

TESIS

Analisis Pengaruh Kontrol Aktif Separasi Aliran Pada Model Kendaraan Terhadap Hambatan Aerodinamika

WAWAN RAUF

D022181007



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2020

**Analisis Pengaruh Kontrol Aktif Separasi Aliran Pada
Model Kendaraan Terhadap Hambatan Aerodinamika**

TESIS

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar
Magister Teknik**

Program Studi

Magister Teknik Mesin / Konversi Energi

Disusun dan diajukan oleh

WAWAN RAUF

D022181007

Kepada

PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2020

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**ANALISIS PENGARUH KONTROL AKTIF SEPARASI ALIRAN PADA
MODEL KENDARAAN TERHADAP HAMBATAN AERODINAMIKA**

Disusun dan diajukan oleh:

Wawan Rauf

D022181007

Telah dipertahankan didepan Panitia Ujian Tesis

Pada tanggal 14 Agustus 2020

Dan dinyatakan memenuhi syarat

Menyetujui :

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT



Dr. Rustan Tarakka, ST., MT



**Ketua Program Studi Magister
Teknik Mesin**

Dr. Halrul Arsyad, ST., MT



**Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin**

Prof. Dr. Jr. Muhammad Arsyad Thaha, MT

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Wawan Rauf

NIM : D022181007

Program studi : Magister Teknik Mesin / Konversi Energi

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tesis yang berjudul: "**Analisis Pengaruh Kontrol Aktif Separasi Aliran Pada Model Kendaraan Terhadap Hambatan Aerodinamika**" adalah karya ilmiah saya sendiri dan sepanjang pengetahuan saya di dalam naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan/ditulis/diterbitkan sebelumnya, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari ternyata di dalam naskah tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut dan diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Gowa, 2020

Yang membuat pernyataan,



Wawan Rauf

KATA PENGANTAR

Jika air dilautan dijadikan tinta, dedaunan di bumi dijadikan kertas dan seluruh pepohonan dijadikan pena, maka sesungguhnya semuanya itu takkan mampu menuliskan kebesaranmu yaa robb. Segala puji bagi Alloh Tuhan yang menjadikan bumi berputar pada porosnya seperti halnya gear yang mentransmisikan putaran mesin dimana tidak satupun sarjana Teknik Mesin mampu menandinginya. Berkat Rahmat dan Karunianya proses penyusunan Tesis ini dapat diselesaikan.

Dalam proses penulisan Tesis ini yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi program magister di Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin, tidak terlepas dari bantuan dan dukungan beberapa pihak. Pada kesempatan yang berbahagia ini penulis secara rinci hendak mengucapkan syukur dan terima kasih kepada:

1. Alloh SWT yang senantiasa memberi petunjuk, kesehatan, dan keselamatan selama menempuh pendidikan program magister.
2. Nabi besar Muhammad Rosululloh Saw yang telah mengajarkan kesabaran dan kerja keras seperti apa yang baginda lakukan demi tersyairnya Islam di bumi ini.
3. Kedua orang tua, Ayah: Hamzah Rauf, Ibu: Aisa Zakaria atas doa restu, materi, nasehat dan motivasinya. Semoga Alloh merahmati keduanya.
4. Istri tercinta Sandrila Patilima SKM dan anak terkasih Syamil Akmal Rauf yang menemani dan ikut merasakan sulitnya hidup diperantauan. Semoga Alloh beri sakinah dalam hati kita.

5. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin ST, MT selaku pembimbing I dan Bapak Dr. Rustan Tarakka, ST, MT selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk membimbing dan mengarahkan selama proses penyelesaian Tesis ini.
6. Bapak Prof. Dr. Ir. Hi. Nasaruddin Salam MT, Dr. Ir. Luther Sule MT, dan Ibu Dr. Eng. Novriany Amaliyah, ST, MT selaku penguji yang telah memberikan saran perbaikan untuk menyempurnakan Tesis ini.
7. Bapak Dr. Ir. Ilyas Renreng, MT selaku Kepala Departemen Teknik Mesin dan Bapak Dr. Hairul Arsyad MT selaku kepala Program Studi Megister Teknik Mesin Universitas Hasanuddin beserta seluruh staf pegawai yang telah memberi kemudahan dalam pengurusan administrasi kelengkapan selama menjalankan studi.
8. Seluruh dosen pengajar dan laboran dilingkungan Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin yang telah memberikan pengajaran dan pengalaman berharga untuk bekal menatap masa depan.
9. Teman-teman Mahasiswa seperjuangan baik senior maupun junior khususnya rekan-rekan seangkatan (2018) yang saling menguatkan dan memberi motivasi tuk bisa cepat selesai.
10. Bapak-bapak mahasiswa S3 dan adik-adik mahasiswa S1 yang senantiasa membagi ilmu dan pengalaman selama menempuh studi.

Seluruh pihak yang mohon maaf kami tidak bisa sebut satu persatu, semoga Allah senantiasa membalas semua kebaikan dengan pahala disisinya.

Secara sadar penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tesis ini masih jauh dari kata sempurna karena keterbatasan yang dimiliki. Olehnya melalui kesempatan ini penulis dengan kerelaan hati memohonan kritik dan saran

yang membangun demi penyempurnaan Tesis ini. Akhirnya, penulis berharap Tesis ini akan memberi sumbangsih positif dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan dicatat dalam sebuah buku sejarah yang bermanfaat untuk generasi yang akan datang.

Salam Teknik

Gowa, 2020.

Penulis

ABSTRAK

Wawan Rauf. Analisis Pengaruh Kontrol Aktif Separasi Aliran pada Model Kendaraan Terhadap Hambatan Aerodinamika (2020). Dibimbing oleh **Dr. Eng. Jalaludin, MT** dan **Dr. Rustan Tarakka, ST, MT**.

Polusi udara dan krisis bahan bakar merupakan dua isu yang sedang menjadi topik perbincangan dunia saat ini. Salah satu penyebab tingginya temperatur udara lingkungan dan krisis bahan bakar adalah populasi kendaraan yang semakin meningkat setiap tahun. Salah satu upaya untuk mengatasi masalah tersebut berupa pertimbangan aerodinamika kendaraan. Metode untuk mengurangi hambatan aerodinamika dapat dilakukan dengan memodifikasi aliran udara yang melalui bodi kendaran dan menunda separasi serta mengurangi berkembangnya daerah resirkulasi pada bagian belakang kendaraan. Hal tersebut dapat dicapai melalui penerapan kontrol aktif *suction* pada kendaraan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik pola aliran yang terbentuk pada bagian belakang model kendaran, distribusi tekanan pada dinding belakang dan pengurangan hambatan aerodinamika. Model yang digunakan merupakan modifikasi *Ahmed model* dengan merubah arah orientasi aliran serta memiliki kemiringan bodi depan 25° . Penelitian dilakukan melalui pendekatan komputasi dengan memanfaatkan program Computational Fluid Dynamics (CFD) dan divalidasi melalui pengujian eksperimental laboratorium memanfaatkan fasilitas sub-sonic wind tunel. Untuk metode komputasi data diperoleh berupa karakteristik aliran, koefisien tekanan dan koefisien drag. Sedangkan untuk pengujian eksperimental hanya fokus pada upaya validasi koefisien drag dengan memanfaatkan perangkat *load cell*. Kecepatan *upstream* yang diterapkan masing-masing 11.1 m/s, 13.9 m/s dan 16.7 m/s dan kecepatan *suction* masing-masing 0.2 m/s, 0.5 m/s, 0.8 m/s, dan 1.0 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kontrol aktif *suction* mampu mengurangi pembentukan wake, meningkatkan distribusi tekanan pada dinding bagian belakang model kendaraan dan mampu mereduksi hambatan aerodinamika tertinggi sebesar 9.9020% untuk pendekatan komputasi dan 10.1918% untuk pendekatan eksperimental.

Kata kunci: CFD, Separasi aliran, Karakteristik pola aliran, C_p , C_d , Kontrol aktif suction

ABSTRACT

Wawan Rauf. Analysis the Effect of Active Control of Flow Separation on Vehicle Models Against Aerodynamic Barriers (2020). Guided by: **Dr. Eng. Jalaludin, MT** dan **Dr. Rustan Tarakka, ST, MT**.

Air pollution and the fuel crisis are two issues that are currently the topic of world discussion today. One of the causes of the high ambient air temperature and fuel crisis is the increasing vehicle population every year. One way to overcome this problem is to pay attention to vehicle aerodynamic factors. Methods to reduce aerodynamic drag can be done by modifying the flow of air through the body of the vehicle and delaying separation and reducing the development of the recirculation area at the rear of the vehicle. This can be achieved through the application of suction active control in vehicles. This study aims to analyze the characteristics of flow pattern formed at the rear of the vehicle model, the distribution of pressure on the back wall, and the reduction of aerodynamic obstacles. The model used is an Ahmed's model modification by changing the direction of flow orientation and having a front body tilt of 25° . The research was carried out through a computational approach utilizing the Computational Fluid Dynamics (CFD) program and validated through experimental laboratory testing utilizing sub-sonic wind tunnel facilities. For the computational method data obtained in the form of flow characteristics, pressure coefficient, and drag coefficient. Whereas experimental testing only focuses on efforts to validate the drag coefficient by utilizing a load-cell device. The upstream velocity applied were 11.1 m/s, 13.9 m/s and 16.7 m/s and the suction velocity were 0.2 m/s, 0.5 m/s, 0.8 m/s, and 1.0 m/s, respectively. The results showed that the application of suction active control can reduce wake formation, increase the pressure distribution on the rear wall of the vehicle model and be able to reduce the highest aerodynamic drag by 9.9020% for the computational approach and 10.1918% for the experimental approach.

