuk setiap simulasi yaitu 0,996 dan nilai koefisien NASH yaitu 0,074. Parameter yang paling sensitif yaitu kerapatan mesh. Rasio (H/P) berpengaruh terhadap profil muka air diatas mercu. Semakin kecil rasio (H/P) maka, semakin besar penurunan muka air yang terjadi. Semakin besar rasio (H/P) maka semakin kecil penurunan muka air yang terjadi.

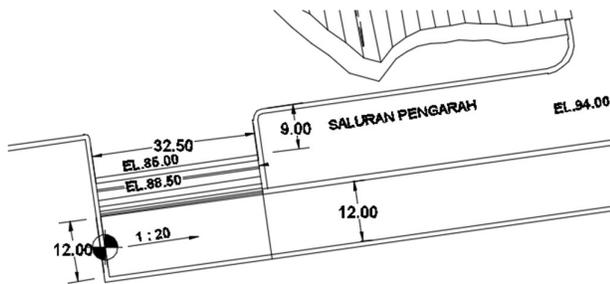
### 1. Pendahuluan

Saluran pengarah aliran merupakan salah satu komponen dari bangunan pelimpah (*Spillway*). Saluran pengarah aliran berfungsi sebagai penuntun dan pengarah aliran agar aliran tersebut dalam kondisi hidraulika yang stabil. Pada buku Bendungan Tipe Urugan, kecepatan aliran pada saluran pengarah maksimum 4 meter/detik, karena apabila melebihi kecepatan tersebut akan menyebabkan aliran bersifat helisoidal, kapasitas pengalirannya menurun, dan akan

berpotensi meningkatkan beban hidrodinamis pada struktur bangunan pelimpah [1].

Dalam perencanaan saluran pengarah, dimensinya ditentukan berdasarkan banyak faktor. Kedalaman dan panjang saluran pengarah aliran ditentukan oleh faktor kondisi geografis bendungan (bentuk kontur dan jenis tanahnya), kapasitas pengaliran pelimpah (*Spillway*), dan debit banjir yang melimpas diatas pelimpah. Sedangkan lebar saluran pengarah pada umumnya menyesuaikan dengan lebar pelimpah.

Saluran pengarah aliran biasanya terletak di hulu pelimpah sebelum mercu pelimpah. Pada umumnya saluran pengarah aliran terdapat pada bendungan yang menggunakan pelimpah jenis pelimpah samping (*side spillway*), terlihat pada **Gambar 1** yang merupakan denah saluran pengarah aliran bendungan logung. Dalam perencanaannya, saluran pengarah aliran masih minim referensi/literatur. Sehingga penelitian ini disusun agar dapat menjadi referensi atau literatur dalam perencanaan saluran pengarah aliran untuk dikembangkan lebih lanjut.



**Gambar 1.** Contoh denah saluran pengarah aliran pada pelimpah samping bendungan logung [2].

Pemodelan saluran pengarah pada penelitian ini dilakukan secara numerik dengan perangkat lunak (*Software*) *OpenFOAM*. Pemodelan tersebut dilakukan hanya 2 dimensi yaitu sumbu vertikal dan horizontal sehingga kemudian bisa dilakukan analisis parameter kecepatan aliran, tinggi muka air, nilai *Froude Number*, dan perubahan energi yang terjadi. Kemudian dari parameter tersebut bisa dianalisis regime aliran yang terjadi sepanjang saluran pengarah sehingga bisa didapatkan hubungan antara rasio kedalaman saluran pengarah aliran dan kedalaman bendungan berdasarkan parameter hidrauliknya.

Dalam pemodelan penelitian ini menggunakan data dimensi penelitian terdahulu [3]. Pada penelitian tersebut menggunakan model pelimpah langsung (*Overflow Spillway*) lalu ditinjau pengaruh bentuk pelimpahnya terhadap parameter hidrauliknya. Tetapi pada pemodelan ini hanya mengadopsi dimensi pelimpah yang berbentuk *Ogee*. Bagaimanapun pemodelan ini merupakan suatu pendekatan dan tidak dapat mewakili data realistik penelitian aslinya.

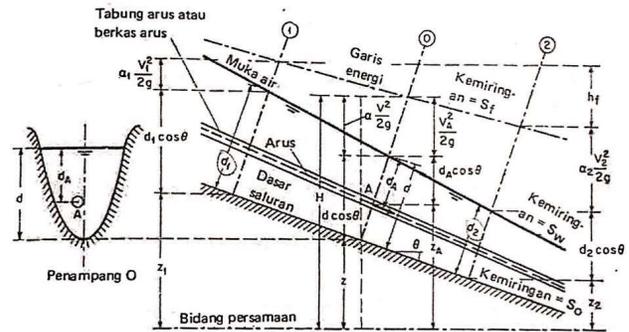
**2. Tinjauan Pustaka**

**2.1 Energi Aliran pada Saluran Terbuka**

Saluran terbuka adalah saluran dimana air mengalir dengan muka air bebas. Tekanan atmosfer pada semua titik di sepanjang saluran permukaan air adalah sama. Aliran pada saluran terbuka atau tertutup yang mempunyai permukaan bebas disebut dengan aliran permukaan bebas (*free surface flow*) atau jua disebut (*open channel flow*). Aliran pada

saluran terbuka terjadi saling ketergantungan antara luas penampang basah, kekentalan fluida (*viskositas*), kemiringan dasar saluran, kekasaran dasar, serta variasi geometrik salurannya.

Dalam prinsip energi, jumlah energi tiap satuan berat dari setiap aliran yang melalui suatu penampang saluran dapat dinyatakan sebagai jumlah tinggi energi (dalam meter) yang besarnya sama dengan jumlah dari ketinggian diatas suatu bidang persamaan, tinggi tekanan, dan tinggi kecepatan dihitung dari suatu datum tertentu [4].



