

Pengaruh Ukuran Grid dan Model Turbulensi pada Analisis Komputasi *Drag Aerodinamika Bluff Body Model Kendaraan*

Rustan Tarakka¹, Harinaldi², Budiarmo²

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin,
Kampus Unhas Tamalanrea Km. 10 Makassar 90245

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,
Kampus UI Depok 16242

email : rustan_tarakka@yahoo.com, harinald@eng.ui.ac.id, mftbd@eng.ui.ac.id

Abstrak

Ketika kontur permukaan suatu benda berubah secara drastis, aliran fluida pada kondisi tertentu tidak mampu untuk bergerak mengikuti kontur tersebut dan mengalami separasi aliran. Separasi aliran menyebabkan munculnya daerah olakan yang memiliki tekanan rendah sehingga menimbulkan gaya *drag*. Kontrol aliran pada *bluff body* dengan tujuan untuk mengurangi *drag* dan kebisingan merupakan salah satu isu utama dalam aerodinamis. Perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang *bluff body* merupakan kontributor utama untuk keseluruhan *drag*, perbedaan ini terutama disebabkan oleh separasi aliran pada bagian belakang *body*. Metode kontrol aliran dapat dilakukan dengan pemberian energi tambahan menggunakan sistem kontrol aktif atau pasif. Strategi kontrol aktif melibatkan penambahan energi untuk mengontrol separasi aliran. Kebutuhan akan pengurangan gaya *drag* yang lebih efektif mendorong pada perancangan otomobil yang lebih kreatif dalam mengembangkan model kontrol aktif yang inovatif. Metode kontrol aktif memungkinkan untuk memodifikasi topologi aliran tanpa merubah bentuk dari kendaraan. Pada penelitian ini, digunakan model *reversed Ahmed body* yang merupakan *bluff body* model kendaraan yang disederhanakan. Model *reversed Ahmed body* dilengkapi dengan kontrol aktif aliran berupa *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang model uji untuk mengetahui besarnya pengurangan *drag* aerodinamika yang diperoleh akibat pengaruh ukuran *grid* dan model turbulensi. Untuk analisis komputasi, ukuran *grid* yang digunakan adalah *mesh A = 8*, *mesh B = 9*, *mesh C = 10* dan *mesh D = 11*. Sementara untuk model turbulensi digunakan *k-epsilon standard*, *k-epsilon realizable*, *k-omega standard* dan *k-omega SST*. Kondisi batas adalah kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan kecepatan *blowing* 1.0 m/s. Penelitian dilakukan dengan pendekatan komputasi menggunakan *Software CFD Fluent 6.3* dan hasil komputasi yang diperoleh divalidasi dengan pendekatan eksperimental menggunakan *load cell*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa *mesh C* dengan ukuran *grid* 10 dan model turbulensi *k-epsilon standard* memberikan hasil yang paling mendekati hasil eksperimen dengan perbedaan nilai pengurangan *drag* yang diperoleh adalah masing-masing 0.31% dan 0.30%.

Keywords: *drag* aerodinamika, kontrol aktif *blowing*, model turbulensi, ukuran *grid*, *reversed Ahmed body*

Pendahuluan

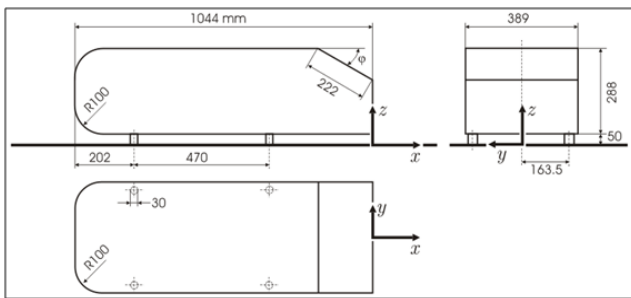
Permodelan model *bluff body* yang paling sering digunakan dalam penelitian-penelitian aerodinamika adalah *Ahmed body*. *Ahmed body* merupakan sebuah model kendaraan yang disederhanakan, dan digunakan banyak peneliti karena mampu mendeskripsikan permodelan turbulensi untuk kasus geometri yang kompleks. Model *Ahmed body* ditunjukkan pada Gb. 1. *Ahmed body* terdiri dari geometri berbentuk bundar pada bagian depan, geometri berbentuk miring dengan sudut yang bisa diubah pada bagian belakang untuk mempelajari fenomena separasi aliran, dan kotak persegi panjang yang menghubungkan bagian depan dan belakang. Pada model *Ahmed body*, medan

aliran yang terdapat pada olakan (*wake*) bersifat *three-dimensional*, *unsteady*, dan sangat tergantung pada sudut kemiringan^[1-2].

