Studi Validasi OpenFOAM Ahmed Bluff Body: Kajian Sensitivitas Mesh dan Bilangan Reynolds

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

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

Abstrak. Laporan ini mendokumentasikan validasi OpenFOAM untuk Ahmed bluff body klasik dengan sudut slant 25°. Baseline produksi (CFD) ditetapkan pada $U\infty$ = 40 m/s, diikuti kajian independensi grid bertingkat tiga (GIT) dan analisis sensitivitas bilangan Reynolds pada tiga titik. Koefisien gaya Cd dan Cl dibandingkan dengan target eksperimen (Cd = 0.299, Cl = 0.345 pada Re $2{,}78\times10^{6}$). Mesh menengah (~0,70 juta sel) menghasilkan kesalahan Cd dan Cl masing-masing sekitar 1% dan 2% terhadap eksperimen. Mesh halus menunjukkan konvergensi tunak Cl yang belum lengkap. Sapuan bilangan Reynolds pada mesh menengah mereproduksi penurunan Cd yang ringan terhadap Re, sesuai tren yang diharapkan.

1. PENDAHULUAN

Ahmed body [1] adalah model kendaraan geometris yang disederhanakan dan banyak diakui sebagai tolok ukur dalam aerodinamika otomotif untuk mereplikasi karakteristik aliran udara mobil penumpang. Dikembangkan oleh S.R. Ahmed, G. Ramm, dan G. Faltin pada 1984, benda tumpul generik ini memiliki bagian belakang miring yang tajam sehingga memicu struktur aliran tiga dimensi yang kompleks, termasuk separasi aliran yang masif serta vorteks trailing yang sangat sensitif.

Validasi templat OpenFOAM untuk kasus ini penting karena menjadi elemen fondasi tensorCFD [4], inisiatif sumber terbuka PT Tensor yang bertujuan menyediakan templat simulasi kelas industri yang siap produksi. Secara khusus, setup tervalidasi ini akan menjadi mesin inti tensorXFV, templat khusus untuk mengevaluasi aliran eksternal kendaraan jalan raya. Karena sudut slant 25° menciptakan rezim aliran yang sangat tidak stabil di dekat ambang aerodinamik kritis, verifikasi ketat templat OpenFOAM ini terhadap data eksperimen tepercaya [2, 3] memastikan bahwa tensorXFV memberikan baseline yang andal, independen terhadap mesh, dan akurat terhadap bilangan Reynolds bagi pengembangan otomotif komersial.

2. METODE NUMERIK

2.1 Solver dan Model Turbulensi

RANS tunak tak-mampat diselesaikan dengan simpleFoam menggunakan algoritma SIMPLE konsisten. Penutupan turbulensi adalah kOmegaSST. Viskositas kinematik $\nu = 1{,}5\times10^{-5}$ m²/s. Koefisien gaya menggunakan Aref = 0,115032 m², lRef = 0,470 m, dan massa jenis aliran bebas $\rho\infty = 1$ (konvensi tak-mampat).

2.2 Geometri dan Kondisi Batas

STL Ahmed body 25° menempati domain $x \in [-5, 15]$, $y \in [-4, 4]$, $z \in [0, 8]$ m. Kecepatan inlet seragam $U\infty$; tekanan outlet tetap; dinding bawah adalah ground bergerak pada kecepatan aliran bebas; dinding atas dan samping slip; permukaan benda no-slip. Intensitas turbulensi inlet sekitar 1%, dengan penskalaan $k \propto U\infty^2$ dan $\omega \propto U\infty$ ketika Re diubah.

2.3 Pembuatan Mesh

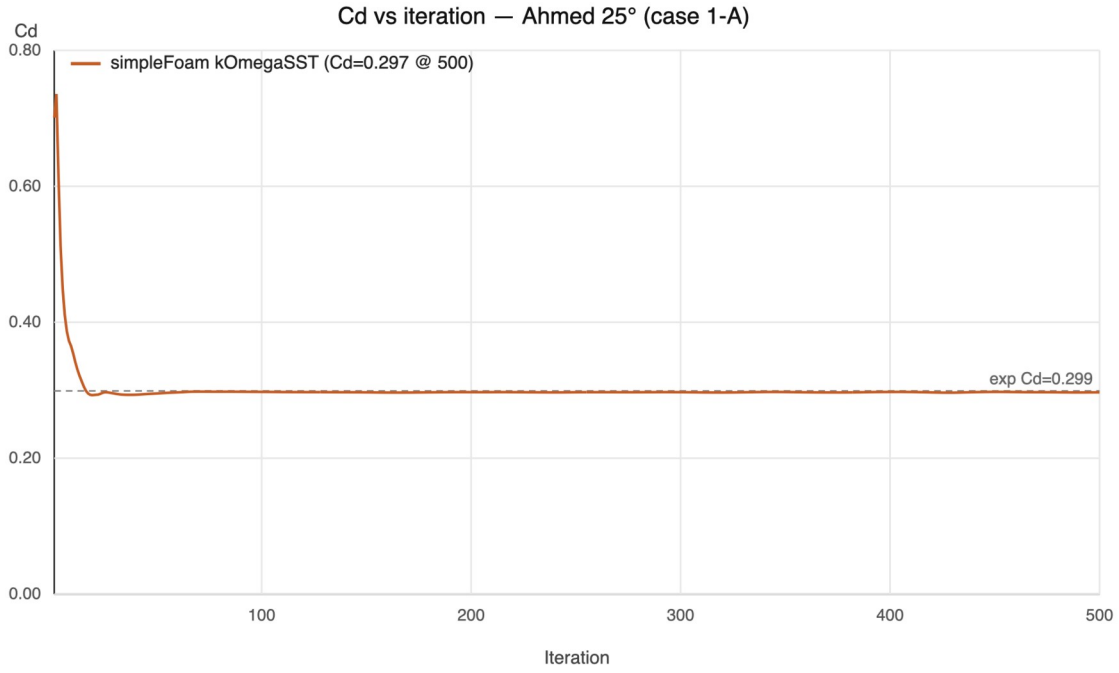
Grid latar dihasilkan dengan blockMesh dan mesh hex-dominan yang mengikuti tubuh dengan snappyHexMesh (castellate, snap, layers). Tepi fitur diekstraksi dengan surfaceFeatureExtract. Meshing paralel memakai delapan rank (hierarchical 4×2×1). Baseline (mesh02 / CFD) memiliki sekitar 695.463 sel setelah penambahan layer.