**Gambar 2.** Tinggi energi dalam aliran saluran terbuka berubah lambat laun [4].

Misalnya pada suatu aliran satu dimensi di dalam suatu saluran terbuka dengan kemiringan tinggi seperti pada **Gambar 2**, jumlah tinggi energi *H* pada suatu penampang *O* di titik *A* yang terletak pada suatu garis arus dinyatakan dengan persamaan 1.

$$H = z_A + d_A \cos \theta + \frac{V_A^2}{2g} \tag{1}$$

Dimana,

- H* = Tinggi energi diatas bidang persamaan (m)
- z<sub>A</sub>* = Tinggi titik diatas bidang persamaan (m)
- d<sub>A</sub>* = Dalamnya titik *A* di bawah muka air diukur sepanjang saluran (m)
- θ* = Sudut kemiringan dasar saluran
- V<sub>A</sub>* = Kecepatan arus yang melalui titik *A* (m/det)
- $\frac{V_A^2}{2g}$  = Tinggi kecepatan dari arus yang melalui titik *A* dalam (m)

Umumnya setiap arus yang melalui suatu penampang saluran akan mempunyai tinggi kecepatan yang berbeda-beda berdasarkan distribusi kecepatan yang tidak seragam dalam aliran yang terjadi sesungguhnya. Hanya dalam suatu aliran ideal sejajar dan distribusi kecepatannya seragam, tinggi kecepatan dapat benar-benar sama untuk setiap titik pada penampang melintangnya. Namun, untuk aliran berubah lambat laun (*gradually varied flow*), untuk keperluan praktis dianggap bahwa tinggi kecepatan setiap

titik pada penampang saluran adalah sama, dan untuk mengoreksi semua pengaruh yang diakibatkan oleh distribusi kecepatan yang tidak seragam dipakai suatu koefisien energi ( $\alpha$ ) [4]. Maka, jumlah energi pada penampang saluran dapat ditulis dengan persamaan 2.

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Untuk saluran berkemiringan kecil ( $\theta = 0$ ) maka, jumlah energi pada penampang dapat ditulis dengan persamaan 3.

$$H = z + d + \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

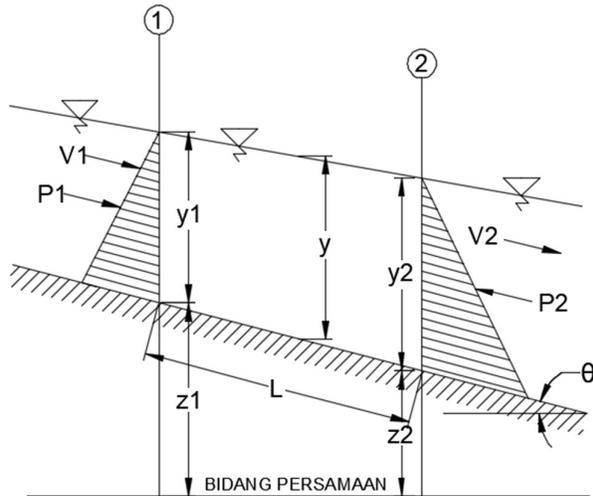
Sehingga menurut prinsip kekekalan energi, jumlah tinggi energi pada penampang 1 di hulu saluran akan sama dengan jumlah tinggi energi pada penampang 2 di hilir ditambah dengan jumlah kehilangan energi diantara kedua penampang ( $h_f$ ) sehingga ditulis menjadi persamaan 4.

$$z_1 + d_1 \cos \theta + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cos \theta + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (4)$$

Persamaan 4 berlaku untuk aliran sejajar atau berubah beraturan.

### 2.2 Momentum Aliran pada Saluran Terbuka

Menurut hukum mekanika fluida, besarnya momentum fluida yang melalui suatu penampang saluran per satuan waktu dinyatakan dengan  $\beta \omega Q V/g$ , dimana  $\beta$  adalah koefisien momentum,  $\omega$  adalah berat jenis fluida, Q adalah debit aliran, V adalah rata-rata kecepatan aliran, dan g adalah gaya gravitasi [4].



**Gambar 3.** Sket suatu volume kontrol untuk menguraikan penerapan hukum momentum [4].

Menurut hukum Newton II, perubahan momentum per satuan waktu dalam suatu volume kontrol adalah sama dengan gaya-gaya yang bekerja pada volume kontrol tersebut [4]. Penerapan prinsip tersebut pada suatu volume kontrol

pada **Gambar 3** diperoleh persamaan momentum (*momentum equation*) yang ditulis dengan persamaan 5.

$$\frac{Q\omega}{g} (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = P_1 - P_2 + W \sin \theta - F_f \quad (5)$$

Dimana :

- Q = Debit aliran (m<sup>3</sup>/det)
- $\omega$  = Berat per satuan volume (kg/m<sup>3</sup>)
- g = Gaya gravitasi (m/det<sup>2</sup>)
- V<sub>1</sub> dan V<sub>2</sub> = Kecepatan rata-rata di penampang 1 dan 2 (m/det)
- P<sub>1</sub> dan P<sub>2</sub> = Resultan gaya yang bekerja pada kedua penampang (N)
- $\beta_1$  dan  $\beta_2$  = Koefisien pada penampang 1 dan 2
- W = Berat fluida di dalam volume kontrol (N)
- $\theta$  = Sudut kemiringan dasar saluran
- F<sub>f</sub> = Gaya akibat dari gesekan dan hambatan yang bekerja sepanjang bidang kontak antara air dan saluran (N)

### 2.3 Perangkat Lunak OpenFOAM

Pemodelan numerik akan dilakukan dengan perangkat lunak (*software*) OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*). OpenFOAM merupakan suatu perangkat lunak (*software*) untuk *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dimiliki oleh OpenFOAM Foundation dan didistribusikan secara eksklusif dibawah *General Public License* (GPL). GPL memberikan kebebasan bagi para pengguna untuk mendistribusikan *software* dan memastikan penggunaannya akan selalu gratis selama dibawah ranah ketentuan lisensi.

