Simulasi CFD Dam-Break dengan Kotak: Studi Validasi OpenFOAM (Benchmark Kleefsman)

Caesar Wiratama, M.S[1,a)]

[1]PT Tensor Karya Nusantara
[a)] wiratama@pt-tensor.com

Abstrak. Laporan ini mendokumentasikan rekonstruksi OpenFOAM dari benchmark laboratorium dam-break dengan kotak tiga dimensi yang dipopulerkan Kleefsman dkk. dan digunakan Sánchez-Cordero, Gómez, serta Bladé (2017) untuk asesmen OpenFOAM. Aliran permukaan bebas transien diselesaikan dengan interFoam (VOF) dan RAS RNG k−ε pada mesh heksa multi-blok terstruktur dengan obstabel sebagai lubang blok konformal. Kedalaman air di empat stasiun Kleefsman H1–H4 dibandingkan dengan deret waktu eksperimen terdigitasi dari Gambar 3 makalah acuan. Kontur permukaan bebas menggambarkan kedatangan bore, benturan kotak, dan sloshing waktu lanjut.

1. PENDAHULUAN

Pelepasan tiba-tiba kolom air menghasilkan bore yang sangat non-hidrostatik, gradien permukaan bebas yang kuat, dan—bila ada obstabel—benturan hebat, run-up, serta entrainment udara. Model air dangkal dua dimensi kemudian tidak memadai; solver Navier–Stokes / VOF tiga dimensi diperlukan untuk menangkap percepatan vertikal dan percikan.

Kleefsman dkk. [1] melaporkan dam-break laboratorium MARIN / ComFLOW dalam tangki 3,22 × 1 × 1 m dengan obstabel kotak persegi panjang serta probe tinggi air / tekanan. Sánchez-Cordero dkk. [2] mereproduksi tata letak itu di OpenFOAM dengan RANS RNG k−ε dan melaporkan kesesuaian kedalaman air yang diukur dengan R^2 di empat stasiun. Studi ini membangun templat OpenFOAM selaras makalah untuk validasi hidrodinamika konstruksi dalam inisiatif tensorCFD PT Tensor [3].

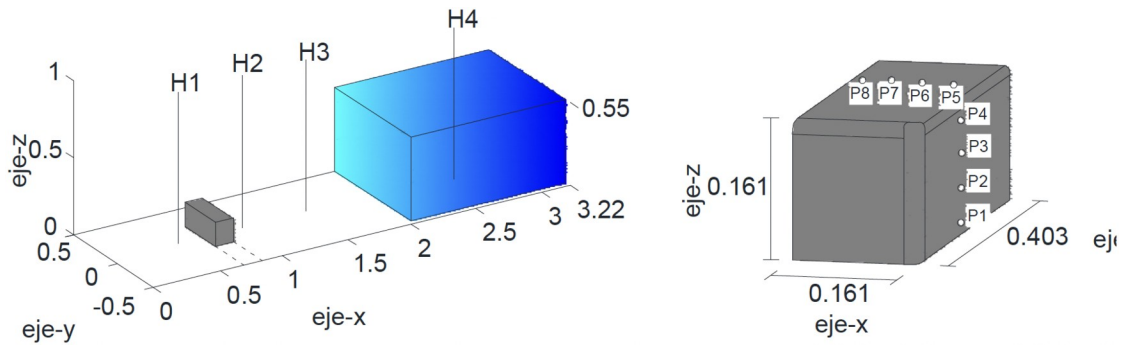
2. METODE NUMERIK

2.1 Solver dan Model Turbulensi

Persamaan volume-of-fluid dua fasa tak-mampat diselesaikan dengan interFoam (OpenFOAM v2512). Turbulensi ditangani dengan RAS RNGkEpsilon, selaras pilihan model di [2]. Udara dan air bersifat Newtonian dengan $\rho_{water} = 998$ kg/m³, $\nu_{water} = 1\times10^{-6}$ m²/s, $\rho_{air} = 1{,}2$ kg/m³, $\nu_{air} = 1{,}48\times10^{-5}$ m²/s, dan tegangan permukaan $\sigma = 0{,}07$ N/m. Integrasi waktu memakai Euler orde satu dengan langkah adaptif dibatasi bilangan Courant dan Courant antarmuka maksimum 0,5, seperti di [2].

2.2 Geometri, Kondisi Awal, dan Kondisi Batas

Tangki berukuran 3,22 m (arah aliran x) × 1,0 m (spanwise y) × 1,0 m (vertikal z). Kotak persegi panjang tertutup menempati (0,67–0,83) × (−0,2–0,2) × (0–0,16) m. Air diam setinggi 0,55 m diinisialisasi untuk $x \geq 2$ m (bidang pintu air); sisa tangki adalah udara kering. Pada $t = 0$ pintu dibuka seketika. Permukaan tangki dan kotak adalah dinding no-slip; atap adalah patch inlet–outlet tekanan atmosfer.

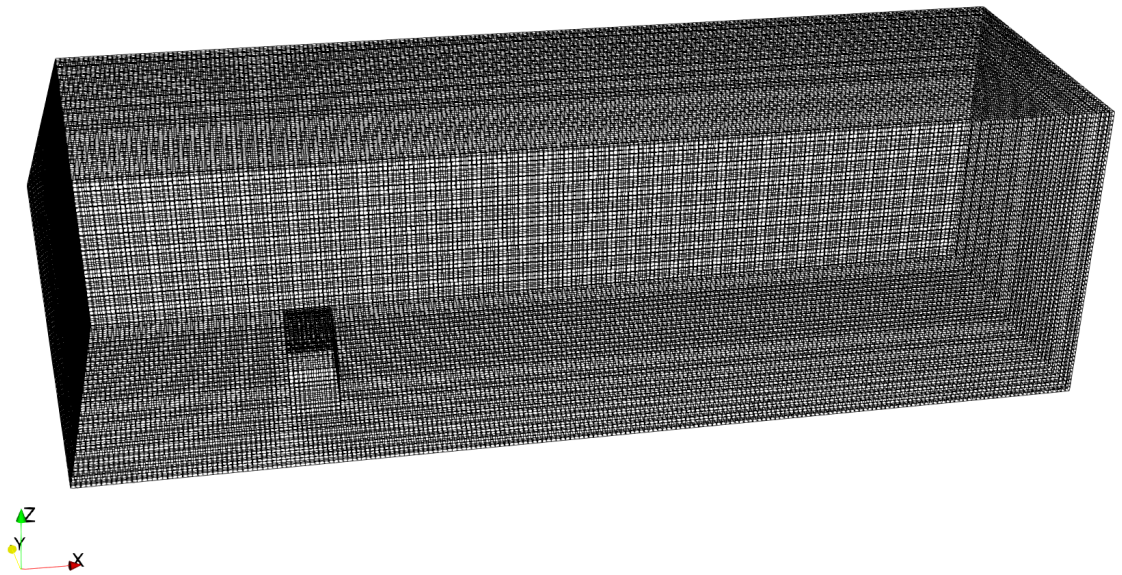


GAMBAR 1. Posisi pengukuran tinggi air (H1–H4) dan probe tekanan (diadaptasi dari Kleefsman dkk. [1]; tata letak seperti di [2]).