Keywords: CFD, Flow separation, Flow characteristics, C_p , C_d , suction Active control

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI.....	xv
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	6
1.3. Tujuan Penelitian	7
1.4. Batasan Masalah	7
1.5. Manfaat Penelitian	8
BAB II. LANDASAN TEORI	
2.1. Penelitian Terkait	9
2.2. Dinamika Aliran pada Bodi Kendaraan	10
2.2.1. Lapisan Batas	13
2.2.2. Separasi Aliran.....	15
2.3. <i>Drag</i> Aerodinamika	16
2.3.1. <i>Drag</i> Tekanan	18
2.3.2. <i>Drag</i> Gesekan	21
2.4. Pengaruh Bentuk Bodi.....	22
2.4.1. Pengaruh Bentuk Bodi Depan dan Belakang Terhadap CD.....	23
2.5. Geometri Ahmed <i>body</i>	26
2.6. Modus kontrol aliran	29
2.7. Kontrol aktif aliran	30
BAB III. METODE PENELITIAN	
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	32
3.2. Model uji	32

3.3. Metode komputasi.....	33
3.4. Metode eksperimental.....	38
3.5. Diagram alir penelitian	42
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Karakteristik aliran	43
4.1.1. Karakteristik aliran pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s	43
4.1.2. Karakteristik aliran pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s	46
4.1.3. Karakteristik aliran pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s	49
4.2. Koefisien tekanan (C_p).....	53
4.2.1. Pengaruh kontrol aktif suction pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s	53
4.2.2. Pengaruh kontrol aktif suction pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s	58
4.2.3. Pengaruh kontrol aktif suction pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s	63
4.2.4. Koefisien tekanan minimum rata-rata	68
4.3. Koefisien drag (C_d).....	71
4.3.1. Koefisien drag pendekatan komputasi.....	71
4.3.1. Koefisien drag pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s	73
4.3.2. Koefisien drag pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s	76
4.3.3. Koefisien drag pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s	80
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	84
DAFTAR PUSTAKA	
DOKUMENTASI	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Aliran udara disekitar kendaraan	11
Gambar 2.2. Partikel fluida ketika mengalir pada lapisan batas.....	14
Gambar 2.3. Separasi aliran pada benda tegak	16
Gambar 2.4. <i>Frontal area</i>	18
Gambar 2.5. Disribusi tekanan pada <i>airfoil</i>	19
Gambar 2.6. Tekanan frontal pada mobil.....	20
Gambar 2.7. <i>Rear vacuum</i> daerah belakang mobil	21
Gambar 2.8. Perkembangan bentuk body kendaraan	23
Gambar 2.9. Pengaruh bentuk body bagian depan dan belakang terhadap nilai koefisien hambat.....	24
Gambar 2.10. (a) Rear end, (b) Squareback, (c) Hatchback.....	25
Gambar 2.11. Pengaruh kemiringan body bagian belakang terhadap koefisien drag	26
Gambar 2.12. <i>Ahmed Body</i>	27
Gambar 2.13. Pemisahan aliran pada geometri <i>Ahmed body</i>	27
Gambar 2.14. Karakterisasi aliran Ahmed body	28
Gambar 3.1. Model uji.....	33
Gambar 3.2. <i>Computational domain</i>	35
Gambar 3.3. Lokasi pengambilan data distribusi tekanan.....	38
Gambar 3.4. Sub-sonic Wind Tunnel	39
Gambar 3.5. Pengukuran kecepatan sepanjang garis tengah seksi uji	39
Gambar 3.6. <i>Eksperimental setup</i>	40
Gambar 3.7. Model uji untuk pengujian eksperimental.....	40

Gambar 3.8. Diagram alir penelitian	42
Gambar 4.1. Pathline kecepatan pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s	46
Gambar 4.2. Pathline kecepatan pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s	49
Gambar 4.3. Pathline kecepatan pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s	52
Gambar 4.4. Koefisien tekanan minimum pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s	58
Gambar 4.5. Koefisien tekanan minimum pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s	63
Gambar 4.6. Koefisien tekanan minimum pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s	68
Gambar 4.7. Perbandingan gaya drag terhadap waktu pengujian	72
Gambar 4.8. Koefisien drag pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s	75
Gambar 4.9. Koefisien drag pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s	79
Gambar 4.10. Koefisien drag pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s	82

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Variasi kecepatan <i>suction</i> terhadap kecepatan <i>upstream</i> $U_{0_1} = 13.9$ m/s.....	36
Tabel 3.2. Variasi kecepatan <i>suction</i> terhadap kecepatan <i>upstream</i> $U_{0_2} = 16.7$ m/s.....	36
Tabel 3.3. Variasi kecepatan <i>suction</i> terhadap kecepatan <i>upstream</i> $U_{0_3} = 19.4$ m/s.....	36
Tabel 4.1. Perbandingan koefisien tekanan minimum pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s	56
Tabel 4.2. Perbandingan koefisien tekanan minimum pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s	61
Tabel 4.3. Perbandingan koefisien tekanan minimum pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s	66
Tabel 4.4. Koefisien tekanan minimum rata-rata setiap kecepatan upstream	70
Tabel 4.5. Koefisien drag pendekatan komputasi	71
Tabel 4.6. Perbandingan koefisien drag pada $U_{0_1} = 11.1$ m/s.....	75
Tabel 4.7. Perbandingan koefisien drag pada $U_{0_2} = 13.9$ m/s.....	79
Tabel 4.8. Perbandingan koefisien drag pada $U_{0_3} = 16.7$ m/s.....	82

DAFTAR NOTASI

Simbol	Keterangan	Satuan
l	Panjang model uji	m
w	Lebar model uji	m
h	Tinggi model uji	m
S	Jarak tempuh	m
U_o	Kecepatan <i>upstream</i>	m/s
U_{sc}	Kecepatan <i>suction</i>	m/s
F_d	Gaya <i>drag</i> aerodinamika	N
C_d	Koefisien <i>drag</i>	-
A	Luas frontal	m ²
P	Tekanan pada permukaan model uji	Pa
P_0	Tekanan <i>streamline</i>	Pa
ρ	Massa jenis	kg/m ³
μ	Visikositas fluida	kg/m-s
Re	Bilangan Reynolds	-
M	Massa	kg
v	kecepatan	m/s
C_p	Koefisien tekanan	-
U_{sc}/U_o	Perbandingan kecepatan <i>suction</i> dan kecepatan <i>upstream</i>	-

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Polusi udara dan krisis bahan bakar merupakan dua isu yang sedang menjadi topik perbincangan dunia saat ini. Hal ini disebabkan semakin meningkatnya perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, meningkatnya populasi kendaraan dan menurunnya produksi bahan bakar. *Environment Statistic of Indonesia 2015* merilis data terkait temperatur udara rata-rata Nasional tahun 2014 pada angka 26,96° C dimana temperatur tertinggi berada di DKI Jakarta yang mencapai 28,40° C yang merupakan daerah dengan populasi kendaraan tertinggi Nasional (BPS, 2015). Salah satu penyebab tingginya temperatur udara lingkungan adalah emisi gas buang kendaraan yang semakin meningkat. *Intergovernmental Panel On Climate Change In Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change* mengemukakan bahwa emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari bidang transportasi mencapai 14% dan diprediksi pada tahun 2050 akan meningkat dua kali lipat. Prediksi tersebut bukan tanpa alasan mengingat tingginya aktifitas manusia yang memanfaatkan kendaraan sebagai salah satu faktor penunjang perekonomiannya.

Di negara-negara berkembang khususnya Indonesia dengan tingkat populasi penduduk yang cukup tinggi, berefek pada tingginya angka pertumbuhan kendaraan. Tercatat dari tahun 2012 hingga 2014 rata-rata peningkatan jumlah kendaraan berada pada angka 11,51% dimana pada tahun 2014 tersebut total jumlah kendaraan penumpang mencapai 11.546.916 unit sekaligus menempatkan mobil penumpang sebagai transportasi darat terbanyak kedua setelah sepeda motor (Badan Pusat Statistik, 2015).

Tingginya populasi kendaraan khususnya mobil berbanding lurus terhadap jumlah konsumsi bahan bakar. Berdasarkan data dari pusat data dan informasi energi dan sumber daya mineral, penggunaan bahan bakar minyak terbesar di Indonesia berasal dari transportasi darat sebesar 47,5%, industri 21,9%, rumah tangga 19,1%, listrik 11,0% dan transportasi nondarat 0,5% (Pusat Data Kementrian ESDM, 2012). Selain itu rata-rata peningkatan kebutuhan energi setiap tahunnya sebesar 36 juta *barel oil equivalen* (BOE) dari tahun 2000 sampai 2014. Sedangkan cadangan energi tidak terbarukan seperti minyak bumi, gas bumi dan batu bara semakin menipis. Dari tahun 2010 hingga 2014 berturut-turut terjadi penurunan produksi minyak bumi dimana pada tahun 2014 produksi minyak bumi hanya 789 ribu bpd atau menurun 4,25% dibandingkan tahun 2013 sebesar 824 ribu bpd. Berdasarkan Rencana Strategis (Renstra) kementrian Energi Sumber Daya Mineral tahun 2015-2019, cadangan minyak bumi Indonesia sebesar 3,6 miliar barel diperkirakan akan habis dalam 13 tahun akan datang (Renstra ESDM 2015-2019). Hal ini perlu mendapat perhatian khusus guna menjamin ketersediaan energi masa depan.