Kontrol aliran pada *bluff body* dengan tujuan mendapatkan pengurangan *drag* menjadi salah satu permasalahan utama dalam bidang aerodinamika kendaraan. Metode kontrol aliran dapat dilakukan dengan pemberian energi tambahan menggunakan sistem kontrol aktif atau pasif. Strategi kontrol aktif melibatkan penambahan energi untuk mengontrol separasi aliran. Bruneau C, et.al^[3] dalam penelitiannya menggunakan pasangan kontrol aktif dan pasif pada model *Ahmed body* dengan pendekatan persamaan *Navier-Stokes* untuk kecepatan dan tekanan serta *cartesian grids* untuk mensimulasikan aliran yang mengalir. Pengurangan

drag menggunakan kontrol aktif pada model *Ahmed body* juga diteliti oleh Roumeas M. et.al [4] dengan menggunakan *lattice Boltzmann method* (LBM).

Salah satu konsep pemberian energi dapat dilakukan dengan tiupan (*blowing*). Menurut Roumeas M. et.al [4], efek yang dihasilkan oleh *blowing* pada bagian belakang benda yaitu mengurangi daerah olakan (*wake*) dan total kehilangan tekanan (*total pressure loss*) serta meningkatkan tekanan statik di permukaan benda. Sementara Lehugeur [5], menjelaskan bahwa *blowing* digunakan untuk mengganggu *longitudinal swirling vortice* yang terjadi di bagian belakang kendaraan sehingga dapat meningkatkan tekanan statik dan mengurangi gaya aerodinamika.



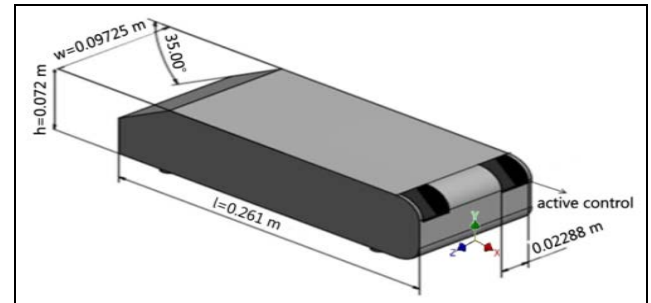
Gambar 1. Model *Ahmed body* [1]

Untuk mengetahui pengaruh ukuran *grid* pada analisis komputasi maka perlu dilakukan suatu penelitian yang menggunakan beberapa ukuran *grid*. Hal tersebut disebabkan karena adanya pendapat bahwa *mesh* yang semakin rapat akan menghasilkan simulasi yang lebih baik, tidak selalu benar. Demikian pula pengaruh model turbulensi terhadap hasil komputasi dimana perlu dilakukan suatu penelitian yang menggunakan beberapa model turbulensi karena dalam *Computational Fluid Dynamics* (CFD), berbagai jenis aliran turbulen memerlukan aplikasi yang berbeda dari model turbulensi.

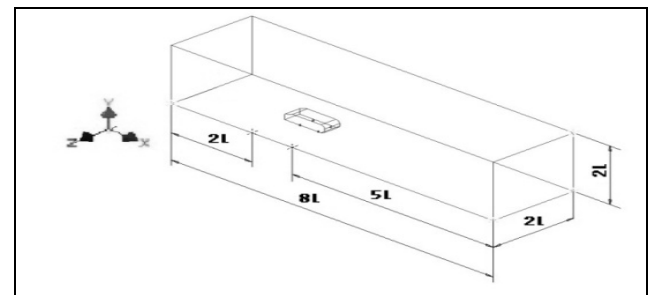
Metodologi Penelitian

Model uji yang digunakan pada penelitian ini adalah *bluff body* model kendaraan yang disederhanakan dan mempunyai disain dasar berupa *body Ahmed* terbalik (*reversed Ahmed body*). Model *reversed Ahmed body* mempunyai rasio geometri 0.25 dari model orisinal *Ahmed body* [1]. Karena itu, model uji memiliki dimensi panjang $l = 0.261$ m, lebar $w = 0.09725$ m, dan tinggi $h = 0.072$ m, seperti yang ditunjukkan pada Gb. 2. Gb. 3 memberikan penjelasan tentang komputasi domain dari *reversed Ahmed model* dengan sudut kemiringan (ϕ) 35° pada bagian depan berbentuk 3D yang digunakan pada penelitian ini. Dari Gb. 3, terlihat bahwa komputasi domain mempunyai panjang (L) = 8l, lebar (W) = 2l, dan tinggi (H) = 2l (l = panjang model dalam arah-x).

Kondisi batas adalah kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan kecepatan *blowing* 1.0 m/s. Persamaan atur (*governing equation*) diselesaikan dengan komputasi menggunakan *software CFD FLUENT 6.3* dengan basis perhitungan metode volume hingga (*finite volume methods*) [6].



Gambar 2. Dimensi *bluff body* model kendaraan



Gambar 3. Domain aliran dalam CFD

Pada penelitian ini digunakan 4 ukuran *grid* yaitu *mesh A* = 8, *mesh B* = 9, *mesh C* = 10 dan *mesh D* = 11. Sementara untuk model turbulensi yang digunakan adalah *k-epsilon standard*, *k-epsilon realizable*, *k-omega standard*, dan *k-omega SST*.