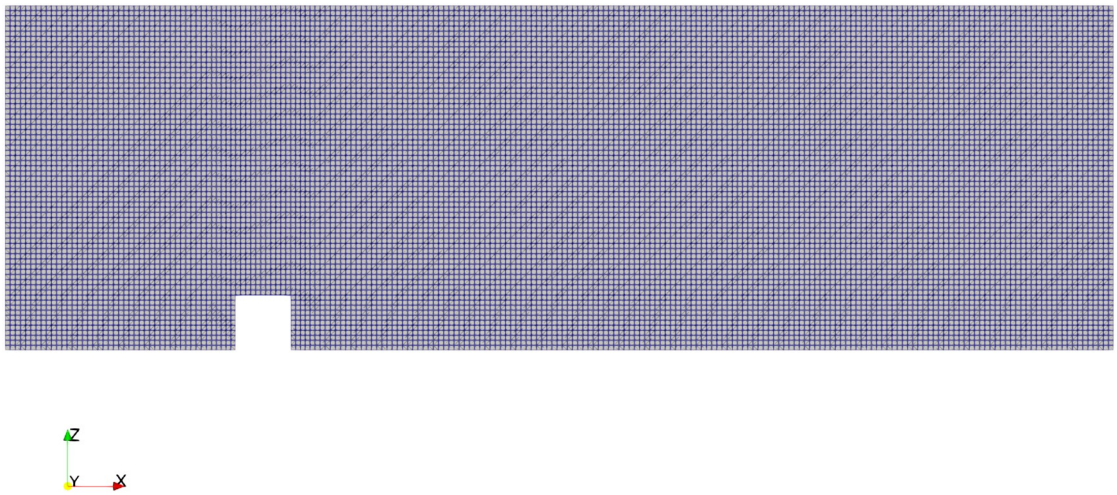
Stasiun kedalaman air mengikuti Kleefsman: H1 di x ≈ 0,50 m (hilir kotak), H2 di x ≈ 1,00 m, H3 di x ≈ 1,50 m (antara kotak dan pintu), serta H4 di x ≈ 2,66 m (di dalam reservoir awal). Pada kasus CFD, garis sampling digeser sedikit dari muka sel (mis. x = 0,51 m, y = 0,01 m) sambil tetap pada bidang pengukuran mid-span.

2.3 Mesh

Mesh heksa terstruktur dihasilkan dengan blockMesh. Kotak merupakan lubang multi-blok konformal (bukan dipotong dengan subsetMesh) agar topologi tetap manifold. Muka blok berimpit dengan tepi kotak dan elevasi permukaan bebas awal z = 0,55 m. Mesh produksi untuk hasil di bawah memiliki spasi nominal sekitar 1,5 cm dan kira-kira $9{,}7\times10^{5}$ sel—resolusi menengah dari keluarga 2 / 1,5 / 1 cm yang dibahas di [2].



GAMBAR 2. Mesh heksa multi-blok terstruktur tangki dam-break dengan obstabel kotak (tampak global).



GAMBAR 3. Detail mesh pada bidang potong vertikal melalui mid-span, menunjukkan penghalusan di sekitar kotak dan stasiun permukaan bebas.

2.4 Diskritisasi dan Ekstraksi Kedalaman Air

Fluks konvektif memakai skema orde dua terbatas (linearUpwind / limitedLinear / vanLeer untuk α); difusi memakai Laplacian Gauss linear corrected—selaras deskripsi "explicit second-order limited" di [2]. Makalah acuan tidak menyatakan bagaimana medan VOF diubah menjadi kedalaman air probe. Di sini α(z) disampling setiap 0,01 s pada garis vertikal di H1 –H4; kedalaman yang dilaporkan adalah $H = \int \alpha^2 \, dz$ dengan rata-rata bergulir singkat ±0,05 s. Pembobotan α^2 menurunkan bobot percikan encer relatif terhadap integral kolom mentah, yang cenderung memperbesar puncak H1 teraerasi.

TABEL 1. Setup numerik baseline

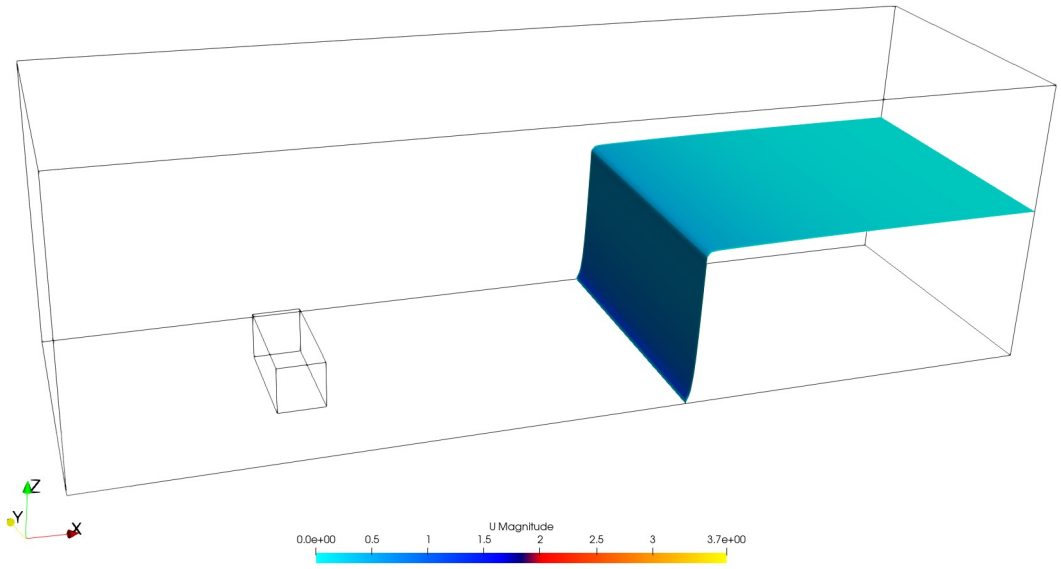
Butir	**Pengaturan**
OpenFOAM	v2512 (opencfd/openfoam-run)
Solver	interFoam (VOF, transient)
Turbulensi	RAS RNGkEpsilon
Domain P×L×T	3.22 × 1.0 × 1.0 m
Obstabel	Box (0.67–0.83)×(−0.2–0.2)×(0–0.16) m
Air awal	x ≥ 2 m, height 0.55 m
maxCo / maxAlphaCo	0.5 / 0.5
endTime (run ini)	6 s
Jumlah sel (kira-kira)	~9.7×10^5 ($\Delta \approx 1.5$ cm hex)
Metrik kedalaman	$\int\alpha^2 \, dz$ on H1–H4 lines (±0.05 s smooth)