Salah satu faktor yang mempengaruhi efisiensi penggunaan bahan bakar dan produksi gas buang pada kendaraan adalah faktor aerodinamika. Dimana sekitar 50-60 persen dari total energi bahan bakar digunakan untuk mengatasi hambatan aerodinamika (Hucho & Sovran, 1993., Bellman M et al, 2009., Hassan S.M.R et al, 2014). Selain gaya aerodinamika, tolok ukur perancangan dan operasi kendaraan saat ini diantaranya berupa berat kendaraan, efisiensi mesin, estetika, cara mengemudi, kenyamanan dan keamanan selama berkendara. Para peneliti telah membuktikan besarnya pengaruh tahanan aerodinamika bodi kendaraan terhadap efisiensi penggunaan bahan bakar (Saunders & Hoffmann, 1993., Kourta A & Gillieron P, 2009., Azizi, 2010), dimana daya yang digunakan untuk menggerakkan mobil juga

digunakan untuk mengatasi hambatan gelinding dan *drag* aerodinamika sehingga jarak tempuh mobil akan lebih pendek untuk setiap liter bahan bakar. Upaya minimalisasi gaya hambat merupakan langkah yang baik untuk mengurangi konsumsi bahan bakar. Dengan mengurangi gaya hambat pada kendaraan sebesar 2-3%, maka itu artinya kendaraan menghemat konsumsi bahan bakar sebanyak 700 hingga 1000 liter setiap tahun (Kumar et al, 2019).

Kontribusi *drag* aerodinamika pada kendaraan dipengaruhi oleh geometri depan mobil, kaca depan, atap dan bagian belakang yang telah ditentukan dengan berbagai model melalui pengujian dan perhitungan numerik. Hingga saat ini, *drag* aerodinamika pada mobil dapat diketahui dengan mudah melalui proses eksperimental maupun komputasi (Rajamani & Krishnan, 2006). Riset-riset terkini dalam bidang aerodinamika kendaraan difokuskan pada pengembangan desain yang efisien dan memberi efek penghematan bahan bakar secara signifikan. Para peneliti terdahulu telah menggunakan model kendaraan sederhana namun geometrinya relevan dengan kendaraan nyata. Riset-riset tersebut diantaranya: (Ahmed et al, 1984., Hinterberger et al, 2004., Fares, 2006., Minguez M. et al, 2008., Uruba V. & Hladik O, 2009., Gillieron P & Kourta A, 2010., Bayraktar et al, 2001., Meile W. et al, 2011., Conan B. et al, 2011., Thacker A et al, 2012).

Berbagai inovasi yang dilakukan pada mobil penumpang memiliki keterkaitan erat dengan kenyamanan, geometri mobil, efisiensi bahan bakar serta ketahanan pakai mobil tersebut. Selain itu, harga bahan bakar fosil yang terus mengalami peningkatan dan produksi yang semakin menipis menjadikan inovasi dalam efisiensi bahan bakar perlu dilakukan. Produk mobil penumpang dengan efisiensi bahan bakar yang tinggi akan sangat menarik minat para konsumen otomotif dan meningkatkan daya penjualan. Dalam hal ini para pembeli (konsumen) dapat menekan biaya

operasional dan secara tidak langsung telah mendukung program Pemerintah dalam bidang ketahanan energi.

Berbagai variasi mobil penumpang yang beredar di masyarakat, baik desain, pabrikan hingga kapasitas mesin. Namun jenis mobil yang paling diminati oleh para konsumen adalah mobil jenis *bluff body*. Kapasitas mobil jenis ini adalah 5-7 orang dan memiliki mesin dengan daya besar yang disesuaikan dengan kemampuan angkutnya dengan bentuk bodi yang kurang mempertimbangkan aspek aerodinamika sehingga gaya *drag* yang dialami pun cukup besar. Sebagian besar gaya *drag* muncul pada mobil disebabkan adanya tekanan rendah dan separasi aliran dibagian belakang mobil. Semakin cepat separasi aliran terjadi, maka pembentukan wake di belakang kendaraan akan semakin besar. Hal ini berdampak pada pengurangan kecepatan kendaraan, meningkatnya konsumsi bahan bakar dan mengarah pada efisiensi kinerja kendaraan yang semakin rendah (Ragavan et al, 2014). Dalam tinjauan dinamika fluida, metode untuk mengurangi hambatan aerodinamika dapat dilakukan dengan memodifikasi aliran udara yang melalui bodi kendaran dan menunda separasi serta mengurangi berkembangnya daerah resirkulasi pada bagian belakang dari struktur pusaran yang terseparasi (*separated swirling structure*) (Jahanmiri & Abbaspour, 2011). Metode-metode dimaksud dapat dilakukan dengan mengontrol aliran permukaan dinding, baik menggunakan sistem kontrol aktif maupun pasif (Fieldler & Fernholz, 1990).

Pengamplikasian sistem pasif dalam kontrol aliran telah banyak dilakukan dengan alasan biaya yang cenderung murah (Fourrie G, Keirsbulck, 2011., Altaf A, Omar A.A, Asrar, 2014). Kontrol aliran dapat dilakukan jika distribusi tekanan pada bagian belakang dan kaca belakang dapat dimodifikasi. Namun kontrol aliran pasif justru memberikan efek yang lemah terhadap aerodinamika karena sifat aliran yang

terlibat adalah turbulen dan kecilnya kontribusi gesekan pada hambatan aerodinamika yakni hanya sekitar 10% (Kourta & Gillieron, 2009). Dengan berbagai kelemahan penggunaan kontrol pasif, maka dianggap perlu untuk mencoba alternatif lain berupa kontrol aktif. Pengurangan pembentukan *wake* dapat dilakukan dengan mengidentifikasi lokasi pemisahan aliran dan kemudian menerapkan perangkat kontrol aktif *suction* dilokasi awal dimana pemisahan aliran terjadi (Kumar et al, 2019). Penggunaan kontrol aktif *suction* pada bagian belakang model mobil mampu meningkatkan tekanan statis hingga 50% dan mengurangi *drag* sebesar 10% (Gerop D & Odhenthal H.J, 2000). Penempatan kontrol aktif aliran kombinasi *blowing* dan *suction* pada bagian atas jendela belakang model Ahmed bodi yang memiliki kemiringan geometri kaca depan 25° dengan diameter kontrol aliran berlubang 0.01 meter juga mampu meningkatkan tekanan rata-rata, mengurangi area separasi aliran secara signifikan dan reduksi *drag* aerodinamika sebesar 9.4% (Wessen & Thiele, 2009). Penelitian terkait pengaplikasian kontrol aktif *suction* pada *reverse Ahmed body* dengan variasi sudut geometri depan 25° , 30° , 35° secara komputasi dan eksperimental pada kecepatan *upstream* 16.7 m/s serta kecepatan *suction* 0.5 m/s mampu meningkatkan koefisien tekanan sebesar 26.50 % pada model uji dengan kemiringan geometri depan 35° dan reduksi hambatan aerodinamika diperoleh pada model uji yang sama sebesar 14.74 % untuk pendekatan komputasi dan 13.57 % untuk pendekatan eksperimental (Tarakka et al, 2018). Melalui pembuktian berbagai hasil riset terdahulu bahwa penggunaan kontrol aktif mampu meningkatkan koefisien tekanan dan mengurangi separasi aliran serta reduksi *drag* aerodinamika, maka sistem kontrol aktif aliran teknik hisapan (*suction*) perlu dikembangkan lebih lanjut sebagai pengganti sistem kontrol pasif dengan tujuan utama berupa maksimalisasi efisiensi penggunaan bahan bakar pada kendaraan.

Pengujian aerodinamika kendaraan dapat dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental maupun metode simulasi numerik yang memanfaatkan perangkat *software computational fluid dynamic* (CFD). Metode komputasi numerik dapat digunakan dengan keunggulan lebih cepat dalam memperoleh data serta rendahnya biaya yang dibutuhkan. Selain itu, pengujian aerodinamika kendaraan dengan metode eksperimental dilakukan pada terowongan angin (*wind tunnel*), dimana model kendaraan diskalakan dan bentuk geometri yang sama dengan prototipe. Metode eksperimental ini sengaja dilakukan sebagai pembanding atau memvalidasi hasil yang diperoleh melalui metode komputasi numerik sehingga hasil yang diperoleh benar-benar akurat dan dapat dipertanggungjawabkan sebagai sebuah penelitian (Nallusamy & Mahaly, 2016). Dengan mengkombinasikan kedua metode tersebut, penelitian ini diharapkan mampu menjawab permasalahan terkait aerodinamika kendaraan dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Berdasarkan uraian diatas maka perlu dilakukan riset lebih lanjut terkait pengaruh kontrol aktif aliran teknik hisapan (*suction*) dengan judul **“Analisis Pengaruh Kontrol Aktif Separasi Aliran Pada Model Kendaraan Terhadap Hambatan Aerodinamika”**.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain:

- a. Bagaimana pengaruh penerapan kontrol aktif aliran teknik *suction* pada model kendaraan terhadap karakteristik pola aliran?
- b. Bagaimana pengaruh penerapan kontrol aktif aliran teknik *suction* pada model kendaraan terhadap nilai koefisien tekanan?
- c. Bagaimana pengaruh penerapan kontrol aktif aliran teknik *suction* terhadap nilai koefisien drag?

1.3. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, penelitian ini memiliki beberapa tujuan utama antara lain:

- a. Menganalisis pengaruh penerapan kontrol aktif aliran teknik *suction* pada model kendaraan terhadap karakteristik pola aliran.
- b. Menganalisis pengaruh penerapan kontrol aktif aliran teknik *suction* pada model kendaraan terhadap nilai koefisien tekanan.
- c. Menganalisis pengaruh penerapan kontrol aktif aliran teknik *suction* pada model kendaraan terhadap nilai koefisien drag.

1.4. Batasan Masalah

Melihat kompleksitas permasalahan diatas, maka dalam penelitian ini menetapkan batasan masalah sebagai berikut:

- a. Fluida yang digunakan adalah udara dengan densitas 1.225 kg/m^3 dan viscositas $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$.
- b. Pengujian baik secara komputasi maupun eksperimental dilakukan pada jenis aliran *steady*.
- c. Udara dianggap mengalir secara *incompressibel flow*.
- d. Model kendaraan yang digunakan baik uji komputasi maupun eksperimental memiliki perbandingan dimensi 1:6 terhadap Ahmed *Body* versi standar dengan panjang (L) = 0.174 meter, lebar (w) = 0.06483 meter dan tinggi (h) = 0.048 meter.
- e. Metode yang digunakan adalah metode komputasi dengan model turbulensi *k-epsilon* standar dan metode eksperimental untuk pengukuran *drag*

menggunakan *load cell* (pendekatan eksperimental hanya berupa pengukuran hambatan).

