Simulasi CFD–CHT Pendinginan Casing Elektronik Tipis: 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 validasi OpenFOAM untuk perpindahan panas konjugat (CHT) aliran paksa dan pemanasan paket pada benchmark casing elektronik tipis Hatakeyama, yang dipakai sebagai baseline produksi templat tensorECool. Aliran dan perpindahan panas multi-region tunak diselesaikan dengan chtMultiRegionSimpleFoam dan RAS kOmegaSST untuk tiga lokasi inlet (Xin = 100, 130, 150 mm). Geometri, beban panas volumetrik (2,6 W), dan stasiun PIV mengikuti Hatakeyama dkk. Validasi berfokus pada profil garis kecepatan arah aliran Uy(x) pada Z = 7 mm terhadap penanda eksperimen terdigitasi. Kenaikan temperatur paket serta medan temperatur solid/fluida disajikan untuk menggambarkan distribusi termal; galat temperatur kuantitatif terhadap eksperimen tidak dibahas karena data termal terpublikasi tidak memadai untuk penilaian titik-demi-titik yang kokoh dalam rekonstruksi ini.

1. PENDAHULUAN

Casing tipis berpendingin udara untuk elektronik menggabungkan inlet samping dengan tumpukan PBGA/PCB terpanas, cerobong outlet, dan dinding samping akrilik. Bangku uji Hatakeyama [1] menyediakan geometri yang ringkas dan terdokumentasi baik dengan profil kecepatan arah aliran PIV pada lima stasiun streamwise serta kenaikan temperatur paket terukur untuk tiga posisi inlet.

Validasi templat OpenFOAM CHT untuk kasus ini penting karena menjadi elemen fondasi tensorCFD [2], inisiatif sumber terbuka PT Tensor yang bertujuan menyediakan templat simulasi siap produksi bertaraf industri. Setup tervalidasi dimaksudkan sebagai mesin inti tensorECool. Verifikasi profil garis kecepatan terhadap eksperimen, bersama mesh multi-region dan medan termal yang konsisten, mendukung baseline andal untuk pengembangan CFD pendinginan elektronik.

2. METODE NUMERIK

2.1 Solver dan Model Turbulensi

Perpindahan panas konjugat tunak diselesaikan dengan chtMultiRegionSimpleFoam (OpenFOAM v2512). Udara diperlakukan dengan buoyancy Boussinesq; turbulensi memakai RAS kOmegaSST. Perlakuan dinding menggunakan fungsi dinding kontinyu di sisi fluida; antarmuka fluida–solid terkopel memakai compressible::turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed. Sifat udara: rho0 = 1,2 kg/m3, mu = 1,8e-05 Pa·s, Pr = 0,7, T0 = 300 K. Konduktivitas PCB anisotropik kappa = (2, 2, 0,35) W/m/K; mold PBGA k = 1 W/m/K dengan panas volumetrik Q = 2,6 W dalam paket.

Metode numerik: linearUpwind terbatas untuk U dan h, upwind untuk k dan omega, gradien cell-limited, SIMPLE klasik, GAMG untuk p_rgh, under-relaxation p_rgh = 0,3, U = 0,3, h = 0,75, k,omega = 0,3. Kasus dijalankan hingga 4.000 iterasi SIMPLE dengan penulisan medan setiap 100 iterasi.

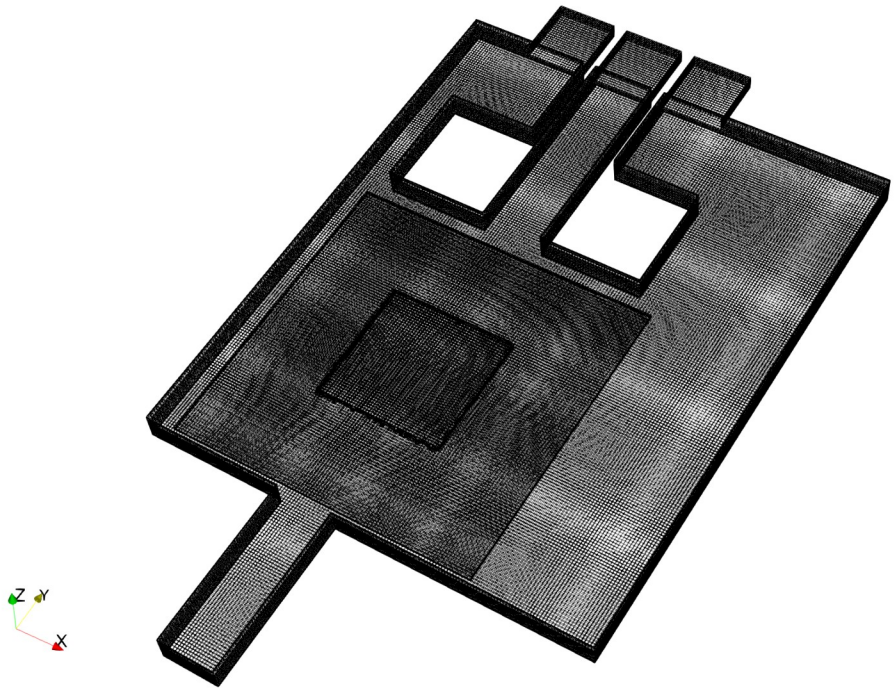
2.2 Geometri dan Kondisi Batas

Geometri mengikuti Hatakeyama dkk. [1]: cangkang akrilik luar 200 x 257 x 30 mm; rongga dalam 120 x 235 x 10 mm. Saluran inlet samping 20 x 10 mm dengan Vin seragam = 2,82 m/s (Qin = 5,64e-4 m3/s). Tiga outlet atas identik, masing-masing lebar 22 mm dalam x, dengan protrusi cerobong 22 mm dalam +y dan slot Z 2,5 mm dinding + 5 mm bukaan + 2,5

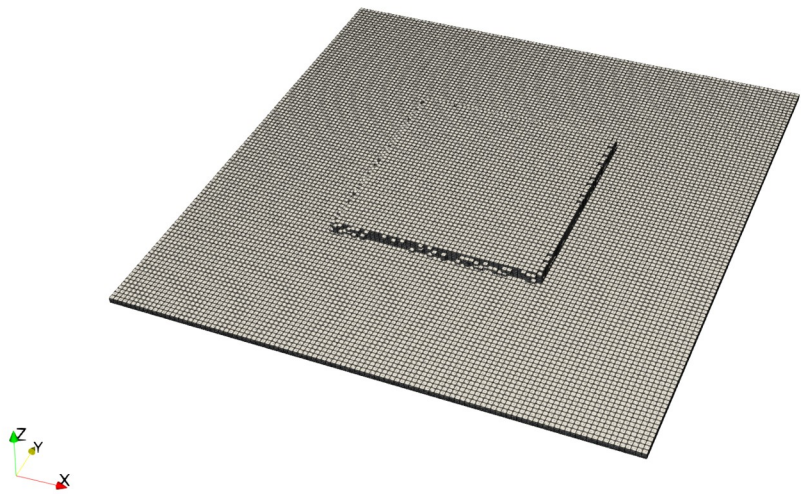
mm dinding. Pulau berbentuk L memisahkan outlet (jari 5 mm). PCB 110 x 110 x 1,2 mm dan PBGA 45 x 45 x 2,5 mm berpusat di (0,100, 0,100) m. Wajah luar +X (side_posX) memakai slip; dummy polistirena kiri tetap ada. Lokasi inlet Xin menggeser saluran 20 mm: Xin = 100, 130, 150 mm.

