

EKSPLORASI KEMAMPUAN *OPEN-SOURCE* CFD OPENFOAM UNTUK SIMULASI *FREE-SURFACE DAM BREAK* DENGAN AMR

Niki Veranda Agil Permadi¹⁾ dan Erik Sugianto²

¹⁾Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

²⁾Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, Universitas Hang Tuah

E-mail: niki.veranda@ppns.ac.id

Abstract

Fenomena *dam break* merupakan salah satu kasus klasik dalam dinamika fluida yang menggambarkan pergerakan aliran dua fasa secara tiba-tiba akibat jebolnya bendungan atau tanggul. Studi ini mengeksplorasi kemampuan perangkat lunak *open-source computational fluid dynamics* (CFD) OpenFOAM dalam mensimulasikan aliran permukaan bebas pada kasus *dam break* menggunakan solver *interFoam*. Fitur *adaptive mesh refinement* (AMR) diterapkan untuk meningkatkan akurasi simulasi di sekitar antarmuka air-udara. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *mesh* dengan AMR mampu merepresentasikan pembentukan gelombang, tinggi muka air, dan sebaran tekanan yang lebih akurat sesuai dengan realitas fisik yang ditunjukkan pada eksperimen. *Mesh* dengan AMR cenderung memberikan prediksi tekanan yang lebih akurat dibandingkan *mesh* tanpa AMR pada sebagian besar lokasi pengukuran. Secara lokal, *mesh* dengan AMR berhasil menurunkan error pembacaan tekanan sebesar 6.7% di *probes* P1, 20% di *probes* P2, dan 23% di *probes* P7 apabila dibandingkan dengan *mesh* tanpa AMR. Hasil ini menunjukkan bahwa AMR memberikan peningkatan akurasi simulasi. Studi ini juga membuka potensi penerapan OpenFOAM untuk kasus dinamika fluida di bidang maritim seperti struktur terapung, *slamming*, *green water*, dan *sloshing*.

Keywords: *OpenFOAM, dam break, interFoam, adaptive mesh refinement, free-surface flow*

The dam break phenomenon is a classical case in fluid dynamics that illustrates the sudden motion of a two-phase flow resulting from the failure of a dam or levee. This study investigates the capability of the open-source computational fluid dynamics (CFD) software OpenFOAM to simulate free surface flows in a dam break scenario using the *interFoam* solver. The adaptive mesh refinement (AMR) feature was implemented to enhance the simulation accuracy around the water-air interface. The simulation results indicate that the AMR-enabled mesh is able to more accurately represent wave formation, water surface elevation, and pressure distribution, closely aligning with the physical behavior observed in experiments. The AMR mesh generally produced more precise pressure predictions than the non-AMR mesh across most measurement locations. Specifically, the AMR mesh reduced the pressure reading errors by 6.7% at probe P1, 20% at probe P2, and 23% at probe P7 compared to the mesh without AMR. These findings demonstrate that AMR improves simulation accuracy. Furthermore, this study highlights the potential application of OpenFOAM in maritime fluid dynamics problems, including floating structures, *slamming*, *green water*, and *sloshing* phenomena.

Keywords: *OpenFOAM, dam break, interFoam, adaptive mesh refinement, free-surface flow*

PENDAHULUAN

Aliran permukaan bebas (*free-surface flow*) merupakan salah satu fenomena penting dalam dinamika fluida yang banyak dijumpai pada berbagai aplikasi teknik, mulai dari infrastruktur sipil seperti bendungan dan kanal, rekayasa maritim dan lepas pantai, aerospace, otomotif, hingga nuklir (Fondelli dkk., 2015). Salah satu kasus klasik yang sering dijadikan uji numerik

adalah fenomena *dam break* (Hervouet, 2000), yaitu aliran tiba-tiba yang terjadi ketika sebuah kolom air dibebaskan dari hambatannya dan menyebar secara cepat ke wilayah sekitarnya. Fenomena ini tidak hanya merepresentasikan skenario banjir akibat jebolnya tanggul, tetapi juga menyerupai dinamika aliran mendadak dalam berbagai konteks kelautan yang membawa risiko bahaya pada lingkungan (Ferdowsi dkk., 2021; Maranzoni & Tomirotti, 2023; Peng dkk., 2023).

Secara fisik, peristiwa *dam break* memiliki kemiripan karakteristik dengan fenomena seperti *slamming* di haluan kapal, masuknya *green water* ke geladak, serta *sloshing* dalam tangki cairan. Seluruh fenomena tersebut melibatkan gerakan cepat dari fluida, interaksi dengan struktur padat, serta perubahan bentuk permukaan bebas secara dinamis. Oleh karena itu, studi terhadap *dam break* tidak hanya penting untuk validasi metode numerik aliran dua fasa (Ozmen-Cagatay & Kocaman, 2011; Zhainakov & Kurbanaliev, 2013), tetapi juga dapat menjadi dasar bagi pengembangan simulasi lanjutan dinamika fluida .

Untuk memodelkan fenomena tersebut, dibutuhkan metode numerik yang mampu melacak antarmuka fluida dengan baik. Salah satu pendekatan umum yang digunakan adalah metode *Volume of Fluid* (VoF), yang mampu menangani deformasi permukaan bebas secara eksplisit dalam domain simulasi.

Di lingkungan akademik, perangkat lunak computational fluid dynamics (CFD) yang digunakan simulasi aliran *free-surface* umumnya merupakan perangkat lunak komersial seperti ANSYS Fluent (Abdolmaleki dkk., 2004; Al-Fatlawi & Al-Shuker, 2023; Azmi dkk., 2023) maupun TELEMACH-3D dan FLOW-3D (Erduran dkk., 2024; Maranzoni & Tomirotti, 2023; Ozmen-Cagatay & Kocaman, 2011). Walaupun menawarkan berbagai fitur canggih, *software* tersebut memiliki keterbatasan dalam hal aksesibilitas, lisensi, serta modifikasi internal. OpenFOAM, yang merupakan *open-source* CFD, di sisi lain menawarkan fleksibilitas tinggi, dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan, dan bebas lisensi. Sehingga sangat potensial untuk digunakan sebagai penelitian maupun alat pengajaran, khususnya dalam simulasi *multiphase* dan aliran permukaan bebas (*free-surface flow*). OpenFOAM menyediakan *solver interFoam* yang dirancang khusus untuk kasus aliran dua fasa berbasis VoF (Sánchez-Cordero dkk., 2017; Widiatmono dkk., 2022).

Lebih lanjut, OpenFOAM memungkinkan penerapan teknik *adaptive mesh refinement* (AMR), yaitu metode untuk memfokuskan *mesh* halus di area penting seperti antarmuka fluida, tanpa harus memperbesar jumlah *mesh* secara keseluruhan. Dengan AMR, akurasi simulasi dapat ditingkatkan secara efisien, terutama pada kasus-kasus transien cepat seperti *dam break*.

Meskipun OpenFOAM bebas lisensi, sumber dokumentasi penggunaan *library* di dalamnya seperti AMR sangat terbatas, bahkan di dalam *website* resminya sekalipun.