- f. Kontrol aktif aliran yang digunakan adalah jenis *suction* ditempatkan pada bagian atas geometri belakang berjumlah lima titik (Sc_1 , Sc_2 , Sc_3 , Sc_4 dan Sc_5) dengan jarak antar titik adalah sama serta masing-masing berdiameter 0.007 meter.
- g. Penelitian dilakukan pada kecepatan *upstream* $U_{0_1} = 11.1$ m/s (40 km/jam), $U_{0_2} = 13.9$ m/s (50 km/jam) dan $U_{0_3} = 16.7$ m/s (60 km/jam).
- h. Kecepatan *suction* yang diterapkan pada model kendaraan masing-masing $U_{sc_1} = 0.2$ m/s, $U_{sc_2} = 0.5$ m/s, $U_{sc_3} = 0.8$ m/s, dan $U_{sc_4} = 1.0$ m/s.
- i. Kemiringan sudut geometri depan (*slant angel*) model uji terhadap sumbu horizontal adalah 25° .

1.5. Manfaat

Dari hasil penelitian ini diharapkan memiliki beberapa manfaat baik bagi peneliti maupun masyarakat luas diantaranya:

- a. Diketuinya karakteristik aliran udara pada bodi kendaraan, besarnya koefisien tekanan serta hambatan pada mobil tanpa kontrol aliran dan menggunakan kontrol aktif aliran teknik *suction*.
- b. Sebagai bahan pertimbangan bagi produsen mobil mirip model uji yang diteliti untuk melakukan perbaikan atau menggunakan kontrol aktif aliran demi efisiensi kecepatan dan penghematan bahan bakar serta pengurangan polusi udara.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Penelitian Terkait

Sejauh ini, baik penelitian eksperimental maupun komputasi terkait gaya aerodinamika kendaraan mengklaim bahwa koefisien *drag* sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri depan dan belakang kendaraan. Pengaruh tersebut dapat diminimalisir melalui pengaplikasian kontrol aktif hisapan pada model. Roumeas et al meneliti tentang pangaplikasian kontrol aktif aliran berupa hisapan (*suction*). Kontrol aktif *suction* tersebut diletakkan pada bagian atas jendela belakang (*rear window*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan kontrol aktif *suction* mampu menghilangkan separasi pada geometri mobil *fastback* yang disederhankan dimana pengurangan *drag* mencapai 17% (Roumeas et al, 2009).

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Bruneau C.H et al, dimana kontrol aktif aliran yang digunakan adalah kombinasi tiga penempatan kontrol aktif hisapan (*suction*) dan tiupan (*blowing*) pada bagian belakang *Ahmed body*. Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan pengurangan gaya *drag* aerodinamika terbaik sebesar 13% (Bruneau C.H et al, 2009). Harinaldi et al menganalisis penggunaan kontrol aktif aliran untuk mereduksi gaya hambat aerodinamika *van model* dengan kecepatan *suction* dan *blowing* 1 m/s, 5 m/s, 10 m/s dan 15 m/s secara komputasi numerik. Hasilnya menunjukkan untuk penggunaan kontrol aktif hisapan (*suction*) mampu mereduksi gaya *drag* aerodinamika sebesar 15,83 % dan untuk penggunaan kontrol aktif tiupan (*blowing*) 14,38 % (Harinaldi et al, 2011).

Harinaldi et al meneliti tentang pengaruh penggunaan kontrol aktif hisapan (*suction*) untuk mereduksi gaya hambat aerodinamika dengan metode komputasi dan

eksperimental. Objek penelitian berupa van model dengan modifikasi struktur aliran dan kemiringan kaca depan 35° serta bilangan Reynolds 2.48×10^5 . Hasil penelitian menunjukkan untuk penggunaan kontrol aktif hisapan (*suction*) dengan metode komputasi berhasil mereduksi gaya hambat aerodinamika sebesar 13.86 % dan metode eksperimental sebesar 16,32 % (Harinaldi et al, 2012).

Harinaldi et al meneliti terkait pengaruh pengaplikasian kontrol aktif hisapan yang diletakkan pada bagian atas *van model* untuk mengontrol struktur aliran pada kemiringan geometri depan 35° melalui pendekatan komputasi dan eksperimental dengan kecepatan *upstream* 11.1 m/s dan kecepatan *suction* 1 m/s. Hasilnya menunjukkan terjadi pengurangan *wake* dan *vortex* serta reduksi *drag* aerodinamika mendekati 24 % untuk metode komputasi dan 14.8 % untuk pendekatan eksperimental (Harinaldi et al, 2012).

Moussa et al melakukan penelitian yang berkaitan dengan efek penggunaan kontrol aktif hisapan terhadap hambatan aerodinamika model kendaraan melalui pendekatan komputasi numerik. Hasil penelitian menunjukkan penerapan kontrol aktif hisapan yang ditempatkan di sisi belakang model kendaraan mampu mengurangi koefisien hambatan sebesar 9% (Mousa et al, 2014).

2.2. Dinamika Aliran Pada Bodi Kendaraan

Salah satu faktor yang harus diperhatikan dalam merancang bodi kendaraan adalah faktor aerodinamika. Aerodinamika didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari tentang gaya-gaya yang disebabkan oleh udara atau interaksi antara objek (benda) yang bergerak dengan udara sekitarnya (Anderson, 2001). Aerodinamika diambil dari kata *aero* yang berasal dari bahasa Yunani yang berarti udara dan *dinamika* yang diartikan tenaga atau kekuatan. Ketika suatu objek bergerak dengan kecepatan

tertentu melalui udara, terdapat gaya yang disebabkan oleh gerakan relatif antara permukaan benda dan udara. Aerodinamika pada kendaraan sangat erat hubungannya dengan kecepatan kendaraan dan hambatan udara karena berkaitan dengan karakteristik medan aliran pada bodi kendaraan dan timbulnya gaya tekanan serta gaya hambat yang mempengaruhi jumlah konsumsi bahan bakar (Bellman et al, 2009).

Umumnya dinamika aliran yang terjadi pada kendaraan dibagi atas dua jenis yaitu aliran internal dan aliran eksternal. Aliran eksternal merupakan aliran udara yang melalui permukaan kendaraan yang mengakibatkan timbulnya gaya-gaya yang mengganggu stabilitas dan optimalisasi performa kendaraan. Aliran disekitar kendaraan merupakan aliran yang kompleks, dimana akan menyebabkan tekanan ke dalam lapisan batas. Ketika aliran udara mencapai bagian belakang kendaraan, aliran akan mengalami separasi (pemisahan aliran) yang disebabkan oleh faktor gesekan dan viscositas fluida sehingga terbentuknya daerah turbulen yang besar dengan tekanan yang rendah dibagian belakang kendaraan yang disebut olakan (*wake*). Fenomena olakan ini berakibat pada terjadinya *preasure drag* yang dapat menurunkan performa kendaraan (Krishnani & Nari P, 2006).



Gambar 2.1. Aliran Udara di Sekitar Kendaraan (Azizi, 2010)

Karakteristik aliran sangat bergantung pada geometri dan Bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang didefinisikan sebagai perbandingan gaya inersia terhadap gaya viskos. Bilangan Reynolds biasanya digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran baik jenis aliran laminar maupun turbulen. Persamaan bilangan Reynolds dituliskan sebagai (Cengel & Cimbala, 2006).

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.1)$$

Dimana:

Re = Bilangan Reynolds (*Reynolds Number*)

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

L = Panjang karakteristik (m)

μ = Viskositas fluida (kg/ms)

Pada saat kendaraan melaju dengan kecepatan tertentu, viskositas fluida menyebabkan kecenderungan udara menempel pada permukaan kendaraan hingga membentuk lapisan batas (*boundary layer*). Sedangkan aliran yang berada diluar lapisan batas disebut *inviscid flow* atau aliran yang tidak dipengaruhi faktor gesekan dengan permukaan kendaraan dan konduktifitas termal (Anderson, 2010).

Kendaraan yang sedang bergerak memiliki dua bidang kontak yaitu kontak terhadap udara dan jalan. Kendaraan yang sedang melaju cenderung akan bergerak relatif terhadap jalan dimana ketika tidak ada hembusan angin, maka kendaraan akan bergerak dengan kecepatan relatif sama terhadap jalan dan udara. Namun jika ada gerakan udara relatif yang berhembus di sekitar kendaraan, maka kendaraan

cenderung memiliki perbedaan kecepatan relatif terhadap udara dan jalan. Pada pendekatan aerodinamika kendaraan, dapat diasumsikan tidak ada hembusan angin dan kendaraan dianggap bergerak dengan kecepatan konstan. Pada umumnya dinamika atau karakteristik aliran berhubungan dengan fenomena separasi aliran dan pola aliran udara pada kendaraan.