2.3 Pembangkitan Mesh

Mesh hex terstruktur dibangkitkan dengan blockMesh (1 mm in-plane), slab-z sejajar PCB (1,2 mm), puncak PBGA (3,7 mm), dan bidang outlet pada 2,5 / 7,5 mm, lalu solid dummy dihapus dengan topoSet/subsetMesh dan region dipisah untuk fluida / PCB / PBGA. Jumlah sel fluida sekitar 715k (Xin100/130) dan 756k (Xin150); PCB ≈ 48k sel; PBGA ≈ 12k sel.



GAMBAR 1. Mesh multi-region terstruktur casing tipis Hatakeyama: tampilan domain penuh.



GAMBAR 2. Region solid PCB dan PBGA di dalam mesh rongga.

TABEL 1. Setup numerik baseline (Xin100)

Item	**Pengaturan**
OpenFOAM	v2512 (opencfd/openfoam-run)
Solver	chtMultiRegionSimpleFoam (steady, Boussinesq air)
Turbulence	RAS kOmegaSST
Inlet Vin / T0	2.82 m/s / 300 K (uniform)
Heat load	2.6 W (PBGA volumetric)
PCB kappa	(2, 2, 0.35) W/m/K
Fluid cells (Xin100)	≈ 715,000
End time (iterations)	4,000

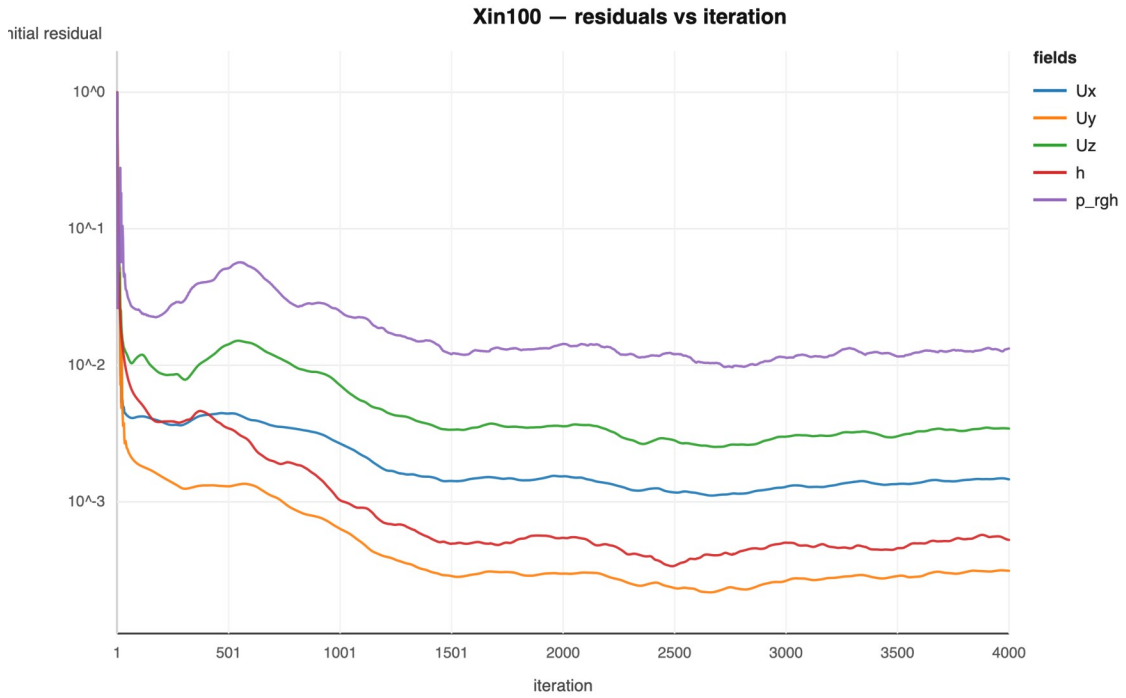
3. VALIDASI DISTRIBUSI KECEPATAN

Validasi membandingkan kecepatan arah aliran OpenFOAM Uy(x) pada Z = 7 mm dengan penanda PIV terdigitasi dari Hatakeyama Gambar 6 [1] pada Y = 60, 80, 100, 120, 140 mm (X = 40–160 mm). Profil dilaporkan untuk ketiga lokasi inlet setelah 4.000 iterasi.

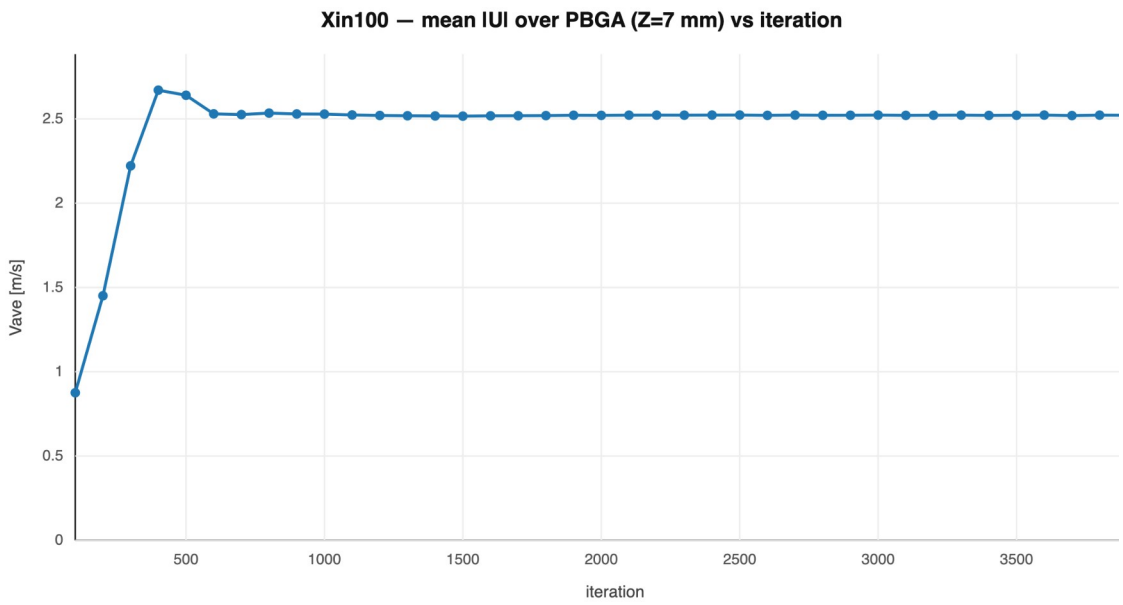
TABEL 2. RMSE profil kecepatan vs PIV terdigitasi (m/s); CFD diinterpolasi ke X eksperimen

