Sensitivitas Mesh dan Laju Aliran Massa Penukar Panas Shell-and-Tube Segmental: Studi Validasi OpenFOAM

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

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

Abstrak. Laporan ini mendokumentasikan validasi conjugate-heat-transfer (CHT) OpenFOAM untuk penukar panas shell-and-tube berbaffle segmental skala laboratorium (SG-STHX) yang digunakan sebagai baseline produksi templat tensorSTHE. Mesh multi-region terstruktur (CFD-mesh01, ~1,45 juta sel) diselesaikan dengan chtMultiRegionSimpleFoam dan RAS kOmegaSST. Laju perpindahan panas Q dan penurunan tekanan sisi shell Δp dibandingkan hanya dengan jangkar eksperimen Zahid dkk. (Gbr. 5) pada lima laju aliran massa ṁ = 0,027–0,047 kg/s. Pada mesh menengah, galat Δp tetap sekitar 6–12% terhadap eksperimen; Q membaik dari sekitar −19% pada ṁ terendah hingga beberapa persen pada ṁ menengah/tinggi. Tangga GIT tiga tingkat dirangkum dengan perkiraan galat kasar/halus. Sensitivitas laju aliran massa mereproduksi kenaikan eksperimen Q dan Δp terhadap ṁ.

1. PENDAHULUAN

Penukar panas shell-and-tube tetap menjadi andalan perpindahan panas proses. Geometri SG-STHX skala laboratorium dengan tata letak baffle yang terdokumentasi baik menyediakan tolok ukur CHT yang ringkas dan dapat diulang: air panas di tabung, air dingin di shell, aliran berlawanan arah, dan dinding konjugat baja tahan karat. Zahid dkk. [1] mengukur perpindahan panas dan penurunan tekanan sisi shell untuk baffle segmental, tri-angular, dan tri-flower serta memvalidasi CFD terhadap metode Kern/Esso dan eksperimen. Konfigurasi segmental (SG) diadopsi di sini sebagai baseline tensorSTHE.

Validasi templat OpenFOAM untuk kasus ini penting karena menjadi elemen fondasi tensorCFD [3], inisiatif sumber terbuka PT Tensor yang bertujuan menyediakan templat simulasi kelas industri yang siap produksi. Setup tervalidasi ini dimaksudkan sebagai mesin inti tensorSTHE, templat untuk CHT shell-and-tube multi-region. Verifikasi Q dan Δp sisi shell terhadap eksperimen Zahid dkk. [1] pada sapuan laju aliran massa mendukung baseline yang andal, sadar-mesh, dan sadar-laju-aliran bagi pengembangan CFD penukar panas.

2. METODE NUMERIK

2.1 Solver dan Model Turbulensi

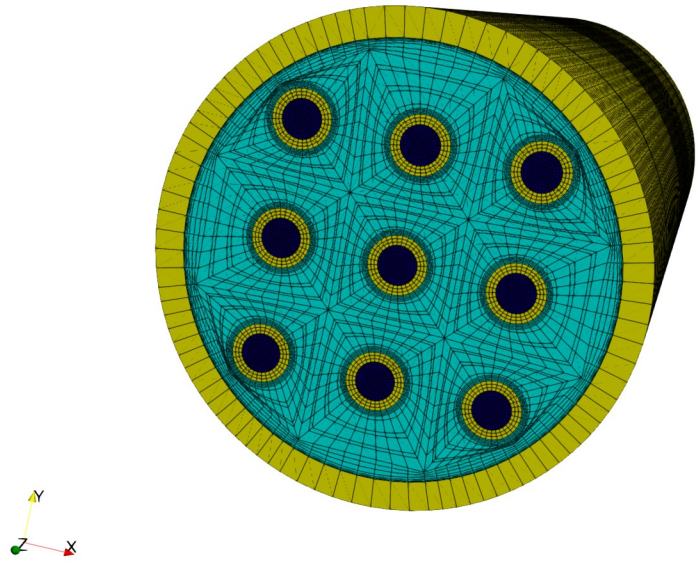
CHT multi-region tunak diselesaikan dengan chtMultiRegionSimpleFoam (OpenFOAM v2512). Region fluida memakai RAS kOmegaSST dengan fungsi dinding untuk k, ω, dan νt. Fluida kerja pada kedua sisi adalah air cair ($\rho = 998{,}2$ kg/m³, $\mu = 1{,}003\times10^{-3}$ Pa·s, Pr = 6,99). Konduktivitas termal padatan $\lambda = 15{,}2$ W/(m·K). Laju perpindahan panas memakai $Q = \dot{m}\, c_p\, (T_{in,h} - T_{out,h})$ dengan $c_p = 4182$ J/(kg·K); Δp shell adalah selisih p_rgh rata-rata muka antara inlet_cold dan outlet_cold.