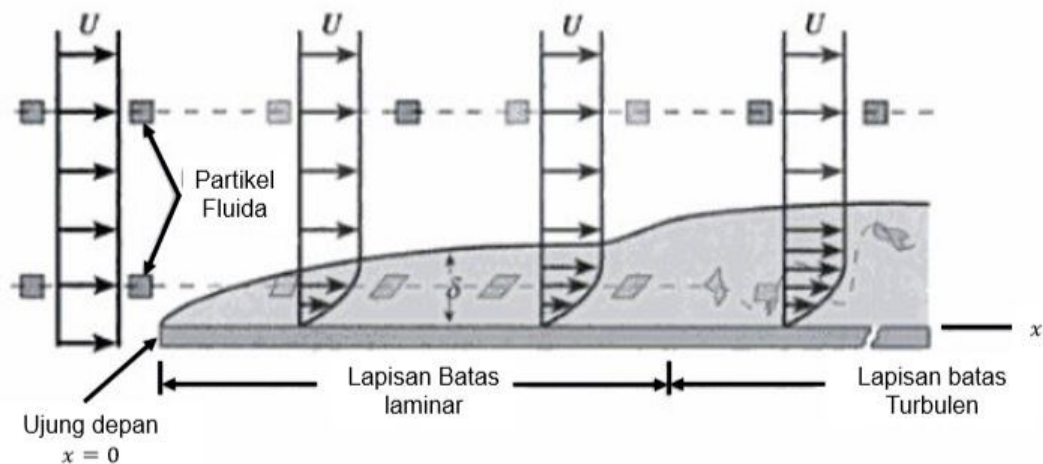
2.2.1. Lapisan Batas

Lapisan batas adalah konsep yang dikembangkan oleh Ludwig Prandtl (1874-1953) yang merupakan seorang ilmuwan dari *Gottigen University*. Lapisan batas didefinisikan sebagai lapisan yang terbentuk pada permukaan suatu benda yang dilewati fluida karena viskositas dan faktor gesekan antara fluida dengan permukaan benda hingga pada kondisi *inviscid*. Aliran *inviscid* adalah aliran dimana gesekan, konduktifitas panas dan difusi massa dapat diabaikan (Anderson, 2001).

Lapisan batas muncul pada permukaan benda karena sifat viskos dari fluida yang cenderung menempel pada permukaan yang bersifat stasioner yang menyebabkan aliran fluida di atasnya melambat karena interaksi tumbukan antar molekul fluida dan permukaan benda. Kecepatan pada daerah lapisan batas meningkat secara perlahan hingga mencapai kecepatan aliran bebas (*free stream*). Fluida dengan kecepatan aliran bebas dapat dimodelkan *inviscid* jika berada diluar daerah lapisan batas. Aliran fluida yang berada diluar lapisan batas disebut aliran tak berotasi, namun pada saat aliran tersebut masuk ke dalam lapisan batas maka aliran disebut aliran berotasi. Pada bagian *downstream* lapisan batas, ada bagian dimana alirannya menjadi turbulen yang dikarenakan partikel fluida menjadi sangat terdistorsi.

Lapisan batas memiliki ketebalan yang membatasi area dimana efek viskos masih berlaku pada suatu aliran fluida atau tidak. Semakin jauh jarak permukaan

benda yang dilewati oleh fluida, maka ketebalan lapisan batas akan lebih besar. Ketebalan sebuah lapisan batas dinotasikan dengan δ dimana perubahan kecepatan yang terjadi pada lapisan batas akan menentukan gradien kecepatan pada permukaan benda dan juga tegangan gesernya.



Gambar 2.2. Partikel fluida ketika mengalir pada lapisan batas (Munson, 2002).

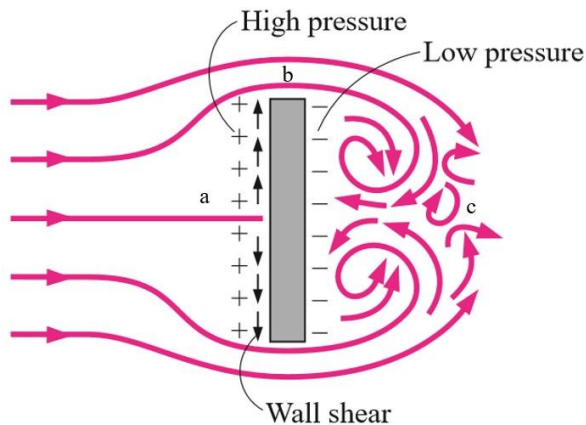
Pada gambar 2.2 menunjukkan lapisan batas yang disebabkan oleh fluida yang mengalir pada plat datar. Partikel fluida yang berada cukup dekat dengan permukaan pelat akan terhambat karena gesekan sehingga kecepatannya mendekati nol. Saat lapisan batas laminar tidak mampu mempertahankan kondisi *steady* yang dimilikinya, maka akan terbentuk lapisan turbulen. Kondisi lapisan batas tergantung pada kekasaran permukaan benda dan tingkat turbulensi aliran *free stream*.

Jika bilangan Reynolds cukup besar, hanya fluida didalam lapisan batas relatif tipis pada pelat yang akan merasakan efeknya. Artinya, kecuali didaerah dekat pelat, kecepatan aliran pada dasarnya akan sebesar $V = U$ i, yaitu kecepatan *upstream*. Untuk pelat dengan panjang tak terhingga yang membentang dari $x = 0$ sampai $x = \infty$, tidaklah jelas bagaimana mendefinisikan bilangan Reynolds karena tidak ada

panjang karakteristiknya. Untuk pelat dengan panjang tertentu, jelas bahwa panjang pelat L dapat digunakan sebagai panjang karakteristik. Namun untuk pelat dengan panjang tak terhingga, jarak koordinat sepanjang pelat dari ujung depan, sebagai panjang karakteristik dan bilangan Reynolds didefinisikan sebagai $Re_x = U_x/\nu$ (Munson, 2002).

2.2.2. Separasi Aliran

Separasi adalah kondisi dimana aliran udara yang mengalir disepanjang permukaan benda tidak mampu lagi menempel pada permukaan tersebut. Separasi aliran berakibat pada terbentuknya aliran balik disekitar benda. Aliran yang bergerak secara teratur akan terpecah saat terjadinya separasi dan mengakibatkan terjadinya penurunan distribusi tekanan dan menimbulkan gaya *drag* (Anderson, 2001). Pada kendaraan, separasi aliran yang terjadi sangat kompleks. Separasi aliran pada bagian bawah body, roda, dinding bagian samping, tepi atas dan samping kaca belakang, memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kompleksitas aliran. Perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang kendaraan merupakan kontributor utama dari keseluruhan *drag* yang disebabkan oleh adanya separasi aliran pada bagian belakang kendaraan (Brunn et al, 2007., Bruneau, 2010). Perbedaan tekanan ini menimbulkan fenomena hisapan kearah belakang akibat aliran balik yang terjadi pada bagian belakang kendaraan (Hilleman, 2007). Semakin cepat separasi aliran terjadi, maka pembentukan wake dan vortex dibagian belakang kendaraan akan semakin besar. Hal ini berdampak pada pengurangan kecepatan kendaraan, peningkatan konsumsi bahan bakar, dan mengarah pada efisiensi kinerja kendaraan yang semakin rendah (Ragavan et al, 2014).



Gambar 2.3. Separasi Aliran pada Benda Tegak (Cengel & Cimbala, 2006)

Pada gambar diatas jelas menunjukan skema terjadinya separasi aliran pada benda tegak. Adanya separasi aliran merupakan bentuk efek dari viskositas fluida (Munson, 2002). Karena disebabkan efek viskos, fluida di titik b pada permukaan benda kehilangan energi kinetik sehingga tidak memiliki momentum untuk mengalir dalam lapisan. Titik a adalah titik dimana separasi aliran terjadi. Sedangkan di titik c terjadi aliran balik (*wake*) karena perbedaan tekanan yang cukup besar antara sisi depan dan sisi belakang benda.

2.3. Drag Aerodinamika

Gaya drag adalah besarnya gaya yang bekerja secara berlawanan dengan gerakan relative sebuah objek yang bergerak sehubungan dengan fluida disekitarnya (Anderson, 2013). *Drag* pada suatu benda disebabkan oleh dua hal yakni gesekan antara fluida dengan permukaan benda kerja (Kundu et al, 2016). *Drag* karena gesekan biasa disebut dengan *friction drag* dan tergantung pada luas permukaan yang bersentuhan langsung dengan fluida, tegangan geser, viscositas, gradien kecepatan, kekasaran permukaan benda dan *streamline body*. Sedangkan *drag* karena perbedaan tekanan disebut *form drag*, yang tergantung pada bentuk, ukuran,

distribusi tekanan, *wake*, bilangan Reynolds dan *bluff body* dari suatu benda yang dikenakan aliran (Munson, 2002).

Koefisien *drag* merupakan sebuah gaya dari fluida yang mengalir melalui permukaan benda searah aliran. Persamaan yang digunakan untuk menghitung koefisien *drag* dapat dituliskan sebagai berikut (Cengel & Cimbala, 2006):

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A} \quad (2.2)$$

Dimana:

C_D = Koefisien *drag*

F_D = *Drag force* (N)

ρ = *Density* (kg/m³)

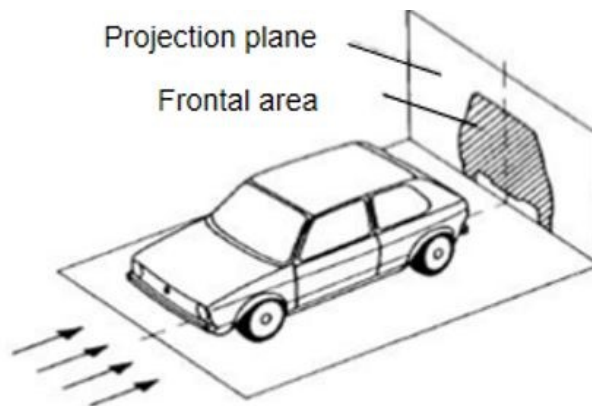
v = Kecepatan *upstream* (m/s)

A = Luas frontal (m²)

Total gaya *drag* yang dialami kendaraan akan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kecepatan udara hingga pada titik tertentu. Bentuk geometri kendaraan akan menentukan nilai koefisien *drag* dimana semakin aerodinamis bentuk kendaraan, maka nilai koefisien *drag* akan semakin kecil (Suswanto B & Finahari N, 2013). Besarnya gaya hambat yang terjadi akan mempengaruhi jumlah konsumsi bahan bakar karena energi yang dibutuhkan oleh mesin untuk mendorong kendaraan dan melakukan percepatan akan semakin kecil seiring dengan berkurangnya gaya hambat yang dikenakan pada kendaraan yang memiliki arah berlawanan dengan laju kendaraan. Artinya semakin kecil gaya hambat yang bekerja pada kendaraan, maka efisiensi energi bahan bakar akan dimaksimalkan untuk

mendorong kendaraan karena sedikitnya kerugian energi mesin untuk melawan gaya hambat.

