

DISERTASI

**KAJIAN AERODINAMIKA KOMBINASI KONTROL
PASIF DAN AKTIF ALIRAN PADA
MODEL KENDARAAN VAN**

***A STUDY ON THE AERODYNAMICS OF COMBINED
PASSIVE-ACTIVE FLOW CONTROLS
ON VAN MODEL VEHICLES***

**MUH. SETIAWAN SUKARDIN
P1400316001**



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

**KAJIAN AERODINAMIKA KOMBINASI KONTROL PASIF DAN AKTIF
ALIRAN PADA MODEL KENDARAAN VAN**


Diajukan oleh :

MUH. SETIAWAN SUKARDIN

Nomor Pokok P1400316001


Telah diperiksa dan dinyatakan memenuhi syarat untuk melaksanakan
Ujian Pra Promosi

Menyetujui
Promotor


Prof. Dr. Ir. H. Nasaruddin Salam, MT

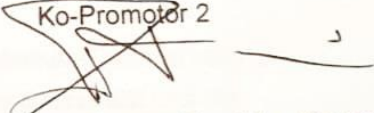
Tgl. Persetujuan :

Ko-Promotor 1


Dr. Eng. Jalaluddin, ST, MT

Tgl. Persetujuan :

Ko-Promotor 2


Dr. Rustan Tarakka, ST, MT

Tgl. Persetujuan :

Mengetahui,
Ketua Program Studi S3
Teknik Mesin Universitas Hasanuddin




Dr. Rustan Tarakka, ST, MT

PRAKATA

Alhamdulillah Rabbil 'Alamin, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan hidayah-Nya sehingga rangkaian penelitian disertasi ini telah selesai dengan baik.

Ide awal penelitian ini dilatarbelakangi oleh tantangan yang berkelanjutan bagi produsen mobil di seluruh dunia untuk penghematan bahan bakar dan penurunan dari rumah kaca emisi gas diupayakan dalam bentuk pengurangan *drag* aerodinamika. Aerodinamika kendaraan mobil dalam bentuk model Ahmed body telah banyak dipelajari oleh peneliti-peneliti melalui pendekatan eksperimental dan numerik. Untuk koefisien *drag* aerodinamis dan pembentukan *vortex* pada sudut yang berbeda dari jendela belakang mobil dengan menggunakan model reversed Ahmed body (model kendaraan van). Tantangan mendesain kendaraan van tanpa penambahan perubahan geometri membutuhkan solusi baru melalui kontrol aliran aerodinamika. Penelitian ini menguji kombinasi konfigurasi kontrol aliran untuk mengurangi *drag* aerodinamis. Kombinasi kontrol aliran yang diaplikasikan berupa kontrol pasif aliran (*dimple*) dan kontrol aktif aliran (*blowing*).

Selama penelitian ini dilakukan, banyak ditemukan kendala yang cukup menantang dengan segala keterbatasan, diantaranya alat ukur dan fasilitas pendukung simulasi dan eksperimental, kondisi peneliti yang jatuh sakit. Namun atas bantuan luar biasa dari bapak-bapak pembimbing, serta rekan-rekan tim sesama peneliti, sedikit-demi sedikit semua kendala dapat diatasi. Oleh karena itu, perkenankan penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Nasaruddin Salam, MT, selaku Promotor yang luar biasa dalam membimbing hingga akhir penelitian ini.
2. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin, ST, MT dan Bapak Dr. Rustan Tarakka, ST, MT sebagai Ko Promotor yang telah menyediakan waktu tenaga dan pikiran yang sangat bermanfaat dalam mengarahkan penyelesaian studi ini
3. Seluruh tim penguji yang terdiri dari Bapak Prof. Dr. Ir. H. Syukri Himran, MSME, Prof. Dr. Luther Sule, MT., Dr. Ir. H. Nasaruddin Azis, M.Si, Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST, MT., dan penguji eksternal dari Universitas Indonesia yang terhormat Bapak Prof. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng. yang telah bersedia menguji dan memberikan masukan dan arahan yang sangat berharga.
4. Ketua Program Studi Doktor Teknik Mesin Bapak Dr. Rustan Tarakka, ST, MT., yang telah mengarahkan dan mendorong penulis dalam penyelesaian studi ini.
5. Teman sejawat, mahasiswa S3, S2 dan S1, khususnya Dr. Khairil Anwar, ST, MT., Dr. Dermawan, ST, MT, Dr. Victus Koten, ST, MT., Muhammad Ihsan, ST, M. Eng, Wawan Rauf, ST, MT, M. Chatib, ST, Haryanto, ST, dan Laboran Lab.Mekanika Fluida, Bapak Hafriison, ST., serta semua pihak yang banyak membantu dalam simulasi komputasi, eksperimental dan penyelesaian disertasi ini.
6. Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia Industri Kementerian Perindustrian Republik Indonesia atas bantuan biaya studi S3.
7. Tenaga medis hemodialisa RS. Mitra Husada, khususnya Ibu Prof.Dr.dr.Haerani Rasyid, M.Kes, SpPD, K-GH,FINASIM,Sp.GK, Ririn Lestari, Ns, Rahmatul Hidayah, Ns, Sri Wahyuni, Ns, Husnaini Ramli, Ns, Apriana, Ns atas pelayanan perawatan selama studi.

Selanjutnya, saya haturkan jazakallah khair dan doa kepada kedua orang tua tercinta, Alm. Drs. H. Sukardin BM dan Hj. Murni Kuruseng,BA, yang telah melahirkan, mendidik, dan membesarkan serta senantiasa mendoakan saya. Terima kasih dan doa kepada kedua

mertua, Bapak Alm.Prof. Dr. M. Yamin Sani, MS dan Dra. Kurniah, yang senantiasa memotivasi untuk menyelesaikan studi. Terima kasih kepada Saudara-saudara, Arif Gunawan, SP, M.AP, Nurhidayat, ST, MT, Nuryadin, ST, dr. Rahmatullah, dr. Hikmatullah dan saudara ipar yang telah memberikan doa dan dukungan moril dan materiil selama ini. Akhirnya salam dan terima kasih yang mendalam kepada istri tercinta dr. Amalia Y. Sani, M.Kes, Sp.PA dan anak-anakku tercinta ; Ahmad Rifqy, Ahmad Ridho, Ahmad Rayyan, Ahmad Raffah yang selalu mendoakan dan sabar memberikan dukungan selama studi dan menjalani perawatan hemodialisa.

Hanya kepada Allah saya memohon diberikan balasan yang setimpal atas dorongan dan dukungan semua pihak. Semoga disertasi ini membawa manfaat bagi pengemangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Makassar, 18 Juni 2021

Penulis

ABSTRAK

MUH. SETIAWAN SUKARDIN. Kajian Aerodinamika Kombinasi Kontrol Pasif dan Aktif Aliran pada Model Kendaraan Van. (dibimbing oleh Nasaruddin Salam, Jalaluddin, Rustan Tarakka)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis metode kontrol separasi aliran turbulen secara pasif dan aktif yang dapat diterapkan dalam mengurangi area separasi sehingga memperkecil *drag* aerodinamika pada model kendaraan van. Penelitian ini telah dilaksanakan dengan mengembangkan model kombinasi kontrol pasif dan aktif separasi aliran melalui pendekatan komputasi (aplikasi CFD). Hasil pendekatan komputasi telah divalidasi melalui pengujian eksperimental pada model kendaraan van. Pada penelitian ini digunakan model uji disederhanakan dalam bentuk *reversed Ahmed body* yang mengkombinasikan kontrol pasif (*dimple*) dan kontrol aktif (*blowing*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan kombinasi kontrol pasif dan kontrol aktif mampu mengurangi area separasi sehingga mereduksi *drag* aerodinamika pada model kendaraan van. Reduksi *drag* aerodinamika tertinggi dicapai pada kecepatan *upstream* 22.2 m/s, dengan kombinasi konfigurasi *dimple* 2 baris zigzag, dan kecepatan *blowing*, Ubl 1.5 m/s diperoleh 14.17% untuk pendekatan komputasi serta 14.10% untuk pendekatan eksperimental.

Kata kunci : *drag* aerodinamika, kontrol Pasif, kontrol Aktif, *dimple*, *blowing*

ABSTRACT

MUH. SETIAWAN SUKARDIN. *A Study on the Aerodynamics of Combined Passive-Active Flow Controls on Van Vehicle Models. (supervised by Nasaruddin Salam, Jalaluddin, Rustan Tarakka)*

This study aims to analyze the passive and active turbulent flow separation control method that can be applied in reducing the separation area to minimize aerodynamic drag on the van model. This research has been carried out by developing a combination model of passive control and active flow separation through a computational approach (CFD application). The results of the computational approach have been validated through experimental testing on the van model. In this study, a simplified test model is used in the form of Reversed Ahmed body which combines passive control (dimple) and active control (blowing). The results showed that the combination of passive control and active control has been able to reduce the separation area. It has been to reduce aerodynamic drag on the van model. The highest aerodynamic drag reduction was achieved at an upstream speed of 22.2 m/s, with a combination of 2 zigzag line dimple configurations, and blowing speed, U_{bl} 1.5 m/s obtained 14.17% for the computational approach and 14.10% for the experimental approach.

Keywords: Aerodynamic Drag, Passive Control, Active Control, Dimple, Blowing

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PRAKATA	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xvii
Bab I	Pendahuluan 1
A	Latar belakang 1
B	Perumusan masalah penelitian 7
C	Tujuan penelitian 7
D	Keterbaruan penelitian 8
E	Batasan masalah 9
Bab II	Tinjauan pustaka 10
A	Separasi aliran 10
B	Lapisan batas 11
C	<i>Drag</i> aerodinamika 15
D	Kontrol pasif separasi aliran 19
E	Kontrol aktif separasi aliran 25
Bab III	Metodologi penelitian 29
A	Tahapan penelitian 29
B	Tahapan komputasi 35
C	Tahapan eksperimental 39
Bab IV	Hasil dan pembahasan 50

A	Pengaruh dimple pada permukaan pelat	50
1.	Pendekatan komputasi	50
2.	Pendekatan eksperimental	52
B	Pengaruh kontrol pasif berupa <i>dimple</i> pada reversed Ahmed body	61
1.	Medan aliran	61
2.	Medan tekanan.....	78
3.	<i>Drag</i> aerodinamika	109
C	Pengaruh Penerapan Kombinasi Kontrol Pasif <i>Dimple</i> dan Kontrol Aktif <i>Blowing</i> pada Reverse Ahmed body	128
1.	Medan aliran	128
2.	Medan tekanan.....	148
3.	<i>Drag</i> aerodinamika	187
Bab V	Kesimpulan.....	206
	DAFTAR PUSTAKA	207
	DAFTAR PUBLIKASI	211
	LAMPIRAN	212