TABEL 1. Setup numerik baseline

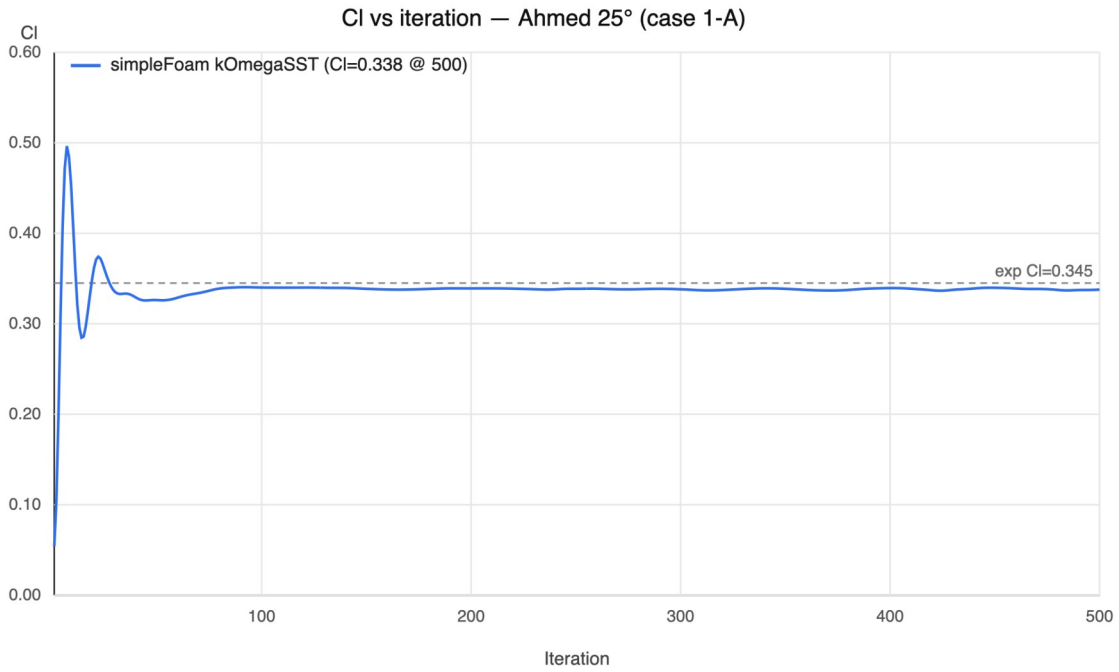
Item	Pengaturan
OpenFOAM	v2406 / host eksekusi v2512
Solver	simpleFoam (RANS tunak)
Turbulensi	RAS kOmegaSST
U∞ (baseline)	40 m/s
Re_L = U∞ L / ν, L = 1,044 m	$2{,}78\times10^{6}$
ν	$1{,}5\times10^{-5}$ m²/s
Cd / Cl eksperimen (Re $2{,}78\times10^{6}$)	0,299 / 0,345
Dekomposisi	8 rank, hierarchical (4 2 1)
End time (iterasi)	500

3. HASIL CFD BASELINE

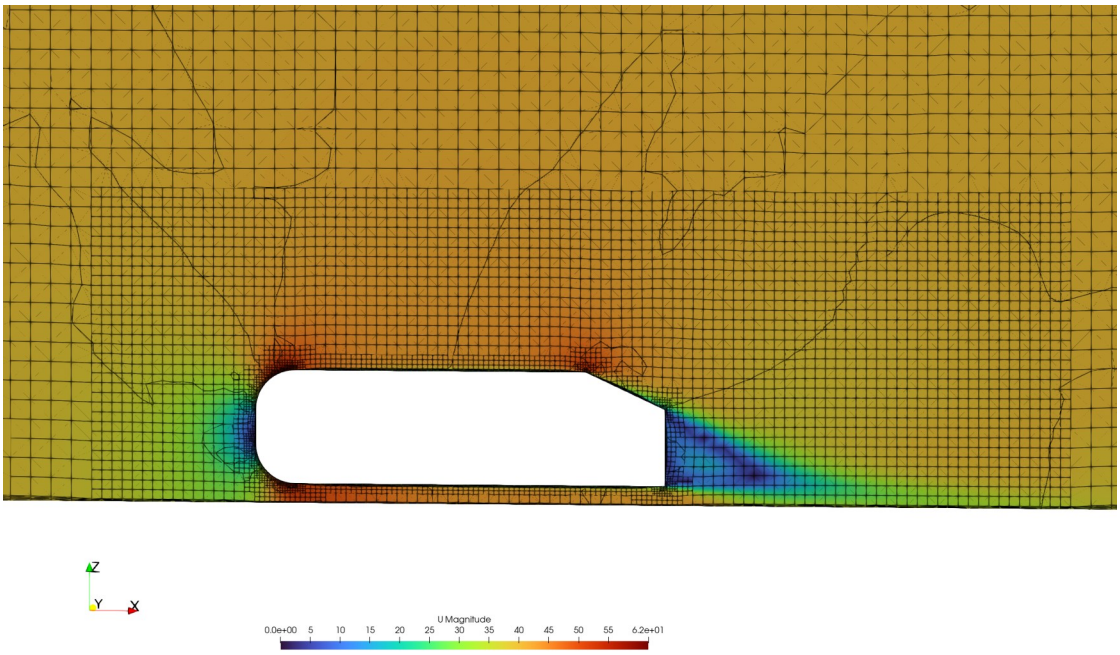
Baseline produksi pada U∞ = 40 m/s dengan mesh menengah konvergen ke Cd ≈ 0,2971 dan Cl ≈ 0,3381 (rerata 200 iterasi terakhir), setara kesalahan relatif sekitar −0,65% dan −2,0% terhadap eksperimen.