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi kemampuan *solver multiphase flow (interFoam)* di OpenFOAM dalam memodelkan fenomena *free-surface dam break* secara tiga dimensi dengan menerapkan fitur *adaptive mesh refinement* (AMR) untuk meningkatkan ketelitian di sekitar antarmuka fluida. Studi ini diharapkan dapat memberikan dasar numerik yang kuat untuk pengembangan simulasi aliran *free-surface* pada struktur maritim serta mendorong pemanfaatan OpenFOAM sebagai alat simulasi *open-source* dalam Pendidikan, penelitian di bidang maritim, dan rekayasa fluida.

METODE PENELITIAN

a) Model Matematis Aliran Fluida

Dalam penelitian ini, aliran fluida *dam break* dimodelkan dengan persamaan Navier-Stokes yang terdiri dari persamaan kontinuitas dan persamaan momentum dengan fraksi volume fluida seperti dituliskan pada persamaan (1) dan (2) berikut (Rodríguez-Ocampo dkk., 2020).

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

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + \rho g + \sigma \kappa_\alpha \nabla \alpha \quad (2)$$

Dimana, U adalah vector kecepatan, ρ adalah massa jenis fluida, p adalah tekanan, μ adalah viskositas dinamik fluida, g adalah percepatan gravitasi, σ adalah tegangan permukaan, κ_α adalah kelengkungan permukaan, dan α adalah besaran skalar dari fraksi volume fluida di dalam *mesh* yang ditentukan dengan menyelesaikan persamaan (3). Persamaan (3) ini dikenal sebagai persamaan Volume of Fluid (VoF).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \cdot U) + \nabla \cdot (\alpha(1 - \alpha)U_r) = 0 \quad (3)$$

Dimana, $U_r = U_l - U_g$ dengan U_l dan U_g adalah kecepatan 2 fluida yang berbeda (air dan udara). Karena pada aliran *free-surface* terdiri dari 2 fluida maka massa jenis dan viskositas

dinamik di dalam domain *mesh* dihitung berdasarkan fraksi volume fluida seperti ditunjukkan pada persamaan (4) dan persamaan (5).

$$\rho = \alpha\rho_l + (1 - \alpha)\rho_g \quad (4)$$

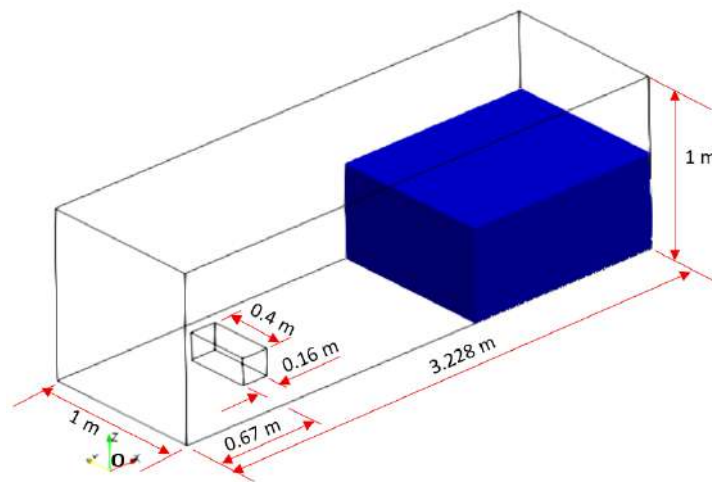
$$\mu = \alpha\mu_l + (1 - \alpha)\mu_g \quad (5)$$

Untuk aliran *incompressible* dengan 2 fasa (air dan udara) maka fraksi volume fluida α dapat meliputi:

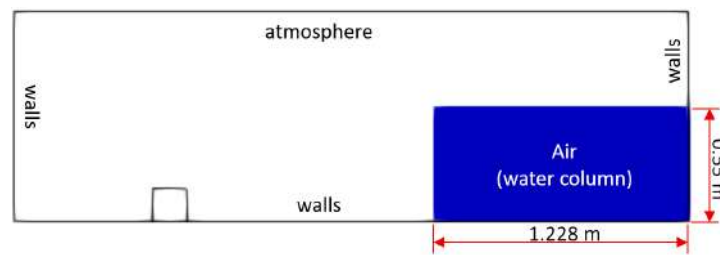
- 1) $0 < \alpha < 1$, *interface* antara 2 fluida (air dan udara) di dalam volume *mesh*
- 2) $\alpha = 0$, volume *mesh* yang terisi oleh udara
- 3) $\alpha = 1$, volume *mesh* yang terisi oleh air

b) Geometri dan Domain Komputasi

Simulasi pada penelitian ini dilakukan pada domain 3-dimensi berupa *water channel* dengan ukuran panjang, lebar, dan tinggi adalah $3.228 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Ukuran ini mengikuti konfigurasi eksperimen *dam break* dari Issa, R. & Violeau, D. (2006) dan Zhainakov, A.Zh. & Kurbanaliev, A.Y. (2013) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Sebuah kotak dengan ukuran $0.4 \text{ m} \times 0.16 \text{ m} \times 0.16 \text{ m}$ dipasang pada sisi *downstream* dengan posisi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Di dalam *water channel* volume air (*water column*) ditentukan dengan ketinggian 0.05 m dari dasar domain.



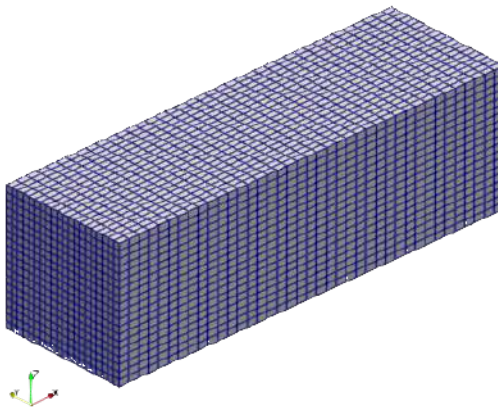
(a)



(b)

Gambar 1. Domain komputasi *dam break* (a) pandangan isometri; (b) pandangan memanjang

Proses *meshing* dilakukan dengan menggunakan *library blockMeshDict* dimana *mesh* yang dihasilkan berbentuk *structured-mesh* dengan jumlah *cell* ke arah sumbu $x \times y \times z$ adalah $39 \times 20 \times 19$. Hasil *mesh* dari *blockMeshDict* ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Hasil *mesh* dari *blockMeshDict*

c) Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Kondisi batas (*boundary condition*) digunakan untuk menentukan nilai fisik pada setiap patch dari domain komputasi. Kondisi batas sangat menentukan hasil simulasi yang dilakukan. Untuk menghasilkan simulasi yang sesuai dengan fenomena asli dari aliran *dam break* maka kondisi batas seperti yang disajikan pada Tabel 1 berikut digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Kondisi batas (*boundary condition*) pada setiap patch domain komputasi

Patch	Fields		
	U	alpha.water	p_rgh
atmosphere	pressureInletOutletVelocity	inletOutlet	totalPressure
walls	uniformFixedValue	zeroGradient	fixedFluxPressure

d) Solver dan Skema Numerik (*Numerical Schemes*)