2.2 Geometri dan Kondisi Batas

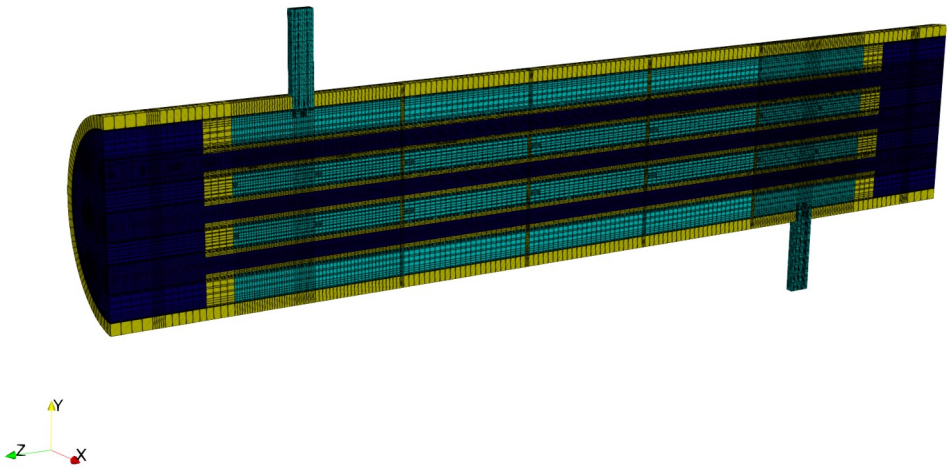
Geometri mengikuti Tabel 1 Zahid dkk. [1]: ID shell 44 mm, OD/ID tabung 6/4 mm, 9 tabung dalam bank persegi 3×3 (pitch 12 mm diasumsikan), panjang efektif tabung 186 mm, empat baffle segmental (tebal 1 mm, jarak 35,6 mm, cut 22%). Air panas di tabung, air dingin di shell, aliran berlawanan arah. Suhu inlet: $T_{in,h} = 371{,}47$ K, $T_{in,c} = 298$ K. Inlet laju aliran massa panas/dingin sama; outlet tekanan; dinding luar shell adiabatik; dinding tabung dan baffle konjugat. Nosel shell setara Ø 5,5 mm.

2.3 Pembangkitan Mesh

Mesh hex multi-region terstruktur penuh dibangkitkan dengan pembangun blockMeshDict Python: tabung O-grid, anulus iso dekat-OD, zona fluida/padatan bersamaan, dan lapisan dekat dinding bergradasi. Baseline produksi (CFD-mesh01) meliputi sekitar 1,45 juta sel (panas 492.672 / dingin 689.760 / padatan 267.504).



GAMBAR 1. Mesh multi-region terstruktur (CFD-mesh01): potongan longitudinal yang menunjukkan paket O-grid sembilan tabung, kerah shell, dan stub nosel.



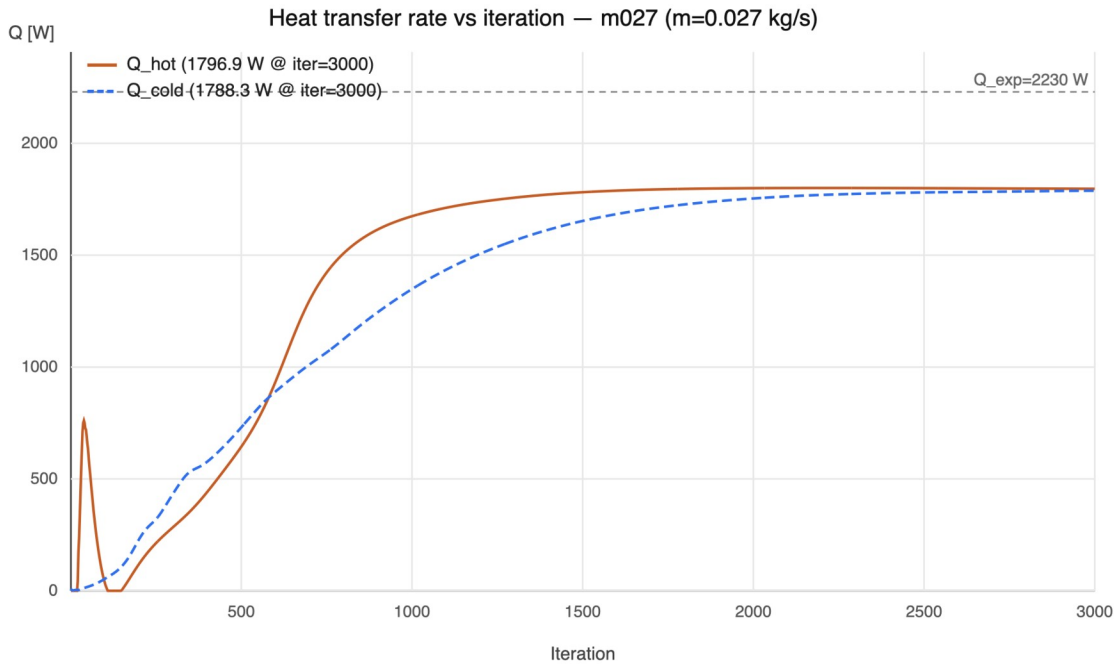
GAMBAR 2. Mesh multi-region terstruktur (CFD-mesh01): potongan melintang / samping melalui bank tabung dan baffle segmental.

