Simulasi CFD Cavity Dengan Input Kalor di Lantai Nielsen: Studi Validasi OpenFOAM

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

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

Abstrak. Laporan ini mendokumentasikan validasi OpenFOAM untuk konveksi campuran ruang dalam pada cavity lantai dengan input kalor Nielsen, yang dipakai sebagai baseline produksi template tensorHVAC. Aliran buoyant tunak diselesaikan dengan buoyantBoussinesqSimpleFoam dan RAS RNGkEpsilon pada grid terstruktur empat tingkat (52k–984k sel). Geometri, jet inlet, fluks panas lantai, dan bilangan Reynolds mengikuti Limane dkk. Validasi membandingkan profil garis kecepatan dan temperatur ternormalisasi CFD terhadap penanda eksperimen Nielsen. y+ dinding dan diagonal sel inti seragam h_diag dilaporkan untuk setiap mesh. Mesh halus yang selaras makalah (mesh03) menyediakan baseline HVAC yang praktis; penghalusan lanjut (mesh04) terus menurunkan y+ dinding dan ukuran sel inti sambil mempertahankan strategi grading dan perlakuan turbulensi yang sama.

1. PENDAHULUAN

Aliran udara ruang dalam dengan permukaan input kalor merupakan masalah CFD HVAC klasik: jet dinding berinteraksi dengan gaya apung dari lantai yang melepaskan kalor, menghasilkan resirkulasi dan medan temperatur berlapis. Cavity dengan input kalor Nielsen menyediakan benchmark yang ringkas dan terdokumentasi baik dengan profil eksperimen terpublikasi yang direproduksi Limane dkk. [1] di OpenFOAM menggunakan buoyancy Boussinesq dan RNG k–ε.

Validasi template OpenFOAM untuk kasus ini penting karena menjadi elemen fondasi tensorCFD [4], inisiatif open-source PT Tensor yang bertujuan menyediakan templat simulasi siap produksi bertaraf industri. Setup tervalidasi dimaksudkan sebagai mesin inti tensorHVAC, templat untuk CFD aliran udara ruang dalam buoyant dan kenyamanan termal. Verifikasi profil garis kecepatan dan temperatur terhadap penanda eksperimen Nielsen, bersama tangga mesh dan audit y+ dinding, mendukung baseline HVAC yang andal dan terprediksi terhadap setingan mesh.

2. METODE NUMERIK

2.1 Solver dan Model Turbulensi

Konveksi campuran tunak diselesaikan dengan buoyantBoussinesqSimpleFoam (OpenFOAM v2512). Turbulensi menggunakan RAS RNGkEpsilon, sesuai model preferensi makalah untuk cavity ini [1]. Perlakuan dinding menggunakan fungsi dinding kontinyu / gaya Spalding: nutUSpaldingWallFunction, epsilonWallFunction (lowReCorrection on), kqRWallFunction, dan alphatJayatillekeWallFunction. Sifat udara konstan (Newtonian) dengan ν dipilih sehingga $Re = U0\ h / \nu = 7100$ untuk tinggi slot inlet h; ekspansi Boussinesq $\beta \approx 1/TRef$ dengan $TRef = T0 = 295{,}15$ K; $Pr = 0{,}7$, $Prt = 0{,}85$.

Metode numerik yang dipakai adalah sebagai berikut: konveksi upwind orde-satu, gradien cell-limited, SIMPLE klasik (bukan consistent), GAMG untuk p_rgh, under-relaxation p_rgh = 0,2, U = 0,2, T,k,ε = 0,3. Iterasi sekitar 2.000 diperlukan untuk mesh kasar, dan hingga 20.000 diperlukan untuk mesh halus.

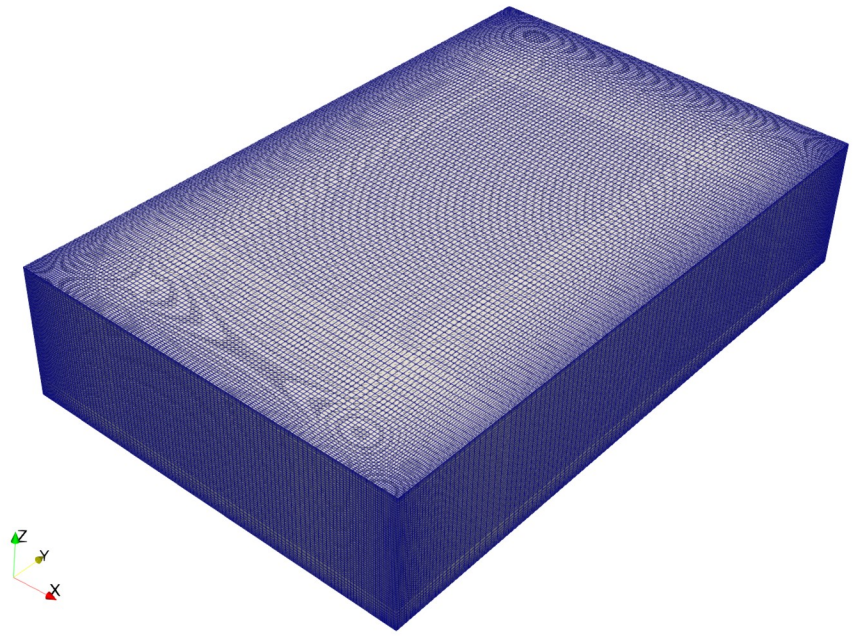
2.2 Geometri dan Kondisi Batas

Geometri mengikuti Limane dkk. [1] / Nielsen: tinggi cavity H = 0,127 m, panjang L = 3H = 0,381 m, lebar W = 4,7H = 0,5969 m. Sistem koordinat: x = panjang, y = lebar, z = tinggi, g = (0, 0, −9,81). Inlet berupa slot kiri-atas dengan U0 = 15,2 m/s, T0 = 295,15 K; outlet berupa slot kanan-bawah. Fluks panas lantai $q = 563$ W/m² diterapkan melalui fixedGradient pada T. Dinding lain adiabatik / no-slip seperti setup makalah. Bilangan Archimedes $Ar = 1{,}8 \times 10^{-6}$.

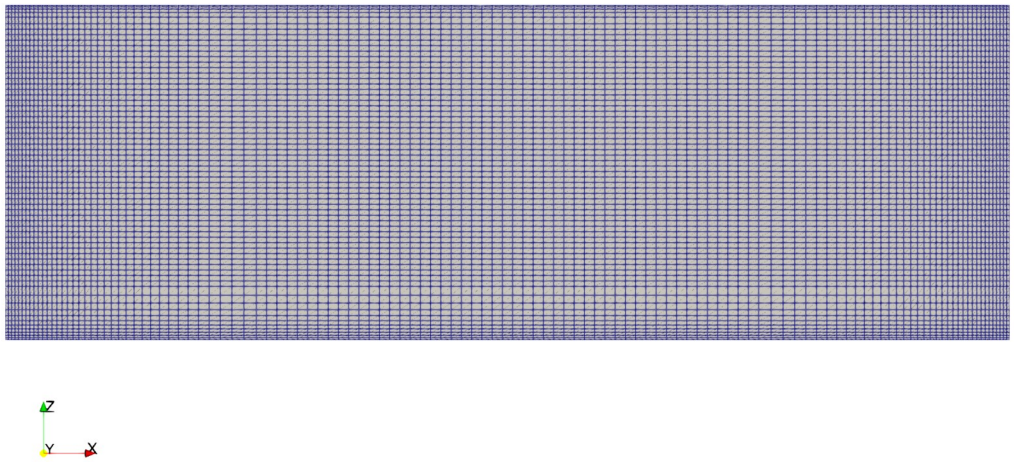
Profil temperatur dinormalisasi sebagai (T − T0) / ΔT0 dengan ΔT0 eksperimen = 1,71 K dari Tabel 2 Limane [1], sehingga CFD dan eksperimen memakai normalisasi yang sama dengan plot terpublikasi. Kecepatan dinormalisasi oleh U0.

