

Permodelan Numerik Aliran pada Pelimpah Bertangga Menggunakan Program Open FOAM

Afkarina Izzati^{1,*}, Umboro Lasminto¹, Satria Damar Negara¹

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: afkarinaizzati95@gmail.com

Info Artikel		Abstract
Diajukan	09 Februari 2021	<i>The flow over steep slope spillways has high velocity and flow energy. It has potential to cause cavitation and scouring the riverbed. Stepped spillway is an alternative construction developed to minimize these dangers. Recently, experimental and numerical modeling by various geometric of steps have been developed. Numerical modeling has strength over experimental modeling in terms of time and research cost. OpenFOAM was chosen for this research because OpenFOAM is open source program that able to modeling multiphase case. The data required in this research was data of previous experimental research, such as geometri of spillway data, flow data, parameter hydraulic for validation. The aim of this research was to know numerical modeling performance, model sensitivity, and energy dissipation. The results indicated that numerical modeling using OpenFOAM have good performance. The range of RMSE In term of water level profile is 0,006–0,013, In term of flow velocity is 0,086–0,217, and in term of energy dissipation is 0,036–0,103. The size of mesh is the most influential parameter to the model result. The flow over stepped spillway of numerical modeling by discharge $Q=0,179 \text{ m}^3/\text{s}$ or $dc/h=1,50 - Q=0,083 \text{ m}^3/\text{s}$ or $dc/h=0,90$ generates energy dissipation 51% – 68%.</i>
Diperbaiki	22 Februari 2021	
Disetujui	23 Februari 2021	

Keywords: stepped spillway, energy dissipation, numerical modeling OpenFOAM, model performance.

Abstrak
Aliran pada pelimpah berkemiringan tinggi memiliki kecepatan dan energi aliran yang besar. Sehingga berpotensi menimbulkan kavitasi dan gerusan dasar sungai. *Stepped spillway* merupakan alternatif meminimalisir bahaya tersebut. Saat ini, permodelan eksperimen maupun numerik dengan berbagai geometri tangga telah dikembangkan. Model numerik memiliki kelebihan dari segi waktu, dan biaya penelitian. OpenFOAM dipilih karena merupakan program *open source* yang dapat memodelkan kasus *multiphase*. Data yang dibutuhkan yaitu data penelitian eksperimen sebelumnya berupa data tangga, pelimpah, debit, kecepatan, dan elevasi muka air. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa model numerik, sensitivitas model, dan besar peredaman energi. Hasil penelitian menyatakan bahwa model numerik OpenFOAM memiliki performa baik. Rentang nilai RMSE profil muka air antara 0,006–0,013, kecepatan aliran antara 0,086–0,217, dan peredaman energi antara 0,036–0,103. Ukuran mesh merupakan parameter paling berpengaruh terhadap hasil model. Aliran pada pelimpah bertangga hasil model numerik dengan rasio debit $dc/h=1,50 - dc/h=0,90$ menghasilkan peredaman energi antara 51% – 68%.

Kata kunci: pelimpah bertangga, peredaman energi, permodelan numerik OpenFOAM, performa model

1. Pendahuluan

Pelimpah merupakan salah satu bangunan pelengkap bendungan yang berfungsi untuk mengalirkan kelebihan air ke sungai bagian hilir. Pelimpah tergolong sebagai saluran berkemiringan tinggi. Kemiringan dasar yang tinggi tersebut menyebabkan air mengalir dengan kecepatan yang besar. Sehingga energi aliran yang dihasilkan menjadi besar. Kondisi tersebut menyebabkan bahaya kavitasi. Kavitasi adalah suatu kejadian yang timbul dalam aliran dengan kecepatan besar sehingga tekanan air menjadi lebih kecil dari pada tekanan uap air maksimum di temperatur itu. Proses ini menimbulkan gelembung-gelembung uap air yang dapat menimbulkan erosi pada konstruksi [1]. Aerasi dapat mencegah atau

mengurangi kerusakan yang diakibatkan oleh kavitasi. Selain itu, adanya udara dalam aliran akan memperbesar volume aliran yang menyebabkan aliran melimpas di atas dinding samping saluran peluncur [2].

Energi aliran yang besar juga berpotensi menggerus dasar sungai yang berada dihilir *spillway*. Sehingga *spillway* biasanya dilengkapi dengan peredam energi pada bagian hilirnya. Semakin besar energi yang harus diredam, semakin panjang kolam olak yang dibutuhkan. Hal tersebut berpengaruh terhadap besarnya biaya konstruksi.

Oleh sebab itu, saat ini banyak dikembangkan penelitian untuk memperoleh alternatif peredaman energi melalui modifikasi geometri *spillway*. Konsep dari modifikasi

tersebut yaitu dengan memberikan peredaman energi secara bertahap berupa anak tangga sepanjang dasar *spillway* yang dikenal dengan *stepped spillway*. Keuntungan *stepped spillway* adalah kemudahan konstruksi, pengurangan potensi resiko kavitasi, dan pengurangan dimensi kolam penenang di bagian hilir kaki *spillway* karena peredaman energi yang signifikan di sepanjang saluran [3].

Penelitian mengenai pola aliran dan peredaman energi pada *stepped spillway* dengan berbagai variasi geometri telah banyak dilakukan dengan permodelan eksperimen laboratorium maupun permodelan numerik. Telah dilakukan penelitian *stepped spillway* dengan berbagai modifikasi permodelan eksperimen [4]–[6]. Demikian juga penelitian permodelan numerik telah dilakukan [7], [8].

Saat ini, permodelan numerik lebih dipilih karena memiliki beberapa kelebihan diantaranya kecepatan dalam komputasi, mampu menyajikan output penelitian yang lebih detail, menghemat biaya dan waktu pelaksanaan penelitian. Walaupun demikian, model numerik memiliki keterbatasan karena tidak mampu memodelkan kondisi yang ada di alam sehingga membutuhkan suatu pendekatan model. Selain itu terdapat parameter tertentu yang sangat mempengaruhi hasil model sehingga perlu dilakukan validasi dengan hasil penelitian eksperimen sebelumnya untuk menghasilkan tingkat korelasi model yang mendekati sempurna.

Model CFD (*Computational Fluid Dynamic*) yang akan digunakan untuk penelitian ini yaitu program OpenFOAM. Program OpenFOAM merupakan salah satu program *open source* yang dapat digunakan secara gratis dan mampu memodelkan kasus *multiphase*. Validasi model numerik ini berdasarkan hasil model eksperimen [5].

