

KOMPARASI MODEL NUMERIK DAN FISIK PADA BANGUNAN PELIMPAH ALIRAN BEBAS DAN TERKONTROL (STUDI KASUS: BENDUNGAN LEUWIKERIS)

Gerald Guntur P. Siregar ^{[1]*}, Budi Prasetyo ^[1], R. Alfin Septya Nugroho ^[2]

^[1] BBWS Citanduy, Kementerian PUPR, Banjar, 46332, Indonesia

^[2] Department of Project Engineering 1, PT. Waskita Karya, Tbk, Banjar, 46332, Indonesia

Email: gerald.siregar@pu.go.id*, bpras_22@yahoo.com, alfin.septya@waskita.co.id

*) Correspondent Author

Received: 30 May 2022; Revised: 26 July 2022; Accepted: 27 July 2022

How to cite this article:

Siregar, G.G.P., Prasetyo, B., Nugroho, R.A.S., (2022). Komparasi Model Numerik dan Fisik pada Bangunan Pelimpah Aliran Bebas dan Terkontrol. Jurnal Teknik Sipil, 18(2), 280-298. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i2.4861>

ABSTRAK

Jumlah variabel yang diperlukan dalam proses perancangan struktur hidrolis sangat menyulitkan jika semua parameter didefinisikan secara matematis. Model numerik adalah salah satu alternatif yang sudah banyak digunakan oleh para ahli dalam menyelesaikan kesulitan tersebut. Studi ini dilakukan untuk mengkaji model tiga dimensi (3D) yang direpresentasikan dengan *Digital Terrain Model* (DTM) dari data pengukuran lapangan untuk mengetahui kemampuan model numerik yang diimplementasikan pada struktur pelimpah Bendungan Leuwikeris dapat mendekati model fisik yang sebelumnya sudah pernah dilakukan. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan *Open Foam software* sebagai alat komputasi fluida dinamis (CFD). Simulasi dilakukan dalam tiga skenario yaitu pada aliran debit Q_{PMF} , Q_{1000} , dan Q_{100} . Masing – masing skenario akan meninjau gaya tekanan air yang bekerja pada dinding saluran peluncur dan performa redaman energi kolam olak. Hasil studi menunjukkan elevasi air di hulu pelimpah pada aliran debit Q_{PMF} , Q_{1000} , dan Q_{100} telah sesuai dengan hasil pemodelan fisik yang telah dilakukan. Elevasi muka air pada tembok yang berhadapan dengan pelimpah dan pintu air perlu melebihi elevasi tembok desain yang ada untuk Q_{PMF} . Apabila limpasan saat Q_{PMF} tidak diijinkan, maka elevasi puncak tembok perlu ditambah sampai pada elevasi +155,00 m. Kolam olak belum mampu meredam aliran pada debit rencana Q_{100} tahun sehingga perlu dilakukan modifikasi desain yang ada.

Kata kunci: Fisik, Leuwikeris, Numerik, Pelimpah, Simulasi

ABSTRACT. *NUMERICAL AND PHYSICAL MODEL COMPARASION OF THE SPILLWAY STRUCTURE (CASE STUDY: LEUWIKERIS DAM).* The number of variables needed in the hydraulic structure design process is very difficult if all parameters are defined mathematically. Numerical model is one alternative that has been widely used by experts in solving these difficulties. This study was conducted to determine the ability of the numerical model implemented on the spillway structure of the Leuwikeris Dam to approach the physical model that had previously been carried out. Numerical simulations were performed using *Open Foam software* as a *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tool. Simulations were carried out in three scenarios, namely on Q_{PMF} , Q_{1000} , and Q_{100} discharge flows. Each scenario will review the water pressure force acting on the launch channel wall and the energy attenuation performance of the stilling basin. The results of the study show that the water elevation upstream of the spillway at the Q_{PMF} , Q_{1000} , and Q_{100} discharge flows is in accordance with the results of the physical modeling that has been carried out. The water level elevation on the wall opposite the spillway and sluice gate needs to exceed the existing wall elevation for Q_{PMF} . If runoff during Q_{PMF} is not permitted, then the elevation of the top of the wall needs to be increased to an elevation of +155.00 m. The stilling basin has not been able to reduce the flow at the planned Q_{100} year discharge, so it is necessary to modify the existing design.

Keywords: Physical, Leuwikeris, Numerical, Spillway, Simulation

1. PENDAHULUAN

Pelimpah tipe ogee adalah salah satu struktur hidrolis yang paling banyak diterapkan karena karakteristik hidrolisnya yang luar biasa. Pelimpah tipe ogee digunakan untuk mengontrol debit dan kedalaman tampungan pada bendungan (Badanapuri, 2018). Pelimpah tipe lain yang juga biasanya ditemui adalah pelimpah ogee yang kontrolnya diatur melalui pintu. Pelimpah tipe ini biasanya dibangun pada bendungan urugan untuk mengalirkan debit banjir dari waduk untuk mencegah terjadinya *overtopping* pada tubuh bendungan (Ahmed & Aziz, 2018). Pelimpah harus memiliki desain yang ekonomis dan fungsional, oleh karena itu, parameter hidrolis seperti debit, kedalaman aliran dan kecepatan harus diketahui secara akurat. Meskipun banyak informasi tentang pemahaman pelimpah ogee, namun setiap turunan dari parameter standar seperti kedalaman aliran dan bentuk puncak dapat mengubah parameter aliran.

Dalam proses perancangan struktur hidrolis, karena ada banyak variabel, tidak mungkin untuk mendefinisikan semua parameter secara matematis. Studi model fisik memungkinkan untuk menghindari ketidakakuratan dan menemukan solusi yang paling tepat sebelumnya. Masalah yang dapat dilihat selama tahap operasi struktur hidrolis dapat menyebabkan hilangnya nyawa manusia dan harta benda yang tidak dapat dikompensasikan. Sebuah studi model fisik diselidiki di laboratorium untuk menentukan masalah yang mungkin timbul di lapangan (Alam, 2018). Namun, biaya yang diperlukan untuk model fisik mungkin sangat mahal jika dibandingkan dengan model numerik karena membutuhkan tenaga kerja profesional, waktu konstruksi, dan laboratorium yang luas. Efek skala adalah kelemahan lain dari model fisik karena mungkin ada perbedaan antara hasil model dan prototipe terutama dalam aliran turbulen (Yildiz, et al., 2020). Keterbatasan – keterbatasan tersebut membuat para peneliti mencoba menggunakan simulasi numerik dalam melakukan studi aliran yang melewati struktur hidrolis (Dehdar-Behbahani & Parsaie, 2016).

Penelitian ini mencoba mensimulasikan pola aliran yang melewati pelimpah Bendungan Leuwikeris menggunakan simulasi numerik 3 dimensi (3D). Gaya tekanan air yang bekerja di dinding saluran peluncur tentunya akan berpengaruh terhadap performa redaman energi dari kolam olak. Simulasi dilakukan pada beberapa skenario yang telah ditetapkan. Hasil dari simulasi numerik ini kemudian akan dibandingkan dengan hasil model tes yang sebelumnya sudah dilakukan pada tahap perencanaan. Perbandingan ini bertujuan untuk mengoptimalkan hasil simulasi numerik apabila dikemudian hari diperlukan suatu perubahan desain karena satu dan lain hal. Apabila hasil dari simulasi numerik mendekati hasil dari model tes, tentunya ini akan sangat menunjang pelaksanaan pekerjaan konstruksi Bendungan Leuwikeris.

Untuk menunjang pelaksanaan pekerjaan konstruksi Bendungan Leuwikeris, maka dilakukan beberapa tinjauan terhadap perencanaan yang telah dilakukan. Tinjauan tersebut antara

lain tinjauan terhadap gaya tekanan air yang bekerja di dinding saluran peluncur dan evaluasi terhadap performa redaman energi dari kolam olak. Tinjauan yang dilakukan menggunakan pemodelan numerik 3 dimensi dengan memperhatikan skenario yang telah ditetapkan. Dari hasil pemodelan terhadap desain yang ada akan diperoleh gambaran dan rencana penyempurnaan desain tersebut. Kriteria perencanaan dari konstruksi pelimpah dan kolam olak bendungan Leuwikeris yang diperoleh dari Laporan Final Uji Model Fisik Bendungan Leuwikeris tahun 2018 adalah sebagai berikut:

- a. Kriteria debit, Q_{PMF} : 4767 m³/s
- b. Tipe : Pelimpah samping tipe Ogee (tanpa pintu)
- c. Debit Q_{PMF} dikurangi Q_{pintu} : 3225,39 m³/s
- d. Elevasi mercu pelimpah : +150,00 m
- e. Elevasi muka air banjir : +156,48 m
- f. Elevasi apron : +148,00 m

Bangunan pemecah energi didesain dengan debit Q_{100out} dengan lebar 35,00 m, elevasi dasar olakan + 74,00 m dan panjang mencapai 40,00 m dibangun untuk meredam energi akibat aliran dari saluran peluncur. Hasil perencanaan bangunan pemecah energi adalah sebagai berikut:

- a. Kriteria debit, Q_{100} : 600,30 m³/s
- b. Tipe : USBR Tipe II
- c. Lebar kolam olak : 35,00 m
- d. Panjang kolam olak : 46,32 m
- e. Elevasi dasar kolam olak : +71,57 m