2.3 Setingan Mesh

Mesh hex terstruktur penuh dibangun dengan blockMesh dan multi-grading sesuai pada referensi: pengelompokan menuju semua dinding (kiri/kanan, depan/belakang, lantai/plafon) dan inti seragam (rasio ekspansi 1). Hanya jumlah sel yang berbeda pada tangga GIT; geometri, fraksi grading, BC, skema, dan turbulensi sama. Kasus produksi / selaras makalah adalah mesh03 (juga dicerminkan oleh nielsen-heated-cavity/ mandiri). Resolusi inti seragam dilaporkan sebagai diagonal sel $h_{diag} = \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)}$, dengan panjang sisi diukur dari polyMesh/points di wilayah tengah cavity yang seragam.



GAMBAR 1. Mesh hex terstruktur cavity lantai input kalor Nielsen (mesh03): tampilan domain penuh.



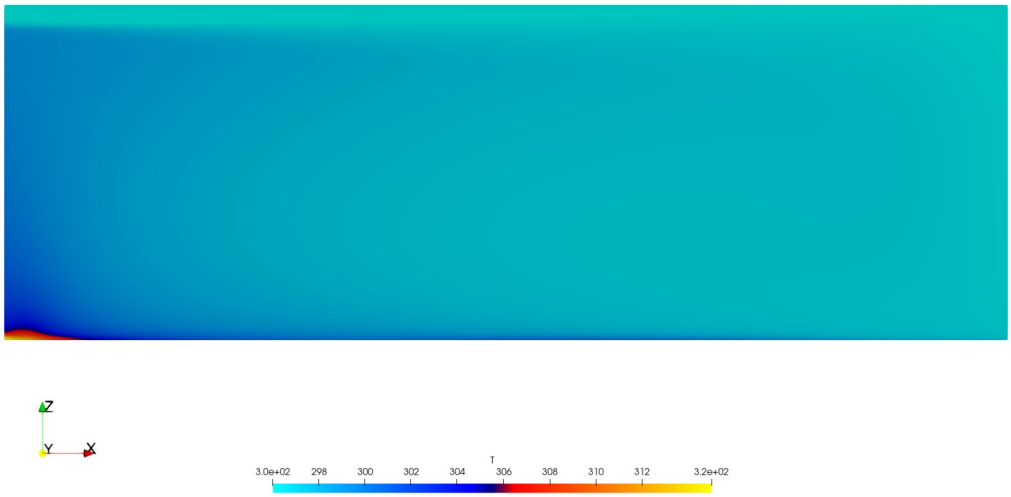
GAMBAR 2. Mesh hex terstruktur (mesh03): potongan melintang yang menunjukkan pengelompokan dinding dan inti seragam.

TABEL 1. Setup numerik baseline (mesh03 / selaras makalah)

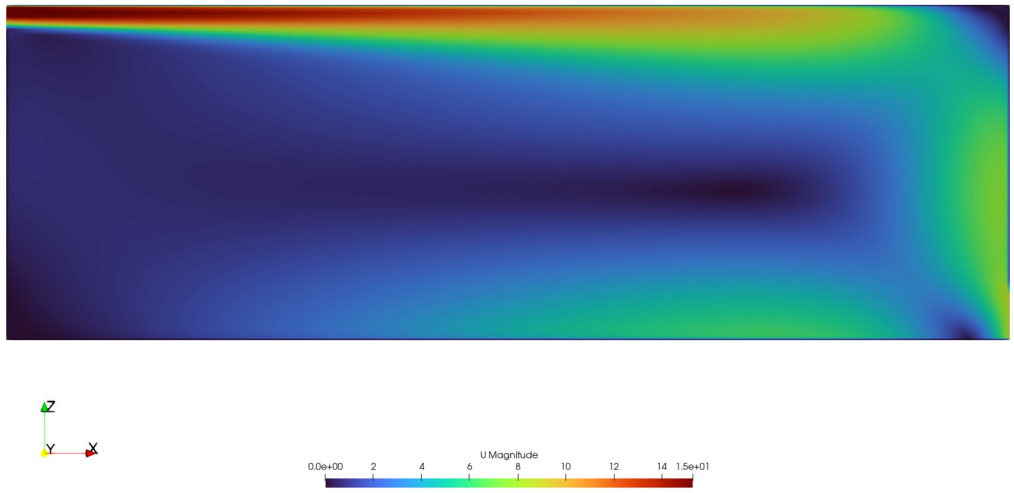
Item	**Pengaturan**
OpenFOAM	v2512 (opencfd/openfoam-run)
Solver	buoyantBoussinesqSimpleFoam (steady, Boussinesq)
Turbulensi	RAS RNGkEpsilon
Inlet U0 / T0	15.2 m/s / 295.15 K
Fluks panas lantai	563 W/m²
Re / Ar	7100 / 1.8×10^{-6}
ΔT0 (normalisasi)	1,71 K (eksperimen, Tabel 2 Limane)
Sel (mesh03)	415,104
h_diag inti	9.812 mm
Waktu akhir (iterasi, target)	5.000–10.000 (distribusi termal)

3. HASIL CFD BASELINE (MESH03)

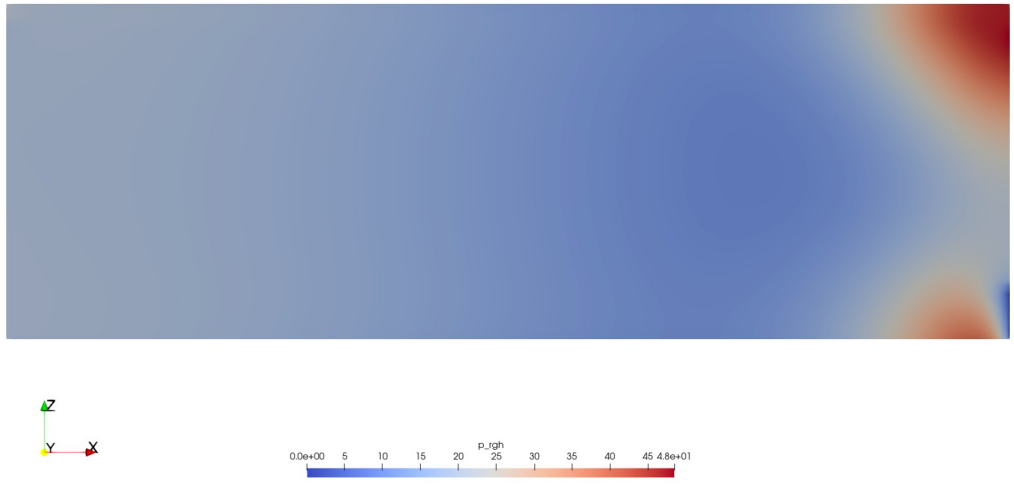
Mesh halus selaras makalah (mesh03, 415.104 sel) dijalankan hingga iterasi 7000 untuk profil yang ditampilkan di sini (target endTime kasus 10.000). Residual dan probe TU menegaskan bahwa temperatur terus terdistribusi ulang selama beberapa ribu iterasi SIMPLE—konsisten dengan pelajaran bahwa 5k–10k iterasi biasanya diperlukan untuk medan termal yang terdistribusi baik dengan masukan panas.



