Simulasi CFD Aliran Udara Data Center Tingkat Rak (Lorong Dingin/Panas): Studi Validasi OpenFOAM

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

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

Abstrak. Laporan ini mendokumentasikan rekonstruksi OpenFOAM dari benchmark lorong dingin/panas tingkat rak CEETHERM tiga rak milik Saiyad, Fulpagare, dan Bhargav (Building Simulation, 2022). Aliran udara buoyant tunak diselesaikan dengan buoyantBoussinesqSimpleFoam dan RAS RNGkEpsilon pada mesh heksa terstruktur. Geometri mengikuti domain 2,2 × 1,82 × 1,98 m dengan simulator rak tengah berpori dan rak tetangga, koneksi overhead dingin–panas yang terbuka, inlet tile (1,54 m/s, 17 °C), serta return langit-langit lorong panas. Panas server dan tahanan Darcy–Forchheimer mengikuti Tabel 2; efek kipas keluar didekati dengan meanVelocityForce pada zona sel tipis di muka panas. Validasi membandingkan temperatur inlet/outlet rak CFD terhadap penanda eksperimen terdigitasi dari makalah acuan.

1. PENDAHULUAN

Data center berlantai panggung menata lorong dingin dan panas bergantian sehingga udara suplai masuk ke depan server dan exhaust panas keluar ke lorong panas. CFD tingkat rak diperlukan untuk menangkap resirkulasi di atas kabinet, temperatur inlet yang tidak seragam, serta pemanasan sendiri server atas—fitur yang sering dihaluskan oleh RANS skala ruang.

Saiyad dkk. [1] memublikasikan domain komputasi tiga rak dengan rak simulator server di baris tengah (empat unit 10U) diapit rak server nyata tetangga, membandingkan RANS k−ε standar dan DES elliptic-blending terhadap eksperimen. Validasi templat OpenFOAM untuk tata letak ini mendukung tensorDC dalam inisiatif tensorCFD PT Tensor [2], menyediakan baseline produksi untuk aliran udara lorong/rak dan metrik termal (Tin, Tout, dan indeks terkait).

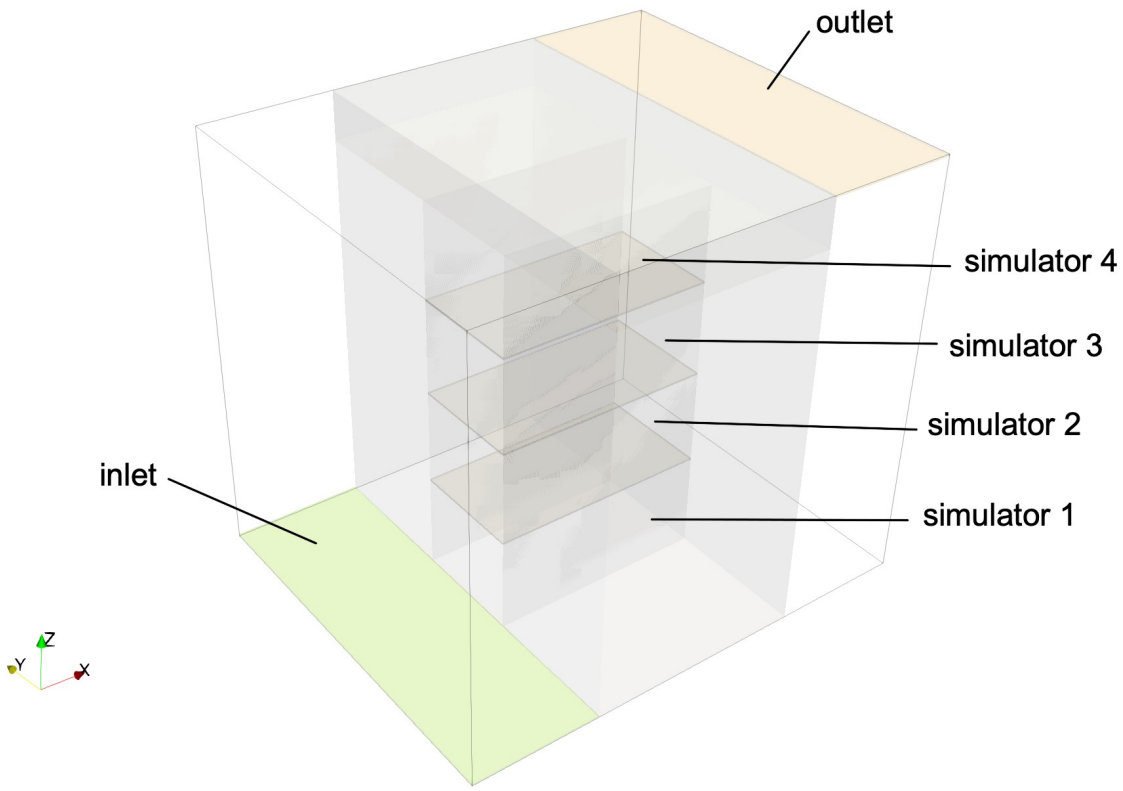
2. METODE NUMERIK

2.1 Solver dan Model Turbulensi

Aliran udara buoyant Boussinesq tunak diselesaikan dengan buoyantBoussinesqSimpleFoam (OpenFOAM v2512). Turbulensi memakai RAS RNGkEpsilon. Pemilihan RNG k−ε dan perlakuan dekat-dinding kontinyu / gaya Spalding mengikuti studi validasi tensorHVAC rongga lantai panas Nielsen [3]: nutUSpaldingWallFunction, epsilonWallFunction (lowReCorrection on), kqRWallFunction, dan alphatJayatillekeWallFunction. Baseline RANS yang dipublikasikan makalah adalah k−ε standar [1]; RNG merupakan pilihan templat yang disengaja dan selaras dengan baseline HVAC tersebut. Sifat udara: $\nu = 1{,}5\times10^{-5}$ m²/s, $\beta \approx 1/\mathrm{TRef}$ dengan TRef = 290,15 K, Pr = 0,7, Prt = 0,85.

