

Pemodelan Numerik Bangunan Peredam Energi Bendungan Pomalaa dengan Analisa Komputasi Fluida Dinamis

Numerical Modelling of Pomalaa Dam Energy Dissipator with Computational Fluid Dynamics

Delivean Rakha Dermawan^{1*}, Evi Nur Cahya¹, Dian Sisinggih¹

¹Jurusan Teknik Pengairan, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang 65145, Indonesia

Article info:

Kata kunci:

Bilangan Froude; *Brier-Skill Score*;
Computational Fluid Dynamics;
Efisiensi peredaman; Peredam energi

Keywords:

Brier-Skill Score; *Computational Fluid Dynamics*; *Efficiency of energy dissipation*; *Energy dissipator*; *Froude number*

Article history:

Received: 07-01-2021

Accepted: 30-11-2021

*delivean@gmail.com

Abstrak

Pada pengujian model fisik pelimpah Bendungan Pomalaa, peredam energi model seri 4 yang memiliki elevasi dasar +41,00 m telah mampu meredam energi aliran dengan baik pada debit Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} , namun perlu dicoba alternatif desain peredam energi yang lebih efektif dan efisien. Metode yang digunakan adalah simulasi model numerik berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD), kemudian hasilnya akan diverifikasi dengan model fisik menggunakan *Brier-Skill Score* (BSS). Setelah itu, dilakukan alternatif desain berupa variasi elevasi dasar peredam energi, yaitu +42,00 m; +43,00 m; dan +44,00 m, kemudian dipilih model terbaik sebagai rekomendasi dari hasil simulasi. Hasil verifikasi model numerik menggunakan BSS menunjukkan bahwa model numerik cukup mampu untuk merepresentasikan model fisik. Hasil simulasi terbaik adalah peredam energi dengan elevasi dasar +42,00 m dengan efisiensi peredaman pada Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} berturut-turut sebesar 93,846%, 85,915%, dan 83,201%. Kemudian pada debit Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} di bagian hilir memiliki nilai bilangan Froude 0,770, 0,995, dan 1,472.

Abstract

In the physical model testing Pomalaa Dam spillway, the series 4 energy dissipator which has a base elevation of +41,00 m has been able to dissipate the flow energy well at the Q_{100y} , Q_{1000y} , and Q_{PMF} , but it is necessary to try alternative designs that more effective and efficient. The method used is a numerical model simulation using an application based on *Computational Fluid Dynamics* (CFD), then the result will be verified with physical model using *Brier-Skill Score* (BSS). After that, an alternative design was carried out in the form of a variation in the base elevation of the energy dissipator, that are +42,00 m; +43,00 m; and +44,00 m, then the best model is selected as a recommendation from the simulation result. The result of the verification of the numerical model using BSS show that numerical model is quite capable of representing the physical model. The best simulation result is an energy dissipator with a base elevation of +42,00 with efficiency of energy dissipation at Q_{100y} , Q_{1000y} , and Q_{PMF} respectively 93,846%, 85,915%, and 83,201%. Then Q_{100y} , Q_{1000y} , and Q_{PMF} at the downstream have Froude number value respectively 0,770, 0,995, and 1,472.

Kutipan: Dermawan, D.R., Cahya, E.N., Sisinggih, D. (2021). Pemodelan Numerik Bangunan Peredam Energi Bendungan Pomalaa dengan Analisa Komputasi Fluida Dinamis. *Jurnal Teknik Pengairan*.
<https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2021.012.02.06>

1. Pendahuluan

Dampak sosial dan ekonomi banjir merepresentasikan masalah yang sangat penting akibat besarnya kerugian yang terjadi. Dalam konteks ini, bendungan mempunyai peran penting dalam memenuhi /keperluan aturan secara hidrologi untuk mengatasi fenomena banjir, terutama pada kolam olak dengan rezim hidrologi yang ekstrim. Karena alasan inilah, persyaratan operasi hidrolik dan bendungan perlu diatasi dengan peningkatan standar keamanan, dan peraturan teknis bendungan yang akan dibangun harus memasukkan persyaratan untuk kontrol operasi bendungan dengan tingkat yang lebih tinggi dan instrumentasi keamanan, termasuk kapasitas debit yang lebih besar. Dalam konteks ini, perlu direview kapasitas hidrolik dari bendungan yang ada (termasuk puncak, pelimpah, dan saluran) dengan mempertimbangkan semua efek dari aliran melalui struktur bendungan. Dalam hal ini, salah satu elemen struktural yang sangat mempengaruhi kapasitas debit pada bendungan gravitasi (*gravity dam*) adalah kolam olak, yang merupakan komponen perangkat hidrolik untuk struktur dissipasi energi dengan biaya yang tinggi, batasan desain yang terbatas, dan kondisi operasi. Saat ini, desain kolam olak tergantung pada variabel hidrolik berupa *intake flow* (Rebollo et al. 2018).

Bendungan menyimpan volume dan energi air yang sangat tinggi pada masa operasinya. Pada saat melepaskannya, energi ini dapat menyebabkan kerugian di hilir bendungan (Mansoori, Erfanian, and Khamchin Moghadam 2017). Energi kinetik air pada saluran pelimpah harus didissipasi dalam kolam olak melalui lompatan hidrolik untuk mencegah gerusan yang parah pada dasar sungai serta kegagalan struktur hilir akibat adanya loncatan hidrolik yang terjadi. *Chute block* dan *sill* dengan konfigurasi yang berbeda-beda digunakan pada kolam olak standar untuk memberikan gangguan pada aliran dan menyerap energi air melalui pembentukan lompatan hidrolik. (Fathi-Moghadam et al. 2011).