Y [mm]	Xin100	Xin130	Xin150
60	0.311	0.319	0.600
80	0.357	0.287	0.527
100	0.422	0.383	0.438
120	0.417	0.431	0.391
140	0.435	0.412	0.376

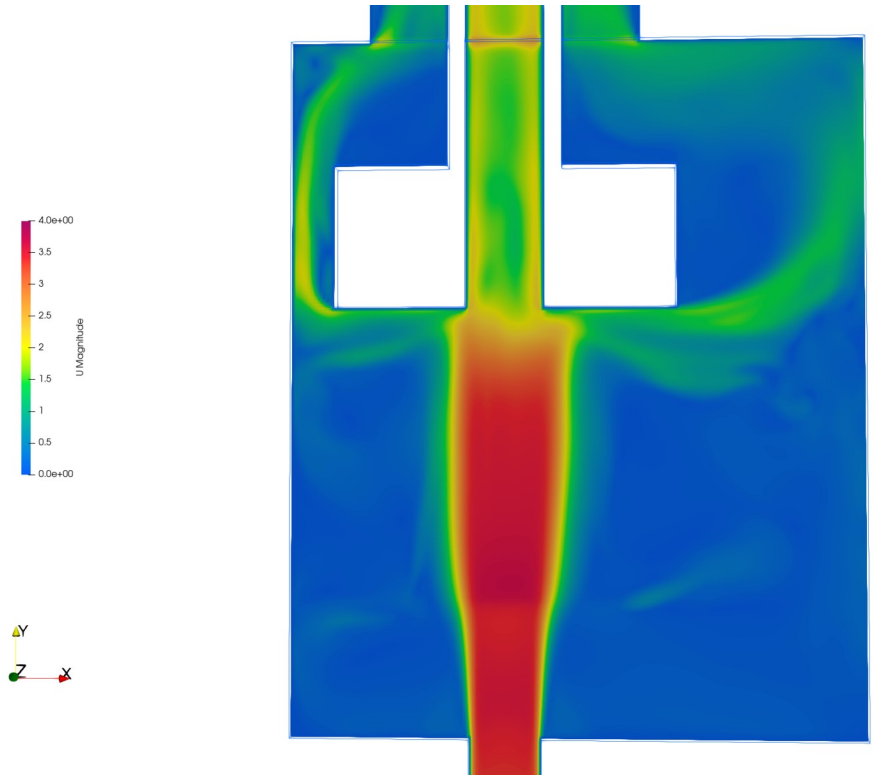
3.1 Xin = 100 mm



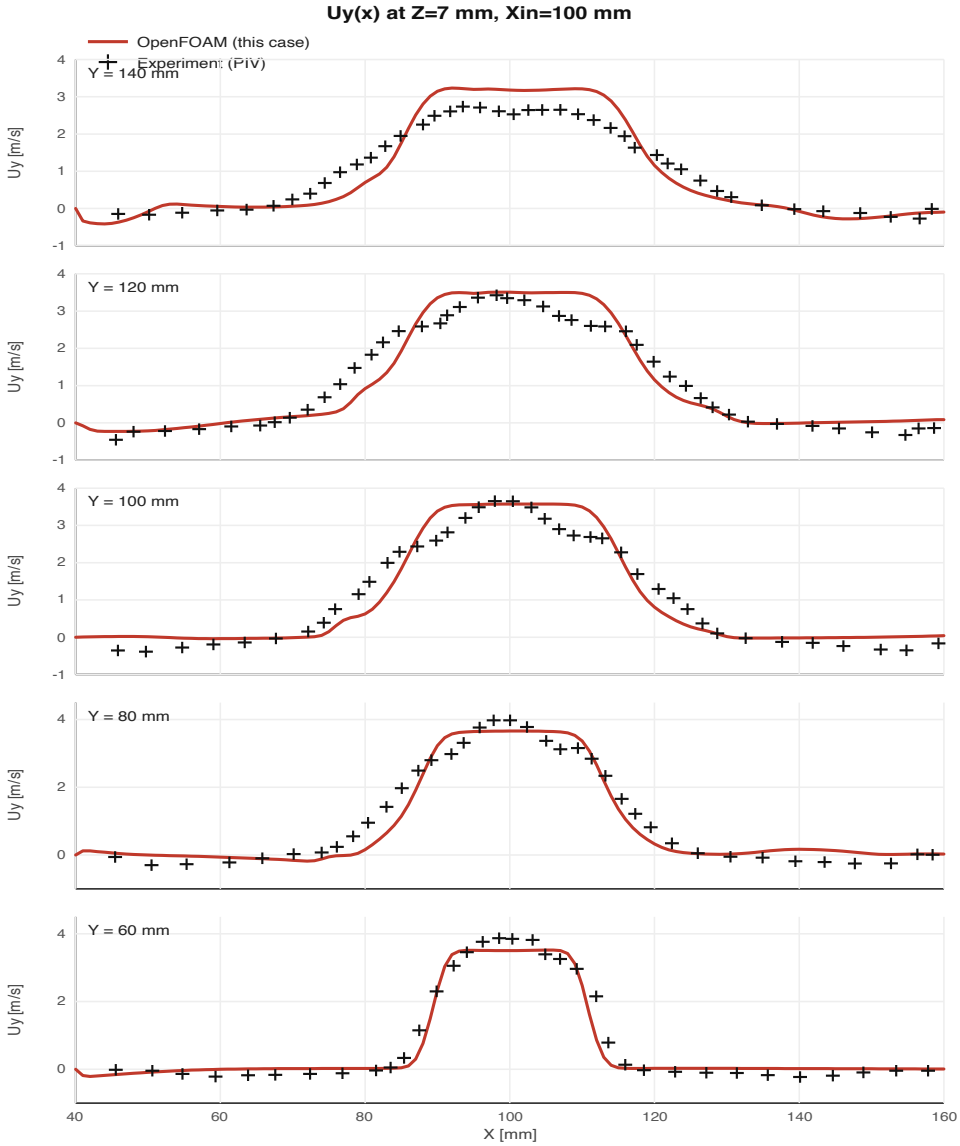
GAMBAR 3. Riwayat residual (Xin100).



GAMBAR 4. Riwayat kecepatan rata-rata domain (Xin100).