2.2 Geometri dan Kondisi Batas

Domain berukuran 2,2 m (arah aliran x: lorong dingin | rak | lorong panas) × 1,82 m (spanwise y: tetangga kiri | sim tengah | tetangga kanan) × 1,98 m (tinggi z). Tinggi IT 0–1,76 m; overhead 1,76–1,98 m tetap fluida terbuka di atas ketiga kolom rak sehingga lorong dingin dan panas terhubung di atas kabinet—"kondisi batas internal" pada bagian atas menurut makalah [1], bukan kanopi padat. Simulator rak tengah menempati y = 0,645–1,175 m dengan empat unit bertumpuk 0,44 m (10U); baffle kedap menghalangi rembesan vertikal antarunit. Rak tetangga mengisi sisa bentang y sebagai kolom berpori kontinyu.



GAMBAR 1. Domain komputasi: lorong dingin, tiga kolom rak berpori, lorong panas, dan koneksi overhead terbuka.

Kondisi batas mengikuti Tabel 2 / Gambar 7 dari [1]: inlet tile lantai lorong dingin U = (0, 0, 1,54) m/s dan T = 290,15 K (17 °C); outlet tekanan langit-langit lorong panas (p_rgh = 0); dinding sisanya adiabatik no-slip. Plenum dan CRAC dihilangkan seperti pada makalah.

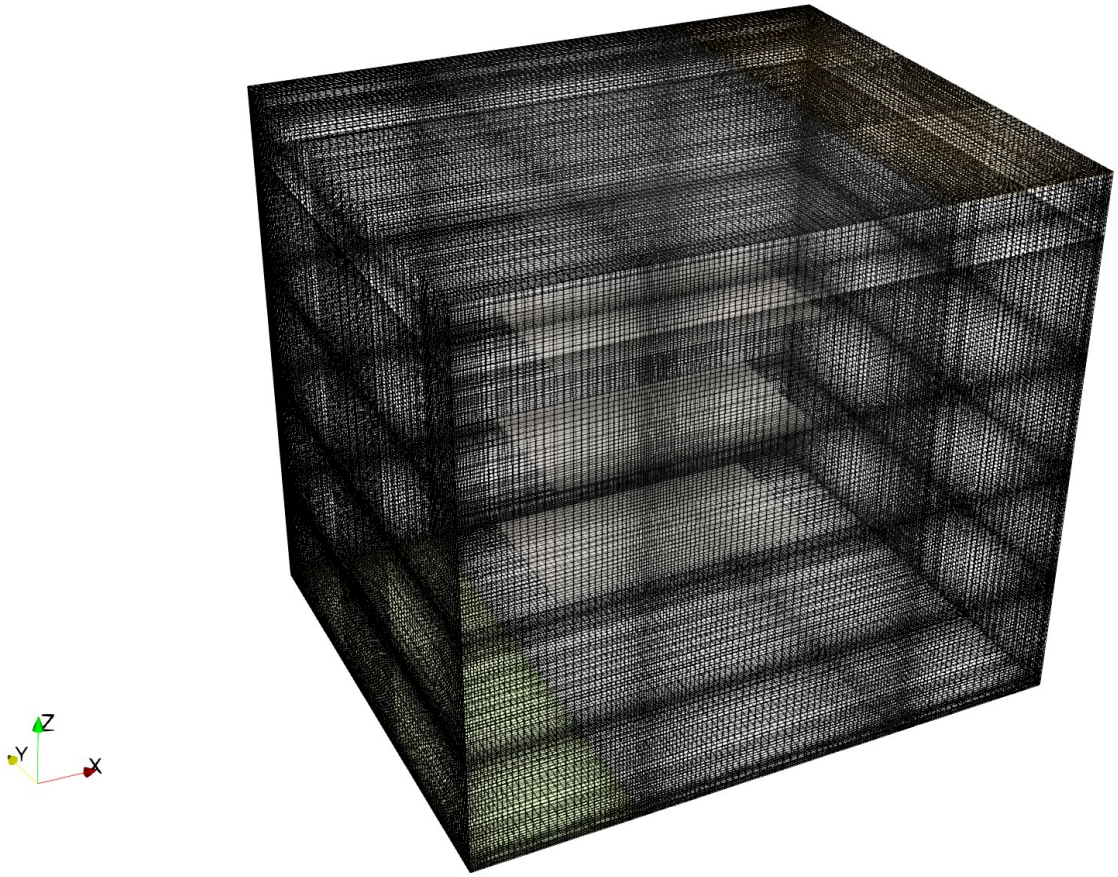
2.3 Server Berpori, Panas, dan Kipas

Server dimodelkan sebagai zona sel berpori dengan tahanan Darcy–Forchheimer dari Tabel 2: viskos Pv = 0,50 kg/(m³·s) → $d_x \approx 2{,}78\times10^{4}$ 1/m²; inersia Pi = 0,05 kg/m^{4} → $f_x \approx 0{,}083$ 1/m. Koefisien transversal diperbesar (konvensi pengali negatif OpenFOAM) agar aliran depan-ke-belakang didorong. Panas diinjeksikan sebagai sumber volumetrik pada temperatur udara: 2500 W per simulator tengah (10 kW rak tengah) dan 10000 W per rak tetangga, dengan Su = Q/(ρ Cp) dalam mode volume absolut (ρ = 1,2, Cp = 1005).