Untuk mewujudkan pertambangan yang berkelanjutan, PT. Vale Indonesia melakukan treatment terhadap tambang nikel yang mereka kelola berupa pembangunan Pomalaa tailing dam. Hal tersebut ditindaklanjuti dengan kegiatan pengujian model fisik guna memenuhi persyaratan keamanan bendungan.

Pada uji model fisik seri 4 khusus di bagian peredam energi menggunakan desain modifikasi tipe USBR I dengan berupa penurunan elevasi dasar dari +46,00 m menjadi +41,00 m, adanya *end sill* setinggi 3 m, dan pemberian kemiringan negatif 1:5 setelah kaki hilir *end sill*. Hasilnya, desain peredam energi model seri 4 telah mampu meredam energi dengan baik di semua debit pengaliran (Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF}), namun perlu dicoba alternatif desain peredam energi yang lebih efektif dan efisien. Dari model seri 4 tersebut akan dilakukan pemodelan dan simulasi aliran menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang ditujukan untuk memberikan gambaran tentang perilaku hidrolika yang terjadi. Dari gambaran tersebut bisa dilakukan penyempurnaan hasil berupa alternatif desain peredam energi.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui perilaku aliran di bangunan peredam energi model seri 4 yang ditinjau dengan CFD dan alternatif desain peredam energi yang direkomendasikan berdasarkan hasil simulasi CFD ditinjau dari efisiensi peredaman dan kondisi aliran di hilir.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan gambaran seberapa besar pendekatan model numerik berbasis CFD dibanding model fisik, dan memahami perilaku hidrolika yang terjadi di bangunan peredam energi akibat variasi elevasi dasar peredam energi berdasarkan model numerik berbasis CFD.

2. Bahan dan Metode

2.1. Lokasi Studi

Bendungan Pomalaa terletak di wilayah Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Bendungan Pomalaa dibangun dengan tujuan yaitu penanganan dari limbah tambang yang mengalir di sungai Ewo-Ewo.

2.2. Bahan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data primer hasil pengukuran tinggi muka air dan kecepatan aliran pada model fisik bangunan peredam energi seri 4 yang menggunakan sistem

kolam olakan datar USBR I termodifikasi berupa penurunan elevasi dasar dari +46,00 m menjadi +41,00 m, end sill setinggi 3 m, dan kemiringan negatif di kaki hilir end sill 1:5.

Kemudian debit banjir rancangan yang digunakan adalah Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Teknis Debit Operasi

No.	$Q_{Rancangan}$ (Tahun)	Q_{Inflow} (m^3/dt)	$Q_{Outflow}$ (m^3/dt)
1	100	200,00	85,00
2	1000	310,00	170,00
3	PMF	640,00	385,00

2.3. Pengolahan Data

Data hasil pengujian model fisik di bagian akhir saluran peluncur 2 akan menjadi data input untuk membangun model numerik dalam analisa pendekatan CFD. Data hasil simulasi CFD tersebut kemudian akan dievaluasi dengan data model fisik menggunakan *Brier-Skill Score* (BSS). Setelah itu akan dilakukan pemodelan numerik alternatif desain peredam energi berupa variasi elevasi dasar peredam energi, yaitu model E-1 (+42,00 m), E-2 (+43,00 m), dan E-3 (+44,00 m). Dari hasil pemodelan numerik alternatif desain tersebut akan dipilih hasil terbaik ditinjau dari efisiensi peredaman dan bilangan Froude di hilir.

2.3.1. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Tuakia (2008) mengatakan bahwa penelitian hingga desain untuk berbagai fenomena hidraulik membutuhkan suatu cara yang mampu memprediksi hasil dari berbagai macam atau jenis karakteristik fluida yang diteliti atau disimulasi dengan akurat dan cepat. Maka berkembanglah suatu ilmu yang dinamakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Secara umum langkah kerja CFD terdiri dari tiga tahapan sebagai berikut:

a. Pre-Processor

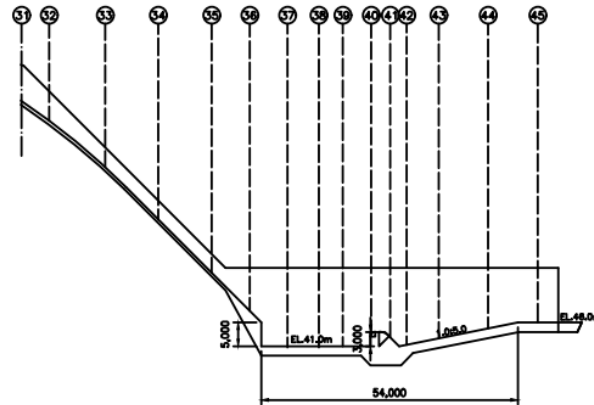
Proses yang dilakukan pada langkah ini adalah sebagai berikut:

i. Membuat geometri model untuk menjadi domain komputasi

Pembuatan geometri model untuk menjadi domain komputasi menggunakan perangkat lunak ANSYS Fluent. Fluent adalah salah satu jenis perangkat lunak yang sering digunakan dalam menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan CFD yang menggunakan metode volume hingga (Tuakia 2008). Solusi persamaan turbulen yang digunakan adalah persamaan *realizable* k- ϵ yang merupakan perbaikan dari model k- ϵ standar dalam pemodelan laju disipasi. Kelemahan model k-epsilon standar dalam pemodelan laju disipasi telah ditingkatkan dapat diwujudkan dengan memodifikasi persamaan transport untuk laju disipasi. *Realizable* k- ϵ menyesuaikan persamaan untuk tingkat disipasi berdasarkan nilai rata-rata kuadrat untuk fluktuasi vortisitas. Itu dapat mengambil vortisitas fluktuasi menjadi pertimbangan sejak model konstan C_μ tidak lagi konstan. C_μ dihitung secara dinamis sebagai fungsi dari regangan rata-rata dan tingkat rotasi, sedangkan dalam *standard* k- ϵ diasumsikan konstan (Fluent 2013).