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) atau komputasi dinamika fluida adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi pola aliran fluida dan fenomena aliran lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika atau model matematikanya. Pada umumnya proses perhitungan untuk aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan persamaan energi, momentum, dan kontinuitas [5].

Salah satu metode pemodelan numerik yaitu *Finite Volume Method* (FVM). Metode tersebut memiliki keunggulan dapat menyelesaikan geometri domain yang kompleks dan perhitungannya yang relatif sederhana. Oleh sebab itu penyelesaian permasalahan aliran untuk permukaan bebas menggunakan konsep *Volume of Fluid* (VOF) yang menggunakan metode FVM. Konsep VOF membagi dua fase yaitu air dan udara [5]. Sehingga persamaan umum yang digunakan yaitu Navier-Stokes untuk fluida *incompressible*, *unsteady*, dan *viscous* dapat dituliskan sebagai persamaan 6.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}^T = -\nabla P + \nabla (\mu \nabla \mathbf{U} + \rho \mathbf{R}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_\sigma$$

Dimana,

- $u$  = Vektor kecepatan fluida  
berupa (x,y)
- $P$  = Tekanan
- $Re$  = Bilangan Reynolds
- $\mu$  = Viskositas dinamik
- $f$  = Tegangan permukaan

#### 2.4 Kalibrasi Model

Kalibrasi model merupakan suatu proses mengoptimalkan atau secara sistematis menyesuaikan nilai parameter model untuk mendapatkan satu set parameter yang memberikan estimasi terbaik dari pengamatan langsung. Dengan kata lain, proses optimalisasi nilai parameter untuk meningkatkan koherensi antara respons suatu parameter yang teramati dan tersimulasi.

Cara Menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE) adalah dengan mengurangi nilai aktual dengan nilai peramalan kemudian dikuadratkan dan dijumlahkan keseluruhan hasilnya kemudian dibagi dengan banyaknya data. Hasil perhitungan tersebut selanjutnya dihitung kembali untuk mencari nilai dari akar kuadrat. Rumus perhitungan dengan metode RMSE ditulis dengan persamaan 7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (7)$$

Dimana :

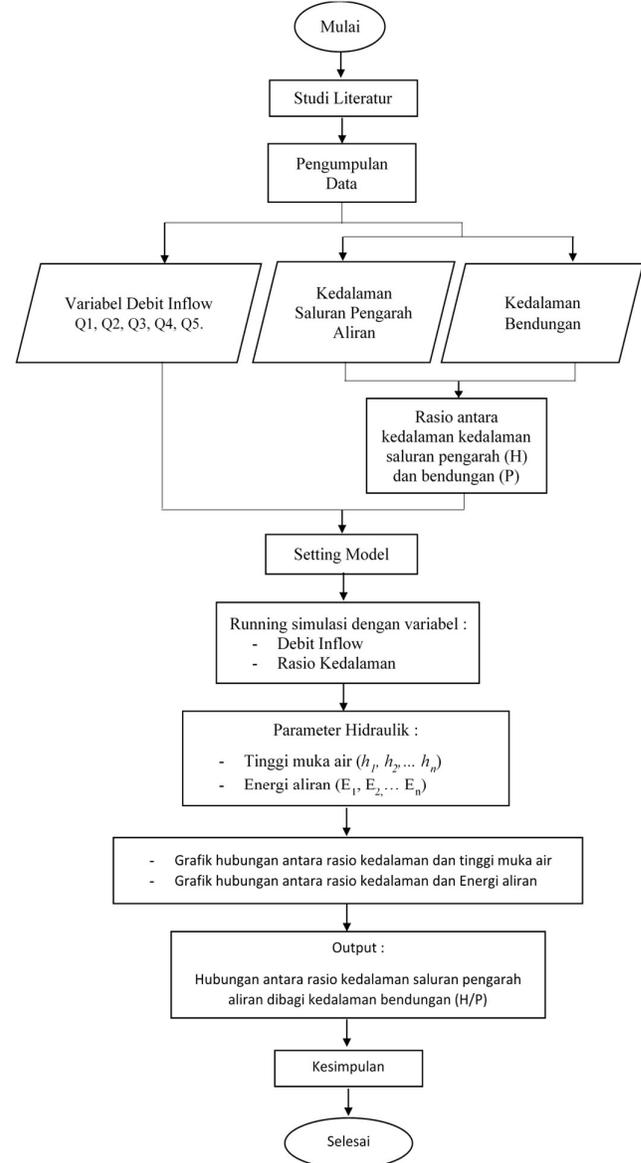
- $A_t$  = Nilai data aktual
- $F_t$  = Nilai hasil pendekatan dengan model
- $z$  = Koordinat sumbu Z
- $n$  = Banyak data
- $\Sigma$  = *Summation* (penjumlahan keseluruhan nilai)

### 3. Metode

Tahapan awal penelitian ini yaitu studi literatur. Ini dilakukan sebagai bahan referensi untuk mengetahui langkah-langkah yang pernah dilakukan oleh instansi ataupun personal yang berhubungan dengan saluran pengarah aliran sehingga penelitian ini dapat disusun dengan baik.