Hubungan koefisien *drag* dengan gaya *drag* yang terjadi pada *bluff body* adalah :

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \tag{1}$$

dimana ρ adalah densitas udara, V_∞ adalah kecepatan *upstream*, S adalah luas penampang dan F_d adalah besarnya gaya *drag* yang terjadi pada model kendaraan disepanjang arah longitudinal. Besarnya gaya *drag* dapat dihitung dari viskositas gaya *drag* dan tekanan gaya *drag*, dimana berlaku persamaan :

$$F_d = \int \tau_w \sin \theta dS + \int p \cos \theta dS \tag{2}$$

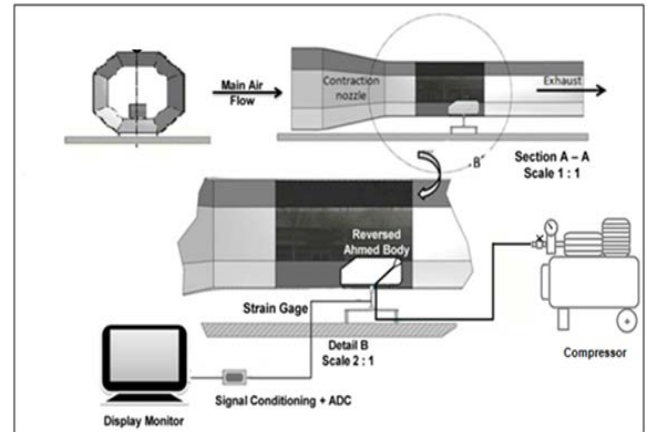
Substitusi persamaan (11) dan (12) menjadi :

$$C_d = \int \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \sin \theta dS + \frac{\int C_p \cos \theta dS}{S} \tag{3}$$

dimana $\tau_w = \mu(du/dy)_w$ adalah *wall shear stress* yang didapat dari *gradien wall velocity* dan $C_p = (p-p_\infty) / (\rho V_\infty^2 / 2)$ adalah koefisien tekanan yang didapat dari distribusi tekanan di *wall*.

Untuk memvalidasi hasil komputasi yang

diperoleh maka dilakukan pendekatan eksperimen dengan menggunakan *load cell*. *Load cell* tersusun dari sebuah plat *stainless steel* yang telah dipasang *strain gage* disisi depan dan belakang kemudian dihubungkan dengan model uji menggunakan batang aluminium. Model uji ditempatkan dalam terowongan angin yang nantinya dialiri udara dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s sehingga model menerima gaya dorong. Gaya dorong yang diterima oleh model uji tersebut juga akan diterima oleh plat yang membuat plat mengalami defleksi. *Strain gage* akan membaca proses tersebut dalam bentuk perubahan hambatan material dan menghasilkan tegangan keluar sebagai *output*. Dengan bantuan kalibrasi, maka *output* tegangan pada *strain gage* ditampilkan dalam bentuk gaya dalam satuan gram. Eksperimen setup ditampilkan pada Gb. 4.



Gambar 4. Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif blowing

Tabel 1. Analisa *grid independency*

No	Model	Cells	Faces	Nodes	Iterasi	dr (%)	Perbedaan (%)
1	Mesh A (Size = 8)	2,133,966	5,226,078	1,097,948	118	8.33	-5.06
2	Mesh B (Size = 9)	1,836,887	4,613,847	1,038,427	130	8.24	-5.15
3	Mesh C (Size = 10)	1,712,923	4,352,503	1,010,859	119	13.70	0.31
4	Mesh D (Size = 11)	623,352	1,383,597	196,560	133	9.65	-3.74
5	Eksperimen					13.39	

Hasil dan Pembahasan

Pendapat yang menyatakan bahwa *mesh* yang semakin rapat akan menghasilkan simulasi yang lebih baik, ternyata tidak selalu benar. Hal tersebut terlihat dari hasil analisa *grid independency* yang telah dilakukan dan hasilnya dirangkum dalam Tabel 1. Pada Tabel 1 terlihat bahwa *mesh C* dengan ukuran *grid* 10 memberikan hasil yang paling mendekati hasil eksperimen dengan perbedaan 0.31%, sedangkan untuk *mesh A*, *mesh B* dan *mesh D* adalah masing-masing 5.06%, 5.15% dan 3.74% (tanda (-) menandakan hasil eksperimen lebih besar dari komputasi). Maka untuk kajian komputasi selanjutnya akan digunakan ukuran *grid* 10.

Untuk melihat pengaruh model turbulensi pada analisis komputasi *drag* aerodinamika *bluff body* model kendaraan, maka pembahasan difokuskan pada medan tekanan, intensitas turbulensi dan pengurangan *drag* aerodinamika.