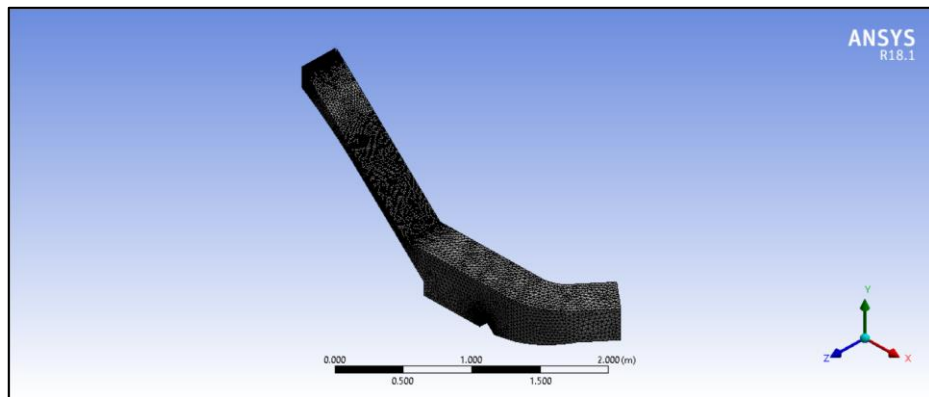
ii. Pembuatan mesh dan grid

Model yang digunakan sebagai verifikasi model numerik dan model fisik dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Gambar ini menunjukkan potongan memanjang bangunan peredam energi yang akan dibuat model numeriknya dilihat dengan titik pandang berasal dari sumbu z positif antara section 31 sampai dengan section 44. Model ini adalah model seri 4 dimana model ini adalah final design dari pengujian model fisik Bendungan Pomalaa.



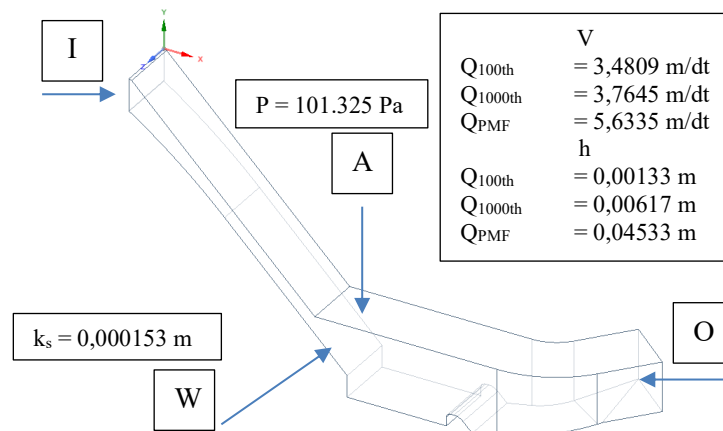
Gambar 1. Potongan Memanjang Bangunan Peredam Energi Model Seri 4

Mesh yang digunakan merupakan pengaturan default dari aplikasi ANSYS (*minimum face size* $1,1574 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ dan *maximum face size* $1,425759 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) dengan jumlah *element* sebesar 297.600 yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil *Mesh* Model Numerik Seri 4

Kemudian penentuan kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 3. Notasi I merupakan inlet, A merupakan tekanan udara/atmosfer, W merupakan *wall* (tembok), dan O merupakan outlet. Arah gravitasi diasumsikan searah dengan sumbu y negatif.



Gambar 3. Kondisi Batas Model Numerik Seri 4

iii. Mendefinisikan *properties* fluida

Nilai kekasaran permukaan ekuivalen yang diseragamkan biasanya direpresentasikan dengan nilai koefisien Manning. Software ANSYS Fluent memakai nilai tipe kekasaran Nikuradse yang berdimensi panjang, sehingga perlu dikonversikan menggunakan persamaan (1) (Yen 2002):

$$k_s = \left(n \frac{m^{\frac{1}{6}}}{0,0389} \right)^6 \quad (1)$$

dengan:

n = nilai koefisien Manning

m = bernilai 1 jika dalam satuan meter

iv. Pengaturan *solver*

Pengaturan parameter-parameter yang ada di Fluent.

b. *Solver*

Pada tahapan ini persamaan-persamaan yang akan digunakan pada simulasi CFD diselesaikan secara iterasi hingga tercapai kondisi konvergen. Persamaan-persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

i. Hukum kekekalan massa

Hukum kekekalan massa atau dikenal juga sebagai hukum Lomonosov-Lavoisier adalah suatu hukum yang menyatakan massa dari suatu sistem tertutup akan konstan meskipun terjadi berbagai macam proses di dalam sistem tersebut (dalam sistem tertutup). Massa zat sebelum dan sesudah reaksi adalah sama (tetap/konstan). Pernyataan yang umum digunakan untuk menyatakan hukum kekekalan massa adalah massa dapat berubah bentuk tetapi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan. Untuk suatu proses kimiawi di dalam suatu sistem tertutup, massa dari reaktan harus sama dengan massa produk (Hatomi 2011).