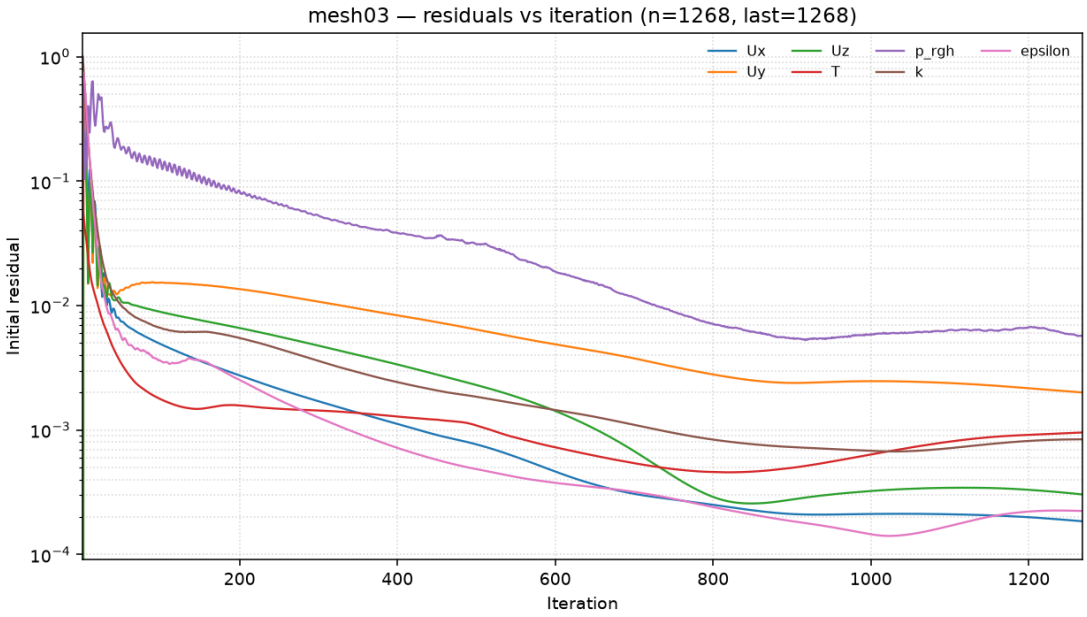
GAMBAR 3. Medan temperatur pada potongan mid-plane (mesh03): stratifikasi lantai input kalor dan pencampuran termal jet inlet.



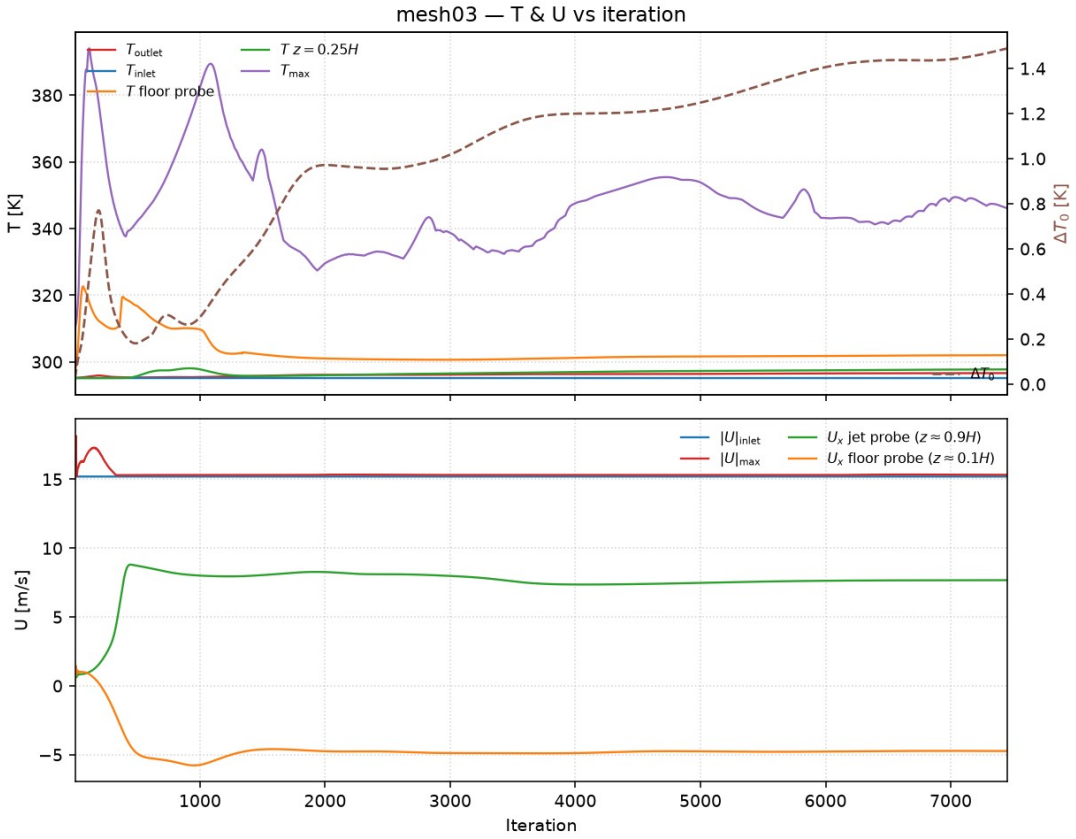
GAMBAR 4. Magnitudo kecepatan pada potongan mid-plane (mesh03): jet dinding dan resirkulasi cavity.



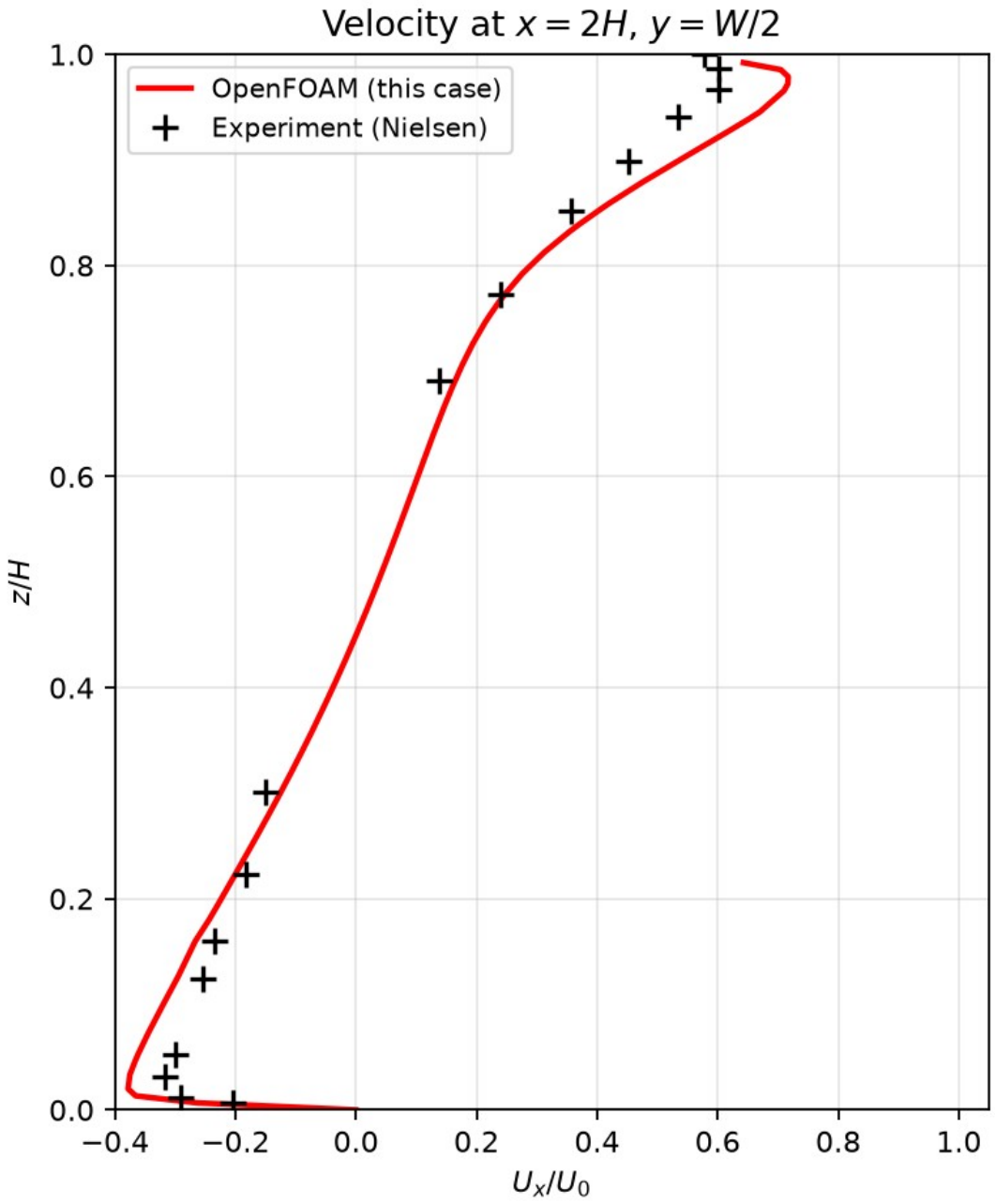
GAMBAR 5. Tekanan (p_rgh) pada potongan mid-plane (mesh03).