GAMBAR 1. CFD baseline: Cd terhadap iterasi (U∞ = 40 m/s).



GAMBAR 2. CFD baseline: Cl terhadap iterasi (U∞ = 40 m/s).



GAMBAR 3. Magnitudo kecepatan baseline pada bidang simetri (mesh02 / CFD, U∞ = 40 m/s).

4. STUDI INDEPENDENSI GRID (GIT)

Tiga mesh dibangun dengan mengubah resolusi latar, penghalusan permukaan/fitur, kotak volume, dan layer prisma. Fisika dan kondisi batas sama dengan baseline CFD. mesh02_medium secara intent identik dengan CFD (~0,70 juta sel).

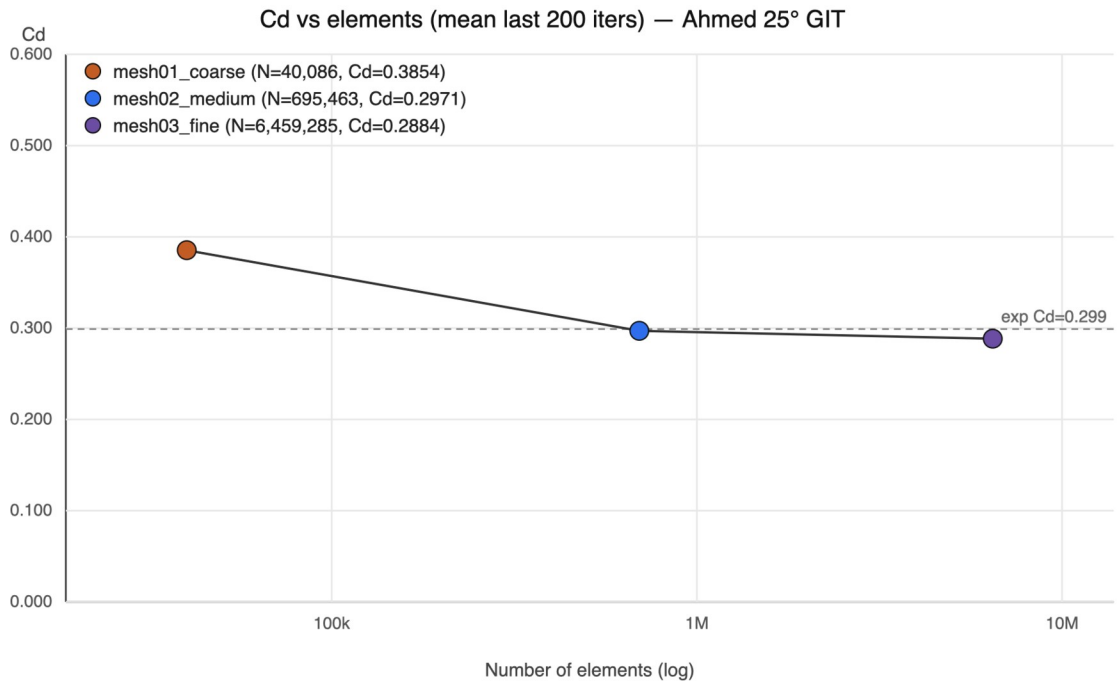
TABEL 2. Pengaturan tangga mesh

Kasus	blockMesh	Level permukaan	Kotak volume	Layer tubuh	Sel
mesh01_coarse	(16 8 8)	(4 5)	2 / 3 / 4	6	40.086
mesh02_medium	(24 10 10)	(5 6)	3 / 4 / 5	10	695.463
mesh03_fine	(36 14 14)	(6 7)	4 / 5 / 6	12	6.459.285

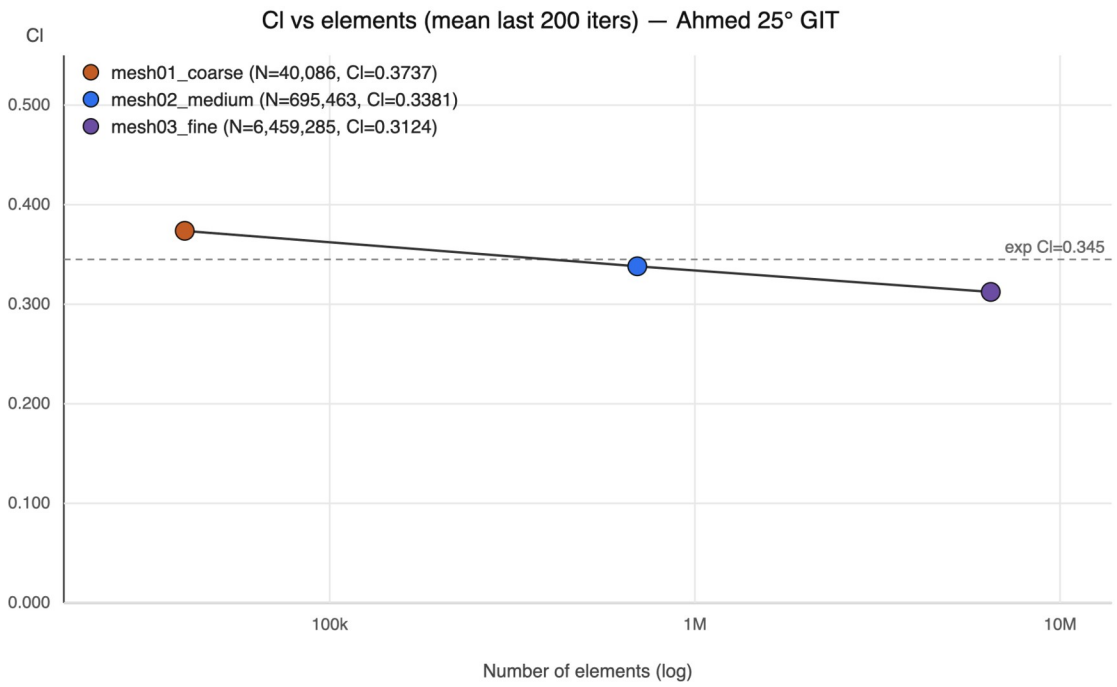
TABEL 3. Hasil GIT terhadap eksperimen (rerata 200 iterasi terakhir untuk mengakomodasi data transien)