2. METODOLOGI

Model yang digunakan dalam pemodelan ini adalah model volume fluida atau *Volume of Fluid* (VoF) yang diperkenalkan oleh Hirt dan Nichols (1981) untuk menyelesaikan permasalahan aliran dengan permukaan bebas yang kompleks. Dalam model ini, fluida dibagi menjadi dua fase yaitu fase air dan udara dengan proporsi volume α . Persamaan umum dari model ini didasarkan berdasarkan persamaan Navier-Stokes untuk fluida tidak terkompresi:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot p U U^T = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu \nabla U + p R] + p g + f_{\sigma} \quad (2)$$

Dengan U adalah vektor kecepatan fluida, p adalah tekanan fluida, μ adalah viskositas dinamis ($p\nu$), g adalah percepatan gravitasi, R adalah tensor tekanan Reynold dan f adalah tegangan permukaan. ρ dan ν merupakan densitas dan viskositas kinematika fluida campuran dimana untuk dua tipe fluida dihitung berdasarkan fraksi volume α :

$$\rho = \rho_1\alpha + \rho_2(1 - \alpha) \quad (3)$$

$$v = v_1\alpha + v_2(1 - \alpha) \quad (4)$$

Untuk memperoleh distribusi fraksi volume, digunakan persamaan adveksi dengan menggunakan vektor kecepatan. Kecepatan artifisial U_r digunakan untuk mencegah fraksi volume terdifusi untuk menjaga batas yang jelas antara fase air dan udara (Rusche, 2002):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot U\alpha + \nabla \cdot U_r\alpha(1 - \alpha) = 0 \quad (5)$$

Untuk memperhitungkan turbulensi, digunakan model turbulen dengan pendekatan rata-rata Reynold (*Reynold Averaged Navier Stokes*) atau disebut juga model RANS (Alfonsi, 2009). Model turbulen yang digunakan adalah $k-\omega$ (Menter, et al., 2003) dengan penambahan efek apung (*bouyancy*) untuk menghindari terbentuknya turbulensi pada area peralihan fase (Devolder, et al., 2017):

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (pUk) - \nabla \cdot (\rho(v + \sigma_k v_t)\nabla k) = \rho P_k + G_b - \rho\beta * \omega k \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (pU\omega) - \nabla \cdot (\rho(v + \sigma_k v_\omega)\nabla \omega) = \frac{\gamma}{v_t} \rho G - \rho\beta\omega^2 + 2(1 - F_1)\rho \frac{\sigma_\omega^2}{\omega} \nabla k \nabla \omega \quad (7)$$

$$G_b = -\frac{v_t}{\sigma_t} \nabla \cdot (\rho g) \quad (8)$$

Dengan k adalah energi kinetik turbulen, P_k adalah laju produksi dari k , v_t adalah viskositas turbulen eddy dan ω adalah laju disipasi spesifik. P_k , G dan v_t dihitung sebagai berikut:

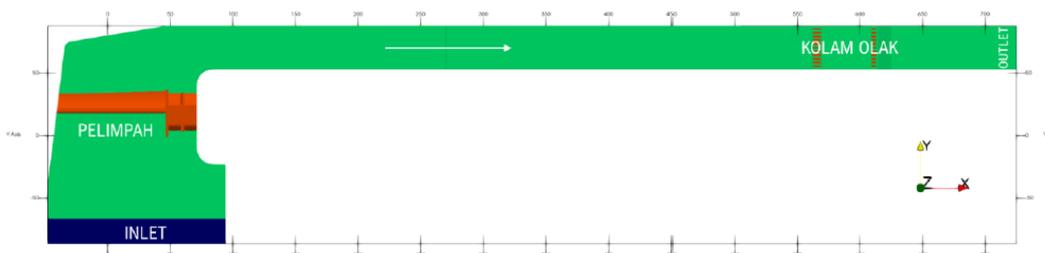
$$P_k = \min(G, 10\beta^* k\omega) \quad (9)$$

$$G = v_t(\nabla \times U) \cdot (\nabla \times U)^T \quad (10)$$

$$v_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)} \quad (11)$$

S adalah laju rata-rata regangan aliran, $\beta^* = 0,09$, $a = 0,31$, F_1 dan F_2 adalah koefisien pencampuran untuk perhitungan σ_k , σ_ω , β dan γ .

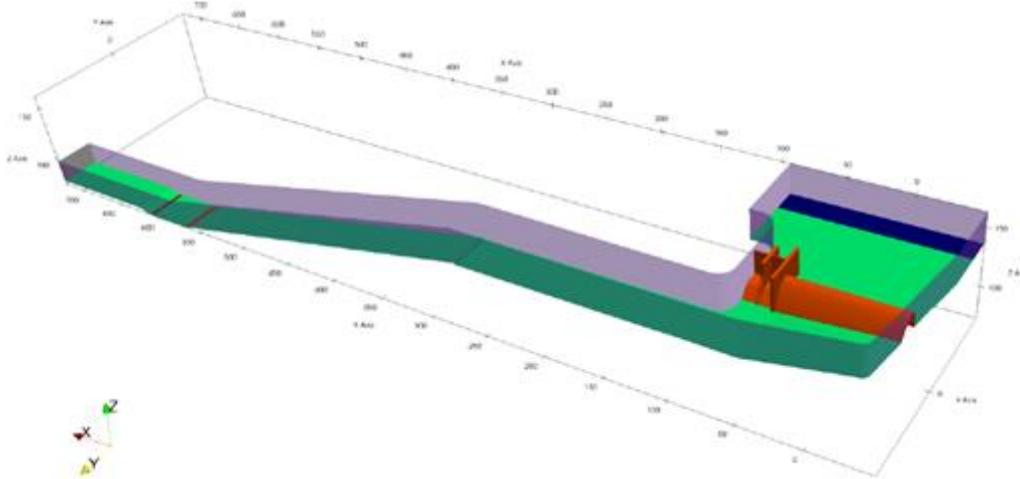
Domain pemodelan yang digunakan hanya memodelkan struktur pelimpah, saluran peluncur dan kolam olak. Domain pemodelan ditunjukkan pada Gambar 1 dan tampilan 3 dimensi domain pemodelan pada Gambar 2.



Gambar 1. Tampak Atas Domain Pemodelan Numerik

Jaring atau kisi-kisi (*meshing*) menggunakan *unstructured grid* dengan resolusi:

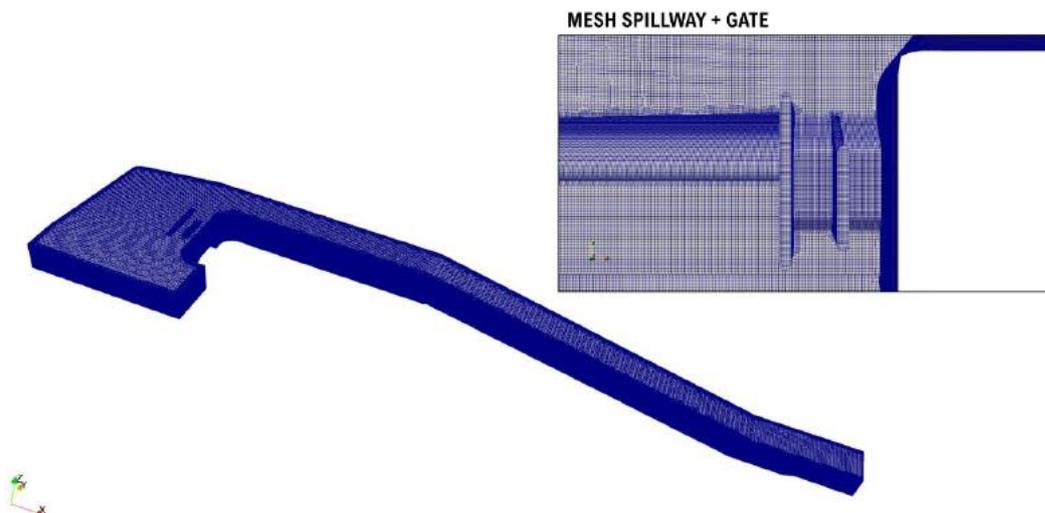
Δx maksimum = 87,50 cm dan Δx minimum = 21,80 cm
 Δy maksimum = 75,00 cm dan Δy minimum = 18,90 cm
 Δz maksimum = 50,00 cm dan Δz minimum = 12,50 cm



Gambar 2. Tampilan 3D Domain Pemodelan Numerik

Gambar 3 menunjukkan jaring atau kisi-kisi yang digunakan dalam pemodelan. Kondisi batas untuk domain model:

- Inlet patch* dengan kecepatan sesuai kondisi debit yang digunakan.
- Tembok dan dasar saluran dengan menggunakan kondisi tidak slip.
- Kondisi tekanan atmosfer standar.
- Outlet patch* dengan kondisi gradien nol.



Gambar 3. Jaring atau Kisi-kisi Pemodelan Numerik

Gambar 3 menunjukkan permodelan jaring atau kisi-kisi bangunan pelimpah dengan kondisi serta batasan dalam studi ini. Permodelan 3D ini menggunakan jaring atau kisi-kisi sebagai bagian dari bangunan yang akan dialiri dengan *fluida*. Gambar 3 menunjukkan area yang akan dianalisa 3D, sedangkan permodelannya dilakukan dengan detail, mulai dari bangunan mercu, dinding pengarah, saluran peluncur, peredam energi, dan saluran peluncur. Kondisi debit yang akan disimulasikan:

- a. Debit Q_{PMF} = 4767 m³/s, kondisi 2 pintu dibuka.
- b. Debit Q_{1000} = 1066 m³/s, kondisi pintu ditutup.
- c. Debit Q_{100} = 600 m³/s, kondisi pintu ditutup untuk evaluasi kolam olak.

