

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri automotif mengalami transformasi yang cukup signifikan selama beberapa dekade terakhir, dimana perkembangannya berfokus pada keandalan, efisiensi bahan bakar, dan dampaknya terhadap lingkungan. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh *International Energy Agency* (IEA), emisi karbon dioksida (CO₂) dari pembakaran energi dan aktivitas industri global mencapai 36,8 gigaton pada tahun 2022. Nilai emisi ini sekitar 0,5 gigaton lebih banyak dibandingkan tahun 2021, sekaligus menjadi rekor tertinggi baru dalam sejarah. Sumber utama peningkatan emisi ini diakibatkan oleh pembakaran batu bara dan minyak bumi. Nilai emisi akibat dari pembakaran minyak bumi (BBM) sendiri mencapai 11.2 gigaton. Angka ini kurang lebih sekitar sepertiga dari penyebab kenaikan emisi karbon dioksida (IEA, 2022). Nilai emisi karbon dioksida ini berpengaruh secara signifikan pada peningkatan pemanasan global. Menurut *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), tren peningkatan suhu permukaan bumi disebabkan oleh aktivitas manusia yang meningkatkan polusi karbon dioksida dan gas rumah kaca lainnya ke atmosfer. Hasil pencatatan suhu oleh NASA menunjukkan bahwa suhu permukaan bumi pada tahun 2021 meningkat sebesar 0,85°C dibandingkan suhu rata-rata tahunan selama periode 1951 hingga 1980. Dalam satu dekade belakangan, suhu permukaan bumi juga sempat meningkat hingga 1,02°C pada tahun 2016 dan 2020 (NASA, 2022). Angka ini dapat diperoleh mengingat ketergantungan aktivitas manusia terhadap kendaraan.

Di Indonesia sendiri, permintaan akan kendaraan beroda empat cukup tinggi. Berdasarkan data statistik *ASEAN Automotive Federation* (AAF) tahun 2023, Indonesia tercatat menjadi pasar kendaraan mobil terbesar di Asia Tenggara, dengan jumlah penjualan unit kendaraan mobil mencapai 675.287 unit selama periode bulan Januari hingga Agustus 2023. Jumlah ini kurang lebih sekitar 30.85% dari keseluruhan penjualan unit kendaraan mobil di kawasan Asia Tenggara. Selain itu Indonesia juga menjadi tempat produksi mobil terbesar kedua di Asia Tenggara, dengan jumlah produksi unit mobil hingga 947.776 selama periode bulan Januari hingga Agustus 2023 (AAF, 2023). Karena permintaan untuk kendaraan semakin tinggi, terdapat tantangan baru dalam pengembangan kendaraan, terutama aspek konsumsi bahan bakar dan emisi. Salah satu hal yang cukup krusial dalam pengembangan kendaraan dan efisiensi kendaraan adalah aerodinamika dari



adalah studi interaksi antara udara dan benda yang bergerak, dan sektor industri otomotif adalah untuk mengurangi gaya hambat stabilitas kendaraan, hingga meningkatkan efisiensi aerodinamika dalam efisiensi kendaraan cukup signifikan,

karena hambatan yang diberikan udara pada kendaraan dapat secara signifikan berpengaruh pada konsumsi bahan bakar dan emisi dari kendaraan. Karena industri otomotif mulai berfokus dalam pengembangan kendaraan yang ramah lingkungan dan efisien dalam penggunaan energi, maka optimalisasi aerodinamika dari model kendaraan menjadi kunci dalam inovasi dan riset dalam dunia otomotif.

Salah satu jenis mobil yang paling banyak diminati oleh masyarakat Indonesia adalah mobil berjenis *Multi-Purpose Vehicle* (MPV) yang disebut juga dengan *Minivan* atau Minibus. Hal ini diperlihatkan oleh data dari Badan Pusat Statistik tahun 2021, dimana jumlah kendaraan mobil yang beroperasi di Indonesia sekitar 21.950.275 unit dengan jumlah mobil penumpang mencapai 16.413.348 unit (BPS, 2021). Minibus sendiri adalah jenis kendaraan yang dirancang untuk mengangkut penumpang atau barang, dengan konfigurasi tempat duduk dua atau tiga baris. Minibus memiliki bodi berbentuk kotak (*bluff body*), dengan bagian atap mobil yang lebih tinggi dan bagian bawah mobil yang relatif datar. Untuk mobil jenis ini, fenomena hisapan akibat aliran di bagian belakang bodi mobil menjadi sumber utama penyebab drag dari kendaraan karena dapat memberikan pengaruh hingga 30% dari keseluruhan drag (Choi et al, 2014). Aliran secara masif terpisah pada bagian belakang mobil, menyebabkan nilai distribusi tekanan yang rendah dan memberikan kontribusi drag yang signifikan. Sehingga, apabila distribusi tekanan pada bagian belakang mobil dapat ditingkatkan, maka reduksi drag dapat diperoleh (Grandemange et al, 2014). Berbagai eksperimen telah dilakukan dengan menggunakan geometri *bluff body* sederhana, baik pada dua dimensi ataupun tiga dimensi, yang menunjukkan bahwa peningkatan distribusi tekanan dapat diperoleh dengan melakukan penundaan separasi aliran. Penundaan separasi aliran ini akan mempengaruhi ukuran olakan pada bagian belakang mobil, mengurangi kurvatur dari gelembung separasi, dan mereduksi daerah resirkulasi (Mariotti & Buresti, 2013., Trip et al, 2014).

Berbagai perusahaan manufaktur kendaraan telah melakukan perubahan desain pada kendaraan penumpang dan truk yang berfokus pada aerodinamika desain untuk memenuhi standar emisi yang ada. Beberapa teknologi aerodinamika yang telah diterapkan berupa kontrol aktif, yaitu teknologi yang aktif pada kondisi yang telah ditentukan untuk meningkatkan efisiensi aerodinamika, maupun kontrol pasif yang mungkin dapat mempengaruhi performa kendaraan sepenuhnya, seperti manajemen pendinginan pada kendaraan, stabilitas dan kendali kendaraan. Akan tetapi, aerodinamika kendaraan adalah permasalahan dengan tingkat teknis yang tinggi dan kompleks. Menambahkan kontrol aerodinamika, seperti *air dam* ataupun mengoptimalkan performa aerodinamika dari kendaraan, mungkin karakteristik aerodinamika kendaraan sepenuhnya (Larose et



ontrol pasif aliran dapat dijadikan sebagai alternatif untuk an tersebut. Penggunaan kontrol pasif *vortex generator* pada *bluff Body* memberikan pengaruh yang lemah, tetapi signifikan

dalam penurunan drag aerodinamika, dengan pengurangan daerah hisapan pada bagian belakang model kendaraan hingga 2.8%. Profil kecepatan aliran mengalami penebalan yang disebabkan oleh *vortex generator*, yang menyebabkan efek positif pada distribusi tekanan pada bagian belakang model kendaraan (Evrard et al, 2017). Studi penggunaan kontrol pasif berupa *hemispherical dimple* dengan konfigurasi sejajar dan zigzag pada model menunjukkan reduksi drag yang signifikan. Dimana persentase reduksi drag menggunakan konfigurasi sejajar mencapai 5.88% dan menggunakan konfigurasi zigzag mencapai 8.65% (Salam N. et al, 2018). Selanjutnya, kombinasi penggunaan kontrol pasif berupa *fin* dan *dimple* pada model kendaraan menunjukkan peran kontrol pasif dalam menunda separasi aliran dan mengurangi olakan pada bagian belakang model kendaraan, dengan reduksi drag aerodinamika hingga 8.999% (Tarakka et al, 2022).

Proses pengambilan data karakteristik aerodinamika model kendaraan dapat dilakukan melalui beberapa metode. Metode eksperimental adalah salah satu metode yang paling lazim digunakan, dimana model kendaraan ditempatkan pada terowongan angin (*wind tunnel*), dengan geometri yang diskalakan terhadap prototipenya jika diperlukan. Metode yang lebih modern adalah menggunakan simulasi numerik dengan memanfaatkan kemampuan komputasi dari komputer. *Computational Fluid Dynamic* (CFD) adalah metode simulasi numerik yang banyak digunakan karena kemudahan dalam penggunaannya dan mampu memperoleh data karakteristik aerodinamika secara detail. Kendati demikian, metode simulasi numerik memerlukan validasi agar hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan (Nallusamy & Mahali, 2016). Sehingga, dengan penggunaan metode eksperimental dan simulasi numerik, diharapkan mampu memberikan data karakteristik aerodinamika kendaraan yang valid dan akurat.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka studi terkait penggunaan kontrol perlu dikembangkan. Sehingga, akan dilakukan penelitian dengan judul **“Studi Komputasi dan Eksperimental Pengaruh Vortex Generator Terhadap Karakteristik Aliran Fluida Melalui Model Kendaraan Minibus”**.

1.2 Rumusan Permasalahan

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana menganalisis dan mengevaluasi karakteristik aerodinamika pada model kendaraan *Reversed Ahmed Body* tanpa dan dengan penerapan vortex generator
2. Bagaimana menganalisis dan mengevaluasi distribusi koefisien tekanan pada model kendaraan *Reversed Ahmed Body* akibat penerapan vortex generator
3. Bagaimana menganalisis dan mengembangkan konfigurasi vortex generator berdasarkan variasi sudut serang



1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah penelitian, maka penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut.

1. Menganalisis dan mengevaluasi karakteristik aliran aerodinamika pada model kendaraan *Reversed Ahmed Body* tanpa dan dengan penerapan vortex generator
2. Menganalisis dan mengevaluasi distribusi koefisien tekanan pada permukaan model kendaraan akibat penerapan vortex generator
3. Mengevaluasi dan mengembangkan konfigurasi vortex generator yang optimal berdasarkan variasi sudut serang

1.4 Ruang Lingkup Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dengan densitas (ρ) = 1.164 kg/m³ dan viskositas (μ) = 1.872 × 10⁻⁵ kg/m · s. Udara dianggap mengalir secara inkompresibel.
2. Model kendaraan yang digunakan adalah *Reversed Ahmed Model* dengan perbandingan skala model 1 : 6 dari *Ahmed Model* yang asli yang memiliki dimensi panjang (l) = 0.174 m, lebar (w) = 0.06483 m dan tinggi (h) = 0.048 m.
3. Kemiringan sudut pada bagian depan model kendaraan terhadap arah aliran bebas (*slant angle*) adalah 30°.
4. Variasi kecepatan *upstream* (U_0) yang digunakan adalah 11.1 m/s (40 km/jam), 13.9 m/s (50 km/jam), 16.7 m/s (60 km/jam), 19.4 m/s (70 km/jam) dan 22.2 m/s (80 km/jam).
5. Jumlah *vortex generator* yang digunakan adalah sebanyak 8 buah
6. Variasi sudut vortex generator terhadap arah aliran bebas adalah 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40° dan 45°
7. Metode komputasi menggunakan model turbulensi k-epsilon ($k - \epsilon$).
8. Metode eksperimental menggunakan *load cell* untuk melakukan pengukuran *drag*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan melakukan penelitian ini, maka diharapkan dapat memberikan gambaran umum bagaimana penggunaan kontrol pasif dapat mempengaruhi distribusi tekanan pada model kendaraan. Dalam dunia akademik, penelitian ini menjadi referensi dalam pengembangan model kendaraan. Dalam penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai referensi bagi para otomotif dalam mengembangkan model kendaraan.



1.5 Tinjauan Pustaka

1.6.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk melakukan kontrol aliran pada kendaraan dengan tujuan untuk meningkatkan performa kendaraan. Salah satu strategi untuk meningkatkan performa kendaraan adalah dengan mengurangi gaya *drag* pada kendaraan tersebut. Penelitian tersebut dilakukan baik secara eksperimen maupun komputasi dengan tujuan untuk mengatasi olakan aliran pada bagian belakang kendaraan yang memberikan kontribusi terbesar pada gaya *drag* kendaraan. Penggunaan kontrol pasif pada *Ahmed Body* dengan meletakkan media berpori pada permukaan *Ahmed Body* 2D memberikan reduksi drag hingga 45% (Bruneau et al, 2008).

Penelitian lainnya menggunakan *deflector* yang ditempatkan pada sudut atas kaca belakang model kendaraan pada bilangan Reynolds 3.1×10^5 dan 7.7×10^5 . Hasil pengukuran gaya *drag* menggunakan balance menunjukkan reduksi drag hingga 9%. *Deflektor* memperluas daerah separasi pada bagian kaca belakang model kendaraan, dan ketika daerah tersebut cukup besar, daerah tersebut mengganggu olakan pada bagian belakang kendaraan (Fourrie et al, 2011). Kemudian penelitian lainnya, mengaplikasikan *flap* pada model kendaraan *square-back Ahmed body*. Hasil yang diperoleh adalah reduksi drag hingga 11.1%. *Flap* yang ditempatkan pada model kendaraan menghasilkan olakan yang mengerucut dan lebih kecil (Altaf, 2014).