Mesh	Sel	Cd	Cd err %	Cl	Cl err %
mesh01_coarse	40.086	0,3854	+28,90%	0,3737	+8,33%
mesh02_medium	695.463	0,2971	−0,65%	0,3381	−1,99%
mesh03_fine	6.459.285	0,2884	−3,54%	0,3124	−9,46%

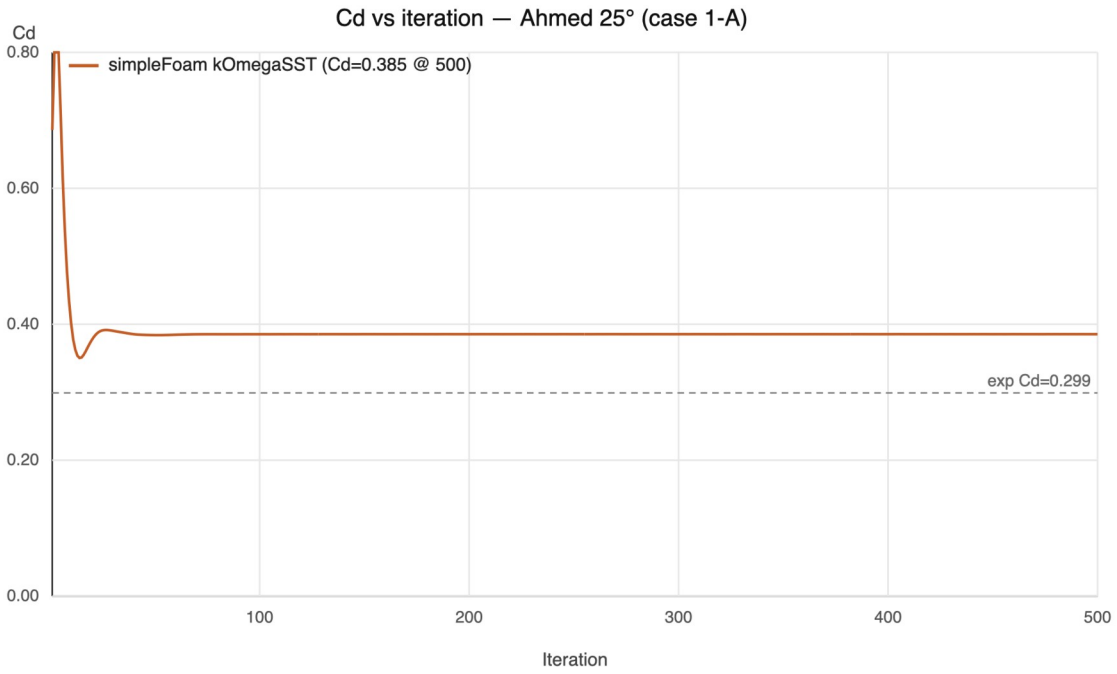
Mesh kasar memprediksi drag terlalu tinggi secara substansial. Mesh menengah paling dekat dengan eksperimen. Mesh halus tidak memperbaiki kesepakatan Cl: Cl menunjukkan osilasi limit-cycle yang besar pada 100 iterasi terakhir (rentang ≈ 0,16), sehingga rerata RANS tunak bukan jawaban tunak yang sepenuhnya terkonvergensi. Grid yang lebih halus mengurangi disipasi numerik dan menyingkap ketidakmantapan intrinsik wake Ahmed 25°.



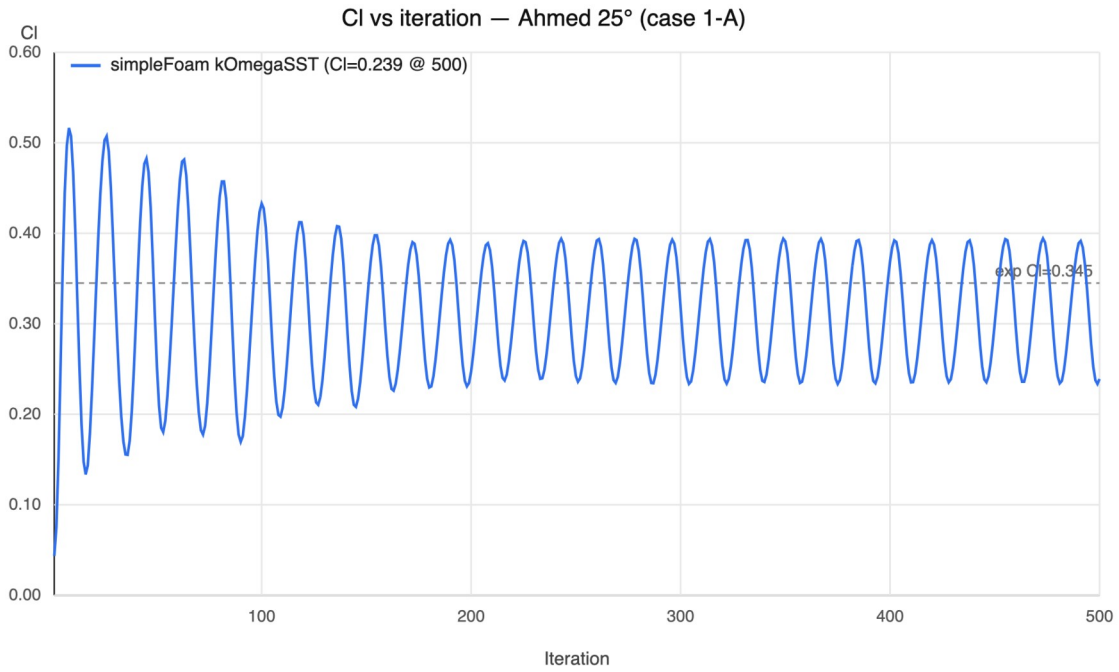
GAMBAR 4. Cd terhadap jumlah elemen (GIT), dengan Cd eksperimen = 0,299.