3. HASIL DAN VALIDASI

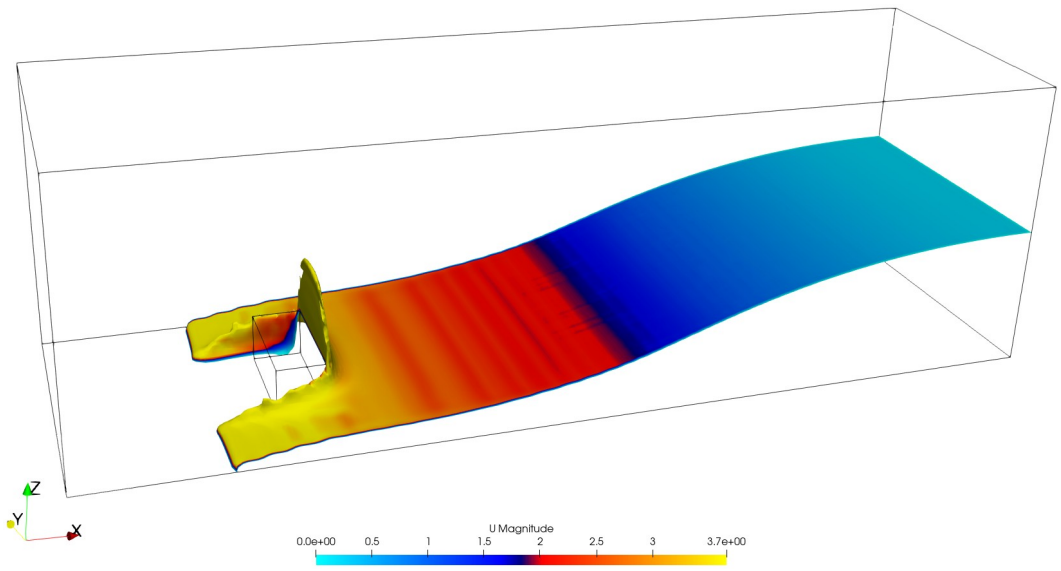
Simulasi berjalan dari diam hingga endTime = 6 s. Kurva eksperimen terdigitasi diambil dari Gambar 3 Sánchez-Cordero dkk. [2] (yang berasal dari Kleefsman [1]). Iso-permukaan bebas di bawah menggambarkan evolusi kualitatif; plot kedalaman air menguantifikasi kesesuaian probe.

3.1 Evolusi Permukaan Bebas

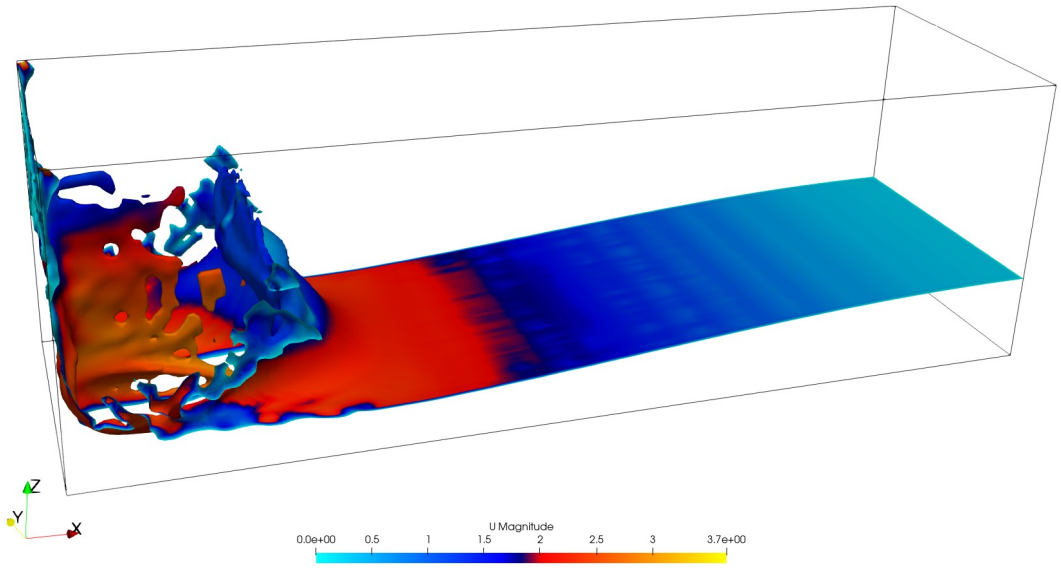
Pada t = 0 reservoir masih diam (gambar berikut). Pada t = 0,5 s bore telah melewati bidang pintu dan mendekati kotak. Antara 1,0 dan 1,5 s ujung depan membentur obstabel, menghasilkan jetting vertikal kuat dan percikan yang menyuplai lonjakan H1 yang dibahas kemudian. Dari 2–3 s aliran mengitari kotak dengan aerasi berkelanjutan; pada 4–5,5 s gerak mereda menjadi sloshing skala tangki beramplitudo lebih rendah sementara lapisan air sisa tetap di sekitar obstabel.



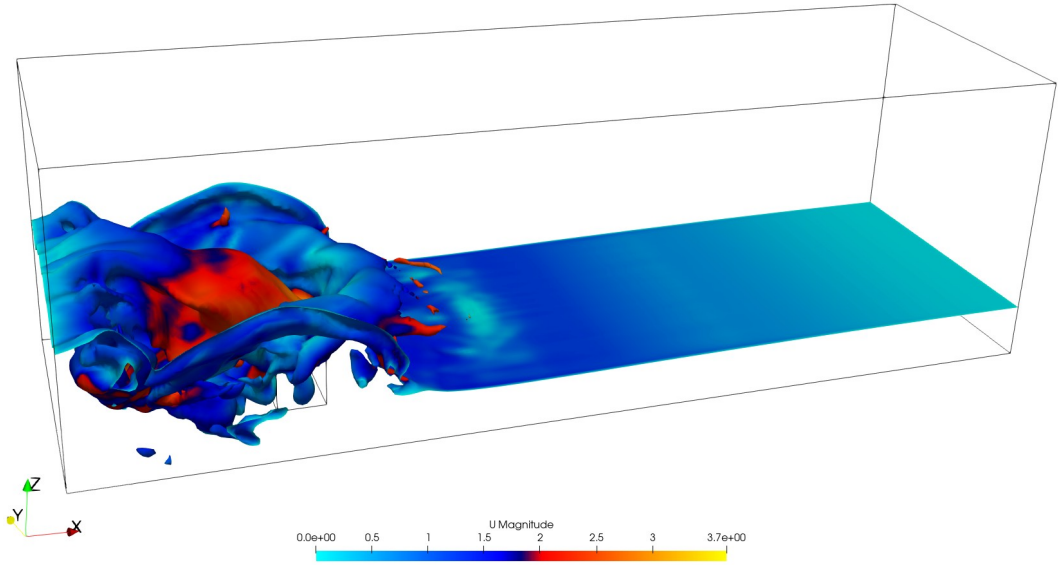
GAMBAR 4. Visualisasi permukaan bebas pada t = 0 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