Solver yang digunakan pada penelitian ini adalah *interFoam*, *solver* eksplisit untuk aliran dua fasa *incompressible* dengan metode VoF. *Solver* ini dijalankan dengan menggunakan algoritma PIMPLE yang merupakan kombinasi algoritma PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*) dan SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). Algoritma PIMPLE memungkinkan simulasi transien tetap stabil meskipun berjalan dalam kondisi *Courant number* (Co) yang besar ($Co > 1$). Sehingga ukuran *time step* yang digunakan dapat lebih fleksibel. Selanjutnya, metode numerik yang digunakan untuk mendiskretisasi persamaan Navier-Stokes dalam kasus ini adalah metode *2nd order accuracy*. Rangkuman dari setup *solver* dan skema numerik pada simulasi ini disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. *Setup solver* dan skema numerik

Parameter	Input
<i>Solver</i>	<i>interFoam</i>
Start time	0
<i>Time step</i>	0.01 s
End time	6 s
Time derrivative scheme ($\frac{\partial}{\partial t}$)	Euler
Gradient scheme (∇)	Gauss linear
Divergence scheme ($\nabla \cdot$)	U: Gauss linearUpwind grad(U) alpha: Gauss vanLeer
Laplacian scheme (∇^2)	Gauss linear corrected
Interpolation scheme	Linear
Surface normal gradient scheme	Corrected

e) ***Adaptive Refinement Mesh (AMR)***

Penelitian ini menggunakan *library* OpenFOAM *adaptive mesh refinement* (AMR) untuk memperhalus *mesh* pada interface antara 2 fluida (air dan udara). *Library* ini berada di dalam file *dynamicMeshDict*. Variabel *refinement* yang digunakan untuk mengaktifkan AMR adalah gradien dari α_{water} . *Mesh* di dalam domain komputasi akan diperhalus hanya di transisi antara $0.001 < \alpha_{water} < 0.999$ dengan interval 1 s, yang berarti *refinement* pada *interface* di dalam

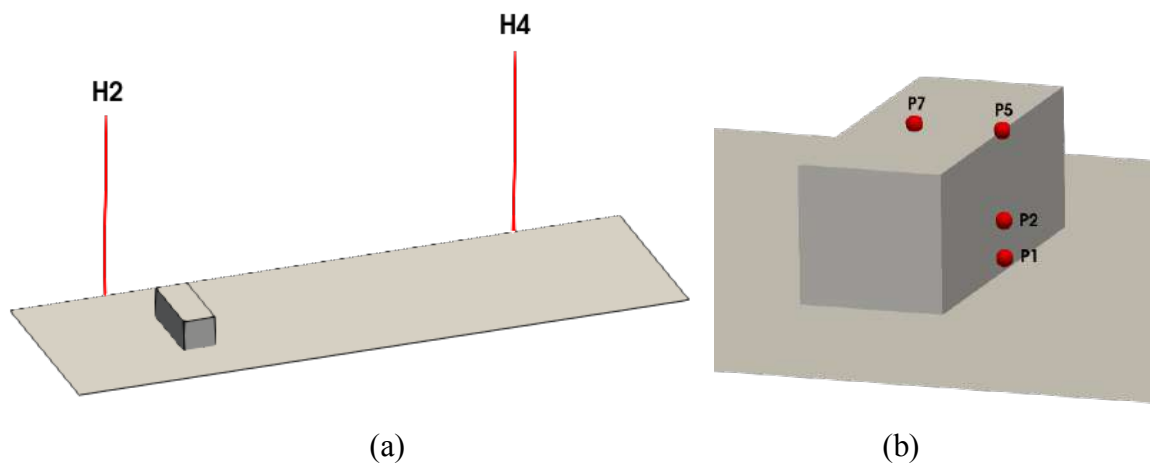
mesh akan dilakukan di setiap *time step*. Detail dari setup AMR pada *dynamicMeshDict* disajikan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. *Setup dynamicMeshDict* untuk mengaktifkan AMR

Parameter	Input
<i>dynamicFvMesh</i>	<i>dynamicRefineFvMesh</i>
<i>refineInterval</i>	1
<i>field</i>	<i>alpha.water</i>
<i>lowerRefineLevel</i>	0.001
<i>upperRefineLevel</i>	0.999
<i>unrefineLevel</i>	10
<i>nBufferLayers</i>	1
<i>maxRefinement</i>	2
<i>maxCells</i>	200,000

f) Lokasi *Sampling* Data

Untuk mendapatkan data simulasi, beberapa titik *sampling* dipasang pada domain komputasi mengikuti posisi *sampling* ketinggian muka air dan sensor tekanan pada eksperimen dan simulasi yang dilakukan oleh Zhainakov, A. Zh. (2013) dan Fondelli, T., dkk (2015) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