TABEL 1. Setup numerik baseline (CFD-mesh01 / m027)

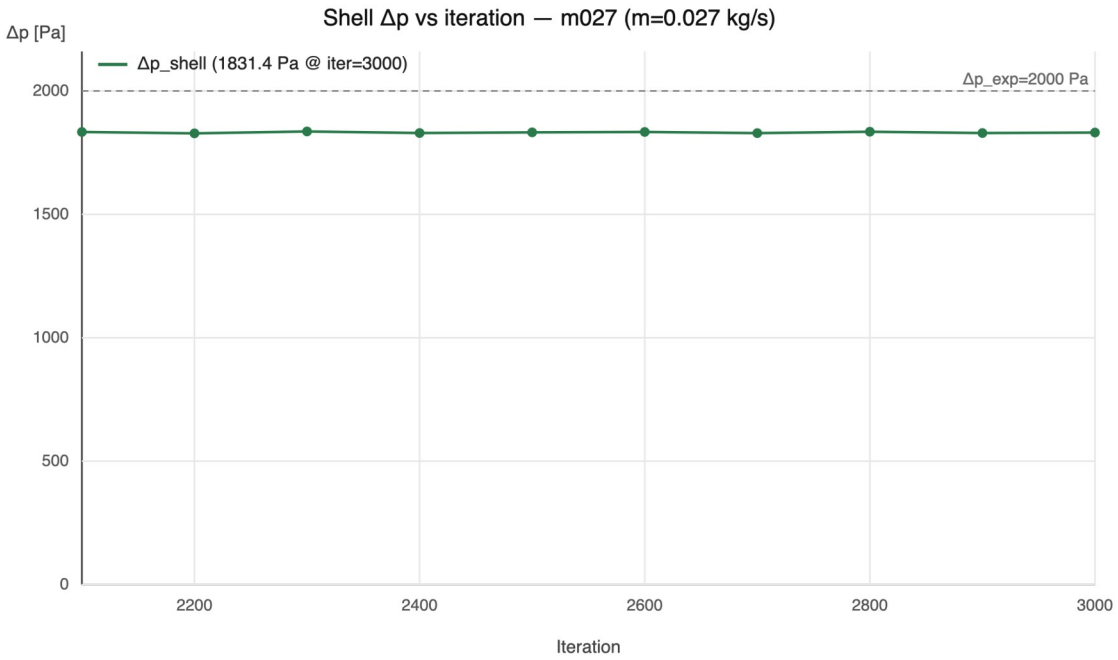
Item	Pengaturan
OpenFOAM	v2512 (opencfd/openfoam-run)
Solver	chtMultiRegionSimpleFoam (CHT tunak)
Turbulensi	RAS kOmegaSST
$\dot{m}$ baseline (panas = dingin)	0,027 kg/s
Tin,h / Tin,c	371,47 K / 298 K
λ padatan	15,2 W/(m·K)
Q / Δp eksp. pada 0,027 kg/s [1]	2230 W / 2000 Pa
Sel (panas / dingin / padatan)	492.672 / 689.760 / 267.504
Waktu akhir (iterasi)	3000

3. HASIL CFD BASELINE

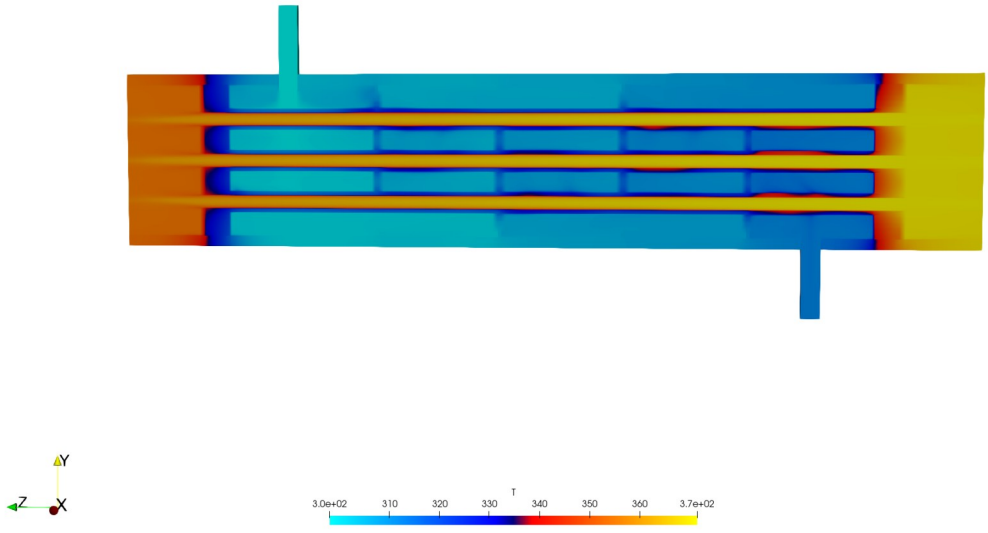
Baseline produksi pada $\dot{m}$ = 0,027 kg/s pada mesh menengah konvergen pada iterasi 3000 ke Q ≈ 1797 W dan Δp shell ≈ 1831 Pa, setara galat relatif sekitar −19,4% dan −8,4% terhadap jangkar eksperimen Gambar 5 Zahid [1]. Q panas dan dingin saling menutup dalam sekitar 0,5%. Δp shell didominasi nosel pada skala laboratorium ini.