1. Medan Tekanan

Distribusi koefisien tekanan yang ditampilkan adalah distribusi tekanan yang terjadi pada bagian

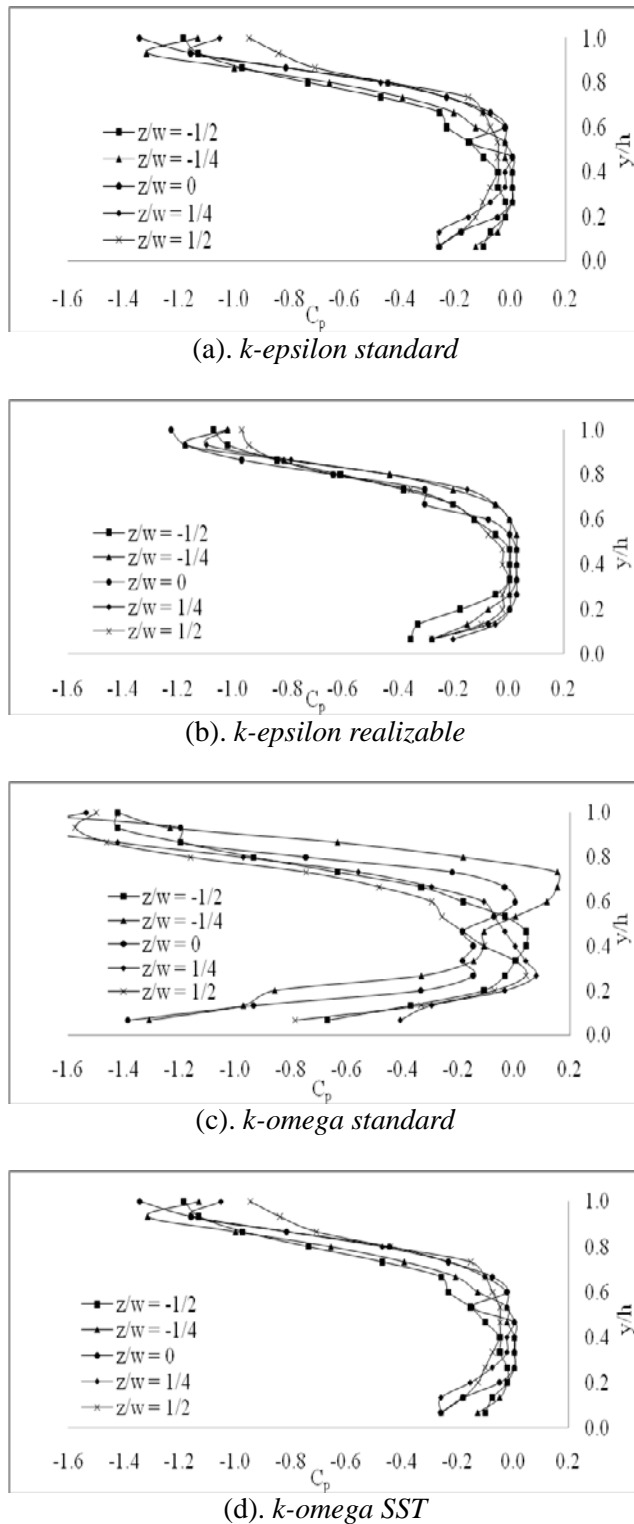
belakang model *reversed Ahmed body*. Gb. 5(a-d) menunjukkan distribusi koefisien tekanan (C_p) dengan kecepatan *upstream* (U_o) 13.9m/s tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model turbulensi.

Tabel 2. Nilai minimum distribusi koefisien tekanan (C_p) pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran

Model turbulensi	C_p	y/h	z/w
<i>k-epsilon standard</i>	-1.3420	1	0
<i>k-epsilon realizable</i>	-1.2246	1	0
<i>k-omega standard</i>	-1.8362	1	0
<i>k-omega SST</i>	-1.5243	1	0