Luas area (*frontal area*) juga sangat mempengaruhi nilai gaya hambat pada suatu kendaraan. Semakin kecil luas *frontal area* dari objek, maka semakin kecil pula gaya hambat yang dihasilkan (Heisler, 2002).

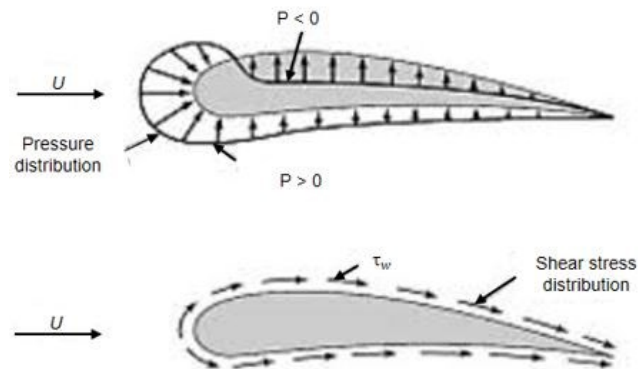


Gambar 2.4. *Frontal Area* (Heisler, 2002)

2.3.1. *Drag* Tekanan

Drag tekanan merupakan komponen paling besar memberikan pengaruh terhadap *drag* total pada kendaraan yang disebabkan oleh separasi aliran pada bagian belakang (Morel, 1978., Hucho et al, 1990., Brunn et al, 2007). Separasi aliran yang terjadi terlalu dini akan mengakibatkan penurunan distribusi tekanan pada dinding belakang kendaraan. Penurunan distribusi tekanan pada jendela belakang dan permukaan kendaraan berkontribusi 90% dari total hambatan dan 80%-nya terjadi pada bagian belakang kendaraan (Kourta & Gilieron, 2009). *Drag* tekanan (C_p) merupakan bagian dari *drag* yang langsung disebabkan oleh tekanan P terhadap sebuah benda. *Drag* ini sering disebut sebagai *drag* bentuk karena ketergantungan yang sangat kuat pada bentuk dari kendaraan. *Drag* tekanan adalah fungsi dari

besarnya tekanan dan orientasi arah elemen permukaan dimana gaya tekan tersebut bekerja. Sebagai contoh, gaya tekan pada kedua sisi plat datar sejajar aliran mungkin saja sangat besar, tetapi gaya tersebut tidak berkontribusi pada *drag* karena gaya tersebut bekerja pada arah tegak lurus terhadap kecepatan *upstream*. Sebaliknya gaya tekanan pada plat datar yang tegak lurus aliran menyebabkan *drag* secara keseluruhan (Munson, 2002).



Gambar 2.5. Distribusi tekanan pada *airfoil* (Munson, 2002)

Sehingga koefisien tekanan dapat dituliskan melalui persamaan (Munson, 2002):

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2.3)$$

Dimana:

C_p = Koefisien tekanan

P = Tekanan (Pa)

P_0 = Tekanan upstream

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

U = Kecepatan (m/s)

Besarnya tekanan acuan tidak mempengaruhi *drag* secara langsung karena total gaya tekanan pada benda adalah nol jika tekanan konstan pada seluruh permukaan. Jika viskositas nol, *drag* tekanan pada setiap benda berbentuk apapun (simetris atau tidak) dalam aliran tunak akan bernilai nol. Namun jika viskositasnya tidak nol, total *drag* tekanan mungkin tidak nol karena separasi lapisan batas (Munson, 2002).

Secara umum drag tekanan pada kendaraan terdiri atas dua macam:

a. *Frontal Pressure*

Frontal pressure merupakan jenis *drag* tekanan yang diakibatkan oleh tekanan aliran udara pada bagian depan kendaraan. Molekul udara menabrak grill depan mobil sehingga mengakibatkan tekanan udara di depan mobil meningkat. Akibat tekanan ini, molekul udara akan mencari jalan keluar di sekitar sisi, bawah dan depan mobil.



Gambar 2.6. Tekanan Frontal Pada Mobil (Azizi, 2010)

b. *Rear Vacuum*

Rear vacuum merupakan jenis *drag* tekanan yang disebabkan oleh ruang yang terbentuk di udara ketika kendaraan melaju yang dipengaruhi oleh kecepatan. Molekul udara yang tidak dapat mengisi ruang hampa akibat kendaraan melaju dengan kecepatan tinggi merupakan penyebab terjadinya *rear vacuum*. Ruang hampa yang terbentuk di daerah belakang kendaraan disebabkan oleh kecepatan kendaraan

melebihi kecepatan molekul udara yang memberikan efek hisapan berlawanan dengan laju arah kendaraan.



Gambar 2.7. *Rear Vacuum* Daerah Belakang Mobil (Azizi, 2010)

2.3.2. *Drag* Gesekan

Drag gesekan merupakan bagian dari *drag* yang langsung disebabkan oleh tegangan geser pada benda. *Drag* bukan hanya merupakan fungsi dari besar tegangan geser dinding, tetapi juga arah orientasi permukaan dimana gaya tersebut bekerja. Jika permukaan sejajar dengan kecepatan *upstream*, seluruh gaya geser berkontribusi langsung terhadap *drag*. Hal ini berlaku untuk plat datar sejajar dengan aliran. Jika permukaan tegak lurus terhadap kecepatan *upstream*, tegangan geser tidak memberikan kontribusi apapun terhadap *drag*.

Secara umum, permukaan sebuah benda akan terdiri dari bagian yang sejajar dan tegak lurus terhadap aliran *upstream* dan juga pada arah diantaranya. Fluida-fluida yang memiliki viskositas rendah, kontribusi dari gaya geser terhadap *drag* keseluruhan pada benda seringkali sangat kecil. Hal ini karena bilangan Reynolds untuk aliran-aliran yang lazim sangat besar, sehingga presentase *drag* yang disebabkan langsung oleh tegangan geser seringkali sangat kecil. Namun demikian, untuk benda-benda yang sangat *streamline* atau untuk aliran dengan bilangan Reynolds rendah, sebagian besar *drag* mungkin disebabkan oleh *drag* gesekan.

Drag gesekan pada plat datar dengan besar b dan panjang L yang sejajar dengan aliran *upstream* dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (Munson, 2002):

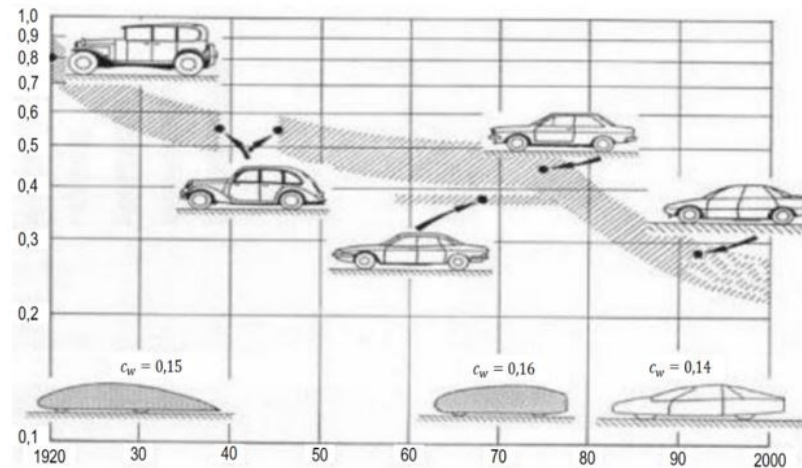
$$D_f = \frac{1}{2} \rho U^2 b l C_{Df} \quad (2.4)$$

Dimana C_{Df} adalah koefisien drag gesekan. Nilai dari C_{Df} dituliskan sebagai fungsi dari bilangan Reynolds, $Re_l = \rho U l / \mu$ dan kekasaran relatif ε/l .

2.4. Pengaruh Bentuk Bodi

Permasalahan aerodinamika sepenuhnya tidak dapat diselesaikan hanya dengan perhitungan analitis dan matematis saja namun harus menggunakan berbagai eksperimen untuk membantu menyelesaikan masalah dan membuktikan teori dasar yang sudah ada. Analisa yang dilakukan oleh berbagai pakar aerodinamika terhadap bentuk bodi kendaraan dilakukan dengan riset pengujian terhadap berbagai komponen bodi kendaraan dan pengaruhnya terhadap beban angin.

Dari tahun ketahun bentuk kendaraan lebih diarahkan pada upaya penurunan koefisien hambat aerodinamika (C_D) tanpa mengesampingkan aspek keindahan dari kendaraan. Hal ini dilakukan untuk menunjang kinerja kendaraan dan pertimbangan efisiensi bahan bakar. Berdasarkan gambar 2.8 dapat dilihat perkembangan bentuk body kendaraan dari tahun 1920 hingga tahun 2000.