Selanjutnya yaitu pengumpulan data. Data yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data sekunder. Data sekunder yaitu data yang diperoleh dari sumber yang sudah ada. Pada pemodelan ini data sekunder yang pertama, *Upstream Boundary Condition* yang menggunakan 5 variabel debit inflow dari penelitian terdahulu [3]. Kedua, menggunakan data hubungan antara debit dan kecepatan aliran. Untuk setiap debit inflow tersebut memiliki kecepatan aliran yang berbeda-beda sehingga kecepatan aliran dapat digunakan sebagai input *Initial Condition*-nya. Ketiga, menggunakan lebar penampang yang sama sehingga

domainnya seragam. Sedangkan rasio antara kedalaman saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan(H/P) ditentukan yaitu (0,10), (0,20), (0,30), dan (0,40). Untuk bagan alir metode penelitian dapat dilihat pada **Gambar 2**.

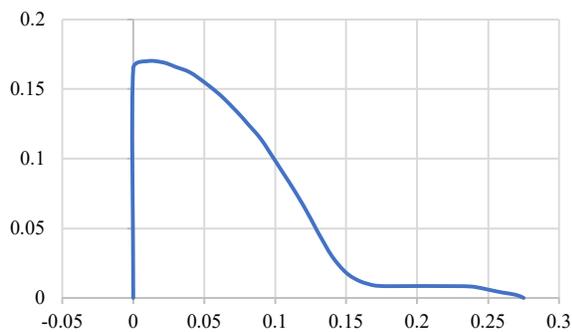


**Gambar 2.** Diagram alir metode penelitian

Simulasi pemodelan numerik dilakukan dengan piranti lunak (*Software*) *OpenFOAM*. Pada tahapan awal yang perlu dipersiapkan untuk simulasi adalah input data dan batasan model yang telah direncanakan. Pemodelan *OpenFOAM* menggunakan data-data dimensi hidrolis penelitian terdahulu [3].

### 3.1 Input Data

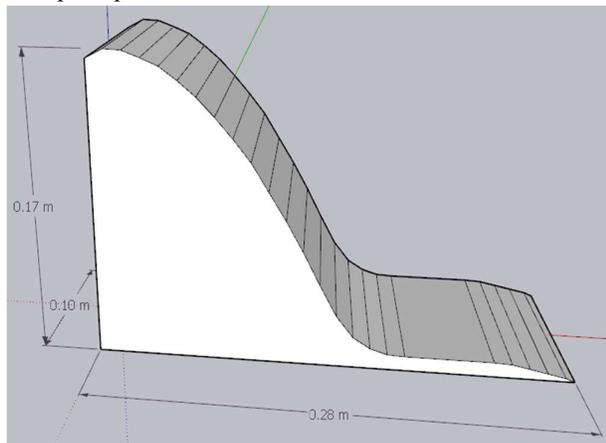
Data hidrolika yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data hidrolika pelimpah tipe *Ogee* dari penelitian Kalita [3]. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan debit tertinggi dari penelitian Kalita yaitu  $Q_5 = 8,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det}$ . Kemudian debit tersebut dilakukan simulasi terhadap 4 variabel rasio kedalaman saluran pengarah dibagi kedalaman bendungan (H/P). Penggunaan debit tertinggi karena keterbatasan aplikasi *OpenFOAM* yang tidak dapat membaca muka air yang terlalu kecil.



**Gambar 4.** Data bentuk pelimpah Kalita [3]

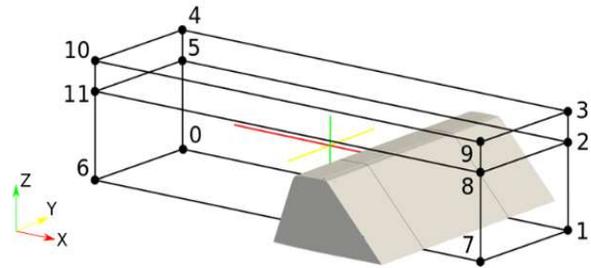
### 3.2 Setting Model

Pada tahapan awal yang perlu dipersiapkan untuk simulasi adalah input data dan batasan model yang telah direncanakan. Pemodelan *OpenFOAM* menggunakan data-data hidrolis Kalita [3]. Berdasarkan data tersebut Kalita melakukan pemodelan dengan eksperimental di laboratorium. Penelitian tersebut menggunakan pelimpah (*Spillway*) dengan tipe *Ogee* dengan tinggi 0,17 meter, panjang 0,26 meter, dan lebar 0,10 meter. Pada pemodelan numeriknya, pelimpah tersebut diletakkan pada jarak 1,3 meter dari ujung hilir saluran dengan asumsi pada jarak tersebut muka air di hulu pelimpah sudah stabil.



**Gambar 5.** Bentuk 3D pelimpah Kalita [3].

Untuk konfigurasi mesh pada pemodelan numerik dapat dilihat pada **Gambar 6** terdapat dua bagian block yaitu bagian atas untuk block udara sedangkan bagian bawah untuk block dari fluida itu sendiri. Untuk keseluruhan block tersebut digunakan mesh dengan ukuran  $0,5 \times 0,5 \text{ cm}$ . Sehingga untuk block sisi bagian bawah (fluida) yang panjangnya 3 meter dan tingginya 0,17 meter, untuk arah x atau vertikalnya dibagi 600 dan untuk arah z horizontalnya dibagi 34. Sedangkan untuk block sisi bagian atas (udara) yang panjangnya 3 meter dan tingginya 0,08 meter, untuk arah x atau vertikalnya dibagi 600 dan untuk arah z horizontalnya dibagi 16.