DAFTAR GAMBAR

Nomor		halaman
1	<i>Road map</i> penelitian dasar bidang kontrol aliran separasi	6
2	Topologi aliran <i>near-wake</i> (a) <i>isosurface</i> $C_{pl}=1,22$ dan (b) medan total kerugian gesek diukur secara transversal	10
3	Topologi aliran jendela belakang bus (a) Visualisasi aliran (b) Simulasi numerik	11
4	<i>Logitudinal Vortex</i> yang terjadi di bagian belakang mobil (a) tampak samping (b) pola garis alir yang terjadi di sisi belakang mobil (c) visualisasi <i>longitudinal vortex</i>	11
5	Ilustrasi interaksi yang kuat antara daerah kental dan daerah encer dibagian belakang lairan melewati benda tumpul	12
6	Aliran fluida viskous di sepanjang sebuah pelat rata	13
7	Aliran melalui sebuah permukaan lengkung	14
8	Aliran dua-dimensi melewati sebuah pelat rata yang normal terhadap arus bebas (a) pola aliran dengan gaya geseran normal terhadap arus bebas (b) Distribusi tekanan sesuai dengan pengukuran-pengukuran	16
9	Efek aspek rasio pada koefisien <i>drag</i> untuk pelat persegi yang normal terhadap aliran	17
10	Aliran melalui silinder bulat (a) pemisahan berlapis; (b) pemisahan bergolak	18
11	Geometri pelat datar dengan (a) dua baris <i>dimple</i> cekung, (b) 8 baris <i>dimple</i> cekung	20
12	Visualisasi aliran sesaat untuk kasus delapan <i>dimple</i> tampak kontur ω pada (a) $y/d = 0.0$ dan (b) $y/d = 5.5$ melewati pusat <i>dimple</i> di baris pertama dan kedua secara berurut. (c) tampak atas <i>isosurface</i> dari kreteria Q dengan kontur gesekan	

permukaan dinding. Kontur ωz pada (d) $z/d = 3.5$ dan (e) $z/d = 22$ sesuai garis putus-putus vertikal di atas	21
13 <i>Dimple Ratio</i>	22
14 Kontur energi kinetik turbulen (a) diameter ratio (DR)=0; (b) DR = 0.05; (c) DR = 0.2; (d) DR = 0.3; (e) DR = 0.4; (f) DR = 0.5	23
15 Variasi C_D dari konfigurasi <i>dimple</i> yang berbeda	24
16 Gaya <i>Drag</i> yang berfluktuatif pada kecepatan <i>upstream</i> $U_o = 13,9\text{m/s}$ Diperoleh dari pengujian eksperimental	27
17 Diagram Alir Penelitian	30
18 Model pelat dengan mengaplikasikan konfigurasi baris <i>dimple</i> pada permukaan atasnya	31
19 Tampak Kontrol Pasif <i>Dimple</i> (a) formasi sejajar <i>dimple</i> (b) <i>dimple semi-spherical (inward)</i> pada pela	31
20 model Reversed Ahmed body skala 1 : 6 tanpa menggunakan kontrol aliran pasif dan aktif	33
21 model Reversed Ahmed body skala 1 : 6 menggunakan 1 baris <i>dimple</i>	33
22 Model Reversed Ahmed body skala 1 : 6 menggunakan 2 baris <i>dimple</i>	33
23 Model Reversed Ahmed body skala 1 : 6 menggunakan kontrol aktif aliran berupa <i>blowing</i>	34
24 Model Reversed Ahmed body skala 1 : 6 menggunakan kombinasi kontrol pasif dan aktif aliran berupa 2 baris <i>dimple</i> dan 1 baris <i>blowing</i>	34
25 Tampak penempatan titik koordinat y/h dan z/w dan titik pengukuran Tekanan	38
26 <i>Wind Tunnel</i>	40
27 Benda uji pada seksi uji wind tunnel	41
28 Sketsa Penempatan Model Uji pada <i>Load Cell</i> dan display rekaman data pengujian	42

29	Pathline kecepatan tampak samping dan isometri pada pelat tanpa dimple pada $U_0 = 20$ m/s	51
30	Pathline kecepatan tampak samping dan isometri pada pelat dengan konfigurasi Dimple 2 Baris sejajar pada $U_0 = 20$ m/s	51
31	Pathline kecepatan tampak samping dan isometri pada pelat dengan konfigurasi dimple baris sejajar pada $U_0 = 20$ m/s	52
32	Hubungan koefisien tekanan C_p dengan posisi tapping pada 6 baris dimple dengan variasi kecepatan upstream	54
33	Hubungan antara koefisien tekanan pada $x/L = 0.95$ dengan jumlah baris dimple dengan variasi kecepatan upstream	56
34	Hubungan antara Koefisien Tahanan (C_d) dengan Bilangan Reynold (Re) pada enam tingkat baris dimple konfigurasi Sejajar	58
35	Hubungan antara Koefisien Tahanan (C_d) dengan Bilangan Reynolds (Re) pada enam tingkat baris dimple, konfigurasi zig-zag	59
36	Hubungan antara Koefisien Tahanan (C_d) dengan Jumlah baris dimple (N) pada tujuh tingkat Bilangan Reynolds, konfigurasi Sejajar	59
37	Hubungan antara Koefisien Tahanan (C_d) dengan Jumlah baris dimple (N) pada tujuh tingkat Bilangan Reynolds, konfigurasi zigzag	60
38	Hubungan antara Koefisien Tahanan dengan jumlah baris dimple (N) pada 3 tingkat Bilangan Re , konfigurasi sejajar dan zigzag	60
39	Karakteristik pola paliran pada $U_0 = 11.1$ m/s	64
40	Karakteristik pola aliran pada $U_0 = 13.9$ m/s	67
41	Karakteristik pola aliran pada $U_0 = 16.7$ m/s	69
42	Karakteristik pola aliran pada $U_0 = 19.4$ m/s	72
43	Karakteristik pola aliran pada $U_0 = 20.0$ m/s	74
44	Karakteristik pola aliran pada $U_0 = 22.2$ m/s	77
45	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 11.1$ m/s	82
46	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 13.9$ m/s	86

47	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 16.7$ m/s	90
48	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 19.4$ m/s	94
49	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 20.0$ m/s	98
50	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 22.2$ m/s	102
51	Perbandingan gaya drag (F_d) eksperimental terhadap waktu pengujian pada kecepatan upstream $U_0 = 11.1$ m/s 1 baris	105
52	Perbandingan C_d setiap model pada $U_0 = 11.1$ m/s	108
53	Perbandingan C_d setiap model pada $U_0 = 13.9$	111
54	Perbandingan C_d setiap model pada $U_0 = 16.7$ m/s	114
55	Perbandingan C_d setiap model pada $U_0 = 19.4$ m/s	116
56	Perbandingan C_d setiap model pada $U_0 = 20.0$ m/s	119
57	Perbandingan C_d setiap Model tanpa dimple $DR=0,00$ dan menggunakan dimple $DR=0.20$, $DR = 0.25$ $DR =0.50$	122
58	Pathline kecepatan model dengan kombinasi dimple dan blowing pada $U_0 = 11.1$ m/s	130
59	Pathline kecepatan model dengan kombinasi dimple dan blowing pada $U_0 = 13.9$ m/s	133
60	Pathline kecepatan model dengan kombinasi dimple dan blowing pada $U_0 = 16.7$ m/s	136
61	Pathline kecepatan model dengan kombinasi dimple dan blowing pada $U_0 = 19.4$ m/s	139
62	Pathline kecepatan model dengan kombinasi dimple dan blowing pada $U_0 = 20.0$ m/s	142
63	Pathline kecepatan model dengan kombinasi dimple dan blowing pada $U_0 = 22.2$ m/s	145
64	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 11.1$ m/s	151
65	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 13.9$ m/s	155
66	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 16.7$ m/s	161
67	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 19.4$ m/s	166
68	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 20.0$ m/s	172
69	Perbandingan koefisien tekanan pada $U_0 = 22.2$ m/s	177

70	Fluktuasi gaya drag (F_d) pada Kecepatan upstream 11.1 m/s	181
71	Perbandingan C_d komputasi dan eksperimental pada $U_0=11.1$ m/s	183
72	Perbandingan C_d komputasi dan eksperimental pada $U_0 = 13.9$ m/s	186
73	Perbandingan C_d komputasi dan eksperimental pada $U_0 = 16.7$ m/s	188
74	Perbandingan C_d komputasi dan eksperimental pada $U_0 = 19.4$ m/s	191
75	Perbandingan C_d komputasi dan eksperimental pada $U_0=20$ m/s	193
76	Perbandingan C_d komputasi dan eksperimental pada $U_0 = 22.2$ m/s	196

DAFTAR TABEL

Nomor		halaman
1	Perbandingan Koefisien <i>Drag variasi rasio dimple</i>	22
2	Koefisien <i>drag</i> dan pengurangan <i>drag</i> aerodinamika	26
3	Perbandingan Koefisien <i>Drag</i> (C_D)	27
4	Metode pengembangan <i>numerical prediction tools</i>	34
5	a. Kondisi komputasi untuk <i>blowing</i> dan <i>dimple</i>	35
	b. Data eksperimen drag aerodinamika sebanyak $n = 120$ data	44
	c. Analisa <i>grid independency</i>	48
6	C_p pada titik pengukuran setelah formasi dimple $x/L = 0.95$	55
7	Koefisien Tahanan (C_d) dengan Bilangan Reynolds (Re) pada Enam tingkat baris dimple, konfigurasi Sejajar	57
8	Koefisien Tahanan (C_d) dengan Bilangan Reynolds (Re) pada enam tingkat baris dimple, konfigurasi Zigza	58
9	Koefisien tekanan minimum pada $U_0 = 11.1$ m/s	82
10	Koefisien tekanan minimum pada $U_0 = 13.9$ m/s	86
11	Koefisien tekanan minimum pada $U_0 = 16.7$ m/s	90
12	Koefisien tekanan minimum pada $U_0 = 19.4$ m/s	94
13	Koefisien tekanan minimum pada $U_0 = 20.0$ m/s	98
14	Koefisien tekanan minimum pada $U_0 = 22.2$ m/s	103
15	Koefisien drag pendekatan komputasi	104
16	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 11.1$	107
17	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 13.9$ m/s	110
18	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 16.7$ m/s	113
19	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 19.4$ m/s	116
20	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 20.0$ m/s	118
21	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 22.2$ m/s	121
22	Koefisien tekanan minimum rata-rata pada $U_0 = 11.1$ m/s	151
23	Koefisien tekanan minimum rata-rata pada $U_0 = 13.9$ m/s	156

24	Koefisien tekanan minimum rata-rata pada $U_0 = 13.9$ m/s	161
25	Koefisien tekanan minimum rata-rata pada $U_0 = 19.4$ m/s	167
26	Koefisien tekanan minimum rata-rata pada $U_0 = 20.0$ m/s	172
27	Koefisien tekanan minimum rata-rata pada $U_0 = 22.2$ m/s	178
28	Koefisien drag pendekatan komputasi	180
29	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 11.1$ m/s	183
30	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 13.9$ m/s	185
31	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 16.7$ m/s	188
32	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 19.4$ m/s	190
33	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 20.0$ m/s	193
34	Perbandingan koefisien drag pada $U_0 = 22.2$ m/s	195

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Simbol	Uraian	Unit
A	Luas karakteristik benda	m ²
C _d	Koefisien <i>drag</i>	-
C _p	Koefisien tekanan	-
C _x	Koefisien <i>drag</i> rata-rata	-
D	Total gaya drag	N
L	Panjang model uji	m
F _d	Gaya drag	N
H	Tinggi model uji	m
N	Jumlah baris dimple	-
p	Tekanan pada permukaan model uji	Pa
p _o	Tekanan garis aliran (streamline)	Pa
Re	Bilangan Reynolds	-
t	Waktu	s
u _o	Kecepatan udara aliran bebas (upstream)	m/s
u _{avg}	Kecepatan rata-rata	m/s
u _{bl}	Kecepatan blowing	m/s
w	Lebar model uji	m
ρ	Massa jenis fluida	kg/m ³
α	Sudut kemiringan model uji	derajat
μ	Viscositas dinamik	kg/m-s
ν	Viscositas kinematik	kg/m-s
n	total data	
i	nama data	

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tantangan yang berkelanjutan bagi produsen mobil di seluruh dunia untuk penghematan bahan bakar dan penurunan dari rumah kaca emisi gas diupayakan dalam bentuk pengurangan *drag* aerodinamika (Barros dkk. 2017). Peningkatan efisiensi bahan bakar kendaraan dan memerangi kenaikan harga bahan bakar serta lingkungan menantang produsen berpikir di luar sistem kendaraan konvensional dengan berfokus pada aerodinamis. *Drag* Aerodinamika lebih 50 persen dari total *Drag* terhadap gerakan pada kecepatan di atas 70 km/jam (Ahmed dan Murtaza 2016).

Upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi *drag* aerodinamika, yakni; 1) menunda terjadinya separasi menjauh dari *body* kendaraan, 2) memperkecil zona resirkulasi yang berkembang di bagian belakang struktur pusan yang terseparasi, dan 3) memodifikasi aliran yang terjadi secara lokal (Roumeas, Gilliéron, dan Kourta 2008). Pengurangan *drag* dan kebisingan dilakukan dengan mengaplikasi kontrol aliran pada *bluff body*. Kontributor terbesar dari keseluruhan *drag* disebabkan oleh perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang *bluff body*. Perbedaan ini terjadi akibat timbulnya separasi aliran pada bagian belakang *bluff body*. (Barros dkk. 2017). Medan aliran pada daerah olakan (*near wake*) didominasi oleh struktur *vortex* dua dimensi. Gangguan secara periodik dari aktuator jet mempengaruhi separasi lapisan geser pada bagian belakang *bluff body* (Li dkk. 2017).

Aerodinamika kendaraan mobil dalam bentuk model Ahmed body telah banyak dipelajari oleh peneliti-peneliti melalui pendekatan eksperimental dan numerik. P. Gilleron telah membandingkan hasil tes wind tunnel eksperimental dengan nilai simulasi komputasi untuk koefisien

drag aerodinamis dan pembentukan *vortex* pada sudut yang berbeda dari jendela belakang mobil dengan menggunakan model Ahmed body (P. Gilliéron dan Chometon 1999). *Drag* aerodinamis kendaraan tersebut terutama hasil perbedaan tekanan yang signifikan antara depan dan permukaan belakang (D.Barros et. al 2017). Eksistensi dari topologi aliran kompleks yang terdiri dari *vortex* transversal dan longitudinal berasal dari separasi aliran yang terjadi pada bagian atas dan tepi jendela belakang benda uji. Topologi setiap struktur yang rinci dan hasil numerik adalah dibandingkan dengan hasil eksperimen dalam literatur. Hasil yang disajikan dapat digunakan untuk mengembangkan solusi dan parameter kontrol aktif aliran yang kondusif untuk meningkatkan kinerja aerodinamis kendaraan mobil (M. Roumeas et. al., 2008). Jendela belakang dan kaca depan kendaraan ditinjau untuk mendapatkan gambaran pembentukan struktur *swirling* dan proses *vortex bursting*. Pengaruh sudut miring pada pembentukan struktur *swirling* dan menunjukkan lebih lanjut bahwa proses *vortex bursting* dapat ditimbulkan oleh sudut kecil jendela belakang mobil (P. Gilliéron dan Kourta 2010). Medan aliran disekitar olakan terdapat sepasang *vortisitas* dan *trailing vortice* yang berasal dari tepi miring bagian belakang mobil. Fitur aliran yang diprediksi oleh studi komputasi sebangun dengan hasil studi eksperimental baik pada permukaan miring (*slanted surface*) maupun di bagian hilir aliran (*downstream*) model Ahmed *body*. Karakteristik fitur aliran pada permukaan miring bagian belakang dan di dekat *wake region* model Ahmed *body* menunjukkan variasi yang besar dalam jarak yang pendek di kedua arah aliran (Tunay, Yaniktepe, dan Sahin 2016).

Tantangan mendesain mobil tanpa penambahan perubahan geometri membutuhkan solusi baru melalui kontrol aliran aerodinamika. Berbagai konfigurasi kontrol demikian diuji untuk mengurangi *drag* aerodinamis. Kontrol aliran dapat berupa kontrol aktif aliran maupun kontrol pasif aliran. Kontrol aktif fluida diantaranya hisap, meniup dan sintetik jet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa protokol berdasarkan

kontrol dengan hisap, meniup atau sintetik jet memungkinkan mengurangi *drag* aerodinamis sehingga mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi gas buang (A. K. P. Gilliéron 2009).

Pengujian kontrol pasif aliran dengan pendekatan numerik penggabungan persamaan Darcy dan persamaan Navier-Stoke mengaplikasikan *porous* media pada model uji Ahmed *body* menjelaskan bahwa penambahan *porous* media pada benda padat dapat meningkatkan efisiensi kontrol pasif aliran dua dimensi. Penempatan posisi *porous layer* yang tepat di *square back* Ahmed *body* dapat menurunkan Cd hingga 40%. Sedangkan penempatan *porous* media dijendela belakang Ahmed *body* menunjukkan penurunan Cd yang tidak signifikan (Bruneau dan Mortazavi 2008). Efek dari *jet slot* pada *drag* aerodinamis dari model Ahmed *body* dengan sudut miring 25° diselidiki menggunakan teknik large eddy simulation (LES). Tiga arah jet; 1) permukaan miring, 2) horizontal arah berlawanan, 3) 30° terhadap sumbu horizontal bagian atas. Slot jet memiliki efek signifikan pada *near wake* dan *drag* aerodinamika. Pada kasus 1, *tail vortices* meningkat dan *drag* meningkat sekitar 0,91%. Kasus 2 & 3, aplikasi slot jet memperluas zona aliran berlawanan dan menekan *tail vortices*. Mengurangi *drag* aerodinamis total 7.88% dan 3.64% pada masing-masing kasus (Wang dan Mengxia 2012). Studi secara eksperimental pada Re 160.000 - 449000, skala *truck trailer* 1/32 dengan parameter model : 1) tanpa kontrol aliran, 2) spoiler, 3) kombinasi *spoiler, passive air channel, redirector type 1*, 4) kombinasi *spoiler, passive air channel, redirector type 2*, 5) kombinasi *spoiler, passive air channel, redirector type 3*. Studi ini menunjukkan bahwa koefisien *drag* terendah 0,588 pada kombinasi *spoiler, passive air channel, redirector type 2* (Özel dkk. 2015). A.A. Moussa et. al menguji secara numerik penggunaan *bump* sebaris pada tepi atas belakang mobil truk sehingga dapat mereduksi tahanan $6 - 10\%$ (Ait Moussa, Fischer, dan Yadav 2015). *Class 8 Truck* dijadikan model uji pendekatan numerik

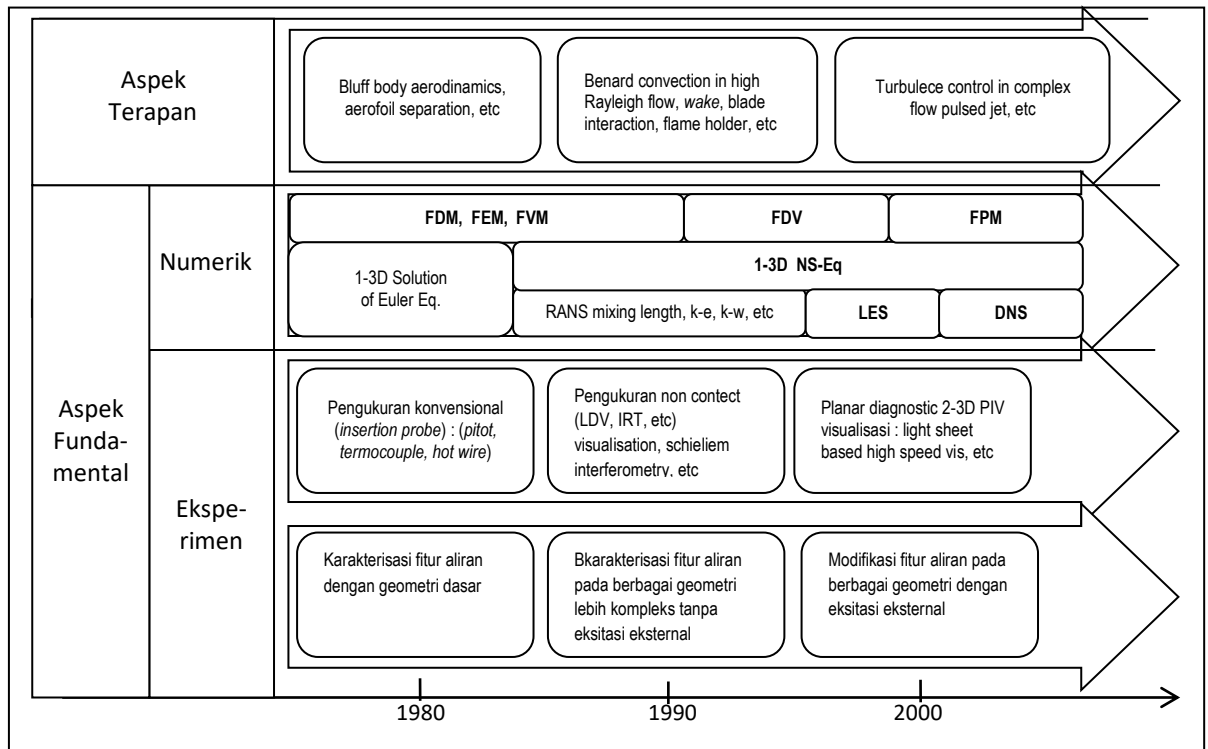
dengan menerapkan kontrol aliran *extended bent* (EB) *flap*, *boat tail* dan kombinasi keduanya. Kecepatan aliran 65 mph (29,05 m/s) menunjukkan kombinasi kontrol pasif mereduksi tahanan aerodinamika 21% dibandingkan tanpa kontrol aliran (R. Pankajakshan et.al, 2016). Kontrol pasif *automatic moving deflector* (AMD) dirancang terinspirasi pergerakan sekunder bulu sayap permukaan isap burung. Bulu sekunder berdiri ketika separasi aliran masif terjadi. Pengujian penerapan AMD pada permukaan belakang Ahmed *body* bersudut kemiringan 25° . Pengujian secara eksperimental dengan bilangan *Reynolds* $1,0 \times 10^5 - 3,8 \times 10^5$ dapat mengurangi *drag* aerodinamika hingga 19% (Kim dkk. 2016). Pengujian *vertical splitter plate* pada depan atau belakang geometri mobil type (*Multi Purpose Vehicle*) MPV menunjukkan pengurangan *drag* aerodinamika hampir 28% pada sudut kemiringan tepi belakang nol pada model kendaraan MPV (A. K. P. Gilliéron 2009).