Penelitian serupa dilakukan pada model kendaraan *Ahmed Body*, dimana deflektor ditempatkan pada bagian sudut atas dan sudut samping kaca belakang model kendaraan. Hasil yang diperoleh adalah reduksi drag hingga 10.9%. Deflektor yang ditempatkan pada sudut samping kaca belakang model kendaraan dapat mengurangi atau bahkan menambah gaya *drag*, bergantung pada ketinggian dari deflektor. Sehingga penempatan deflektor mereduksi gaya *drag* dari permukaan miring kaca belakang model kendaraan (Hanfeng, 2016).

Selanjutnya, penelitian pada model kendaraan *Ahmed Body* dilakukan dengan menambahkan *dimple* pada bagian belakang model kendaraan tersebut. Pada model kendaraan dengan sudut *slant* 25° dan kecepatan 3 m/s, reduksi gaya *drag* yang diperoleh mencapai 40%. Berdasarkan penelitian ini, penggunaan *dimple* diaplikasikan secara aktual pada kendaraan untuk perlombaan *Shell Eco Marathon Asia* 2015. Hasilnya, dengan penempatan *dimple* pada kendaraan meningkatkan *drag* hingga 7% (Stanly et al, 2016). Kemudian, penelitian menggunakan *generator* dan *flap* dilakukan pada model kendaraan *Ahmed Body* diperoleh memperlihatkan terjadinya reduksi *drag* yang cukup signifikan pada model kendaraan *Ahmed Body* dengan *flap*, dimana terjadi reduksi drag dengan penempatan *flap* pada sudut belakang model kendaraan (Altaf, 2014). Penelitian secara numerik dilakukan pada model kendaraan menggunakan pelat *deflector* sebagai kontrol pasif. Deflektor



divariasikan sudutnya dari 25° hingga 60° . Hasil investigasi menunjukkan bahwa reduksi drag maksimal dapat diperoleh hingga 7% dibandingkan tanpa menggunakan deflektor. Olakan kecil yang disebabkan oleh *deflector* berinteraksi dengan olakan yang berada di belakang model kendaraan, mereduksi nilai koefisien drag dari model kendaraan (Raina, 2017)

Studi eksperimental dan komputasi dilakukan pada model kendaraan *Ahmed Body* menggunakan *vortex generator*. Hasil studi menunjukkan bahwa reduksi drag maksimum yang diperoleh mencapai 4.53%. Tingkat energi kinetik turbulen pada bagian atap model kendaraan lebih tinggi dibandingkan model kendaraan yang tidak diaplikasikan *vortex generator* (Shankar & Devaradjane, 2018).

Tarakka et al melakukan studi eksperimen dan numerik pada model kendaraan *Ahmed Body* dengan mengkombinasikan kontrol pasif berupa *fin* dan kontrol aktif berupa *suction*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kombinasi kontrol aliran memberikan pengaruh yang positif terhadap karakteristik aliran, dimana terjadi penundaan separasi aliran. Penambahan *fin* dan *suction* mereduksi koefisien drag dari model kendaraan sebesar 16.902% secara numerik dan 17.757% secara eksperimen (Tarakka et al, 2023).

1.6.2 Jenis-Jenis Aliran

Berdasarkan karakteristiknya, aliran fluida dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis sebagai berikut.

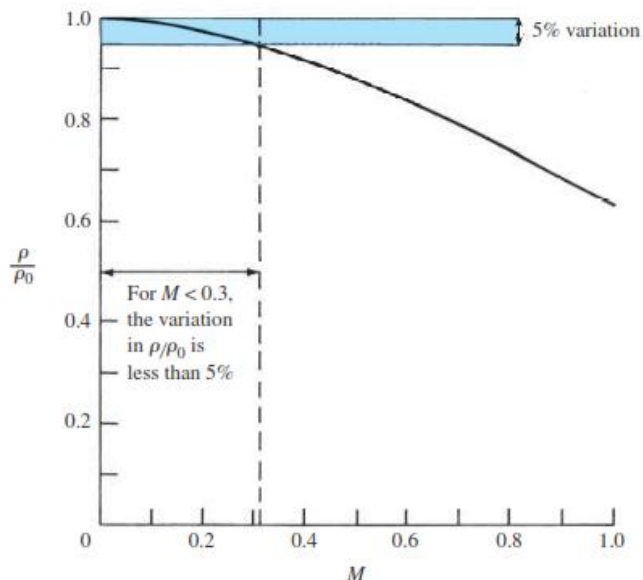
1.6.2.1 Aliran Viskos dan Aliran Inviscid

Ketika dua lapisan fluida bergerak relatif satu sama lain, maka gaya gesek akan terbentuk diantara keduanya. Gaya gesek ini disebabkan oleh sifat fluida yang disebut oleh viskositas. Viskositas disebabkan oleh gaya kohesif antar molekul (pada cairan) dan akibat tabrakan antar molekul (pada gas). Aliran dimana efek gesekan ini tidak dapat diabaikan disebut dengan aliran viskos. Sedangkan aliran yang diasumsikan tanpa gesekan disebut dengan aliran inviscid. Aliran inviscid sebenarnya tidak pernah ada, tetapi ada banyak aplikasi aerodinamika yang dimana efek gaya gesek ini sangat kecil dibandingkan dengan gaya inersia atau gaya tekan dari aliran. Sehingga pada aplikasi ini, digunakan pendekatan aliran inviscid (Cengel, 2006).

1.6.2.2 Aliran Kompresibel dan Aliran Inkompresibel



Aliran fluida dengan densitas yang konstan disebut dengan aliran inkompresibel, aliran fluida dengan densitas yang berubah-ubah disebut dengan aliran kompresibel. Ketika melakukan analisis aliran fluida, terutama aliran fluida inkompresibel, biasanya diekspresikan ke dalam bentuk bilangan Mach, yang didefinisikan sebagai



Gambar 1. Variasi Densitas Terhadap Bilangan Mach (Anderson, 2017)

$$\text{Ma} = \frac{U_0}{c} = \frac{\text{Kecepatan Aliran Lokal}}{\text{Kecepatan Suara Lokal}} \quad (1.1)$$

Aliran udara dapat dianggap sebagai aliran inkompresibel jika perubahan densitasnya berada dibawah 5%. Aliran ini dapat diperoleh jika bilangan Mach berada dibawah 0.32, dimana perubahan densitasnya kurang dari 5%. Pada bilangan Mach diatas 0.32, perubahan densitasnya meningkat secara eksponensial, sehingga efek kompresibilitas aliran tidak dapat diabaikan. Sehingga, ahli aerodinamika menyimpulkan bahwa aliran fluida dengan bilangan Mach dibawah 0.3 dapat diasumsikan sebagai aliran inkompresibel. Meskipun pada kenyataannya, aliran inkompresibel tidak pernah ada (Anderson, 2017).

1.6.2.3 Aliran Laminar dan Aliran Turbulen

Aliran fluida yang lapisannya tersusun dan bergerak secara halus disebut dengan aliran laminar. Sedangkan aliran fluida yang bergerak secara acak dengan kecepatan yang berfluktuasi disebut dengan aliran turbulen. Aliran yang berada diantara laminar dan turbulen disebut dengan aliran transisi. Pada tahun 1880, kukan oleh Osborn Reynolds menyimpulkan bahwa jenis aliran nelalui bilangan tak berdimensi yang disebut dengan bilangan inisikan sebagai (Cengel, 2006) :

$$\text{Re} = \frac{\rho U_0 L}{\mu} = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viskos}} \quad (1.2)$$



Untuk aliran yang berada di dalam saluran, aliran laminar diperoleh pada bilangan Reynolds dibawah 2300, aliran turbulen diperoleh pada bilangan Reynolds diatas 4000 dan aliran transisi berada diantaranya. Untuk aliran eksternal, aliran laminar diperoleh pada bilangan Reynolds dibawah 10^5 , aliran turbulen diperoleh pada bilangan Reynolds diatas 5×10^5 dan aliran transisi berada diantaranya (Cengel, 2006).

1.6.2.4 Aliran *Steady* dan Aliran *Unsteady*

Aliran *steady* adalah aliran fluida dimana tidak ada perubahan karakteristik aliran terhadap waktu. Pada aliran *steady*, sifat-sifat fluida tidak berubah pada satu titik tetap. Aliran yang beroperasi secara kontinu seperti turbin dan pompa dapat dianggap sebagai aliran *steady*. Sebaliknya, aliran *unsteady* adalah aliran dimana terdapat perubahan karakteristik aliran terhadap waktu.

1.6.3 Gaya *Drag* Aerodinamika

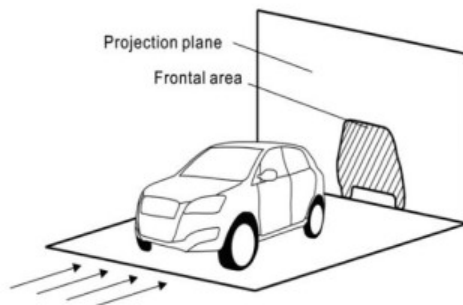
Ketika suatu benda bergerak melalui fluida ataupun sebaliknya, maka fluida tersebut akan memberikan gaya pada benda tersebut pada arah tertentu. Gaya drag adalah gaya yang diberikan oleh fluida pada benda yang arahnya sejajar dengan aliran. Gaya drag ini dapat diukur secara langsung dengan menempelkan benda pada suatu pegas yang telah dikalibrasi, kemudian menghitung pergeseran pegas tersebut sepanjang arah aliran. Pengukuran yang lebih mutakhir, seperti *drag balance*, menggunakan batang fleksibel yang disambungkan dengan *strain gage* digunakan untuk mengukur *drag* secara elektronik. Gaya *drag* adalah gaya yang tidak diinginkan, sehingga sebisa mungkin perlu diminimalisir. Gaya *drag* mempengaruhi penggunaan bahan bakar kendaraan bermotor, kapal, dan pesawat, mempengaruhi stabilitas kendaraan, hingga kebisingan dan getaran (Cengel, 2006).

Gaya drag bergantung pada densitas dari fluida, kecepatan *upstream* aliran, dan ukuran, bentuk dan orientasi dari benda terhadap aliran. Karena membuat daftar besarnya gaya *drag* pada suatu benda pada berbagai kondisi tidak praktis, maka digunakan angka tak berdimensi untuk mewakili karakteristik *drag*. Angka tak berdimensi ini disebut dengan koefisien drag, yang dapat diekspresikan sebagai berikut (Cengel, 2006).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 A} \quad (1.3)$$

Nilai A adalah luas frontal dari benda, yaitu luas benda yang diproyeksikan arahnya normal terhadap aliran. Konsumsi bahan bakar dari ini oleh luas frontalnya. Gaya *drag* aerodinamika bergantung kendaraan yang karakteristiknya diwakili oleh luas frontal memberikan tahanan terhadap benda yang melewatinya. bergantung secara langsung terhadap bentuk dan luas frontal awati fluida (Sprei et al, 2008).



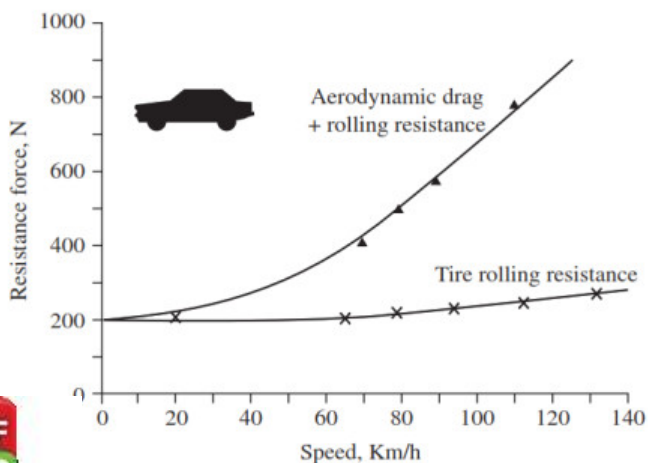


Gambar 2. Luas Frontal (Wu & Liu, 2011)

Pentingnya gaya *drag* aerodinamika pada kendaraan dan pengaruhnya pada konsumsi bahan bakar mulai dikaji pada saat kendaraan bermotor pertama kali di rilis. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.2, dimana diperlihatkan dengan jelas bahwa *rolling resistance* dari kendaraan mulai dapat diabaikan pada kecepatan diatas 100 km per jam. Sehingga, daya dorong kendaraan yang diperlukan untuk menahan gaya *drag* aerodinamika berbanding lurus terhadap pangkat tiga dari kecepatan kendaraan tersebut (Katz, 2016) :

$$P = F_D \cdot U_0 = C_D \left(\frac{1}{2} \rho U^3 A \right) \quad (1.4)$$

Sehingga, daya dorong yang diperlukan dan konsumsi bahan bakar kendaraan sangat bergantung pada gaya *drag* dari kendaraan tersebut.