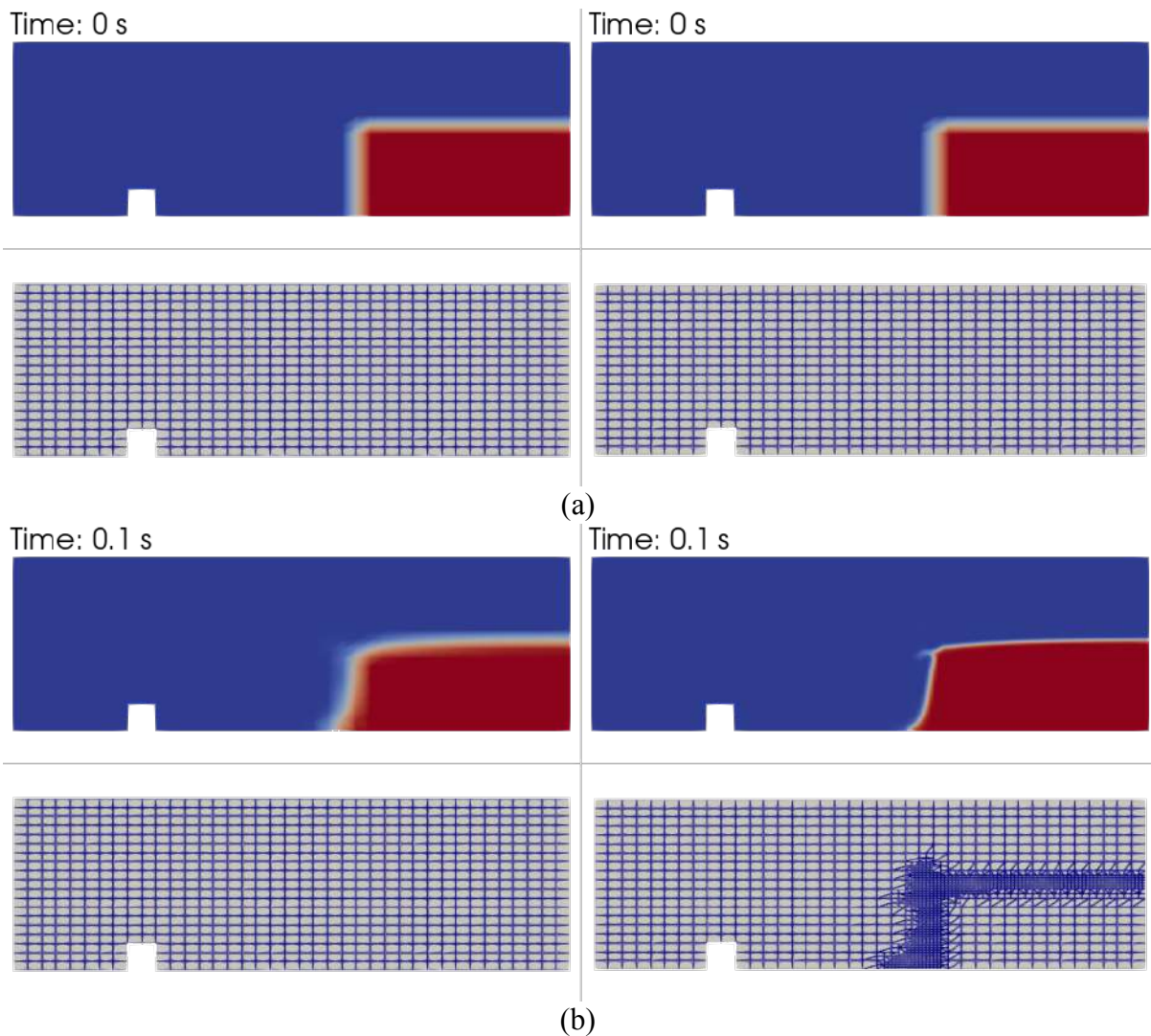


Gambar 3. Lokasi (a) *sampling* ketinggian air muka; (b) *probes* tekanan

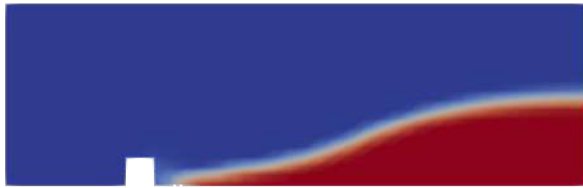
HASIL DAN PEMBAHASAN

a) Perubahan *Mesh* dan Fraksi Volume Fluida pada setiap *Time step*

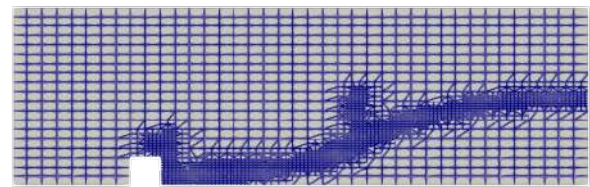
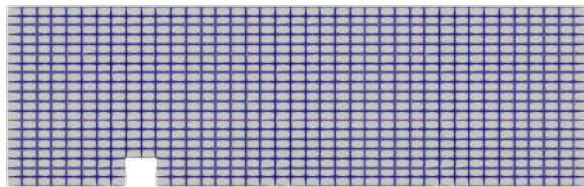
Pada kondisi awal ($t = 0 \text{ s}$) *mesh* di dalam domain fluida belum terjadi perubahan seperti ditampilkan pada Gambar 4(a), dimana *mesh* tanpa AMR dan *mesh* dengan AMR menunjukkan hasil yang sama. Seiring simulasi berjalan, AMR mulai aktif dan terjadi proses *refinement* pada daerah antarmuka fluida sesuai dengan kriteria *refinement* yang telah ditetapkan ($0.001 < \alpha_{\text{water}} < 0.999$) seperti ditunjukkan pada Gambar 4(b). Penerapan AMR menghasilkan *mesh* yang lebih padat di sekitar antarmuka fluida, meningkatkan ketelitian tanpa memperbesar jumlah *cell* secara global. Perbandingan dengan *mesh* tanpa AMR menunjukkan bahwa penerapan AMR memberikan hasil lebih halus dalam menangkap gelombang terutama di awal pergerakan dan cipratan air saat air menumbuk dinding seperti pada Gambar 4(c)-4(f).



Time: 0.4 s

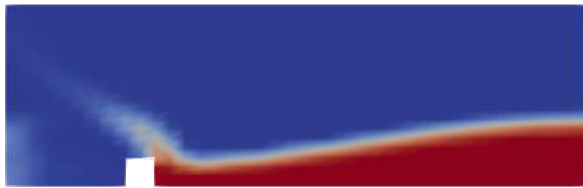


Time: 0.4 s

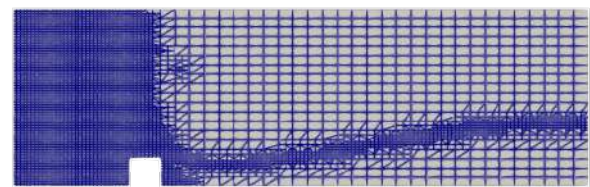
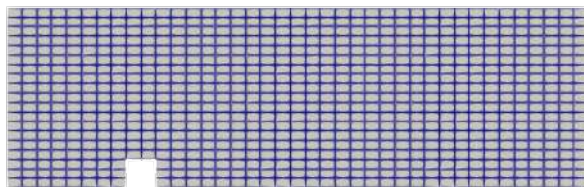


(c)

Time: 0.8 s

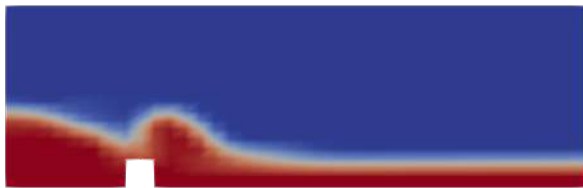


Time: 0.8 s

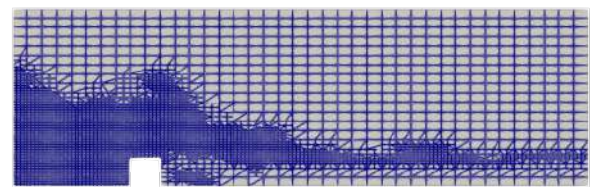
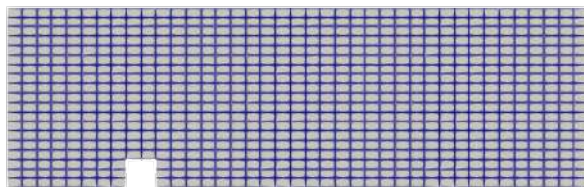
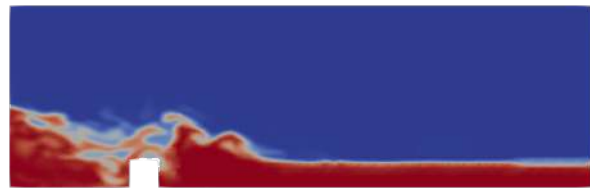


(d)