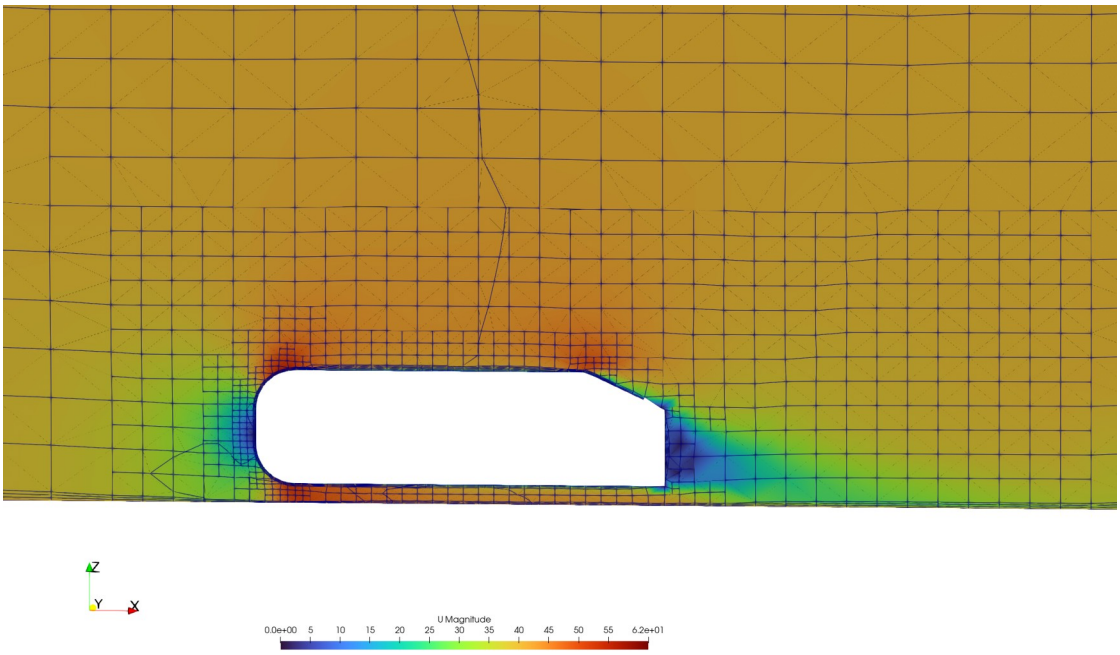
GAMBAR 5. Cl terhadap jumlah elemen (GIT), dengan Cl eksperimen = 0,345.



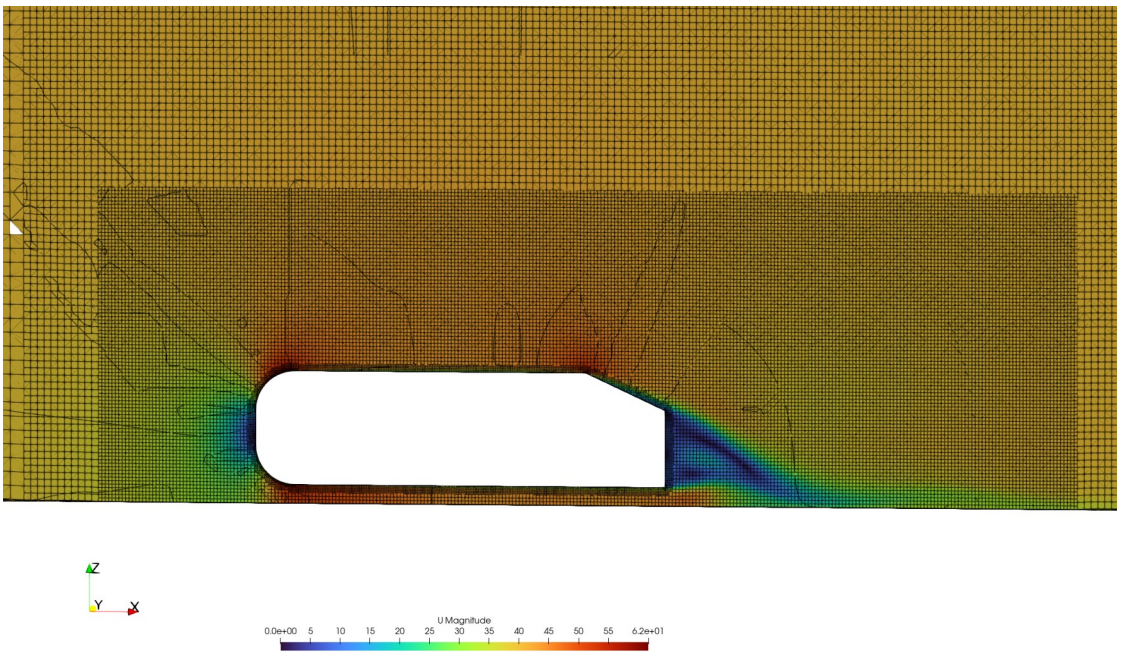
GAMBAR 6. mesh01_coarse: Cd terhadap iterasi.