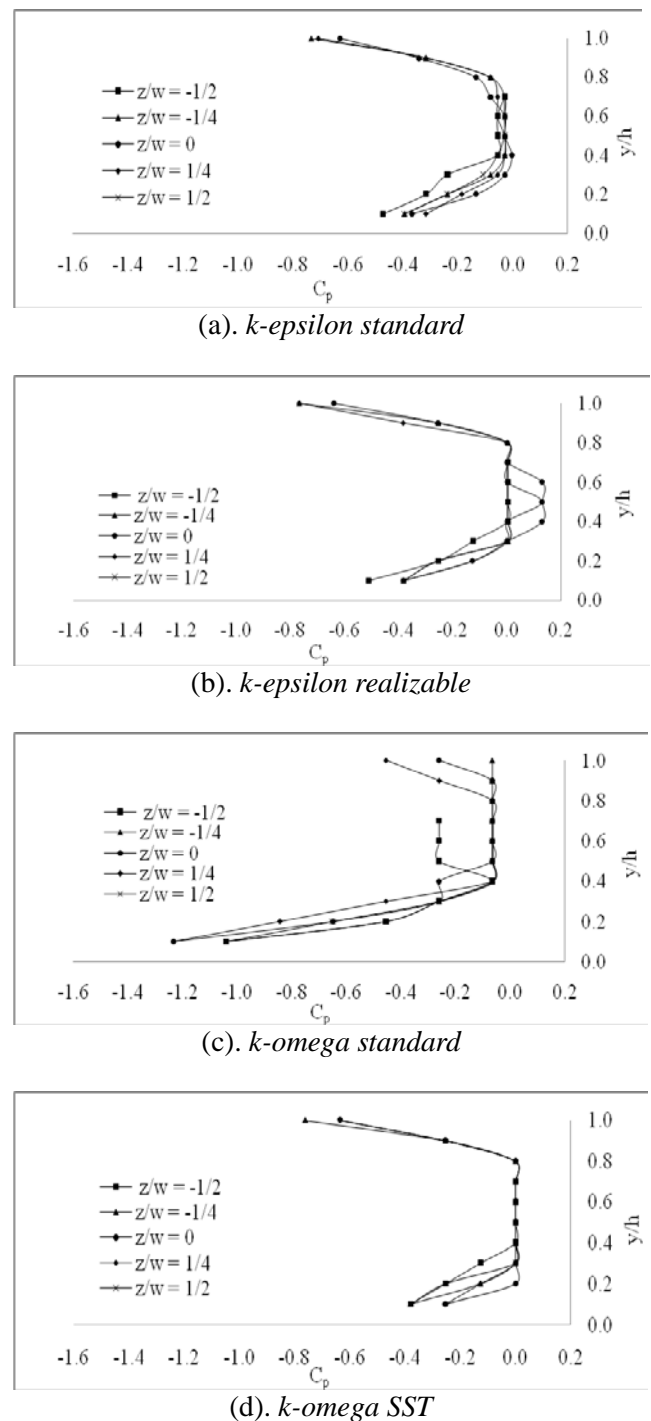
Pada Gb. 5(a-d), diperoleh bahwa nilai koefisien tekanan cenderung mengalami penurunan pada $y/h=0.6$ hingga $y/h=1$ pada setiap model turbulensi, hal ini menunjukkan bahwa pada sisi atas bagian belakang model nilai koefisien tekanan bernilai minimal. Nilai minimum distribusi tekanan tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model

turbulensi dirangkum dalam Tabel 2.



Gambar 5. Distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran

Gb. 6(a-d) menunjukkan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada bagian belakang model *reversed Ahmed body* dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan kontrol aliran *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s pada setiap model turbulensi.



Gambar 6. Distribusi koefisien tekanan pada setiap model turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl}=1.0$ m/s

Pada Gb. 6(a-d) diperlihatkan bahwa nilai koefisien tekanan cenderung mengalami kenaikan atau bergeser ke arah positif pada setiap model turbulensi. Nilai minimum distribusi koefisien tekanan dengan *blowing*, $U_{bl}=1.0$ m/s pada setiap model turbulensi dinyatakan dalam Tabel 3.

Pada Tabel 2 dan Tabel 3 terlihat bahwa penempatan kontrol *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s mengakibatkan terjadinya peningkatan nilai koefisien tekanan. Peningkatan terbesar terjadi pada model turbulensi *k-omega SST* yakni sebesar 50.12%.

Sementara peningkatan nilai koefisien tekanan untuk model turbulensi *k-epsilon standar*, *k-epsilon realizable* dan *k-omega standar* masing-masing 45.44%, 37.52% dan 32.80%. Hal ini menunjukkan bahwa *blowing* mampu mengurangi *total pressure loss* dan meningkatkan tekanan statik di permukaan benda atau model. Hal tersebut sejalan juga dengan penelitian yang dilakukan Roumeas, et al [7], dimana efek *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang model adalah mampu mengurangi *total pressure loss* dan meningkatkan tekanan statik pada bagian belakang *generic squareback bluff body*.

Tabel 3. Nilai minimum distribusi koefisien tekanan (C_p) pada setiap model turbulensi dengan *blowing*, $U_{bl} = 1.0$ m/s

Model turbulensi	C_p	y/h	z/w
<i>k-epsilon standar</i>	-0.7322	1	-1/4
<i>k-epsilon realizable</i>	-0.7651	1	-1/4 ; 1/4
<i>k-omega standar</i>	-1.2340	0.1	0 ; 1/4
<i>k-omega SST</i>	-0.7603	1	-1/4

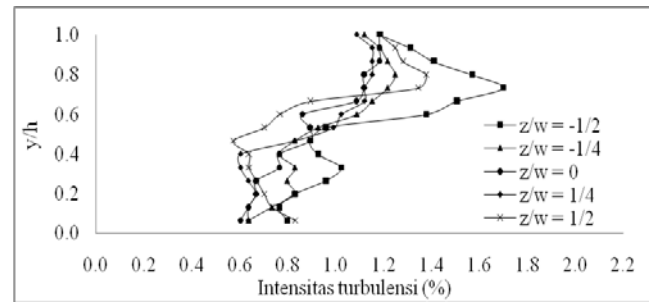
2. Intensitas Turbulensi

Intensitas turbulensi yang ditampilkan adalah intensitas turbulensi yang terjadi pada bagian belakang model *reversed Ahmed body*. Gb. 7(a-d) menunjukkan intensitas turbulensi pada model uji dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model turbulensi. Pada Gb. 7(a-d) diketahui bahwa nilai intensitas turbulensi maksimum berada pada $0.6 < y/h < 0.8$ dan $z/w = -1/2$ untuk setiap model turbulensi. Nilai maksimum intensitas turbulensi tanpa kontrol aktif aliran pada setiap model turbulensi diberikan pada Tabel 4.