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan performa model numerik terhadap model eksperimen laboratorium ditinjau dari profil muka air, kecepatan aliran, dan peredaman energi. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan referensi atau bahan pertimbangan bagi instansi terkait dalam menentukan desain peredam energi pada *spillway* atau aplikasi saluran berkemiringan tinggi lain.

2. Tinjauan Pustaka

2.1. Energi Aliran

Jumlah energi dari setiap aliran yang melalui suatu penampang saluran dinyatakan sebagai jumlah tinggi air yang setara dengan jumlah dari tinggi di atas suatu bidang persamaan, tinggi tekanan, dan tinggi kecepatan [9]. Tinggi energi aliran dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$H = z_A + d_A \cdot \cos\theta + \frac{v_A^2}{2g} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan:

H = Tinggi energi aliran (m)

z_A = Tinggi titik A diatas bidang persamaan (m)

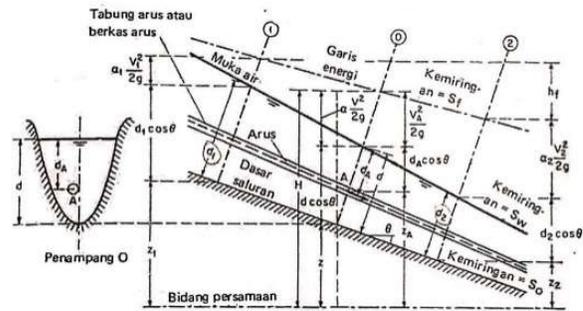
d_A = Kedalaman titik A di bawah muka air diukur sepanjang penampang saluran (m)

θ = Sudut kemiringan dasar saluran ($^\circ$)

v_A = Kecepatan arus yang mengalir melalui A (m/s)

g = Percepatan gaya gravitasi bumi (m/s^2)

Menurut prinsip kekekalan energi, jumlah tinggi energi penampang 1 di hulu akan sama dengan jumlah tinggi energi pada penampang 2 di hilir akan sama dengan jumlah tinggi hf diantara kedua penampang [9].



Gambar 1. Energi Aliran Saluran Terbuka [9]

Persamaan energi dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$z_1 + d_1 \cdot \cos\theta + \alpha \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + d_2 \cdot \cos\theta + \alpha \frac{v_2^2}{2g} + h_f \dots\dots(2.2)$$

dengan:

z_1 = Tinggi titik A diatas bidang persamaan I (m)

d_1 = Kedalaman titik A di bawah muka air diukur sepanjang penampang I (m)

v_1 = Kecepatan aliran melalui A pada penampang I (m/s)

z_2 = Tinggi titik A di atas bidang persamaan penampang 2 (m)

d_2 = Kedalaman titik A di bawah muka air diukur sepanjang penampang 2 (m)

v_2 = Kecepatan aliran melalui A pada penampang 2 (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

h_f = Kehilangan tinggi energi (m)

Energi spesifik dalam suatu penampang saluran dinyatakan sebagai energi air setiap penampang saluran dan diperhitungkan terhadap dasar saluran [9]. Untuk saluran yang berkemiringan kecil dan $\alpha=0$, maka energi spesifik dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$E = d + \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan:

E = Energi spesifik (m)

d = Kedalaman (m)

Q = Debit aliran (m³/s)

A = Luas penampang basah (m²)

v = Kecepatan aliran (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

Kehilangan energi merupakan perbedaan energi spesifik sebelum dan setelah terjadi loncatan. Besar kehilangan energi dapat dirumuskan sebagai berikut [9]:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^2}{4 \cdot y_1 \cdot y_2} \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan:

- ΔE = Kehilangan energi
- E_1 = Tinggi energi di hulu saluran
- E_2 = Tinggi energi di hilir saluran
- y_1 = Kedalaman air di hulu saluran
- y_2 = Kedalaman air di hilir saluran

2.2. Prinsip Energi dan Momentum

Menurut hukum Newton II tentang gerakan, perubahan momentum persatuan waktu dalam air mengalir pada saluran adalah sama dengan resultante semua gaya gaya luar yang bekerja pada kedua tampang aliran yang ditinjau. Pada saluran dengan kemiringan tinggi, penerapan rumusan perubahan momentum per satuan waktu aliran diantara tampang 1 dan 2 dikenal dengan persamaan momentum [9]. Adapun persamaan tersebut sebagai berikut.

$$\frac{Q \cdot \omega}{g} (\beta_2 \cdot v_2 - \beta_1 \cdot v_1) = P_1 - P_2 + W \cdot \sin \theta - F_f \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan:

- Q = Debit (m^3/s)
- ω = Berat per volume air (kg/m^3)
- β_1 = Koefisien Momentum pada penampang 1
- v_1 = Kecepatan aliran di penampang 1 (m/s)
- β_2 = Koefisien Momentum pada penampang 2
- v_2 = Kecepatan aliran di penampang 2 (m/s)
- P_1 = Tekanan pada penampang 1
- P_2 = Tekanan pada penampang 2
- W = Berat air diantara kedua penampang
- θ = Sudut kemiringan terhadap bidang datar ($^\circ$)
- F_f = Gaya luar dari gesekan dan tahanan yang bekerja di sepanjang bidang kontak antara air dan dasar saluran.

2.3. Froude Number

Angka Froude (F_r) merupakan parameter tidak berdimensi yang membandingkan gaya kelembaman dan gaya gravitasi. Angka Froude dirumuskan sebagai berikut:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} \dots \dots \dots (2.6)$$

dengan:

- F_r = Angka Froude
- V = Kecepatan (m/s)
- g = Gravitasi (m/s^2)
- h = Kedalaman aliran (m)

Karakteristik aliran berdasarkan angka Froude [10]

1. Aliran sub kritis ($Fr < 1$)
2. Aliran kritis ($Fr = 1$)
3. Aliran superkritis ($Fr > 1$)

2.4. Reynold Number

Angka Reynold (Re) merupakan parameter tidak berdimensi yang digunakan sebagai dasar untuk membedakan sifat aliran [10]. Angka Reynold dirumuskan sebagai berikut:

$$Re = \frac{v \cdot R}{U} \dots \dots \dots (2.7)$$

dengan:

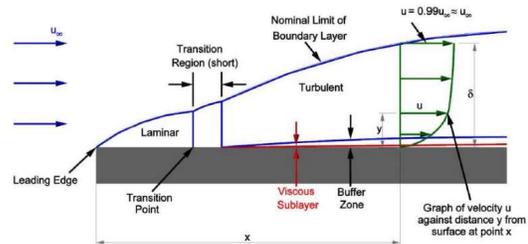
- Re = Angka Reynolds
- v = Kecepatan aliran (m/s)
- R = Jari-jari hidrolis (m)
- U = Kekentalan kinematik (m^2/s)

Karakteristik aliran berdasarkan bilangan Reynold [10]

1. Aliran laminar ($Re < 500$)
2. Aliran transisi ($500 \leq Re \leq 12.500$)
3. Aliran turbulen ($Re > 12.500$)

2.5. Boundary Layer

Boundary layer atau lapisan batas adalah suatu lapisan aliran setebal δ di atas batas aliran dimana kecepatan aliran mendapat hambatan dari pengaruh kondisi batas aliran tersebut. Tebal lapisan batas δ pada dasarnya ditentukan sebagai jarak dari permukaan batas aliran sampai suatu titik dimana kecepatan aliran $u = 0,995 u_e$, dengan pengertian bahwa u_e sama dengan kecepatan aliran di dalam lapisan luar [10]



Gambar 2. Aliran Fluida di atas Permukaan Flat Plate [11]

2.6. Program OpenFOAM

a. Computational Fluid Dynamic (CFD)

CFD adalah sebuah cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode dan algoritma numerik untuk menganalisa masalah yang menyangkut aliran fluida atau sedikitnya beberapa fenomena fisika yang dimodelkan sebagai aliran fluida. Terdapat tiga tahapan dalam penggunaan CFD yaitu *pre processing*, *solving*, dan *post processing* [12].

b. Metode Volume of Fluid (VOF)

Metode VOF diperkenalkan oleh Hirt dan Nichols [13]. Dalam model ini, fluida dibagi menjadi dua fase yaitu fase air dan udara dengan proporsi volume α . Persamaan umum yang digunakan berdasarkan persamaan Navier-Stokes untuk fluida tidak terkompresi:

$$\nabla \cdot U = 0$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U U^T = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu \nabla U + \rho R] + \rho g + f_\sigma \dots (2.8)$$

dengan:

U = Vector kecepatan fluida

P = Tekanan fluida

μ = Viskositas dinamis ($\rho \nu$)

G = Percepatan gravitasi

R = Tensor tekanan Reynold

F = Tegangan permukaan

ρ = densitas

ν = viskositas kinematika campuran dimana untuk dua tipe fluida dihitung berdasarkan fraksi volume α :

$$\rho = \rho_1 \alpha + \rho_2 (1 - \alpha) \dots (2.9)$$

$$\nu = \nu_1 \alpha + \nu_2 (1 - \alpha) \dots (2.10)$$

c. Model Komputasi OpenFOAM

OpenFOAM atau *Open Field Operation and Manipulation* adalah sebuah platform untuk analisis umum komputasi fluida dinamik dengan menggunakan metode volume hingga (*Finite Volume*) [14]. Metode volume hingga untuk penyelesaian persamaan umum model diselesaikan dengan metode teori divergen Gauss. Domain model dibagi menjadi beberapa volume kontrol. Masing-masing volume kontrol tidak berpotongan satu sama lain. Karena tidak ada batasan jumlah sisi volume kontrol, bentuk volume kontrol dapat menyesuaikan dengan domain model yang diinginkan.

d. *Multiphase Flow*

Program OpenFOAM memiliki beberapa solver untuk incompressible maupun compressible. InterFoam merupakan solver untuk menyelesaikan kasus *multiphase flow* dengan pendekatan VOF.

e. Model turbulen OpenFOAM

Terdapat 2 macam model turbulen pada *solver* interFoam di OpenFOAM yaitu Reynolds Average Simulation (RAS), dan Large Eddy Simulation (LES). K-Epsilon dan realizable KE merupakan bagian dari model RAS [15].

2.7. Uji Keandalan Model

Salah satu jenis uji keandalan Model yaitu RMSE. Tujuan *Root Mean Square Errors* (RMSE) yaitu untuk mempresentasikan rata-rata kuadrat simpangan (selisih) antara nilai keluaran model terhadap nilai pengukuran atau target. Nilai

RMSE yang semakin mendekati nol artinya hasil model tersebut semakin mendekati hasil lapangan. Berikut ini adalah rumus perhitungan untuk metode RMSE:

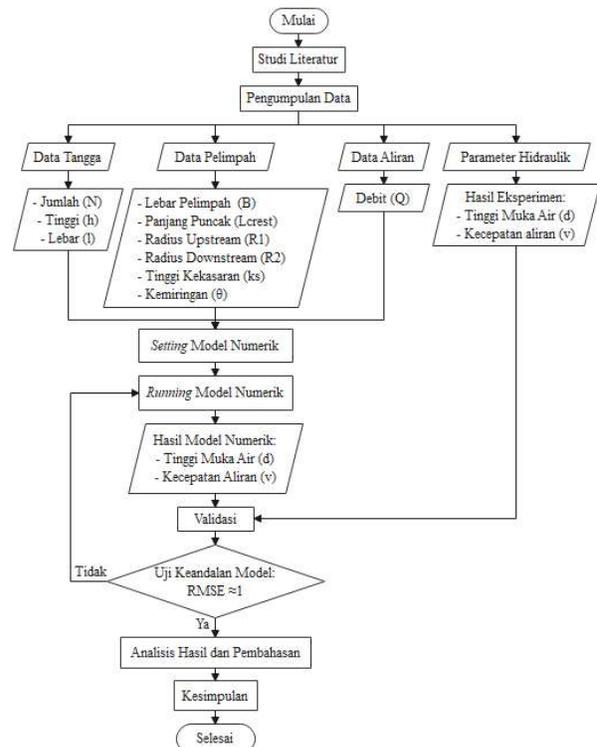
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{obs} - y_{mod})^2} \dots (2.11)$$

Dimana :

y_{obs} = Kedalaman air hasil pengamatan dilapangan (m)

y_{mod} = Kedalaman air hasil pemodelan (m)