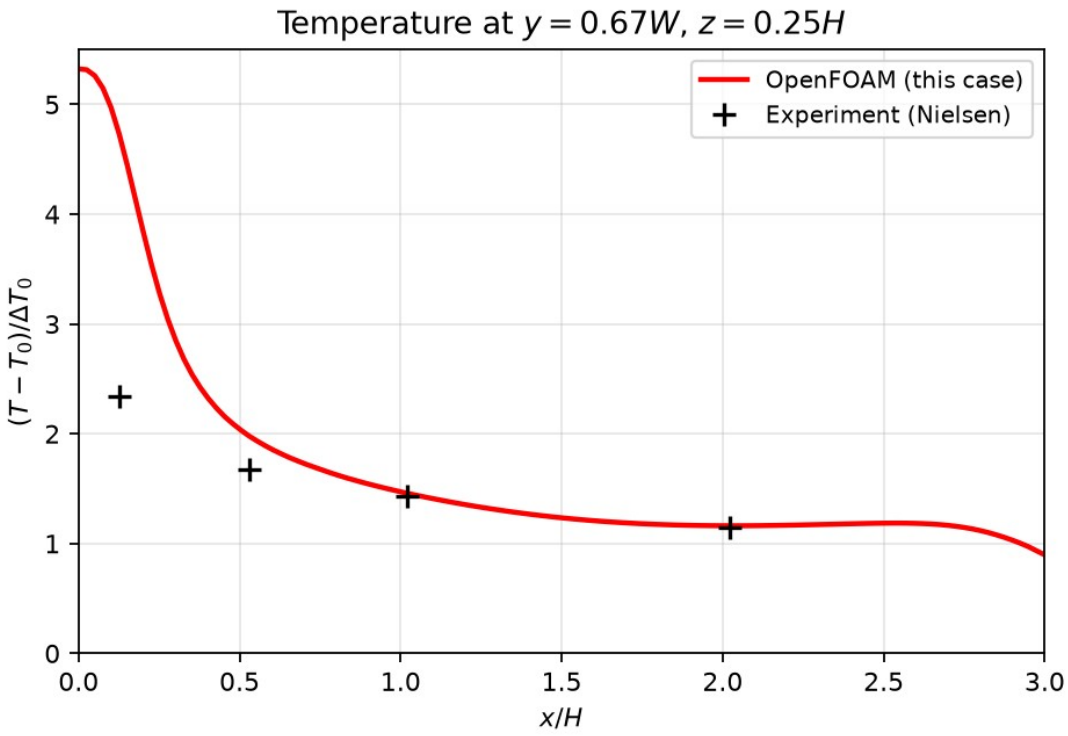
GAMBAR 6. Riwayat residual (mesh03).



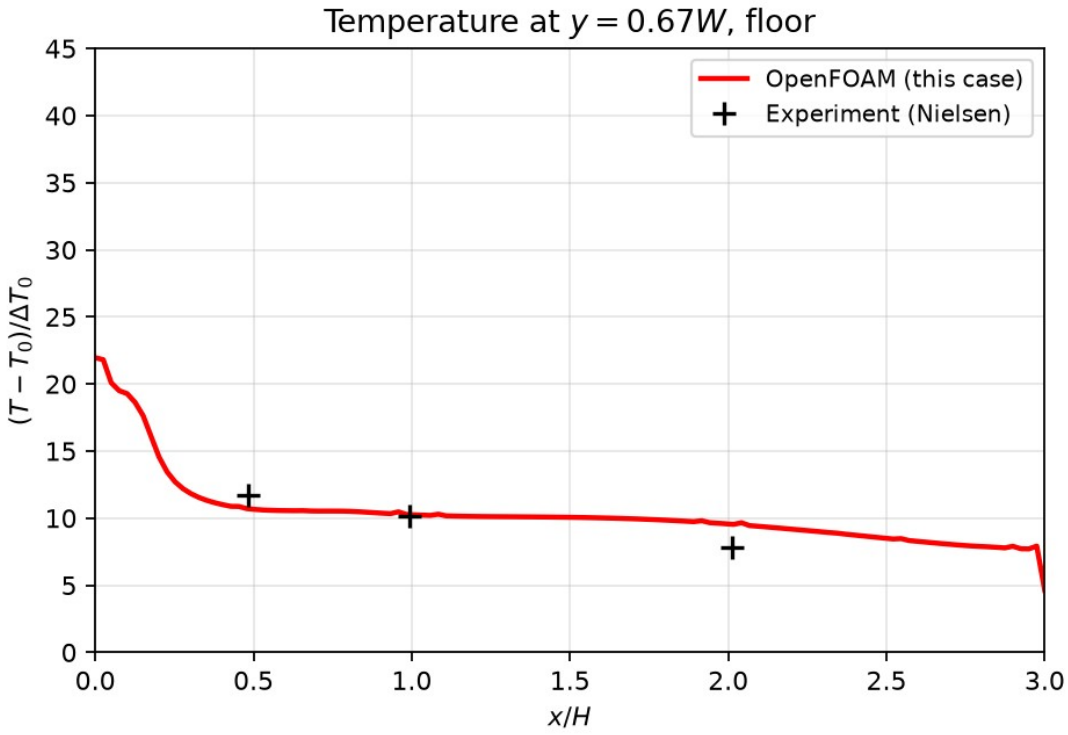
GAMBAR 7. Riwayat probe temperatur dan kecepatan (mesh03): T inlet/outlet, ekstremum domain, dan stasiun validasi.



GAMBAR 8. Kecepatan ternormalisasi pada x = 2H, y = W/2: OpenFOAM (mesh03) versus eksperimen Nielsen terdigitasi [1–3].



GAMBAR 9. Temperatur ternormalisasi pada y ≈ 0,67W, z = 0,25H: OpenFOAM (mesh03) versus eksperimen.



GAMBAR 10. Temperatur ternormalisasi dekat lantai input kalor pada y ≈ 0,67W: OpenFOAM (mesh03) versus eksperimen.

Profil kecepatan menangkap struktur jet dinding dan aliran balik pada x = 2H. Profil temperatur setengah-tinggi dan lantai menunjukkan perkembangan termal arah aliran yang didorong fluks panas lantai; sisa penyimpangan lokal terhadap eksperimen tipikal untuk RANS tunak + fungsi dinding pada cavity konveksi campuran ini dan dibahas bersama tangga mesh di §4.

4. STUDI KETAKTERGANTUNGAN GRID (GIT)

Empat densitas mesh dipertimbangkan. Fisika dan kondisi batas identik; hanya jumlah sel blockMeshDict yang berubah. Validasi membandingkan overlay profil eksperimen vs OpenFOAM pada stasiun Nielsen (metrik galat skalar terpisah tidak dipertahankan dalam laporan ini).