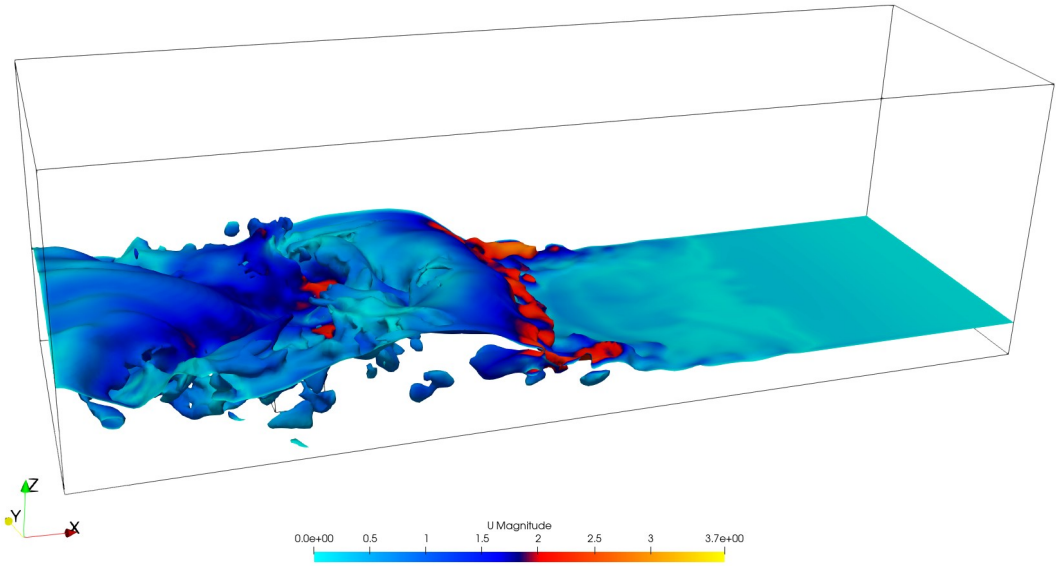
GAMBAR 5. Visualisasi permukaan bebas pada t = 0,5 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



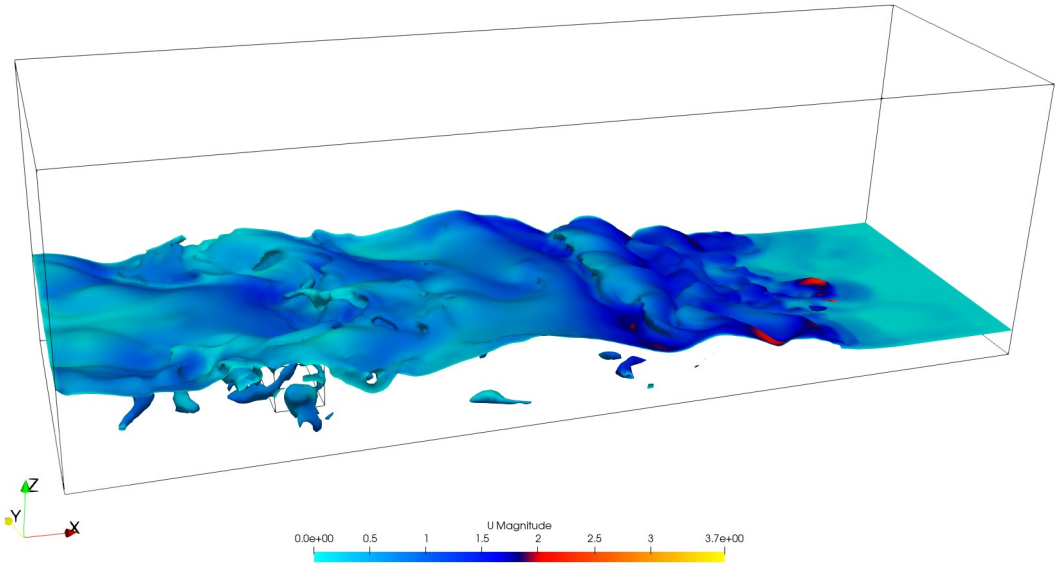
GAMBAR 6. Visualisasi permukaan bebas pada t = 1,0 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



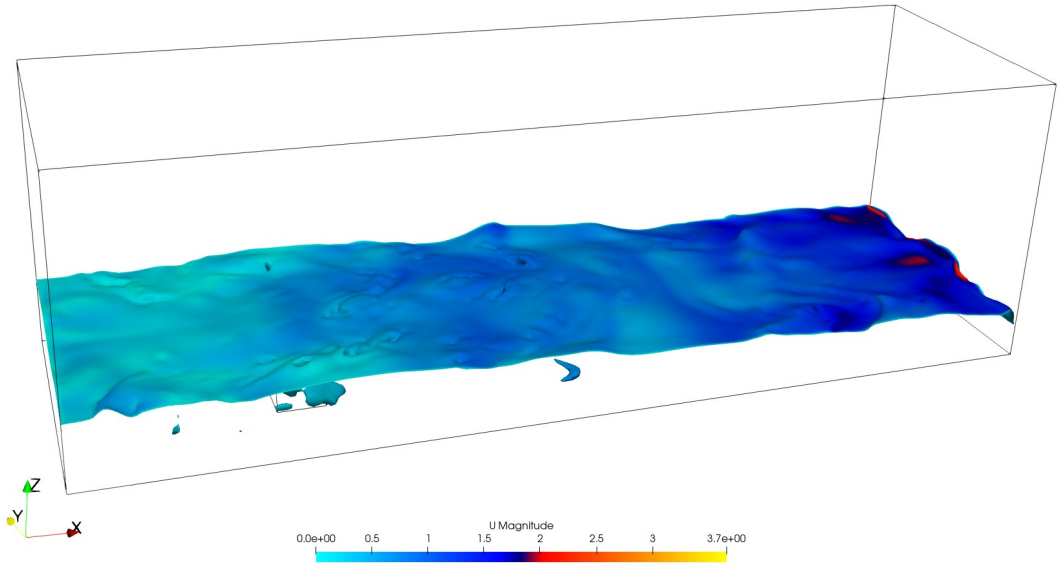
GAMBAR 7. Visualisasi permukaan bebas pada t = 1,5 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