N. Beratlis et. al. (2014) mengkaji kontrol pasif berbentuk *dimple*, kehadiran *dimple* memicu ketidakstabilan yang menyebabkan transport momentum yang signifikan. Lapisan geser terbentuk sebagai separasi aliran melewati dua baris pertama *dimple* menjadi tidak stabil dan kumpulan *vortex* yang koheren. Ketika *vortex* berkembang melewati pelat atau rangkaian *dimple* maka dinamika aliran menjadi sangat berbeda akibat perubahan transport momentum melintasi lapisan batas (Beratlis, Balaras, dan Squires 2014). Penerapan *dimple* tipe *semi spherical inward* pada benda uji pelat, dengan rasio *dimple* (RD) 0,1 dan kedalaman *dimple* setara dengan dua kali tebal lapisan batas. formasi *dimple* 2 dan 8 baris bersilangan (*staggered arrangement*). E. Livya et.al (2015) mengevaluasi *drag* aerofoil pesawat pada variasi sudut serang $0^\circ - 20^\circ$ yang menerapkan formasi satu *dimple*. Jenis *dimple* yang diterapkan; 1) *square*, 2) *semi spherical*, 3) *compound* (kombinasi *semi spherical* dan *square*) masing-masing berwujud cekung (*inward*) dan cembung (*outward*). Ketika aliran melewati *dimple*, terbentuk gelembung separasi

kecil. Formasi gelembung ini mengakselerasi aliran diantara *dimple* pada permukaan *aerofoil* dan lapisan batas menjadi aliran transisi dari laminar ke turbulen. Aliran transisi ini menunda terjadinya separasi aliran sebagai penyebab penurunan *drag*. Besar *drag* airfoil tanpa *dimple* 0,28 sedangkan menggunakan semi spherical inward 0,05 pada masing-masing sudut serang 20° (Livya, Anitha, dan Valli 2015). S.F.Wong & S.S.Dol (2016) menerapkan satu baris *dimple* ditepi bagian belakang Ahmed body dengan kemiringan permukaan 25° . Pendekatan komputasi model *k-epsilon* pada ANSYS Fluent. Variasi rasio *dimple* (DR) ; 1) 0,005 2) 0,2 3) 0,4 dan 0,5 pada kecepatan 40 m/s diperoleh penurunan *drag* terbesar 1,95% pada DR 0,4 dibandingkan model tanpa *dimple*. (Wong dan Dol 2016)

Alternatif lain mengurangi *drag* aerodinamika tanpa mengubah bentuk kendaraan dapat mengaplikasikan kontrol aktif aliran. Kontrol aktif *synthetic jet* ditempatkan dibagian atas belakang jendela *Ahmed model*. Pendekatan numerik mengurangi *Drag Coefficient* (Cd) hingga 28% (Leclerc dkk. 2006). Pengujian penerapan *suction* dan *blowing* dengan pendekatan numerik pada model kendaraan van menggunakan jenis aliran turbulen *k-epsilon* pada kecepatan ; 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s dan 15 m/s. Pengujian ini mampu mengurangi *drag* menggunakan *suction* hingga 15,83% dan memakai *blowing* sebesar 14, 38% (Harinaldi, Tarakka, dan Simanungkalit 2011). Studi aplikasi *suction* pada van model yang disederhanakan dalam benda uji *reversed Ahmed body* dengan *slant angle* 35° menurunkan *Drag* 24% secara numerik dan 14,8% secara eksperimental kecepatan aliran 11,1 m/s (Harinaldi dkk. 2012). Aplikasi *blowing* menunjukkan *wake* dan *vortex* berkurang karena adanya energi luar dari control aktif *blowing*, koefisien tekanan menurun hingga 34,01% dan penurunan intensitas turbulensi 12,94%. Penurunan *drag* 13,92 % secara eksperimental serta 11,11% secara komputasi (Harinaldi et.al, 2013). Kajian secara eksperimental pada *bluff body* menggunakan

piezoelectric actuator dapat menurunkan *Drag* hingga 10% (N. Tounsi et. al. 2016).



Gambar 1. *Road map* penelitian dasar bidang kontrol aliran separasi

Berdasarkan uraian di atas dan hasil riset yang telah dilakukan, masih memungkinkan untuk melakukan kajian kombinasi kontrol pasif dan aktif aliran pada aerodinamika model kendaraan. Penulis akan mengkaji penerapan kontrol pasif berupa *dimple* dan kontrol aktif berupa *blowing* dengan metode komputasi dan eksperimen untuk *bluff body* model kendaraan yang disederhanakan. Model ini didekati dengan model *Reversed Ahmed body* karena sangat mirip dengan desain dasar kendaraan penumpang (MPV) yang diproduksi di Indonesia. Penelitian ini termasuk dalam *road map* penelitian dasar bidang kontrol aliran separasi yang ditekuni berbagai laboratorium dinamika fluida di seluruh dunia sebagaimana terlihat pada Gambar 1.

B. Perumusan Masalah Penelitian

Pengkajian dan pengembangan jenis-jenis kontrol aliran secara pasif maupun aktif telah dilakukan peneliti-peneliti. Bentuk kendaraan yang dialiri fluida sangat mempengaruhi pola aliran dan distribusi tekanan yang terjadi. Model uji menggunakan desain dasar kendaraan yang umum digunakan di masyarakat, telah menawarkan model tanpa merubah desain dasar yang mengakomodir fungsi kapasitas penumpang dan estetika kendaraan. Penelitian ini akan meninjau ;

1. Bagaimana pengaruh kombinasi kontrol pasif dan aktif aliran berupa *dimple (dimple)* dan tiupan (*blowing*) terhadap karakteristik aliran dibelakang benda uji, distribusi tekanan, gaya drag pada model kendaraan van.
2. Bagaimana kondisi optimum kombinasi kontrol pasif dan aktif aliran sehingga dapat mereduksi gaya *drag* aerodinamika pada kendaraan van.
3. Bagaimana besar perbedaan drag aerodinamika antara pendekatan komputasi dan eksperimental.

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis metode kombinasi kontrol aliran secara pasif dan aktif yang dapat diterapkan dalam mengurangi area separasi sehingga mengurangi gradien tekanan statik dan total yang mengatur pengurangan *drag* aerodinamika pada model *Reversed Ahmed body*. Penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa kegiatan yang saling berkaitan dengan masing-masing tujuan sebagai berikut :

1. Menganalisis pengaruh kombinasi kontrol pasif dan aktif aliran berupa *dimple* (*dimple*) dan tiupan (*blowing*) terhadap karakteristik aliran dibelakang benda uji, distribusi tekanan, gaya drag.
2. Menentukan kondisi optimum kombinasi kontrol pasif dan aktif aliran sehingga dapat mereduksi gaya *drag aerodinamika* pada model kendaraan van.
3. Menganalisis besar perbedaan drag aerodinamika antara pendekatan komputasi dan eksperimental.

D. Keterbaruan Penelitian

Pengguna kendaraan penumpang memperhatikan aspek kapasitas penumpang, penampilan desain, kenyamanan dari getaran dan suara serta keselamatan penumpang. Kontrol separasi aliran yang efisien dan efektif dapat meningkatkan kinerja aerodinamika melalui penurunan *drag*. Penurunan *drag* berimplikasi pada penghematan bahan bakar. *State of the art* dari pengetahuan dasar dan teknologi kontrol turbulensi memberi peluang dalam rancangan suatu teknik kontrol aliran yang orisinal, menguntungkan dan mudah *dimplementasikan*.

Mengacu pada uraian di atas, maka kebaruan dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Penerapan kontrol pasif aliran berupa *dimple* pada berbagai variasi baris dan rasio *dimple* (DR).
2. Pengkombinasian kontrol pasif aliran (*dimple*) dan aktif aliran (*blowing*) pada tepi atas bagian belakang (*rear-end* prototipe) *Reversed Ahmed body* (*modifikasi Ahmed body*) dengan mengaplikasikan *blowing* dan variasi konfigurasi baris *dimple* untuk memperoleh pengurangan *drag* yang terbaik mengacu pada fenomena aliran tanpa pengontrolan.

E. Batasan Masalah

Penelitian ini membatasi diri berdasarkan kondisi berikut :

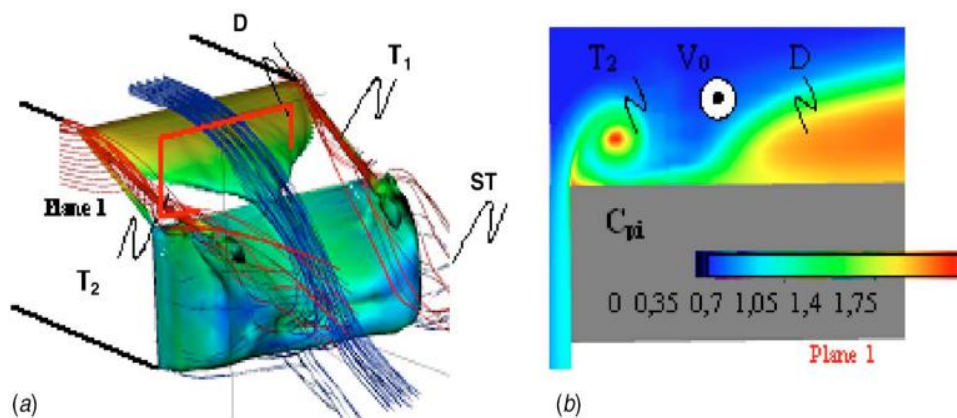
- a. Fluida uji merupakan udara yang dianggap fluida tak mampu mampat dan mengalir secara seragam pada aliran bebas yang berjarak jauh di hulu.
- b. Model uji berbentuk *bluff body* model kendaraan (*modified/reversed Ahmed body*) berdimensi 1/6 dari *Ahmed body* versi original. Geometri model berupa panjang ($l=0,174$ m), lebar ($w=0,065$ m) dan tinggi ($h=0,048$ m).
- c. Kemiringan sudut pada bagian depan model uji adalah 25° terhadap sumbu horizontal.
- d. Kontrol pasif aliran yang digunakan adalah *dimple*.
- e. Kontrol aktif aliran yang digunakan adalah *blowing*.
- f. Kecepatan aliran *blowing* adalah 0,5 m/s, 1 m/s dan 2 m/s.
- g. Rasio *Dimple* (RD) yang digunakan ; 1) 0,20 2) 0,25 3) 0,5
- h. Type *dimple* yang dikombinasi ; setengah bola (*semi spherical*)
- i. Metode yang digunakan adalah metode komputasi dengan model turbulensi *k-epsilon standard* dan metode eksperimen pengukuran *load cell*.