3. Metode

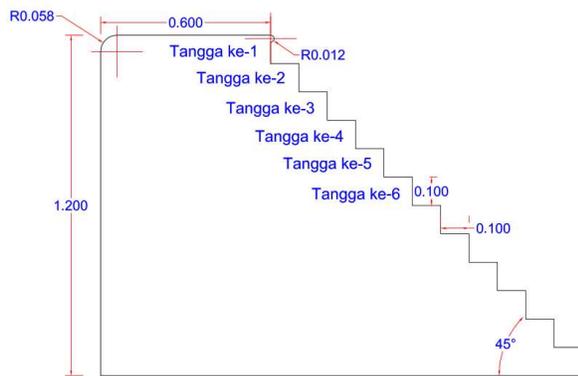


Gambar 3. Flowchart Permodelan Numerik

Penelitian ini menggunakan permodelan numerik dengan program OpenFOAM, Langkah-langkahnya seperti terlihat pada Gambar 3. OpenFOAM merupakan salah satu model *Computational Fluid Dynamic* (CFD) yang menggunakan metode *Volume of Fluid* (VoF) untuk menyelesaikan kasus *multiphase*. Dalam penelitian ini, digunakan model 2D vertikal. Spasial arah x dan z, komponen y tidak ditinjau.

3.1. Data Input

Data yang digunakan untuk penelitian ini yaitu data eksperimen sebelumnya, antara lain data geometri pelimpah, tinggi kekasaran (ks), debit (Q), dan parameter hidraulik hasil eksperimen meliputi tinggi muka air (d), dan kecepatan (v). Data-data untuk input model sebagai berikut. Material dasar pelimpah model eksperimen penelitian sebelumnya berupa besi. Maka, nilai tinggi kekasaran (ks) yaitu 0,0002 m.



Gambar 4. Data Geometri Pelimpah [5]

Tabel 1. Data Debit [5]

No.	Q (m ³ /s)	B (m)	dc (m)	h (m)	dc/h
1	0.179	0.985	0.150	0.1	1.50
2	0.145	0.985	0.130	0.1	1.30
3	0.112	0.985	0.110	0.1	1.10
4	0.098	0.985	0.100	0.1	1.00
5	0.083	0.985	0.090	0.1	0.90

3.2. Setting Model

Beberapa hal yang perlu dilakukan pada tahap *setting* model yaitu membuat geometri pelimpah, mengatur *physical parameter*, membuat *mesh*, mengatur kondisi awal model dan *boundary condition*.

3.3. Running Model

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan lima variasi debit. Simulasi dilakukan hingga aliran stabil. *Solver* yang digunakan untuk menyelesaikan kasus *multiphase* ini yaitu *interFoam*.

3.4. Validasi dan Uji Keandalan Model

Hasil simulasi dalam penelitian ini yaitu tinggi muka air (d) dan kecepatan aliran (v) dari berbagai debit. Dalam penelitian ini, proses validasi menggunakan hasil eksperimen penelitian pelimpah bertangga oleh Chanson, et al. Uji keandalan model menggunakan persamaan *Root Mean Square Errors* (RMSE). Model dikatakan akurat apabila nilai RMSE mendekati satu (1) artinya hasil model numerik mendekati model eksperimen. Apabila tidak mendekati angka tersebut, maka diperlukan simulasi kembali dengan mengubah *mesh* atau parameter-parameter lain yang mempengaruhi model.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Tahap Permodelan Pelimpah

a. Membuat Geometri Model

Geometri pelimpah untuk input OpenFOAM berformat .stl. Sehingga dalam penelitian ini digunakan Autocad untuk membuat file 2D berformat .dwg. File tersebut digunakan sebagai input membuat file 3D berformat .stl pada Sketchup.

b. Mengatur *Physical Properties*

Terdapat 3 *directory* yang perlu disiapkan yaitu folder 0, folder constant, dan folder system. Adapun penjelasan file yang terdapat pada masing-masing folder sebagai berikut:

- *Setting 0 Directory*

Pada file alpha.water dilakukan *setting* kondisi awal air pada $t=0$ setinggi pelimpah dengan mengatur nilai *internalField* menjadi "1". *Setting* kedalaman air dan batasannya diatur pada file *setFields*. Pada file U dilakukan *setting* kecepatan aliran pada boundary *InletWater*. Misal untuk debit $Q=0,179$ m³/s, kecepatan yang diinput yaitu 0,151 m/s. Pada file k dilakukan *setting* energi kinetik turbulen pada setiap *boundaryField*. Sebesar 0,0000447 m³/s². Pada file epsilon dilakukan *setting* dissipasi energi kinetik turbulen pada setiap *boundaryFields* sebesar 0,000000713 m²/s³. Pada file nut dilakukan *setting* kekasaran dinding model dengan *nutkRoughWallFunction*. Tinggi kekasaran $ks = 0,0002$ m. untuk material besi Tingkat keseragaman $Cs = 0,5$ untuk kekasaran yang seragam.

- *Setting Constant Directory*

Folder *triSurface* berisi file 3D dengan format .stl yang yang telah disiapkan sebelumnya. Pada file *boundary* terdapat 2 jenis *boundary* yaitu *patch* dan *wall*. *Patch* digunakan pada *boundary inlet*, *outlet*, *atmosphere*. Sedangkan *wall* digunakan pada *boundary* dasar pelimpah untuk mendefinisikan *wall function*. Pada file g dilakukan *setting* nilai percepatan gravitasi sebesar -9,81 m/s². Arah positif sumbu x model yaitu ke atas. Karena arah gravitasi bumi ke bawah, maka gravitasi disetting minus. Pada file *transportProperties* dilakukan *setting* viskositas dan massa jenis air serta udara. Pada file *turbulenceProperties* dan *RASProperties* dilakukan *setting* model turbulen. Dalam simulasi ini digunakan tipe RAS dengan model *realizableKE*.

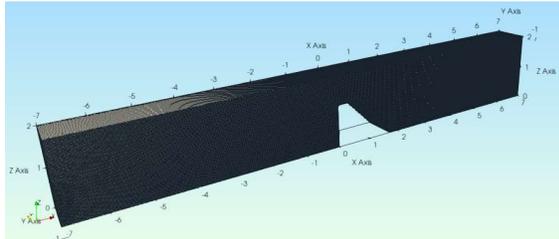
- *Setting System Directory*

System *directory* terdiri dari beberapa dictionary antara lain *blockMeshDict*, *controlDict*, *extrudeMeshDict*, *fvSchemes*, *fvSolution*, *meshQualityDict*, *setFieldsDict*, *snappyHexMeshDict*, *surfaceFeatureExtractDict*.

c. Generate Mesh

Dalam penelitian ini, terdapat 2 block yaitu block air dan block udara seperti terlihat pada Gambar 5. Panjang *mesh* 14 m dan tinggi *mesh* block air 1,2 m dan tinggi *mesh* block udara 0,8 m. File .stl diextract menggunakan *surfaceFeature*

Extract menghasilkan file .eMesh. Selanjutnya dilakukan pemotongan blockMesh menggunakan snappyHexMesh. Mesh arah y hasil snappyHexMesh terbagi menjadi beberapa cell. Sehingga perlu dilakukan extrudeMesh karena merupakan model 2D.