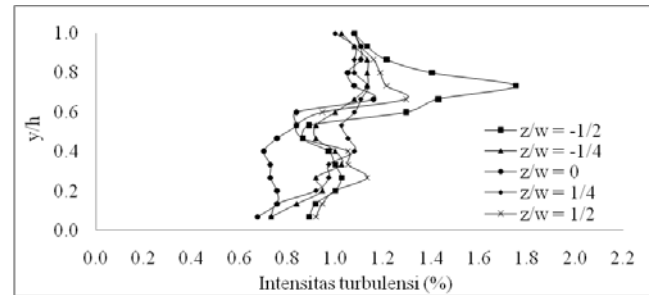
Gb. 8(a-d) menunjukkan intensitas turbulensi pada bagian belakang model *reversed Ahmed body* dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s dan *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s pada setiap model turbulensi.

Tabel 4. Nilai maksimum intensitas turbulensi (IT) pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran.

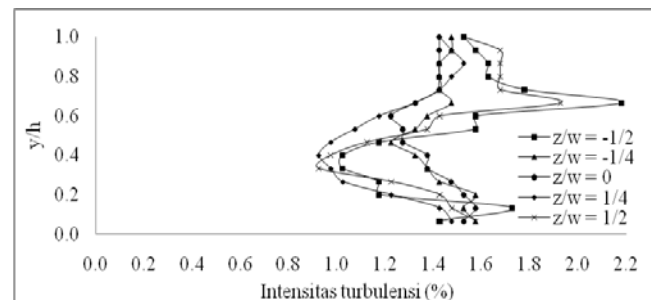
Model turbulensi	IT (%)	y/h	z/w
<i>k-epsilon standar</i>	1.70	0.73	-1/2
<i>k-epsilon realizable</i>	1.75	0.73	-1/2
<i>k-omega standar</i>	2.18	0.67	-1/2
<i>k-omega SST</i>	1.19	0.73	-1/2