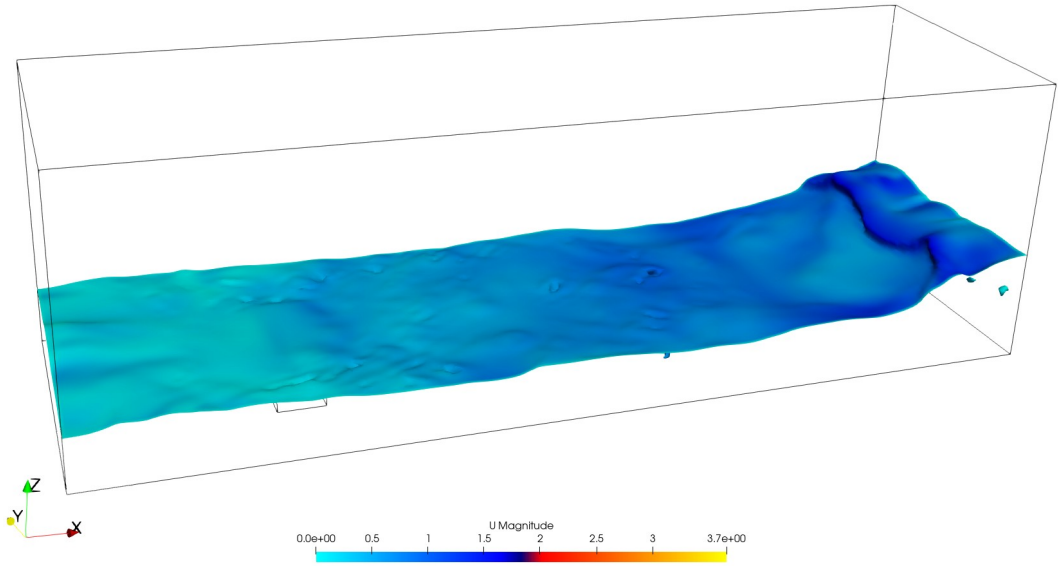
GAMBAR 8. Visualisasi permukaan bebas pada t = 2,0 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



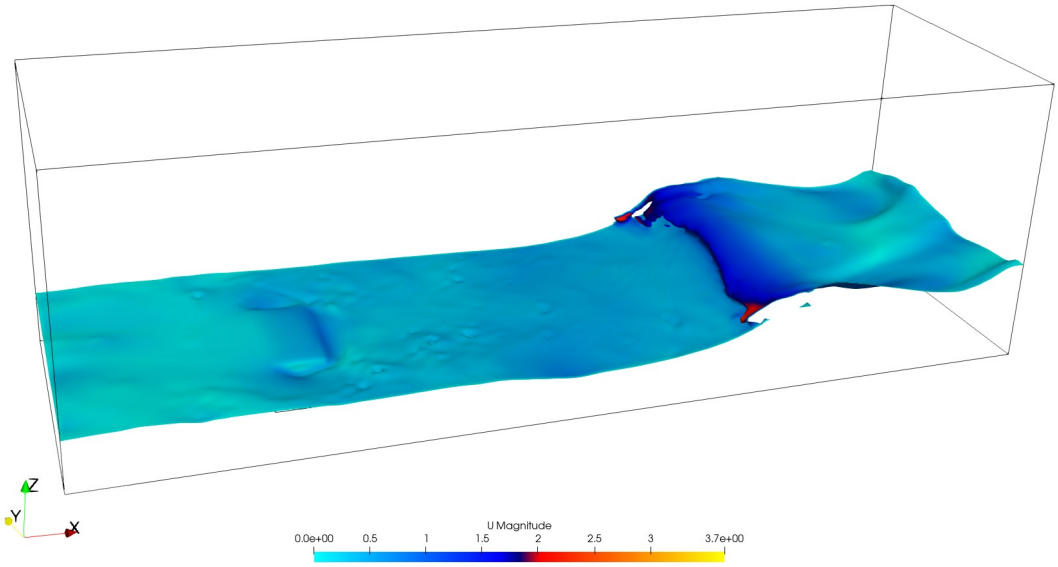
GAMBAR 9. Visualisasi permukaan bebas pada t = 2,5 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



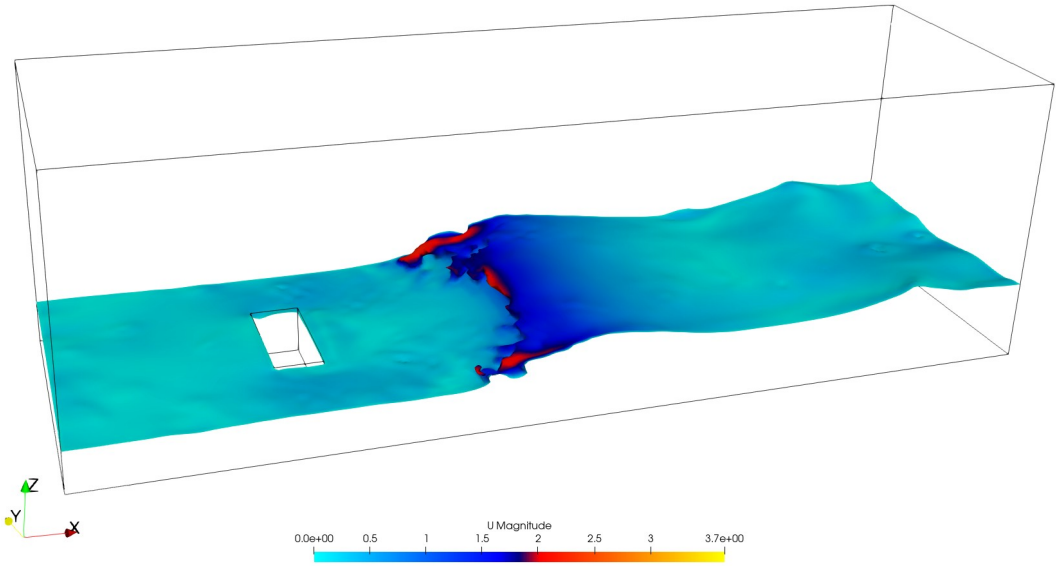
GAMBAR 10. Visualisasi permukaan bebas pada t = 3,0 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