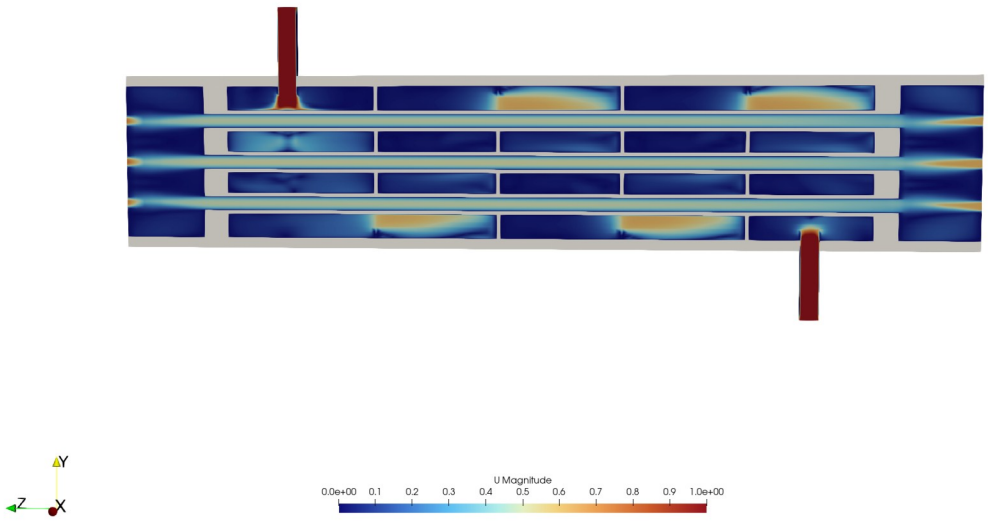
GAMBAR 3. CFD baseline: Q terhadap iterasi (m027, $\dot{m}$ = 0,027 kg/s).



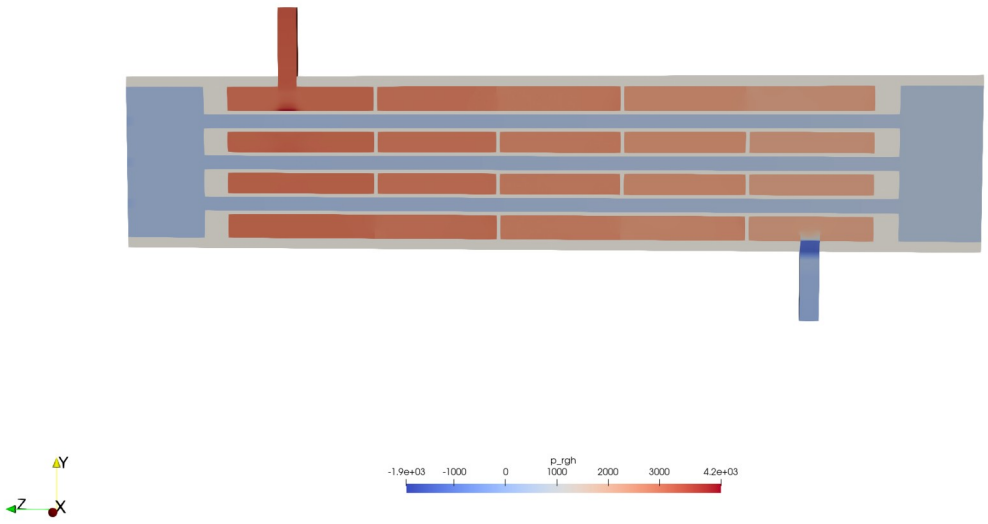
GAMBAR 4. CFD baseline: Δp shell terhadap iterasi (m027).



GAMBAR 5. Medan suhu pada potongan mid-plane longitudinal (CFD-mesh01): fluida sisi tabung panas dan sisi shell dingin dengan baffle segmental.



GAMBAR 6. Magnitudo kecepatan pada potongan mid-plane longitudinal (CFD-mesh01): jalur zigzag sisi shell dan jet nosel.



GAMBAR 7. Tekanan (p_rgh) pada potongan mid-plane longitudinal (CFD-mesh01): penurunan sisi shell didominasi nosel dan penyeberangan baffle.

4. STUDI INDEPENDENSI GRID (GIT)

Tiga kepadatan mesh dipertimbangkan untuk SG-STHX. Fisika dan kondisi batas mengikuti CFD-mesh01 pada ṁ = 0,037 kg/s (m037). Arsip hasil GIT rinci telah dihapus; galat kasar (~20%) dan halus (~4%) adalah perkiraan dari GIT/GIT-notes.md. Nilai menengah adalah hasil aktual CFD-mesh01 / m037 terhadap eksperimen.