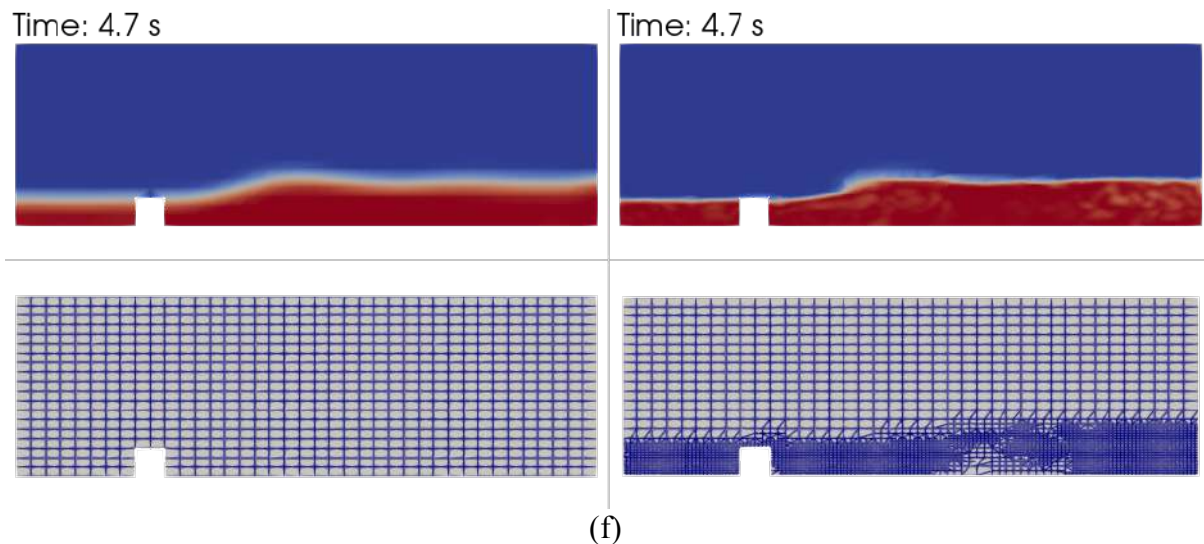
Time: 1.9 s



Time: 1.9 s



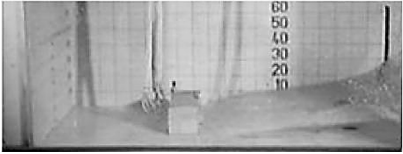
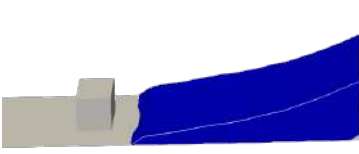
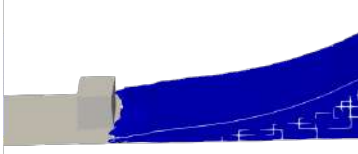

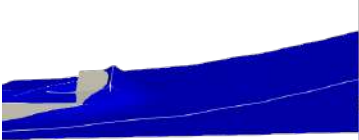

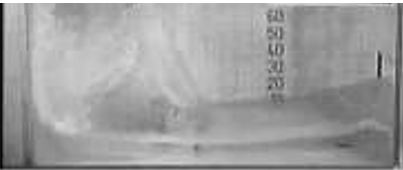
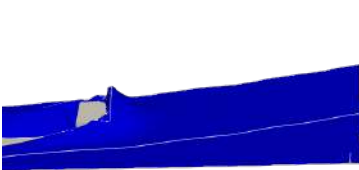



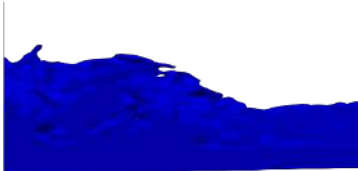

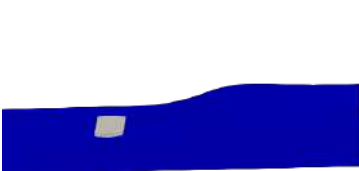
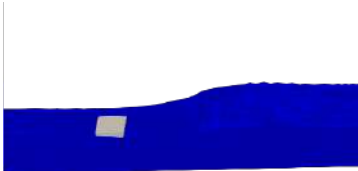
(e)



Gambar 4. Perubahan *mesh* dan fraksi volume fluida pada tiap *time step* (a) $t = 0$ s; (b) $t = 0.1$ s; (c) $t = 0.4$ s; (d) $t = 0.8$ s; (e) $t = 1.9$ s, dan (f) $t = 4.7$ s

b) Visualisasi Permukaan Bebas (*Free-Surface*)

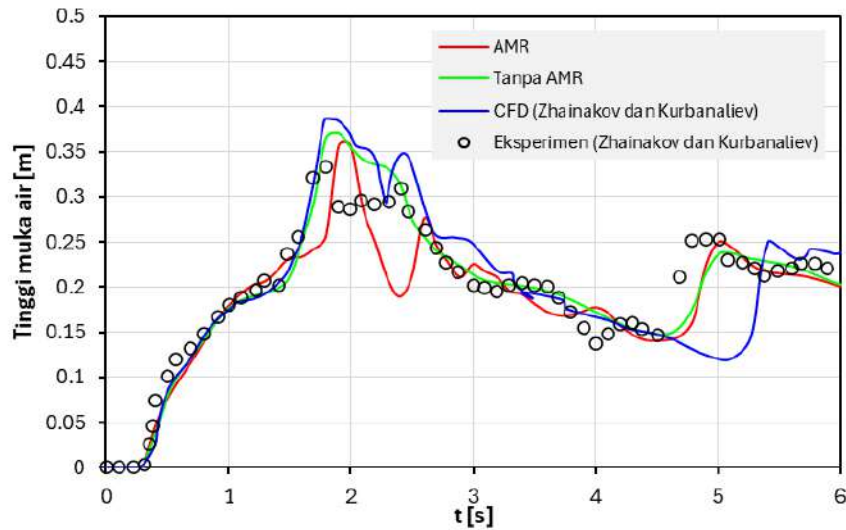
Iso-volume digunakan untuk melihat dengan jelas hasil *free-surface* yang terbentuk dari simulasi ini. Bentuk *iso-volume* kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Zhainakov, A. Zh. (2013) dan Fondelli, T., dkk (2015). Gambar 5 menunjukkan perbandingan gelombang yang terbentuk dari aliran *dam break* pada eksperimen dengan simulasi OpenFOAM. Secara kualitatif, hasil penelitian ini menunjukkan evolusi permukaan bebas yang konsisten dengan eksperimen. Air menyebar secara horizontal membentuk *front* gelombang, diikuti oleh pembentukan cipratan pada saat interaksi dengan kotak *obstacle*. Namun, simulasi tanpa AMR tidak mampu menangkap *interface* yang terbentuk ketika air berinteraksi dengan kotak *obstacle* seperti terlihat di Gambar 5 pada $t = 0.6$ s dan $t = 0.8$ s. Sebaliknya, *mesh* dengan AMR mampu menangkap *interface* pada daerah tersebut dengan lebih akurat. Pada $t = 1.9$ s dan $t = 4.7$ s fraksi volume fluida (juga dapat direpresentasikan secara detail oleh *mesh* dengan AMR apabila dibandingkan dengan eksperimen).

