

## Pengaruh Penggunaan Kontrol Aktif *Synthetic Jet* terhadap *Drag* Aerodinamika pada *Bluff Body* Model Kendaraan

Budiarso<sup>1</sup>, Harinaldi<sup>1</sup>, Rustan Tarakka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,  
Kampus UI Depok 16242

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin,  
Kampus Unhas Tamalanrea Km. 10 Makassar 90245

email : mftbd@eng.ui.ac.id, harinald@eng.ui.ac.id, rustan\_tarakka@yahoo.com

### Abstrak

Strategi kontrol aliran untuk mengurangi *drag* aerodinamika sebuah kendaraan adalah upaya memodifikasi timbulnya separasi aliran di lapisan batas dari permukaan kendaraan yang berakibat pada terbentuknya aliran balik di sekitar kendaraan. Oleh karena itu, pada banyak aplikasi aerodinamika sangat diperlukan pengendalian terhadap aliran pada lapisan batas untuk mencegah atau menunda terjadinya separasi sejauh mungkin. Banyak kajian yang menunjukkan bahwa kontrol aktif separasi aliran turbulen memberikan alternatif yang prospeknya sangat baik untuk mengurangi *drag* aerodinamika pada kendaraan otomotif. Kontrol secara aktif memerlukan sumber energi luar untuk mengontrol aliran di sekitar kendaraan tanpa perlu mengganggu bentuknya. Pada penelitian ini, digunakan model *reversed Ahmed body* yang merupakan *bluff body* model kendaraan yang disederhanakan. Model ini dilengkapi dengan kontrol aktif *synthetic jet* pada bagian belakang model uji untuk mengetahui besarnya pengurangan *drag* aerodinamika yang diperoleh. *Synthetic jet* ini terbentuk dari perpaduan rangkaian *vortex* yang ditimbulkan oleh getaran harmonik sebuah diafragma yang berfungsi sebagai dinding sebuah *cavity*. Jika amplitudo getaran diafragma cukup besar, separasi aliran terjadi di sekitar orifis yang berfungsi sebagai saluran keluar-masuk aliran fluida. Dengan demikian suatu lapisan geser akan terbentuk antara fluida yang keluar dan fluida di sekelilingnya. Sebuah jet sintetik adalah deretan cincin-cincin *vortex* yang terbentuk secara berurutan. Pada aplikasi aerodinamika, jet sintetik ini memiliki keunggulan untuk memodifikasi lapisan batas dalam upaya mengurangi gaya hambatan (*drag*) aerodinamika. Kondisi batas adalah kecepatan *upstream* 16.7 m/s dan kecepatan *synthetic jet* 2.0 m/s. Penelitian dilakukan dengan metode komputasional dan eksperimental. Pada metode komputasional menggunakan *Software CFD Fluent 6.3* dengan model turbulensi *k-epsilon standar* dan pada metode eksperimental menggunakan *load cell*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa dengan mengaplikasikan *synthetic jet* pada bagian belakang model uji memberikan pengaruh yang signifikan terhadap aliran dan *vortex* yang terbentuk. Pengurangan *drag* yang diperoleh sebesar 18.49% dengan metode komputasi dan 17.83% dengan metode eksperimental.

**Keywords:** *drag* aerodinamika, kontrol aktif *synthetic jet*, *bluff body* model kendaraan

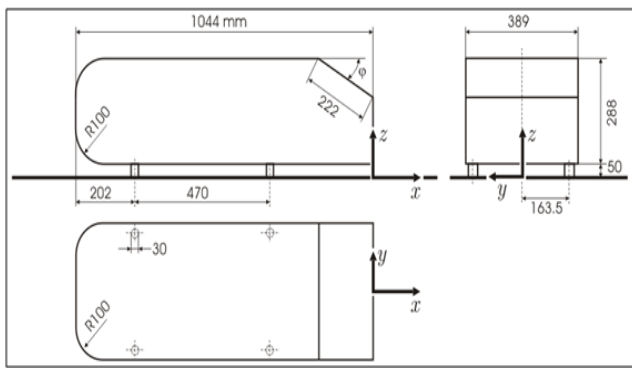
### Pendahuluan

Kompleksitas yang tercakup dalam desain mobil karena adanya sejumlah besar aksesoris dan perangkat yang membentuk geometrinya mendorong kajian yang intensif secara komputasi dalam memodifikasi medan aliran, sebelum dilakukan pengujian secara eksperimental. Banyak penelitian<sup>[1-5]</sup>, menggunakan model *Ahmed body* (Gb. 1) sebagai referensi model paling umum untuk mobil berjenis *bluff body* karena bentuknya yang cukup sederhana namun diyakini dapat mencapai tingkat akurasi yang memadai pada simulasi aliran dengan mempertahankan fitur yang relevan, penting dan praktis dari *body* mobil tersebut. Model *Ahmed*

*body* adalah geometris *body* sederhana yang mempertahankan fitur aliran utama, khususnya *vortex wake flow* di mana sebagian besar bagian dari *drag* terkonsentrasi dan merupakan parameter yang baik digunakan sebagai acuan tes (*test reference*)<sup>[6]</sup>.