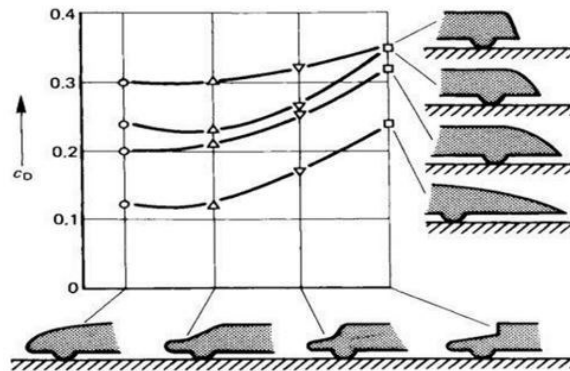
Gambar 2.8. Perkembangan bentuk bodi kendaraan (Munson, 2002)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa koefisien *drag* untuk mobil semakin berkurang secara terus menerus dari tahun ke tahun. Pengurangan tersebut merupakan hasil perancangan pada bentuk dan perincian seperti jendela dan kaca spion. Pengurangan *drag* telah dilakukan dengan suatu pengurangan luas proyeksi. Hasil pengurangan *drag* ini mampu meningkatkan efisiensi bahan bakar, khususnya ketika kendaraan dioperasikan dengan kecepatan tinggi.

2.4.1. Pengaruh Bentuk Bodi Bagian Depan dan Belakang Terhadap Koefisien Hambat

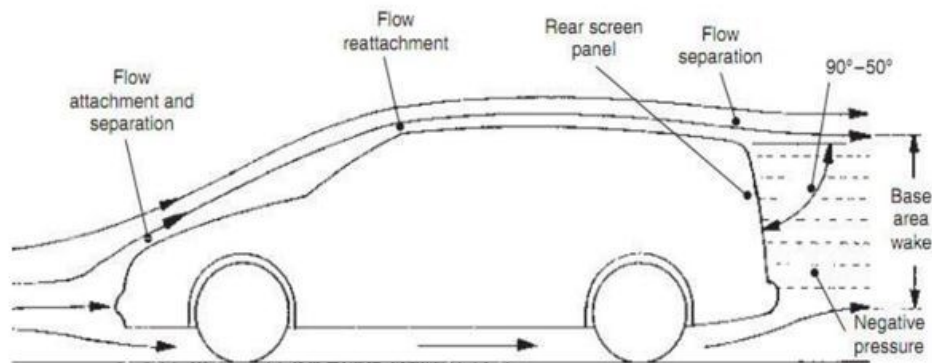
Penelitian terkait pengaruh bentuk bodi bagian depan dan belakang telah dilakukan pada tahun 1930. Dari gambar 2.9 menunjukan bahwa bentuk bodi bagian depan memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap nilai koefisien hambatan. Bentuk bodi depan yang berbentuk tajam (*sharp edge*) memiliki koefisien hambatan yang besar dibandingkan dengan bentuk bodi yang halus (*smooth edge*). Hal ini diakibatkan oleh angin yang melewati bodi dengan bentuk *smooth edge* tidak mengalami separasi aliran sehingga angin akan tetap *attached* dan tidak terjadi turbulensi yang dapat meningkatkan nilai koefisien hambatan (Hucho et al., 1990).

Bentuk bodi belakang dengan bentuk tumpul (*blunt rear end*) memiliki nilai koefisien hambat yang besar dibandingkan dengan bentuk bodi meruncing (*tapered rear end*). Namun pengaruh bodi bagian belakang terhadap penurunan nilai koefisien hambat tidak signifikan seperti pengaruh bentuk bodi bagian depan.

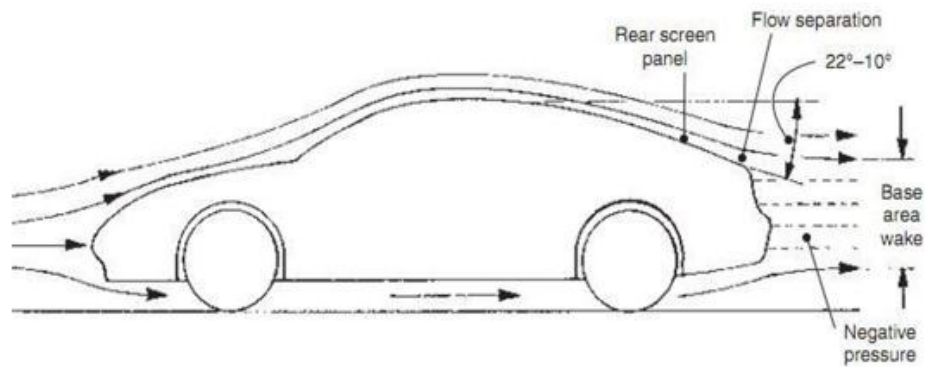


Gambar 2.9. Pengaruh Bentuk Body Depan dan Belakang Terhadap Nilai Koefisien Hambat (Hucho, et al., 1990).

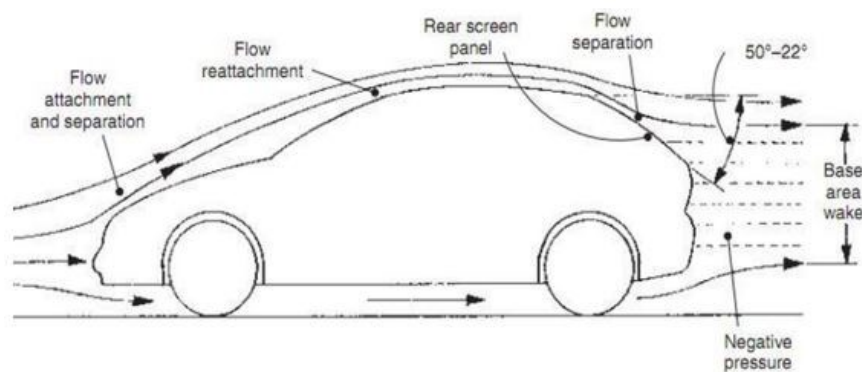
Bentuk bodi bagian belakang kendaraan dibedakan menjadi 4 jenis yaitu *squareback* (van), *fastback*, *notchback* (sedan) dan *hatchback*. Separasi yang terjadi pada bentuk *squareback* dimulai dari ujung belakang kendaraan pada bentuk *fastback*, *notchback* dan *hatchback* titik separasi dimulai lebih bawah sesuai dengan kemiringan kaca belakang.



(a)



(b)

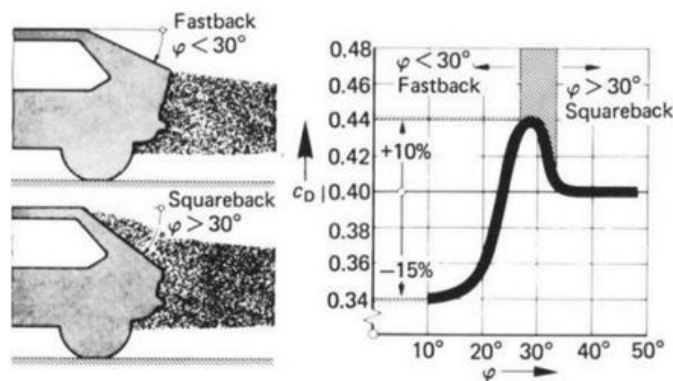


(c)

Gambar 2.10. (a) *Rear end*, (b) *Squareback*, (c) *Hatchback* (Heisler, 2002)

Dalam mereduksi gaya *drag* biasa dilakukan dengan menganalisa kemiringan bentuk bodi belakang kendaraan. Kemiringan bentuk *squareback* berbeda dengan bentuk *fastback*, dimana bentuk bodi *squareback* memiliki sudut kemiringan bagian belakang mendekati 90° sedangkan bentuk *fastback* dibawah 30 derajat. Saat ini kendaraan dengan bentuk *fastback* sudah jarang diproduksi. Pada *squareback*, akan terjadi *wake* yang lebih besar karena titik separasi dimulai dari bagian ujung belakang kendaraan, sedangkan pada kendaraan *fastback*, *hatchback* dan *notchback* *wake* yang terjadi lebih kecil. Nilai yang dihasilkan oleh *squareback* lebih tinggi dipengaruhi oleh besarnya *wake*.

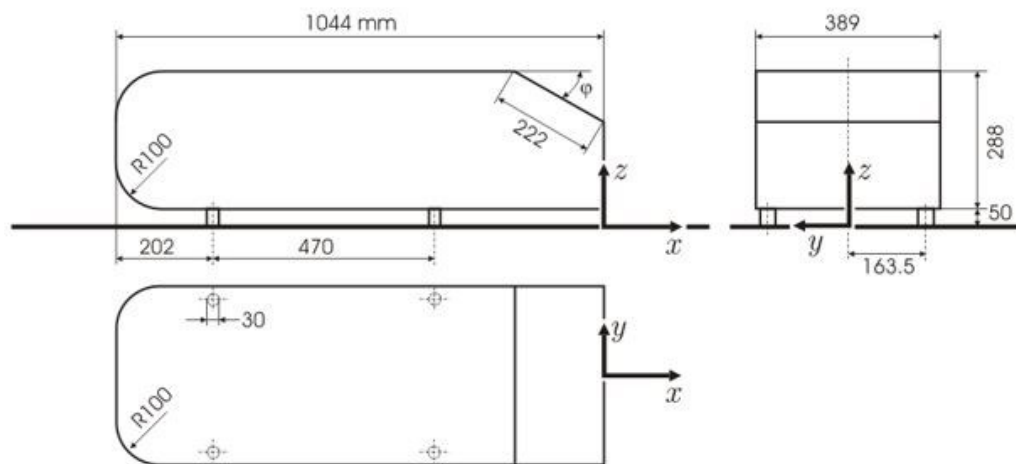
Pada bentuk *fastback* besarnya gaya *drag* pada sudut kemiringan bagian belakang selain dipengaruhi oleh besarnya *wake* juga dipengaruhi oleh aliran *vortex* yang terjadi pada bagian belakang kendaraan. Pada gambar 2.11 dibawah ini menunjukan bagian belakang kendaraan yang memiliki kemiringan antara 15-35 derajat memiliki besaran gaya *drag* dan *lift* yang cukup bervariasi. Hal tersebut disebabkan adanya pengaruh *vortex* yang besar pada kemiringan tersebut.