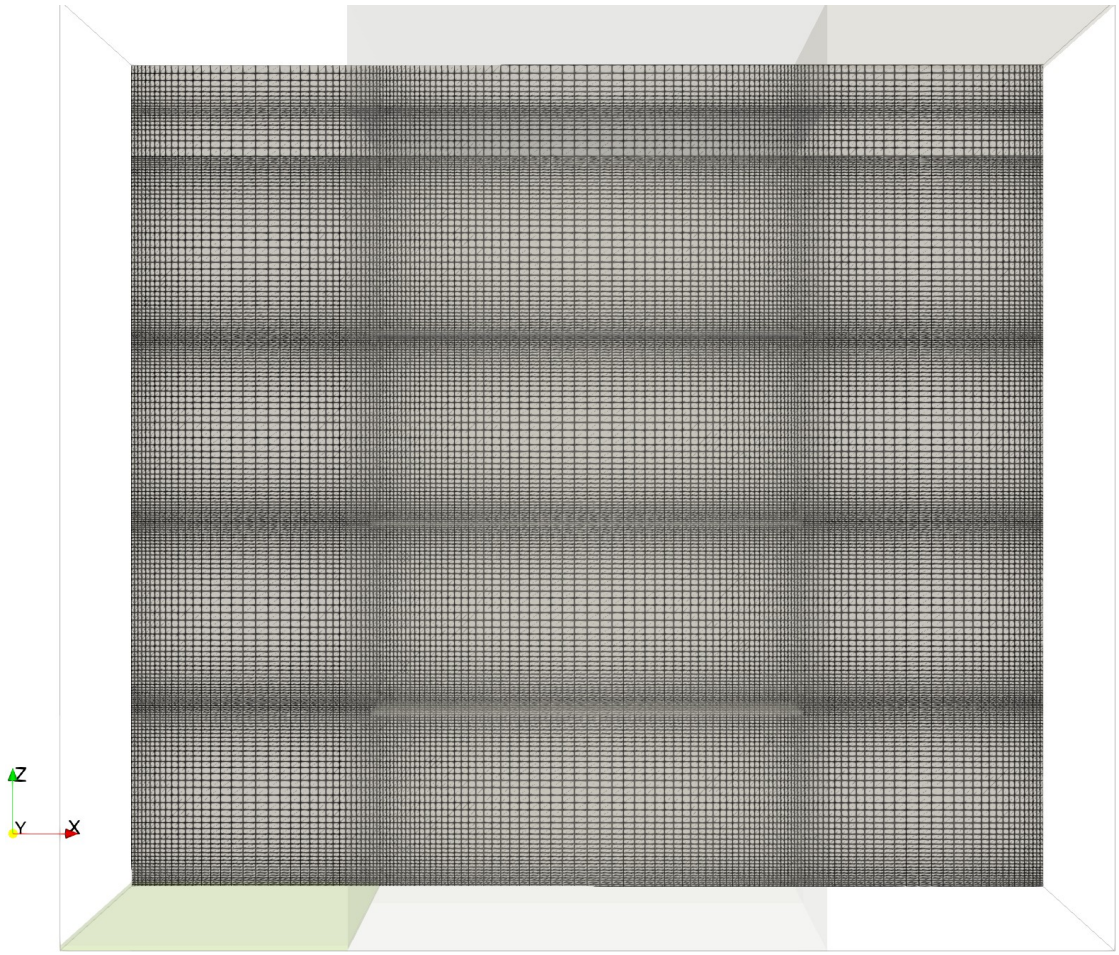
Makalah menerapkan kurva kipas pabrik di keluar server [1]. Di sini, meanVelocityForce pada zona sel keluar tipis (x ≈ 1,55–1,60 m) mendekati efek tersebut: simulator tengah menargetkan Ubar = (1,5, 0, 0) m/s (konsisten dengan ΔT rak tengah ≈6 K pada 10 kW); tetangga memakai Ubar lebih ringan agar massa tile (≈1,68 m³/s) tidak terdorong berlebih.

2.4 Mesh

Mesh heksa terstruktur dihasilkan dengan blockMesh. Mesh dekat dinding mengikuti strategi yang sama yang divalidasi untuk aliran dalam ruangan buoyant pada laporan tensorHVAC Wiratama, C. [3]: grading normal dinding yang mengelompokkan sel menuju muka domain dan lorong–rak untuk y^{+} fungsi dinding, dengan inti lebih kasar menjauh dari batas. Grading kedua ujung ditambahkan pada setiap pita simulator 0,44 m agar sel juga mengelompok normal terhadap baffle antar-sim. Resolusi linear digandakan relatif terhadap baseline ~$3{,}5\times10^{5}$ sebelumnya; mesh produksi di sini sekitar $2{,}8\times10^{6}$ sel.