Jan Antara Drag dan Rolling Resistance terhadap Kecepatan Kendaraan (Katz, 2016)

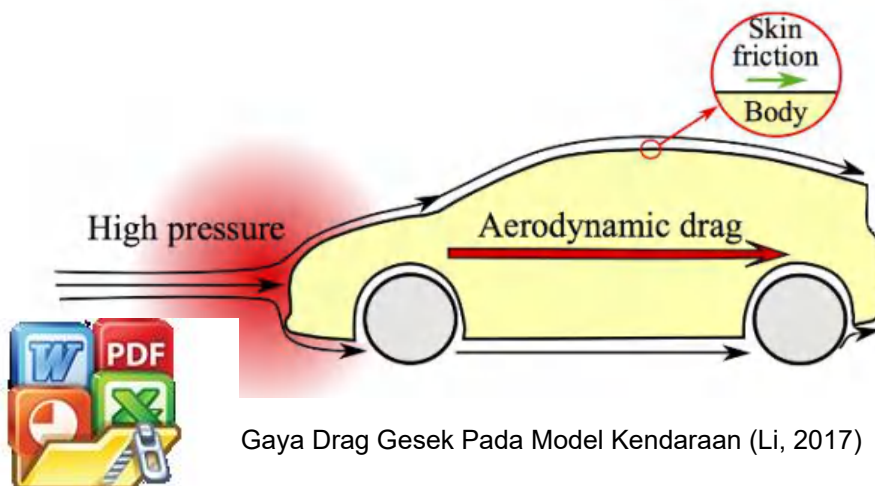
1.6.3.1 Gaya Drag Gesek

Gaya *drag* gesek (*Friction Drag*) adalah gaya *drag* yang disebabkan oleh distribusi tegangan geser pada permukaan benda. Gaya *drag* gesek adalah komponen dari gaya geser dinding yang sejajar dengan arah aliran, sehingga besar nilainya bergantung pada orientasi dari benda dan besarnya tegangan geser pada dinding benda. Gaya *drag* gesek bernilai nol untuk permukaan datar yang orientasinya tegak lurus terhadap arah aliran dan menjadi maksimal untuk permukaan datar yang orientasinya sejajar terhadap arah aliran. Gaya *drag* gesek adalah fungsi yang sangat bergantung terhadap viskositas dari fluida. Bilangan Reynolds berbanding terbalik terhadap viskositas dari fluida. Sehingga, kontribusi gaya *drag* gesek terhadap gaya *drag* total untuk *blunt body* cukup kecil pada bilangan Reynolds yang lebih besar dan dapat diabaikan pada bilangan Reynolds yang sangat tinggi. Pada bilangan Reynolds rendah, gaya *drag* total didominasi oleh gaya *drag* gesek. Hal ini sangat penting terutama untuk benda dengan bentuk yang *streamline* seperti airfoil. Gaya *drag* gesek tidak bergantung terhadap kekasaran permukaan benda untuk aliran laminar, tetapi sangat bergantung terhadap kekasaran permukaan untuk aliran turbulen (Cengel, 2006).

Koefisien gesek dinding (*Skin-Friction Coefficient*) C_f adalah angka tidak berdimensi yang menyatakan besarnya gesekan antara permukaan kendaraan dan udara, yang dapat dinyatakan sebagai berikut (Katz, 1996) :

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (1.5)$$

Dimana koefisien gesek dinding adalah τ yaitu tegangan geser pada permukaan kendaraan (tahanan gesek) dibagi dengan tekanan dinamis dari udara.



Gaya Drag Gesek Pada Model Kendaraan (Li, 2017)

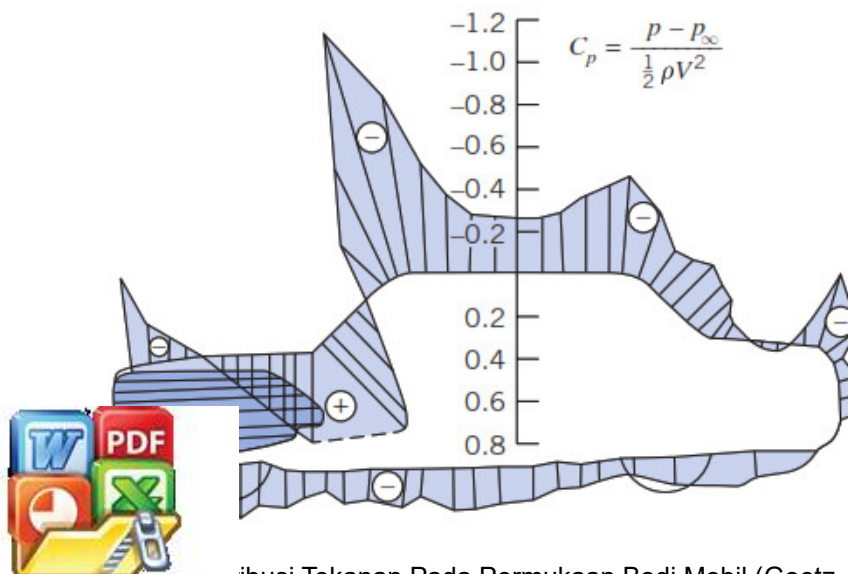


1.6.3.2 Gaya Drag Tekan

Gaya *drag* tekan adalah gaya *drag* yang disebabkan oleh distribusi tekanan pada permukaan benda. Gaya *drag* ini disebut juga dengan gaya *drag* bentuk (*form drag*) karena nilainya sangat bergantung pada bentuk permukaan benda. Nilai gaya *drag* tekan berbanding lurus terhadap luas frontal, dan juga berbanding lurus terhadap selisih antara tekanan yang bekerja pada bagian depan dan bagian belakang benda. Sehingga, gaya *drag* tekan biasanya mendominasi untuk *blunt body*, tetapi cukup kecil untuk benda yang *streamline* seperti airfoil dan pelat datar tipis yang orientasinya sejajar terhadap arah aliran. Gaya *drag* tekan menjadi sangat signifikan ketika kecepatan dari fluida terlalu tinggi sehingga fluida tidak lagi mampu untuk mengikuti kurvatur dari permukaan benda, dan menyebabkan aliran fluida terpisah dari permukaan benda pada suatu titik. Akibatnya, terbentuk daerah dengan tekanan yang sangat rendah pada bagian belakang benda. Gaya *drag* tekan pada kasus ini diakibatkan perbedaan besar antara tekanan di bagian depan benda dan di bagian belakang benda (Cengel, 2006).

Koefisien tekanan (*Pressure Coefficient*) C_p adalah bilangan tak berdimensi yang berhubungan secara langsung terhadap tekanan yang bekerja pada benda. Dimana koefisien tekanan dapat dinyatakan sebagai berikut (Katz, 1995) :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_0^2} \quad (1.6)$$



Perhatikan bahwa nilai koefisien tekanan adalah ukuran untuk tekanan lokal pada permukaan benda. Nilai distribusi tekanan tidak bergantung pada kecepatan kendaraan, dan distribusi tekanan pada kendaraan dalam bentuk C_p seharusnya sama untuk tiap kecepatan (Katz, 1995).

Untuk beberapa benda, terdapat bagian dari permukaan benda tersebut yang sejajar terhadap arah aliran fluida, dan ada juga yang tegak lurus terhadap arah aliran fluida, dan terdapat juga yang membentuk sudut diantaranya. Gaya *drag* tekan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan distribusi tekanan pada permukaan benda tersebut (Munson, 2009).

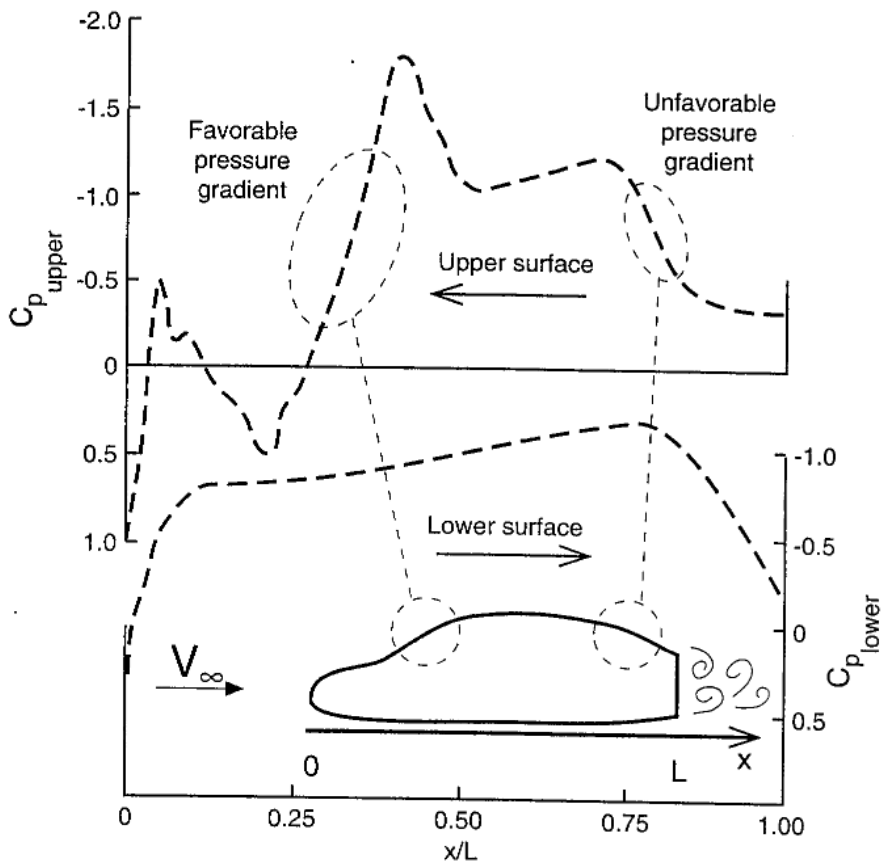
$$C_{D,P} = \frac{1}{A} \int C_p \cos \theta dA \quad (1.7)$$

Untuk aliran dengan gaya inersia yang relatif lebih besar dibandingkan dengan gaya viskosnya (Bilangan Reynolds tinggi), perbedaan tekanan berbanding lurus terhadap tekanan dinamis dan koefisien tekanan tidak berhubungan terhadap bilangan Reynolds. Dalam hal ini, koefisien drag dikatakan relatif tidak berhubungan terhadap bilangan Reynolds (Munson, 2009).

Gambar 2.5 menunjukkan distribusi tekanan pada kendaraan mobil. Ketika aliran dibelokkan oleh permukaan konkaf (pada bagian depan mobil), maka kecepatan aliran akan turun dan nilai tekanannya akan meningkat. Kemudian, ketika aliran dibelokkan oleh permukaan konveks (pada bagian *hood* depan mobil), maka kecepatan aliran akan naik dan nilai tekanannya akan turun. Pada bagian depan terdapat titik stagnasi sehingga nilai koefisien tekanannya adalah nol. Kemudian aliran berakselerasi sepanjang *hood* depan mobil dan nilai koefisien tekanannya menjadi negatif, karena permukaan pada daerah tersebut dapat dianggap konveks. Pada *root* kaca depan, kecepatan aliran kembali menurun, karena permukaannya dapat dianggap konkaf. Kemudian aliran kembali berakselerasi dari ujung kaca depan hingga ke atap mobil, dimana pada bagian ini tekanan terendah terukur.

Selanjutnya dibagian belakang mobil, tahap ini berulang tetapi terbalik (walaupun bentuk bagian belakang mobil sedikit agak berbeda dibandingkan bagian depan mobil). Tetapi, koefisien tekanan pada bagian belakang mobil tidak mencapai $C_p = 1$, seperti yang terlihat pada grafik. Hal ini disebabkan aliran mengalami separasi dibelakang mobil. Distribusi tekanan pada bagian bawah kendaraan juga mengalami hal yang sama. Akibat separasi aliran, tekanan pada bagian belakang mobil lebih rendah dibandingkan bagian depan, yang dimana pengaruhnya (Katz, 1996).