3. HASIL DAN DISKUSI

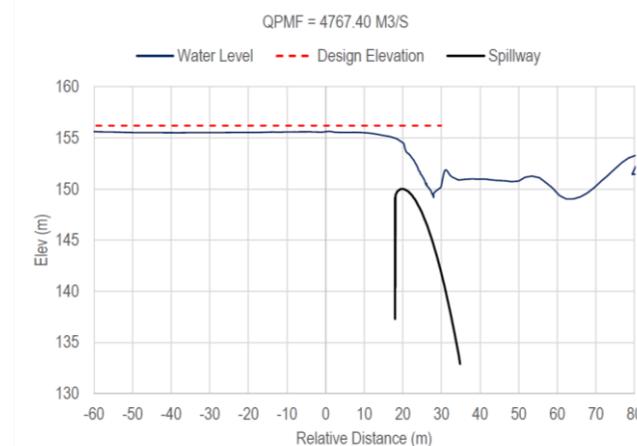
3.1 Hasil Simulasi Debit Q_{PMF}

Hasil simulasi menunjukkan elevasi muka air di hulu pelimpah pada elevasi +156,10 m, hal ini cukup sesuai dengan hasil model fisik pada +156,20 m seperti pada Gambar 4. Grafik simulasi aliran ditampilkan dalam kurva sumbu x dan y, dimana sumbu x adalah jarak dan sumbu y adalah tinggi elevasi air. Titik 0 (nol) digunakan untuk mempermudah permodelan sebagai titik acuan sumbu lokal. Grafik diambil pada lokasi muka pelimpah dimana hasil simulasi kecepatan menunjukkan kecepatan setelah pelimpah dan pintu mencapai 15 m/s.

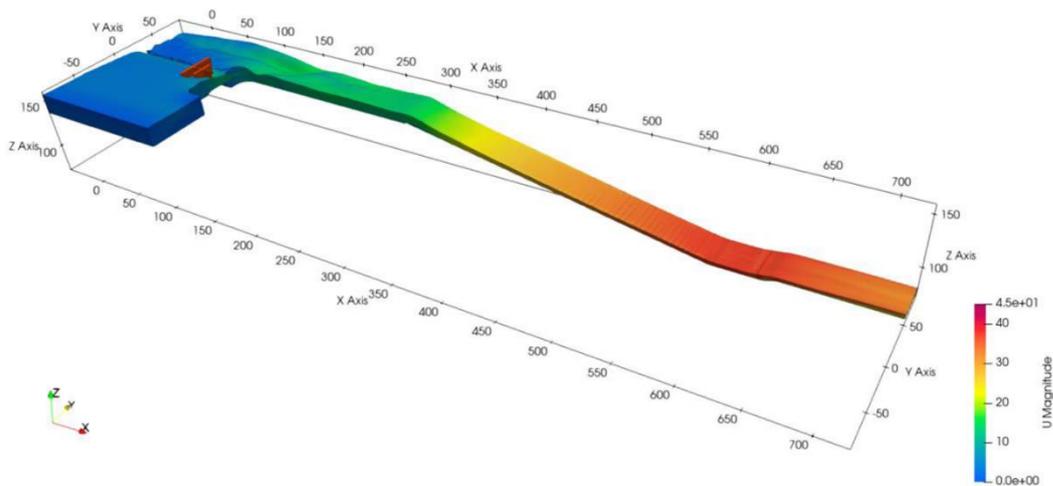
Pola aliran sebelum *end sill* pada Gambar 5 tidak menunjukkan adanya *cross flow*, hal ini disebabkan karena muka air yang cukup tinggi. Kolam olak memiliki desain persegi empat seperti pada Gambar 6 dengan kecepatan aliran setelah kolam olak mencapai $v = 29,70$ m/s dan elevasi muka air setelah kolam olak $y = D = 4,74$ m sehingga angka Froude setelah kolam olak:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} = \frac{29,7}{\sqrt{9,81 \times 4,74}} = 4,4 \quad (12)$$

Dimana kolam olak tidak didesain untuk meredam aliran dengan Q_{PMF}

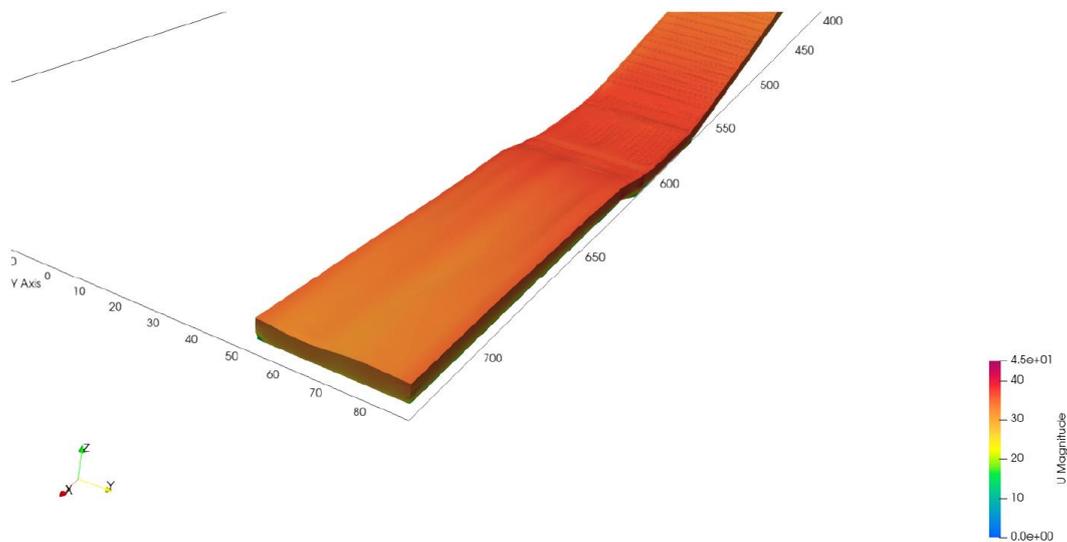


Gambar 4. Hasil Simulasi Elevasi Muka Air di Hulu Pelimpah (*Existing Design*)



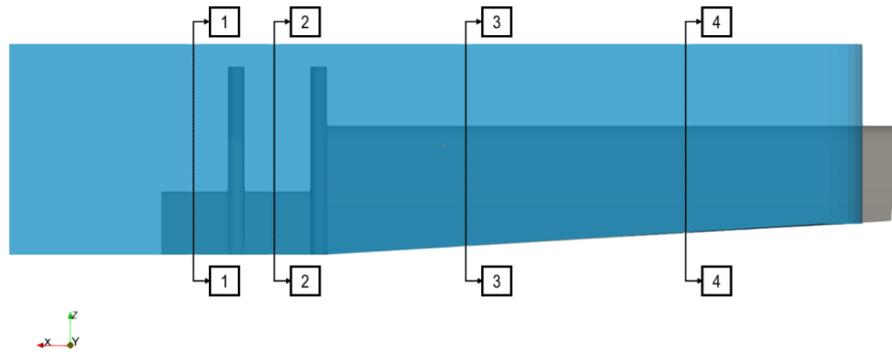
Gambar 5. Pola Kecepatan Aliran Setelah Pelimpah dan Pintu (Q_{PMF} Existing Design)

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan pola kecepatan aliran setelah pelimpah pada kondisi Q_{PMF} dimana nilai dari kecepatan aliran ditunjukkan dengan skala warna dengan satuan SI (m/s). Pada lokasi kolam olak menunjukkan nilai kecepatan aliran dengan nilai $v = 29,70$ m/s. Satuan yang digunakan pada gambar adalah metrik dengan skala warna pada permodelan 3D pola aliran tersebut.



Gambar 6. Pola Kecepatan Aliran $v = 29,70$ m/s Setelah Kolam Olak (Q_{PMF} Existing Design)

Tekanan air yang bekerja pada tembok di depan pelimpah dan pintu air dihitung pada 4 *cross-section* seperti Gambar 7. Dari hasil simulasi didapatkan informasi elevasi tinggi muka air akibat Q_{PMF} yang terjadi pada tembok saluran, yang ditunjukkan pada Gambar 8. Elevasi muka air pada tembok cukup tinggi dengan elevasi maksimum +154,30 m pada *section* 4 dan sekitar +153,20 m pada *section* 1-3. Oleh karena itu disarankan penambahan tinggi tembok pada elevasi +155,00 m pada *section* 4 dan +154,00 m pada *section* 1-3.