**Gambar 6.** Sketsa koordinat mesh [5]

Pada penelitian ini digunakan 7 boundary yaitu *inletAir*, *inletWater*, *outlet*, *atmosphere*, *bottomWall*, *front*, *back*. Untuk *inletAir*, *inletWater*, *outlet*, dan *atmosphere* menggunakan boundary tipe *patch*. Untuk *bottomWall* menggunakan boundary tipe *wall*, sedangkan untuk *front* dan *back* menggunakan boundary tipe *empty*.

### 3.3 Running Model

Simulasi pemodelan numerik dengan *OpenFOAM* dilakukan dengan suatu variabel debit inflow dan rasio kedalaman saluran pengarah aliran terhadap kedalaman bendungan. Simulasi pertama dilakukan dengan menggunakan debit tertinggi di penelitian sebelumnya yaitu  $Q_5 = 8,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{det}$  kemudian dimodelkan terhadap salah satu rasio kedalaman saluran pengarah aliran terhadap kedalaman bendungan misal  $H/P = 0,1$ . Simulasi kedua dilakukan dengan debit inflow yang sama ( $Q_5$ ) tetapi menggunakan rasio yang berbeda dengan simulasi pertama yaitu  $H/P = 0,2$ . Simulasi dilakukan hingga rasio yang terakhir sehingga terdapat sekitar 4 simulasi sebagaimana **Tabel 1**.

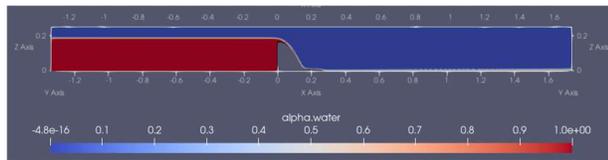
## 4. Hasil dan Pembahasan

*Post processing* merupakan tahapan akhir yang digunakan untuk melihat hasil komputasi pada pemodelan. Pada tahapan ini digunakan program aplikasi *ParaView* yang berbasis 3 Dimensi. Misalnya untuk melihat muka air dari

pemodelan yaitu dengan membuka program aplikasi ParaView, lalu buka file spillway foam dan pilih alpha water maka akan terlihat hasil pemodelan fluida saat melalui bangunan pelimpah seperti **Gambar 7**.

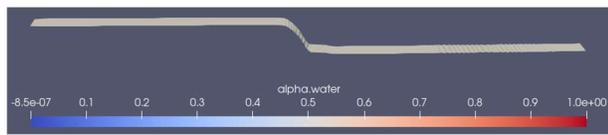
**Tabel 1.** Simulasi pemodelan numerik

No.	Simulasi	Debit			Rasio (H/P)
		Inflow (Q5) (m <sup>3</sup> /s)	b (meter)	h (meter)	
1	Simulasi 1	0,000846	0,08	0,17	Rasio 0
2	Simulasi 2	0,000846	0,08	0,17	Rasio 0,1
3	Simulasi 3	0,000846	0,08	0,17	Rasio 0,2
4	Simulasi 4	0,000846	0,08	0,17	Rasio 0,3
5	Simulasi 5	0,000846	0,08	0,17	Rasio 0,4



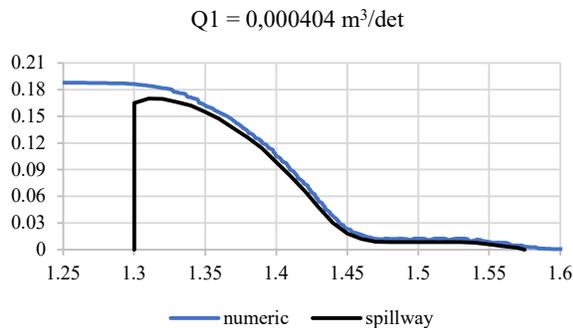
**Gambar 7.** Hasil komputasi muka air (alpha.water)

Untuk melihat tinggi muka air lebih detail bisa digunakan *tool contour* kemudian masukkan nilai value range sebesar 0,5. Angka 0,5 tersebut merupakan representasi dari permukaan fluida yang bebas bergerak (*free surface*). Permukaan air *free surface* dapat dilihat pada **Gambar 8**.



**Gambar 8.** Hasil komputasi muka air bebas (*free surface*)

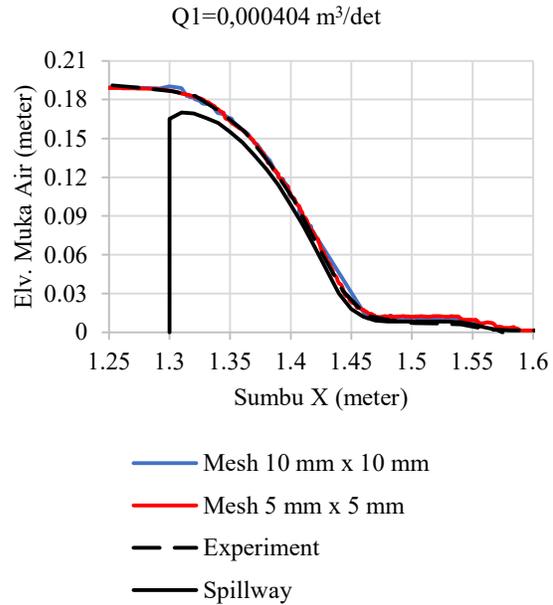
Hasil ekstraksi grafik tinggi muka air dengan jarak dapat dilihat pada **Gambar 9**.