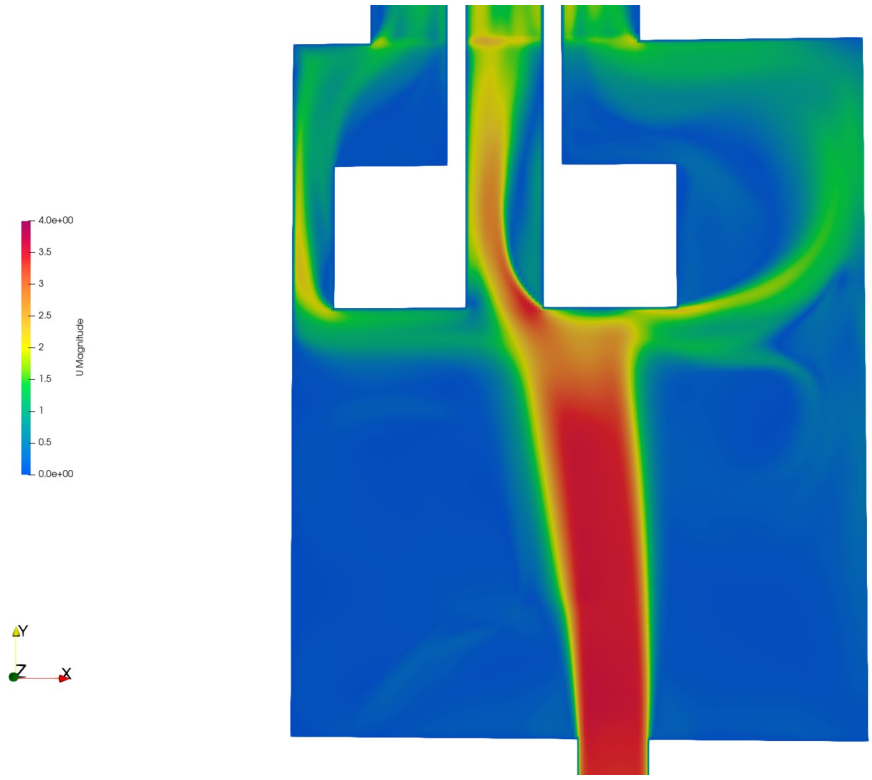
GAMBAR 5. Magnitudo kecepatan mid-plane (Xin100): inlet samping, wake paket, dan aliran keluar cerobong.



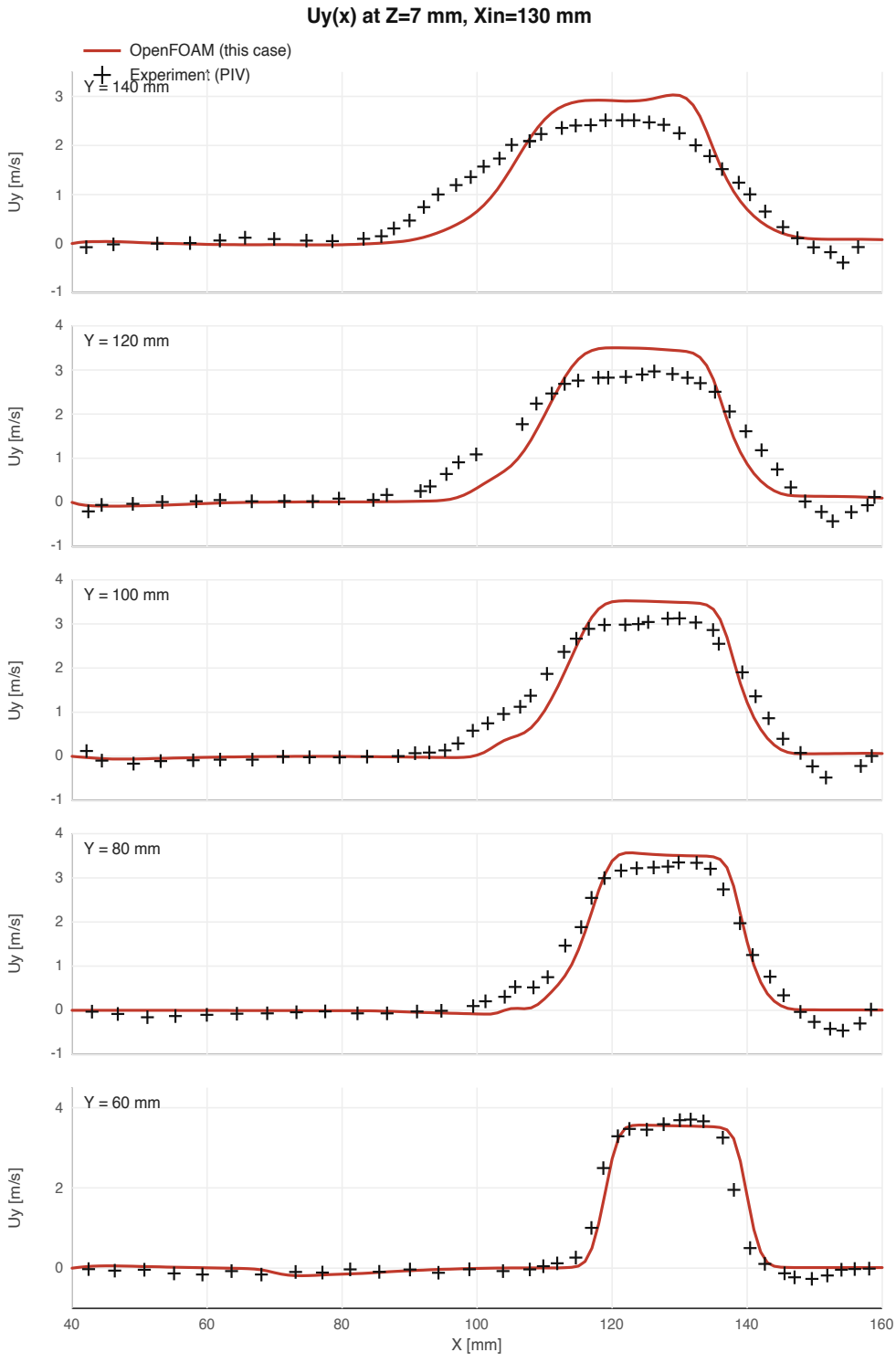
GAMBAR 6. Uy(x) arah aliran pada Z = 7 mm (Xin100): OpenFOAM versus PIV terdigitasi [1]. Stasiun Y = 140 (atas) hingga Y = 60 mm (bawah).

Medan kecepatan mid-plane menunjukkan jet inlet samping, akselerasi di atas paket, dan aliran keluar menuju tiga slot cerobong. Profil Uy(x) bertumpuk merekam inti jet eksperimen dan resirkulasi samping pada Y = 60–100 mm. Stasiun hilir (Y = 120–140 mm) masih sedikit lebih puncak relatif terhadap PIV—konsisten dengan pencampuran lateral yang under-prediksi di wake paket pada RANS tunak—namun topologi keseluruhan jet–wake–outlet sesuai eksperimen.