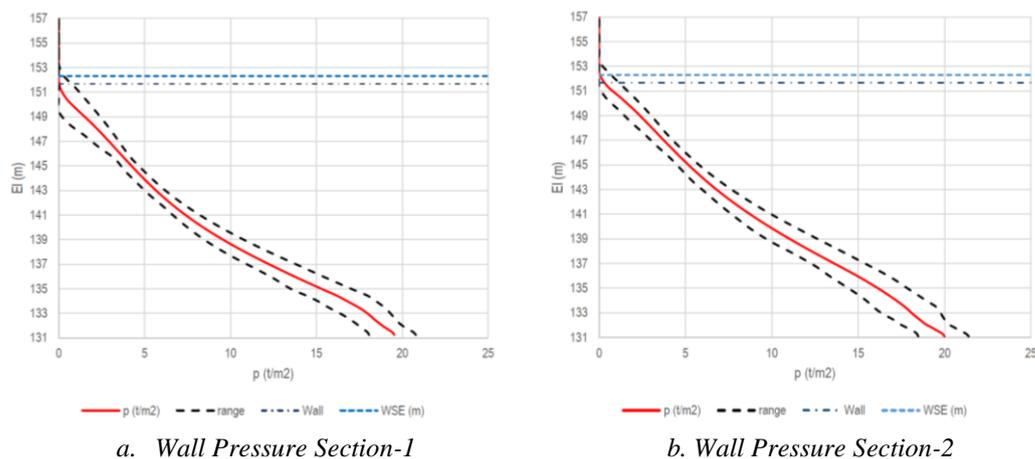


Gambar 7. Lokasi Perhitungan Tekanan Air pada Tembok Saluran *Existing Design* (Penampang Longitudinal)

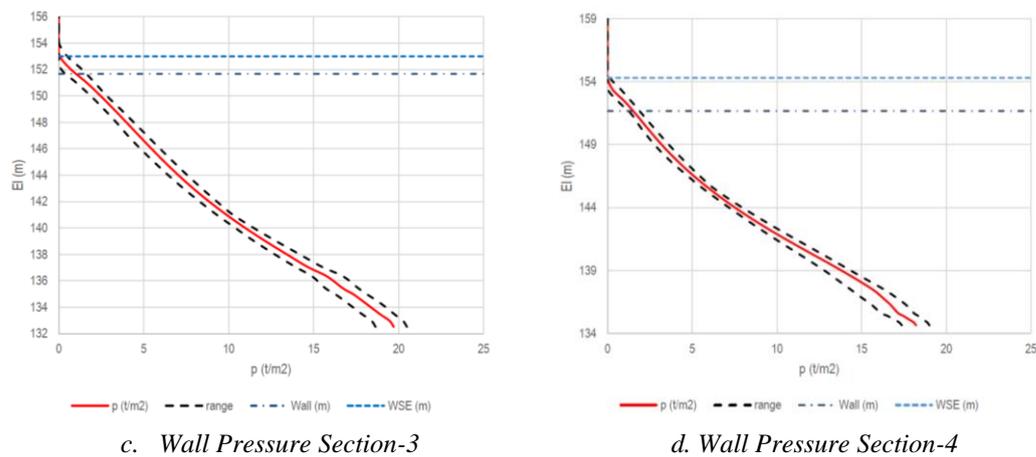
Gambar 8 menunjukkan tekanan air pada masing masing *section* Gambar 7. Nilai tekanan diambil dari grafik permodelan 3D yang telah dibuat dan satuan yang digunakan dalam permodelan menggunakan satuan metrik (t/m^2). Contoh tekanan air pada *section* – 3, dimana elevasi dasar berada pada +131,00 m dan elevasi Q_{PMF} +152,00 m (beda elevasi $h = 21$ m), maka nilai tekanan air dapat dihitung menggunakan Persamaan (13):

$$P = \frac{F}{A} = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 10 \cdot 21 = 210000 \frac{N}{m^3} = 21,41 t/m^2 \quad (13)$$

dimana ρ adalah massa jenis air dengan nilai 1000 kg/m^3 dan g adalah gravitasi bumi dengan nilai 10 m/s^2 . Nilai tekanan air menggunakan Persamaan (13) tervalidasi dengan *range* nilai pada grafik pemodelan 3D pada Gambar 8.



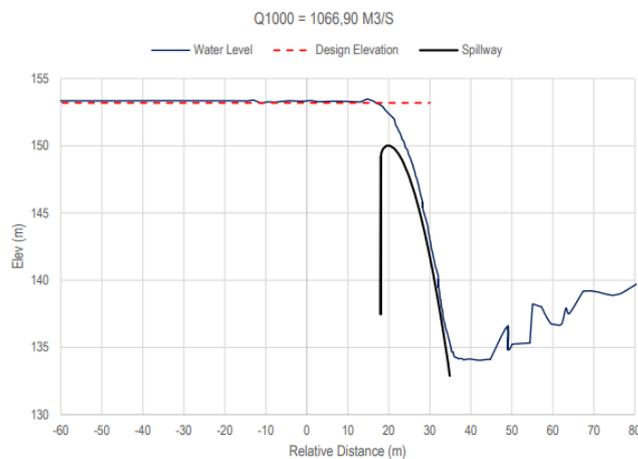
Gambar 8. Tekanan Air pada Masing – masing Section (Q_{PMF} *Existing Design*)



Gambar 8. Tekanan Air pada Tiap Section (Q_{PMF} Existing Design) (lanjutan)

3.2 Hasil Simulasi Debit Q_{1000}

Pada kondisi debit Q_{1000} dengan pintu tertutup, hasil simulasi menunjukkan elevasi muka air di hulu pelimpah pada elevasi +153,40 m di mana simulasi cukup mendekati data teknis pelimpah pada Laporan Pemodelan Fisik pada +153,27 m seperti Gambar 9. Nilai 0 (nol) pada Gambar 9 merupakan lokasi tinjauan lokal yang ada pada permodelan 3D saluran bangunan pelimpah.



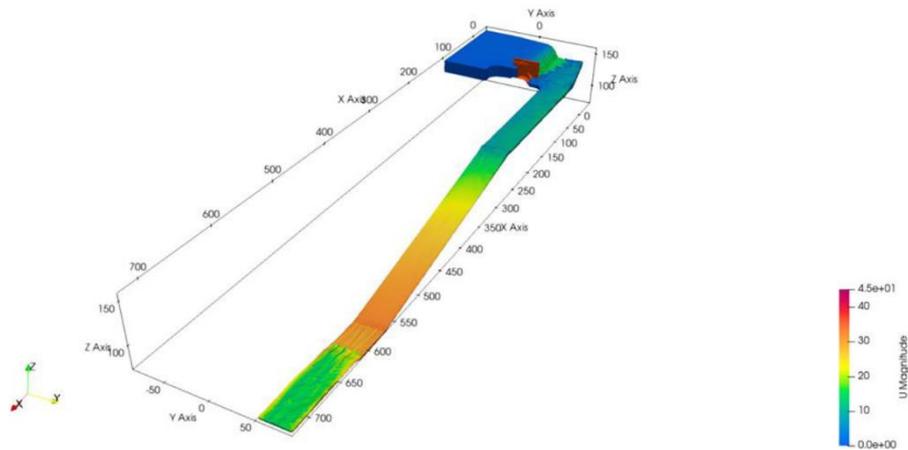
Gambar 9. Hasil Simulasi Elevasi Muka Air di Hulu Pelimpah (Q_{1000} Existing Design)

Hasil simulasi kecepatan menunjukkan kecepatan setelah pelimpah dan pintu mencapai 15 m/s. Gambar 10 menunjukkan pola aliran bersilangan (*cross flow*) yang dapat dilihat pada aliran sebelum *end sill*. Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan pola kecepatan aliran setelah pelimpah pada kondisi Q_{1000} dimana nilai dari kecepatan aliran ditunjukkan dengan skala warna dengan satuan SI (m/s). Nilai kecepatan aliran pada lokasi kolam olak $v = 15,20$ m/s dengan satuan yang digunakan pada gambar adalah metrik dengan skala warna pada permodelan 3D pola aliran

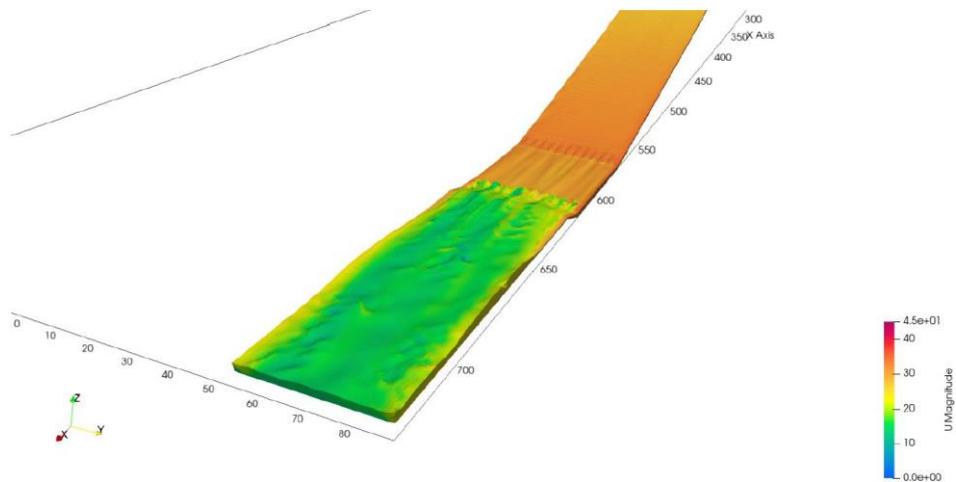
tersebut. Pemasangan *end sill* dapat dilihat mampu meredam aliran bersilangan, meskipun masih terlihat sedikit aliran bersilangan pada hulu saluran peluncur. Kecepatan aliran sebelum kolam olak pada Gambar 6 sebesar 29 m/s. Setelah melewati kolam olak, kecepatan aliran 15,20 m/s dan elevasi muka air $y = D = 2,05$ m dari Gambar 11, angka Froude setelah kolam olak:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} = \frac{15.2}{\sqrt{9.81 \times 2.05}} = 3.4 \quad (14)$$

Dimana kolam olak tidak didesain untuk meredam aliran dengan Q_{1000} .