GAMBAR 2. Mesh heksa terstruktur domain tiga rak (tampilan global).



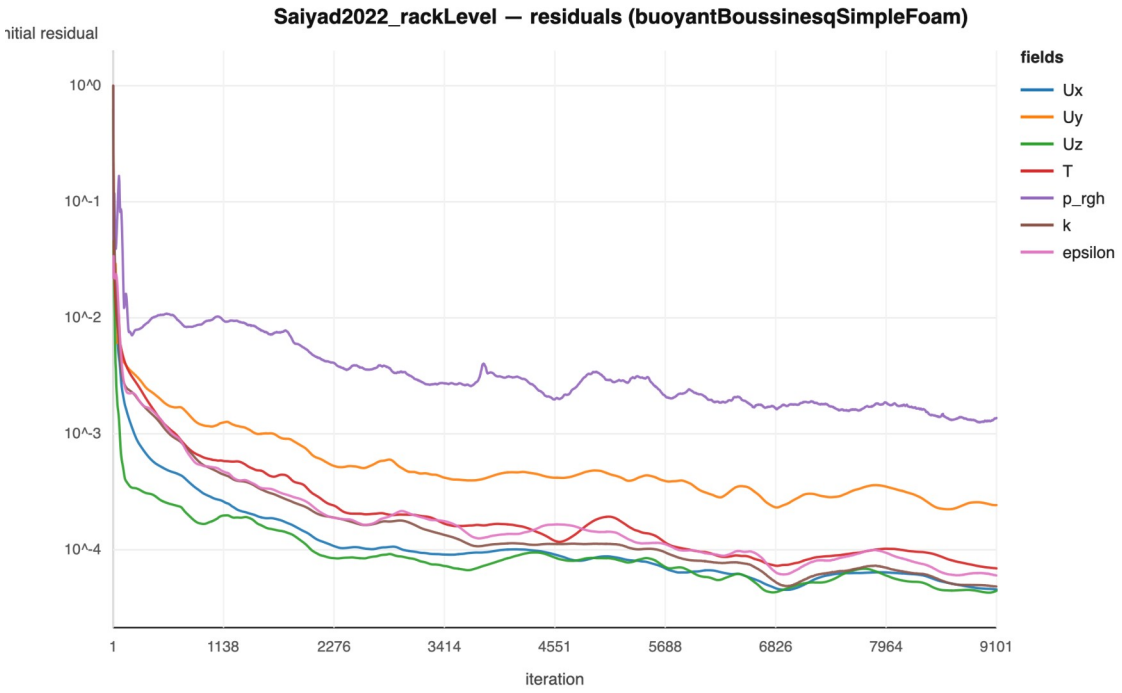
GAMBAR 3. Detail mesh pada bidang potong melalui rak tengah dan lorong.

TABEL 1. Setup numerik baseline (Saiyad2022_rackLevel)

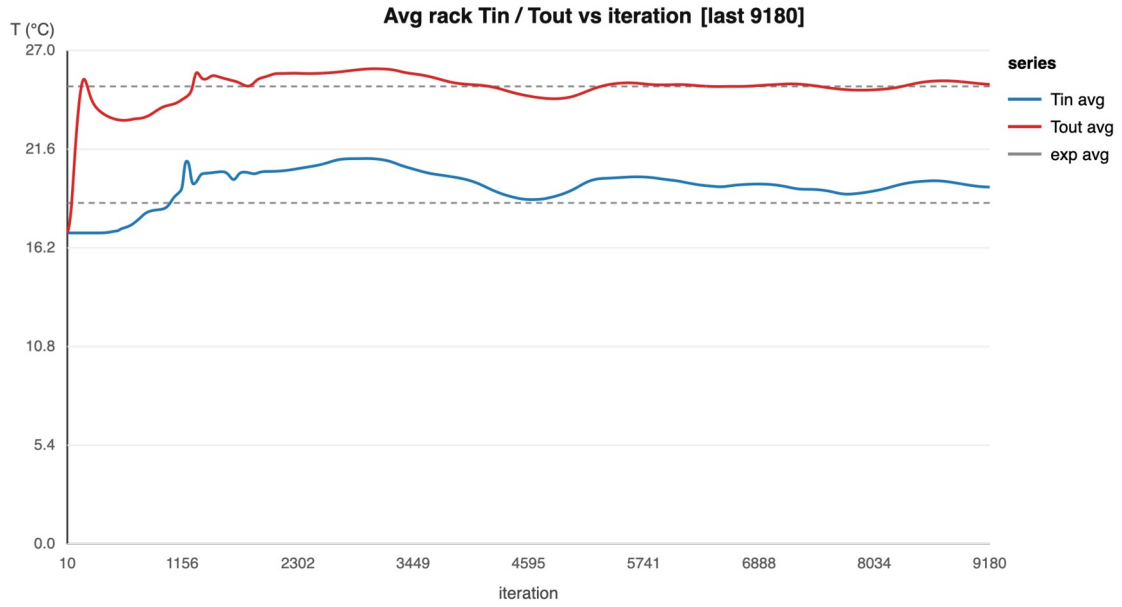
Butir	**Pengaturan**
OpenFOAM	v2512 (opencfd/openfoam-run)
Solver	buoyantBoussinesqSimpleFoam (steady, Boussinesq)
Turbulensi	RAS RNGkEpsilon (paper RANS: standard k−ε)
Domain P×L×T	2.2 × 1.82 × 1.98 m
Inlet tile	1.54 m/s @ 17 °C (cold-aisle floor)
Return	p_rgh = 0 (hot-aisle ceiling)
Pori d_x / f_x	≈27778 1/m² / ≈0.0833 1/m (Table 2)
Panas (tengah / tetangga)	4×2500 W / 2×10000 W
Kipas keluar	meanVelocityForce on exit zones (mid Ubar=1.5)
Sel (kira-kira)	~2,8×10^6 (heksa graded)
Iterasi sampel CFD	9180