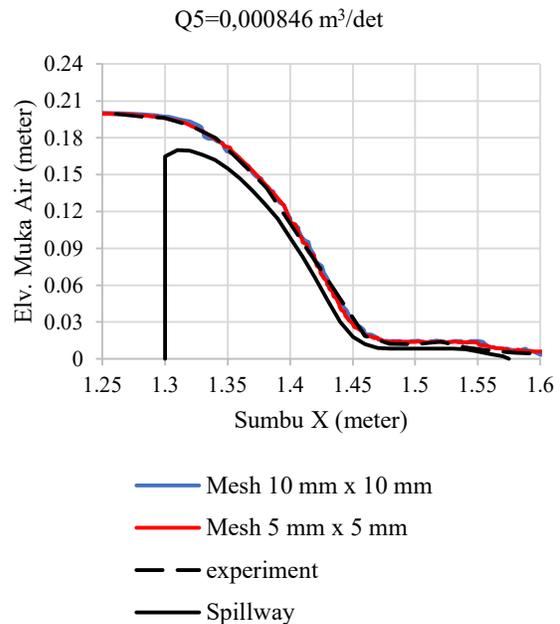
**Gambar 9.** Hasil komputasi muka air bebas (*free surface*)

Analisis sensitivitas bertujuan untuk melihat pengaruh ukuran mesh terhadap muka air hasil simulasi untuk kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen. Dalam

penelitian ini digunakan 2 ukuran mesh yaitu 10 mm x 10 mm dan 5 mm x 5 mm. Dua mesh tersebut kemudian disimulasikan dengan debit terendah yaitu Q1= 0,000404 m<sup>3</sup>/det dan Q5= 0,000846 m<sup>3</sup>/det. Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada **Gambar 10** dan **Gambar 11**.



**Gambar 10.** Hasil pemodelan dengan debit Q1 menggunakan mesh yang berbeda.



**Gambar 11.** Hasil pemodelan dengan debit Q5 menggunakan mesh yang berbeda.

Berdasarkan **Gambar 10** dan **Gambar 11** dapat dilihat bahwa kerapatan mesh sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi. Misalnya pada **Gambar 10** dimana simulasi dilakukan dengan debit terendah yaitu  $Q1= 0,000404$  m<sup>3</sup>/det kemudian dilakukan simulasi dengan variasi mesh berbeda yaitu 10 mm<sup>2</sup> dan 5 mm<sup>2</sup>, hasil yang paling mendekati hasil eksperimennya yaitu simulasi yang dilakukan dengan mesh 5 mm<sup>2</sup>. Terlihat pada sisi hilir pelimpah, perubahan muka air pada simulasi tersebut sangatlah kasar. Namun, sebaliknya pada mesh 10 mm<sup>2</sup> hasil simulasi muka airnya mendekati hasil eksperimennya.

Pada **Gambar 11** dimana simulasi dilakukan dengan debit tertinggi yaitu  $Q5= 0,000846$  m<sup>3</sup>/det. Dapat dilihat bahwa hasil simulasi dengan kerapatan mesh yang lebih kecil yaitu 5 mm<sup>2</sup> hasil muka airnya lebih mendekati hasil muka air eksperimennya. Dan juga sebaliknya, pada sisi hulu di bagian mercu pelimpah dimana muka air hasil simulasi kerapatan mesh 10 mm<sup>2</sup> terdapat ketidakstabilan yang ditunjukkan oleh naik turunnya muka air secara tiba-tiba.

Kalibrasi pemodelan dilakukan untuk mengetahui apakah hasil simulasi model dengan parameter yang sama melenceng atau mendekati hasil eksperimen. Kalibrasi dilakukan terhadap parameter tinggi muka air hasil simulasi *OpenFOAM* dengan hasil eksperimen jurnal Kalita [8]. Pada jurnal tersebut terdapat 5 variabel debit inflow ( $Q1, Q2, Q3, Q4$  dan  $Q5$ ), sehingga kalibrasi muka air dilakukan terhadap 5 variabel debit tersebut dengan menggunakan NASH dan RMSE (*Root Mean Square Error*). Hasil kalibrasi muka air untuk 5 variabel debit dapat dilihat pada **Tabel 2**.

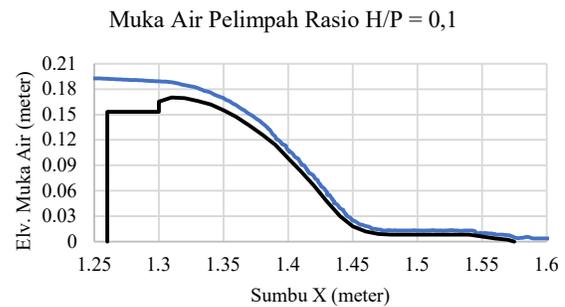
**Tabel 2.** Hasil kalibrasi muka air

No.	Variabel	NASH	RMSE
1	Q1	0,998	0,076
2	Q2	0,993	0,074
3	Q3	0,999	0,072
4	Q4	0,993	0,073
5	Q5	0,998	0,073
Rata-rata		0,996	0,074

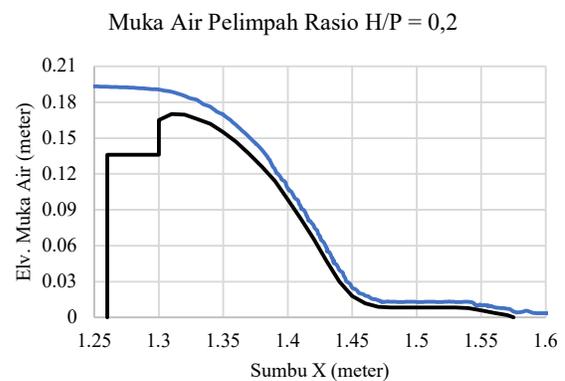
Berdasarkan **Tabel 2** menunjukkan bahwa hasil kalibrasi untuk setiap variabel debit mendekati hasil eksperimen. Hal tersebut ditunjukkan oleh hasil kalibrasi dengan NASH yang apabila nilainya semakin mendekati 1 maka hasil kalibrasinya semakin baik. Begitu juga untuk hasil kalibrasi dengan RMSE yang semakin mendekati 0 maka hasil simulasinya semakin baik. Misalnya saja pada variabel debit  $Q1$  yang nilai NASH nya 0,998 dan RMSE nya 0,076 angka NASH tersebut mendekati 1 dan angka RMSE nya mendekati

0 artinya simulasi dapat dilakukan dengan *OpenFOAM* karena mendekati hasil eksperimennya.