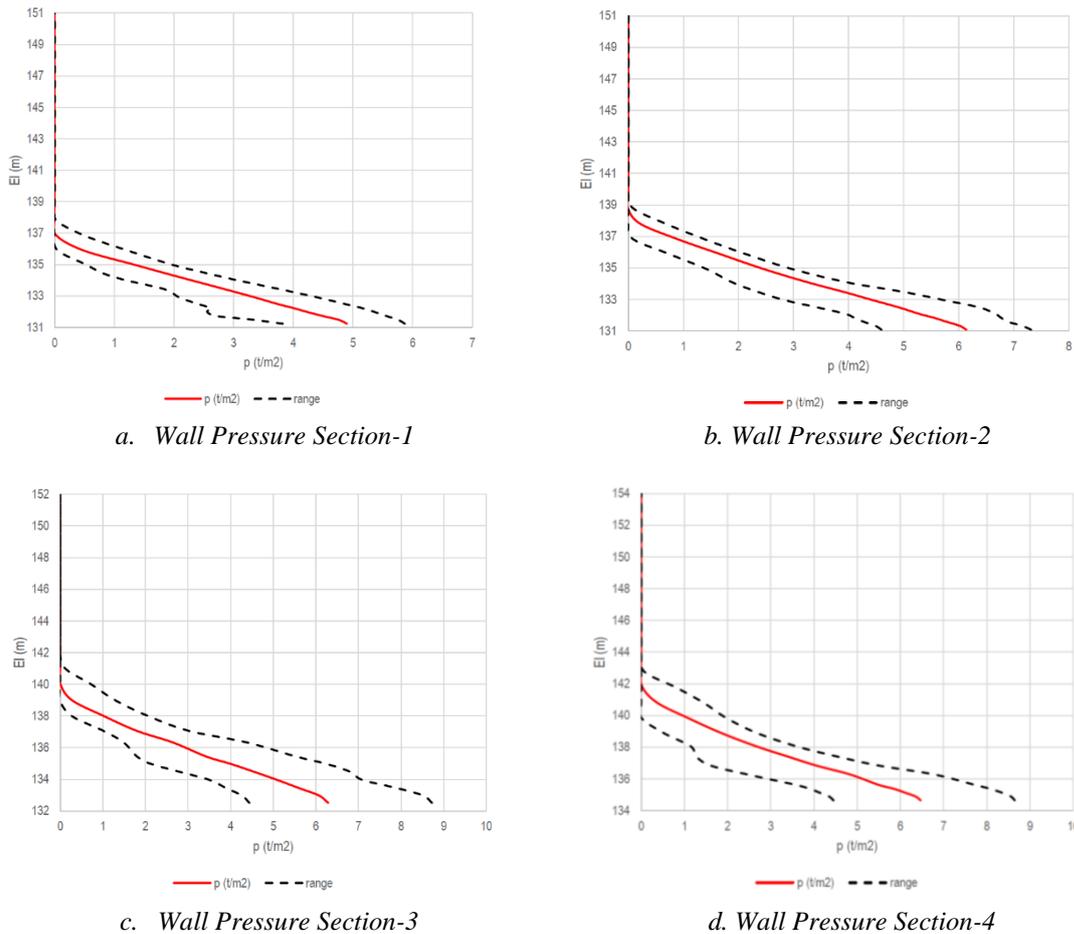


Gambar 10. Pola Kecepatan Aliran Setelah Pelimpah dan Pintu (Q_{1000} Existing Design)



Gambar 11. Pola Kecepatan Aliran Setelah Kolam Olak (Q_{1000} Existing Design)

Tekanan air yang bekerja pada tembok di depan pelimpah dan pintu air dihitung pada 4 *cross-section* sama seperti pada Gambar 7. Dari hasil simulasi diperoleh tekanan yang terjadi pada tembok saluran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.



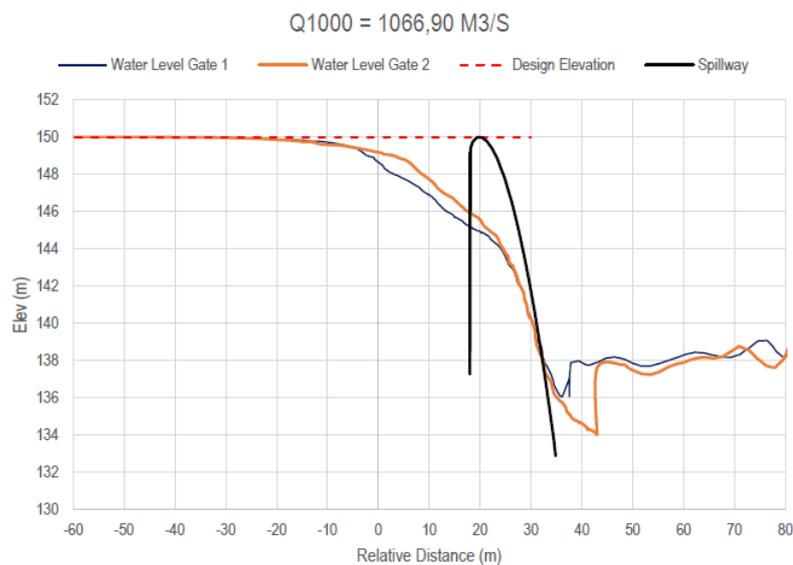
Gambar 12. Tekanan Air pada Tiap Section (Q_{1000} Existing Design)

Gambar 12 menunjukkan tekanan air pada masing masing *section* menurut Gambar 7. Nilai tekanan diambil dari grafik permodelan 3D yang telah dibuat dan satuan yang digunakan dalam permodelan menggunakan satuan metrik (t/m^2). Contoh tekanan air pada *section* – 3, dengan elevasi dasar berada pada +132,00 m dan elevasi Q_{PMF} +140,00 m (beda elevasi $h = 8$ m), dengan menggunakan Persamaan (12), didapatkan nilai tekanan air sebesar 8,15 t/m^2 . Nilai tekanan air menggunakan Persamaan (13) tervalidasi dengan *range* nilai pada grafik pemodelan 3D pada Gambar 12.

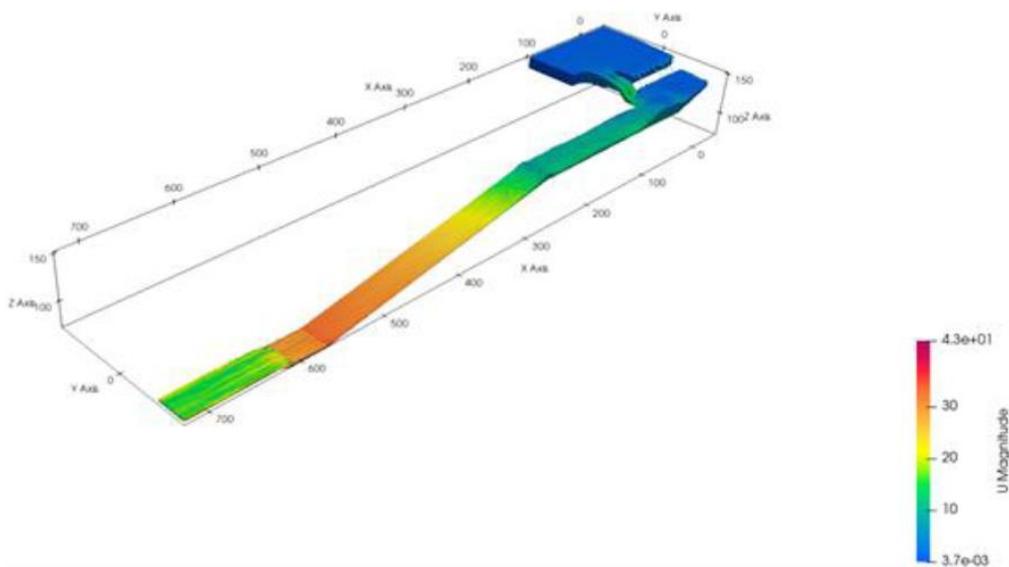
Pada kondisi debit Q_{1000} dimana kedua pintu dibuka, hasil simulasi menunjukkan elevasi muka air tidak melimpah, di mana hal ini telah sesuai dengan hasil pemodelan fisik. Elevasi muka air pada kedua pintu ditunjukkan pada Gambar 13. Pola kecepatan setelah pelimpah ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 15. Tekanan air yang bekerja pada tembok di depan pelimpah dan pintu air dihitung pada 4 *cross-section* menurut Gambar 7. Dari hasil simulasi diperoleh tekanan

yang terjadi pada tembok saluran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16 dimana tekanan air pada *section 1* dan *2* mencapai 14 t/m^2 .