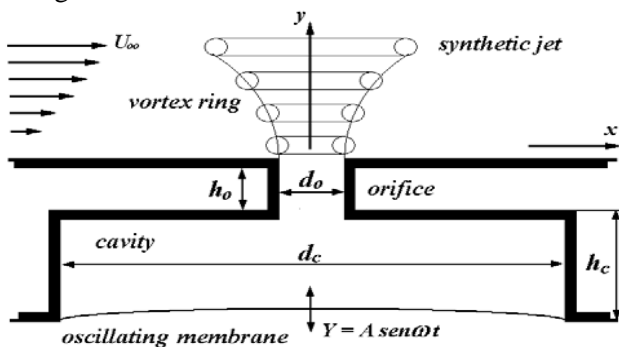
Separasi adalah sebuah kondisi dimana aliran udara yang mengalir di sepanjang permukaan benda tidak mampu lagi menempel pada permukaan tersebut. Aliran yang sedang bergerak maju secara teratur akan terpecah saat terjadinya separasi dan mengakibatkan penurunan distribusi tekanan dan menimbulkan gaya *drag*<sup>[7]</sup>. Pada kendaraan, separasi aliran yang terjadi sangat kompleks. Separasi aliran pada gril radiator, bagian bawah *body*, sekitar roda yang berputar, dinding bagian samping, tepi atas dan

samping kaca belakang, memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kompleksitas aliran tersebut. A.Brunn et.al<sup>[8]</sup> menyimpulkan bahwa perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang merupakan kontributor utama dari keseluruhan *drag*, yang disebabkan karena adanya separasi aliran pada bagian belakang kendaraan. Oleh karena itu, pengembangan disain kendaraan yang mampu meminimalisir separasi aliran yang terjadi sangat diperlukan.



Gambar 1. Model *body* Ahmed<sup>[6]</sup>

Strategi kontrol aliran untuk mengurangi hambatan aerodinamika sebuah benda pada dasarnya berlandaskan pada upaya memodifikasi timbulnya separasi aliran di lapisan batas dari permukaan padat sebuah benda yang berakibat pada terbentuknya aliran balik di sekitar benda tersebut. Oleh karena itu, pada banyak aplikasi aerodinamika sangat diperlukan pengendalian terhadap aliran pada lapisan batas untuk mencegah atau menunda terjadinya separasi sejauh mungkin.



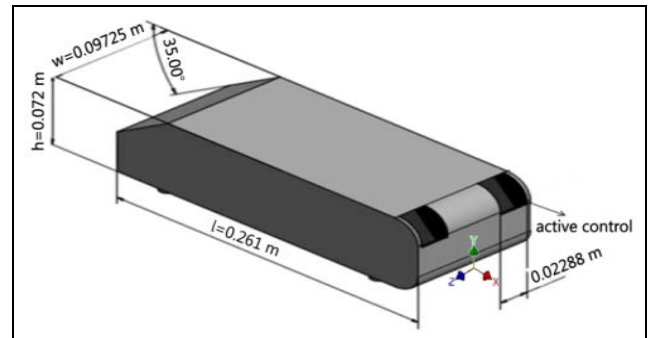
Gambar 2. Sketsa jet sintetik yang dibentuk oleh aktuator dalam *cavity* dengan saluran keluar orifis<sup>[9]</sup>.

*Synthetic jet* merupakan salah satu kontrol aktif aliran yang digunakan dalam bidang aerodinamika untuk memodifikasi lapisan batas agar dapat mengurangi *drag* atau gaya hambat. Mekanisme jet sintetik dihasilkan oleh sebuah aktuator jet sintetik (*Synthetic Jet Actuator/SJA*). Secara teknik, aktuator ini adalah peralatan yang memerlukan input massa netto nol (*zero mass input*), namun menghasilkan *output* momentum netto tidak nol (*non zero*

*momentum output*). Sebuah jet sintetik adalah deretan cincin-cincin *vortex* yang terbentuk secara berurutan. Pada aplikasi aerodinamika, jet sintetik ini memiliki keunggulan untuk memodifikasi lapisan batas dalam upaya mengurangi gaya hambatan (*drag*) aerodinamika. Gb. 2 menunjukkan sketsa konseptual sebuah jet sintetik yang dihasilkan sebuah aktuator.