Gambar 5. Mesh Ukuran 2,5cm x 2,5cm

d. *Setting* Kondisi Awal Model dan *Boundary Condition*

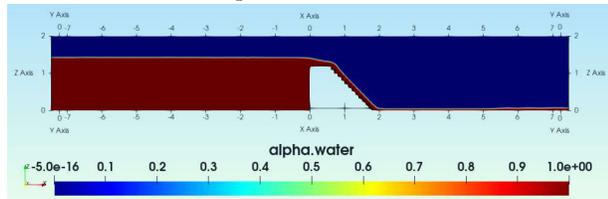
Pada model ini terdapat 8 *boundary*. Karena model disimulasi secara 2D, maka pada *boundary front* dan *back* diatur *empty*. Kondisi awal air pada model diasumsikan setinggi 1,2 m untuk mempercepat proses running melalui pengaturan pada file alpha.water dan setFields.

e. Proses Komputasi

Solver yang digunakan untuk menyelesaikan kasus *multiphase* ini yaitu *interFoam*. Simulasi model dilakukan selama 25 detik.

f. *Post Processing*

Output simulasi ditampilkan melalui *paraview*. Pada Gambar 6 terlihat tampilan kondisi muka air di detik ke-25.



Gambar 6. Tampilan alphawater

Hasil muka air yang diamati yaitu pada *alphawater* 0,5 sebagai representasi *free surface*. Tampilan muka air *alphawater* 0,5 pada debit $Q=0.179 \text{ m}^3/\text{s}$ atau $dc/h=1.50$ terlihat pada Gambar 7.

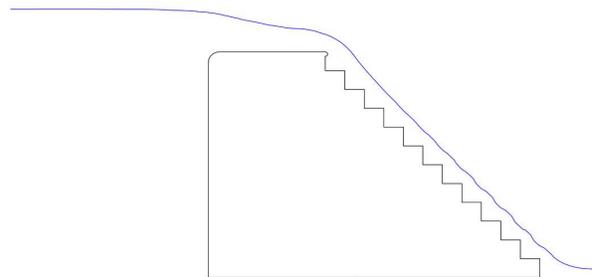
4.2. Validasi Model

Dalam penelitian ini, dilakukan validasi terhadap pengaruh ukuran mesh dan pengaruh model turbulen. Hasil simulasi numerik dibandingkan dengan hasil eksperimen melalui uji keandalan RMSE. Hasil uji keandalan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Validasi Uji Keandalan Model

Model turbulen	Ukuran Mesh	RMSE		
		Muka Air (m)	Kecepatan (m/s)	Peredaman Energi (m)
Realizable k- ϵ	2.5 cm x 2,5 cm	0.011	0.147	0.043
	4 cm x 4 cm	0.014	0.196	0.046
Standard k- ϵ	2.5 cm x 2,5 cm	0.011	0.148	0.045
	4 cm x 4 cm	0.013	0.194	0.049

Hasil validasi menyatakan bahwa mesh berukuran 2,5 cm x 2,5 cm dengan model *realizable k- ϵ* menghasilkan performa model yang paling baik.



Gambar 7. Muka Air Hasil Simulasi $dc/h=1,50$ atau $Q = 0,179 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3. Simulasi Variasi Debit

a. Profil Muka Air

Tinggi muka air yang dianalisis yaitu pada *alphawater* 0,5 sebagai representasi dari *free surface*. Grafik pola muka air tersebut dapat dilihat pada Gambar 8.

Tabel 3. Hasil Uji Keandalan Model Profil Muka Air

No	Q (m^3/s)	dc/h	RMSE (m)
1	0.179	1.50	0.011
2	0.145	1.30	0.013
3	0.112	1.10	0.006
4	0.098	1.00	0.008
5	0.083	0.90	0.009

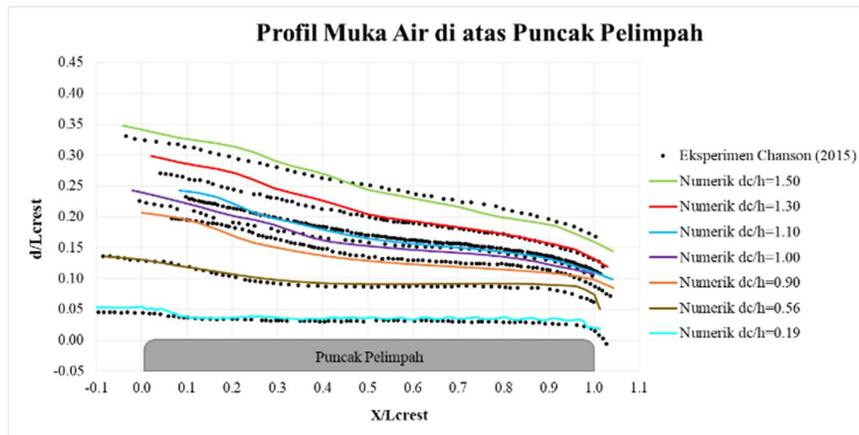
Berdasarkan Tabel 3, dapat diketahui bahwa model memiliki performa yang baik dengan rentang nilai RMSE antara 0,006 – 0,013.

Pola aliran pada Gambar 8 dibedakan menjadi 3 regim aliran yaitu *nappe flow*, *transition flow*, dan *skimming flow*.

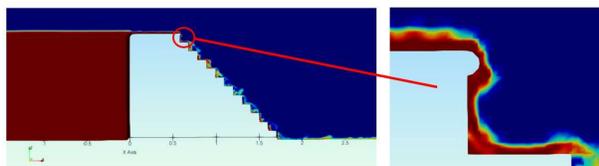
• *Nappe flow*

Pada permodelan ini, regim aliran *Nappe Flow* terjadi pada $dc/h=0,19$. Pola aliran yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 9.

Aliran berjenis ini terjadi karena debit yang mengalir relatif kecil sehingga terjadi aliran jatuh bebas. Air jatuh menuju anak tangga dibawahnya.