3. HASIL DAN VALIDASI

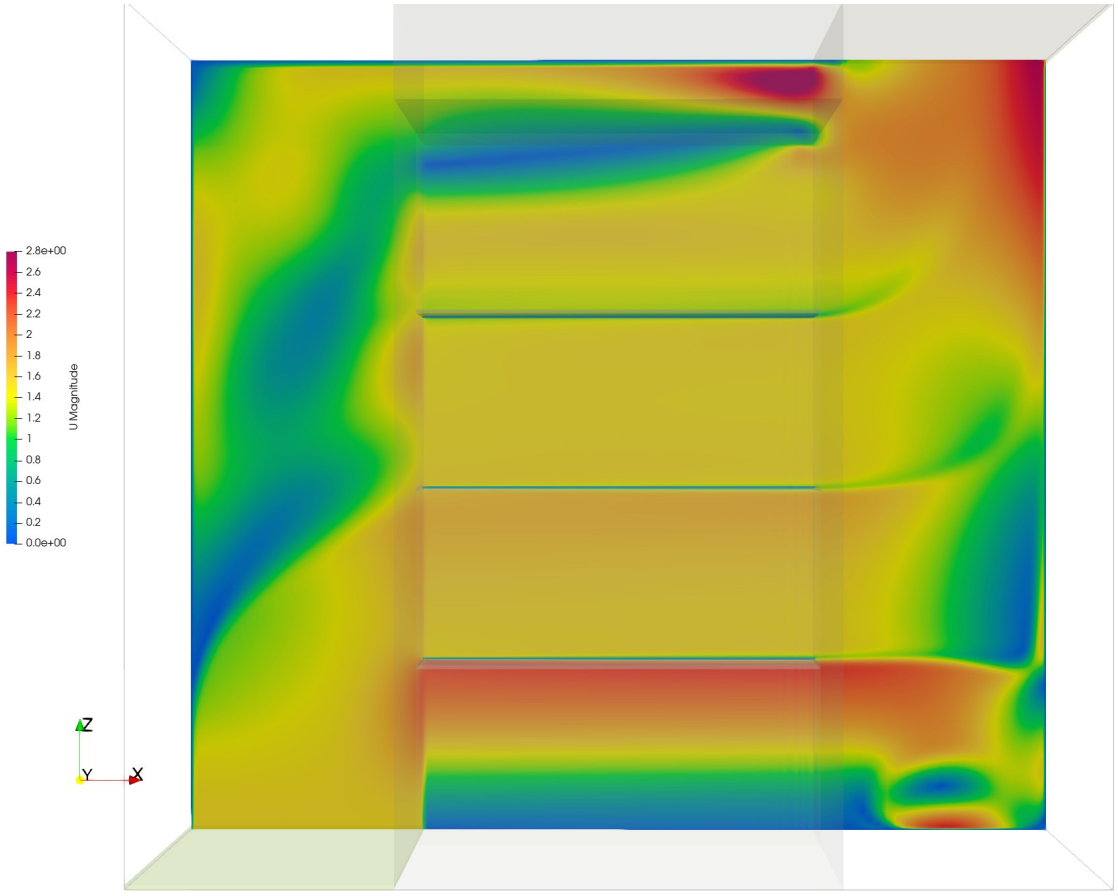
Residual serta riwayat Tin/Tout dipantau selama berjalan. Plot medan dan validasi di bawah memakai sampel dekat iterasi 9180 pada mesh halus ~2,8×10^6 sel. Kurva eksperimen terdigitasi diambil dari Saiyad dkk. [1].