Eksperimen	OpenFOAM tanpa AMR	OpenFOAM dengan AMR
Time: 0.4 s 	Time: 0.4 s 	Time: 0.4 s 
Time: 0.6 s 	Time: 0.6 s 	Time: 0.6 s 
Time: 0.8 s 	Time: 0.8 s 	Time: 0.8 s 
Time: 1.9 s 	Time: 1.9 s 	Time: 1.9 s 
Time: 4.7 s 	Time: 4.7 s 	Time: 4.7 s 

Gambar 5. Perbandingan *free-surface* pada tiap *time step*: eksperimen (kiri), OpenFOAM tanpa AMR (tengah), OpenFOAM dengan AMR (kanan)

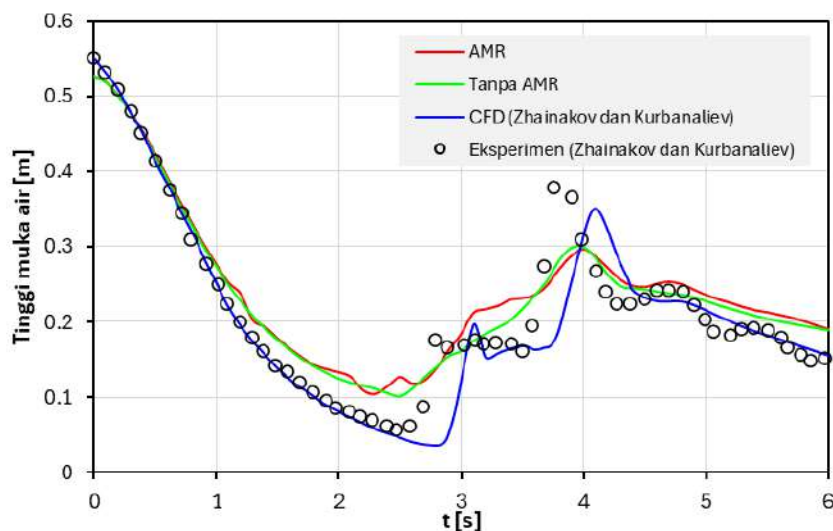
Perbandingan hasil *sampling* ketinggian muka air dari simulasi ini dengan eksperimen dan CFD lainnya pada lokasi H2 dan H4 masing-masing ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7 . Seperti terlihat pada Gambar 6, baik *mesh* dengan AMR dan tanpa AMR menunjukkan tinggi muka air maksimum pada $t = 1.9 - 2$ s. Hasil ini serupa dengan simulasi CFD lain dan eskperimen yang dilakukan oleh Zhainakov, A. Zh. (2013). Selanjutnya, hasil CFD dari

Zhainakov, A. Zh. (2013) pada $t = 4.5 - 5$ s terlihat menyimpang dari eksperimen. Sedangkan, pada *time step* tersebut hasil penelitian ini baik pada *mesh* dengan AMR dan tanpa AMR menunjukkan hasil yang identik dengan eksperimen.



Gambar 6. Tinggi muka air pada lokasi *sampling* H2

Pada lokasi *sampling* H4 dimana *water column* mulai bergerak, *mesh* dengan AMR dan tanpa AMR menunjukkan hasil yang konsisten mulai dari $t = 0 - 1$ s dibandingkan dengan eksperimen dan CFD lainnya seperti terlihat pada Gambar 7. Namun, tinggi muka air $t = 1 - 4$ s sedikit menyimpang dan menunjukkan nilai yang lebih besar. Tetapi secara keseluruhan *time domain*, hasil simulasi ini memiliki tren tinggi muka air yang identik dengan penelitian lain.



Gambar 7. Tinggi muka air pada lokasi *sampling* H4

Selanjutnya nilai *root mean square error* (RMSE) dan *mean absolut error* (MAE) digunakan untuk menilai seberapa dekat hasil simulasi ini (dengan AMR dan tanpa AMR) dengan data eksperimen. Nilai RMSE dan MAE dapat dihitung menggunakan persamaan (6) dan persamaan (7) berikut.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{sim,i} - y_{exp,i})^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_{sim,i} - y_{exp,i})| \quad (7)$$

Dimana, n adalah jumlah data, $y_{sim,i}$ adalah ketinggian muka air dari simulasi pada waktu ke- i dan $y_{exp,i}$ adalah ketinggian muka air dari eksperimen pada waktu ke- i . Hasil perhitungan RMSE dan MAE untuk lokasi *sampling* H2 dan H4 disajikan pada Tabel 4. Meskipun RMSE dan MAE dari *mesh* tanpa AMR menunjukkan nilai yang lebih kecil, tapi hasil visualisasi secara keseluruhan menunjukkan bahwa hasil simulasi dengan AMR lebih mendekati realitas fisik. Nilai RMSE dan MAE ini sangat dipengaruhi oleh jumlah data yang dapat terbaca pada eksperimen, sensor *noise*, maupun resolusi alat ukur. Meskipun demikian kedua *mesh* masih menunjukkan hasil yang dekat dengan eksperimen. Tetapi, *mesh* dengan AMR lebih detail menangkap fenomena lokal seperti cipratan air setelah *water column* berinteraksi dengan kotak *obstacle*.

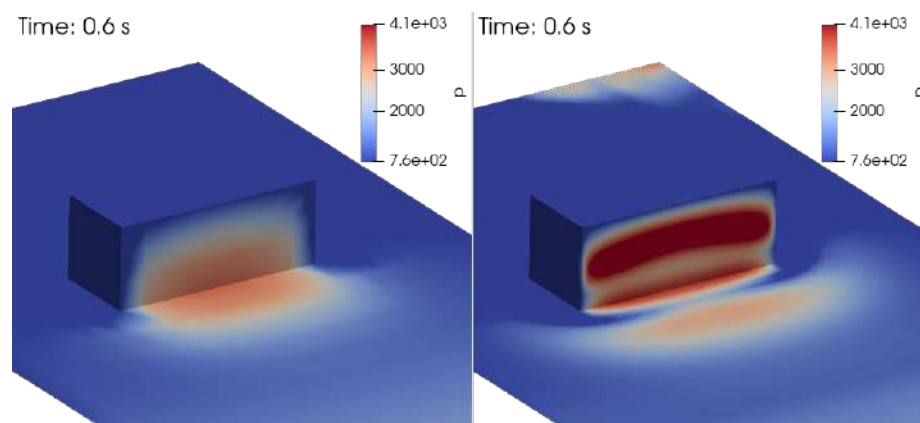
Tabel 4. Nilai RMSE dan MAE ketinggian muka air

<i>Mesh</i>	Lokasi Sampling	RMSE [m]	MAE [m]
Tanpa AMR	H2	0.0246	0.0162
	H4	0.0320	0.0264
Dengan AMR	H2	0.0346	0.0221
	H4	0.0386	0.0322