GAMBAR 7. mesh03_fine: Cl terhadap iterasi (osilasi kuat di akhir waktu).



GAMBAR 8. Magnitudo kecepatan, mesh01_coarse (bidang simetri).



GAMBAR 9. Magnitudo kecepatan, mesh03_fine (bidang simetri).

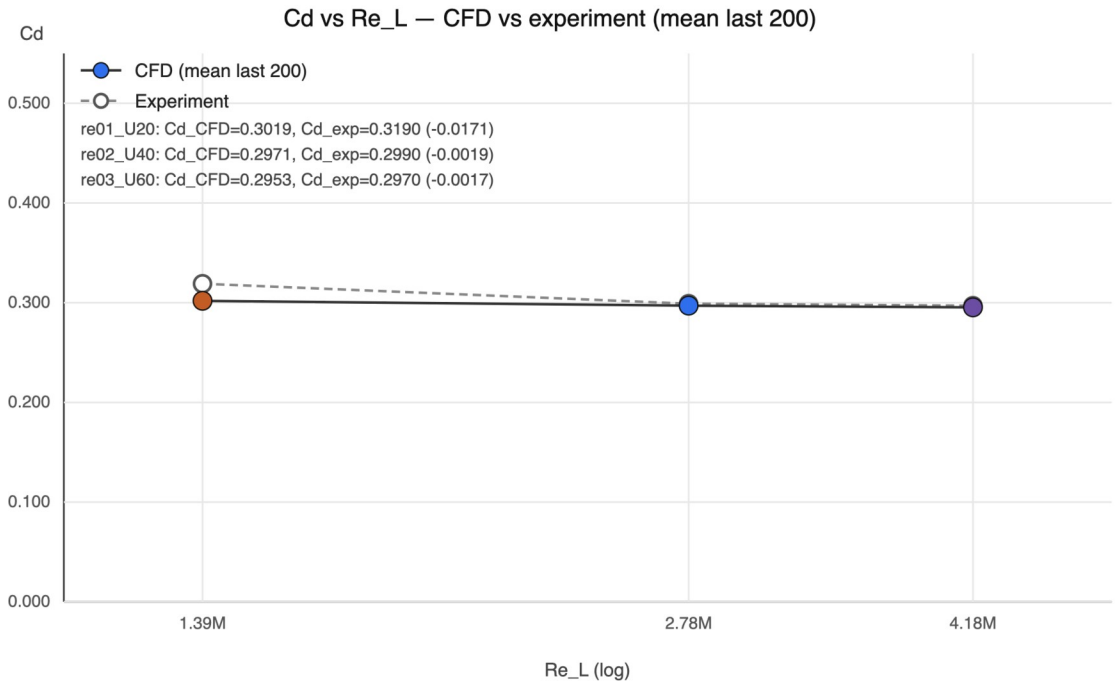
5. SENSITIVITAS BILANGAN REYNOLDS

Dengan mesh menengah, kecepatan aliran bebas diatur ke 20, 40, dan 60 m/s ($Re_L \approx 1{,}39\times10^6$, $2{,}78\times10^6$, $4{,}18\times10^6$). Intensitas dan skala panjang turbulensi dijaga tetap melalui penskalaan $k \propto U_\infty^2$ dan $\omega \propto U_\infty$. Jangkar eksperimen mid-Re (Cd = 0,299, Cl = 0,345) diambil dari Meile dkk. [3]. Nilai Cd_exp rendah/tinggi adalah estimasi tren berdasarkan ketergantungan Re dalam [3] dan perbandingan Re tinggi dengan Ahmed dkk. [1], dijangkar agar titik tengah cocok dengan Cd = 0,299; Cl_exp dijaga 0,345.

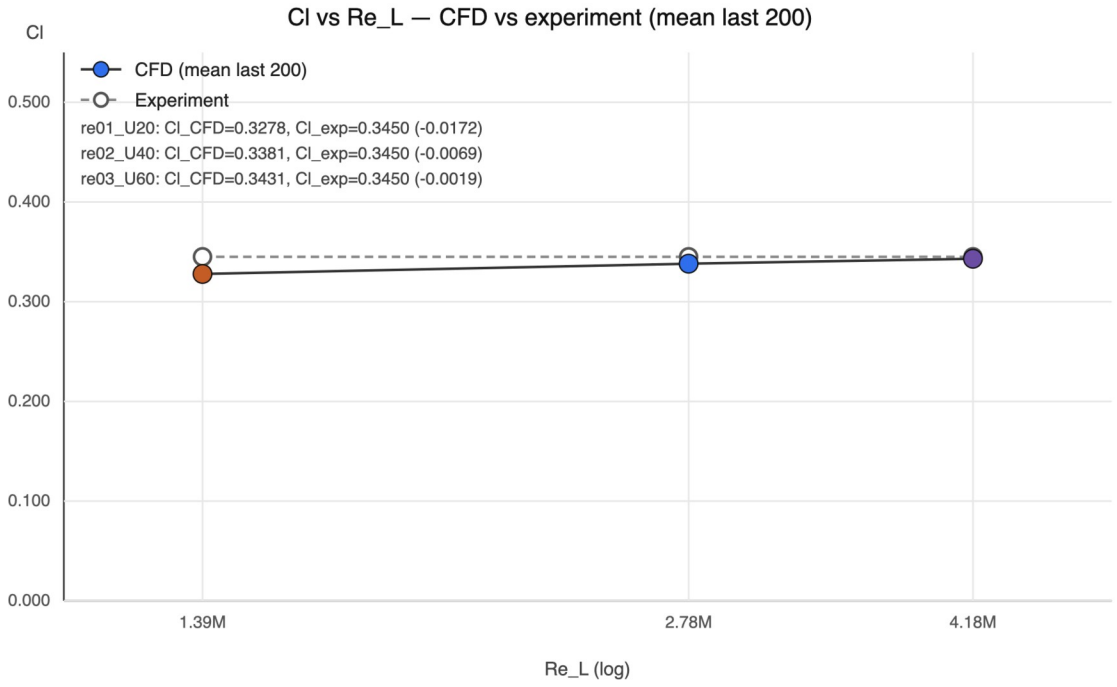
TABEL 4. Sensitivitas Re: CFD versus eksperimen (rerata 200 iterasi terakhir)