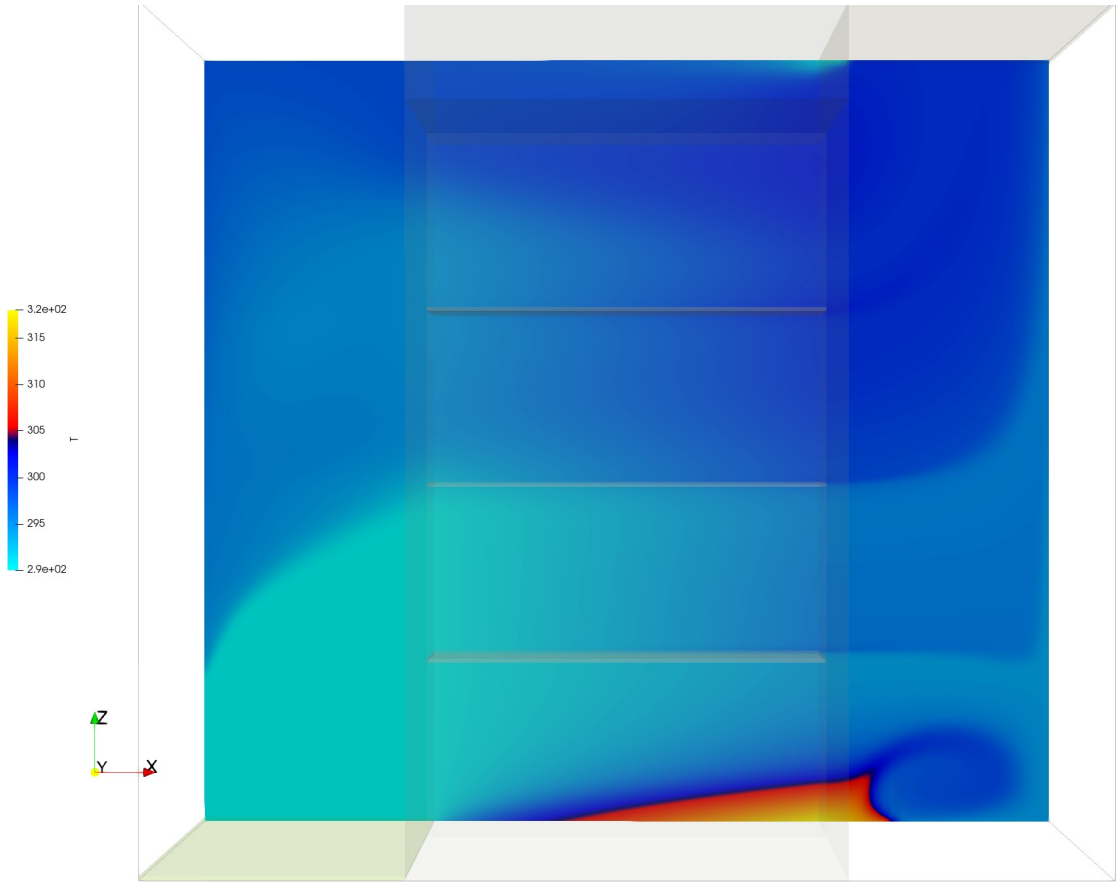
GAMBAR 4. Riwayat residual solver (iterasi SIMPLE).



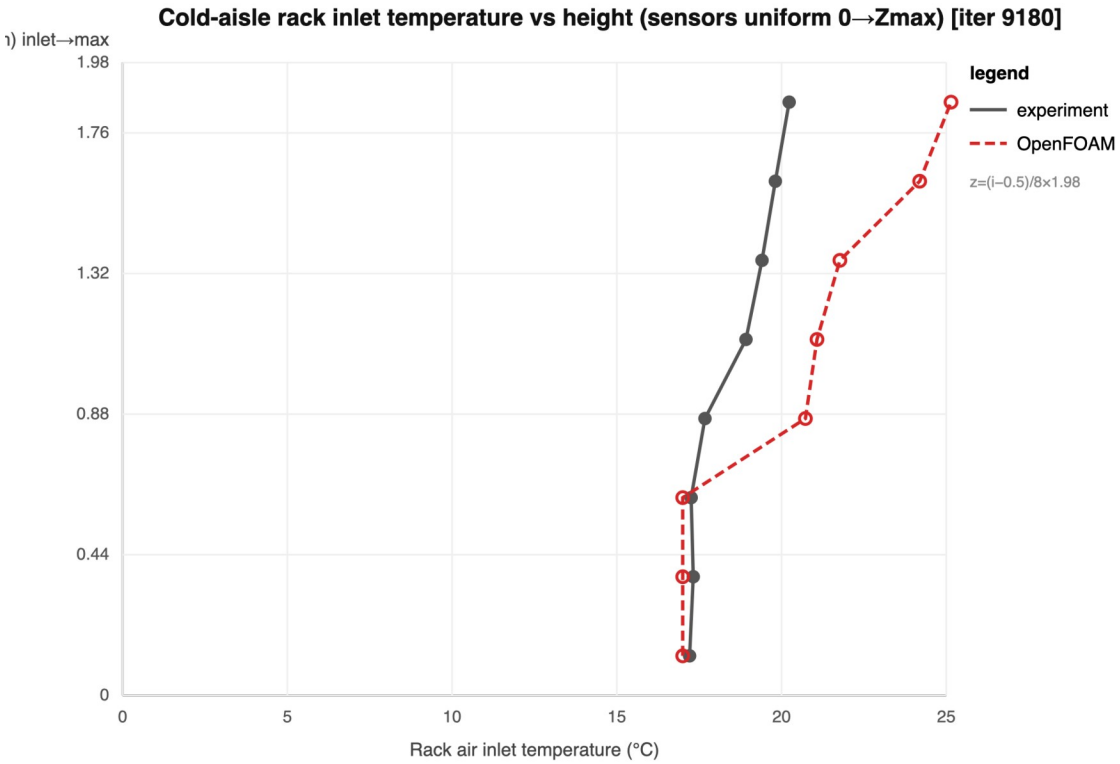
GAMBAR 5. Rata-rata temperatur udara inlet dan outlet rak tengah versus iterasi, dengan target rata-rata eksperimen (putus-putus).