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (2)$$

ii. Hukum momentum linear

Yaitu laju perubahan momentum dari suatu volume fluida sebanding dengan gaya yang bekerja padanya

$$P \frac{\delta \rho}{\delta t} = -\text{grad } p + \rho b \quad (3)$$

iii. Hukum kekekalan energi

Energi kinetik dari benda tertentu adalah energi yang dimiliki saat bergerak. Seperti yang ungkapan, energi kinetik sama dengan setengah dari massa benda dikalikan dengan kuadrat kecepatan benda, atau $EK = \frac{1}{2} mv^2$. Energi kinetik terdiri dari tiga jenis energi. Energi kinetik vibrasi energi karena gerak getaran, dan energi kinetik rotasi adalah energi karena gerak rotasi. Energi kinetik translasi adalah energi karena gerak pusat massa dari satu titik ke titik lain.

Secara umum, energi potensial suatu benda adalah energi yang disimpan sementara pada saat diam pada medan gaya. Gravitasi adalah kekuatan yang bertindak atas benda dan memberikan energi potensial.

$$E_{total} = E_{kinetik} + E_{internal} \quad (4)$$

Persamaan-persamaan ini merupakan persamaan non-linear diferensial parsial dan merupakan persamaan atur pada banyak aplikasi di bidang *engineering* khususnya mekanika fluida. Sulit untuk menyelesaikan persamaan ini secara analitis. Tetapi begitu, dimungkinkan untuk mendapatkan solusi dari persamaan itu dengan menggunakan pendekatan berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Strategi pemecahan permasalahan terkait persamaan alur di atas adalah dengan proses diskritisasi yaitu merubah continuous domain menjadi discrete domain dengan menggunakan grid. Pada continuous domain, setiap variable aliran didefinisikan pada tiap titik domain. Misalkan tekanan P pada daerah 1 dimensional kontinyu didefinisikan sebagai berikut:

$$P = p(x), 0 < x < 1 \quad (5)$$

Pada discrete domain, tiap variable didefinisikan hanya pada titik grid. Misalnya pada daerah diskrit berikut, tekanan hanya pada N grid:

$$P_i = p_i(x), i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Pada solusi CFD, nilai variabel aliran ditentukan hanya pada titik grid. Nilai pada titik-titik lainnya ditentukan dengan interpolasi nilai pada titik grid.

c. *Post-Processor*

Pada langkah ini hasil-hasil komputasi numerik dibuat visualisasi dan dokumentasi.

2.3.2. *Brier-Skill Score (BSS)*

Pertanyaan tentang seberapa bagus sebuah model seharusnya didefinisikan dengan cara yang lebih kuantitatif dari peringkat kualitatif (*excellent, good, reasonable* atau *poor*) yang biasanya dipakai. Bagian ini mendefinisikan sebuah angka sebagai parameter statistik yang bisa digunakan untuk menilai kualitas dari performa model (van Rijn et al. 2003). Dalam hal ini digunakan *Brier-Skill Score (BSS)* untuk mengevaluasi performa dari model numerik. BSS merepresentasikan seberapa baik model memprediksi tinggi muka air dan kecepatan dibandingkan dengan kondisi aslinya. Persamaan BSS dapat dilihat sebagai berikut:

$$BS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (f_t - o_t) \quad (7)$$

$$BS_{ref} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (B - o_t) \quad (8)$$

$$BSS = 1 - \frac{BS}{BS_{ref}} \quad (9)$$

dengan:

BS = *Brier-Score*

BSS = *Brier-Skill Score*

BS_{ref} = referensi perkiraan *Brier-Score*

n = jumlah data

f_t = hasil simulasi ke-t

o_t = data observasi ke-t

B = *baseline (0)*

Nilai dari BSS tersebut kemudian akan diklasifikasikan sesuai Tabel 2. dibawah sebagai berikut (van Rijn et al. 2003):

Tabel 2. Klasifikasi *Brier-Skill Score*

<i>Score</i>	<i>Classification</i>
< 0	<i>Bad</i>
0 – 0,3	<i>Poor</i>
0,3 – 0,6	<i>Reasonable</i>
0,6 – 0,8	<i>Good</i>
0,8 – 1	<i>Excellent</i>

Sumber: van Rijn et al, 2003

2.3.3. *Analisa Perilaku Hidrolika*

Beberapa analisa perilaku hidrolika yang akan dilakukan didasarkan pada teori sebagai berikut:

a. Loncatan Hidrolik

Loncatan hidrolik terjadi apabila suatu aliran berubah dari superkritis ke kondisi subkritis. Terdapat suatu kenaikan yang tiba-tiba pada permukaan air dan kehilangan energi yang besar dalam loncatan hidrolik. Pusaran turbulen yang berukuran besar terbentuk pada awal loncatan. Pusaran ini menarik energi dari aliran utama dan pusaran terpecah-pecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil sambil mengalir ke hilir (Subramanya 1982). Pengklasifikasian kondisi dari aliran subkritis, kritis, dan superkritis didefinisikan oleh bilangan Froude (Peterka 1984):

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot D_1}} \quad (10)$$

dengan:

- F_1 = bilangan Froude di titik 1
 V_1 = kecepatan aliran rata-rata di titik 1 (m/dt)
 g = percepatan gravitasi (m/dt²)
 D_1 = kedalaman hidrolis (m) di titik 1

b. Kehilangan Energi

Kehilangan energi pada loncatan diartikan sebagai perbedaan energi spesifik sebelum loncatan dan sesudah terjadi loncatan (Peterka 1984), besarnya adalah:

$$E_1 = D_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (11)$$

dan

$$E_2 = D_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (12)$$

maka

$$E_L = E_1 - E_2 \quad (13)$$

dengan:

- E_L = kehilangan energi tinggi tekanan pada loncatan hidrolis (m)
 D_1 = kedalaman di titik 1 (m)
 D_2 = kedalaman di titik 2 (m)
 V_1 = kecepatan aliran di titik 1 (m)
 V_2 = kecepatan aliran di titik 2 (m)
 g = konstanta percepatan gravitasi (m/dt²)

c. Efisiensi Peredaman

Efisiensi loncatan hidrolis didefinisikan sebagai rasio antara energi spesifik setelah loncatan hidrolis dibanding dengan sebelum terjadinya loncatan hidrolis, dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8F_1^2 + 1)^{3/2} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2 \cdot (2 + F_1^2)} \quad (14)$$

dengan:

F_1 = bilangan Froude di titik 1

Sedangkan efisiensi dari kehilangan energi disusun dengan persamaan (11), persamaan (12), dan persamaan (13) didefinisikan sebagai berikut (Peterka, 1984):

$$\frac{E_L}{E_1} = \frac{(E_1 - E_2)}{E_1} \times 100\% \quad (15)$$

Nilai dari persamaan (15) dipakai untuk menunjukkan seberapa besar kemampuan bangunan peredam energi berfungsi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Kalibrasi Model Numerik

Parameter yang dikalibrasi adalah nilai kekasaran permukaan dan tekanan udara. Nilai kekasaran permukaan dikonversi dari koefisien kekasaran Manning (n) ke nilai kekasaran Nikuradse menggunakan Persamaan (1). Material yang digunakan dalam model fisik adalah akrilik dengan asumsi nilai $n = 0,009$, sehingga:

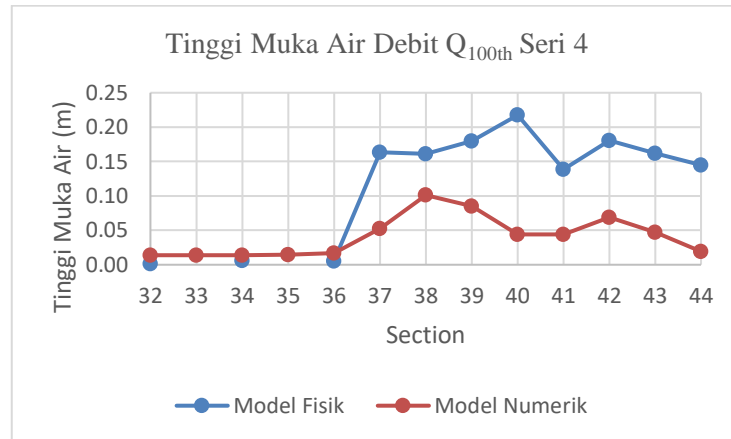
$$k_s = \left(0,009 \frac{1^{1/6}}{0,0389} \right)^6 = 0,000153 \text{ m}$$

Kemudian nilai tekanan udara yang digunakan adalah sebesar 1 atm atau 101.325 Pa.

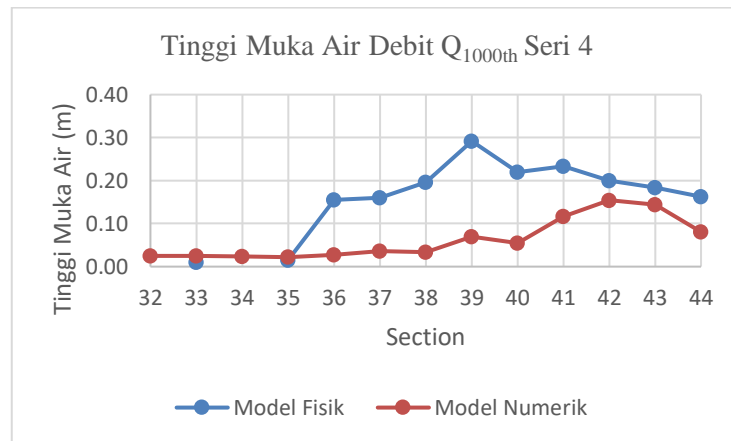
3.2. Tinggi Muka Air Model Seri 4

Simulasi model numerik dimulai dengan *input* data tinggi muka air di bagian akhir saluran peluncur 2 (*section* 31) berturut-turut dari Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} sebesar 0,00133 m, 0,00617 m, dan 0,04533 m. Berikut pada Gambar 4. – Gambar 5. adalah hasil simulasi tinggi muka air model

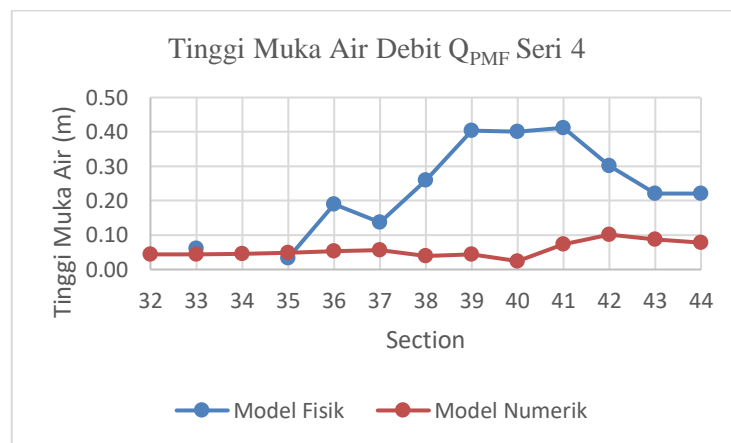
numerik model seri 4 berturut-turut dari Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} yang dibandingkan dengan hasil pengukuran model fisik:



Gambar 4. Perbandingan Tinggi Muka Air Model Fisik dan Model Numerik Seri 4 Q_{100th}