Kasus	U∞	Re_L	Cd	Cd_exp	Cd err %	Cl	Cl_exp	Cl err %
re01_U20	20	1,39e6	0,3019	0,3190	−5,36%	0,3278	0,3450	−4,98%
re02_U40	40	2,78e6	0,2971	0,2990	−0,65%	0,3381	0,3450	−1,99%
re03_U60	60	4,18e6	0,2953	0,2970	−0,56%	0,3431	0,3450	−0,56%

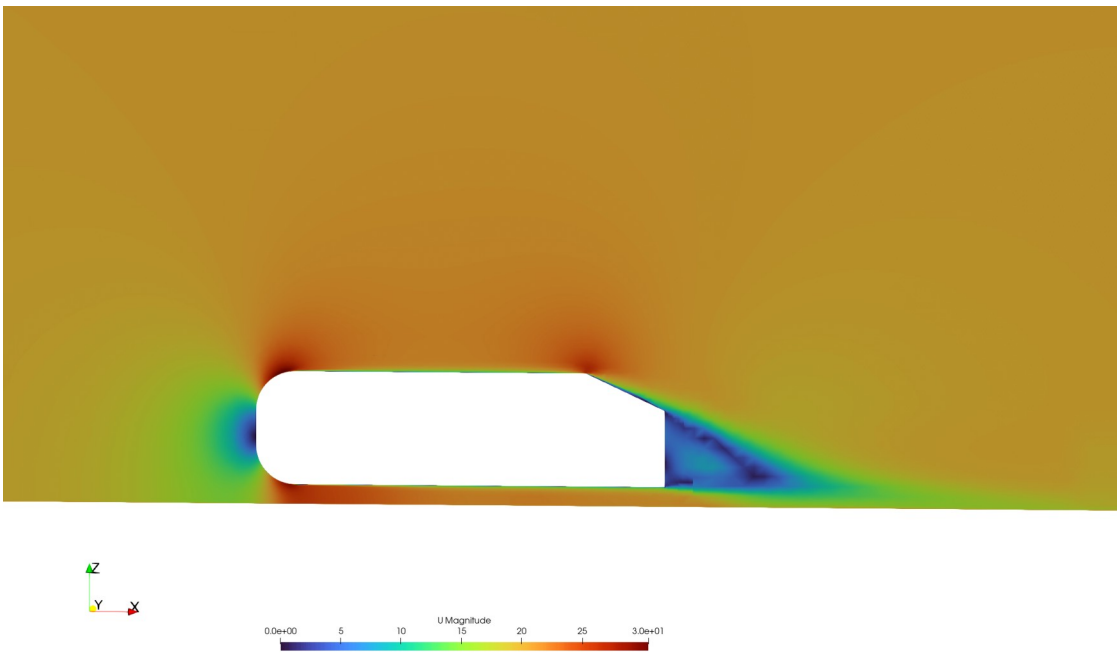
CFD mereproduksi penurunan Cd yang ringan seiring peningkatan Re, konsisten dengan tren publikasi. Kesepakatan terbaik pada Re menengah dan tinggi terhadap target jangkar. Perbedaan Cd yang lebih besar pada Re rendah sebagian mencerminkan ketidakpastian Cd eksperimen terestimasi pada $Re_L = 1{,}39 \times 10^6$.



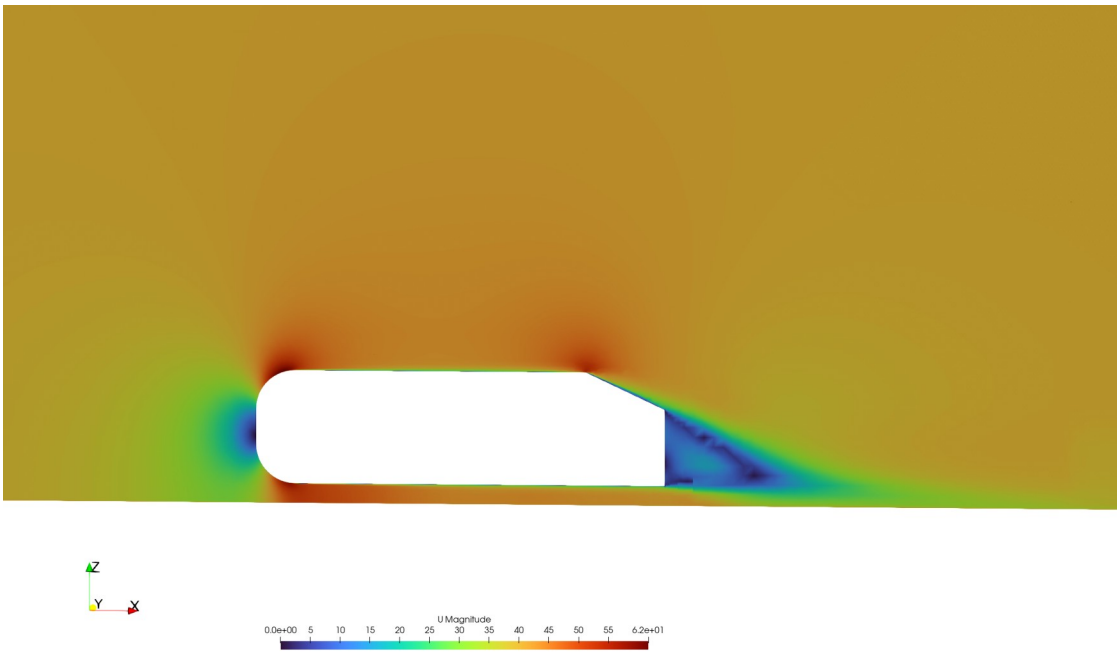
GAMBAR 10. Cd terhadap Re_L: CFD versus eksperimen.