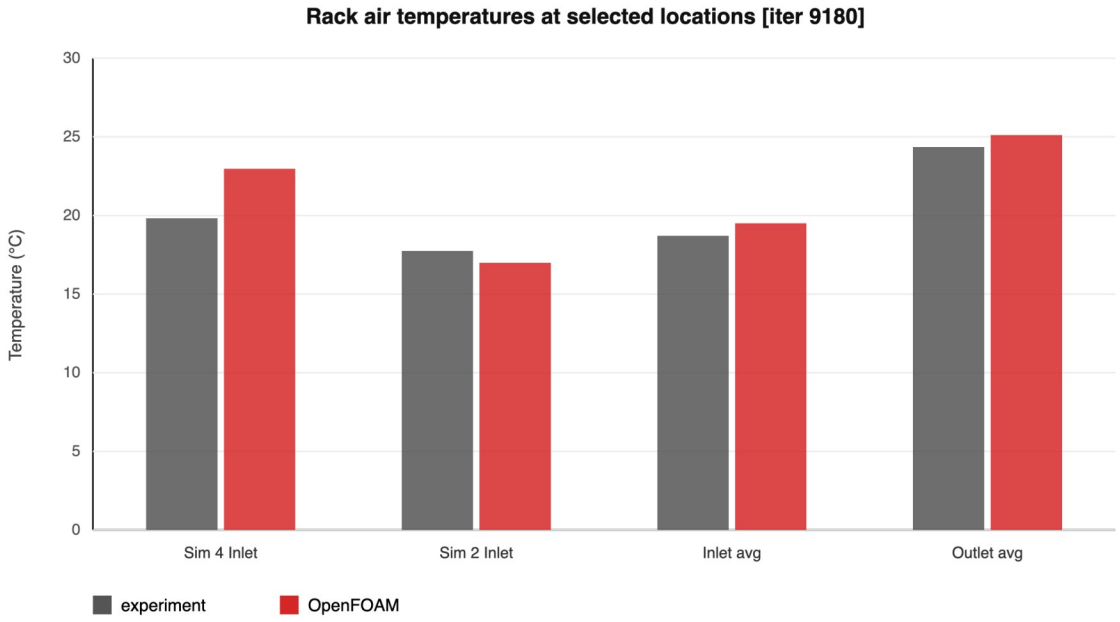
GAMBAR 6. Magnitudo kecepatan pada potongan bidang tengah melalui lorong dingin, rak, dan lorong panas.



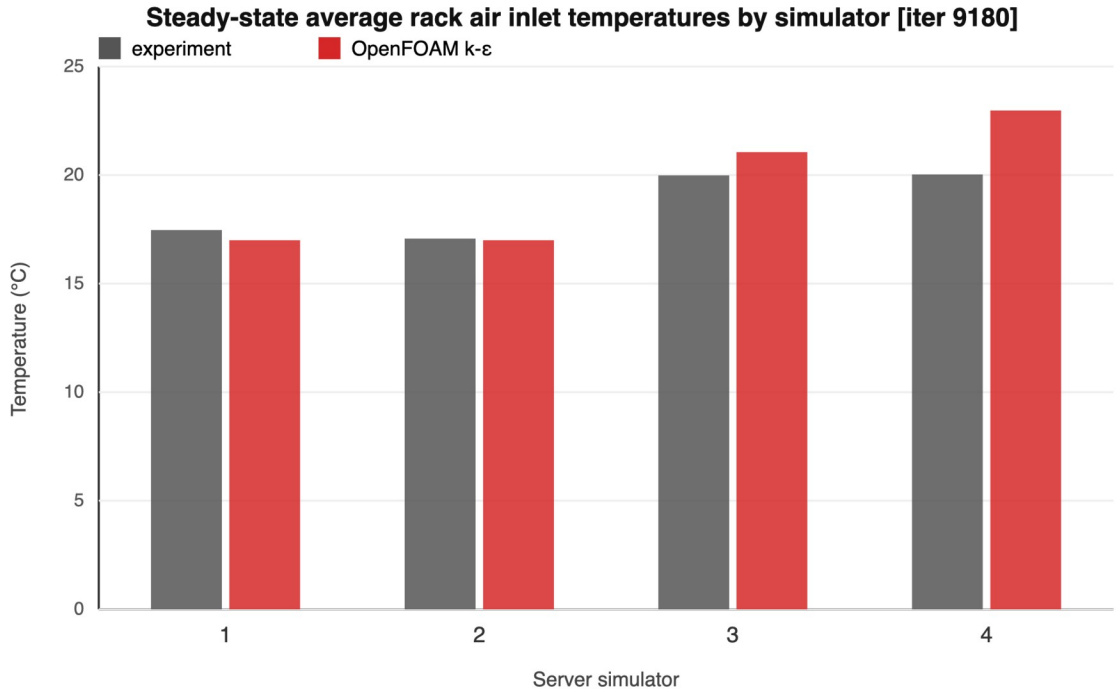
GAMBAR 7. Temperatur udara pada potongan bidang tengah melalui lorong dingin, rak, dan lorong panas.