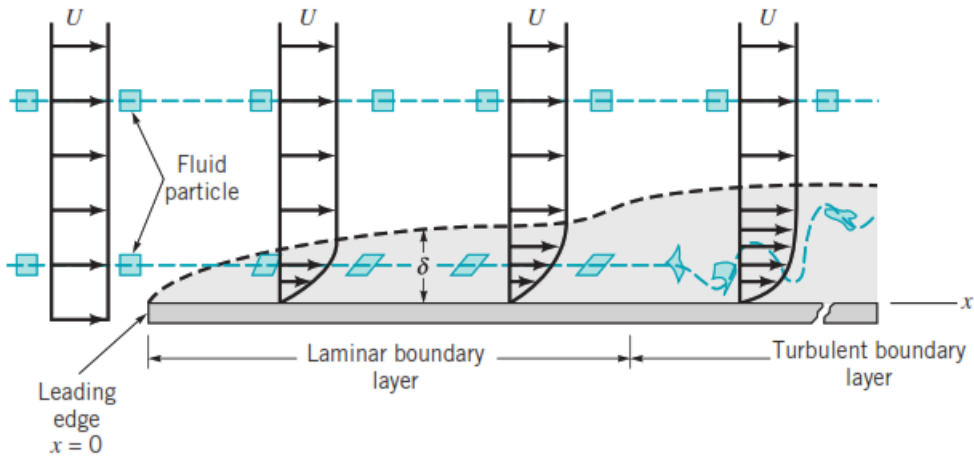


Gambar 6. Distribusi Tekanan pada Mobil (Katz, 1996)

Berdasarkan distribusi tekanan, kita dapat mengidentifikasi bagian pada kendaraan dimana tekanannya berkurang sepanjang *streamline*. Kondisi ini disebut gradien tekanan menguntungkan (*favorable pressure gradient*). Bagian ini dapat diamati pada bagian kaca depan kendaraan. Bagian lainnya adalah di dekat titik stagnasi depan kendaraan (dimana biasanya inlet radiator dipasang). Bagian yang berkebalikan dengan ini adalah pada bagian kaca belakang kendaraan. Kondisi ini disebut dengan gradien tekanan merugikan (*unfavorable pressure gradient*), karena tekanannya meningkat sepanjang *streamline* (Anderson, 2017).



adalah lapisan tipis yang berada di dekat permukaan benda, terpengaruh oleh gesekan dari permukaan benda. Konsep ini dikemukakan oleh Ludwig Prandtl pada tahun 1904. Meskipun lapisan ini hanya mencakup sebagian kecil dari keseluruhan geometri dari benda, tetapi pengaruhnya terhadap gaya *drag* sangat signifikan (Anderson, 2017).



Gambar 7. Partikel Fluida Dalam Lapisan Batas Pelat Datar (Munson, 2009)

Jika bilangan Reynolds cukup besar, maka efek viskos akan menjadi penting di dalam lapisan batas. Lapisan batas diperlukan untuk memenuhi kondisi batas tanpa slip pada permukaan benda. Di luar lapisan batas, gradien kecepatan yang tegak lurus terhadap aliran sangat kecil, dan dapat dianggap sebagai fluida inviscid, meskipun viskositasnya bukan nol.

Gambar 2.6 memperlihatkan profil kecepatan pada lapisan batas. Kecepatan fluida tepat pada permukaan benda adalah nol dan meningkat secara kontinu hingga mendekati kecepatan upstream sebenarnya ($u = 0.99U_{\infty}$). Gradien dari profil kecepatan ini cukup penting karena menyatakan nilai tegangan geser pada permukaan benda. Tegangan geser pada permukaan benda diekspresikan dengan (Anderson, 2017) :

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{y=0} \quad (1.8)$$

Ada berbagai macam ukuran lapisan batas dan struktur aliran didalamnya. Variasi ini dipengaruhi oleh bentuk dari benda dimana lapisan batas terbentuk. Untuk memahami konsep ini secara sederhana, dapat diamati lapisan batas pada pelat datar dengan fluida viskos dan inkompresibel seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Ketika bilangan Reynolds cukup tinggi, hanya fluida yang berada didaerah lapisan mengalami efek gesekan dari permukaan pelat. Jika pelat cukup panjang tertentu dari *leading edge*, lapisan batas menjadi turbulen dan akan mengalami distorsi berat karena sifat acak dari aliran antara lapisan batas laminar dan lapisan batas turbulen terjadi. Pada bilangan Reynolds tertentu, diantara 2×10^5 hingga 3×10^6 , transisi lapisan permukaan dan besar turbulensi dari aliran *upstream*



Tebal lapisan batas hanya beberapa milimeter pada bagian depan mobil yang bergerak dengan kecepatan 100 kilometer per jam, dan tebalnya dapat mencapai beberapa centimeter pada bagian belakang mobil. Lapisan batas yang lebih tebal menciptakan gaya *drag* gesek yang lebih besar. Jika tebal lapisan batas mengalami peningkatan secara cepat, maka akan berakibat pada terjadinya separasi aliran, yang menyebabkan gaya *drag* yang tinggi dan hilangnya *downforce* dari kendaraan. Tebal lapisan batas turbulen lebih besar dibandingkan tebal lapisan batas laminar. Dimana pada range bilangan Reynolds tertentu, lapisan batas laminar dan turbulen, bergantung pada gangguan pada aliran, kekasaran permukaan dan yang lainnya. Karena pada lapisan batas turbulen terdapat transfer momentum yang lebih besar, maka separasi aliran akan tertunda lebih lama dibandingkan lapisan batas laminar. Hal ini yang menjadi alasan mengapa pada aplikasi otomotif, digunakan lapisan batas turbulen untuk menunda separasi aliran. Untuk kendaraan, sebagian besar daerah lapisan batas laminar harus dipertahankan. Tetapi untuk bagian dimana separasi aliran tidak dapat dihindari, seperti pada bagian belakang kendaraan atau pada bagian belakang airfoil, lebih baik menciptakan lapisan batas turbulen, dengan konsekuensi gaya *drag* tertentu, untuk menunda separasi aliran yang menyebabkan gaya *drag* terbesar pada kendaraan (Katz, 1996).

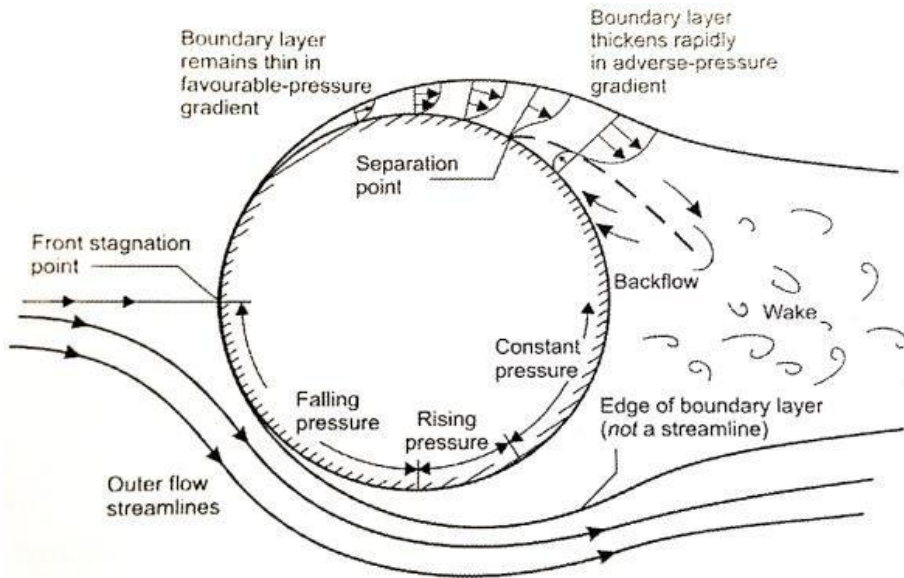
Baik secara eksperimen atau secara teoritis, tekanan statis lapisan batas pada arah tegak lurus terhadap permukaan benda adalah bernilai konstan. Fenomena ini cukup penting. Hal ini yang menjadi alasan mengapa distribusi tekanan yang dihitung menggunakan pendekatan aliran inviscid memberikan hasil yang akurat terhadap distribusi tekanan pada benda di kehidupan nyata (Anderson, 2017).

1.6.5 Separasi Aliran

Separasi aliran didefinisikan sebagai suatu kondisi dimana aliran fluida yang mengalir di sekitar permukaan benda tidak lagi mampu untuk menempel pada permukaan tersebut. Ketika aliran mengalami separasi, distribusi tekanan pada permukaan benda mengalami perubahan secara drastis yang menghasilkan gaya *drag* yang sangat besar. Gaya *drag* yang sangat besar pada *blunt body* disebabkan karena separasi aliran yang sangat besar (Anderson, 2017).

Salah satu metode yang optimal untuk menghindari separasi aliran adalah dengan mencegah pembentukan dari lapisan batas. Karena sifat alami dari lapisan batas yang menyebabkan perbedaan kecepatan antara aliran di dekat dinding permukaan benda dan bagian terluarnya (kondisi tanpa slip), maka perbedaan kecepatan ini harus dapat diminimalisir. Cara lainnya untuk menghindari separasi aliran adalah memberikan energi tambahan pada aliran fluida yang berada di bagian belakang ini karena aliran fluida yang berada di lapisan batas memiliki energi kinetik yang lebih rendah (Schlichting, 2017).





Gambar 8. Separasi Aliran Pada Silinder (Mudimeli, 2018)

Gaya *drag* tekan pada airfoil disebabkan oleh separasi aliran. Untuk aliran yang sepenuhnya menempel pada permukaan airfoil, tekanan yang bekerja pada permukaan bagian belakang dapat ditahan oleh tekanan dari depan airfoil, sehingga menghasilkan gaya *drag* tekan nol. Tetapi, jika aliran mengalami separasi pada permukaan bagian belakang airfoil, maka tekanan dari depan airfoil tidak lagi dapat menahan tekanan dari belakang tersebut, sehingga menghasilkan gaya *drag* tekan pada airfoil (Anderson, 2017).

Akibat terbentuknya profil kecepatan di dalam lapisan batas, terdapat pengaruh gradien tekanan. Jika gradien tekanannya menguntungkan, maka lapisan batas laminar akan tetap bertahan hingga nilai bilangan Reynolds mencapai beberapa juta. Adanya gradien tekanan yang menguntungkan akan menunda transisi aliran, dan juga menunda separasi aliran. Jika lapisan batas mulai merasakan gradien tekanan yang merugikan, maka transisi aliran akan terpicu. Koefisien gesek yang pada awalnya bernilai kecil, secara tiba-tiba mengalami kenaikan akibat transisi aliran menjadi turbulen. Transisi ini dapat ditandai oleh beloknya kurva distribusi tekanan. Belokan pada kurva distribusi tekanan terjadi karena naiknya tebal lapisan batas. Pada bagian belakang titik transisi ini, gesekan pada permukaan benda menyebabkan kenaikan gaya *drag* gesek. Karena gradien tekanan terjadi separasi aliran pada bagian belakang benda. Aliran di lapisan batas. Karena tekanan relatif pada daerah separasi ini peningkatan gaya *drag* tekan pada benda (Katz, 2016).



Bentuk mobil yang disederhanakan seperti *Ahmed Body*, adalah *bluff body* tiga dimensi yang bergerak melewati udara dan menghasilkan aliran turbulen. Beberapa daerah separasi aliran terbentuk pada permukaannya. Separasi aliran ini menghasilkan daerah resirkulasi yang memberikan koefisien *drag* yang cukup besar. Sehingga, tujuan kontrol aliran adalah untuk mengurangi daerah olakan akibat separasi aliran (Ahmed et al, 1984., Onorato et al, 1984., Gillieron & Spohn, 2002). Memodifikasi aliran secara lokal dilakukan dengan tujuan untuk menghilangkan atau menunda separasi aliran atau untuk mereduksi pembentukan daerah resirkulasi pada olakan di bagian belakang benda. Hal ini dapat diperoleh dengan melakukan kontrol aliran di dekat permukaan benda baik dengan atau tanpa menggunakan energi tambahan, dengan menggunakan kontrol aktif maupun pasif (Fiedler & Fernholz, 1990., Gillieron, 2002).

1.6.5.1 Olakan

Olakan (*wake*) adalah jejak aliran yang terganggu di belakang benda yang bergerak melewati fluida yang diam. Salah satu contoh dari olakan adalah olakan vorteks di belakang pesawat yang terbang, dan udara yang berputar dibelakang mobil truk. Gangguan lokal yang terjadi pada bagian belakang kendaraan ini adalah penyebab aktual dari kerugian momentum (atau *drag* bentuk) dari kendaraan. Jika aliran mengalami separasi di bagian belakang *bluff body*, maka olakan akan terbentuk, dan akan menyeret kendaraan ke belakang. Energi yang diperlukan untuk menyeret olakan ini menghasilkan gaya *drag*.

Ahmed et al. mempelajari pengaruh sudut *slant* bagian belakang model kendaraan terhadap olakan yang terjadi. Dari sudut 0° hingga 12.5° , aliran tetap menempel pada bagian belakang jendela model kendaraan dan terpisah pada bagian ujung belakang, menghasilkan olakan *square-back* tipikal. Jika sudut *slant* diperbesar maka aliran akan menjadi lebih kompleks, menghasilkan gelembung separasi pada bagian belakang jendela belakang kendaraan (Ahmed et al, 1984., Romeas et al, 2009).