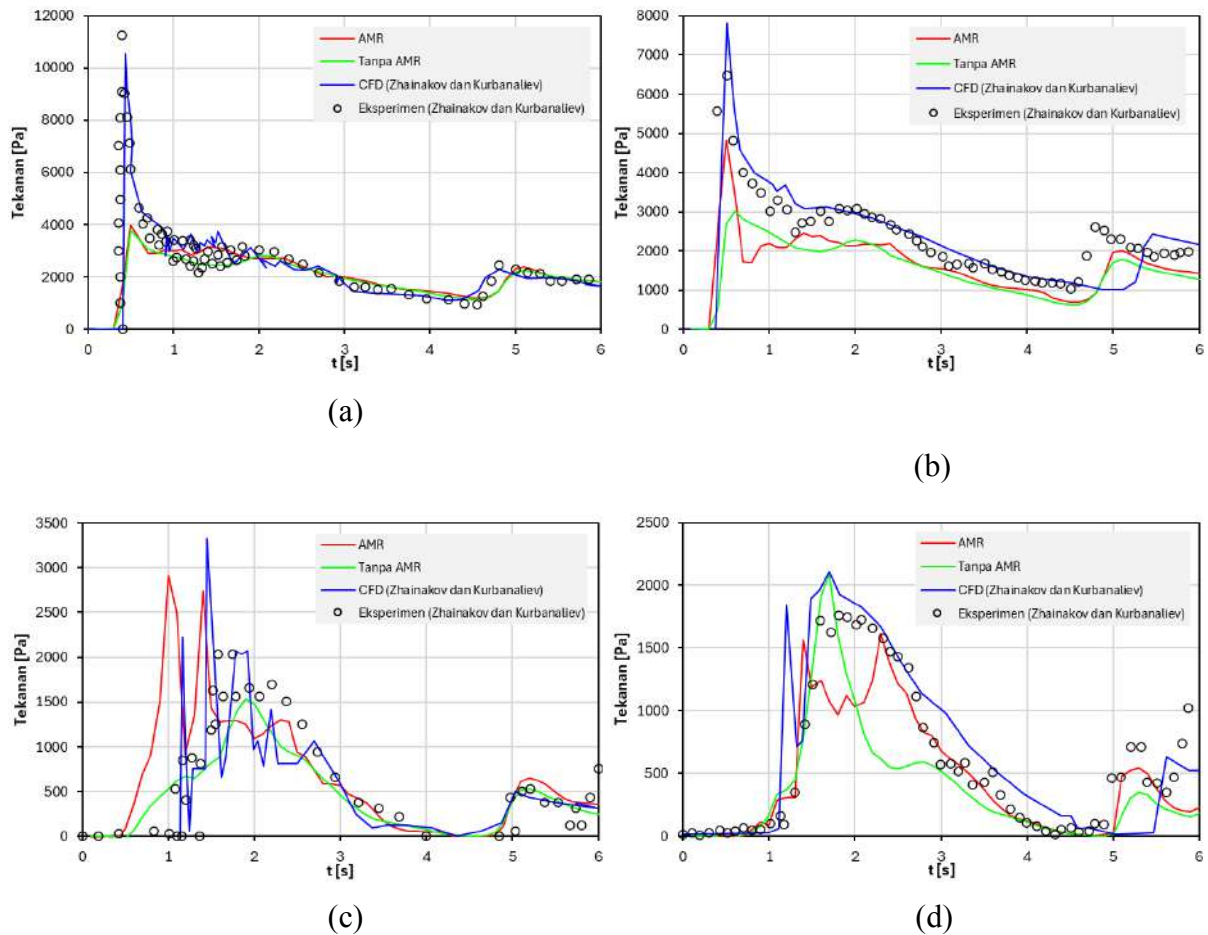
c) Pengaruh *Adaptive mesh refinement* (AMR) terhadap Tekanan

Pengaruh *free-surface* terhadap tekanan di kotak *obstacle* ditunjukkan pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan kontur tekanan di kotak *obstacle* pada $t = 0.6$ s. Seperti terlihat dari gambar tersebut, *mesh* dengan AMR menunjukkan nilai tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa AMR. Hal ini terjadi karena pada $t = 0.6$ s *mesh* dengan AMR mampu menangkap *free-surface* yang lebih akurat ketika air berinteraksi dengan kotak *obstacle* (Gambar 3). Interaksi ini menimbulkan cipratan yang lebih kuat pada sisi depan dari kotak *obstacle*. Sehingga tekanan yang terjadi pada sisi tersebut besarnya akan sebanding dengan fraksi volume fluida yang melewatinya.

Nilai tekanan pada *time step* yang lain disajikan pada Gambar 9 dalam bentuk *time domain*. Hasil tersebut merupakan pembacaan pada *probes* tekanan P1, P2, P5, dan P7 (Gambar 3(b)). Dari Gambar 9(a)-(c), terlihat bahwa evolusi tekanan pada masing-masing *probes* menunjukkan hasil yang identik dengan eksperimen maupun studi CFD lainnya. Namun simulasi ini juga memprediksi fluktuasi nilai tekanan yang terjadi pada kotak *obstacle*, seperti yang terbaca pada *probes* P5 dan P7 pada rentang $t = 1 - 2.5$ s. Fluktuasi ini tidak terbaca dalam hasil eksperimen. Secara keseluruhan nilai tekanan yang terbaca pada masing-masing *probes* lebih tinggi pada *mesh* dengan AMR jika dibandingkan dengan *mesh* tanpa AMR. Selanjutnya, RMSE dan MAE digunakan untuk menguji seberapa dekat hasil tekanan dari simulasi dengan eksperimen. Nilai RMSE dan MAE tekanan pada masing-masing *probes* ditampilkan pada Tabel 5.



Gambar 8. Kontur tekanan pada $t = 0.6$ s (kiri) tanpa AMR; (kanan) dengan AMR



Gambar 9. Perbandingan nilai tekanan pada probes (a) P1; (b) P2; (c) P5; (d) P7

Tabel 5. Nilai RMSE dan MAE dari tekanan pada sisi kotak obstacle

<i>Mesh</i>	Lokasi Probes Tekanan	RMSE [Pa]	MAE [Pa]
Tanpa AMR	P1	2484.54	1205.39
	P2	1067.83	747.98
	P5	391.92	287.53
	P7	392.26	256.81
Dengan AMR	P1	2318.47	1154.19
	P2	854.30	639.74
	P5	863.45	524.27
	P7	301.95	82.15

Tabel 6. Penurunan eror RMS setelah penerapan AMR

Probes	$\% \eta = \frac{RMSE_{tanpa\ AMR} - RMSE_{dengan\ AMR}}{RMSE_{tanpa\ AMR}} \times 100\%$
P1	6.7
P2	20
P5	-120
P7	23

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa secara umum nilai tekanan yang terbaca pada *mesh* dengan AMR lebih mendekati eksperimen di sebagian besar lokasi, ditunjukkan nilai nilai RMSE dan MAE yang lebih kecil daripada *mesh* tanpa AMR kecuali pada *probes* P5. Selanjutnya, penurunan eror setelah penerapan AMR disajikan pada Tabel 6. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa dengan diterapkannya AMR dapat menurunkan eror pembacaan tekanan pada sebagian besar lokasi kecuali pada *probes* P5. Hasil ini menunjukkan bahwa AMR memberikan peningkatan akurasi di sebagian besar area. Sehingga, apabila tekanan ini diintegrasikan terhadap luas permukaan kotak *obstacle* akan menghasilkan gaya yang jauh lebih akurat dan mendekati kondisi nyata meskipun masih terdapat inkonsistensi pada titik tertentu.