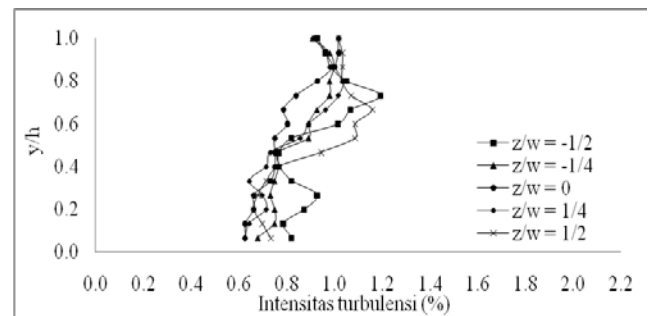
(a). *k-epsilon standar*



(b). *k-epsilon realizable*



(c). *k-omega Standard*

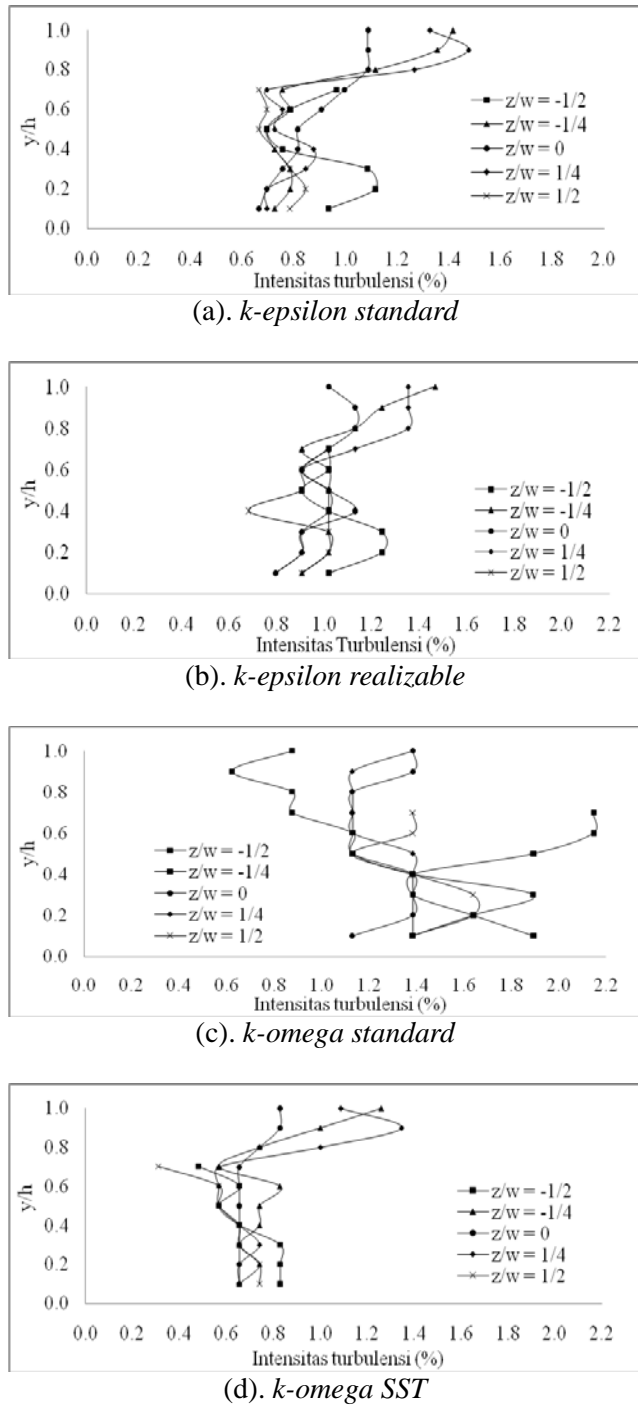


(d). *k-omega SST*

Gambar 7. Intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi tanpa kontrol aktif aliran

Tabel 5. Nilai maksimum intensitas turbulensi (IT) pada setiap model turbulensi dengan *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s)

Model turbulensi	IT (%)	y/h	z/w
<i>k-epsilon standar</i>	1.475	0.9	1/4
<i>k-epsilon realizable</i>	1.467	1	-1/4
<i>k-omega standar</i>	2.147	0.7	-1/2
<i>k-omega SST</i>	1.348	0.9	1/4



Gambar 8 Intensitas turbulensi pada setiap model turbulensi dengan *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s)

Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan kontrol *blowing* ($U_{bl}=1.0$ m/s) pada setiap model turbulensi dinyatakan dalam Tabel 5. Pada Tabel 4 dan Tabel 5 terlihat bahwa penambahan kontrol aktif berupa *blowing* mengakibatkan terjadinya pengurangan nilai intensitas turbulensi sebesar 13.19%, 16.24% dan 1.48% pada model turbulensi *k-epsilon standard*, *k-epsilon realizable* dan *k-omega standard*. Namun pada model *k-omega SST* intensitas turbulensi maksimum naik sebesar 12.98%. Pengurangan intensitas turbulensi ini karena kontrol aliran berupa *blowing* mampu mengurangi olakan

(wake) yang terjadi di belakang model *reversed Ahmed body*.

3. Drag Aerodinamika

Besarnya nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* yang diperoleh pada setiap model turbulensi besarnya berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh perbedaan besaran distribusi tekanan yang terjadi di permukaan model uji. Besarnya koefisien *drag* dan pengurangan *drag* pada setiap model turbulensi dinyatakan pada Table 6.

Tabel 6. Koefisien *drag* (C_d) dan pengurangan *drag* (dr) pada setiap model turbulensi, CDF

Model Turbulensi	C_d		dr(%)
	TKA	<i>Blowing</i> , $U_{bl}=1.0$ m/s	
<i>k-epsilon standard</i>	1.781	1.537	13.70
<i>k-epsilon realizable</i>	1.622	1.455	10.27
<i>k-omega standard</i>	3.209	2.832	11.75
<i>k-omega SST</i>	1.774	1.354	23.65

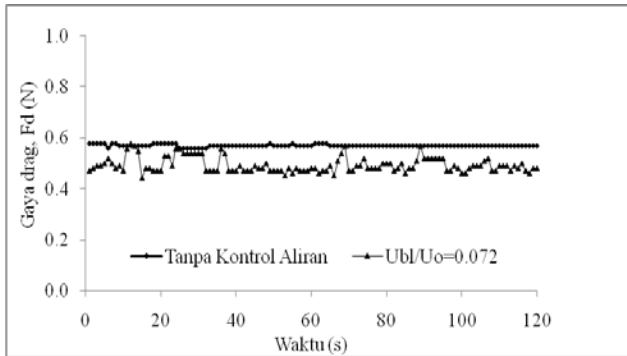
Pada Tabel 6 tampak bahwa pengurangan *drag* terbesar diperoleh dengan menggunakan model turbulensi *k-omega SST* yaitu sebesar 23.65%. Hal ini bersesuaian dengan peningkatan koefisien tekanan yang diperoleh juga terbesar yakni sebesar 50.12%, namun intensitas turbulensi maksimum justru mengalami kenaikan sebesar 12.98%. Sedangkan pada 3 model turbulensi lainnya yaitu *k-epsilon standar*, *k-epsilon realizable* dan *k-omega standar* terdapat kecenderungan terjadi pengurangan intensitas turbulensi dan *drag reduction* jika terjadi peningkatan koefisien tekanan sebagai akibat adanya penempatan *blowing* pada bagian belakang model uji.