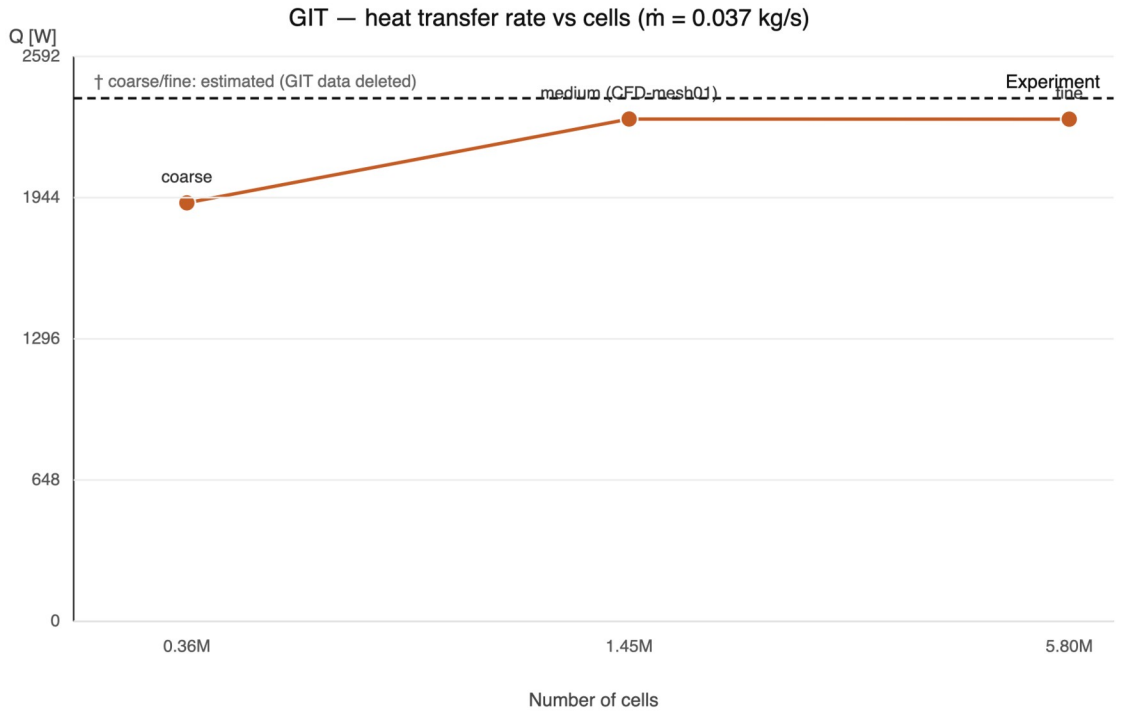
TABEL 2. Tangga mesh (CHT terstruktur)

Kasus	Peran	Sel (kira-kira)
kasar	batas bawah GIT	~0,36 juta
menengah (CFD-mesh01)	baseline produksi	1.449.936
halus	batas atas GIT	~5,8 juta

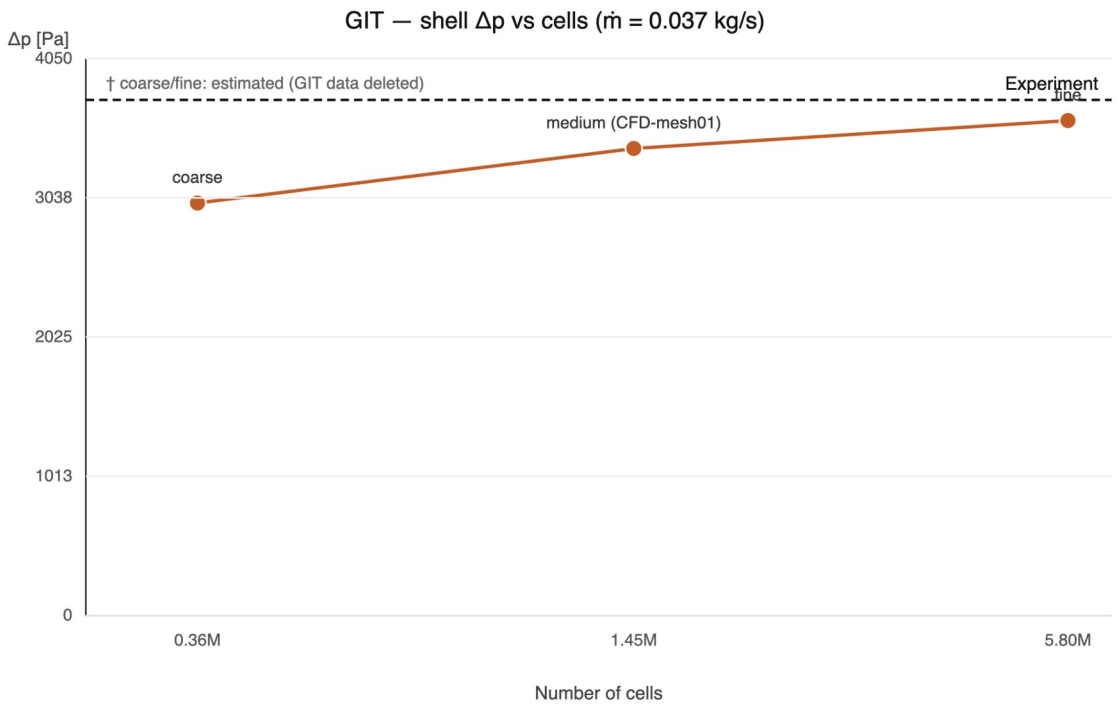
TABEL 3. GIT versus eksperimen pada ṁ = 0,037 kg/s (menengah = aktual; kasar/halus = perkiraan)