3.2 Xin = 130 mm



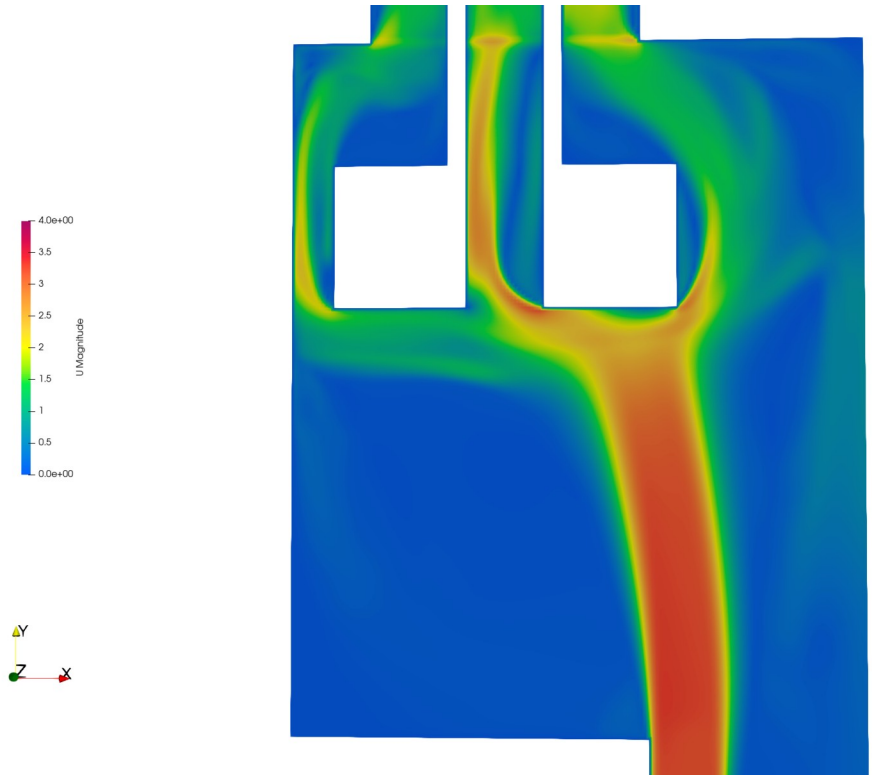
GAMBAR 7. Magnitudo kecepatan mid-plane (Xin130).



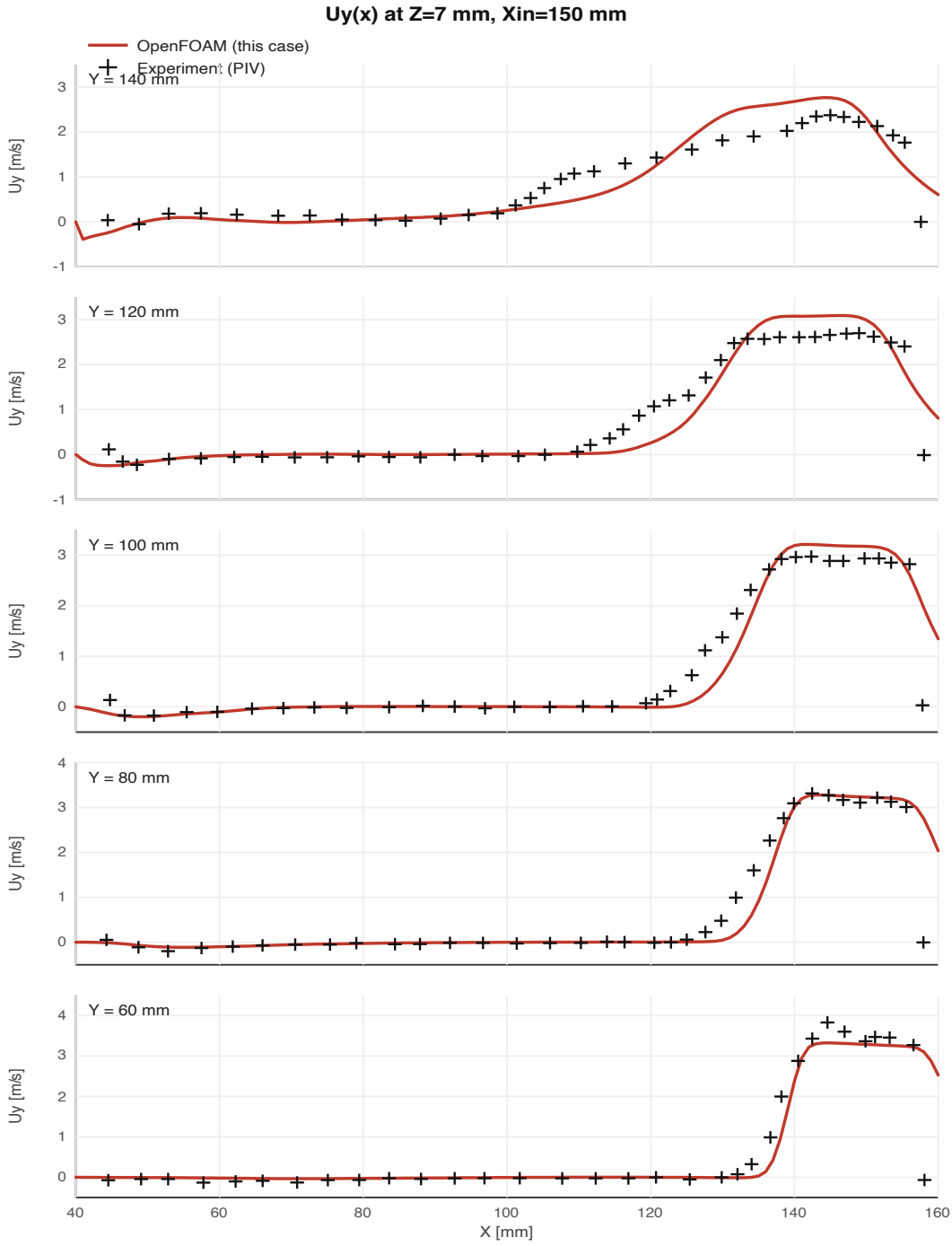
GAMBAR 8. Uy(x) arah aliran pada Z = 7 mm (Xin130): OpenFOAM versus PIV terdigitasi [1].

Menggeser inlet ke Xin = 130 mm memindahkan inti berkecepatan tinggi dan mengubah interaksi jet dengan paket serta pulau-L. Overlay profil merekam evolusi streamwise Uy dengan nilai RMSE bermagnitudo serupa Xin100 pada stasiun tengah dan jauh (Tabel 2).