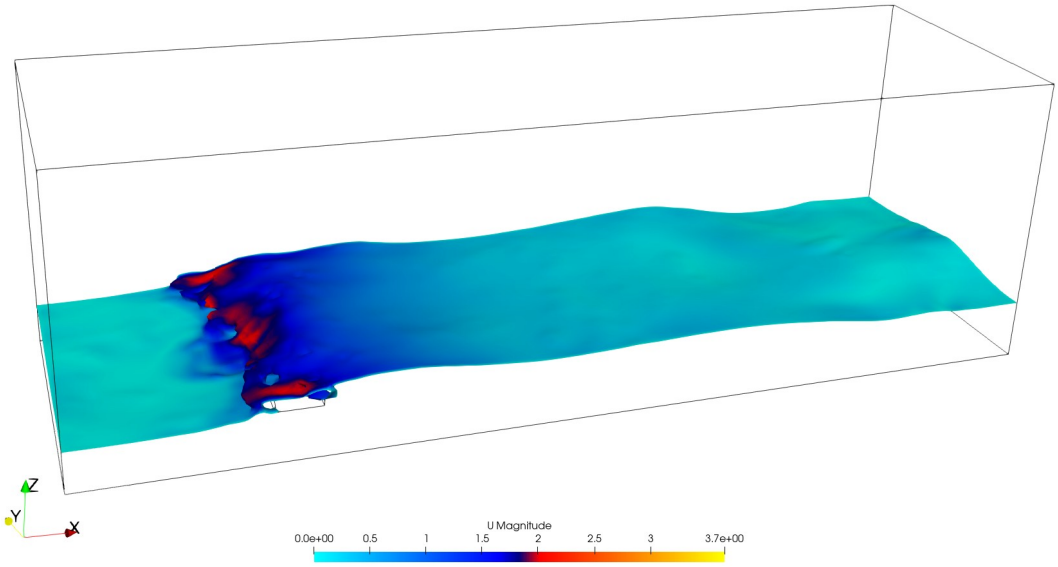
GAMBAR 11. Visualisasi permukaan bebas pada t = 3,5 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



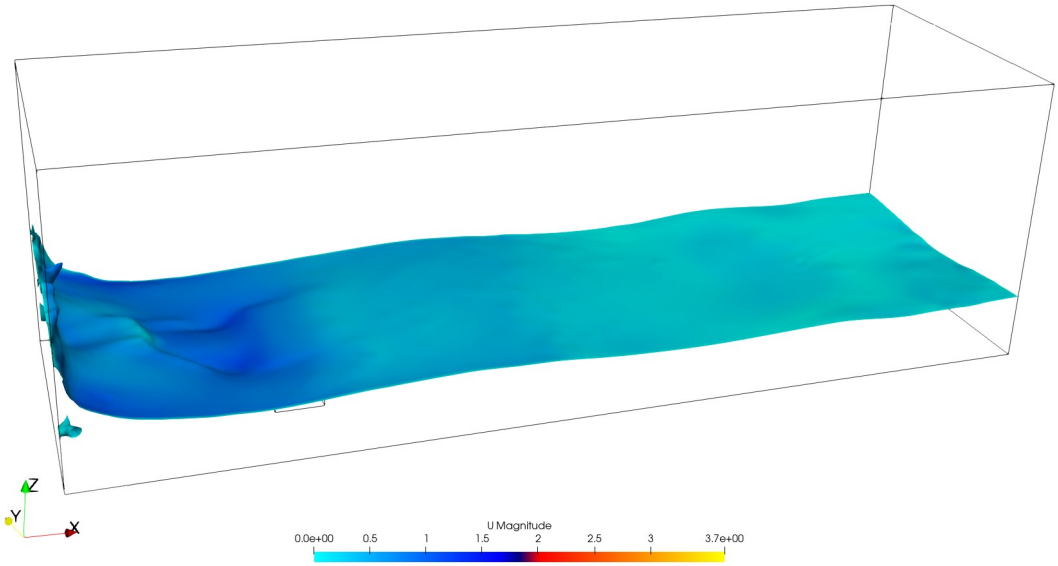
GAMBAR 12. Visualisasi permukaan bebas pada t = 4,0 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



GAMBAR 13. Visualisasi permukaan bebas pada t = 4,5 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



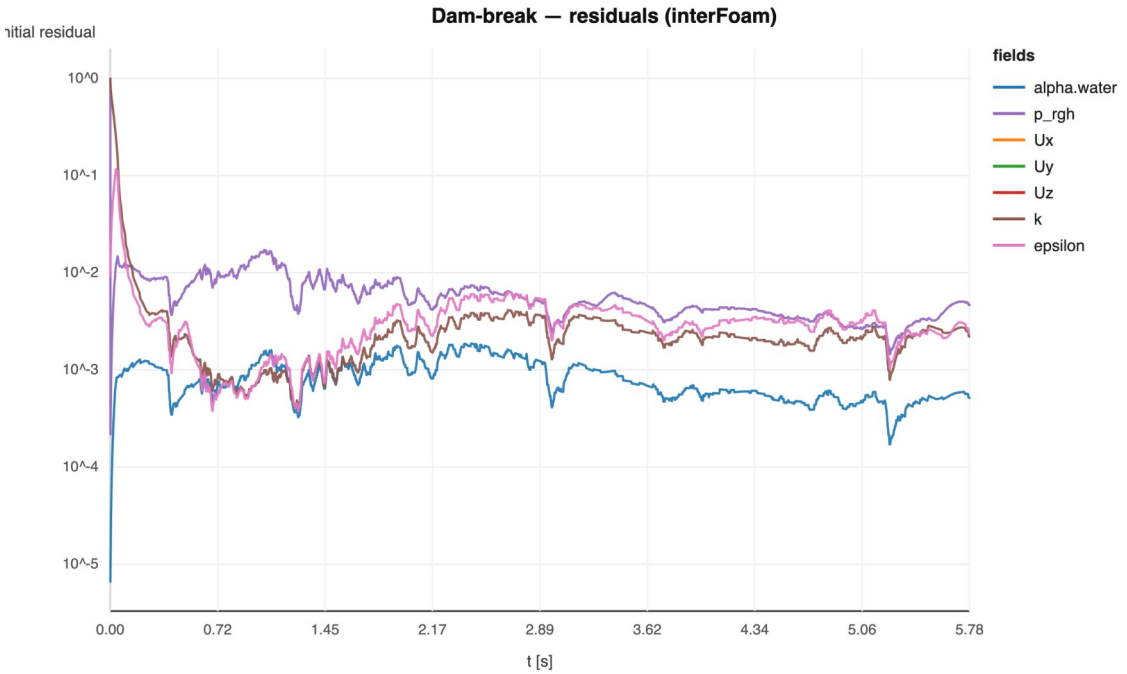
GAMBAR 14. Visualisasi permukaan bebas pada t = 5,0 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).



GAMBAR 15. Visualisasi permukaan bebas pada t = 5,5 s (iso-permukaan α.water / volume rendering).