Mesh	Sel	Q [W]	Galat Q %	Δp [Pa]	Galat Δp %
kasar†	~360.000	~1920	≈ −20%	~3000	≈ −20%
menengah	1.449.936	2304,7	−4,0%	3396,8	−9,4%
halus†	~5.800.000	~2304	≈ −4%	~3600	≈ −4%

Mesh menengah dipertahankan sebagai grid produksi praktis: pada ṁ menengah 0,037 kg/s, Q sudah dalam sekitar 4% dari eksperimen dan Δp shell dalam sekitar 10%. Perkiraan mesh halus menyarankan penghalusan lebih lanjut terutama memperketat Δp. Q pada ṁ rendah tetap lebih menuntut (lihat §5).



GAMBAR 8. Q terhadap jumlah sel (GIT), Q eksperimen = 2400 W [1] pada ṁ = 0,037 kg/s. Titik kasar/halus diperkirakan.



GAMBAR 9. Δp terhadap jumlah sel (GIT), Δp eksperimen = 3750 Pa [1] pada ṁ = 0,037 kg/s. Titik kasar/halus diperkirakan.

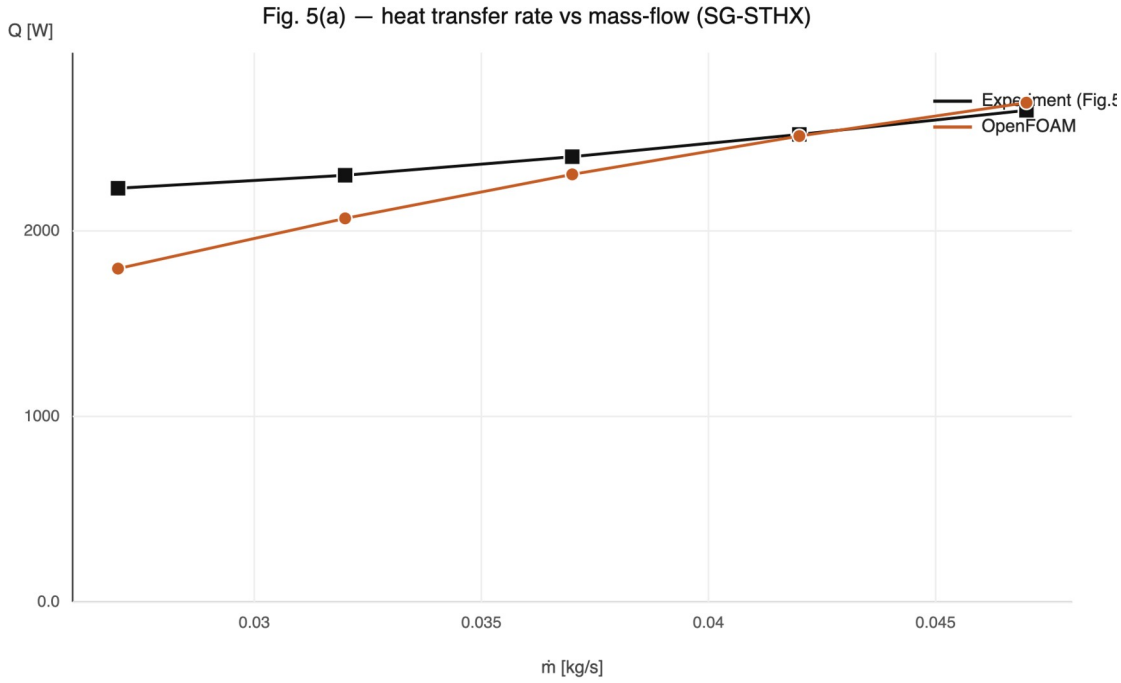
5. SENSITIVITAS LAJU ALIRAN MASSA

Dengan mesh menengah, laju aliran massa tabung dan shell ditetapkan ke 0,027, 0,032, 0,037, 0,042, dan 0,047 kg/s (kasus m027–m047), sesuai laju aliran inlet pada [1]. Suhu inlet dijaga tetap. Acuan eksperimen Q dan Δp didigitasi dari Gambar 5 Zahid dkk. [1]. Validasi membandingkan eksperimen versus OpenFOAM saja.