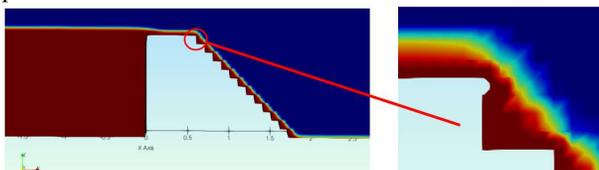
Gambar 8. Perbandingan Profil Muka Air di Atas Puncak Pelimpah Hasil Model Numerik dan Eksperimen



Gambar 9. Muka Air Kondisi *Nappe Flow* pada $dc/h=0.19$

• *Transition Flow*

Aliran ini terjadi pada $dc/h=0,56$ sampai dengan $dc/h=1,10$. Tampilan pola aliran hasil simulasi dapat dilihat pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Muka Air Kondisi *Transition Flow* pada $dc/h=0.56$

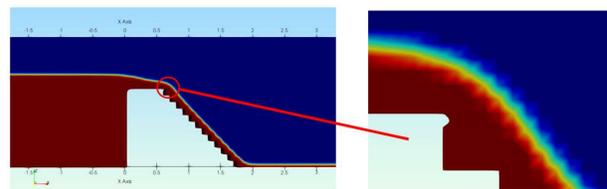
Berdasarkan **Gambar 10**, terlihat aliran memiliki pancaran air yang kuat melimpas pada ujung tangga mendekati kondisi stagnasi dan adanya permukaan aliran turbulen.

• *Skimming Flow*

Skimming flow terjadi pada $dc/h=1,30$ dan $dc/h=1,50$. Pada aliran ini, air yang mengalir pada permukaan bertangga tidak terputus. Tampilan hasil simulasi terlihat pada **Gambar 11**.

Berdasarkan pola aliran **Gambar 11** di bagian hulu dekat puncak, alirannya nampak halus dan tidak terjadi pemasukan udara. Namun, di hilirnya karakteristik aliran sebagian besar mengandung udara dan terjadi pusaran air yang kuat di setiap kaki tangga. Oleh karena itu, peredaman energinya sebagian

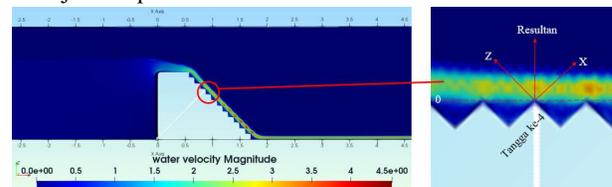
besar ditentukan oleh perpindahan momentum antara aliran utama dan putaran air yang terjebak di antara tangga.



Gambar 11. Muka Air Kondisi *Skimming Flow* pada $dc/h=1.50$

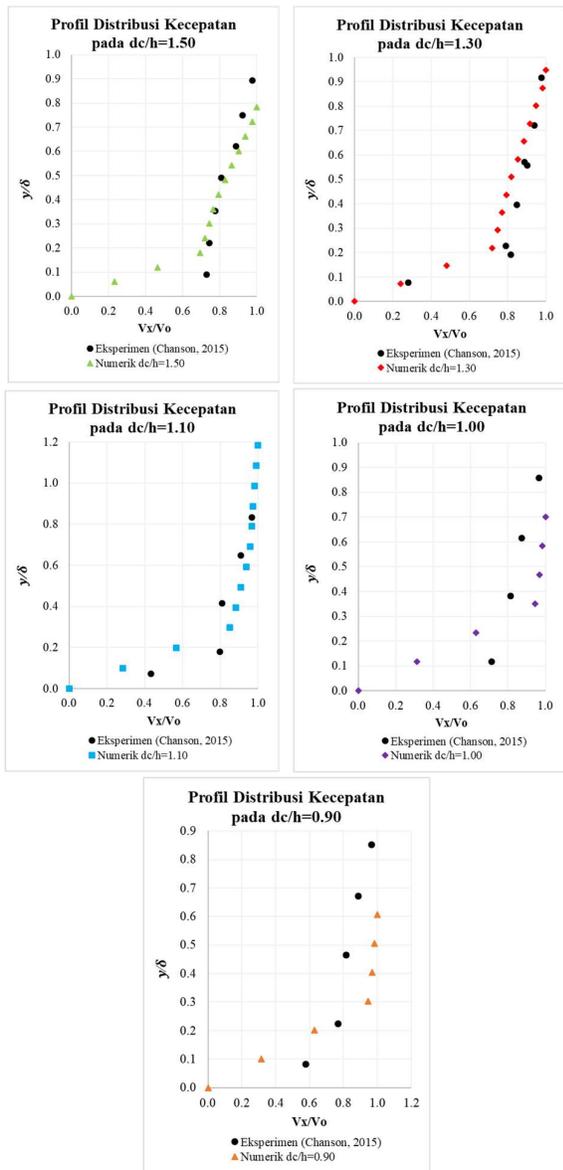
b. Distribusi Kecepatan Aliran

Pengamatan distribusi kecepatan aliran dalam arah longitudinal (*Resultan*) pada anak tangga ke-4 yang ditunjukkan pada **Gambar 12**.



Gambar 12. Pengamatan Kecepatan Aliran Longitudinal

Kecepatan aliran dalam *boundary layer* dinyatakan dalam V_x . Elevasi dan V_x yang digunakan untuk analisis distribusi kecepatan longitudinal ini merupakan hasil simulasi arah *resultan*. V_0 merupakan *freestream velocity* yang merupakan kecepatan maksimal dari hasil simulasi. δ merupakan tebal *boundary layer* yang diperoleh dari hasil eksperimen. V_x/V_0 dan y/δ merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan hubungan kecepatan aliran longitudinal terhadap elevasi longitudinal. Distribusi kecepatan aliran hasil simulasi dan eksperimen dari berbagai debit ditunjukkan pada **Gambar 13**.