3.3 Xin = 150 mm



GAMBAR 9. Magnitudo kecepatan mid-plane (Xin150).

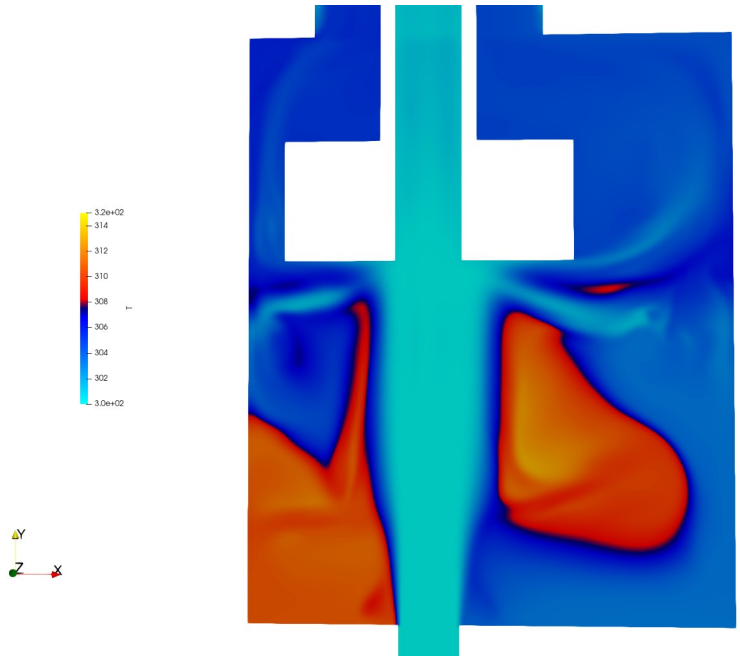


GAMBAR 10. Uy(x) arah aliran pada Z = 7 mm (Xin150): OpenFOAM versus PIV terdigitasi [1].

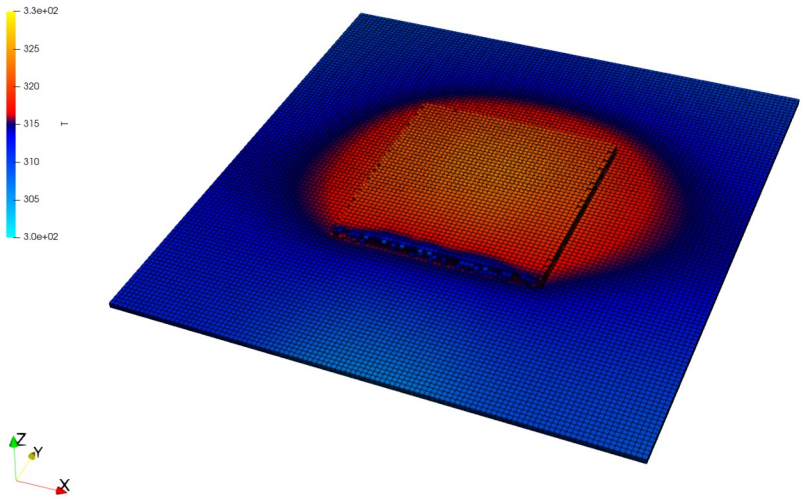
Pada Xin = 150 mm saluran lebih dekat ke dinding +X. Stasiun dekat-inlet menunjukkan RMSE lokal lebih besar di mana garis sampel memotong gradien spanwise yang lebih curam; stasiun tengah dan jauh tetap sebanding dengan kasus Xin lainnya.

4. DISTRIBUSI TEMPERATUR

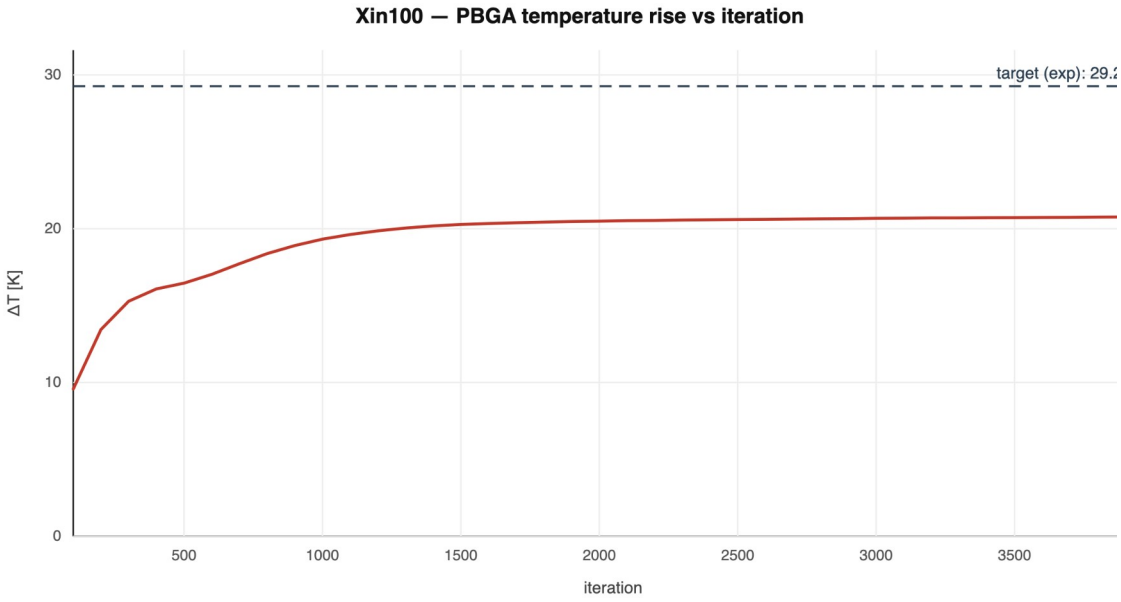
Perpindahan panas konjugat menghasilkan paket PBGA panas, konduksi lateral ke PCB anisotropik, dan pendinginan konvektif oleh jet udara. Medan temperatur fluida mid-plane dan temperatur solid untuk Xin100/130/150 menggambarkan plume termal serta respons terhadap lokasi inlet: posisi inlet yang lebih jauh mengurangi pendinginan lokal di atas paket dan menaikkan temperatur paket.