SIMPULAN

Simulasi *free-surface* aliran *dam break* menggunakan *solver interFoam* di OpenFOAM berhasil menunjukkan representasi aliran dua fasa yang realistis dan sesuai dengan perilaku fisik. Implementasi *adaptive mesh refinement* (AMR) secara signifikan meningkatkan akurasi antarmuka fluida dan tekanan pada sebuah objek yang berinteraksi dengan aliran tersebut. Meskipun nilai RMSE dan MAE tinggi muka air menunjukkan hasil yang sebaliknya, secara kualitatif tinggi muka air (*interface*) yang terbentuk dari *mesh* dengan AMR lebih mendekati kondisi nyata yang direpresentasikan melalui eksperimen. Selanjutnya, hasil *free-surface* yang akurat ini menghasilkan pembacaan tekanan yang juga akurat. Perbandingan hasil simulasi menunjukkan bahwa *mesh* dengan AMR cenderung memberikan prediksi tekanan yang lebih akurat dibandingkan *mesh* tanpa AMR pada sebagian besar lokasi pengukuran. Secara lokal, *mesh* dengan AMR berhasil menurunkan error sebesar 6.7% di P1, 20% di P2, dan 23% di P7 apabila dibandingkan dengan *mesh* tanpa AMR. Namun *mesh* dengan AMR menunjukkan

peningkatan error sebesar 120% di P5. Hasil ini menunjukkan bahwa AMR memberikan peningkatan akurasi di sebagian besar area, meskipun masih terdapat inkonsistensi pada titik tertentu.

Studi ini menunjukkan potensi besar OpenFOAM sebagai alternatif *open-source* untuk simulasi aliran permukaan bebas. *Adaptive mesh refinement* (AMR) merupakan salah satu pendekatan numerik yang sangat potensial dalam meningkatkan akurasi dan efisiensi simulasi fenomena free-surface di bidang kemaritiman, seperti *slamming* kapal, *green water impact*, bahan *sloshing* pada sebuah tangki. Pengembangan ke depan diarahkan pada integrasi AMR dengan estimasi galat otomatis dan pendekatan berbasis *machine learning* untuk menentukan area *refinement* secara adaptif dan efisien, sehingga beban komputasi dapat diminimalkan tanpa mengorbankan akurasi hasil. Selain itu, pengembangan AMR dapat digunakan untuk simulasi multi-fisika, seperti interaksi fluida-struktur (FSI) yang berpotensi memperluas aplikasi AMR dalam desain struktur terapung. Dalam konteks industri maritim, penerapan AMR dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan ketepatan perhitungan tekanan *impact*, efisiensi propulsi, serta prediksi perilaku gelombang ekstrem terhadap struktur terapung dan pelabuhan. Oleh karena itu, pengembangan AMR secara sistematis dan integratif sangat penting untuk mendukung inovasi teknologi simulasi berbasis CFD yang lebih realistis dan aplikatif dalam dunia maritim.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdolmaleki, K., Thiagarajan, K. P., & Morris-Thomas, M. T. (2004, Desember 13). *Simulation of The Dam break Problem and Impact Flows Using a Navier-Stokes Solver*. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney, Sydney, Australia.
- Al-Fatlawi, M., & Al-Shuker, A. (2023). Application of ANSYS-Fluent Software for Innovative Stepped Dissipation Blocks Arrangement in Ogee Spillway. *E3S Web of Conferences*, 427, 04002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342704002>
- Azmi, N. A. I. N. M., Amir, M. A. H., Sukor, A. S., & Idris, N. (2023). *Numerical Modelling of Two Dimensional Dam break with Heavy Flow using Ansys Software*. 4(2), 1–9.
- Erduran, K. S., Ünal, U., & Dokuz, A. Ş. (2024). Experimental and numerical investigation of partial dam-break waves. *Ocean Engineering*, 308, 118346. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118346>

- Ferdowsi, A., Nemati, M., & Farzin, S. (2021). Development of Dam-Break Model Considering Real Case Studies with Asymmetric Reservoirs. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 4(4).
<https://doi.org/10.22115/cepm.2021.311759.1188>
- Fondelli, T., Andreini, A., & Facchini, B. (2015). Numerical Simulation of Dam-Break Problem Using an Adaptive Meshing Approach. *Energy Procedia*, 82, 309–315.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.038>
- Hervouet, J.-M. (2000). A high resolution 2-D dam-break model using parallelization. *Hydrological Processes*, 14(13), 2211–2230. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200009\)14:13<2211::aid-hyp24>3.0.co;2-8](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200009)14:13<2211::aid-hyp24>3.0.co;2-8)
- Issa, R., & Violeau, D. (2006). *Test-case 2, 3D dambreaking*. release 1.1 ERCOFTAC. SPH European research interest community SIG, Electricite De France, Laboratoire National Hydraulique et Environnement.
- Maranzoni, A., & Tomirotti, M. (2023). Three-Dimensional Numerical Modelling of Real-Field Dam-Break Flows: Review and Recent Advances. *Water*, 15(17), 3130.
<https://doi.org/10.3390/w15173130>
- Ozmen-Cagatay, H., & Kocaman, S. (2011). Dam-Break Flow in the Presence of Obstacle: Experiment and CFD Simulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(4), 541–552. <https://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015393>
- Peng, L., Zhang, T., Li, J., & Feng, P. (2023). Three-Dimensional Numerical Study of Dam-Break Flood Impacting Problem with VOF Method and Different Turbulence Closures. *Water Resources Management*, 37(10), 3875–3895. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03530-z>
- Rodríguez-Ocampo, P. E., Ring, M., Hernández-Fontes, J. V., Alcérreca-Huerta, J. C., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). CFD Simulations of Multiphase Flows: Interaction of Miscible Liquids with Different Temperatures. *Water*, 12(9), 2581.
<https://doi.org/10.3390/w12092581>
- Sánchez-Cordero, E., Gómez, M., & Bladé, E. (2017). Three-dimensional numerical analysis of a dam-break using OpenFOAM. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 29(6), 311–320. [https://doi.org/10.15514/ispras-2017-29\(6\)-20](https://doi.org/10.15514/ispras-2017-29(6)-20)
- Widiatmono, R., Mahmudah, R. S. N., Hidayat, I., Nugroho, K. A., & Apriansari, R. Y. (2022). Investigation of Under-Relaxation Factors in 2D Dam break Simulation of

OpenFOAM®. *Journal of Physics: Conference Series*, 2377(1), 012014.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2377/1/012014>

Zhainakov, A. Zh., & Kurbanaliev, A. Y. (2013). Verification of the open package OpenFOAM on *dam break* problems. *Thermophysics and Aeromechanics*, 20(4), 451–461.
<https://doi.org/10.1134/s0869864313040082>