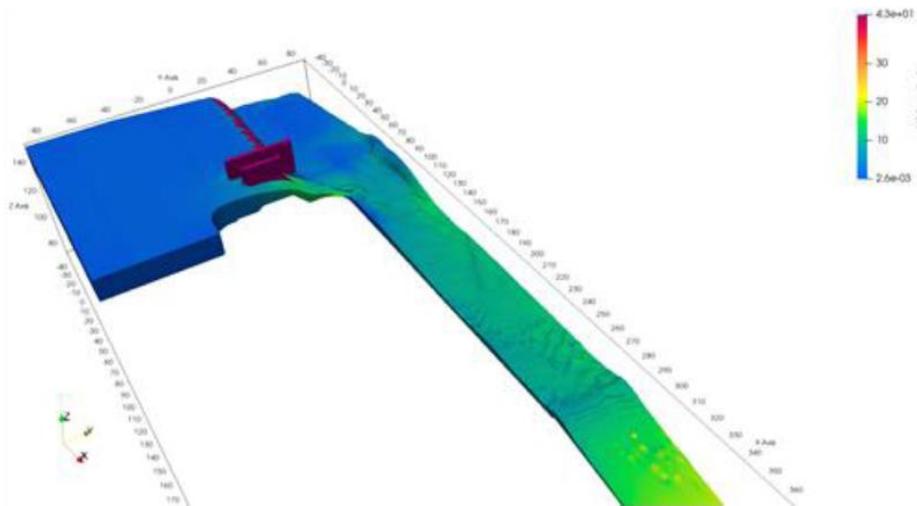
Simulasi dengan debit Q_{1000} dimodelkan menjadi 2 hal, pertama yaitu debit Q_{1000} dengan pintu air ditutup dan yang kedua Q_{1000} dengan pintu air dibuka, tujuannya adalah untuk melihat perilaku kecepatan aliran pada lokasi kolam olak dan menghitung nilai *Fraud* yang ada. Selain itu digunakan untuk mengetahui tekanan yang terjadi pada dinding pengarah. Tekanan ini nantinya dapat digunakan sebagai dasar pada permodelan struktur selanjutnya.



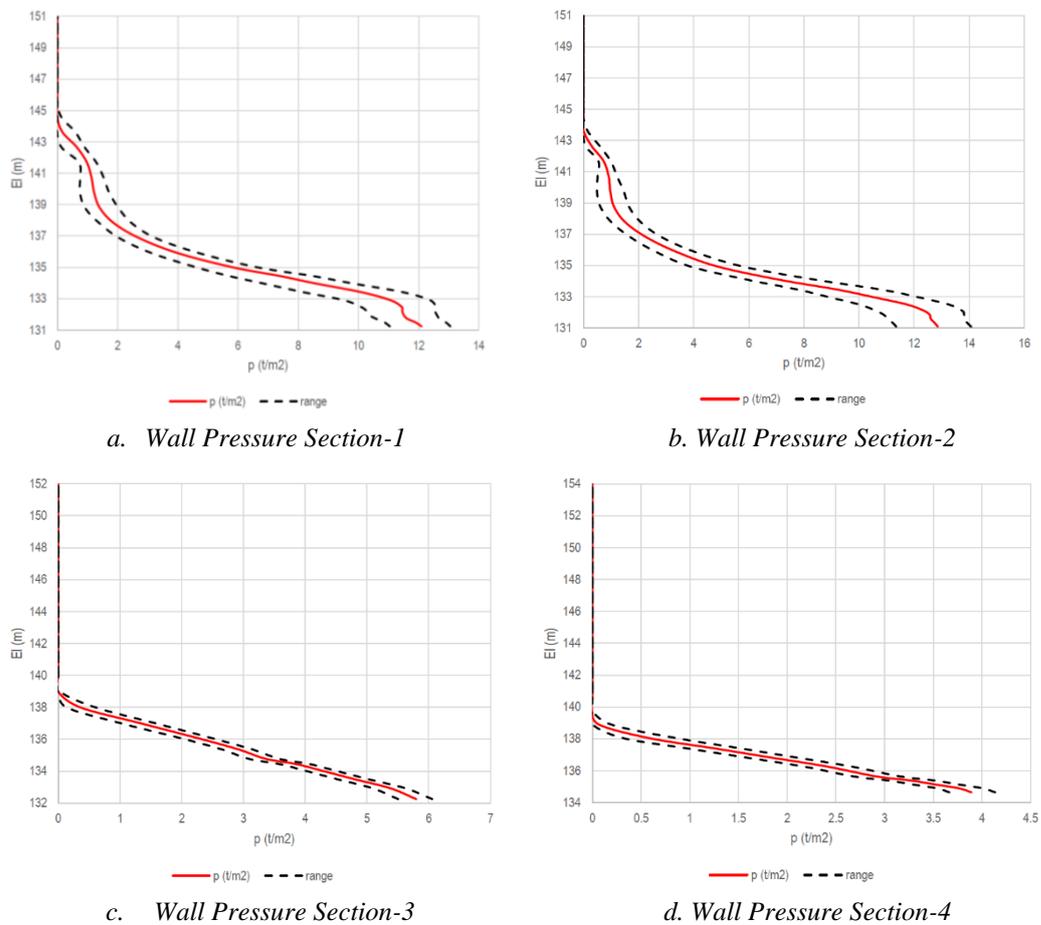
Gambar 13. Hasil Simulasi Elevasi Muka Air di Hulu Pelimpah, 2 Pintu Dibuka (Q_{1000} Existing Design)



Gambar 14. Pola Kecepatan Aliran Setelah Pelimpah dan Pintu, 2 Pintu Dibuka pada Lokasi Saluran Peluncur dan Kolam Olak (Q_{1000} Existing Design)



Gambar 15. Pola Kecepatan Aliran Setelah Pelimpah dan Pintu, 2 Pintu Dibuka pada Lokasi Mercu (Q_{1000} Existing Design)



Gambar 16. Tekanan Air Tiap Section, Bukaan 2 Pintu (Q_{1000} Existing Design)

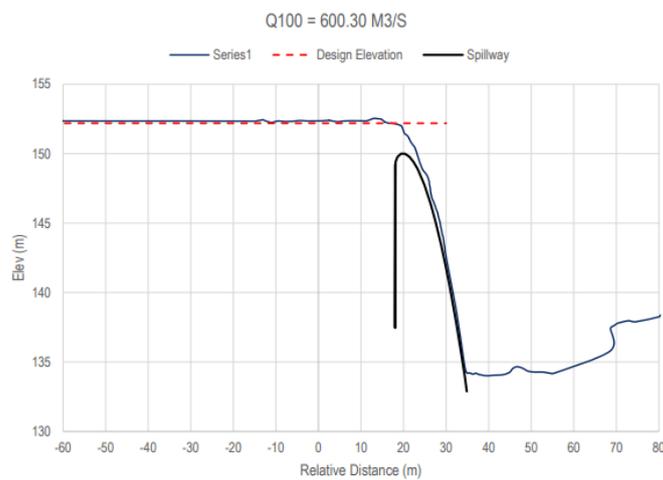
3.3 Hasil Simulasi Debit Q_{100}

Pada kondisi debit Q_{100} dengan pintu tertutup, hasil simulasi menunjukkan elevasi muka air di hulu pelimpah pada elevasi +152,35 m, hal ini cukup sesuai dengan data teknis pelimpah pada Laporan Pemodelan Fisik pada +152,19 m seperti Gambar 17.

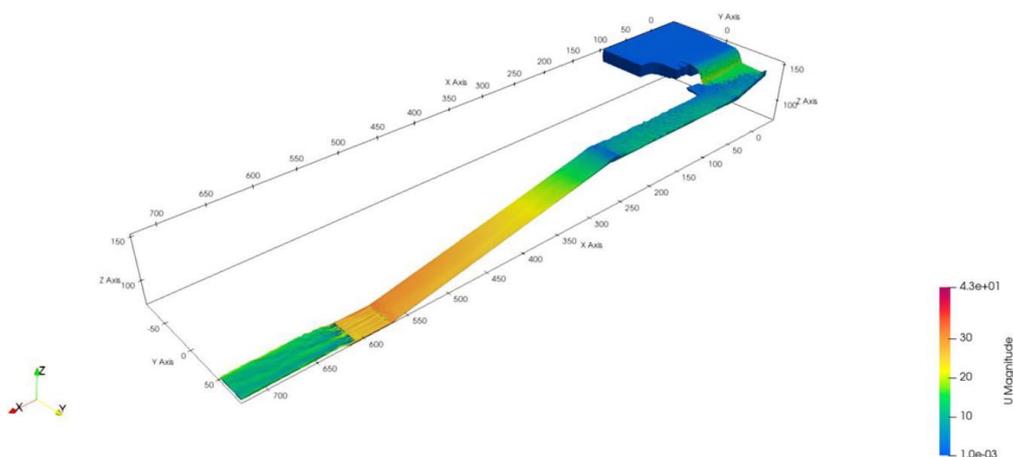
Hasil simulasi kecepatan menunjukkan kecepatan setelah pelimpah dan pintu 15 m/s sedangkan kecepatan sebelum kolam olak mencapai 29 m/s. Gambar 18 menunjukkan pola aliran sebelum *end sill* masih tidak beraturan (terjadi *cross flow*) namun setelah *end sill* aliran sudah cukup tenang. Pada Gambar 19 setelah melewati kolam olak, kecepatan aliran 11,3 m/s dan elevasi muka air 11,3 m. Angka Froude setelah kolam olak:

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gd}} = \frac{11.3}{\sqrt{9.81 \times 1.57}} = 2.87 \quad (15)$$

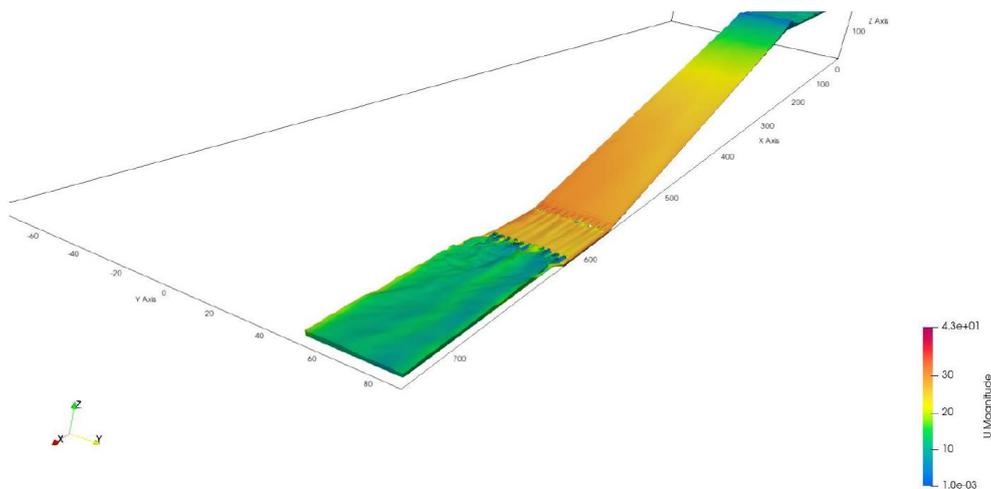
Dari hasil perhitungan angka Froude, dapat dilihat bahwa kolam olak belum berfungsi karena angka froude masih lebih besar dari 1 (aliran super kritis). Oleh karena itu perlu dilakukan modifikasi pada desain kolam olak sehingga mampu meredam aliran pada Q_{100} tahun.