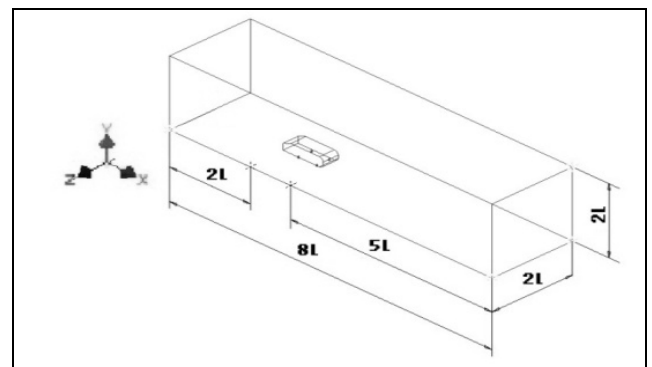
### Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini dikaji pengurangan *drag* pada *bluff body* model kendaraan dengan menggunakan model *reversed Ahmed body* yang mempunyai rasio geometri 0.25 dari *Ahmed body* original<sup>[6]</sup>. Oleh karena itu, model uji mempunyai dimensi panjang ( $l$ ) = 0.261 m, lebar ( $w$ ) = 0.09725 m, dan tinggi ( $h$ ) = 0.072 m dengan sudut pada bagian depan ( $\phi$ ) = 35°. Pada bagian belakang model uji ditempatkan kontrol aktif *synthetic jet* (Gb. 2). Metode pendekatan yang digunakan yaitu metode komputasional dan eksperimental.



Gambar 2. Dimensi *bluff body* model kendaraan

Pada pendekatan komputasional, komputasi domain dari *reversed Ahmed model* yang berbentuk 3D mempunyai panjang ( $L$ ) = 8l, lebar ( $W$ ) = 2l, dan tinggi ( $H$ ) = 2l ( $l$  = panjang model dalam arah-x) ditampilkan pada Gb. 3. Model turbulensi yang digunakan adalah *k-epsilon standard* dengan tipe *meshing* yaitu jenis elemen adalah *tet/hybrid* dengan tipe *hex core* dimana jumlah *mesh volume* yang dihasilkan adalah 1.7 juta.



Gambar 3. Domain aliran dalam CFD

Untuk menggambarkan eksitasi yang dihasilkan oleh *synthetic jet* pada *fluent 6.3* <sup>[10]</sup>, pada *user definite function (UDF)* didefinisikan persamaan sebagai berikut :

$$U(t) = 2.8 \cos (602 \cdot t) \quad (1)$$

Detail kondisi komputasi diberikan pada Tabel 1.

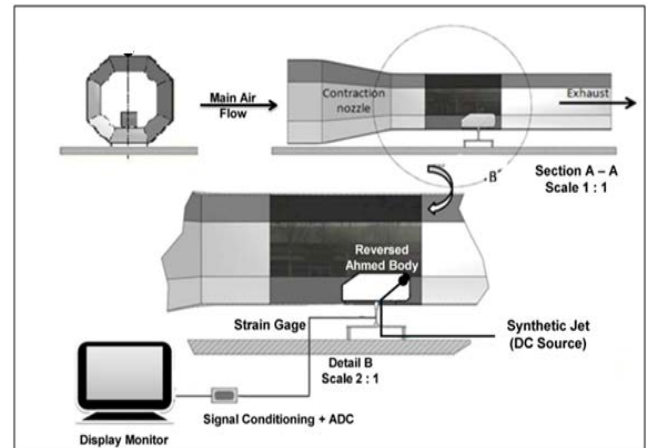
Tabel 1. Kondisi komputasi untuk *synthetic jet*