TABEL 2. Tangga mesh (hex terstruktur; multi-grading bersama)

Kasus	Peran	nx × ny × nz	Cells	h_diag (mm)
mesh01	Kasar	46 × 47 × 24	51,888	19.6
mesh02	Menengah	62 × 64 × 32	126,976	14.3
mesh03	Halus (= makalah)	92 × 94 × 48	415,104	9.8
mesh04	Lebih halus	123 × 125 × 64	984,000	7.2

4.1 y+ dinding

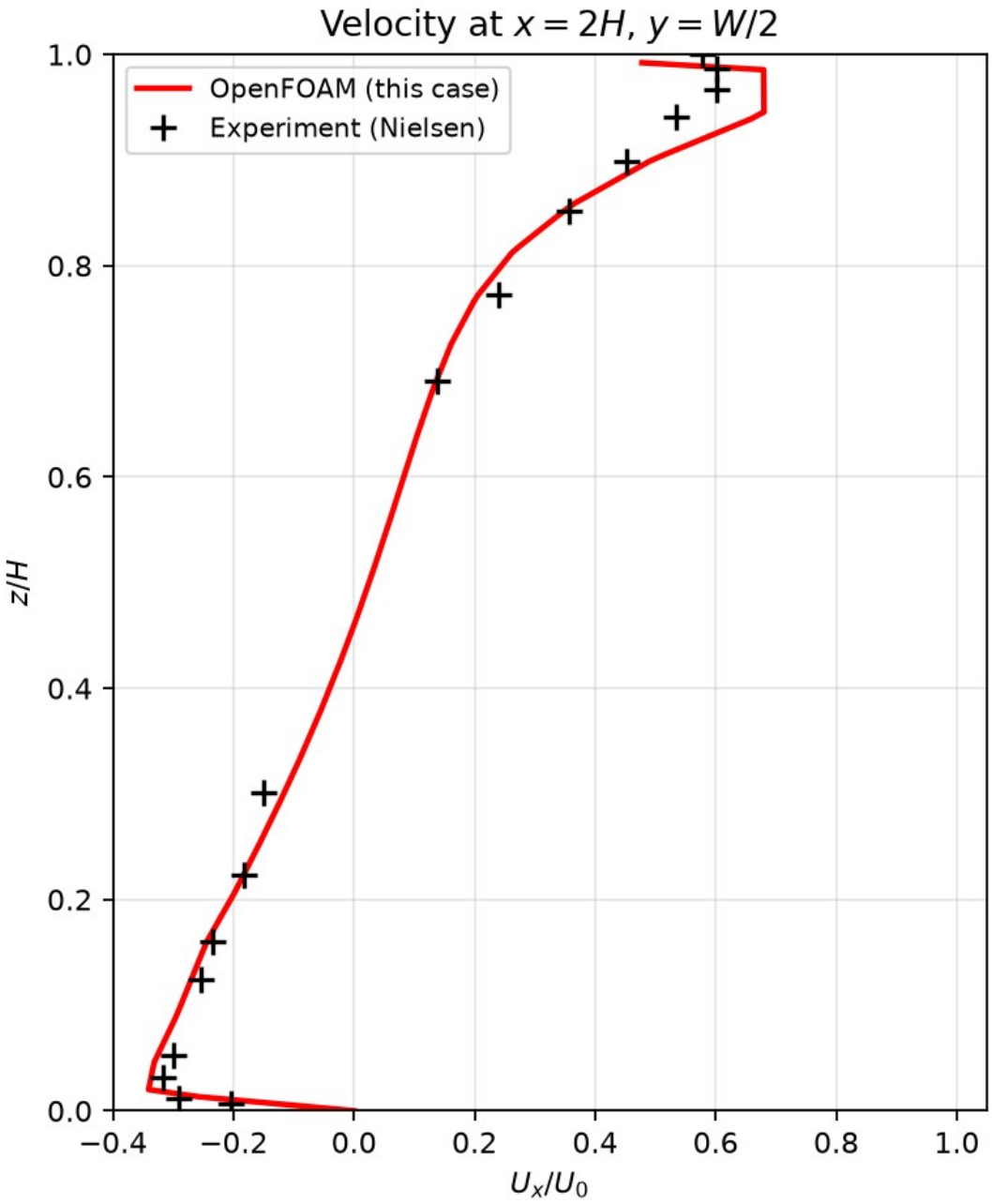
y+ dinding dihitung pada waktu rekonstruksi terbaru setiap mesh dengan buoyantBoussinesqSimpleFoam -postProcess -func yPlus.

TABEL 3. Ringkasan y+ dinding (keenam patch dinding)

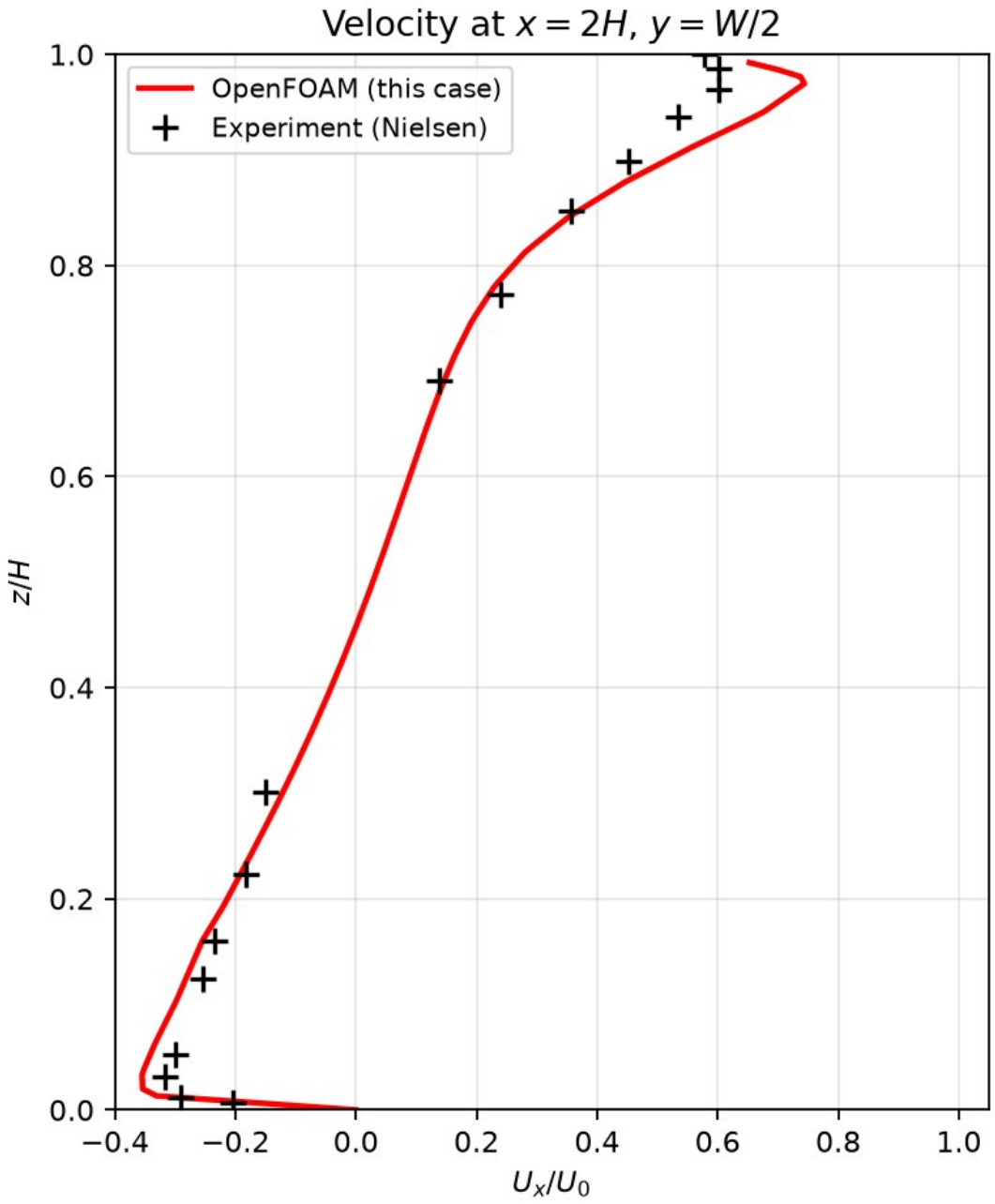
Kasus	Waktu	y+_min	y+_max	Rata-rata rata-rata patch
mesh01	10000	1.6	115.3	27.0
mesh02	10000	1.0	90.5	21.2
mesh03	7000	0.4	64.4	15.4
mesh04	14000	0.3	52.0	12.1

Puncak y+ terjadi pada dinding samping depan/belakang (pengaruh jet inlet); leftWall (dinding inlet) paling tenang. Penghalusan dari mesh01 → mesh04 menurunkan y+ dinding rata-rata secara konsisten. Nilai lokal di bawah y+ ≈ 1 pada mesh lebih halus tetap dapat diterima dengan fungsi dinding Spalding / kontinyu.