Gambar 17. Hasil Simulasi Elevasi Muka Air di Hulu Pelimpah (Q_{100} Existing Design)

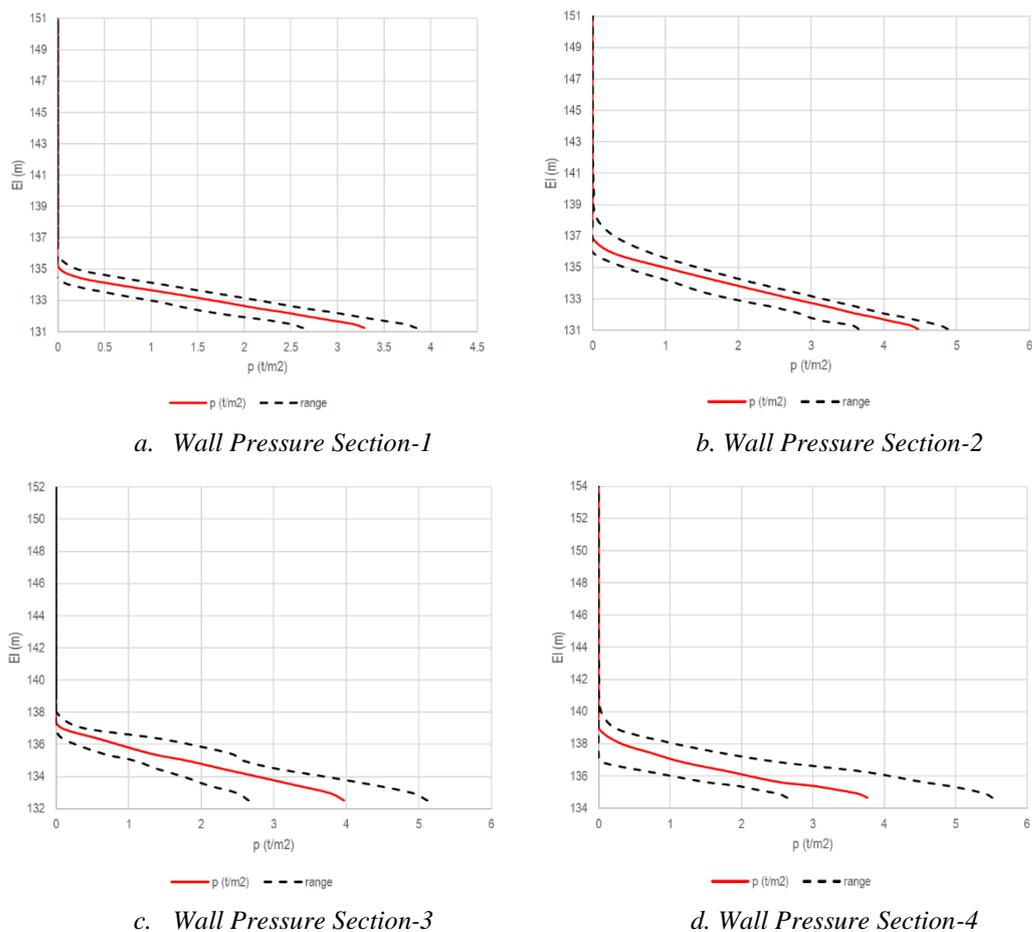


Gambar 18. Pola Kecepatan Aliran Setelah Pelimpah dan Pintu (Q_{100} Existing Design)



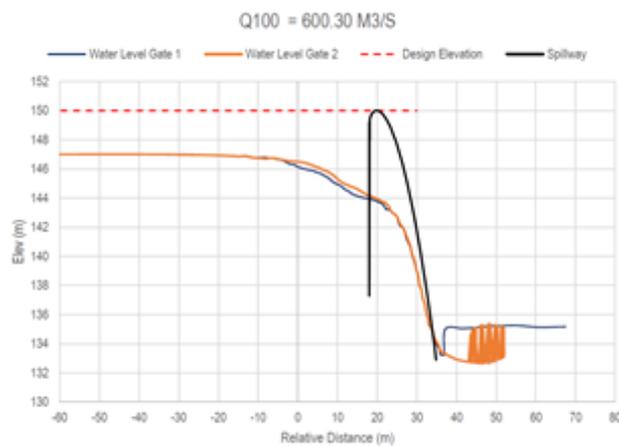
Gambar 19. Pola Kecepatan Aliran Setelah Kolam Olak (Q_{100} Existing Design)

Tekanan air yang bekerja pada tembok di depan pelimpah dan pintu air dihitung pada 4 *cross-section* menurut Gambar 7. Dari hasil simulasi diperoleh tekanan yang terjadi pada tembok saluran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.

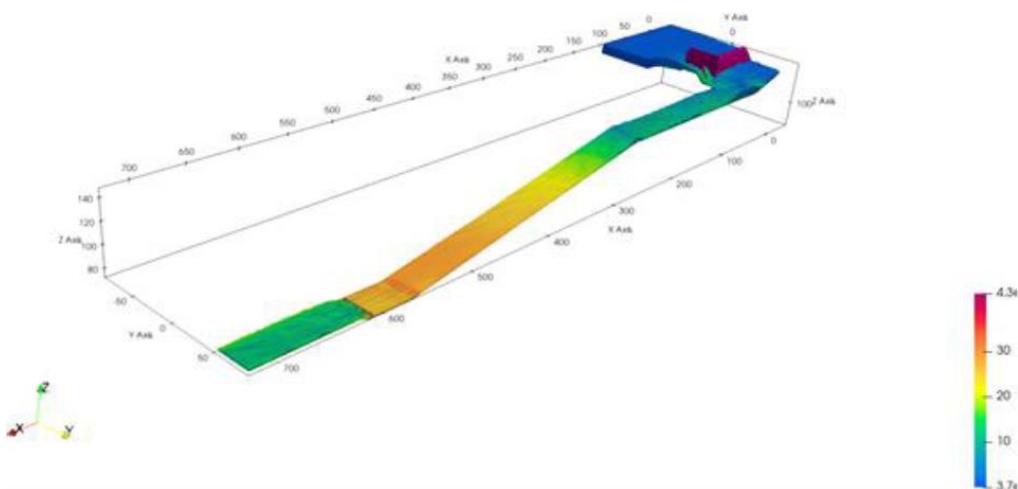


Gambar 20. Tekanan Air Tiap Section (Q_{100} Existing Design)

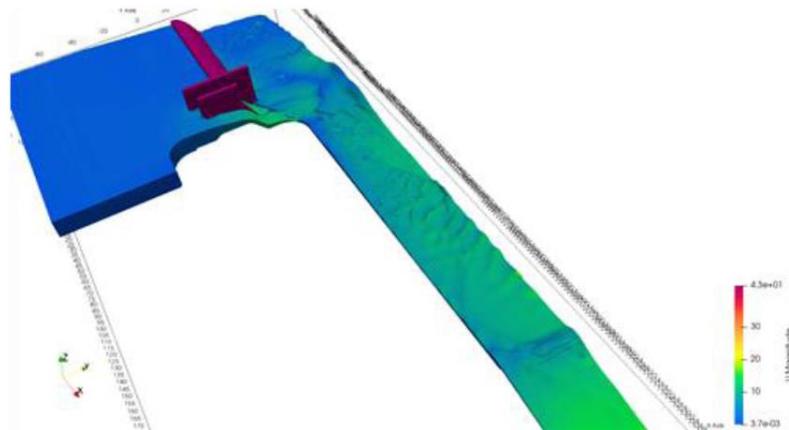
Pada debit Q_{100} dengan kedua pintu dibuka, hasil simulasi menunjukkan elevasi muka air tidak melimpah, hal ini sesuai dengan hasil pemodelan fisik. Elevasi muka air pada kedua pintu ditunjukkan pada Gambar 21. Elevasi pada hulu pelimpah lebih rendah dari elevasi mercu pelimpah, sedangkan hasil pada model fisik menunjukkan elevasi muka air pada +150,00 m. Perbedaan elevasi disebabkan oleh volume tampungan yang berbeda dari tampungan pada model fisik. Elevasi ini sudah sesuai dikarenakan dengan debit yang lebih besar (Q_{1000}) elevasi muka air belum melimpah pada mercu pelimpah apabila 2 pintu dibuka. Pola kecepatan setelah pelimpah ditunjukkan pada Gambar 22 dan Gambar 23. Tekanan air yang bekerja pada tembok di depan pelimpah dan pintu air dihitung pada 4 *cross-section* menurut Gambar 7. Dari hasil simulasi diperoleh tekanan yang terjadi pada tembok saluran seperti pada Gambar 24.