3.2 Residual

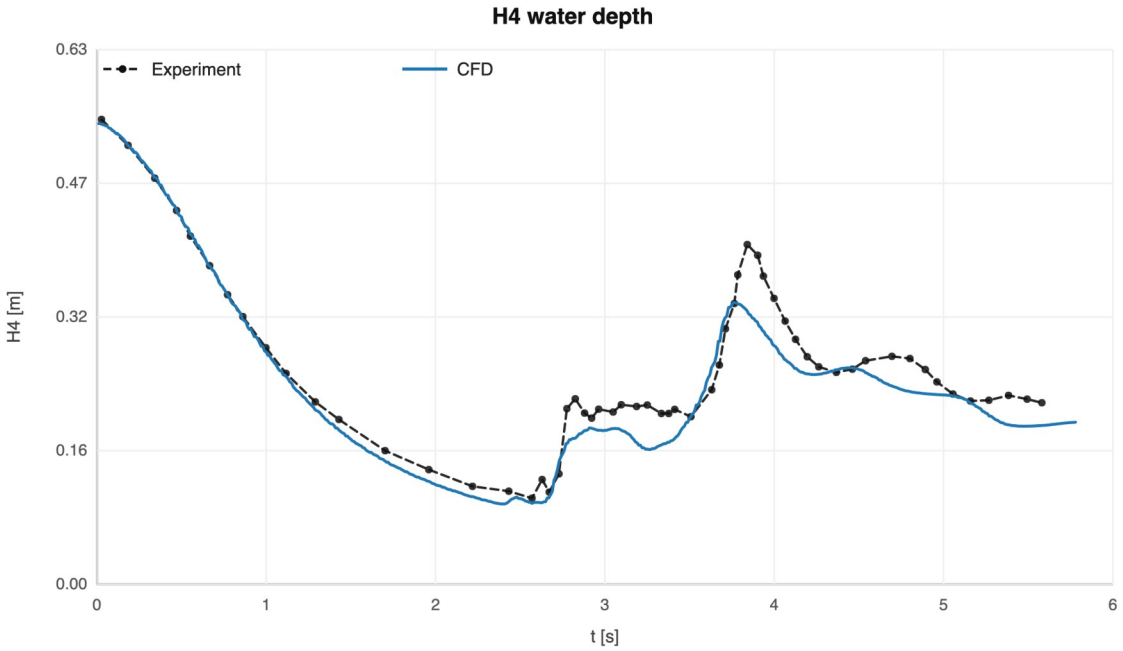
Residual awal sistem PIMPLE / MULES tersegregasi tetap terkendali di bawah batas Courant. Lonjakan sesekali bertepatan dengan benturan dan momen sangat teraerasi, tetapi tidak menghalangi kemajuan stabil hingga 6 s.



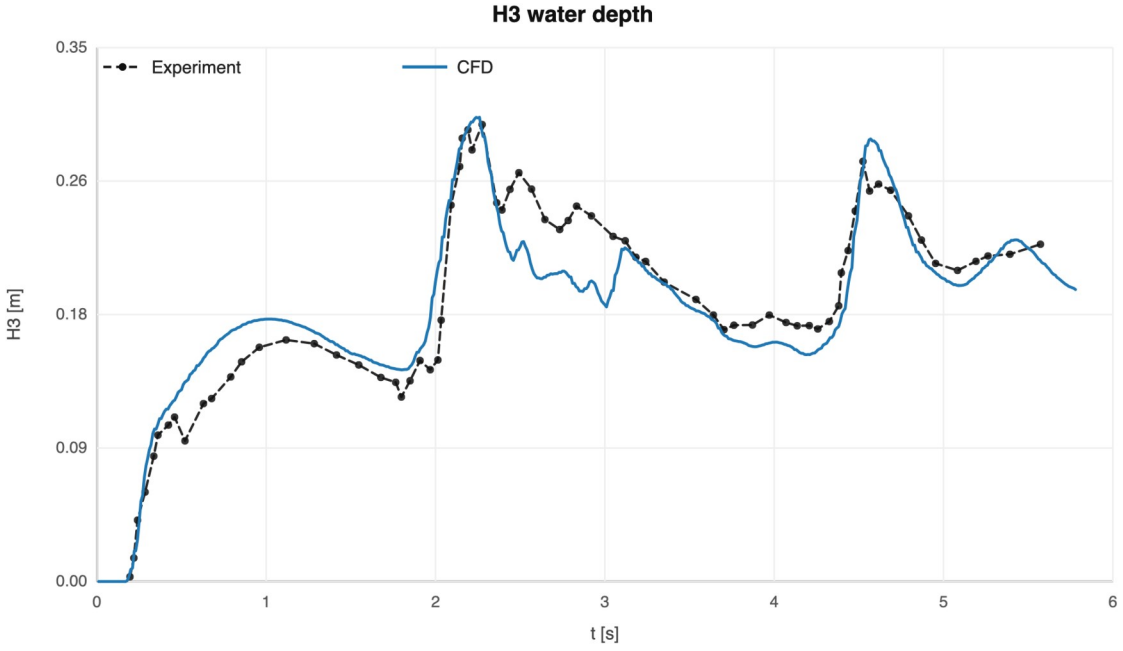
GAMBAR 16. Riwayat residual solver selama run transien.

3.3 Kedalaman Air di H1–H4

Gambar di bawah menumpuk kedalaman air CFD (garis penuh) pada eksperimen terdigitasi (penanda dan garis putus-putus). H4, di dalam reservoir, mengikuti penurunan eksperimen dengan erat setelah pintu dibuka—selaras dengan [2], di mana H4 adalah stasiun berkorelasi terbaik. H3, antara kotak dan pintu, menangkap kenaikan keseluruhan dan puncak sekunder dengan bias tinggi ringan saat kedatangan bore pertama; stasiun ini juga paling menantang dalam studi OpenFOAM acuan.

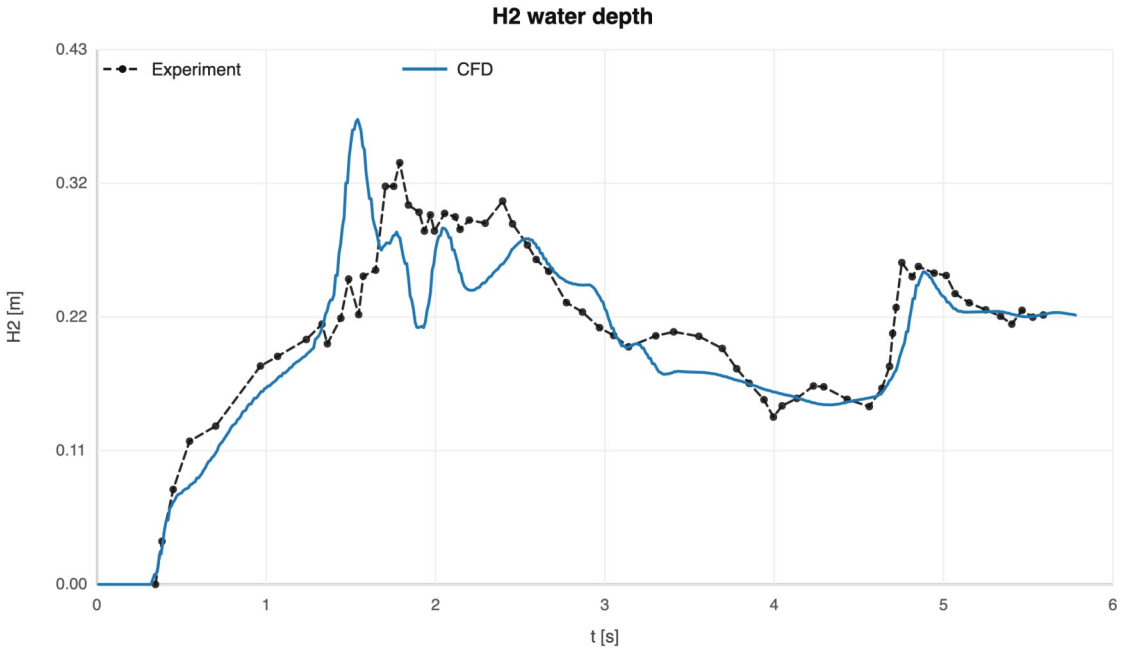


GAMBAR 17. Kedalaman air di H4 (reservoir) versus waktu: eksperimen vs OpenFOAM.