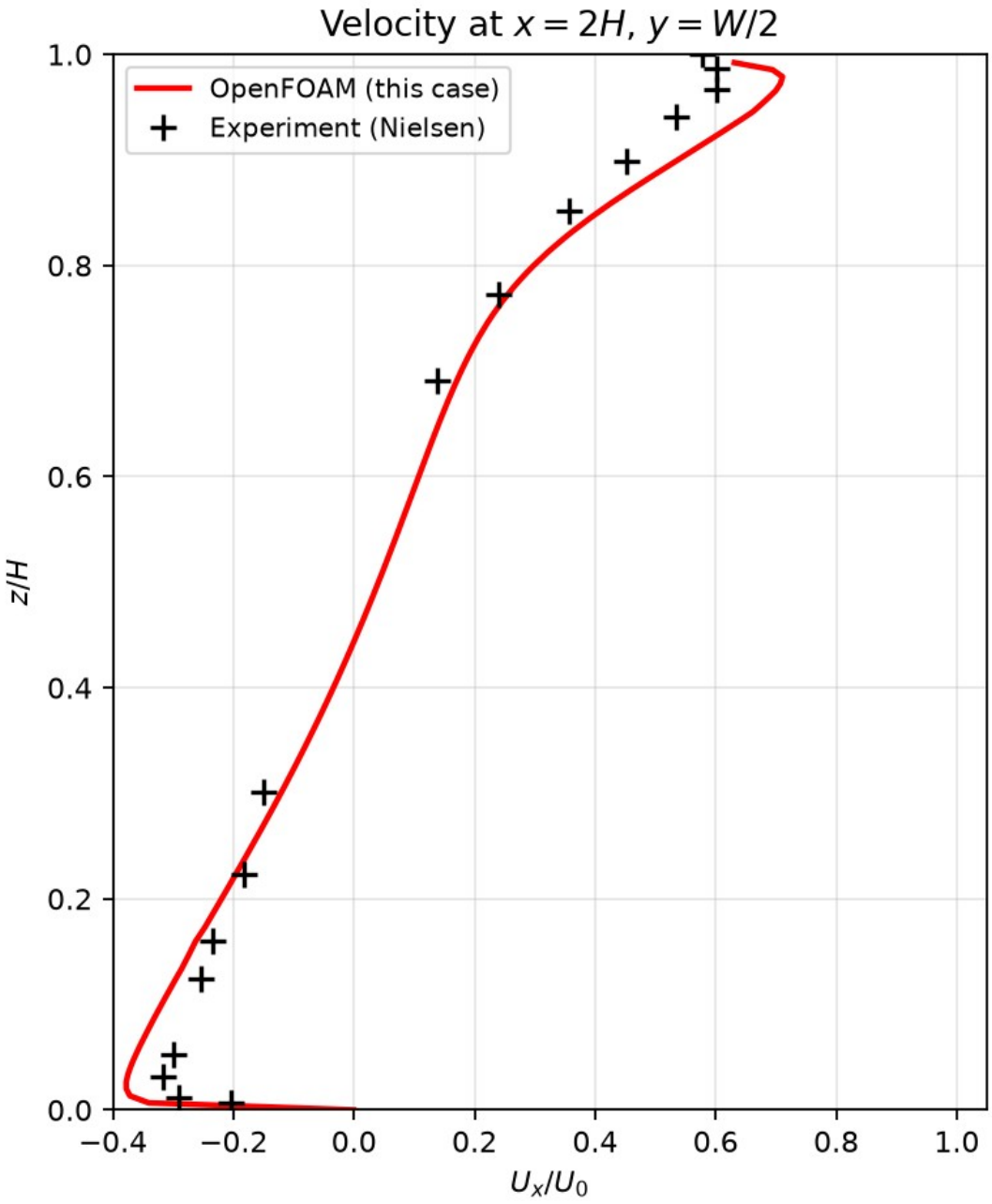
4.2 Perbandingan profil antar mesh



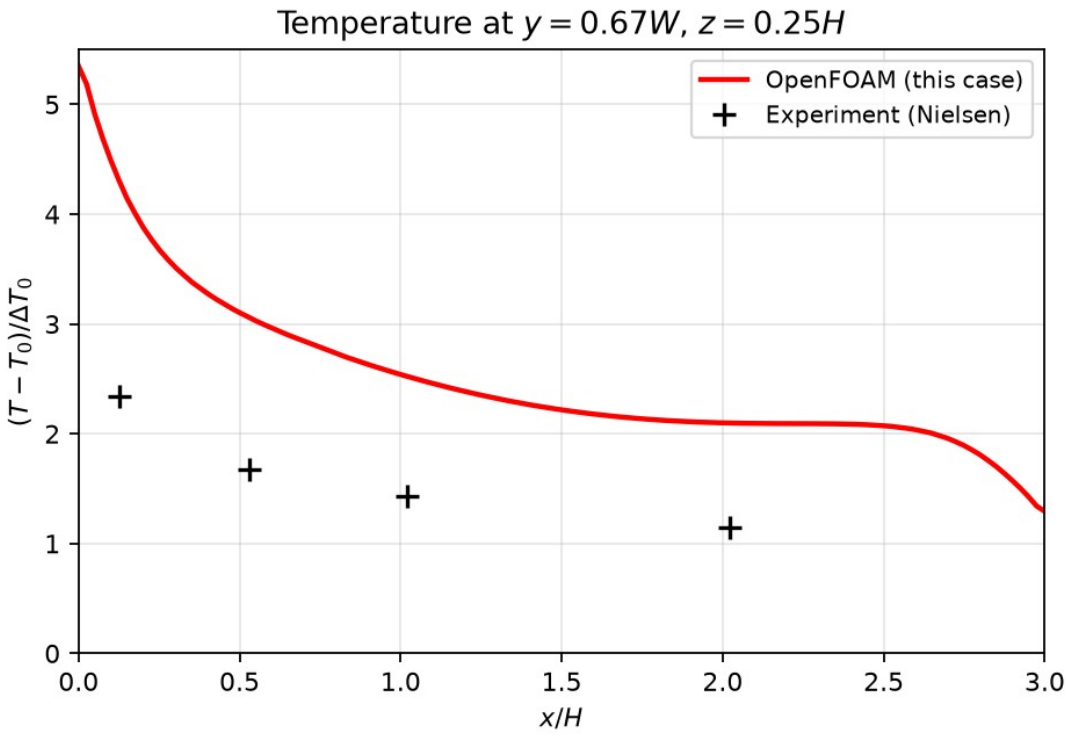
GAMBAR 11. Kecepatan pada x = 2H — mesh01 (kasar) vs eksperimen.