Gambar 13. Perbandingan Kecepatan Aliran Hasil Model Numerik dan Eksperimen

Tabel 4. Hasil Uji Keandalan Kecepatan Aliran

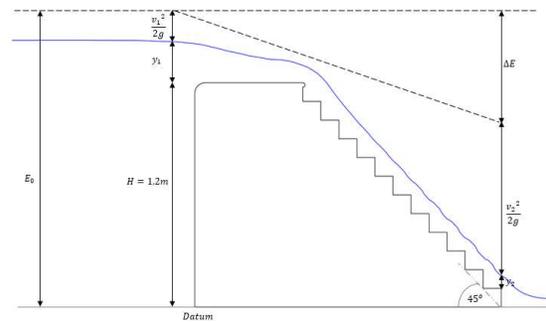
No	Q (m ³ /s)	dc/h	RMSE (m/s)
1	0.179	1.50	0.147
2	0.145	1.30	0.086
3	0.112	1.10	0.169
4	0.098	1.00	0.217
5	0.083	0.90	0.173

Berdasarkan **Tabel 4** dapat diketahui bahwa model memiliki performa yang baik dengan rentang nilai RMSE antara 0,086 – 0,217. Pada hasil model eksperimen, titik pengamatan kecepatan pada saat $y = 0$ tidak disajikan. Hal

tersebut karena pengukuran kecepatan dilakukan menggunakan tabung pitot yang memiliki diameter. Berdasarkan teori, kecepatan fluida yang berada dekat dengan benda padat nilai kecepataannya $v = 0$. Istilah tersebut dikenal sebagai *No slip condition* atau kondisi fluida yang tidak bergeser. Fluida memiliki suatu gradien kecepatan ketika mulai menjauhi benda padat. Tebal *boundary layer* (δ) merupakan jarak dari kecepatan $v = 0$ hingga $v_x = 0,99 \cdot v_0$. Pada *boundary layer* terdapat pengaruh viskositas fluida. *Freestream velocity* atau v_0 merupakan kecepatan yang tidak dipengaruhi *boundary condition*.

c. Peredaman Energi

Pengamatan muka air untuk menentukan peredamaan energi diamati pada tiap anak tangga arah vertikal di alphawater 0,5, sketsanya dapat dilihat pada **Gambar 14**. Hasilnya dinyatakan dalam grafik hubungan antara jumlah anak tangga yang dilewati aliran (N) terhadap besar peredaman energi ($\Delta E/E_t$).



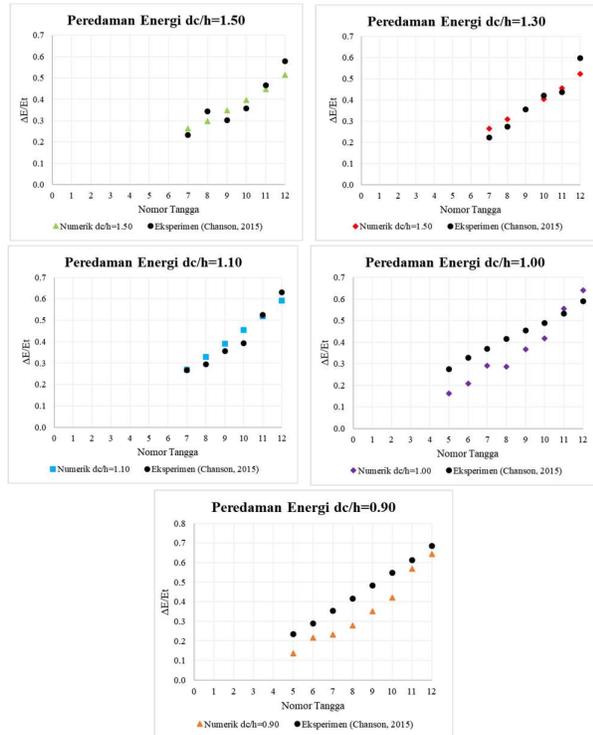
Gambar 14. Sketsa Tinggi Energi

Tinggi energi total (E_t) merupakan jumlah dari tinggi pelimpah (H), tinggi muka air (y), dan tinggi kecepatan ($v^2/2g$) di hulu. Tinggi energi di anak tangga (E) merupakan jumlah dari tinggi muka air di anak tangga tersebut (y) dan tinggi kecepatan ($v^2/2g$). Sehingga peredaman energi ($\Delta E/E_t$) merupakan perbandingan selisih antara tinggi energi total (E_t) dan energi yang diamati dari tiap anak tangga (E) terhadap tinggi energi total (E_t). Hasil perhitungan peredaman energi dapat dilihat pada **Gambar 15** dan **Tabel 6**.

Tabel 5. Hasil Uji Keandalan Model Peredaman Energi

No	Q (m ³ /s)	dc/h	RMSE (m)
1	0.179	1.50	0.043
2	0.145	1.30	0.039
3	0.112	1.10	0.036
4	0.098	1.00	0.090
5	0.083	0.90	0.103

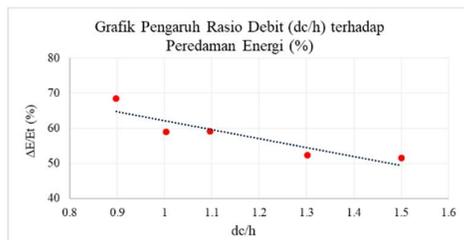
Berdasarkan **Tabel 5** diketahui bahwa model memiliki performa yang baik dengan rentang nilai RMSE antara 0,036 – 0,103.



Gambar 15. Perbandingan Peredaman Energi Hasil Model Numerik dan Eksperimen

Tabel 6. Besar Peredaman Energi pada tiap Debit

Q m ³ /s	dc/h	Titik	ΔE/Et (%)
0.179	1.50	Step 12	51
0.145	1.30	Step 12	52
0.112	1.10	Step 12	59
0.098	1.00	Step 12	59
0.083	0.90	Step 12	68



Gambar 16. Grafik Pengaruh Rasio Debit (dc/h) terhadap Peredaman Energi (%)

Berdasarkan **Gambar 16** dapat disimpulkan bahwa semakin besar debit maka semakin kecil peredaman energinya. *Trend* yang terbentuk yaitu memiliki pola linear.

Peredaman energi terbesar model numerik pelimpah bertangga pada penelitian ini terjadi pada debit terkecil yaitu $Q=0.083 \text{ m}^3/\text{s}$ atau $dc/h=0.90$ dengan prosentase peredaman sebesar 68%. Apabila pelimpah bertangga ini diaplikasikan di lapangan dengan debit rencana $Q=0,179 \text{ m}^3/\text{s}$ atau $dc/h=1,50$ dan tipe aliran *skimming*, maka peredaman energi yang dihasilkan mencapai 51%.