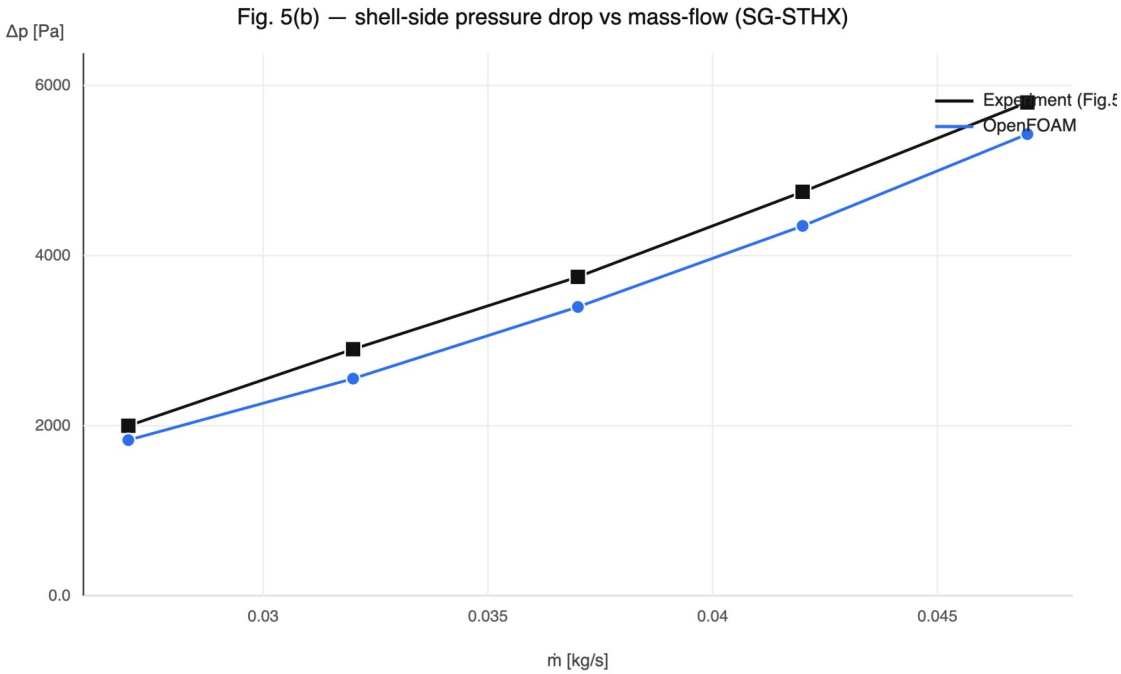
TABEL 4. Sensitivitas laju aliran massa: OpenFOAM versus eksperimen (iterasi 3000)

Kasus	ṁ	Q	Q_eksp	Galat Q %	Δp	Δp_eksp	Galat Δp %
m027	0,027	1796,9	2230	−19,4%	1831,4	2000	−8,4%
m032	0,032	2067,6	2300	−10,1%	2554,2	2900	−11,9%
m037	0,037	2304,7	2400	−4,0%	3396,8	3750	−9,4%
m042	0,042	2511,3	2520	−0,3%	4349,0	4750	−8,4%
m047	0,047	2691,3	2650	+1,6%	5428,0	5800	−6,4%

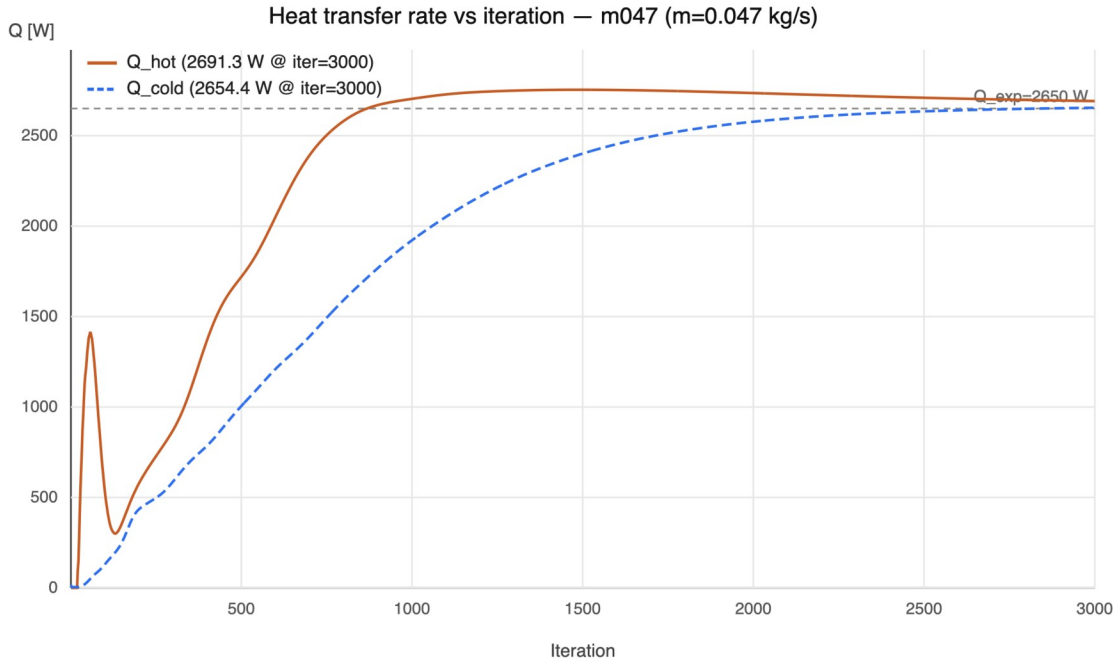
CFD mereproduksi kenaikan monoton Q dan Δp terhadap ṁ. Kesepakatan Q paling lemah pada aliran terendah dan menjadi sangat baik pada ṁ menengah/tinggi (−4% hingga +2%). Δp shell tetap dalam sekitar 6–12% dari eksperimen di seluruh sapuan.