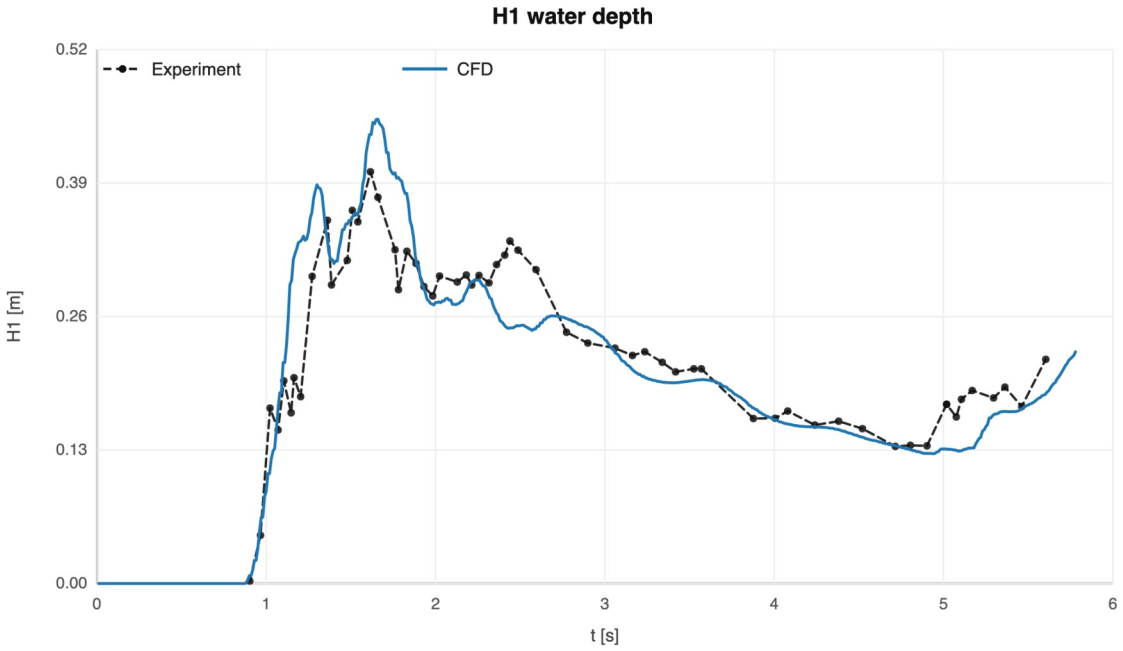


GAMBAR 18. Kedalaman air di H3 (antara kotak dan pintu) versus waktu: eksperimen vs OpenFOAM.

H2, tepat di hulu kotak pada sisi kering pita obstabel, mereproduksi waktu kenaikan pertama dan plateau berosilasi berikutnya, dengan CFD agak lebih tinggi pada interval paling teraerasi—kembali diharapkan ketika integral kolom mempertahankan percikan yang cenderung dibaca rendah oleh wave gauge. H1, paling hilir, menunjukkan puncak besar khas dekat 1–1,5 s terkait percikan di atas/sekitar kotak. Bahkan dengan pembobotan α^2, puncak CFD tetap lebih tinggi dan sedikit lebih awal dari eksperimen; mesh lebih halus dan grading dinding gaya makalah di [2] mengurangi tetapi tidak menghilangkan perbedaan ini, dan H1 bukan stasiun R^2 terkuat dalam studi tersebut.



GAMBAR 19. Kedalaman air di H2 (dekat kotak, arah aliran) versus waktu: eksperimen vs OpenFOAM.



GAMBAR 20. Kedalaman air di H1 (hilir kotak) versus waktu: eksperimen vs OpenFOAM.

4. KESIMPULAN

Kasus OpenFOAM dam-break dengan kotak yang selaras Kleefsman / Sánchez-Cordero telah ditetapkan: topologi heksa multi-blok dengan lubang kotak konformal, RNG k−ε, dan interFoam terbatas Courant. Pada mesh produksi ~1,5 cm, cuplikan permukaan bebas memulihkan maju bore, benturan kotak, dan sloshing lanjut. Kedalaman probe H3 dan H4 bersepakat baik dengan eksperimen terdigitasi; H1–H2 menunjukkan overshoot terkait percikan yang lebih besar, sebagian bergantung metrik ($\int\alpha^2$) dan sebagian terbatas resolusi / model turbulensi. Langkah tersisa menuju penutupan kuantitatif yang lebih dekat mencakup mesh graded 1 cm makalah, definisi tinggi pendamping opsional (mis. iso $\alpha = 0{,}5$ terhubung lantai), serta validasi probe tekanan terhadap Gambar 5 dari [2] setelah deret tersebut didigitasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT Tensor atas sponsor studi validasi ini dan atas kemajuan komunitas CFD melalui inisiatif tensorCFD [3]. Karya ini mencerminkan tujuan mereka menjaga templat rekayasa fidelitas tinggi tetap mudah diakses, praktis, dan siap produksi.

Dalam semangat kolaborasi sumber terbuka, struktur kasus tensorHydro, atau secara khusus studi validasi ini, kamus mesh, dan perangkat pasca-proses dikembangkan di bawah program templat OpenFOAM PT Tensor yang dapat diakses di GitHub ini:https://github.com/pt-tensor/Dam-Break-with-Box-Validation-Study.git

PUSTAKA

[1] Kleefsman, K. M. T., Fekken, G., Veldman, A. E. P., Iwanowski, B. & Buchner, B. (2005). A Volume-of-Fluid based simulation method for wave impact problems. Journal of Computational Physics, 206, 363–393.
[2] Sánchez-Cordero, E., Gómez, M. & Bladé, E. (2017). Three-dimensional numerical analysis of a dam-break using OpenFOAM. Trudy ISP RAN / Proc. ISP RAS, 29(6), 311–320. https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2017-29(6)-20
[3] https://en.pt-tensor.com/openfoam-case-templates/