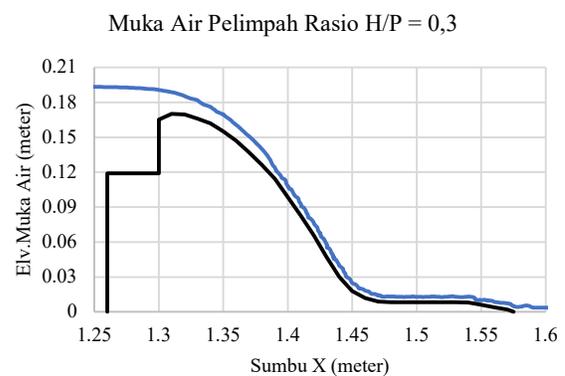
Hasil simulasi model dengan program aplikasi *OpenFOAM* didapatkan profil muka air yang berbeda untuk setiap rasio kedalaman ( $H/P$ ). Hasil simulasi untuk setiap rasio dapat dilihat pada gambar



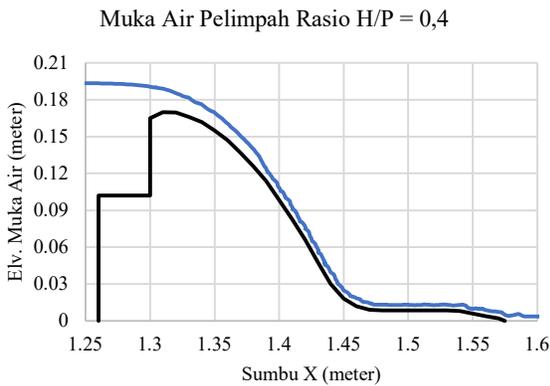
**Gambar 12.** Muka air pelimpah untuk setiap rasio  $H/P = 0,1$



**Gambar 13.** Muka air pelimpah untuk setiap rasio  $H/P = 0,2$

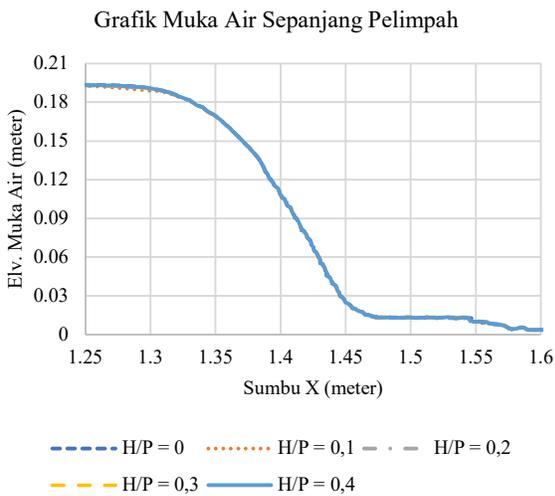


**Gambar 14.** Muka air pelimpah untuk setiap rasio  $H/P = 0,3$



Gambar 15. Muka air pelimpah untuk setiap rasio H/P = 0,4

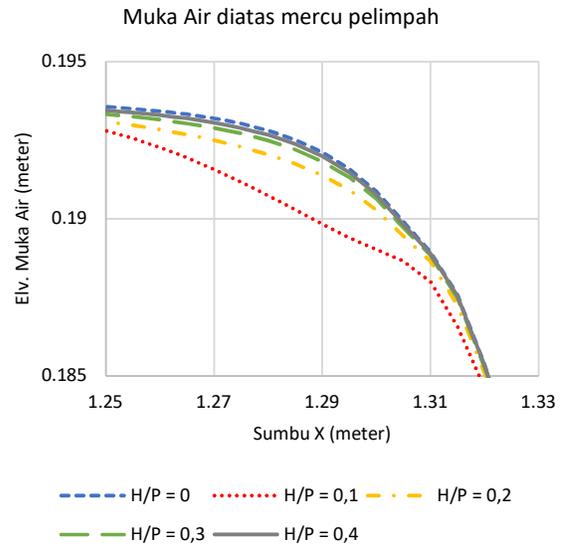
Pada Gambar 12, 13, 14, 15 menunjukkan bahwa grafik muka air untuk setiap rasio kedalaman saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) tidak terlihat pengaruhnya. Untuk lebih jelasnya setiap grafik muka air tersebut harus dijadikan dalam satu grafik sebagaimana Gambar 16.



Gambar 16. Rekapitulasi hasil simulasi muka air dengan OpenFOAM

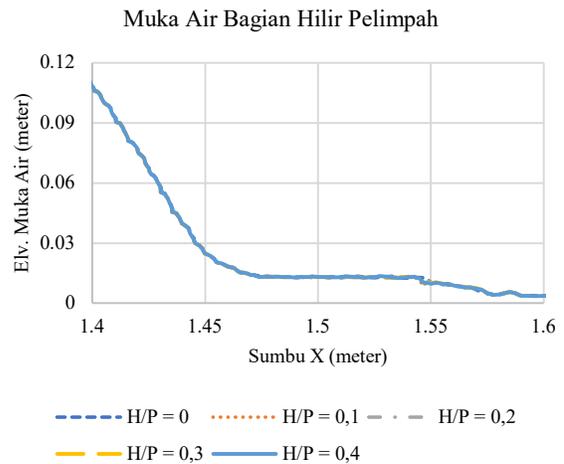
Hasil dari pemodelan dengan OpenFOAM secara keseluruhan terlihat berhimpitan. Artinya pengaruh rasio kedalaman saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) tidak signifikan. Tetapi apabila dilihat dengan skala yang lebih besar ada gradasi warna pada bagian hulu pelimpah. Artinya hasil simulasi rasio rasio kedalaman saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) terdapat pengaruh pada bagian hulu pelimpah tepat diatas

mercu. Agar terlihat lebih jelas maka perlu dilakukan skala grafik untuk melihat lebih jelas muka air di bagian hulu.