Gambar 2.11. Pengaruh Kemiringan Bodi bagian Belakang Terhadap Koefisien *Drag* (Hucho & Sovran., 1993).

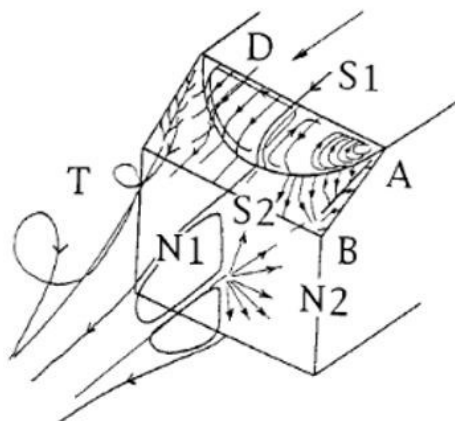
2.5. Geometri Ahmed Body

Fenomena fisik aliran yang terjadi di sekitar kendaraan dapat digambarkan melalui penggunaan model geometri. Ahmed *body* merupakan salah satu model geometri yang digunakan dimana dengan menggunakan model tersebut, sangat memungkinkan untuk mengetahui fenomena fisik aliran turbulen disekitar kendaraan. Kendaraan jenis *bluff body* paling umum menggunakan model *Ahmed Body* yaitu model kendaraan yang bagian depannya memiliki bidang *frontal* dan tidak terdapat permukaan miring yang cukup untuk mentransfer energi tekanan menjadi energi kinetik. Beberapa contoh diantara kendaraan dengan model *bluff* adalah bus, kereta api, mobil keluarga dan kendaraan angkut barang.

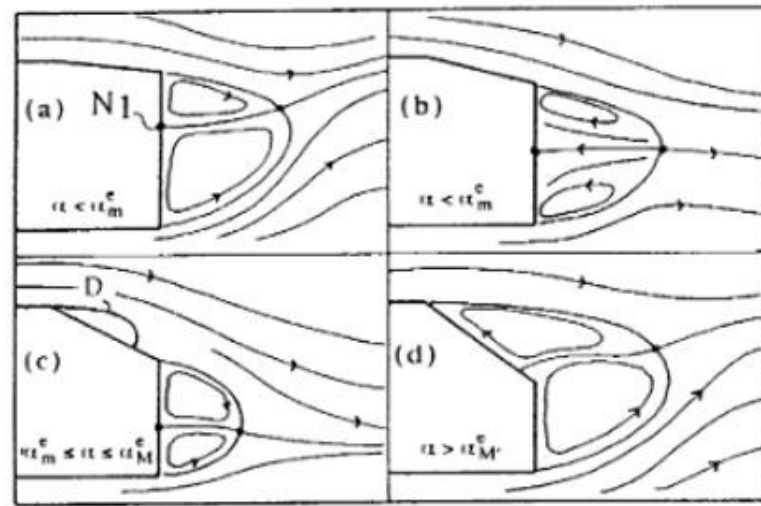


Gambar 2.12. Ahmed *Body* (Ahmed et al, 1984)

Pada gambar 2.13 menunjukkan separasi aliran yang terjadi pada bagian ujung atap sampai bagian bawah model Ahmed *body*. Aliran yang terpisah terdiri dari dua jenis aliran berputar yang berlawanan dan konvergen atau menuju dua pusat separasi (Ahmed et al, 1984). Aliran ini disebabkan oleh interaksi antara dua pusat separasi dengan aliran masuk serta aliran pada permukaan kendaraan. Aliran pada bagian samping model terpisah di sisi jendela belakang dan menimbulkan dua struktur pusaran longitudinal yang berlawanan arah putarannya. Pada dinding bagian belakang, aliran terpisah pada pinggir bawah yang menyebabkan timbulnya struktur pusaran yang berinteraksi dengan aliran yang terpisah di jendela belakang.



Gambar 2.13. Pemisahan Aliran Pada Geometri Belakang Ahmed *Body* (Gillieron P & Chometon F, 1999)



Gambar 2.14. Karakterisasi Aliran *Ahmed Body*
(Gillieron P & Chometon F, 1999)

Salah satu penelitian tentang aliran balik pada *Ahmed body* dengan metode eksperimental yang menggunakan rasio model 3/20 dari *Ahmed body* standar dengan panjang 156.6 mm (Uruba V & Hladik O, 2009). Kecepatan aliran 6.5 m/s dan bilangan Reynolds 54.000 dengan sudut kemiringan masing-masing 25° dan 35° pada bagian belakang terhadap bidang horizontal. Model uji ditempatkan pada seksi uji terbuka yang memiliki ukuran $250 \times 250 \text{ mm}^2$. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada kemiringan 25° , *down flow* terlihat sangat kuat disekitar bidang simetri sehingga pasangan *contra-rotating vortex* lemah. Sedangkan pada kemiringan 35° terlihat pembentukan vortex sangat besar.

Selain itu penelitian dengan metode eksperimental tentang aerodinamika kendaraan jenis *bluff* dilakukan dengan mengkombinasikan PIV dan *oil visualization* dengan maksud untuk memahami perilaku aliran di sekitar *Ahmed body* dan menginterpretasi secara fisik perubahan dari koefisien *drag*. Geometri *Ahmed body* yang digunakan memiliki variasi sudut kemiringan bagian belakang 10° , 20° , 25° , 30° dan 40° . Hasil penelitian tersebut menunjukkan koefisien *drag* untuk sudut 10° sampai

20° tidak mengalami banyak perubahan jika dibandingkan dengan hasil dari pengujian *Ahmed body* standar. Pada 20° sampai 30° terjadi perubahan sekitar 50% dimana pada sudut 30° koefisien *drag* yang diperoleh dari 0,27 menjadi 0,40. Setelah sudut 30°, koefisien *drag* yang diperoleh hampir konstan (Conan et al, 2011).

2.6. Modus Kontrol Aliran

Pengembangan kendaraan saat ini membutuhkan basis aerodinamika yang kuat untuk meningkatkan kontrol aliran baik berupa alat kontrol pasif maupun kontrol aktif. Teknik kontrol aliran yang sudah dikembangkan dapat dibedakan menjadi 4 berdasarkan konfigurasi dan tujuannya (Aider et al, 2009) diantaranya:

- a. Melakukan kontrol aliran pada titik separasi. Hal ini akan dengan mudah dilakukan jika daerah separasi terdefinisi dengan jelas seperti pada kasus *Ahmed body*.
- b. Melakukan kontrol terhadap lapisan batas pada *upstream* dari daerah separasi, sehingga lokasi daerah separasi dan sifat lapisan geser dapat dimodifikasi.
- c. Melakukan kontrol aliran dengan aktuasi sepanjang dinding *downstream* daerah dimana separasi terjadi. Kontrol aliran tersebut berupa tiupan (*blowing*) atau hisapan (*suction*).
- d. Melakukan kontrol aliran dengan aktuasi pada *region downstream* daerah dimana separasi terjadi.

Penerapan kontrol aliran dalam upaya mengurangi *drag* aerodinamika kendaraan merupakan cara memodifikasi separasi aliran di lapisan batas dari dinding kendaraan yang berakibat pada terbentuknya olakan di sekitar kendaraan. Sehingga pada aplikasi aerodinamika sangat dibutuhkan pengendalian terhadap aliran pada lapisan batas untuk mencegah atau menunda terjadinya separasi aliran.

2.7. Kontrol Aktif Aliran

Dalam melakukan kontrol aktif aliran membutuhkan penambahan energi untuk mengontrol separasi aliran. Kontrol aktif menggunakan aktuator yang membutuhkan daya dan umumnya diambil dari generator pada kendaraan. Bagian luar dari sistem ini berupa permukaan yang bergerak, lubang yang ditempatkan pada permukaan kendaraan dimana aliran harus dikontrol. Dalam pengaplikasian sistem kontrol aktif membutuhkan energi mekanik, elektromagnetik dan listrik yang ditempatkan pada bagian berongga. Berat dan dimensinya pun harus dibuat minimal untuk menghindari penggunaan luasan yang berlebihan.

Ketika aliran fluida melewati permukaan yang memiliki kelengkungan konveks, akan terjadi perubahan distribusi tekanan yang mendorong terjadinya separasi aliran di bagian *downstream* setelah melalui permukaan ini akibat tekanan balik. Secara konseptual, lapisan batas yang mengalami tekanan balik ini mungkin diberikan energi tambahan atau dihilangkan dan digantikan dengan fluida berenergi tinggi sehingga memungkinkan aliran terus bergerak melawan gradien tekanan balik tanpa mengalami separasi. Konsep pemberian energi dapat dilakukan dengan tiga cara diantaranya : 1. Tiupan (*blowing*), 2. Hisapan (*suction*) dan 3. *Jet synthetic*. Kontrol aliran dengan metode hisapan (*suction*) dapat dilakukan melalui penggunaan perangkat hisap seperti pompa vakum. Secara teoritis metode hisapan dapat dilakukan secara kontinu maupun periodik yang bertujuan untuk memodifikasi lapisan batas.

Contoh penelitian kontrol aktif dengan metode hisapan dengan kemiringan bagian belakang mobil 25°. Hasilnya menunjukkan pengurangan *drag* hingga 18% pada kecepatan hisapan $V_s = 0,6$ kali *free stream velocity* (Roumeas M, Gillieron P, & Kourta A, 2008). Selain itu pengaplikasian metode hisapan mampu mengurangi

gaya *drag* yang diakibatkan oleh pusaran *longitudinal vortices* yang terjadi di sisi kiri dan kanan kaca depan. Dalam riset tersebut diperoleh pengurangan *drag* hampir 8% dengan metode eksperimen dan numerik (Lehugeur B. & Gillieron P, 2006).