BAB 2

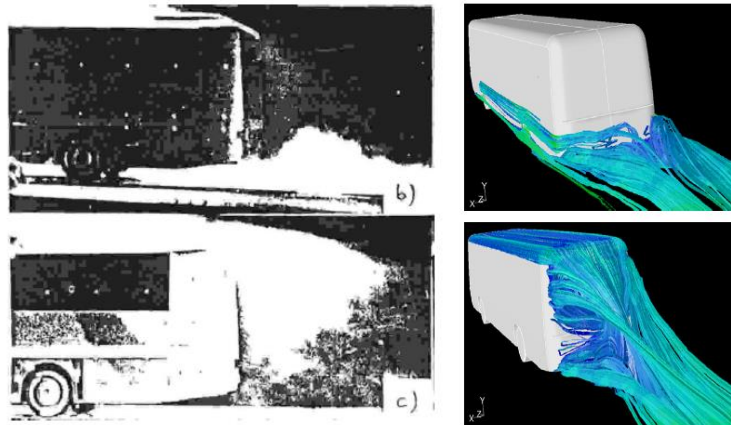
TINJAUAN PUSTAKA

A. Separasi Aliran

Separasi aliran akibat efek viskos fluida. Fluida kehilangan energi kinetik di permukaan dinding sehingga tidak memiliki momentum yang cukup untuk mengalir dalam lapisan batas. Perubahan kontur secara drastis menyebabkan fluida tidak mampu bergerak mengikuti kontur sehingga mengalami separasi. Orlan yang ditimbulkan oleh separasi aliran memiliki tekanan yang rendah dan menyebabkan gaya *drag*. *Drag* aerodinamis kendaraan tersebut terutama hasil perbedaan tekanan yang signifikan antara depan dan permukaan belakang. Topologi aliran *near-wake* ditunjukkan pada gambar 2 (D.Barros et. al 2017). Sementara, pada gambar 2, diperlihatkan topologi aliran jendela belakang bus (Lajos 2002).

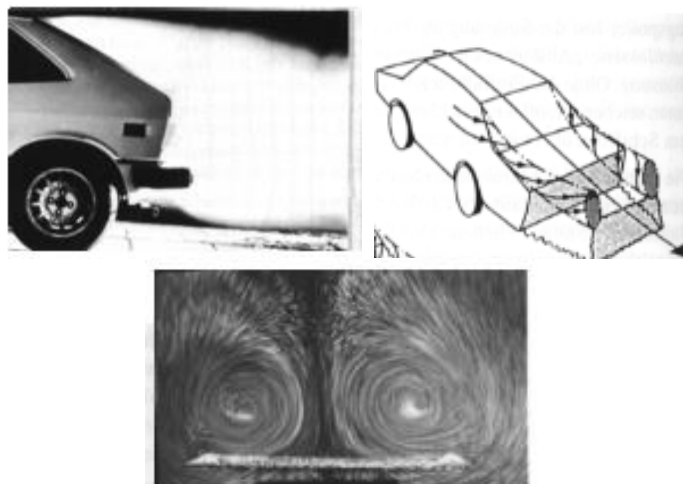


Gambar 3. Topologi aliran *near-wake* (a) *isosurface* $C_{pl}=1,22$ dan (b) medan total kerugian gesek diukur secara transversal (Roumeas, Gilliéron, dan Kourta 2008)



Gambar 4. Topologi aliran jendela belakang bus (a) Visualisasi aliran (b) Simulasi numerik (Lajos 2002)

Kemiringan bagian belakang mobil menimbulkan *vortex* longitudinal sehingga sehingga meningkatkan *drag*. *Logitudinal Vortex* yang terjadi di bagian belakang mobil diperlihatkan pada gambar 4 (Lajos 2002).

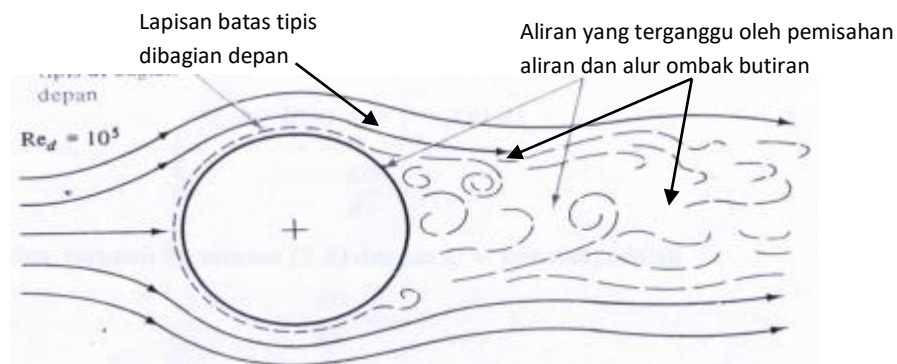


Gambar 5. *Logitudinal Vortex* yang terjadi di bagian belakang mobil (a) tampak samping (b) pola garis alir yang terjadi di sisi belakang mobil (c) visualisasi *longitudinal vortex* (Lajos 2002)

B. Lapisan Batas

Aliran fluida selalu menunjukkan adanya suatu daerah yang alirannya terhambat, yaitu dekat batas yang kecepatannya relatif terhadap

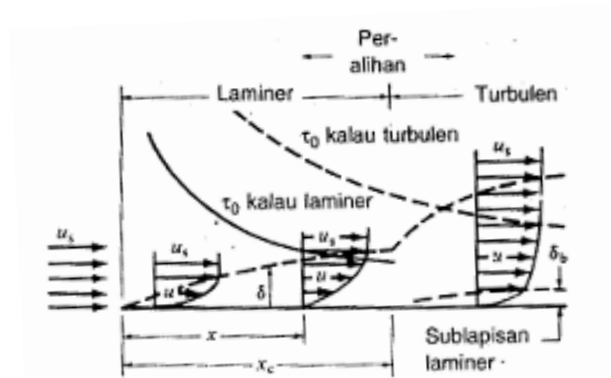
batas bervariasi antara nol pada batas hingga suatu harga yang dapat diduga dari solusi aliran potensial di titik agak jauh dari dinding. Daerah yang alirannya terhambat disebut lapisan batas (*boundary layer*). Aliran eksternal memperlihatkan pertumbuhan lapisan batas yang kontinu karena tidak adanya batasan yang mengurung, contohnya pada sekitar sayap pesawat terbang. Efek viskous juga menimbulkan kondisi yang disebut pemisahan aliran (*flow separation*). Sebuah garis arus yang semula menempel pada batas padat terlepas dan membentuk sebuah *wake* besar sehingga setelah hilir titik pemisahan itu aliran netto tidak berkembang. Lokasi titik pemisahan sering terjadi pada sudut-sudut yang tajam. Gaya-gaya dinamik pada benda-benda yang tumpul seperti selinder pada gambar 5 umumnya terjadi akibat gejala pemisahan dan disipasi energi energi di dalam *wake*.



Gambar 6. Ilustrasi interaksi yang kuat antara daerah kental dan daerah encer dibagian belakang lairan melewati benda tumpul (sumber : Frank M. White, 1997)

Proses pembentukan aliran batas dapat divisualisasikan dengan membayangkan aliran disepanjang sebuah pelat rata. Misalkan ada aliran seragam sebuah fluida tak dapat mampat mendekati pelat dengan kecepatan arus bebas u_s (lihat gambar 6). Ketika fluida mencapai tepi sebelah depan, tegangan geser yang besar terbentuk dekat permukaan pelat karena partikel-partikel yang cukup dekat dan normal terhadap pelat dihambat oleh geseran viskous. Daerah tempat aliran mengalami *drag* ini

disebut lapisan batas dan ketebalannya dinyatakan dengan δ . Lapisan batas menebal dalam arah yang sama dengan aliran, akibatnya perubahan kecepatan dari nol di permukaan pelat hingga u_s pada jarak δ semakin jauh menjadi semakin besar. Laju kecepatan mula-mula menentukan gradien kecepatan di permukaan pelat, demikian pula tegangan gesernya.

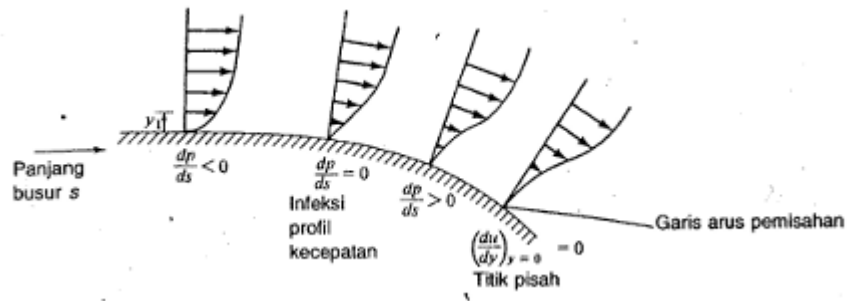


Gambar 6. Aliran fluida viskous di sepanjang sebuah pelat rata (sumber : R.M. Olson, et.al. 1993)

Tegangan geser untuk lapisan batas laminar bervariasi terhadap jarak disepanjang pelat karena profil kecepatan juga bervariasi terhadap jarak. Begitu lapisan batas laminar mulai menebal, ketidakmampuan terjadi dan dalam kondisi tertentu ini tidak dapat diredam, sehingga sebuah lapisan batas turbulen segera terbentuk. Pada lapisan batas turbulen, profil kecepatan yang terjadi lebih tumpul dengan gradien kecepatan di permukaan pelat lebih tinggi, sementara lapisan batas lebih tebal dan tegangan gesernya lebih besar pula. Peralihan dari lapisan batas laminar ke lapisan batas turbulen tergantung pada kekasaran pelat dan tingkat turbulensi arus bebas, atau jika arus bebas tidak seragam.

Peningkatan tekanan terjadi akibat penurunan energi kinetik atau kecepatan, dan kecepatan pada jarak yang tetap dari permukaan bisa berkurang sampai nol. Apabila ini terjadi, lapisan batas memisahkan diri

dari permukaan, dan gejala tersebut dikenal sebagai pemisahan lapisan batas. Titik pemisahan ini mengawali suatu daerah yang disebut *wake*, di daerah ini terjadi kisaran yang kuat disertai peningkatan gaya hambat (disipasi energi).



Gambar 7 Aliran melalui sebuah permukaan lengkung (sumber : R.M. Olson, et.al. 1993)

Untuk aliran yang melalui sebuah permukaan lengkung sehingga aliran meluas, profil kecepatan akan mengalami infleksi (perubahan kelengkungan) yang dimulai di tempat gradien tekanan positif (gambar 7). Partikel pada y_1 mengalami penurunan kecepatan ketika mengalir sepanjang permukaan, dan pada akhirnya berhenti sesaat di tempat lapisan batas memisahkan diri. Gaya total dalam arah aliran, atau gaya hambat (*drag*), dibagi berdasarkan penyebabnya. Gaya hambat yang disebabkan oleh tegangan geser atau tegangan tangensial di lapisan batas disebut *skin-friction drag* (*drag* gesek kulit), sedangkan yang disebabkan oleh tekanan netto atau selisih tekanan normal terhadap permukaan disebut *form drag*. Kalau gaya hambat ditimbulkan oleh geseran viskous, maka kita perlu menghambat pembentukan turbulensi dalam lapisan batas, kalau gaya hambat terutama disebabkan oleh rendahnya tekanan dalam *wake*, maka kita justru perlu mempercepat pembentukan turbulensi dalam lapisan batas sehingga titik pemisahan pindah ke arah hilir. Pemisahan yang tertunda ini akan menimbulkan *wake* yang lebih kecil.