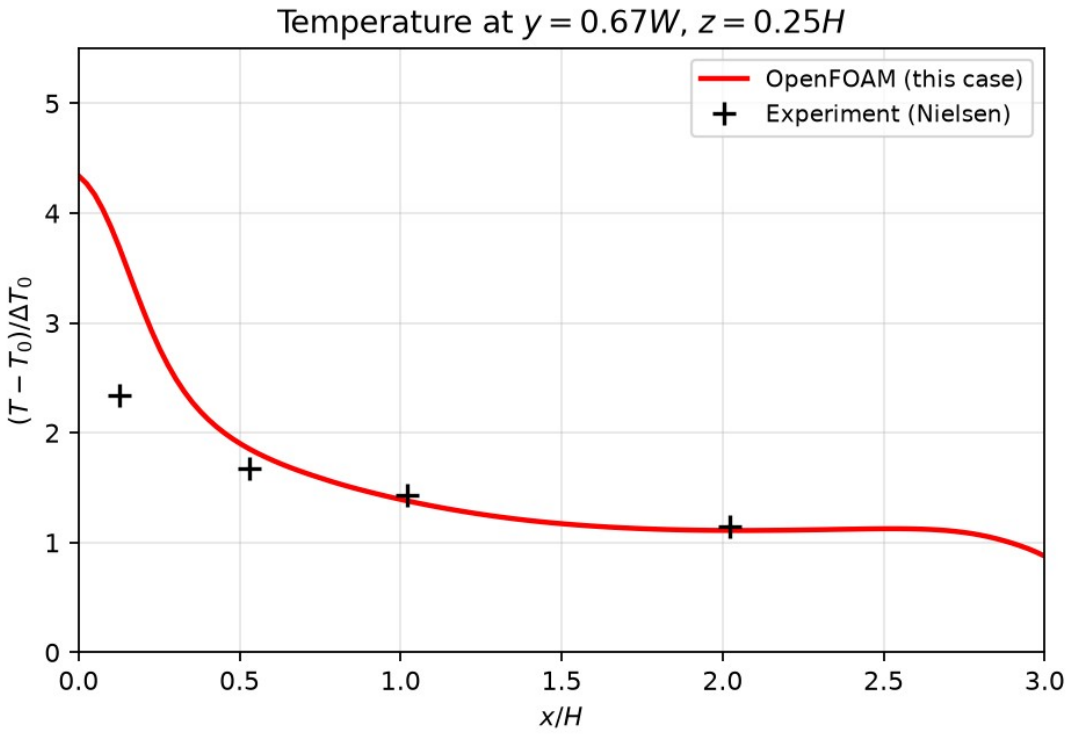
GAMBAR 12. Kecepatan pada x = 2H — mesh02 (menengah) vs eksperimen.



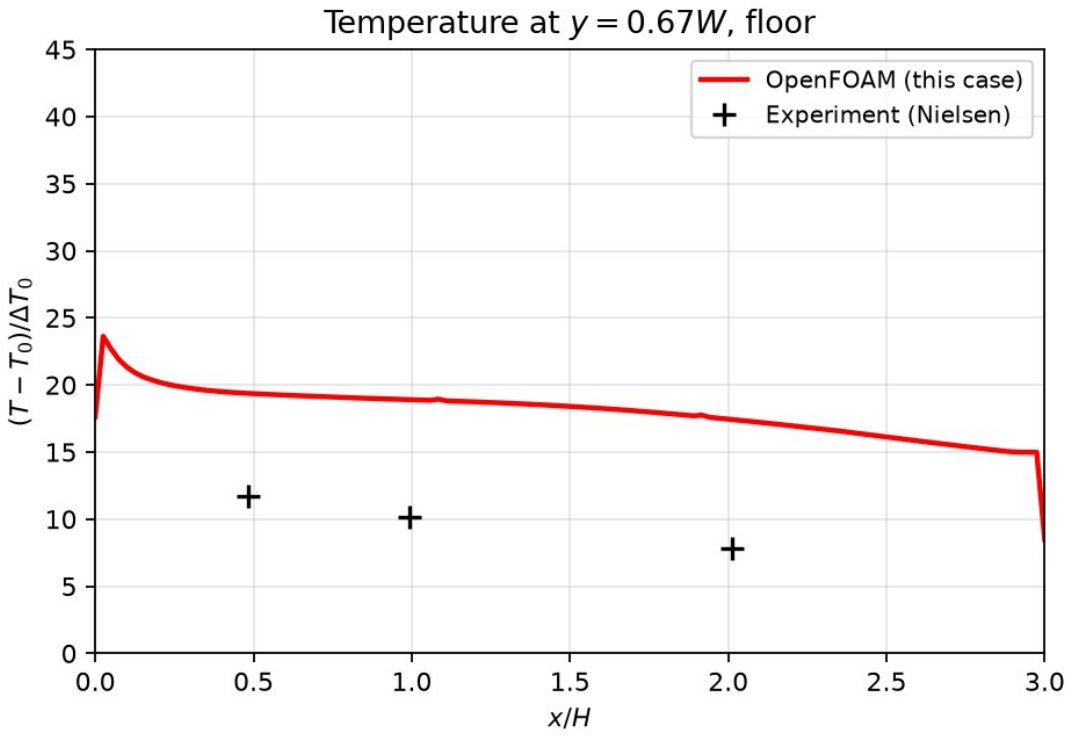
GAMBAR 13. Kecepatan pada x = 2H — mesh04 (lebih halus) vs eksperimen.



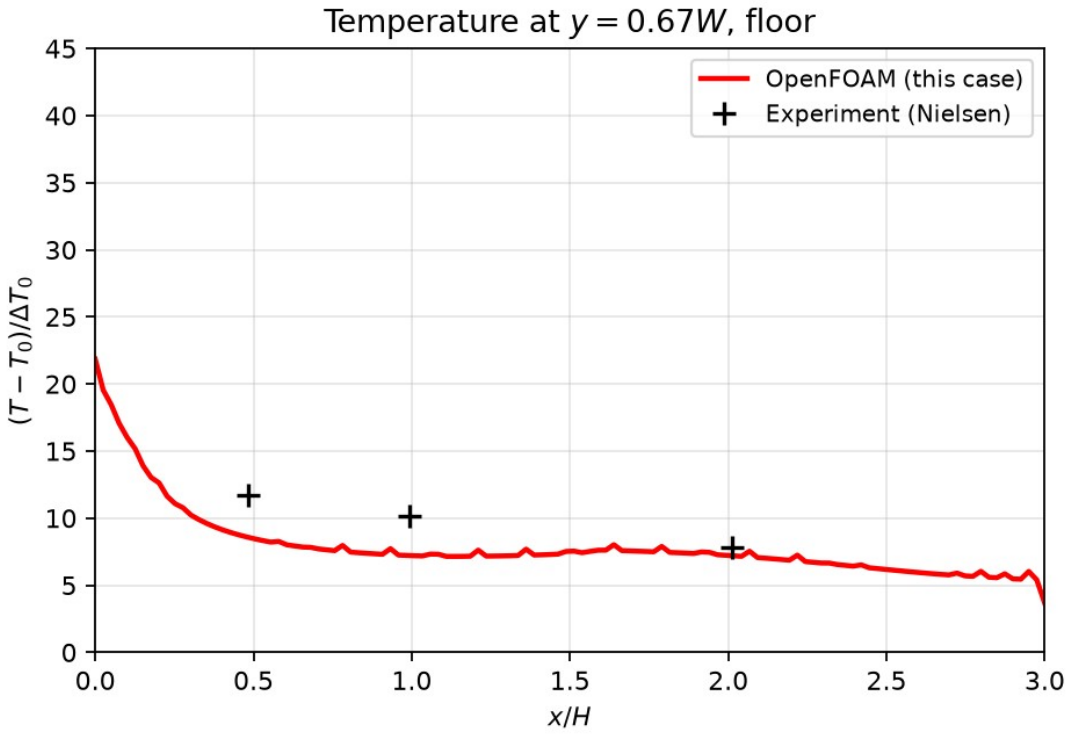
GAMBAR 14. Temperatur pada z = 0,25H — mesh01 vs eksperimen.