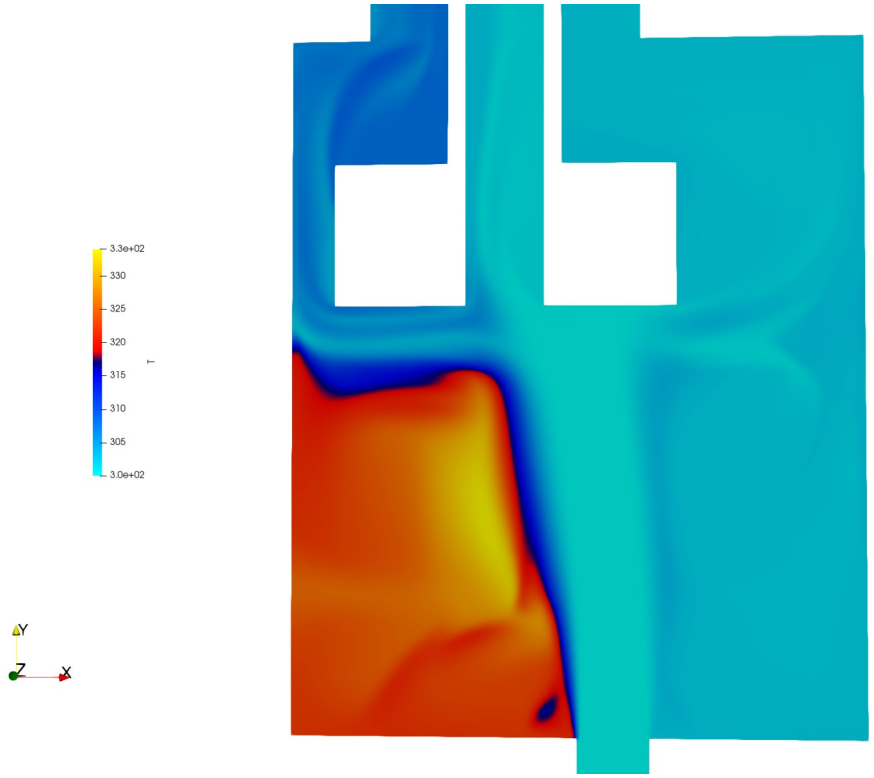
GAMBAR 11. Temperatur fluida mid-plane (Xin100).



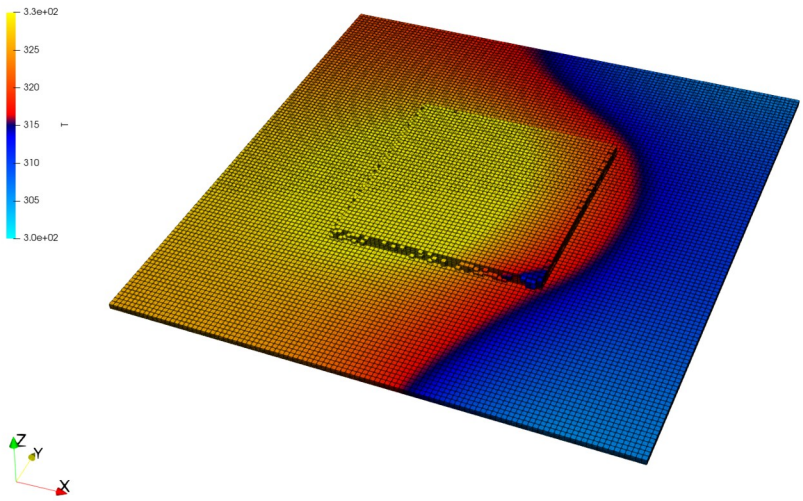
GAMBAR 12. Temperatur solid PCB / PBGA (Xin100).



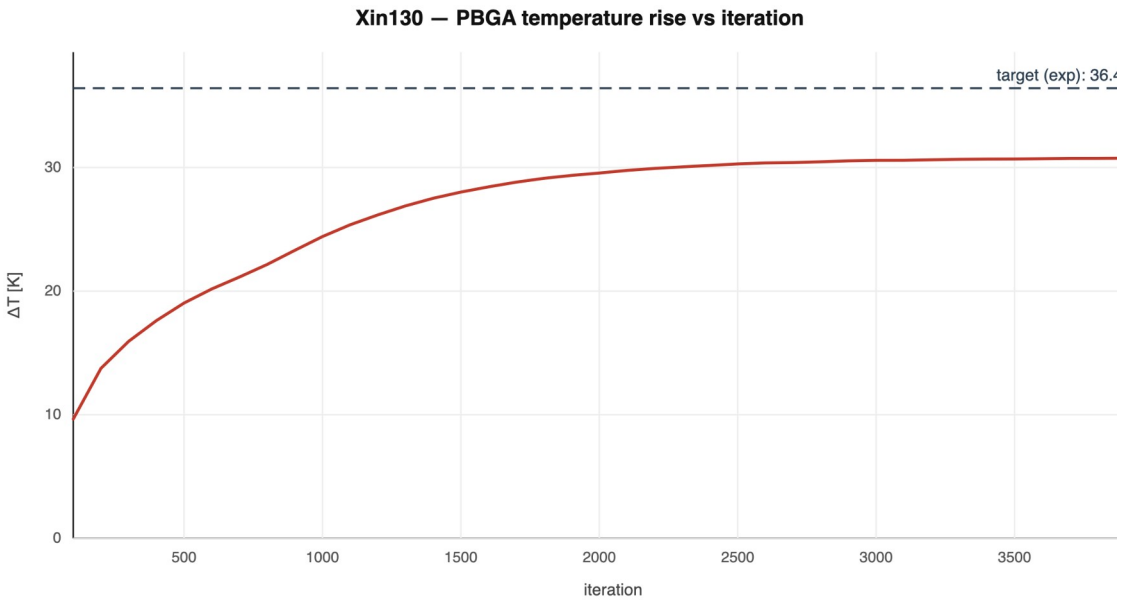
GAMBAR 13. Riwayat kenaikan temperatur paket DeltaT = TPBGA,avg − Tinlet (Xin100).



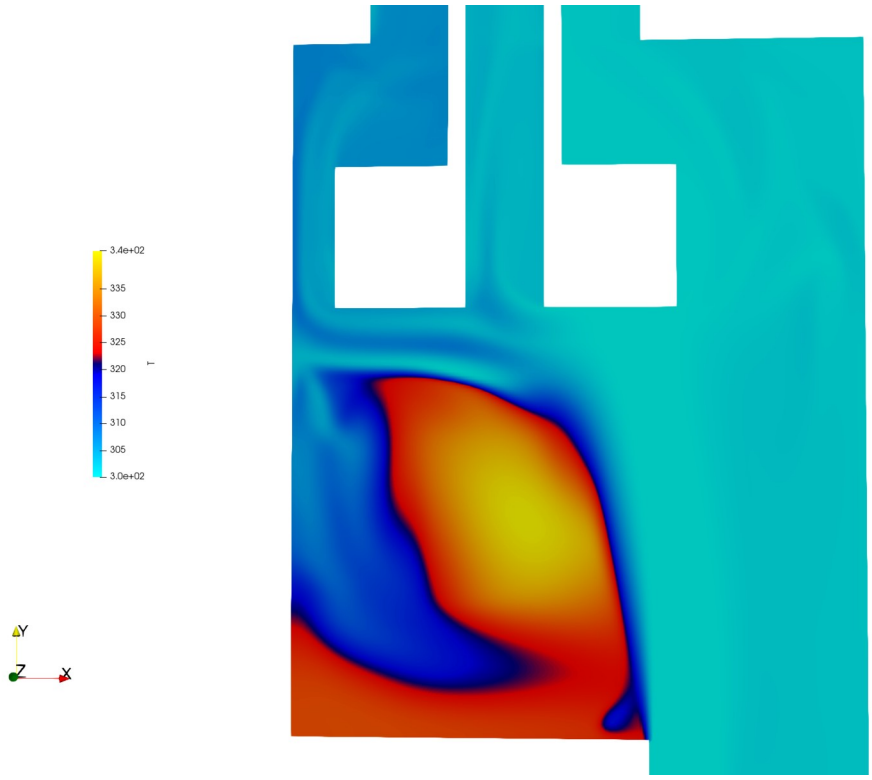
GAMBAR 14. Temperatur fluida mid-plane (Xin130).