C. Drag Aerodinamika

Apabila gelombang atau *drag* terinduksi tidak ada, *drag* total sama dengan *drag* profil, yang ditimbulkan oleh tekanan dan geseran viskous. *Drag* profil dapat terjadi karena geseran viskous sepenuhnya, karena tekanan sepenuhnya, atau kombinasi keduanya. Gaya geseran viskous memainkan peran penting dalam perkembangan lapisan batas dari permukaan benda. Ini berpengaruh pada ukuran *wake* dan beda-beda tekanan di dalamnya, keduanya turut menentukan besar *drag* akibat tekanan. Beda tekanan yang positif di bagian depan sebuah benda juga berpengaruh terhadap *drag* tekanan. *Drag* diekspresikan sebagai hasil kali koefisien *drag*, tekanan dinamik arus bebas, dan luas karakteristik. Koefisien *drag* merupakan fungsi sejumlah parameter seperti bentuk benda, angka *Reynolds*, angka *Mach*, angka *Froude*, kekasaran permukaan, dan turbulensi arus bebas. Pada umumnya diekspresikan sebagai

$$drag = c_d \frac{\rho u_s^2}{2} A \quad \dots \dots \dots (1)$$

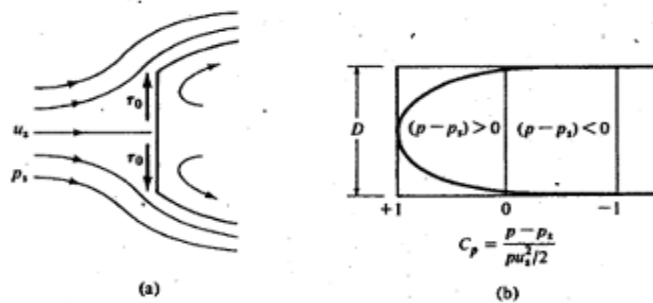
C_d : koefisien *drag*

$\rho u_s^2/2$: tekanan dinamik arus bebas

A : luas karakteristik

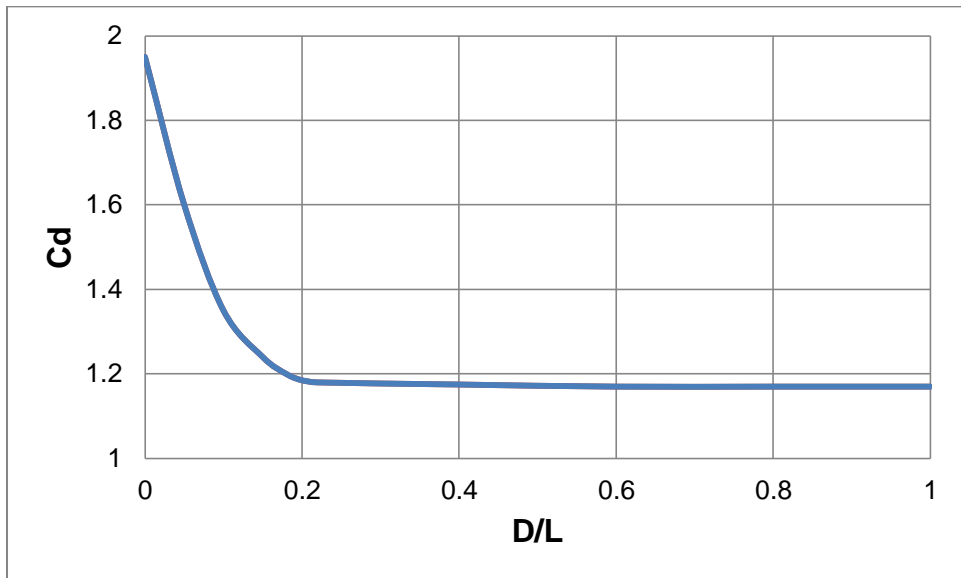
Koefisien *drag* C_d bergantung pada lapisan batas laminar atau turbulen. Jika lapisan batas laminar, C_d dipengaruhi oleh angka *Reynolds* aliran yang didasarkan pada kecepatan arus bebas dan panjang pelat x. Jika lapisan batas turbulen, C_d dipengaruhi oleh angka *Reynolds* aliran, kekasaran pelat, serta lokasi transisi dari lapisan batas laminar menjadi lapisan batas turbulen, yang sangat bergantung pada kekasaran pelat dan tingkat turbulensi arus bebas.

Drag tekanan murni dialami oleh aliran yang melewati sebuah pelat rata yang normal terhadap garis arus. Gaya-gaya geseran bekerja dalam arah normal terhadap arus tidak memberikan sumbangan langsung kepada gaya *drag*. Namun gaya ini bisa berpengaruh terhadap pertumbuhan lapisan batas di sepanjang permukaan dan mempengaruhi distribusi tekanan walaupun kecil. Koefisien *drag* untuk *drag* tekanan murni dipengaruhi oleh bentuk permukaan dan angka *Reynolds* aliran yang didasarkan pada suatu dimensi karakteristik D . Pola aliran dan distribusi tekanan untuk aliran dua-dimensi di sekitar sebuah pelat dengan panjang tak terhingga L dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8 Aliran dua-dimensi melewati sebuah pelat rata yang normal terhadap arus bebas (a) pola aliran dengan gaya geseran normal terhadap arus bebas (b) Distribusi tekanan sesuai dengan pengukuran-pengukuran (sumber : R.M. Olson, 1993)

Koefisien *drag* untuk sebuah pelat yang panjangnya tertentu bergantung pada nisbah D/L , serta Re_D , karena efek-efek bagian ujung. Untuk harga D/L dari 0,4 hingga 1,0 pada $Re_D > 1000$, $C_D \approx 1,16$, yang sedikit lebih besar dibandingkan harga-harga untuk sebuah piringan lingkaran ($C_D = 1,12$) untuk rentang Re_D yang sama gambar 9 menunjukkan efek D/L pada C_D untuk pelat persegi yang normal terhadap aliran.



Gambar 9 Efek aspek rasio pada koefisien *drag* untuk pelat persegi yang normal terhadap aliran (sumber: R.M. Olson, 1993)

Drag terjadi akibat pemisahan aliran. Teori lapisan batas dapat meramalkan titik pisah, distribusi tekanan biasanya rendah di daerah pemisahan itu. Perbedaan antara tekanan tinggi di daerah stagnasi di depan dan tekanan rendah di daerah pemisahan di belakang, memberikan kontribusi *drag* yang besar, yang disebut *drag* tekanan. Tegangan geser atau *drag* gesek benda menambah besar *drag*, hal ini dapat dilihat pada persamaan berikut :

$$C_d = C_{d,tekanan} + C_{d,gesekan} \dots\dots\dots (2)$$

Kontribusi relatif *drag* tekanan dan *drag* gesek tergantung pada bentuk benda, terutama tebalnya.(R.M. Olson et.al, 1993)

Drag tekanan merupakan *drag* akibat tahanan fluida yang mengubah aliran hingga dapat mengisi ruang di belakang benda. Fenomena hisapan terjadi akibat perbedaan tekanan antara *upstream* dan *downstream* yang diakibatkan oleh tekanan total pada bagian belakang lebih rendah dari bagian depan. *Drag* akibat tekanan dipengaruhi oleh

bentuk benda, utamanya bentuk benda datar yang tegak lurus terhadap arah aliran. *Drag* tekanan menggunakan bilangan tak berdimensi koefisien tekanan (C_p) (Munson, 2002), sebagai berikut ;

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \dots \dots \dots (3)$$

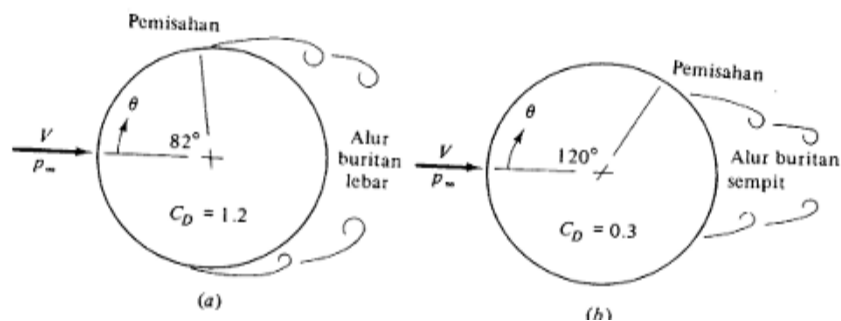
C_p = tekanan pada permukaan model (Pa)

P_0 = tekanan garis aliran (Pa)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

U_0 = kecepatan aliran bebas (m/s)

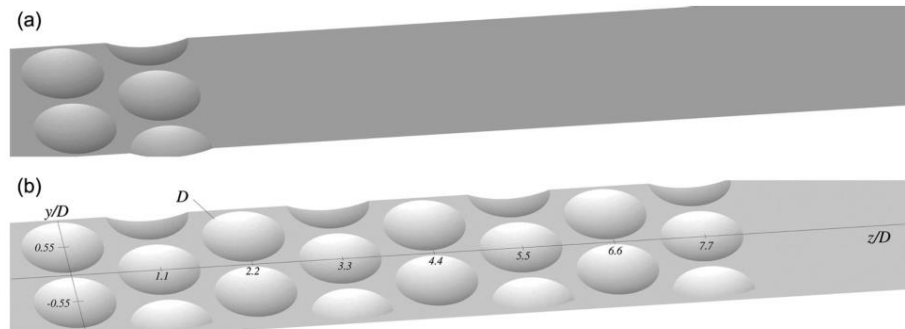
Pada benda silinder yang dilalui aliran viskous, terlihat di gambar 10 bagian (a) Aliran laminier sangat rentan terhadap gradien-merugikan dibelakang silinder, pemisahan terjadi pada $\theta = 82^\circ$, alur *wake* buritan yang lebar dan tekanan yang sangat rendah pada daerah berlapis yang terpisah menimbulkan *drag*, $C_D = 1,2$. Pada gambar 10 (b) terlihat lapisan-batas lebih tahan bergolak dan pemisahannya tertunda sampai $\theta = 120^\circ$, dan menimbulkan alur buritan yang lebih kecil, tekanan lebih tinggi di bagian belakang, dan *drag* yang 75% lebih rendah, $C_D = 0,5$.