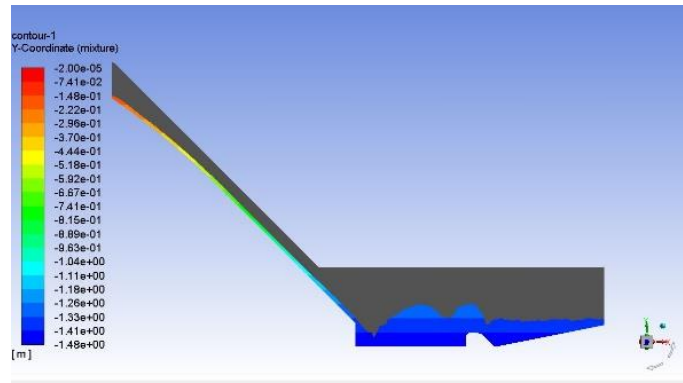


Gambar 5. Perbandingan Tinggi Muka Air Model Fisik dan Model Numerik Seri 4 Q_{1000th}

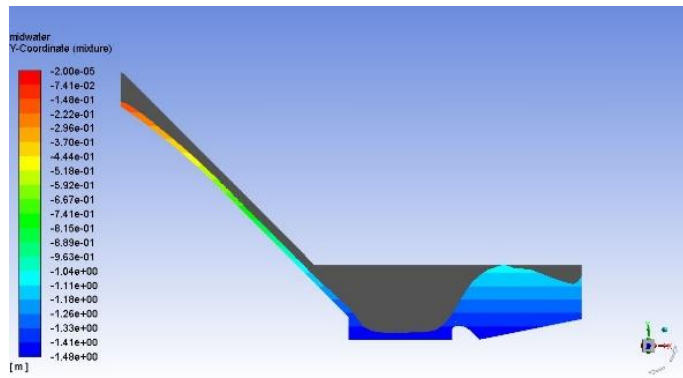


Gambar 6. Perbandingan Tinggi Muka Air Model Fisik dan Model Numerik Seri 4 Q_{PMF}

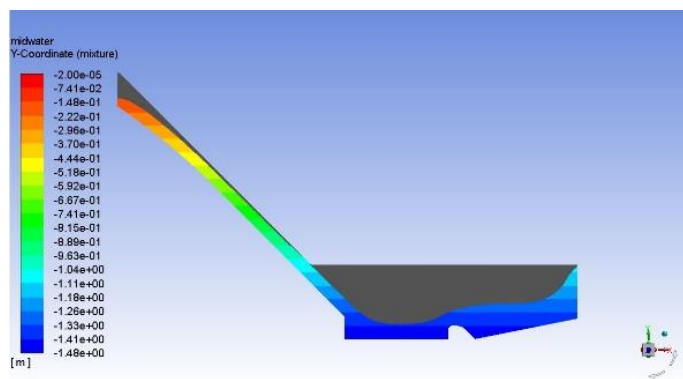
Kemudian berikut pada Gambar 7. – Gambar 9. adalah tampak samping tinggi muka air pada model numerik:



Gambar 7. Hasil Simulasi Tinggi Muka Air Debit Q_{100th} Seri 4 Tampak Samping



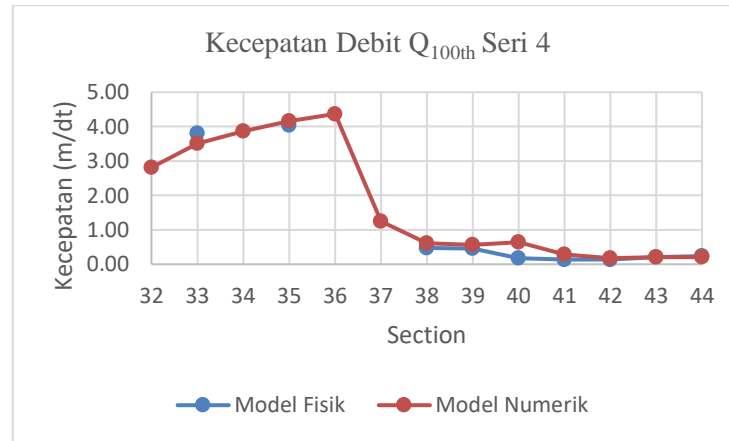
Gambar 8. Hasil Simulasi Tinggi Muka Air Debit Q_{1000th} Seri 4 Tampak Samping



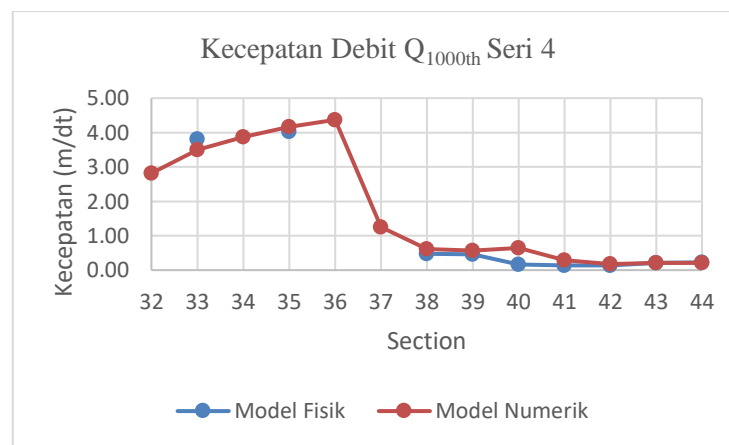
Gambar 9. Hasil Simulasi Tinggi Muka Air Debit Q_{PMF} Seri 4 Tampak Samping