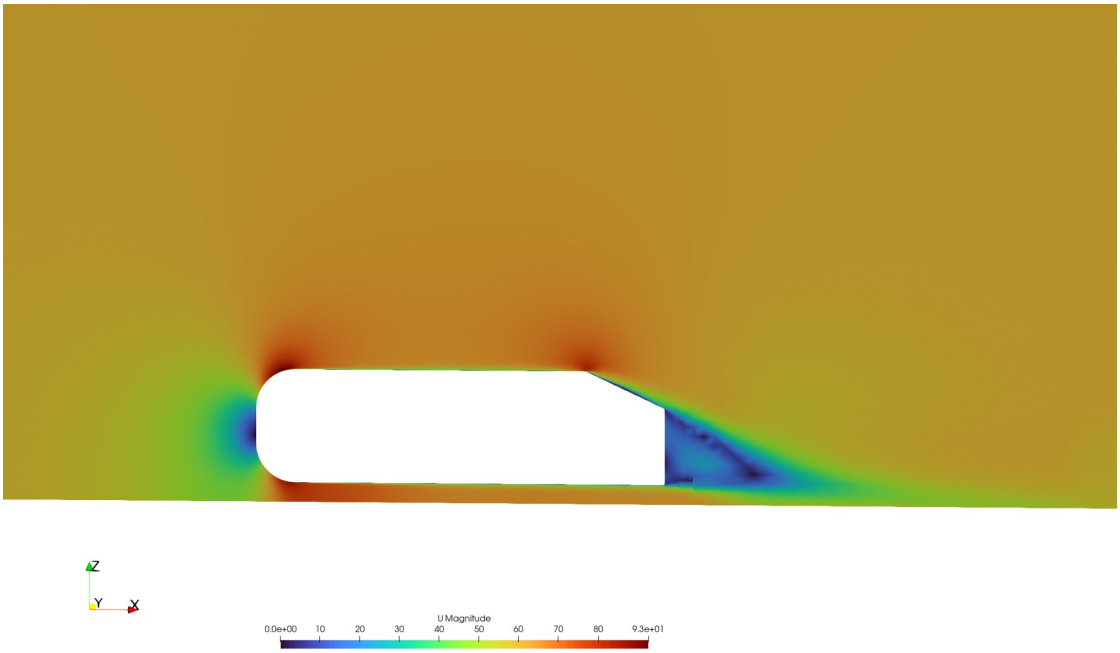
GAMBAR 11. Cl terhadap Re_L: CFD versus eksperimen.



GAMBAR 12. Magnitudo kecepatan pada U∞ = 20 m/s (re01_U20).



GAMBAR 13. Magnitudo kecepatan pada U∞ = 40 m/s (re02_U40).



GAMBAR 14. Magnitudo kecepatan pada U∞ = 60 m/s (re03_U60).

6. KESIMPULAN

Studi ini berhasil menetapkan dan memvalidasi alur kerja simulasi RANS OpenFOAM v2406 untuk Ahmed body 25° terhadap koefisien gaya eksperimen pada kecepatan 40 m/s. Melalui kajian independensi grid yang sistematis, konfigurasi mesh menengah dengan sekitar 0,70 juta sel diidentifikasi sebagai optimum praktis untuk perhitungan RANS tunak. Kerapatan grid ini mencapai akurasi prediksi yang sangat baik, membatasi kesalahan koefisien drag (Cd) sekitar −0,65% dan koefisien lift (Cl) sekitar −2%.

Menariknya, peningkatan resolusi hingga mesh halus sekitar 6,5 juta sel tidak memperbaiki akurasi koefisien lift. Sebaliknya, grid yang lebih halus menyingkap ketidakmantapan wake transien yang bertentangan dengan batasan iterasi keadaan tunak. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi yang adil terhadap mesh sangat halus memerlukan pendekatan transien yang lebih maju, seperti Unsteady RANS (URANS) atau Detached Eddy Simulation (DES), disertai pererataan waktu yang lebih panjang. Akhirnya, sapuan bilangan Reynolds pada mesh menengah optimal menangkap tren fisik yang konsisten tentang bagaimana drag berubah terhadap bilangan Reynolds, dengan hasil tetap dalam beberapa persen dari target eksperimen baseline.

UCAPAN TERIMA KASIH

PT Tensor atas sponsorship studi validasi ini dan komitmen berkelanjutan dalam memajukan komunitas dinamika fluida komputasi melalui inisiatif tensorCFD. Karya ini dimungkinkan oleh visi mereka untuk menjaga templat rekayasa fidelitas tinggi tetap aksesibel, praktis, dan siap produksi bagi aplikasi industri global.

Dalam semangat kolaborasi sumber terbuka, berkas kasus lengkap, konfigurasi mesh, dan skrip pascaproses otomatis untuk studi ini telah tersedia secara publik. Templat simulasi dapat diakses, di-clone, dan dimodifikasi langsung melalui GitHub pada: https://github.com/pt-tensor/AhmedBody-RANS.git

REFERENSI

1. Ahmed, S. R., Ramm, G., & Faltin, G. (1984). Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. SAE Technical Paper 840300.
2. Lienhart, H., Stoots, C., & Becker, S. (2000). Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model). DGLR Fach-Symposium der AG STAB.
3. Meile, W., Brenn, G., Reppenhagen, A., Lechner, B., & Fuchs, A. (2011). Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. CFD Letters, 3(1), 32–39.
4. PT Tensor. Templat kasus OpenFOAM / tensorCFD. https://en.pt-tensor.com/openfoam-case-templates/