Gambar 10 Aliran melalui silinder bulat (a) pemisahan berlapis; (b) pemisahan bergolak (Sumber : Frank M. White)

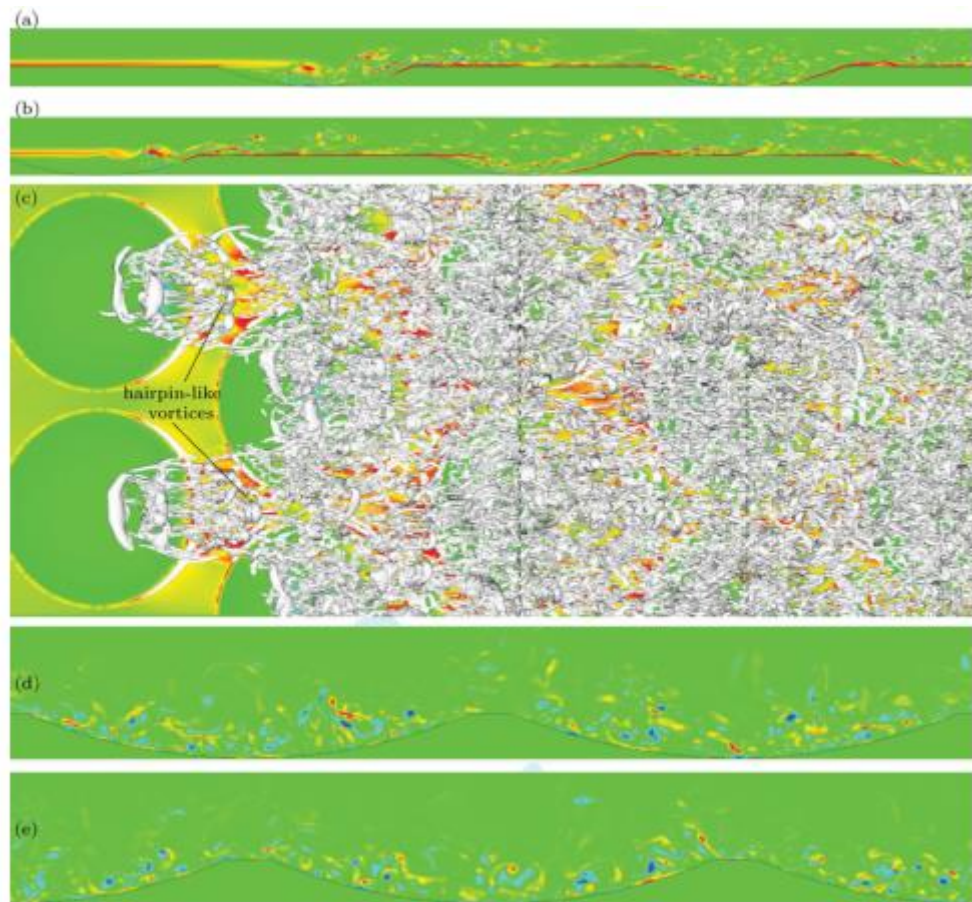
D. Kontrol Pasif Separasi Aliran

Pengaplikasian kontrol pasif aliran tidak membutuhkan energi untuk mengendalikan pola aliran aerodinamika. Beberapa penelitian pererapan kontrol pasif aliran telah dilakukan. Dimple merupakan salah satu bentuk kontrol pasif aliran. Beratlis et.al (2014) melakukan studi pengaruh *dimple* pada lapisan batas laminar melalui DNS pada aliran melalui dua baris dan delapan baris *dimple*. Pada kasus *dimple* baris kedua efektif mengubah lapisan batas menuju kondisi menyerupai turbulen pada bilangan *Reynolds* rendah. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan geser yang terbentuk melalui *dimple* dua baris pertama menjadi tidak stabil dan gulungan menjadi lembaran pusaran yang koheren. Lembaran pusaran mentransformasi diri menjadi sebuah paket vortisitas yang bereorientasi menjadi bentang vortisitas ke *streamwise*. Dinamika aliran ketika vortisitas ini merambat melewati pelat datar atau melalui serangkaian *dimple* menjadi sangat berbeda. Untuk kasus pertama dinamika aliran mendekati gradien tekanan nol pada lapisan batas turbulen, sedangkan untuk kasus terakhir gradien tekanan lokal dan selanjutnya ketidakstabilan lapisan geser memiliki efek yang lebih besar pada transportasi momentum di lapisan batas. Pada beberapa baris *dimple* terjadi vortisitas *streamwise* dengan ditemukan peningkatan kekuatan dalam *dimple* yang meningkatkan pencampuran di lapisan batas. Akibatnya pertumbuhan lapisan batas menjadi lebih tebal melewati *dimple* dan tetap konsisten menebal hingga meninggalkan wilayah *dimple* dengan perpindahan dan ketebalan momentum yang lebih besar. Perhitungan energi kinetik turbulen juga mengungkapkan bahwa dinamika selama melalui *dimple* menjadi lebih besar dari lapisan pencampuran serta lebih banyak energi yang timbul dan diangkut menjauh dari permukaan pelat datar. Perhitungan melewati *dimple* setengah bola dengan kesamaan susunan *dimple* memverifikasi bahwa separasi menyeluruh tertunda ketika satu baris *dimple* digunakan sebagai fasilitator yang konsisten dihasilkan ketika melewati pelat yang ber*dimple*.



Gambar 11 Geometri pelat datar dengan (a) dua baris *dimple* cekung, (b) 8 baris *dimple* cekung (Beratlis et.al, 2014)

Untuk kasus delapan baris *dimple* di atas, dinamika aliran selama dua baris pertama dari *dimple* masih identik : lapisan geser berguling menjadi gulungan yang bertransformasi sendiri menjadi jenis paket-paket vortisitas yang berkembang ke hilir (lihat Gambar 12 (c)). Namun aliran dinamika melewati baris ketiga dari *dimple* menjadi berbeda. Sebuah lapisan geser terbentuk melewati tepi depan *dimple* tetapi gulingan lapisan geser yang tidak koheren dan lapisan geser segera terpecah menjadi vortisitas yang lebih kecil. Selain itu ada vortisitas berasal dari *dimple* hulu yang terus berkembang saat mereka mengalir melewati *dimple*. Sebuah plot kontur dari *streamwise* vortisitas pada dua *dimple* melewati pusat dari ketiga dan keempat baris *dimple* (lihat Gambar 12 (d) dan 12 (e), masing-masing) mengungkapkan bahwa aliran merupakan populasi aliran vortisitas pada kedua sisi dan bagian atas rangkaian *dimple*. dengan vortisitas *streamwise* baik di dalam *dimple*. (Beratlis et.al, 2014).



Gambar 12 Visualisasi aliran sesaat untuk kasus delapan *dimple* tampak kontur ω pada (a) $y/d = 0.0$ dan (b) $y/d = 5.5$ melewati pusat *dimple* di baris pertama dan kedua secara berurutan. (c) tampak atas *isosurface* dari kriteria Q dengan kontur gesekan permukaan dinding. Kontur ω_z pada (d) $z/d = 3.5$ dan (e) $z/d = 22$ sesuai garis putus-putus vertikal di atas (Beratlis et.al, 2014)

C. K. Chear, S. S. Dol, 2015 melakukan studi pengaruh *dimple* pada bagian atas tepi belakang (rear-end) model Ahmed Body yang memiliki sudut kemiringan 25° . Model diuji menggunakan komputasi *k-epsilon turbulent ANSYS Fluent*. Telah dibandingkan koefisien *drag* yang dihasilkan pada model tanpa *dimple*, dengan menggunakan *dimple ratio* (DR) 0,05, DR=0,2, DR=0,3, DR=0,4 dan DR=0,5. (lihat tabel 1 di bawah). Semua model rasio *dimple* (DR) memberikan koefisien *drag* yang lebih kecil, dibandingkan dengan model tanpa *dimple* (Tabel 1). Koefisien

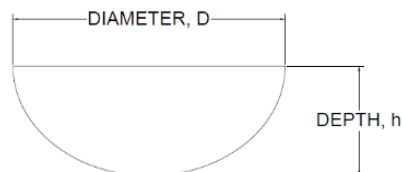
drag, C_d yang direduksi yang terbesar mencapai 1,95% pada model $DR = 0,4$.

Tabel 1. Perbandingan Koefisien *Drag variasi rasio dimple*

Model	Koefisien <i>Drag</i>	Perbedaan Persentase (%)
Permukaan halus	0,261	-
DR = 0.05	0,257	1,32
DR = 0.2	0,259	0,55
DR = 0.3	0,260	0,07
DR = 0.4	0,255	1,95
DR = 0.5	0,258	0,84

Sumber : C. K. Chear, S. S. Dol, 2015

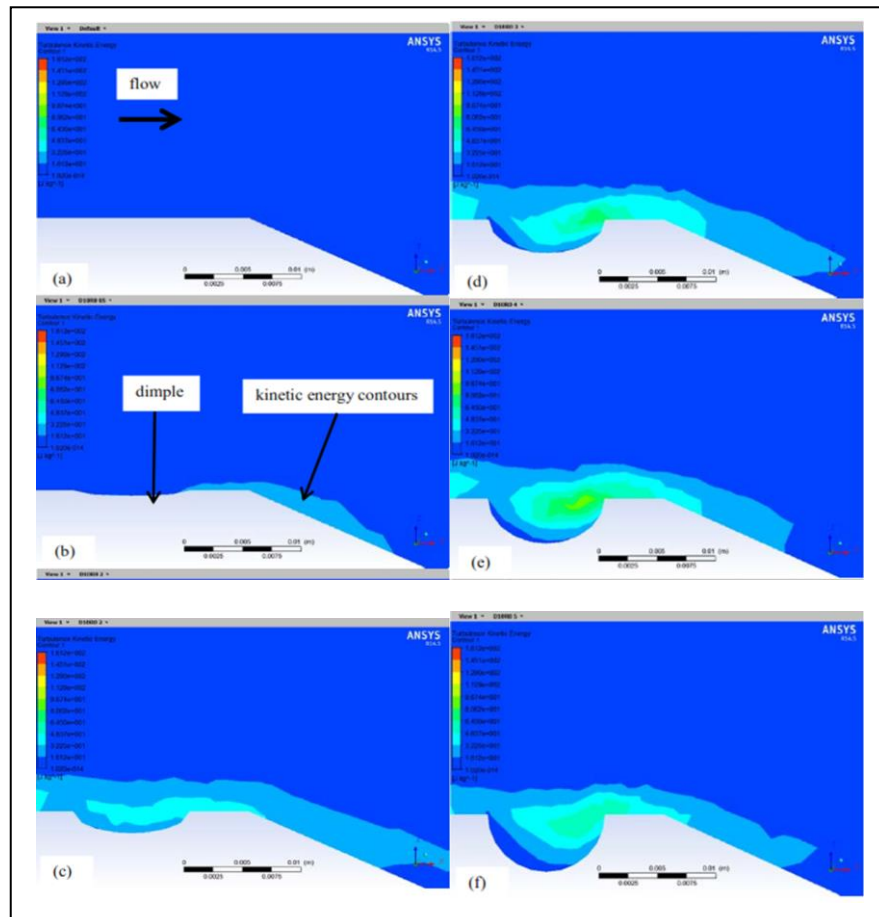
Dimple ratio (DR) merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam mengaplikasikan *dimple* (lihat gambar 13). *Dimple ratio* (DR) adalah perbandingan antara diameter *dimple* (D) dengan kedalaman *dimple* (h).