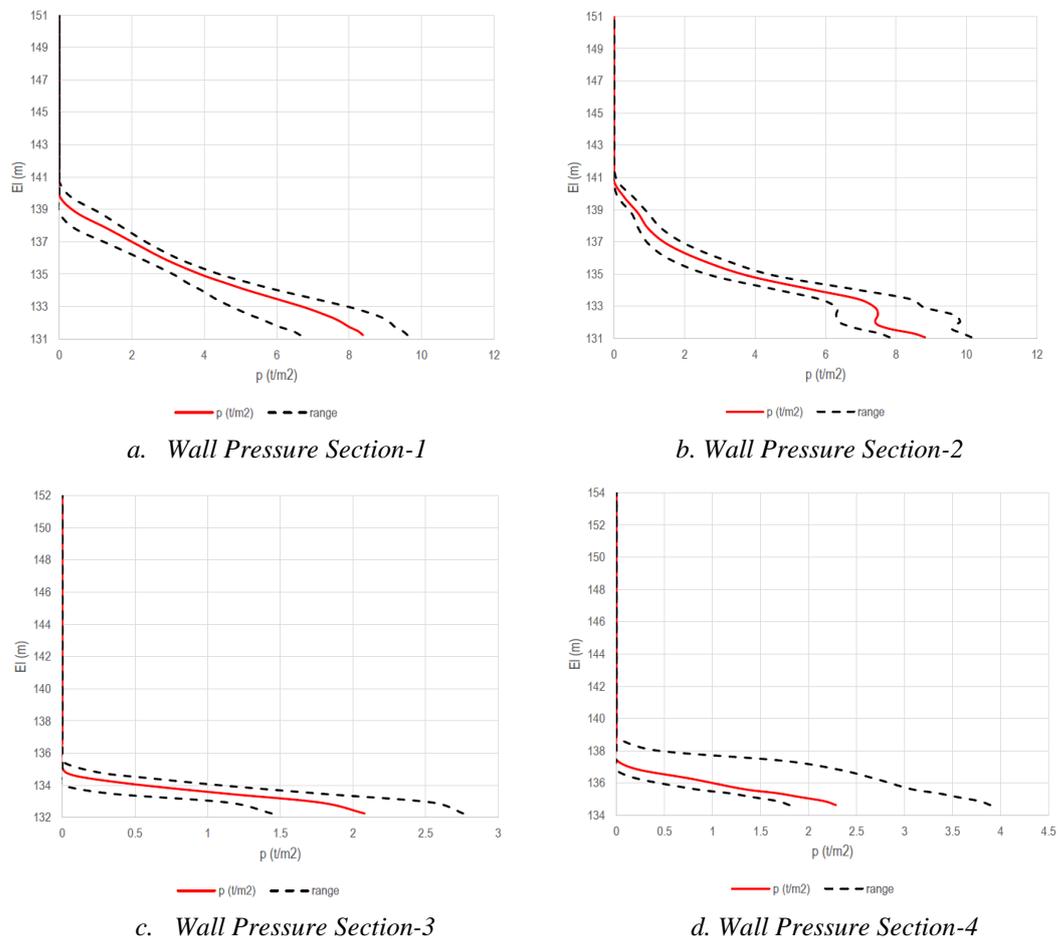
Gambar 21. Hasil Simulasi Elevasi Muka Air di Hulu Pelimpah, 2 Pintu Dibuka (Q_{100} Existing Design)



Gambar 22. Pola Kecepatan Aliran Setelah Pelimpah dan Pintu, 2 Pintu Dibuka pada Lokasi Kolam Olak (Q_{100} Existing Design)



Gambar 23. Pola Kecepatan Aliran Setelah Pelimpah dan Pintu, 2 Pintu Dibuka pada Lokasi Mercu (Q_{100} Existing Design)

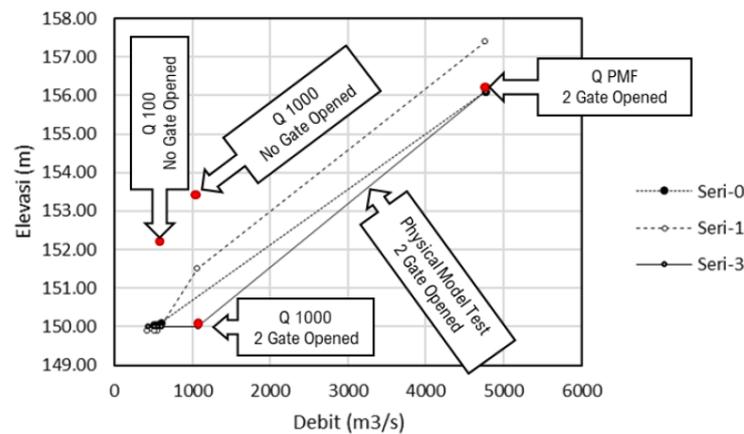


Gambar 24. Tekanan Air Tiap Section, Bukaan 2 Pintu (Q_{100} Existing Design)

4. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi model yang ada, diperoleh hasil sebagai berikut:

- a. Hasil simulasi untuk debit Q_{PMF} , Q_{1000} dan Q_{100} menunjukkan elevasi air di hulu pelimpah telah sesuai dengan data teknis bendungan dan hasil pemodelan fisik yang telah dilakukan. Gambar 25 menunjukkan *rating curve* pelimpah hasil model fisik dan hasil pemodelan numerik, dimana bila pintu air dibuka maka pada lokasi kolam olak tinggi muka air akan bertambah, naik turun-nya debit berdasarkan buka atau tutup pintu air, sedangkan naik-nya debit akan berakibat dengan naiknya elevasi muka air yang ada pada kolam olak.



Gambar 25. Perbandingan *Rating Curve* Model Numerik dan Model Fisik (Model Fisik Kondisi Bukaan 2 Pintu)

- b. Elevasi muka air pada tembok yang berhadapan dengan pelimpah dan pintu air perlu melebihi elevasi tembok yang ada untuk Q_{PMF} . Untuk Q_{1000} dan Q_{100} , elevasi muka air masih di bawah tembok pelimpah. Apabila *overtopping* untuk Q_{PMF} tidak diijinkan, maka elevasi puncak tembok perlu ditambah sampai pada elevasi +155,00 m seperti rekomendasi pada Gambar 26.



Gambar 26. Rekomendasi Penambahan Elevasi Puncak Tembok pada +155,00 m

- c. Kolam olak belum mampu meredam aliran pada debit rencana Q_{100} tahun, sehingga perlu dilakukan modifikasi terhadap desain yang ada. Modifikasi yang dilakukan sesuai saran dari hasil pemodelan fisik yaitu dengan menurunkan elevasi dasar kolam olak sebesar 1 m dengan bentuk kolam olak persegi empat.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S. S., & Aziz, Y. W. (2018). *Numerical Modeling of Flow in Side Channel Spillway Using ANSYS-CFX*. *Zanco Journal of Pure and Applied Sciences*, 30(1), 83-93. Accessed from: https://www.academia.edu/36946660/Numerical_Modeling_of_Flow_in_Side_Channel_Spillway_Using_ANSYS-CFX
- Alam, R. R. R. (2018). *Kajian Hidrolika Pelimpah Samping pada Model Fisik Bendungan Pasuruhan Kabupaten Magelang Provinsi Jawa Tengah dengan Skala 1: 60 (Doctoral dissertation, Universitas Brawijaya)*. Accessed from: <http://repository.ub.ac.id/12870/1/Rizki%20Robbi%20Rahman%20Alam.pdf>
- Alfonsi, G. (2009). *Reynolds-averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling*. *Applied Mechanics Reviews*, 62(4). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3124648>
- Badanapuri, V. R. (2018). *Design Principles that are Involved in the Design of Flow over an Ogee Crest Spillway*. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 8(8), 245-254. Accessed from: <https://www.ijsr.net/archive/v8i8/ART2020136.pdf>
- Bargess, M. F., Lesmana, C., & Tallar, R. Y. (2019). *Analisis Struktur Bendung dengan Metode Elemen Hingga*. *Jurnal Teknik Sipil*, 5(1), 1-21. DOI: <https://doi.org/10.28932/jts.v5i1.1309>
- Dehdar-Behbahani, S., & Parsaie, A. (2016). *Numerical Modeling of Flow Pattern in Dam Spillway's Guide Wall. Case study: Balaroud dam, Iran*. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 467-473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.006>
- Devolder, B., Rauwoens, P., & Troch, P. (2017). *Application of a Buoyancy-Modified $k-\omega$ SST Turbulence Model to Simulate Wave Run-Up Around a Monopile Subjected to Regular Waves Using OpenFOAM®*. *Coastal Engineering*, 125, 81-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.04.004>
- Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981). *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201-225. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- Menter, F. R., Kuntz, M., & Langtry, R. (2003). *Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model*. *Turbulence, heat and mass transfer*, 4(1), 625-632.
- Rusche, H. (2003). *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions (Doctoral dissertation, Imperial College London, (University of London))*. Accessed from: <http://hdl.handle.net/10044/1/8110>
- Yildiz, A., Yazar, A., Kumcu, S. Y., & Marti, A. I. (2020). *Numerical and ANFIS Modeling of Flow Over an Ogee-Crested Spillway*. *Applied Water Science*, 10(4), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-020-1177-4>