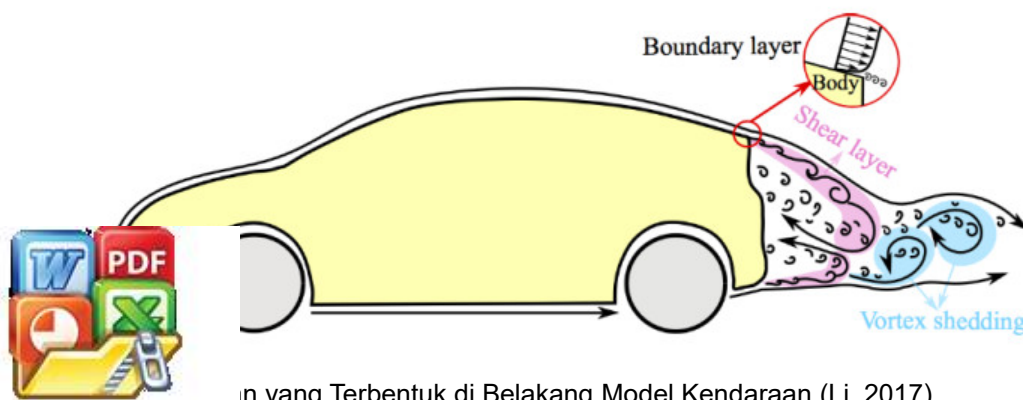


Diagram yang Terbentuk di Belakang Model Kendaraan (Li, 2017)

1.6.5.2 Faktor Geometri

Koefisien drag dari suatu benda bergantung pada bentuk dari benda tersebut, baik *streamline* maupun *blunt*. Untuk benda berbentuk elips dengan aspek rasio yang sangat besar, benda tersebut berperilaku sebagai pelat datar yang sejajar dengan aliran. Pada kasus ini, gaya *drag* gesek lebih besar dibandingkan gaya *drag* tekan. Gaya *drag* pada pelat datar yang sejajar dengan aliran bergantung pada kekasaran permukaannya, yang menentukan struktur lapisan batasnya. Sebuah pelat datar yang kasar memiliki kecenderungan untuk menghasilkan lapisan batas turbulen dibandingkan dengan pelat datar yang halus.

Secara umum, untuk benda yang *streamline*, gaya *drag* akan meningkat jika kekasaran permukaannya naik. Sehingga, diperlukan permukaan yang sehalus mungkin pada benda yang *streamline*. Untuk benda dengan bentuk *blunt body*, meningkatkan kekasaran permukaannya dapat mengurangi gaya *drag* pada benda tersebut. Hal ini dapat ditunjukkan pada benda berbentuk silinder, dimana olakan yang dihasilkan oleh silinder kasar lebih ramping dibandingkan olakan yang dihasilkan oleh silinder halus. Hasilnya adalah penurunan yang signifikan pada *drag* tekan dan hanya sedikit peningkatan *drag* gesek, yang jika dijumlahkan menghasilkan gaya *drag* total yang lebih kecil (Munson, 2009).

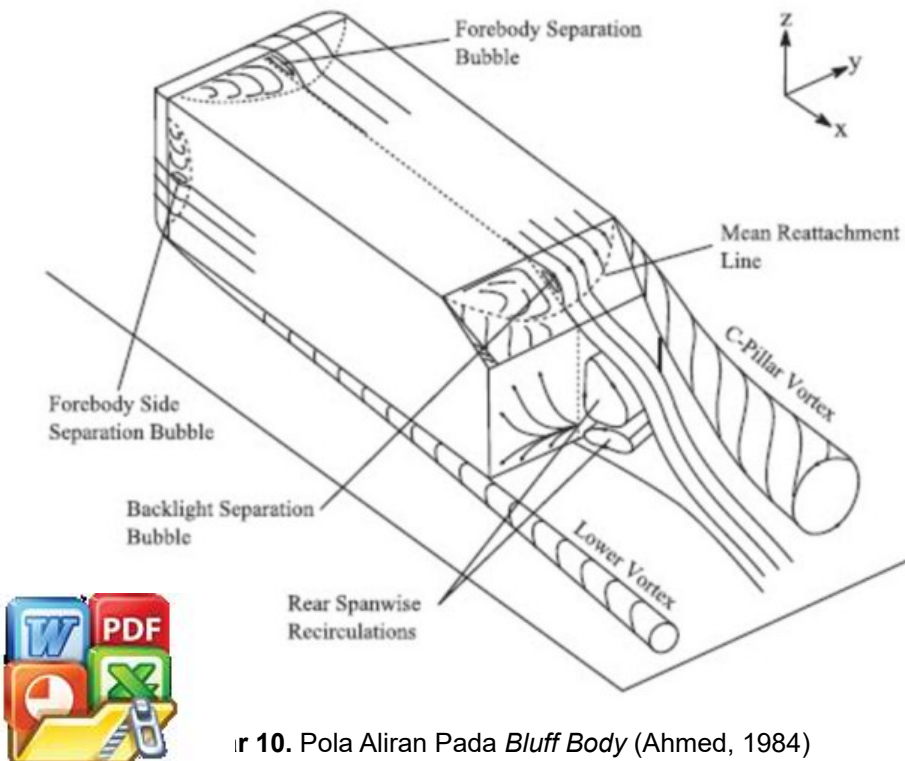


Fig. 10. Pola Aliran Pada *Bluff Body* (Ahmed, 1984)

1.6.6 Persamaan Navier-Stokes

Persamaan Navier-Stokes adalah bentuk diferensial dari hukum kedua Newton tentang gerak. Persamaan ini pertama diberi nama berdasarkan dua ilmuwan terkenal yaitu Louis Henri Navier (1785-1836) dan George Gabriel Stokes (1819-1903). Persamaan ini adalah persamaan paling mendasar dari mekanika fluida. Persamaan ini adalah persamaan diferensial parsial orde dua yang bersifat *unsteady* dan nonlinear. Solusi eksak dari persamaan ini hanya dapat diperoleh untuk kasus aliran yang sangat sederhana. Hingga saat ini, belum ada solusi umum yang memenuhi persamaan ini.

Persamaan Navier-Stokes memiliki empat variabel yang tidak diketahui, yang terdiri dari tiga komponen kecepatan dan tekanan, sedangkan persamaan ini hanya terdiri dari tiga persamaan. Untuk melengkapi persamaan ini, maka diperlukan persamaan kontinuitas untuk menyelesaikannya. Persamaan Navier-Stokes untuk aliran inkompresibel dalam koordinat kartesian dapat dinyatakan sebagai berikut (Cengel, 2006).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1.10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (1.11)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (1.12)$$

Secara teori, persamaan Navier-Stokes seharusnya dapat diselesaikan dengan menggunakan metode kalkulus. Tetapi, dalam pengaplikasiannya, persamaan ini terlalu sulit untuk diselesaikan secara analitik. Peneliti dan insinyur telah melakukan aproksimasi dan penyederhanaan persamaan hingga memperoleh set persamaan yang dapat diselesaikan. Dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), persamaan tersebut dapat diselesaikan dengan bantuan komputer menggunakan berbagai metode, seperti metode selisih (*finite difference method*), metode elemen hingga (*finite element method*), metode volume hingga (*finite volume method*) (Cengel, 2006).



1.6.7 Permodelan Turbulensi

Permodelan turbulensi (*Turbulence Modelling*) adalah model ideal yang menyederhanakan kompleksitas dari aliran turbulen dengan tetap mempertahankan karakteristik dari aliran tersebut. Permodelan turbulensi adalah salah satu kunci dalam proses simulasi CFD. Hampir semua aplikasi fluida dalam bidang teknik berkaitan dengan aliran turbulen. Permodelan turbulensi didasarkan pada persamaan *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Persamaan ini didasarkan pada asumsi bahwa aliran turbulen, secara rata-rata, tidak bervariasi terhadap waktu (Wilcox, 2006).

Sejauh ini, model turbulensi yang paling banyak digunakan selama beberapa dekade terakhir dari abad ke-20 adalah persamaan $k - \epsilon$. Persamaan ini pertama kali dikembangkan oleh Chou (1945), Davidov (1961), Harlow dan Nakayama (1968). Kemudian penggunaannya secara luas diawali oleh Jones dan Launder (1972). Launder dan Sharma (1974) kemudian menyatakan model ini dengan model $k - \epsilon$ standar. Dalam perumusan model $k - \epsilon$, idenya adalah untuk menurunkan persamaan eksak untuk ϵ dan mencari pendekatan akurat dari persamaan RANS. Model ini terdiri dari dua persamaan dan memungkinkan energi kinetik turbulen dan panjang skala *eddy* nya ditentukan secara terpisah. Model $k - \epsilon$ standar dapat ditulis sebagai berikut (Wilcox, 2006).

Viskositas Kinematik Eddy :

$$v_T = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (1.13)$$

Energi Kinetik Turbulen :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (1.14)$$

Laju Disipasi :

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (1.15)$$

Nilai Koefisien dan Persamaan Tambahan :

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (1.16)$$

$$\omega = \frac{\epsilon}{C_\mu k} \quad \text{dan} \quad \ell = \frac{C_\mu k^{3/2}}{\epsilon} \quad (1.17)$$



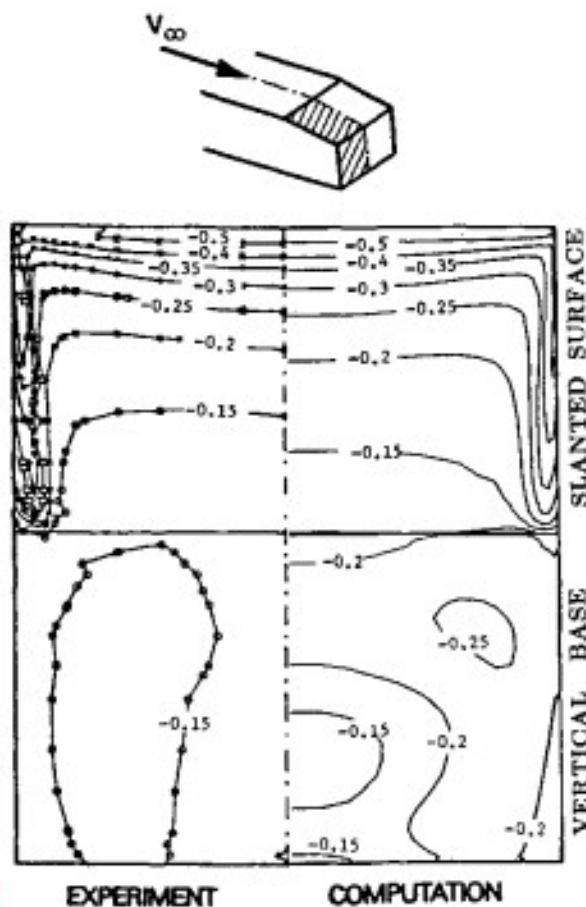
ngan energi kinetik turbulen per satuan massa dan didefinisikan (Wilcox, 2006).

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (1.18)$$

Besaran ϵ disebut dengan disipasi per satuan massa dan didefinisikan dengan korelasi berikut (Wilcox, 2006).

$$\epsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \quad (1.19)$$

Penelitian yang telah dilakukan pada *Ahmed Body* menggunakan model $k - \epsilon$ standar pada bilangan Reynolds 4.3×10^6 memberikan hasil yang baik. Dimana variabel yang cukup penting pada medan aliran *Ahmed Body* seperti distribusi tekanan, kecepatan, dan titik separasi aliran pada permukaan model dapat diprediksi dengan baik (Han, 1989).



Perbandingan kontur tekanan antara hasil eksperimen dan komputasi menggunakan metode k -epsilon standar (Han, 1989)

1.6.8 Metode Kontrol Aliran

Kontrol aliran untuk menunda proses separasi aliran adalah hal yang cukup menantang baik untuk keperluan akademik maupun keperluan industri. Dari sudut pandang industri, kontrol aliran adalah salah satu cara untuk meningkatkan performa kendaraan. Dari sudut pandang akademik, kontrol aliran memungkinkan pemilihan gangguan yang tepat untuk mengatur struktur aliran pada kondisi tertentu (Aider, 2009). Strategi untuk mengontrol aliran pada kendaraan jalan sangat berbeda dengan yang digunakan untuk mengendalikan aliran pada airfoil atau bodi dari pesawat terbang. Efek tanah (*ground effect*), putaran roda dan geometri yang kompleks menghasilkan aliran tiga dimensi yang kompleks dan turbulen (Joslin, 1998., dan Hucho, 1998).