Kondisi komputasi		
Van model	3D, Unsteady state	
Fluida	Udara	
Sifat-sifat fluida	Kerapatan ( $\rho$ )	1.225 kg/m <sup>3</sup>
	Viskositas ( $\mu$ )	0.000017894 kg/m-s
Kondisi batas tanpa kontrol aliran	Model uji	Dinding
	Tekanan keluar	Tekanan keluar
	Kecepatan masuk	Kecepatan masuk
	Dinding	Dinding
Kondisi batas dengan <i>synthetic jet</i>	Model uji	Dinding
	Tekanan keluar	Tekanan keluar
	Kecepatan masuk	Kecepatan masuk
	Dinding	Dinding
	Frekuensi (f)	96 Hz
	<i>Synthetic jet 1 &amp; 2</i>	UDF
Kecepatan <i>synthetic jet</i>	2 m/s	

Pada pendekatan eksperimental dilakukan uji model eksperimen di terowongan angin kecepatan rendah (*low speed wind tunnel*) yang terkontrol. Terowongan angin yang digunakan merupakan produk dari Armfield dengan kode C2-00, mempunyai geometri panjang 260 cm dan diameter mulut 55 cm. Aliran dalam terowongan angin digerakkan *blower axial* dengan penggerak motor DC yang memiliki putaran 2800 rpm dan daya 1.5 kW. Terowongan angin memiliki satu sesi difuser yang berfungsi untuk menyeragamkan arah aliran. Kecepatan aliran udara maksimum yang mampu dibangkitkan dalam seksi uji adalah 70 km/jam atau 19.44 m/s.

Untuk sistem *synthetic jet*, digunakan modul-modul aktuator *synthetic jet* yang digerakkan oleh sebuah *piezoelectric diaphragms* yang terbuat dari bahan dasar *lead zirconium titanate* (PZT).

Aktuator ini dirancang untuk dapat bergerak dengan konsumsi energi listrik yang kecil. Pada penelitian ini, digunakan *synthetic jet* tipe *synjet xflow 30 cooler 40 watt* yang mempunyai frekuensi (f) 96 Hz yang diukur menggunakan osiloskop dan kecepatan rata-rata yang terukur pada model uji adalah 2 m/s menggunakan *hot wire*. Eksperimen setup dengan *synthetic jet* pada seksi uji terowongan angin diperlihatkan pada Gb. 4. Kecepatan *upstream* ( $U_o$ ) yang digunakan pada pendekatan eksperimental ini adalah sama dengan yang dipakai pada pendekatan komputasi yaitu 2 m/s.



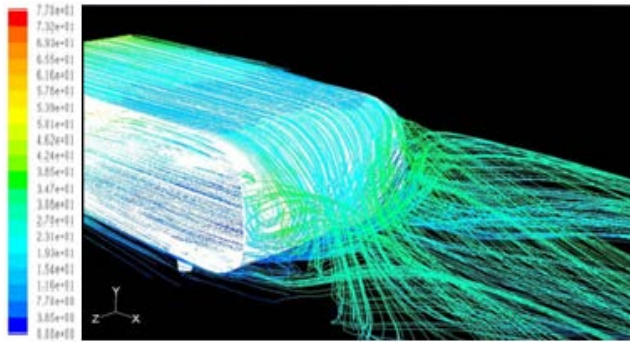
Gambar 4. Eksperimen setup menggunakan kontrol aktif *synthetic jet*

## Hasil dan Pembahasan

### 1. Medan Aliran

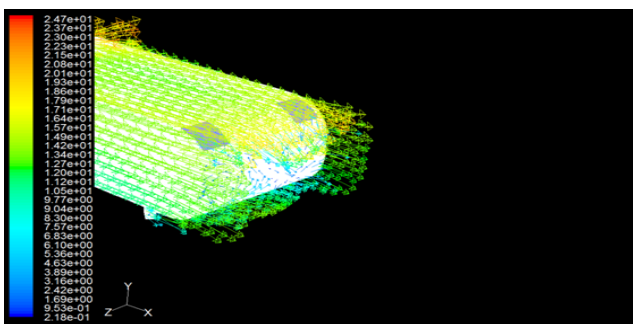
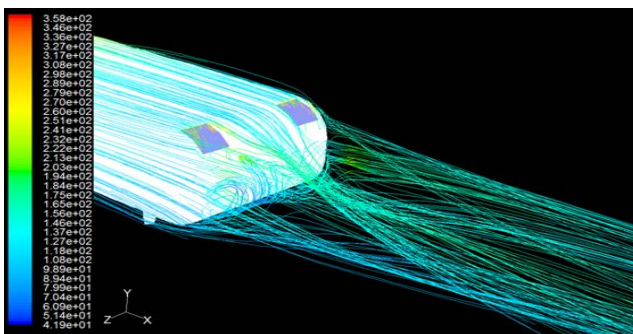
Gb. 5 memperlihatkan bahwa separasi aliran terjadi pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dan mengakibatkan adanya aliran balik sehingga olakan (*wake*) terbentuk. Separasi aliran terjadi karena fluida tidak dapat mengalir mengikuti bentuk permukaan dari *reversed Ahmed model*. Struktur olakan yang terbentuk pada bagian belakang *reversed Ahmed body*, selain disebabkan oleh separasi aliran juga dipengaruhi oleh adanya *vortex longitudinal* yang muncul pada dari bagian tepi samping, sisi belakang pada model *reversed Ahmed body* yang disebabkan karena adanya perbedaan kecepatan aliran antara daerah olakan dan daerah samping. Dari definisi *drag* yang diberikan oleh Onorato et al<sup>[11]</sup> bahwa terbentuknya *drag* aerodinamika pada kendaraan selain disebabkan oleh aliran terseparasi dan tekanan jatuh, juga merupakan efek dari interaksi *vortex longitudinal* maka daerah eksitasi aliran ditempatkan pada sisi belakang dekat tepi samping dimana *vortex longitudinal* terbentuk dengan tujuan mengurangi struktur *vortex* yang terbentuk, mengurangi luasan area olakan dan mengurangi total tekanan jatuh.