3.3. Kecepatan Aliran Model Seri 4

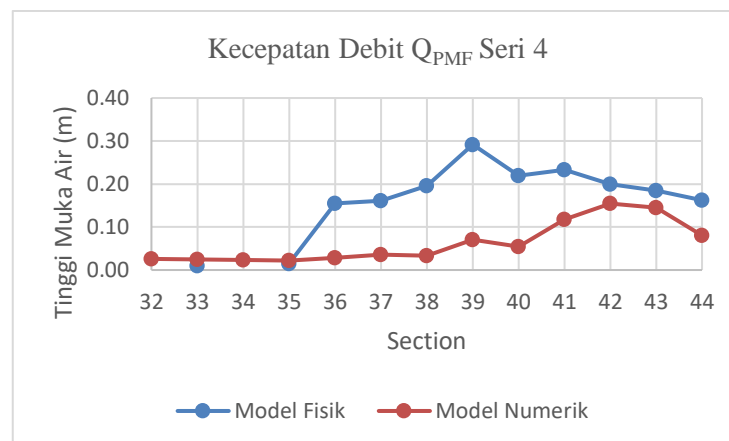
Simulasi model numerik dimulai dengan *input* data kecepatan aliran di bagian akhir saluran peluncur 2 (*section 31*) berturut-turut dari Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} sebesar 3,4809 m/dt, 3,7645 m/dt, dan 5,6335 m/dt. Berikut pada Gambar 10. – Gambar 12. adalah hasil simulasi kecepatan aliran model numerik model seri 4 berturut-turut dari Q_{100th} , Q_{1000th} , dan Q_{PMF} yang dibandingkan dengan hasil pengukuran model fisik:



Gambar 10. Perbandingan Kecepatan Aliran Model Fisik dan Model Numerik Seri 4 Q_{100th}



Gambar 11. Perbandingan Kecepatan Aliran Model Fisik dan Model Numerik Seri 4 Q_{100th}



Gambar 12. Perbandingan Kecepatan Aliran Model Fisik dan Model Numerik Seri 4 Q_{PMF}

3.4. Verifikasi Model Numerik

Dari hasil simulasi model numerik didapatkan data tinggi muka air dan kecepatan, sehingga bilangan Froudenya dapat dihitung menggunakan Persamaan (10), kemudian data-data tersebut akan dievaluasi terhadap model fisik dengan *Brier-Skill Score* (BSS) menggunakan Persamaan (7) – Persamaan (9).

Hasil verifikasi model menggunakan BSS ditampilkan dalam Tabel 3. berikut:

Tabel 3. Rekapitulasi Evaluasi BSS Model Seri 4

Tinggi Muka Air			Kecepatan Aliran			Bilangan Froude		
Debit	BSS	Klasifikasi	Debit	BSS	Klasifikasi	Debit	BSS	Klasifikasi
Q_{100th}	0,534	<i>Reasonable</i>	Q_{100th}	0,988	<i>Excellent</i>	Q_{100th}	0,862	<i>Excellent</i>
Q_{1000th}	0,579	<i>Reasonable</i>	Q_{1000th}	0,869	<i>Excellent</i>	Q_{1000th}	0,857	<i>Excellent</i>
Q_{PMF}	0,334	<i>Reasonable</i>	Q_{PMF}	0,874	<i>Excellent</i>	Q_{PMF}	0,854	<i>Excellent</i>

Hasil verifikasi dari model numerik dibandingkan dengan model fisik memiliki trend data tinggi muka air yang secara umum memiliki selisih yang cukup besar, sedangkan trend data kecepatan aliran secara umum memiliki selisih yang cukup kecil. Banyak faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran di laboratorium maupun hasil simulasi model numerik. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil tersebut adalah kemampuan alat dalam melakukan pengukuran, kondisi tenaga manusia pada saat proses pengukuran di model fisik, jumlah mesh yang digunakan, data-data hasil interpolasi dari model numerik, jenis model turbulen yang dipilih, parameter-parameter dalam aplikasi yang kurang sesuai dengan kondisi aslinya dan masih banyak faktor-faktor lain.

Dari hasil verifikasi diatas terlihat bahwa pada tinggi muka air memiliki klasifikasi BSS *reasonable*, sedangkan pada kecepatan aliran dan bilangan Froude memiliki klasifikasi BSS *excellent*. Jadi, dapat diambil kesimpulan bahwa model numerik cukup mampu untuk merepresentasikan model fisik sehingga dapat dilanjutkan ke alternatif desain peredam energi.

3.5. Simulasi Alternatif Desain Peredam Energi

Alternatif desain peredam energi yang akan dimodelkan berupa variasi elevasi dasar peredam energi, yaitu seri E-1 (+42,00 m), E-2 (+43,00 m), dan E-3 (+44,00 m). Setelah dilakukan simulasi akan dihitung efisiensi peredaman energi dan bilangan Froudenya di hilir, kemudian akan dipilih desain yang terbaik.

Hasil analisa simulasi model numerik alternatif desain bangunan peredam energi menunjukkan bahwa semakin tinggi elevasi dasar peredam energi, maka tinggi muka air di kolam olak semakin rendah, namun kecepatan alirannya semakin tinggi.