Secara garis besar, terdapat beberapa metode untuk mengendalikan separasi aliran. Metode ini bergantung pada karakteristik aliran tersebut. Metode pertama adalah dengan mengendalikan lapisan geser pada titik separasi. Hal ini dapat dilakukan jika titik separasi dapat diketahui seperti pada kasus *Ahmed Body* (Chun et al, 1999., Aider & Beaudoin, 2008., Verzico et al, 2002., dan Leclerc et al, 2006). Metode kedua adalah dengan mengatur lapisan batas pada *upstream* dari daerah separasi. Dengan mengatur lapisan batas pada *upstream* separasi aliran, maka titik separasi dapat diubah (Song & Eaton, 2002). Metode ketiga adalah dengan memberikan aktuasi pada dinding *downstream* dimana separasi aliran terjadi, seperti dengan menggunakan *blowing*, *suction* atau kombinasi antara keduanya (*synthetic jets*). Dengan cara ini, separasi dapat diatur secara efektif (Roumeas et al, 2009). Metode keempat adalah dengan mengatur aliran meletakkan gangguan tertentu pada *downstream* separasi. Contohnya adalah dengan mengatur struktur aliran pada olakan silinder dengan diameter tertentu menggunakan silinder dengan diameter yang lebih kecil (Strykowski & Sreenivasan, 1990., Dalton et al, 2001).

Tabel 1. Beberapa Jenis Metode Kontrol Aliran (Sudin et al, 2014)

Jenis Kontrol Aliran	Metode Kontrol Aliran
Aktif	<i>Pulse Jet</i>
	<i>Synthetic Jet</i>
	<i>Blowing</i>
	<i>Suction</i>
Pasif	<i>Vortex Generator</i>
	<i>Rear Spoiler</i>
	<i>Diffuser</i>
	<i>Guided Vanes</i>
	<i>Base Cavity</i>
	<i>Vertical Splitter Plate</i>
	<i>Deflector</i>
	<i>Rear Screen</i>
	<i>Rear Fairing</i>
	<i>Tail Plate</i>
<i>Streak of Dimple</i>	

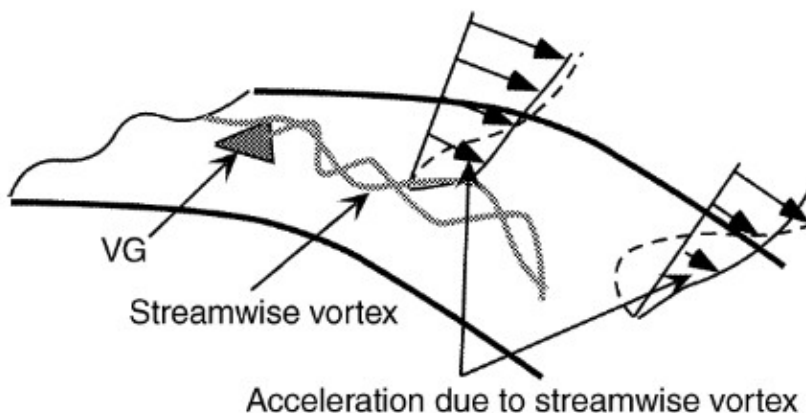


1.6.9 Kontrol Pasif Aliran

Terdapat dua faktor utama yang menjadi penyebab dari separasi aliran, yaitu gradien tekanan yang merugikan dan viskositas. Kontrol separasi aliran dapat dilakukan dengan mengubah atau mempertahankan struktur aliran sehingga dapat mencegah atau menunda separasi aliran. Kontrol pasif aliran adalah salah satu metode yang dapat diaplikasikan tanpa menggunakan daya eksternal. Terdapat beberapa jenis kontrol pasif seperti *slots*, *vortex generator* dan *splitter plate* (Chang, 1970).

Slots adalah salah satu jenis kontrol pasif yang digunakan untuk mencegah *stalling* pada sayap pesawat. Dengan memberikan *slot* pada bagian depan sayap, hisapan pada bagian belakang sayap dapat direduksi dan menghambat pertumbuhan lapisan batas. Sehingga range sudut serang sayap dapat meningkat. *Slot* antara *flap* dan sayap utama mencegah separasi aliran pada permukaan *flap* pada sudut *flap* yang lebih besar (Chang, 1970).

Splitter plate yang ditempatkan dibelakang *blunt body* akan mencegah osilasi olakan pada bagian belakang, dan mereduksi gaya *drag*. Sebagai contoh, meletakkan *splitter plate* di belakang silinder dapat mengurangi koefisien *drag* hingga 0.7 (Chang, 1970).



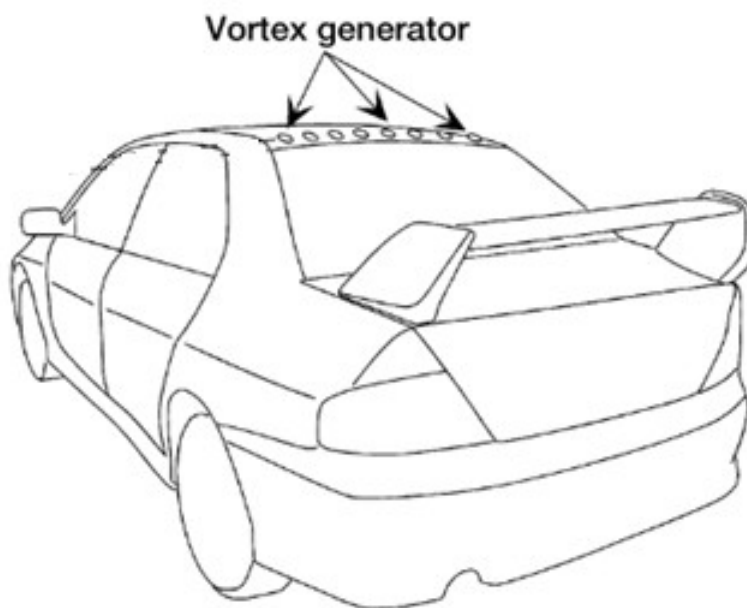
Gambar 12. Skema Aliran Pada Vortex Generator (Koike, 2004)



tor adalah salah satu jenis kontrol pasif yang memindahkan momentum dari luar lapisan batas ke dalam lapisan batas, dan digunakan untuk mengatur aliran yang mengalami separasi seperti pada sayap, diffuser kendaraan atau sayap pada kecepatan subsonik maupun supersonik. Saat berada di dekat dinding, aliran yang bergerak di dekat dinding akan lebih cepat karena akibat sifat viskos dari udara. Tujuan dari penambahan *Vortex generator* untuk memindahkan momentum dari luar lapisan batas dimana

kecepatannya lebih tinggi ke dalam lapisan batas dimana momentumnya lebih kecil, dengan *streamwise vortex* yang dibentuk oleh *vortex generator* tepat sebelum titik separasi aliran. Dengan menunda titik separasi, kecepatan pada titik separasi akan menjadi lebih kecil dan tekanan statis akan menjadi lebih tinggi (Koike, 2004).

Tetapi, *vortex generator* yang ditempatkan pada model kendaraan juga menambah gaya drag sendiri. Sehingga, efisiensi dari pengaplikasian *vortex generator* pada model kendaraan secara deduktif dapat dihitung dengan mengurangi reduksi gaya *drag* yang diperoleh oleh *vortex generator* dengan jumlah gaya *drag* yang dihasilkan oleh *vortex generator* itu sendiri. Kesimpulannya, terdapat ukuran yang optimal untuk *vortex generator* (Koike, 2004).



Gambar 13. *Vortex Generator* Pada Mobil Mitsubishi Lancer Evo VIII (Koike, 2004)



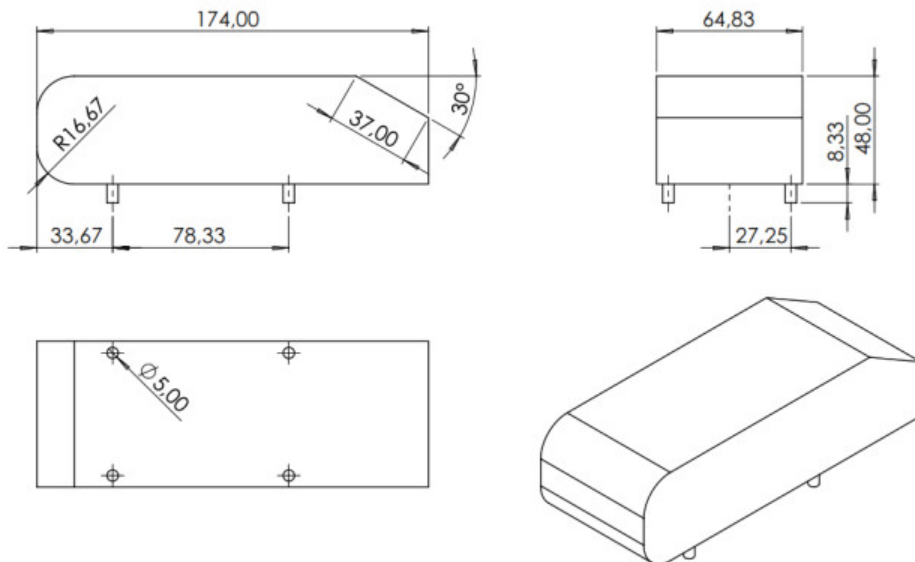
BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari 2024 sampai dengan November 2025. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Fluida Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin yang beralamat di Jalan Poros Malino Km 6 Kabupater Gowa, Sulawesi Selatan.

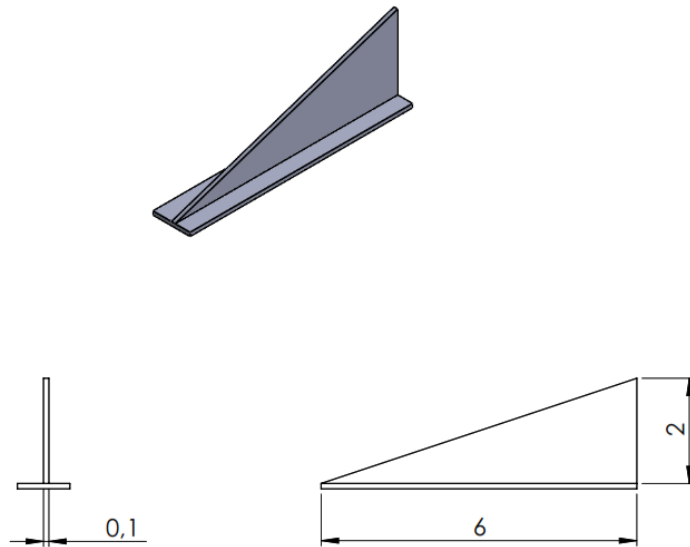
2.2 Objek Penelitian

Model uji yang digunakan dalam penelitian adalah *bluff body* model kendaraan yang menyerupai model mobil minibus. Model uji ini adalah *Ahmed Body* dengan posisi terbalik (*Reversed Ahmed Body*). Model uji yang digunakan mempunyai skala model 1 : 6 dari ukuran sebenarnya. Skala ini digunakan agar spesimen dapat diuji di dalam terowongan angin. Dimensi yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1. Panjang model adalah 174 mm, lebar model 64.83 mm dan tinggi model 48. Sudut kemiringan bagian depan model (*slant angle*) adalah 30°.



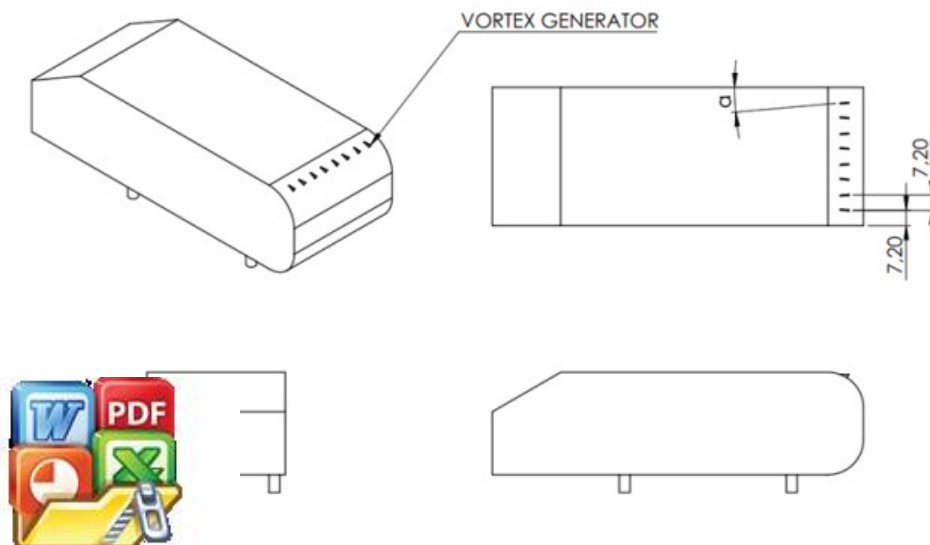
1. Dimensi Model Kendaraan *Reversed Ahmed Body*





Gambar 15. Dimensi *Vortex Generator* Model Segitiga

Penelitian ini membandingkan hasil antara model kendaraan tanpa menggunakan kontrol pasif *vortex generator* dan model kendaraan yang menggunakan kontrol pasif *vortex generator*. Adapun model *vortex generator* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.2.



onfigurasi *Vortex Generator* Pada *Reverse Ahmed Body*

Adapun penempatan *vortex generator* pada model kendaraan diperlihatkan pada Gambar 3.5. *Vortex generator* ditempatkan tepat pada bagian ujung belakang model kendaraan dan disusun secara paralel membentuk sudut sebesar α . Pada penelitian ini, sudut α divariasikan dengan nilai berturut-turut 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° dan 50° .