Mengingat aliran *synthetic jet* adalah aliran yang bersifat periodik maka hasil komputasi ditampilkan dalam bentuk *pathline* dan vektor kecepatan dengan 2 fase, yaitu fase *suction* maksimum ( $t = \frac{1}{2} T$ ) dan fase *blowing* maksimum ( $t = T$ ). Gb. 6 memperlihatkan *pathline* dan vektor kecepatan dengan kecepatan *synthetic jet* 2 m/s dan kecepatan *upstream* 16.9 m/s.

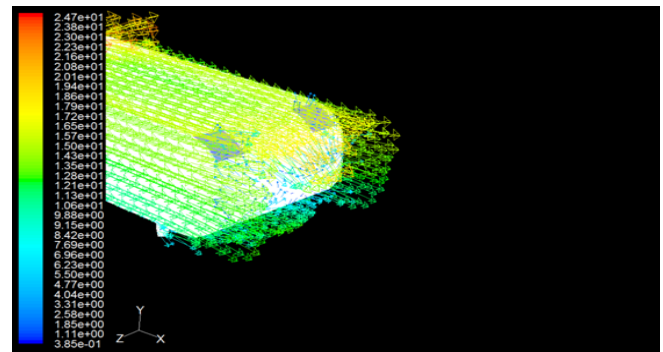
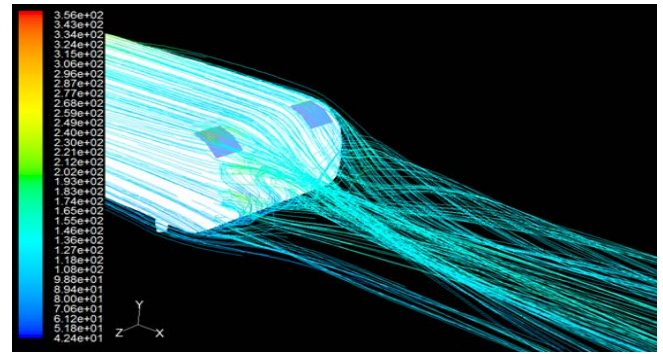


Gambar 5. *Pathline* kecepatan dengan kecepatan *upstream*,  $U_o = 16.7$  m/s tanpa kontrol aliran

Pada Gb. 6 tampak bahwa pada fase *blowing*, *synthetic jet* memberikan pengaruh dimana struktur olakan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed model* berpindah semakin ke atas dan ke belakang (perpindahan positif terhadap sumbu-y dan sumbu-x). Pada fase *suction*, struktur olakan cenderung bergeser ke bawah. Namun secara umum, besarnya area olakan yang teramati pada bagian belakang *reversed Ahmed model* cenderung lebih sedikit dibandingkan dengan *reversed Ahmed model* tanpa kontrol aliran.