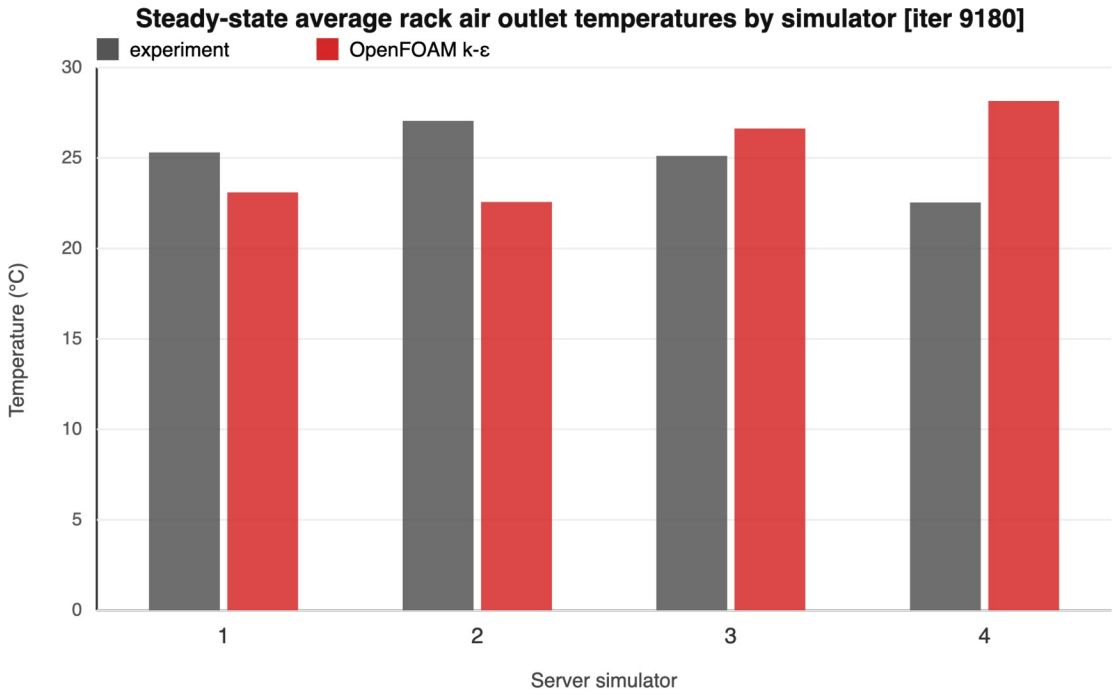
GAMBAR 8. Temperatur inlet rak lorong dingin versus tinggi (eksperimen terdigitasi vs OpenFOAM).



GAMBAR 9. Temperatur udara rak pada lokasi makalah terpilih (eksperimen vs OpenFOAM).



GAMBAR 10. Rata-rata tunak temperatur udara inlet rak per simulator server (eksperimen vs OpenFOAM).



GAMBAR 11. Rata-rata tunak temperatur udara outlet rak per simulator server (eksperimen vs OpenFOAM).

TABEL 2. Tin / Tout rak tengah CFD (°C) pada iterasi 9180

Besaran	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4
Tin	17.00	17.00	21.06	22.98
Tout	23.11	22.58	26.63	28.16

TABEL 3. Target eksperimen (°C) dari Saiyad dkk. [1]

Besaran	Sim1	Sim2	Sim3	Sim4
Tin eksp	17.48	17.07	19.99	20.04
Tout eksp	25.31	27.06	25.13	22.54

Relatif terhadap eksperimen, pada mesh halus ~2,8×10^6 sel dekat iterasi 9180, inlet rak tengah bawah (Sim1–2) tetap dekat suplai tile, sementara inlet dan outlet simulator atas kini mencapai atau melebihi beberapa puncak terukur (terutama Tout Sim4)—berbeda dengan under-prediction pemanasan atas pada mesh kasar. Rata-rata Tin rak tengah sedikit di atas eksperimen (~19,5 vs ~18,6 °C) dan rata-rata Tout dekat (~25,1 vs ~25,0 °C). Sisa sebaran titik-demi-titik konsisten dengan batas pencampuran RANS untuk k−ε standar di [1] serta celah model (RNG vs k−ε standar, kurva kipas keluar vs meanVelocityForce, tinggi domain 1,98 m vs teks 2,3 m).

4. KESIMPULAN

Rekonstruksi OpenFOAM tiga rak dari benchmark tingkat rak Saiyad dkk. telah tersedia untuk tensorDC: beban panas berpori selaras makalah, tautan overhead dingin–panas terbuka, baffle lantai antar-sim tengah, gaya kipas lokal di keluar, dan mesh heksa graded halus ~$2{,}8\times10^{6}$ sel. Kontur medan dan plot validasi pada iterasi 9180 menunjukkan penangkapan pemanasan rak atas yang lebih baik relatif terhadap grid kasar, dengan rata-rata Tout dekat eksperimen dan sisa sebaran antar-simulator. Fidelitas kurva kipas yang lebih dekat serta opsi run pendamping k−ε standar tetap berguna sebelum mengklaim penutupan kuantitatif penuh terhadap studi DES/RANS terpublikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT Tensor atas sponsor studi validasi ini dan atas kemajuan komunitas CFD melalui inisiatif tensorCFD [2]. Karya ini mencerminkan tujuan mereka menjaga templat rekayasa fidelitas tinggi tetap mudah diakses, praktis, dan siap produksi.

Dalam semangat kolaborasi sumber terbuka, struktur kasus tensorDC, 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/tensorDC.git

PUSTAKA

[1] Saiyad, A., Fulpagare, Y. & Bhargav, A. (2022). Comparison of detached eddy simulation and standard k−ε RANS model for rack-level airflow analysis inside a data center. Building Simulation, 15, 1595–1610. https://doi.org/10.1007/s12273-021-0879-3
[2] https://en.pt-tensor.com/openfoam-case-templates/
[3] Wiratama, C. (2026). Nielsen Heated-Floor Cavity CFD Simulation: OpenFOAM Validation Study. Tensor Publiser. DOI 10.13140/RG.2.2.23150.57922