2.3 Pendekatan Eksperimental

Pendekatan eksperimental pada penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk memberikan validasi melalui pengambilan data secara aktual pada model kendaraan. Dimensi model yang digunakan pada pendekatan eksperimental memiliki similaritas terhadap dimensi model yang digunakan pada pendekatan komputasi. Proses pengambilan data dilakukan pada terowongan angin subsonik (*subsonic wind tunnel*). Pengambilan data *drag* aerodinamika dilakukan dengan menggunakan perangkat *load cell* dengan *strain gauge* agar data *drag* aerodinamika dapat diambil secara *real time* dan akurat. Proses pengambilan data *drag* aerodinamika model kendaraan dilakukan selama 300 detik untuk tiap kecepatan *upstream* dengan *logging* data tiap detiknya, sehingga diperoleh 300 data untuk tiap kecepatan *upstream*. Nilai rata-rata dari data kemudian diambil sebagai data *drag* aerodinamika model kendaraan pada kecepatan tersebut.



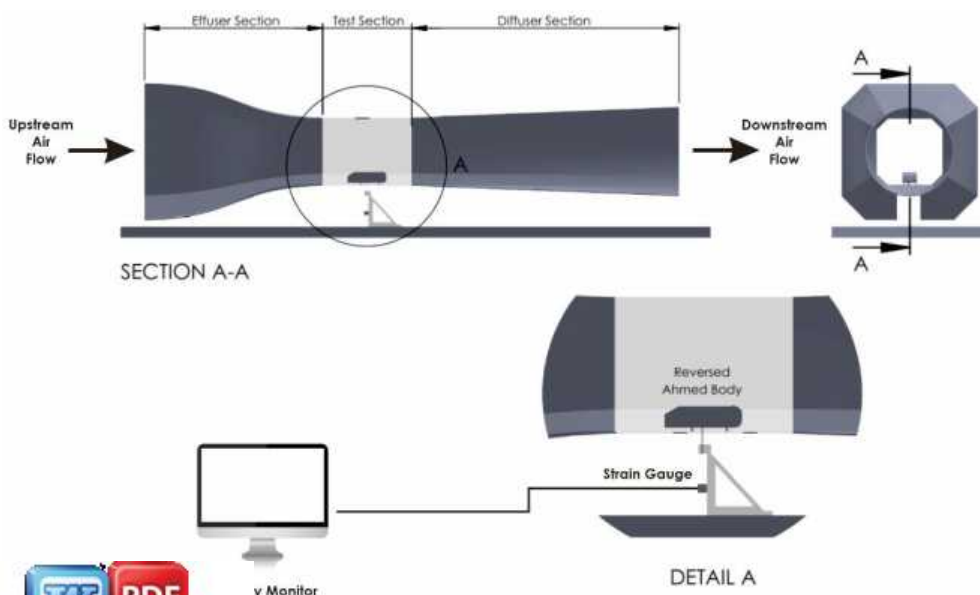
Gambar 17. Terowongan Angin (*Wind Tunnel*)



tan eksperimental, pengukuran gaya *drag* aerodinamika model menggunakan *load cell*. *Load cell* tersusun dari pelat besi yang model kendaraan melalui batang aluminium. Model kendaraan terowongan angin yang dialiri oleh udara dengan kecepatan model kendaraan akan menerima gaya *drag*. Karena model

kendaraan terhubung dengan pelat besi, maka gaya *drag* yang diterima oleh model kendaraan akan diterima oleh pelat besi sehingga pelat besi akan menekuk dan meregang. Nilai regangan dari pelat besi akan membaca nilai regangan tersebut kemudian menerjemahkannya ke dalam bentuk nilai tegangan tertentu sehingga diperoleh tegangan *output* tertentu. Kode pemrograman yang disematkan pada *load cell* akan membaca nilai tegangan tersebut dan menampilkannya dalam bentuk gaya dengan satuan gram. Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.7.

Proses kalibrasi dari *load cell* dilakukan dengan menempatkan beban tertentu yang telah diketahui massanya pada *load cell*. Nilai beban ini dimasukkan sebagai data awal yang direkam oleh komputer, kemudian beban massa sesungguhnya diletakkan pada *load cell*. Informasi ini kemudian akan disimpan oleh komputer sebagai nilai konversi untuk pengukuran selanjutnya. Pada penelitian ini, kalibrasi *load cell* dilakukan dengan memanfaatkan timbangan digital, dimana timbangan tersebut diletakkan dengan posisi berdiri dan tepat berada di samping model uji yang telah dipasang *load cell*. Kemudian timbangan akan didorong hingga menyentuh model sehingga gaya dorong yang diterima oleh model uji akan ditampilkan pada *display* timbangan. Nilai dari gaya dorong ini kemudian dimasukkan pada *input load*. Setelah proses kalibrasi selesai dilakukan, prosedur pengujian gaya *drag* aerodinamika dapat dilakukan. Adapun skema kalibrasi *load cell* dapat dilihat pada Gambar 3.8.



1a Pengukuran Gaya Drag Aerodinamika Pada *Wind Tunnel*



Adapun prosedur dalam pengujian gaya *drag* aerodinamika melalui pendekatan eksperimental menggunakan *load cell* dengan variasi kecepatan upstream adalah sebagai berikut; Pertama, model uji dipasang pada dudukan benda uji pada seksi uji terowongan angin. Kedua, *load cell* dipasang pada benda uji yang telah dilekatkan pelat. Ketiga, *load cell* yang dipasang harus menyentuh batang besi yang terhubung ke benda uji, kemudian dilakukan kalibrasi hingga tidak ada nilai yang terbaca pada *display*. Keempat, motor listrik terowongan angin diaktifkan dan kecepatan *upstream* diatur pada kecepatan tertentu sehingga udara yang dialirkan akan membuat benda uji terseret ke belakang dan menyebabkan pelat mengalami *bending* dan meregang. Regangan pada pelat akan terbaca pada *load cell* dengan satuan gram. Terakhir, mengulangi langkah sebelumnya untuk kecepatan *upstream* yang berbeda. Pengambilan data untuk tiap kecepatan *upstream* dilakukan selama lima menit, dan diulangi sebanyak tiga kali. Hasil dari ketiga pengukuran ini kemudian di rata-ratakan sehingga data yang diperoleh memiliki validitas yang tinggi. Tahap ini dilakukan untuk memastikan data yang diperoleh memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Setelah semua prosedur telah dilakukan, prosedur ini kemudian diulang kembali untuk tiap variasi konfigurasi *vortex generator* yang ditempatkan pada model kendaraan.

2.4 Pendekatan Komputasi

Pendekatan komputasi pada penelitian ini dilakukan untuk memperoleh data karakteristik aerodinamika model kendaraan secara numerik. Untuk memberikan hasil yang akurat, digunakan simulasi tiga dimensi (3D) pada model kendaraan dengan jumlah *mesh cell* diatas 1 juta. Selain itu, untuk memastikan data yang diperoleh valid, akan dilakukan proses *Grid Independency Test* pada domain komputasi. Proses pendekatan komputasi dilakukan melalui dua tahap. Tahap pertama adalah melakukan proses komputasi pada model kendaraan tanpa menggunakan kontrol aliran. Proses komputasi pada model ini dilakukan untuk memperoleh data awal yang dapat dijadikan sebagai pembanding terhadap model kendaraan yang telah diaplikasikan *vortex generator*. Tahap ini dilakukan untuk memperoleh gambaran awal terhadap potensi optimasi karakteristik aerodinamika pada model kendaraan, yang meliputi beberapa aspek, seperti pembentukan lapisan batas pada model kendaraan, pembentukan olakan (*wake development*) pada model kendaraan, serta pengaruhnya terhadap nilai distribusi tekanan pada model kendaraan. Tahap kedua adalah melakukan proses komputasi pada model kendaraan yang telah diaplikasikan kontrol pasif berupa *vortex generator*. Tahap ini dilakukan untuk tiap konfigurasi *vortex generator* pada model kendaraan. Tujuannya

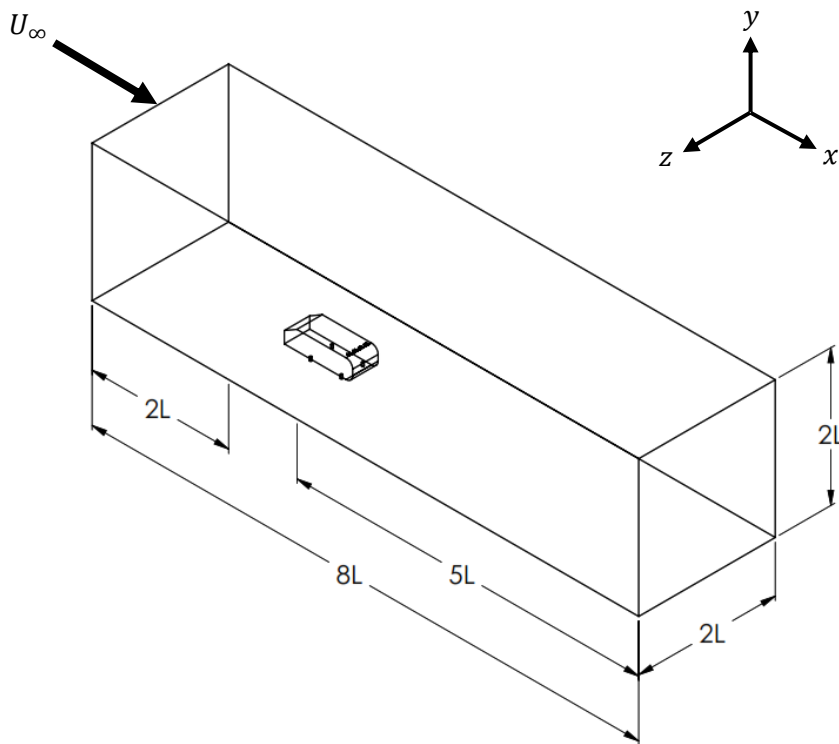


eroleh karakteristik aerodinamika dari tiap konfigurasi yang <an>, gaya *drag* hingga *streamline* aliran pada konfigurasi <arakteristik ini kemudian akan dibandingkan dengan data <andaraan yang diperoleh tanpa menggunakan kontrol aliran.

1), prosedur pendekatan komputasi melalui metode CFD <tahap dasar.

2.4.1 Pre-Processing

Tahap *pre-processing* meliputi pendefinisian geometri model kendaraan, penentuan domain komputasi, pembentukan *grid* atau *mesh* pada domain komputasi dan penetapan kondisi batas (*boundary condition*) pada domain komputasi. Geometri dari model kendaraan dibuat pada software CAD dengan dengan merujuk pada model kendaraan yang sebenarnya. Geometri model yang telah siap kemudian dipindahkan ke dalam software *meshing*.