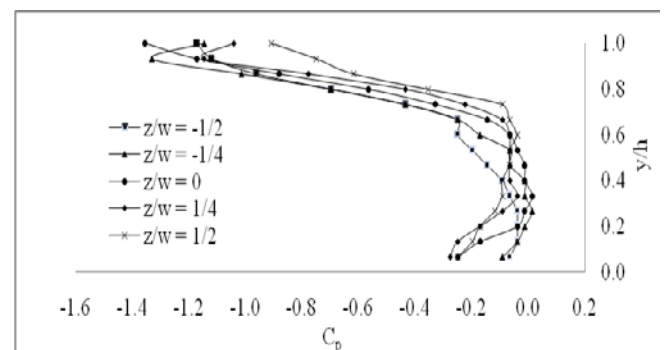


(a). Fase *suction* maksimum,  $t = \frac{1}{2} T$

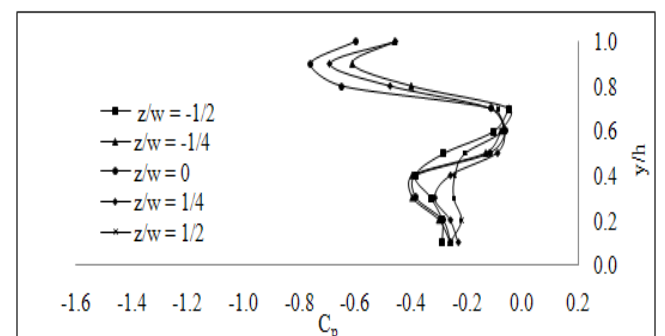


(b). Fase *blowing* maksimum,  $t = T$

Gambar 6. *Pathline* dan vektor kecepatan dengan kecepatan *upstream*,  $U_o = 16.7$  m/s dan *synthetic jet*,  $U_{sj} = 2$  m/s.



Gambar 7. Distribusi koefisien tekanan tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*



Gambar 8. Distribusi koefisien tekanan dengan *synthetic jet*,  $U_{sj} = 2$  m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*



Gb. 7 menunjukkan hasil distribusi koefisien tekanan tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*. Gb. 8 memperlihatkan hasil distribusi koefisien tekanan dengan kontrol aliran *synthetic jet* dengan kecepatan 2 m/s. Pada Gb. 7 dan Gb. 8 diperoleh nilai minimum koefisien tekanan seperti terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai minimum koefisien tekanan dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s

No.	Uraian	Koefisien tekanan, $C_p$
1	Tanpa kontrol aliran	-1.3556
2	Dengan <i>synthetic jet</i> ( $U_{sj} = 2$ m/s)	-0.7585

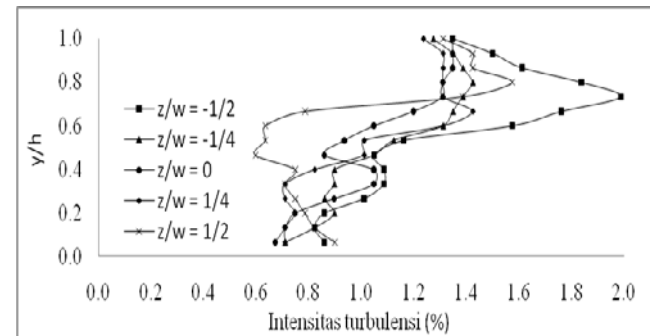
Pengaruh dari penambahan kontrol aliran berupa *synthetic jet* yang diletakkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body* yang merupakan daerah dimana separasi dan olakan terbentuk seperti yang terlihat pada Gb. 8 adalah meningkatnya nilai koefisien tekanan statik pada bagian belakang dari *reversed Ahmed*. Hal tersebut terlihat pada Tabel 2 dimana nilai koefisien tekanan statik minimum mengalami kenaikan. Peningkatan nilai koefisien tekanan statik yang diperoleh sebesar 44.04%. Selain hal tersebut, juga diperoleh informasi bahwa nilai minimum koefisien tekanan yang diperoleh mengalami pergeseran dari  $y/h=1$  dan  $z/w=0$  tanpa kontrol aliran ke  $y/h = 0.9$  dan  $z/w = 0$  dengan adanya *synthetic jet*.