Gambar 13 *Dimple Ratio* (RD) (Sumber : S.F. Wong, S.S. Dol, 2016)

Untuk model tanpa penerapan *dimple*, energi kinetik turbulen pada permukaan mobil tidak signifikan (Gambar 14 (a)). Jika dibandingkan dengan model tanpa *dimple*, energi kinetik turbulen yang dihasilkan dalam *dimple* dan di sekitar tepi *dimple* (Gambar 14 (b) - (f)). Menunjukkan bahwa aliran lapisan batas berhasil bergerak lebih jauh sebelum separasi aliran berlangsung. Geometri *dimple* mengubah kinematika dan dinamika aliran. interaksi yang kompleks antara aliran turbulen yang berfluktuasi dan aliran rata-rata meningkatkan intensitas turbulensi dan lapisan batas menghasilkan momentum dari energi kinetik turbulen. Tingkat maksimum

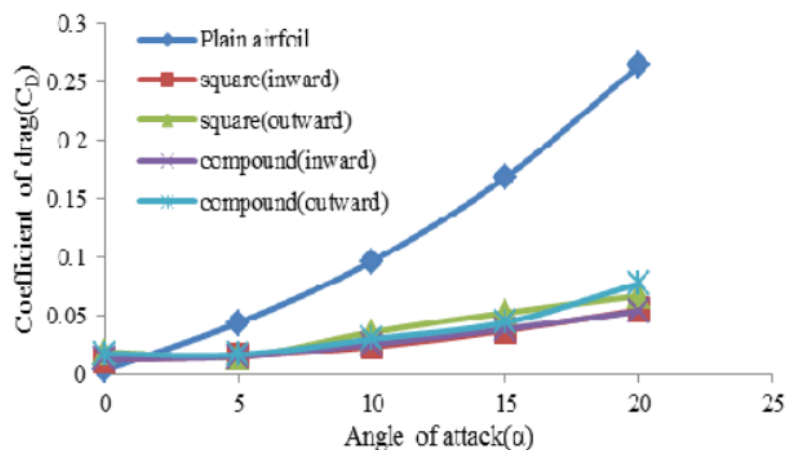
energi kinetik turbulen terjadi pada DR = 0,4 seperti ditunjukkan pada Gambar. 14 (e).



Gambar 14 Kontur energi kinetik turbulen (a) diameter ratio (DR) =0; (b) DR = 0.05; (c) DR = 0.2; (d) DR = 0.3; (e) DR = 0.4; (f) DR = 0.5 (sumber : C. K. Chear, S. S. Dol, 2015)

E. Livya, et.al (2015) melakukan studi secara komputasi dan eksperimen pengaruh *dimple* pada sayap pesawat, menggunakan NACA 0018 airfoil. Bentuk *Dimple* yang digunakan adalah semi-bola, segi enam, silinder, persegi yang dipilih untuk analisis. Airfoil diuji di bawah kecepatan *inlet* 30 m/s dan 60 m/s dengan sudut serang yang berbeda (5°, 10°, 15°, 20°, dan 25°). Hal ini dilakukan untuk meningkatkan karakteristik

aerodinamis dan manuver dari pesawat terbang. Peningkatan ini meliputi pengurangan *drag* dan fenomena *stall*. Airfoil yang mengaplikasikan *dimple* memiliki *drag* yang relatif kecil dibandingkan airfoil polos. Aplikasi *dimple* di sayap pesawat akan menciptakan turbulensi dengan menciptakan pusaran yang menunda pemisahan lapisan batas sehingga terjadi penurunan *pressure drag* dan juga peningkatan sudut *stall*. Selain itu, Reduksi *wake* mengarah ke pengurangan emisi akustik. Secara keseluruhan studi ini meningkatkan kemampuan manuver pesawat akibat penundaan titik pemisahan aliran di *stall* dan dengan demikian mereduksi *drag* dengan menerapkan efek *dimple* pada sayap pesawat. *Dimple* meningkatkan efisiensi aerodinamis, yang bermuara pada peningkatan kinerja pesawat terbang.



Gambar 15 Variasi C_D dari konfigurasi *dimple* yang berbeda (sumber : E. Livya, et.al 2015)

Gambar 15 mengilustrasikan variasi koefisien *drag* terhadap sudut serang pada bentuk *dimple* yang berbeda-beda. Diharapkan pengaplikasian *dimple* dapat mereduksi *drag*. Airfoil tanpa *dimple* memiliki *drag* maksimum mendekati 0,28 pada sudut serang 20° , tetapi pada airfoil yang mengaplikasikan setengah bola dan compound dapat menurunkan *drag* hingga 0,05. Konfigurasi *compound* dari *dimple* sangat efektif mereduksi *drag* seperti konfigurasi *double square*, *double semi-spherical* (E. Livya et.al, 2015). Pengujian secara komputasi pada satu *dimple* telah

dilakukan, di mana aplikasi *dimple* pada mobil terbukti efektif untuk mereduksi koefisien *drag*. Parameter yang berbeda seperti posisi *dimple*, jumlah *dimple*, orientasi *dimple* perlu studi lanjut untuk meningkatkan kinerja *dimple* pada aplikasi aerodinamika mobil (S.F. Wong, S.S. Dol, 2016).

E. Kontrol Aktif Separasi Aliran

Kontrol aktif aliran merupakan bentuk kontrol aliran yang membutuhkan energi dari luar atau energi tambahan untuk mengontrol separasi aliran sehingga mereduksi *drag* aerodinamika. Kontrol aktif aliran, diantaranya; blowing, suction, sintetik jet. Rustan Tarakka et al, 2014 melakukan studi pada aplikasi aerodinamika, dimana pengendalian terhadap aliran lapisan batas sangat diperlukan untuk mencegah atau menunda terjadinya separasi sejauh mungkin. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk memodifikasi timbulnya separasi aliran di lapisan batas dari permukaan kendaraan yang berakibat pada terbentuknya aliran balik di sekitar kendaraan adalah penerapan kontrol aktif aliran. *Blowing* (hembusan) merupakan salah satu teknik kontrol aktif aliran yang dapat diaplikasikan pada kendaraan untuk mengontrol terjadinya separasi aliran yang memberikan efek positif terhadap pengurangan *drag* aerodinamika. Model uji yang digunakan adalah *Reversed Ahmed body* dengan kemiringan pada bagian depan adalah 25° . Model uji dilengkapi dengan kontrol aktif *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang. Pendekatan komputasi diterapkan menggunakan empat model turbulensi yaitu *k-epsilon standard*, *k-epsilon realizable*, *k- ω standard* dan *k- ω SST* dengan menggunakan *software fluent 6.3*. Sementara, kondisi batas adalah kecepatan *upstream* dan kecepatan *blowing* masing-masing 16.7 m/s dan 0.5 m/s. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pengurangan *drag* aerodinamika terbesar dengan penggunaan kontrol aktif *blowing* terjadi pada model turbulensi *k- ω SST* sebesar 12.58%.

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 2. Adanya *blowing* yang ditempatkan pada bagian belakang model kendaraan dengan kecepatan 0.5 m/s memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pengurangan *drag* aerodinamika. Pengurangan *drag* terbesar diperoleh dengan menggunakan model turbulensi *k- ω SST* yaitu sebesar 12.58%. Sementara untuk ketiga model turbulensi lainnya adalah masing-masing 11.90% untuk *k-epsilon standard*, 10.36% untuk *k-epsilon realizable* dan 10.37% untuk *k- ω standard* (Tarakka R, at. al 2014).

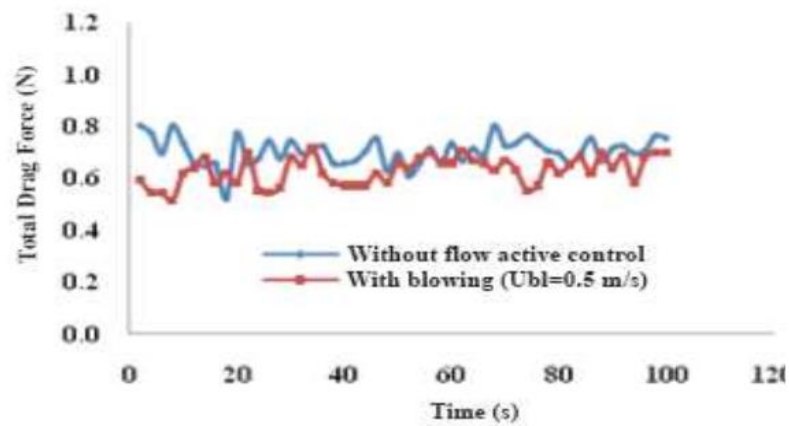
Tabel 2 Koefisien *drag* dan pengurangan *drag* aerodinamika

Model turbulensi	Koefisien <i>drag</i> (c_d)		Pengurangan <i>drag</i> (%)
	Tanpa kontrol aliran	Dengan <i>blowing</i>	
<i>k-epsilon standard</i>	1.775	1.564	11.90
<i>k-epsilon realizable</i>	1.681	1.497	10.36
<i>k-ω standard</i>	2.037	1.853	10.37
<i>k-ω SST</i>	1.701	1.478	12.58

(Sumber :Tarakka R, at. al 2014)

Pengkajian melalui pendekatan eksperimental yang digunakan *load cell* untuk memvalidasi reduksi *drag* aerodinamis yang diperoleh dari pendekatan komputasi pada model Ahmed *bluff body* model van. Model ini disesuaikan bentuk dimodifikasi mewakili model dasar terdekat dari van keluarga banyak diproduksi oleh produsen mobil. Pendekatan komputasi yang digunakan *k- ϵ* turbulen standar. Penambahan kontrol

aktif *blowing* memberikan pengaruh pada karakteristik aliran lapangan, intensitas turbulensi dan *drag* aerodinamis. Pengurangan *drag* aerodinamis mencapai 13,92% untuk pendekatan komputasi dan 11,11% untuk pendekatan eksperimental. Gambar 16 menggambarkan gaya *drag* fluktuatif pada model tanpa control aktif dan dengan control aktif (*blowing*). *Drag* yang direduksi menunjukkan bahwa aliran dari *blowing* dapat secara efektif mengurangi *wake* yang terjadi di belakang *bluff body* kendaraan model van (Harinaldi et.al 2013).



Gambar 16 Gaya *Drag* yang berfluktuatif pada kecepatan *upstream* $U_o = 13,9 \text{ m/s}$ Diperoleh dari pengujian eksperimental (sumber : Harinaldi et. al 2013)

Tabel 3 berikut membandingkan *drag* pada pendekatan komputasi dengan pendekatan eksperimental. Perbedaan koefisien *drag* antara pendekatan eksperimental dan komputasi sebesar 14,61% pada kasus tanpa kontrol aliran *blowing*.

Tabel 3 Perbandingan Koefisien *Drag* (C_D) (sumber : Harinaldi et. al 2013)

Deskripsi	Tanpa control aliran	<i>Blowing</i> ($U_{bl}=0,5\text{m/s}$)	Reduksi C_d
Komputasi	1,78	1,53	13,92%
Eksperimen	1,52	1,35	11.11%
Perbedaan	14,61%	11,76%	2,81%

Perbedaan pada kasus menggunakan *blowing* dengan kecepatan *blowing* ($U_{bl}=11,76\%$). Perbedaan reduksi *drag* antara pendekatan eksperimental dan komputasi sebesar 2,81% (Harinaldi et.al 2013).