Gambar 17. Skala grafik muka air diatas mercu pelimpah.

Gambar 17 dapat menjelaskan bahwa saluran pengarah aliran berpengaruh terhadap profil muka air yang terjadi di atas mercu pelimpah. Hal tersebut ditunjukkan dengan profil muka air selain rasio H/P = 0 (tanpa saluran pengarah aliran), muka airnya berada diatas profil muka air yang lain. Artinya, semakin kecil rasio saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) maka, semakin besar penurunan muka air yang terjadi. Dan sebaliknya, semakin besar rasio saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) maka semakin kecil penurunan muka air yang terjadi.



Gambar 18. Skala grafik muka air di hilir pelimpah.

Pada **Gambar 18** dapat dilihat bahwa muka air untuk setiap rasio tersebut berhimpitan artinya pengaruh rasio H/P terhadap hilir pelimpah sangat kecil. Untuk profil muka air bagian hilirnya tidak terlihat pengaruh rasio saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P).

## 5. Simpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan tentang pengaruh rasio kedalaman saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) didapatkan disimpulkan sebagai berikut:

1. Parameter yang paling sensitif dalam pemodelan menggunakan *OpenFOAM* yaitu kerapatan Mesh atau grid. Semakin rapat mesh atau grid maka hasil yang didapatkan semakin baik.
2. Berdasarkan profil muka air hasil pemodelan dengan *OpenFOAM* dan eksperimen didapatkan hasil yang baik dengan nilai koefisien NASH dan RMSE yaitu 0,996 dan 0,074.
3. Rasio kedalaman saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) berpengaruh terhadap profil muka air diatas mercu pelimpah. Semakin kecil rasio saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) maka, semakin besar penurunan muka air yang terjadi. Dan semakin besar rasio kedalaman saluran pengarah aliran dibagi kedalaman bendungan (H/P) maka semakin kecil penurunan muka air yang terjadi.

## Daftar Pustaka

- [1] S. Sosrodarsono, "*Bendungan Tipe Urugan*", Pradnya Paramita, Jakarta, 2002.
- [2] BBWS Pemali Juana, "*Sertifikasi Desain Pembangunan Bendungan Logung, Kabupaten Kudus, Jawa Tengah*", Jakarta: Kementrian Pekerjaan Umum Direktorat Sumber Daya Air, 2015.
- [3] H.M. Kalita, R. Das, A. Hajong, N. Kumar, D. Kharnaioir, H.C. Dkhar, "*Experimental and Numerical Flow Simulation over Weirs*". New York: John Wiley & Sons, 2019.
- [4] Anggrahini, "*Hidrolika Saluran Terbuka*", Surabaya: Citra Media, 2005.
- [5] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, "*An Introduction to Computational Fluid Dynamics "The Finite Volume Method"*". Department of Civil Engineering, National Institute Technology of Meghalaya, Meghalaya, India, 1995.
- [6] Direktorat Jendral Departemen Pekerjaan Umum, , "*Standar Perencanaan Irigasi – Kriteria Perencanaan 02*", Badan Penerbit Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta, 2010.
- [7] D. Ulfiana, N. Anwar, W. Wardoyo, "*Model test variations of baffled block installation pattern in energy dissipator USBR type III for reduce flow energy*", AIP Conf Proc, 2018;1977.
- [8] E. Goodarzi, J. Farhoudi, N. Shokri, "*Flow characteristics of rectangular broad-crested weirs with sloped upstream face*", J. Hydrol. Hydromech., 60, 2, 87–100, 2012.
- [9] G. P. Galdi, "*An Introduction To The Mathematical Theory Of The Navier Stokes Equations (Steady-State Problems)*", Second Edition, New York: Springer, 2011.
- [10] L. Prasetyorini, D. E. Nurhayati, N. Anwar, W. Wardoyo, "*Pool-Type Fishway on The Sembayat Barrage*", IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 437 (2020) 012011.
- [11] T. M. M. A, Elmageed, "*Flow Over Spillway Chute Channels*", Civil Engineering Department, University of Khartoum, Sudan, 2005.
- [12] United States Departement of Interior Bureau of Reclamation (USBR), "*Appurtenant Structures for Dams (Spillways and Outlet Works) Design Standard*" USBR, Washington, 2014.
- [13] United States Departement of Interior Bureau of Reclamation (USBR), "*Design of Small Dams*", Government Printing Office, Washington, 1987.
- [14] V. L. Streeter, dan E. B. Wylie, "*Mekanika Fluida (Fluid Mechanics)*", 8th edition, Erlangga, Jakarta, 1992.
- [15] V. T. Chow, "*Hidrolika Saluran Terbuka (Open Channel Hydraulics)*", Erlangga, Jakarta, 1997.
- [16] Z. Zachoval, J. Pařilková, L. Rouřar, "*Velocity measurements in front of rectangular broad-crested weir*", Proc. 26th Symp. Anemometry, pp. 113–119 in Czech, 2012.

Halaman ini sengaja dikosongkan