## 2. Intensitas Turbulensi

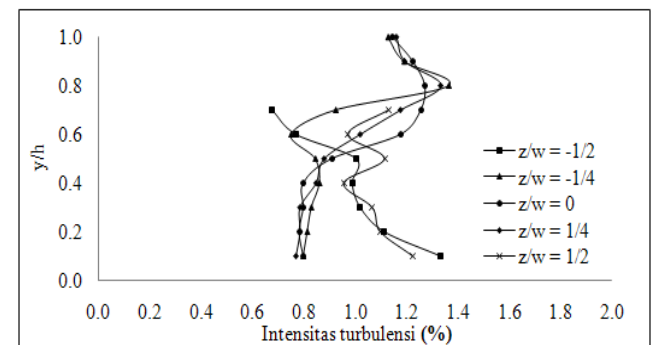
Pada daerah *downstream* dari *reversed Ahmed body* yang ditunjukkan oleh medan aliran tampak bahwa adanya suatu struktur olakan yang terbentuk. Parameter intensitas turbulensi untuk menyatakan secara kuantitatif besaran dari struktur olakan ini merupakan gambaran turbulensi yang terjadi dalam aliran. Gb. 9 menunjukkan hasil komputasi untuk intensitas turbulensi tanpa kontrol aktif aliran dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s. Kontrol aliran *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* dengan kecepatan 2 m/s memberikan pengaruh terhadap intensitas turbulensi dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s, seperti yang terlihat pada Gb. 10. Nilai maksimum intensitas turbulensi yang diperoleh dari Gb. 9 dan Gb. 10 dapat dilihat pada Tabel 3.

Penempatan kontrol aliran berupa *synthetic jet* dengan kecepatan 2 m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengurangan nilai intensitas maksimum sebesar 31.29%. Hal lain yang

dapat diamati adalah terjadi pergeseran lokasi dimana nilai maksimum intensitas turbulensi terjadi karena adanya pengaruh kontrol aliran *synthetic jet*. Lokasi pergeseran nilai maksimum intensitas turbulensi dari model *reversed Ahmed body* tanpa kontrol aliran pada posisi  $y/h = 0.73$  dan  $z/w = -1/2$ , cenderung bergeser ke posisi  $y/h = 0.8$  dan  $z/w = -1/4$  dengan adanya *synthetic jet*.



Gambar 9. Intensitas turbulensi tanpa kontrol aliran pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*



Gambar 10. Intensitas turbulensi dengan *synthetic jet*,  $U_{sj} = 2$  m/s pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body*

Tabel 3. Nilai maksimum intensitas turbulensi dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s

No.	Uraian	Intensitas Turbulensi (%)
1	Tanpa kontrol aliran	1.99
2	Dengan <i>synthetic jet</i> ( $U_{sj} = 2$ m/s)	1.37

## 3. Drag Aerodinamika

Nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* dengan kecepatan *synthetic jet* 2 m/s dan kecepatan *upstream* 16.7 m/s yang diperoleh dirangkum

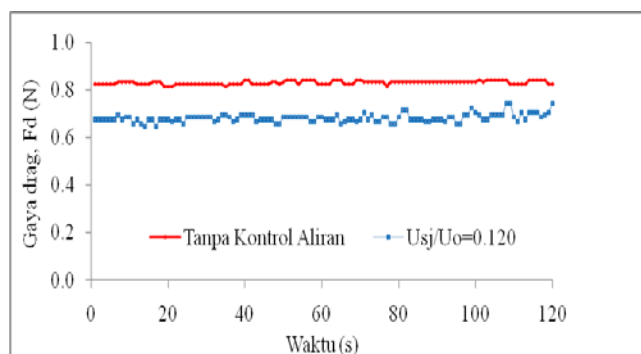
dalam Tabel 4. Pada Tabel 4 terlihat bahwa terdapat pengaruh dari penempatan kontrol aliran *synthetic jet* pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* terhadap nilai koefisien *drag* rata-rata dan pengurangan *drag*. Pada perbandingan kecepatan *synthetic jet* terhadap kecepatan *upstream*,  $U_{sj}/U_o = 0.12$ , pengurangan *drag* yang diperoleh adalah 18.49%.

Tabel 4. Nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* dengan *synthetic jet*, CFD

No.	Koefisien <i>drag</i> , $C_d$		Pengurangan <i>drag</i> (%)
	Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2 \text{ m/s}$	
1	1.756	1.431	18.49

#### 4. Validasi dengan Pendekatan Eksperimen

Untuk memvalidasi hasil komputasi numerik *drag* aerodinamika yang telah diperoleh, maka digunakan *load cell*. Data gaya *drag* yang diambil adalah sebanyak 120 buah untuk perbandingan kecepatan *synthetic jet* dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s dengan interval waktu pengambilan data adalah 120 detik. Data yang diperoleh berfluktuasi, seperti diperlihatkan pada Gb. 11.



Gambar 11. Fluktuasi data gaya *drag* dengan kecepatan *upstream* 16.7 m/s dan *synthetic jet* 2 m/s.

Nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* yang diperoleh dari eksperimen diringkas dalam Tabel 5. Pada Tabel 5 terlihat bahwa dengan adanya kontrol aliran *synthetic jet* yang dipasang pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap nilai koefisien *drag* rata-rata dan pengurangan *drag*. Pengurangan *drag* yang dihasilkan adalah 17.83%. Dan pada Tabel 6 diperoleh perbedaan hasil komputasi dengan eksperimen untuk penggunaan kontrol aliran berupa *synthetic jet* sebesar 0.66%.

Tabel 5. Nilai koefisien *drag* dan pengurangan *drag* dengan *synthetic jet*, Eksperimen

No.	Koefisien <i>drag</i> , $C_d$		Pengurangan <i>drag</i> (%)
	Tanpa kontrol aliran	Kecepatan <i>synthetic jet</i> , $U_{sj} = 2 \text{ m/s}$	
1	1.244	1.022	17.83

Tabel 6. Perbandingan pengurangan *drag* yang diperoleh dengan pendekatan komputasional dan eksperimental, *synthetic jet*

No.	Uraian	Pengurangan <i>drag</i> (%)
1	Komputasi	18.49
2	Eksperimen	17.83
3	Perbedaan	0.66

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil komputasional dan eksperimen yang diperoleh maka dapat diambil suatu kesimpulan sebagai berikut :

1. Penempatan *synthetic jet* pada bagian belakang dari *reversed Ahmed body* memberikan pengaruh terhadap pengurangan olakan dan *vortex* yang terbentuk.
2. Diperoleh peningkatan nilai koefisien tekanan dan penurunan intensitas turbulensi masing-masing sebesar 44.04% dan 31.29% pada bagian belakang *reversed Ahmed body* dengan adanya *synthetic jet*.
3. Pada pendekatan komputasional dan eksperimen, pengurangan *drag* yang diperoleh masing-masing sebesar 18.49% dan 17.83% dengan penggunaan *synthetic jet* yang ditempatkan pada bagian belakang *reversed Ahmed body*.

## 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)

$\phi$	sudut kemiringan model uji (derajat)
L	panjang domain komputasi
W	lebar domain komputasi
H	tinggi domain komputasi
t	waktu
$\rho$	kerapatan ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	viskositas ( $\text{kg/m-s}$ )
f	frekuensi (Hz)
$U_o$	kecepatan <i>upstream</i> (m/s)
$U_{sj}$	kecepatan <i>synthetic jet</i> (m/s)
$U_{sj}/U_o$	perbandingan kecepatan <i>synthetic jet</i> dengan kecepatan <i>upstream</i>
y/h	perbandingan antara tinggi <i>grid</i> dengan tinggi model
z/w	perbandingan antara lebar <i>grid</i> dengan lebar model
$C_p$	koefisien tekanan
IT	intensitas turbulensi (%)
$C_d$	koefisien <i>drag</i>

- [9]. Mello, Miranda H.C., Catalano, Martini F., Study of the Effect of Synthetic Jet Actuators on the Delay of Transition of the Boundary Layer Developed on a Flat Plate, 24<sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences, pp. 1-9 (2004).
- [10]. User's Guide Manual of Fluent 6.3, September (2006)
- [11]. Onorato M, Costeli AF and Garonne A., Drag Measurement through wake analysis, SAE, SP-569., International Congress and Exposition, Detroit (1984).

## Referensi

- [1] Hinterberger C., Villalba M. G. & Rodi W., Large eddy simulation of flow around the Ahmed body, Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany (2004).
- [2]. Fares E., Unsteady flow simulation of the Ahmed reference body using a lattice Boltzmann approach, Computers and Fluids, 35, pp. 940-950 (2006).
- [3]. 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).
- [4]. Franck G. & D'Elia J., CFD modeling of the flow around the Ahmed vehicle model, <http://www.cimec.org.ar> (2004).
- [5]. Minguez M., Pasquetti R. & Serre E., 2008, High-order Large Eddy Simulation of Flow over the Ahmed Body" Car Model", Physics of Fluids, 20
- [6]. Ahmed S.R., G. Ramm and G. Falin., SAE paper, Detroit, Michigan, USA, 840300-01 (1984).
- [7]. Anderson, J.D., Fundamental of Aerodynamics (3rd ed), Singapore, McGraw-Hill (2001).
- [8]. Brunn A., Wassen E., Sperber D., Nitsche W., Thiele F., Active Drag Control for a Generic Car Model, Active Flow Control, NNFM 95, pp. 247-259 (2007).