4. Validasi Hasil Komputasi

Hasil komputasi numerik untuk *drag* aerodinamika yang telah diperoleh divalidasi secara eksperimental dengan menggunakan *load cell*. Data gaya *drag* yang diambil adalah sebanyak 120 buah dengan interval waktu pengambilan data adalah 120 detik. Data yang diperoleh berfluktuasi, seperti diperlihatkan pada Gb. 9.

Nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* yang diperoleh secara eksperimen dirangkum dalam Tabel 7. Pada Tabel 7 tampak bahwa dengan adanya penambahan kontrol aliran berupa *blowing* dengan kecepatan 1.0 m/s memberikan pengaruh terhadap pengurangan *drag* aerodinamika pada model uji sebesar 13.39%. Hasil validasi eksperimen terhadap

hasil komputasi untuk pengurangan *drag*, terlihat bahwa yang paling mendekati hasil eksperimen adalah model turbulensi *k-epsilon standard*, dimana perbedaan nilai pengurangan *drag* yang diperoleh sekitar 0.30%. Sementara, untuk model turbulensi yang lain *k-epsilon realizable*, *k-omega standar* dan *k-omega SST* adalah masing-masing -3.13%, -1.65% dan 10.25% (tanda (-) menandakan bahwa hasil eksperimen lebih besar dibanding hasil komputasi).



Gambar 9. Fluktuasi data gaya *drag* dengan kecepatan *upstream* 13.9 m/s, *blowing*

Tabel 7. Nilai koefisien *drag* (C_d) dan pengurangan *drag* (*dr*) dengan *blowing*, Eksperimen

U_o (m/s)	C_d		<i>dr</i> (%)
	TKA	<i>Blowing</i> , $U_{bl}=1.0$ m/s	
13.9	1.231	1.066	13.39

Kesimpulan

Ukuran *grid* dan model turbulensi sangat berpengaruh terhadap hasil analisis komputasi *drag* aerodinamika *bluff body* model kendaraan. Pendapat yang menyatakan bahwa *mesh* yang semakin rapat akan menghasilkan simulasi yang lebih baik, ternyata tidak selalu benar. Dari hasil analisa *grid independency* yang telah dilakukan menunjukkan bahwa *mesh C* dengan ukuran *grid* 10 memberikan hasil yang paling mendekati hasil eksperimen dengan perbedaan nilai pengurangan *drag* yang diperoleh adalah 0.31%. Sementara pengaruh model turbulensi terhadap hasil komputasi dibuktikan dari koefisien *drag* dan pengurangan *drag* yang didapat pada setiap model turbulensi besarnya berbeda-beda. Hal ini disebabkan oleh perbedaan besaran distribusi tekanan yang terjadi di permukaan model uji pada setiap model turbulensi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa model turbulensi *k-epsilon standard* memberikan hasil yang paling mendekati hasil eksperimen dengan perbedaan nilai pengurangan *drag* yang diperoleh adalah 0.30% dengan penerapan

kontrol aliran *blowing*.

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Kementerian Negara Riset dan Teknologi melalui skema Insentif Riset Dasar No. RD-2011-0863.

Nomenklatur

- l panjang model uji (m)
- w lebar model uji (m)
- h tinggi model uji (m)
- ϕ sudut kemiringan model uji (derajat)
- L panjang domain komputasi
- W lebar domain komputasi
- H tinggi domain komputasi
- U_o kecepatan *upstream* (m/s)
- U_{bl} kecepatan *blowing* (m/s)
- U_{bl}/U_o perbandingan kecepatan *blowing* dengan kecepatan *upstream*
- y/h perbandingan antara tinggi *grid* dengan tinggi model
- z/w perbandingan antara lebar *grid* dengan lebar model
- C_p koefisien tekanan
- IT intensitas turbulensi (%)
- C_d koefisien *drag*

Subsripts

- TKA tanpa kontrol aliran
- dr* *drag reduction* (pengurangan *drag*)

Referensi

- [1]. Ahmed S.R., G. Ramm and G. Faltin., SAE paper, Detroit, Michigan, USA, 840300-01 (1984).
- [2]. Lienhart H., Stoots C., and Becker S, Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified car Model (Ahmed Model), Numerical and Experimental Fluid (2002).
- [3]. Bruneau C. H., Coupling active and passive techniques to control the flow past the square back Ahmed body, Computers & Fluids 39, pp. 1875-1892 (2010).
- [4]. Roumeas M., Gillieron P., and Kourta A., Separated Flow around the Rear Window of a Simplified Car Geometry, Journal of Fluids Engineering, 130 (2008).
- [5]. Lehugeur B. & Gilliéron P., Drag reduction by active control of A-pillar vortex breakdown on a simplified car geometry, European Drag Reduction & Flow Control Meeting, Italy (2006).
- [6]. User's Guide Manual of Fluent 6.3, September (2006)
- [7]. Roumeas M, Gillieron P & Kourta A., Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry, Computers & Fluids, 38,

pp. 60–70 (2009).