Gambar 19. Dimensi Domain Komputasi

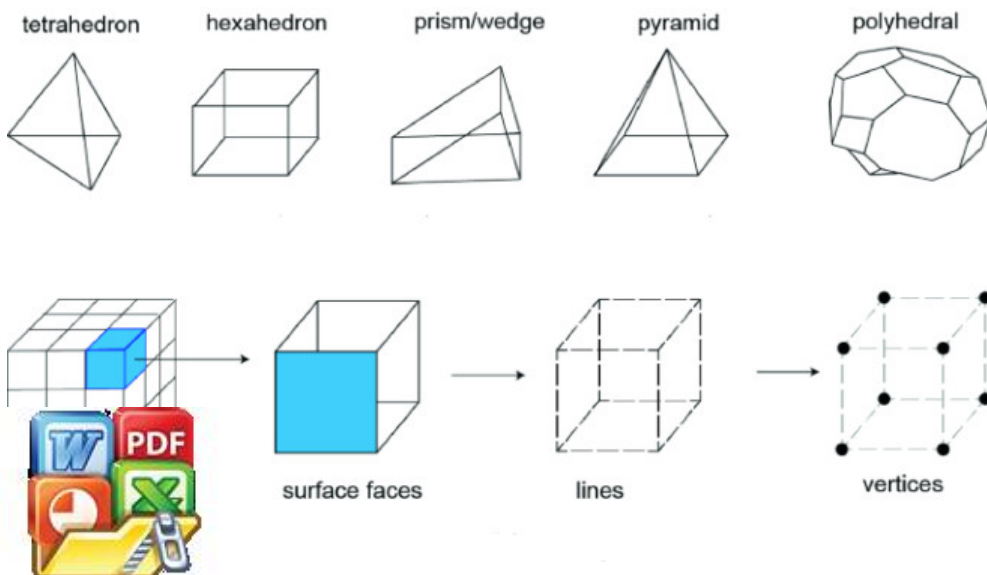


Agar aliran pada model kendaraan tidak dipengaruhi oleh pengaruh viskos di in, maka dimensi dari domain komputasi perlu ditetapkan. Iari domain komputasi didasarkan pada penelitian yang telah a. Domain komputasi yang digunakan berbentuk balok dengan dan tinggi 2L. Model kendaraan ditempatkan pada jarak 2L dari putasi (Harinaldi et al, 2011).

Proses pembuatan *meshing* pada domain komputasi dilakukan dengan menggunakan kombinasi elemen hexahedral dan tetrahedral (*tetrahedral hybrid*) pada *software* GAMBIT. Elemen hexahedral (*hex element*) memberikan akurasi yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis elemen lainnya. Tetapi, elemen ini tidak cocok digunakan pada beberapa bagian kompleks yang terletak pada geometri model kendaraan. Untuk mengatasi hal ini, elemen tetrahedral juga digunakan pada pendekatan ini. Elemen ini cocok digunakan pada bagian yang kompleks pada geometri model kendaraan. Kombinasi dari kedua elemen ini dapat menjadi pendekatan yang efektif untuk domain komputasi ini. Pendekatan ini menyeimbangkan efisiensi komputasi dan akurasi hasil komputasi.

Pada bagian dekat dinding model kendaraan, lapisan inflasi (*inflation layer*) digunakan. Lapisan inflasi digunakan untuk memperhalus elemen *mesh* pada bagian dekat dinding dengan gradien kecepatan yang tinggi. Penentuan jumlah lapisan dan tinggi lapisan pertama dilakukan berdasarkan bilangan Reynolds pada domain komputasi.

Setelah melakukan proses *meshing* pada domain komputasi, selanjutnya adalah menetapkan kondisi batas pada domain komputasi. Kecepatan *upstream* (U_{∞}) yang digunakan adalah 11.1 m/s (40 km/jam), 13.9 m/s (50 km/jam), 16.7 m/s (60 km/jam), 19.4 m/s (70 km/jam), dan 22.2 m/s (80 km/jam). Fluida kerja pada domain komputasi dianggap sebagai aliran inkompresibel. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dengan densitas (ρ) = 1.164 kg/m³ dan viskositas (μ) = 1.872×10^{-5} kg/m · s. Model turbulensi yang digunakan adalah k-epsilon standar.



enis *Mesh* Pada Domain Komputasi (Lintermann, 2021)

Proses komputasi dilakukan dalam keadaan tunak (steady state condition), dengan kecepatan upstream yang mengalir secara seragam. Semua penetapan kondisi batas dilakukan pada software GAMBIT dan FLUENT. Setelah seluruh proses pre-processing telah dilakukan, tahap selanjutnya adalah proses processing atau tahap iterasi.

Viskositas Kinematik Eddy :

$$v_T = \frac{C_\mu k^2}{\epsilon} \tag{2.1}$$

Energi Kinetik Turbulen :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \tag{2.2}$$

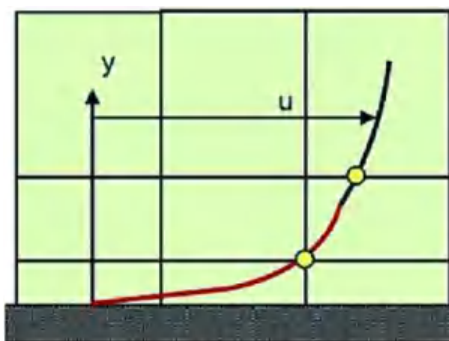
Laju Disipasi :

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \tag{2.3}$$

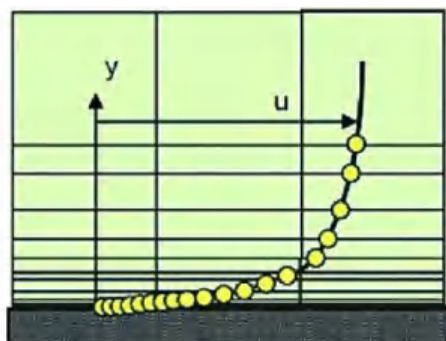
Nilai Koefisien dan Persamaan Tambahan :

$$C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3 \tag{2.4}$$

$$\omega = \frac{\epsilon}{C_\mu k} \quad \text{dan} \quad \ell = \frac{C_\mu k^{3/2}}{\epsilon} \tag{2.5}$$



Wall functions used to resolve boundary layer

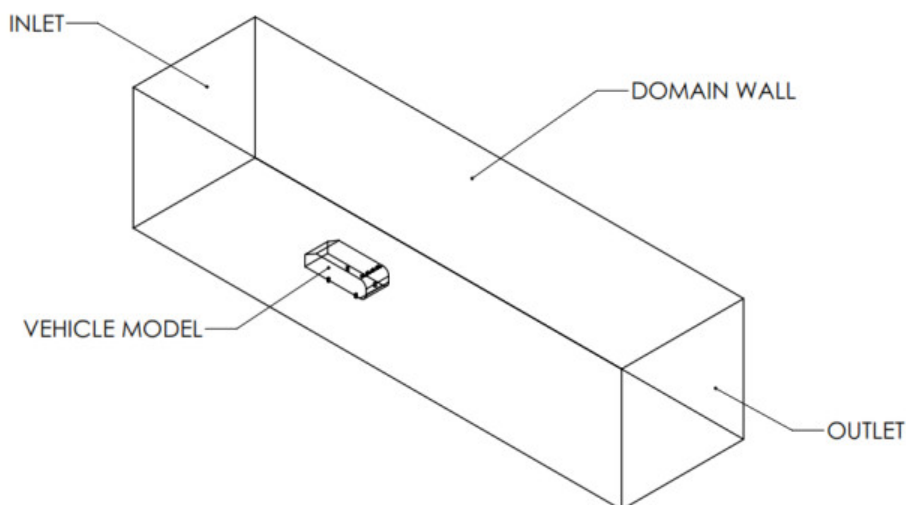


Wall functions not used to resolve boundary layer

Boundary layer



flation Layer pada Domain Komputasi (Elmekawy, 2020)



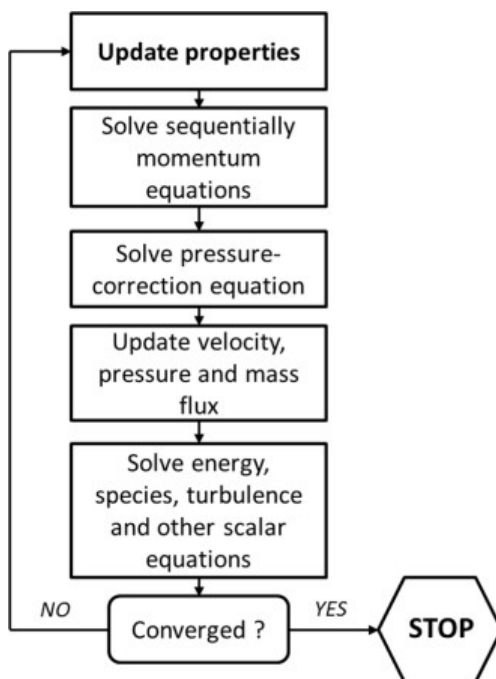
Gambar 22. Kondisi Batas Pada Domain Komputasi

2.4.2 Processing

Pada tahap iterasi atau *processing*, proses perhitungan komputasi dilakukan oleh komputer secara numerik. Proses komputasi berjalan berdasarkan kondisi batas dan model persamaan yang telah ditentukan sebelumnya. Agar tahapan ini berjalan dengan lancar, proses iterasi harus dilakukan dengan menggunakan komputer dengan spesifikasi yang tinggi. Pada pendekatan ini, spesifikasi komputer yang digunakan adalah komputer dengan CPU AMD Ryzen 5800H (8 core, 16 thread) dengan frekuensi dasar 3.2 Ghz. GPU yang digunakan adalah Nvidia Geforce RTX 3060 dengan kapasitas VRAM 6 GB. Kapasitas RAM yang digunakan adalah 32 GB agar proses komputasi dapat dijalankan secara paralel, dan memangkas waktu yang diperlukan untuk proses iterasi. Untuk meningkatkan akurasi dari hasil komputasi, proses iterasi dilakukan sebanyak 1000 kali step.

Proses iterasi dilakukan pada *software* FLUENT. Langkah pertama yang dilakukan oleh software adalah menyelesaikan persamaan kekekalan fluida, yaitu persamaan kontinuitas (kekekalan massa), persamaan Navier-Stokes (kekekalan momentum), dan persamaan tambahan untuk model turbulensi. Semua persamaan ini diubah menjadi bentuk aljabar sehingga dapat dihitung oleh komputer. Nilai-nilai yang ditentukan harus saling menyesuaikan agar aliran memenuhi persamaan ini. Software menggunakan algoritma untuk menebak nilai kecepatan sementara, memperbaharui nilai tekanan, dan terus menebak nilai kecepatan hingga hasilnya konsisten. Kemudian software menyelesaikan persamaan secara iteratif. Setelah diperoleh hasil yang akurat, langkah terakhir adalah *post processing* atau dokumentasi.





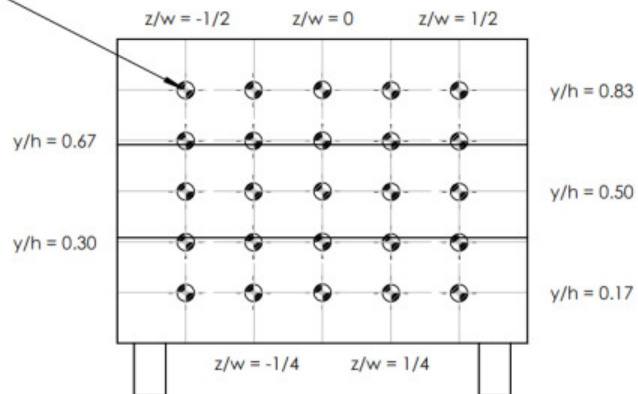
Gambar 23. Algoritma *Processing* ANSYS FLUENT (Ansys, 2021)

2.4.3 *Post-Processing*

Pada tahap *post processing*, data-data hasil iterasi akan ditampilkan dalam bentuk numerik seperti medan kecepatan, medan tekanan dan gaya *drag* aerodinamika. Pada pendekatan komputasi, pengambilan data distribusi tekanan pada model kendaraan dilakukan dengan tujuan untuk mendukung hasil gaya *drag* aerodinamika model yang didapatkan. Pada dasarnya, reduksi gaya *drag* aerodinamika pada model kendaraan berbentuk *bluff body* ditandai dengan naiknya nilai distribusi tekanan pada bagian belakang kendaraan. Karena sekitar 80 persen kontributor penyebab gaya *drag* aerodinamika pada model kendaraan *bluff body* adalah pada aliran di belakang model kendaraan (Kourta & Gillieron, 2009). Hal ini kemudian yang menjadi landasan untuk lokasi pengambilan data distribusi tekanan pada model kendaraan. Titik pengambilan data distribusi tekanan dilakukan pada lima garis grid yang berbeda sepanjang sumbu horizontal (z) yaitu $z/w = -1/2$, $z/w = 1/2$ dan $z/w = 1/4$, dan lima garis grid yang berbeda sepanjang sumbu vertikal (y) yaitu $y/h = 0.17$, $y/h = 0.30$, $y/h = 0.50$, $y/h = 0.67$ dan $y/h = 0.83$, aris grid adalah 8 mm. z/w adalah rasio antara lebar grid dan lebar model kendaraan dan y/h adalah rasio antara tinggi grid dan tinggi model kendaraan yang ada, maka diperoleh total sebanyak 25 titik untuk pengambilan data tekanan.



Titik Pengambilan
Data C_p



Gambar 24. Titik Pengambilan Data Tekanan Pada Bagian Belakang Model Kendaraan



2.5 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir pada penelitian yang dilaksanakan adalah sebagai berikut.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

Gambar 25. Diagram Alir Penelitian