Efisiensi peredaman dihitung menggunakan Persamaan (15), sedangkan bilangan Froude di hilir dihitung menggunakan Persamaan (10). Titik sebelum terjadi loncatan hidrolis terdapat pada bagian akhir saluran peluncur 3 (*section* 35), sedangkan titik setelah terjadi loncatan hidrolis terdapat pada saluran akhir (*section* 44). Hasil perhitungan efisiensi peredaman dan bilangan Froude di hilir ditampilkan pada Tabel 12. berikut:

Tabel 4. Rekapitulasi Efisiensi Peredaman Model Numerik dan Bilangan Froude di Hilir

Seri 4 (Model Numerik) (+41,00 m)				Seri E-2 (+43,00 m)			
No.	Debit	Efisiensi (%)	Bil. Froude	No.	Debit	Efisiensi (%)	Bil. Froude
1	Q_{100th}	97,617	0,486	1	Q_{100th}	91,530	0,633
2	Q_{1000th}	89,085	1,008	2	Q_{1000th}	80,118	1,247
3	Q_{PMF}	78,466	2,228	3	Q_{PMF}	77,362	2,441
Seri E-1 (+42,00 m)				Seri E-3 (+44,00 m)			
No.	Debit	Efisiensi (%)	Bil. Froude	No.	Debit	Efisiensi (%)	Bil. Froude
1	Q_{100th}	93,846	0,770	1	Q_{100th}	87,058	0,916
2	Q_{1000th}	85,915	0,995	2	Q_{1000th}	80,019	1,375
3	Q_{PMF}	83,201	1,472	3	Q_{PMF}	80,105	2,057

Dari hasil perhitungan diatas, dapat dilihat bahwa model numerik seri 4 memiliki efisiensi peredaman paling baik pada debit Q_{100th} dan Q_{1000th} , sedangkan model E-1 memiliki efisiensi peredaman paling baik pada debit Q_{PMF} . Namun, apabila melihat bilangan Froude pada saluran akhir, model seri E-1 memiliki nilai bilangan Froude < 1 di debit Q_{100th} dan Q_{1000th} yang berarti merupakan aliran subkritis, sedangkan pada Q_{PMF} memiliki nilai bilangan Froude paling kecil dari semua seri model. Jadi, dapat disimpulkan bahwa desain peredam energi pada model seri E-1 memiliki hasil terbaik.

4. Kesimpulan

Dari pengujian pada model fisik bangunan peredam energi Bendungan Pomalaa dengan skala 1:40 serta dilakukan simulasi dengan model numerik berbasis CFD menggunakan software ANSYS, maka dapat diambil kesimpulan bahwa perilaku aliran bangunan peredam energi model seri 4 yang disimulasikan menggunakan model numerik berbasis CFD telah dievaluasi menggunakan *Brier-Skill Score* pada tinggi muka air, kecepatan aliran, dan bilangan Froude memiliki klasifikasi yang cukup baik. Dari hasil verifikasi yang dilakukan, diketahui bahwa pada tinggi muka air memiliki klasifikasi *reasonable* dengan rentang nilai BSS antara 0,3-0,5, sedangkan pada kecepatan aliran dan bilangan Froude memiliki klasifikasi *excellent* dengan rentang nilai BSS antara 0,8-1. Apabila ditinjau secara pengamatan visual, loncatan hidrolik pada peredam energi model seri 4 dimulai pada bagian akhir saluran peluncur 3, sedangkan pada hasil simulasi model numerik rata-rata loncatan hidrolik terjadi pada area peredam energi. Jenis aliran di saluran akhir pada bangunan peredam energi model seri 4 pada semua debit pengaliran adalah subkritis dengan nilai bilangan Froude < 1 , sedangkan pada model numerik aliran subkritis hanya terjadi pada debit Q_{100th} .

Kemudian dari hasil simulasi numerik berbasis CFD yang dilakukan, desain yang direkomendasikan adalah desain dari peredam energi yang memiliki elevasi dasar peredam energi +42,00 m (model seri E-1), karena memiliki aliran subkritis pada debit Q_{100th} dan Q_{1000th} , serta pada debit Q_{PMF} memiliki nilai bilangan Froude terkecil dari semua seri model. Hasil analisa pada model tersebut mempunyai efisiensi peredaman pada Q_{100th} sebesar 93,846%, pada Q_{1000th} sebesar 85,915%, dan pada Q_{PMF} sebesar 83,201%. Kemudian pada debit Q_{100th} dan Q_{1000th} di bagian saluran akhir memiliki jenis aliran subkritis dengan nilai bilangan Froude pada Q_{100th} sebesar 0,770, pada Q_{1000th} sebesar 0,995, sedangkan pada Q_{PMF} memiliki jenis aliran superkritis dengan nilai bilangan Froude sebesar 1,472.

Daftar Pustaka

- Fathi-Moghadam, Manoochehr, Sadegh Haghighipour, Babak Lashkar-Ara, and Peyman Aghtouman. 2011. "Reduction of Stilling Basin Length with Tall End Sill." *Journal of Hydrodynamics* 23(4): 498–502.
- Fluent, Ansys. 2013. "Ansys Fluent Theory Guide." *ANSYS Inc., USA*.
- Hatomi, Fasri. 2011. "Analisis CFD Turbin Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut Pada Kapasitas 1,2 KW." Universitas Indonesia.
- Mansoori, Abbas, Shadi Erfanian, and Farhad Khamchin Moghadam. 2017. "A Study of the Conditions of Energy Dissipation in Stepped Spillways with Λ -Shaped Step Using FLOW-3D." *Civil Engineering Journal* 3(10): 856.
- Peterka, A. J. 1984. "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators." *Water resources technical publication - US department of the interior*.
- Rebollo, Juan José, David López, Tamara Ramos, and Luis Garrote. 2018. "Energy Dissipation Structures: Influence of Aeration in Supercritical ." *Proceedings* 7(1): 5.
- Subramanya, K. 1982. "Flow in Open Channels. Volumes 1 and 2."
- Tuakia, Firman. 2008. *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Cet. 1. Bandung: Informatika.
- van Rijn, L. C. et al. 2003. "The Predictability of Cross-Shore Bed Evolution of Sandy Beaches at the Time Scale of Storms and Seasons Using Process-Based Profile Models." *Coastal Engineering*.
- Yen, Ben Chie. 2002. "Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula." *Water Resources Publications, LLC., Highlands Ranch, Colorado, U.S.A.*