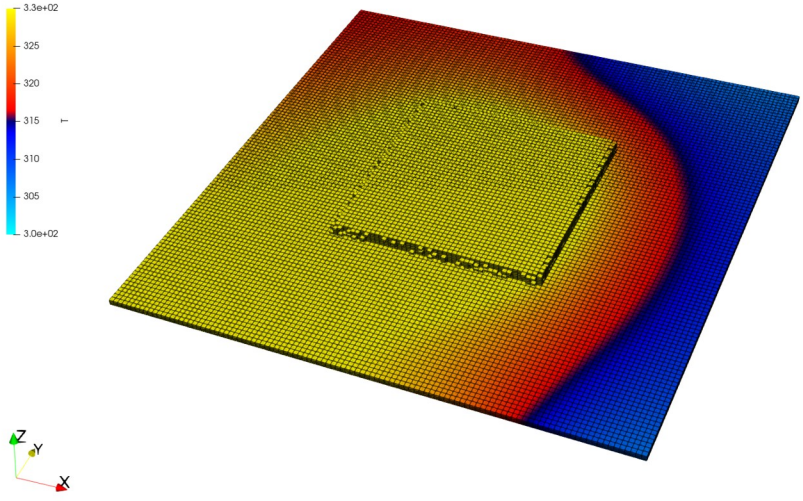
GAMBAR 15. Temperatur solid PCB / PBGA (Xin130).



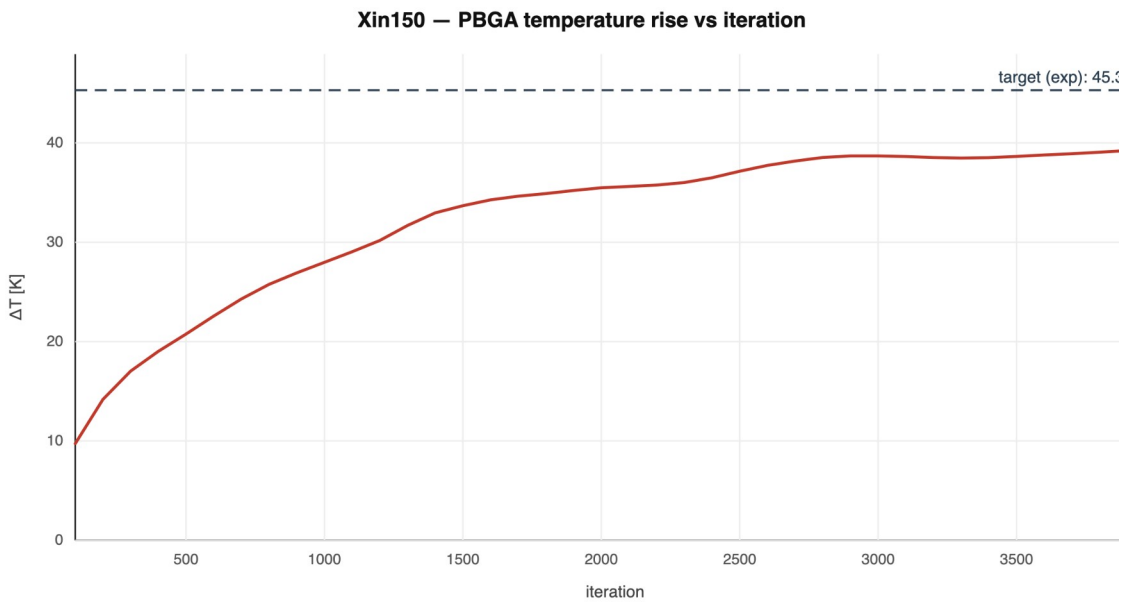
GAMBAR 16. Riwayat kenaikan temperatur paket (Xin130).



GAMBAR 17. Temperatur fluida mid-plane (Xin150).



GAMBAR 18. Temperatur solid PCB / PBGA (Xin150).



GAMBAR 19. Riwayat kenaikan temperatur paket (Xin150).

Kenaikan temperatur paket didefinisikan sebagai DeltaT = TPBGA,avg − Tinlet. Riwayat DeltaT menegaskan bahwa medan termal menuju mantap selama beberapa ribu iterasi SIMPLE untuk setiap kasus Xin. Pembahasan galat temperatur kuantitatif yang rinci terhadap kenaikan paket terpublikasi dihilangkan di sini karena informasi termal eksperimental dari makalah tidak memadai untuk validasi spasial yang kokoh, sebanding dengan dataset kecepatan PIV.

5. KESIMPULAN

Studi ini menetapkan dan memvalidasi alur kerja CHT OpenFOAM v2512 untuk casing elektronik tipis Hatakeyama terhadap profil kecepatan arah aliran PIV terdigitasi pada lima stasiun untuk Xin = 100, 130, dan 150 mm [1]. Dengan kOmegaSST, inlet seragam, outlet selaras Gambar 2 (bukaan 22 mm, jari 5 mm, slot Z 5 mm), dan konduktivitas PCB anisotropik, CFD merekam struktur kecepatan esensial jet, wake, dan cerobong. Sisa perbedaan terutama berupa under-spreading wake pada Y = 120–140 mm, tipikal pencampuran RANS tunak. Medan temperatur dan riwayat DeltaT mendokumentasikan respons termal konjugat yang konsisten; metrik galat temperatur tidak ditekankan menunggu data termal eksperimen yang lebih kaya. Suite tiga inlet menyediakan baseline produksi praktis untuk templat tensorElectronicCooling.

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 tensorECool, 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/tensorECool.git.

PUSTAKA

1. Hatakeyama, T., Ishizuka, M., Kibushi, R., & Nakagawa, S. (2012). A test bench for validation of CFD analysis for air flow in thin electronic casing model. Journal of Physics: Conference Series, 395, 012024. DOI: 10.1088/1742-6596/395/1/012024.

2. PT Tensor. OpenFOAM case templates / tensorCFD. https://en.pt-tensor.com/openfoam-case-templates/