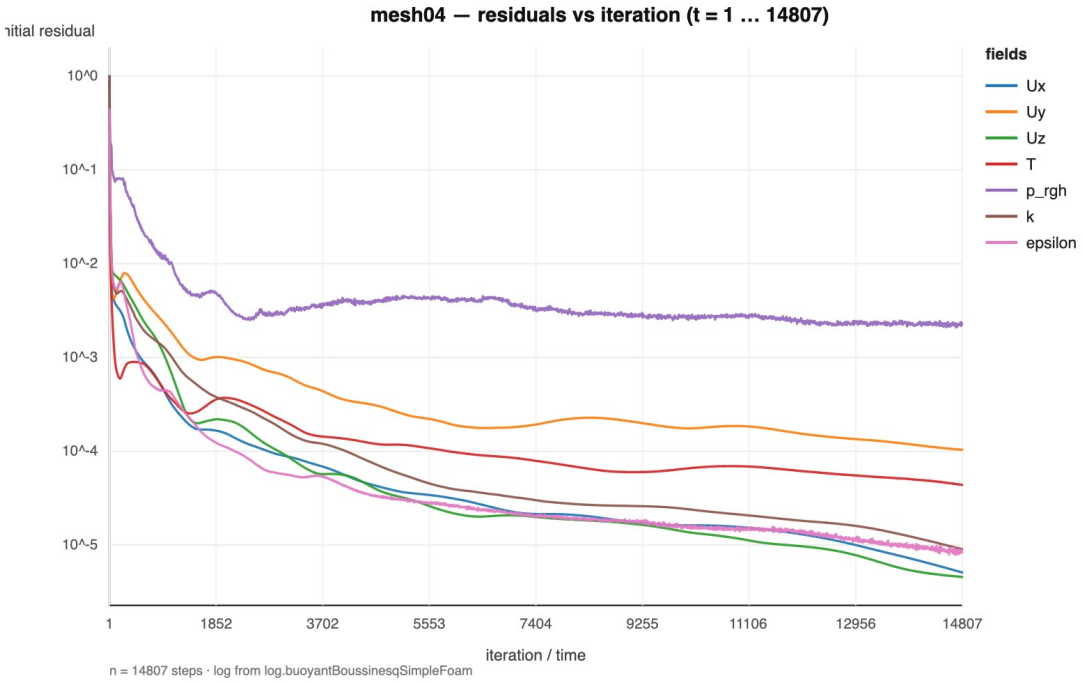
GAMBAR 15. Temperatur pada z = 0,25H — mesh04 vs eksperimen.



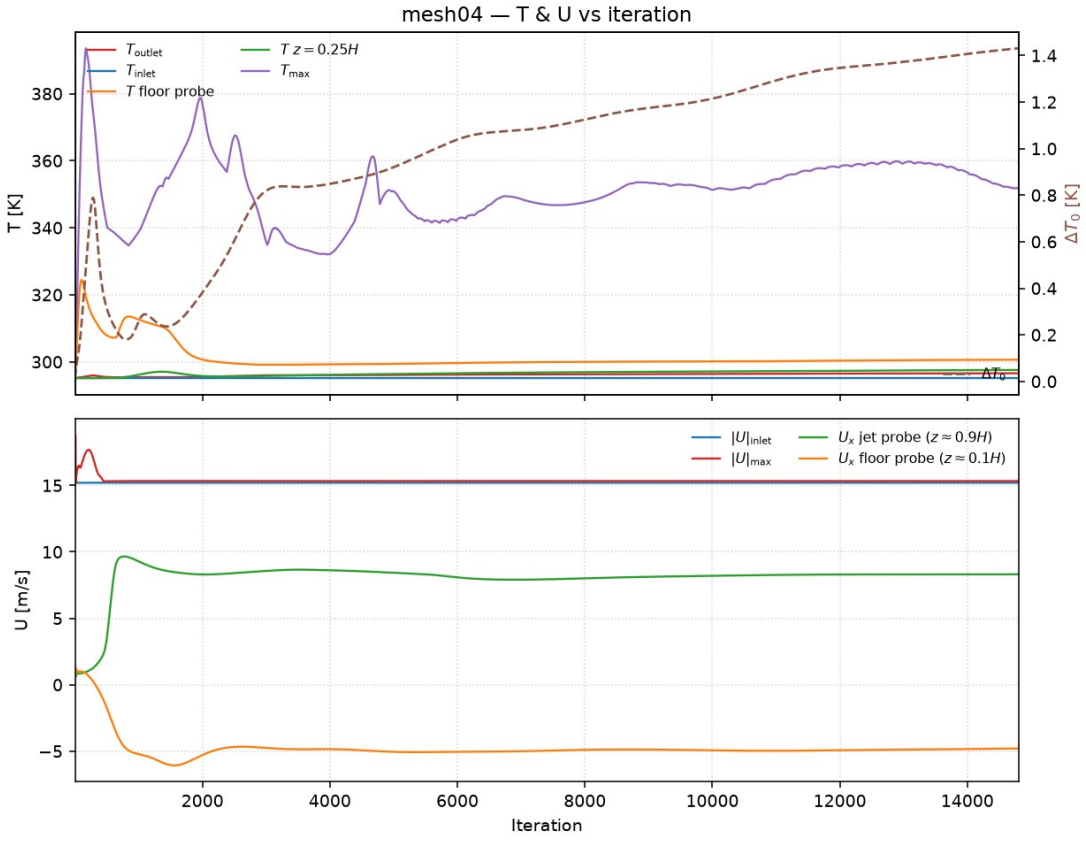
GAMBAR 16. Temperatur lantai — mesh01 vs eksperimen.



GAMBAR 17. Temperatur lantai — mesh04 vs eksperimen.



GAMBAR 18. Riwayat residual (mesh04).



GAMBAR 19. Riwayat probe temperatur dan kecepatan (mesh04).

Secara kualitatif, struktur kecepatan jet dinding dan stratifikasi termal yang didorong lantai dipulihkan pada keempat mesh. Mesh kasar mesh01 menunjukkan lebih banyak pengaburan gradien dekat-dinding; mesh03/mesh04 memperbaiki resolusi lapisan temperatur dinding vertikal dan lantai, konsisten dengan kebutuhan mengelompokkan sel pada dinding vertikal sekaligus lantai input kalor untuk konveksi alami / campuran. mesh03 dipertahankan sebagai grid produksi praktis selaras makalah untuk tensorHVAC; mesh04 tersedia bila y+ dekat-dinding yang lebih ketat dan h_diag inti yang lebih kecil diperlukan.

5. KESIMPULAN

Studi ini menetapkan dan memvalidasi alur kerja aliran udara ruang dalam buoyant OpenFOAM v2512 untuk cavity lantai dengan input kalor Nielsen terhadap profil kecepatan dan temperatur eksperimen terdigitasi (Limane dkk. [1]; Nielsen [2,3]). Mesh terstruktur halus (mesh03, ~415k sel, h_diag ≈ 9,8 mm) dengan RNGkEpsilon menyediakan baseline produksi praktis untuk templat tensorHVAC. GIT empat tingkat mendokumentasikan diagonal inti seragam dari 19,6 mm (mesh01) hingga 7,2 mm (mesh04) dan penurunan monoton y+ dinding rata-rata dari sekitar 27 ke 12. Overlay profil menegaskan bahwa grading selaras makalah dan anggaran iterasi memulihkan interaksi jet–buoyancy yang esensial; penghalusan lanjut terutama memperketat resolusi dekat-dinding dengan biaya lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT Tensor atas sponsor studi validasi ini dan atas kemajuan komunitas CFD melalui inisiatif tensorCFD [4]. Karya ini mencerminkan tujuan mereka menjaga templat rekayasa fidelitas tinggi tetap aksesibel, praktis, dan siap produksi.

Dalam semangat kolaborasi sumber terbuka, struktur kasus tensorHVAC, kamus mesh, dan perangkat pasca-proses dikembangkan di bawah program templat OpenFOAM PT Tensor. Folder validasi HVAC untuk studi ini tersedia di https://github.com/pt-tensor/HVAC-validation-Nielsen-heated-floor-cavity.git

PUSTAKA

1. Limane, A., Fellouah, H., & Galanis, N. (2015). Thermo-ventilation study by OpenFOAM of the airflow in a cavity with heated floor. Building Simulation, 8, 271–283. DOI: 10.1007/s12273-014-0205-4.
2. Nielsen, P. V. (1976). Flow in air conditioned rooms (PhD thesis). Technical University of Denmark.
3. Nielsen, P. V., Restivo, A., & Whitelaw, J. H. (1978). The velocity characteristics of ventilated rooms. Journal of Fluids Engineering, 100(3), 291–298.
4. PT Tensor. OpenFOAM case templates / tensorCFD. https://en.pt-tensor.com/openfoam-case-templates/