4.4. Sensitivitas Model

Analisis sensitivitas bertujuan untuk mengetahui parameter-parameter yang paling berpengaruh terhadap output model Pada penelitian ini, parameter yang diuji sensitivitas yaitu ukuran mesh, dan tinggi kekasaran (ks).

a. Sensitivitas terhadap Ukuran Mesh

Dalam uji sensitivitas ukuran mesh ini ditampilkan pengaruh penggunaan mesh 4cm x 4cm dan 2,5cm x 2,5cm. Model disimulasi dengan debit 0,179 m³/s atau $dc/h=1,50$, tinggi kekasaran besi $ks = 0,0002 \text{ m}$, angka Reynolds $R=150.000$ sehingga energi kinetik turbulen $k = 0,0000447$ dan laju disipasi $\epsilon = 0,000000713$ sebagaimana parameter yang digunakan untuk *setting* simulasi model.

Tabel 7. Hasil Uji Keandalan Sensitivitas terhadap Pengaruh Ukuran Mesh

Ukuran Mesh	RMSE		
	Muka Air (m)	Kecepatan (m/s)	Peredaman Energi (m)
2.5 cm x 2,5 cm	0.011	0.147	0.043
4 cm x 4 cm	0.014	0.196	0.046

Berdasarkan **Tabel 7** dapat disimpulkan bahwa simulasi menggunakan mesh 2,5 cm x 2,5 cm menghasilkan performa yang lebih baik daripada mesh berukuran 4 cm x 4 cm. Hasil output model yaitu kecepatan aliran paling sensitif terhadap ukuran mesh.

b. Sensitivitas terhadap Tinggi Kekasaran

Uji sensitivitas ini membandingkan hasil simulasi model dengan tiga jenis material yaitu kaca, besi, dan beton seperti terlihat pada **Tabel 8**. Model disimulasi dengan mesh ukuran 2,5 cm x 2,5 cm, debit 0,179 m³/s atau $dc/h=1,50$, angka Reynolds $R=150.000$ sehingga energi kinetik turbulen $k = 0,0000447$ dan laju disipasi $\epsilon = 0,000000713$.

Tabel 8. Sensitivitas terhadap Tinggi Kekasaran

No.	Tinggi Kekasaran (m)	Bahan	RMSE		
			Muka air (m)	Kecepatan (m/s)	Peredaman Energi (m)
1	0.0000015	Kaca	0.011	0.145	0.054
2	0.0002	Besi	0.011	0.147	0.043
3	0.002	Beton	0.013	0.153	0.048

Ditinjau dari output tinggi muka air, kecepatan aliran, dan peredaman energi dari ketiga model dengan tinggi kekasaran

berbeda tersebut menghasilkan selisih nilai RMSE yang cukup kecil. Variasi nilai tinggi kekasaran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil output model. Artinya, model tidak sensitif terhadap parameter tinggi kekasaran.

5. Simpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan diatas diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Ditinjau dari hasil profil muka air, model numerik OpenFOAM memiliki performa yang baik dengan rentang nilai RMSE antara 0,006 – 0,013.
2. Ditinjau dari kecepatan aliran, model numerik OpenFOAM memiliki performa yang baik dengan rentang nilai RMSE antara 0,086 – 0,217.
3. Ditinjau dari peredaman energi, model numerik OpenFOAM memiliki performa yang baik dengan rentang RMSE antara 0,036 – 0,103.
4. Berdasarkan uji sensitivitas dari dua parameter antara lain ukuran mesh, dan tinggi kekasaran, parameter yang paling berpengaruh terhadap hasil model yaitu ukuran mesh. Sehingga perlu hati-hati dalam menentukan ukuran mesh untuk permodelan selanjutnya.
5. Semakin besar debit maka semakin kecil peredaman energinya. *Trend* yang terbentuk yaitu memiliki pola linear. Peredaman energi terbesar model numerik pelimpah bertangga pada penelitian ini terjadi pada debit terkecil yaitu $Q=0.083 \text{ m}^3/\text{s}$ atau $dc/h=0.90$ dengan prosentase peredaman sebesar 68%. Apabila pelimpah bertangga ini diaplikasikan di lapangan dengan debit rencana $Q=0,179 \text{ m}^3/\text{s}$ atau $dc/h=1,50$ dan tipe aliran *skimming*, maka peredaman energi yang dihasilkan mencapai 51%.

Daftar Pustaka

- [1] O. F. Patty, *Tenaga Air*. Jakarta: Erlangga, 1995.
- [2] H. Chanson, "Stepped spillway flows and air entrainment," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 422–435, 1993.
- [3] G. P. Otto, "Enhancement of Dissipation Energy on Stepped Spillway." Tshwane: Tshwane University of Technology, 2006.
- [4] H. Felder, S., & Chanson, "Aeration, flow instabilities, and residual energy on pooled stepped spillways of embankment dams," *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 139, no. 10, pp. 880–887, 2013.
- [5] H. Zhang, G., & Chanson, "Hydraulics of the developing flow region of stepped cascades: an experimental investigation," 2015.
- [6] D. N. Krisnayanti, D. S., Dermawan, V., Solichin, M., Suhardjono, S., & Khaerudin, "Bendung Bertangga

- sebagai Alternatif pada Perencanaan Bangunan Irigasi," *J. Irrig.*, vol. 11, no. 2, pp. 91–102, 2017.
- [7] A. Ashoor, A., & Riazi, "Stepped spillways and energy dissipation: a non-uniform step length approach," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 23, p. 5071, 2019.
- [8] et . al Morovati, K., "Numerical Study of Energy Dissipation of Pooled Stepped Spillways," *Civ. Eng. J.*, vol. 2, no. 5, pp. 208–220, 2016.
- [9] V. T. Chow, "Hidrolika Saluran Terbuka. Erlangga." Jakarta, hal, 1989.
- [10] Anggrahini, *Hidrolika Saluran Terbuka*. Surabaya: Citra Media, 1997.
- [11] R. Khatri, P. Agrawal, M. Gupta, and J. Verma, "Laminar flow analysis over a flat plate by Computational fluid dynamics," *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. 3, no. 2, p. 756, 2012.
- [12] C. T. Shaw, "Using Computational Fluid Dynamics Prentice Hall," *Washington*, p. 315, 1992.
- [13] B. D. Hirt, C. W., & Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," *J. Comput. Phys.*, vol. 39, no. 1, pp. 201–225, 1981.
- [14] H. Jasak, "Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows.," 1996.
- [15] J. C. Greenshields, "User Guide Version 8." OpenFOAM, Inggris, 2020.