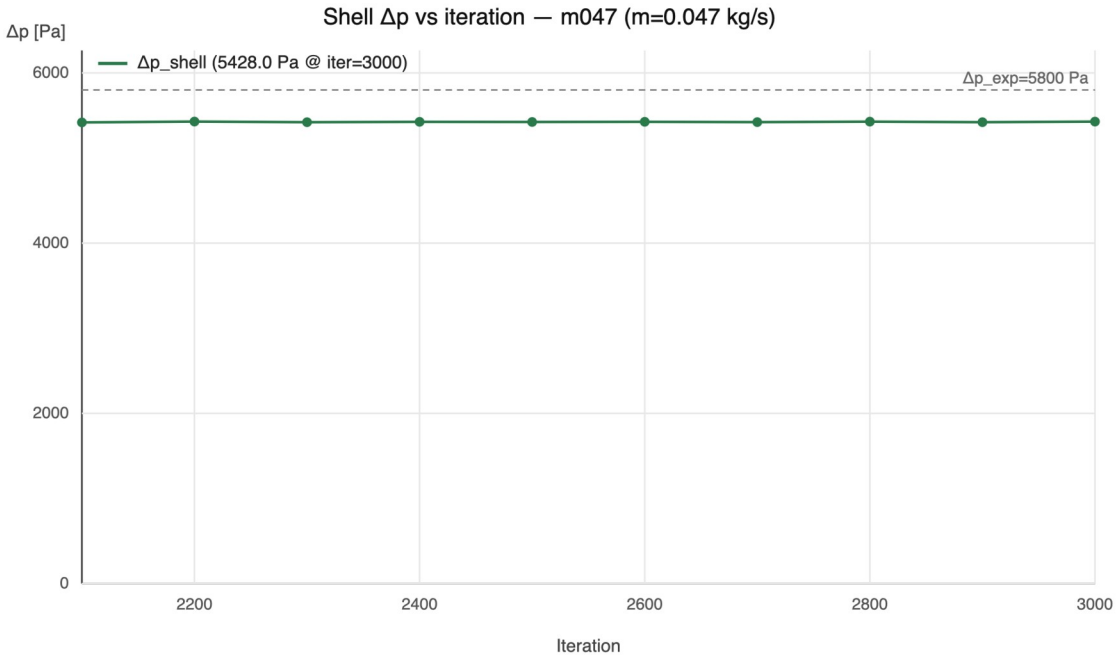
GAMBAR 10. Laju perpindahan panas terhadap laju aliran massa: OpenFOAM versus eksperimen [1].



GAMBAR 11. Penurunan tekanan sisi shell terhadap laju aliran massa: OpenFOAM versus eksperimen [1].



GAMBAR 12. Kasus aliran tinggi m047 (ṁ = 0,047 kg/s): Q terhadap iterasi.



GAMBAR 13. Kasus aliran tinggi m047: Δp shell terhadap iterasi.

6. KESIMPULAN

Studi ini menetapkan dan memvalidasi alur kerja CHT multi-region OpenFOAM v2512 untuk SG-STHX laboratorium terhadap Q dan Δp shell eksperimen dari Zahid dkk. [1]. Mesh terstruktur menengah (CFD-mesh01, ~1,45 juta sel) dengan kOmegaSST menyediakan baseline produksi praktis untuk templat tensorSTHE: galat Δp shell sekitar 6–12% pada $\dot{m}$ = 0,027–0,047 kg/s, dan galat Q dari sekitar −19% pada $\dot{m}$ terendah hingga beberapa persen pada $\dot{m}$ menengah/tinggi.

Arsip GIT untuk mesh terstruktur lebih kasar/lebih halus tidak disimpan; perkiraan galat (~20% kasar, ~4% halus pada 0,037 kg/s) menyarankan penghalusan lebih lanjut masih dapat memperketat Δp, sementara mesh menengah saat ini sudah mencocokkan Q rentang menengah dengan baik. Sapuan laju aliran massa mereproduksi tren eksperimen Q($\dot{m}$) dan Δp($\dot{m}$), mendukung tensorSTHE sebagai templat CHT yang sadar-mesh dan sadar-laju-aliran.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

Dalam semangat kolaborasi sumber terbuka, struktur kasus tensorSTHE, skrip mesh, dan alat pasca-pemrosesan dikembangkan di bawah program templat OpenFOAM PT Tensor. Anda juga dapat mengakses case folder dari pekerjaan ini di GitHub: https://github.com/pt-tensor/STHE-validation-study.git

PUSTAKA

1. Zahid, H. B., Mubashar, A., Waqas, M., Siddiqi, M. H., Munir, U., & Naqvi, S. M. A. (2023). Experimental and CFD Simulation Study of Shell and Tube Heat Exchangers with Different Baffle Segment Configurations. Thermal Science, 27(1B), 843–853.
2. Naqvi, S. M. A., Elfeky, K. E., Cao, Y., & Wang, Q. (2019). Numerical analysis on performances of shell side in segmental baffles, helical baffles and novel clamping anti-vibration baffles with square twisted tubes shell and tube heat exchangers. Energy Procedia, 158, 5770–5775.
3. PT Tensor. OpenFOAM case templates / tensorCFD. https://en.pt-tensor.com/openfoam-case-templates/