

II. TEORI DASAR

Ketika objek bergerak melalui udara, terdapat gaya yang dihasilkan oleh gerakan relatif antara udara dan permukaan benda. Aerodinamika adalah ilmu yang mempelajari tentang gaya - gaya ini, yang dihasilkan oleh gerakan udara, menurut jenis aliran biasanya aerodinamika dikelompokkan menjadi; subsonik, hipersonik, supersonik. Sangat penting bahwa aerodinamika diterapkan selama mendesain mobil sebagai perbaikan di dalam mobil, sehingga akan mencapai kecepatan yang lebih tinggi dan efisiensi bahan bakar lebih. Untuk mencapai ini desain aerodinamis mobil dirancang lebih rendah ke tanah dan biasanya dalam desain ramping dan hampir semua sudut yang dibulatkan, untuk menjamin kelancaran aliran udara melalui bodi mobil, selain itu beberapa perangkat tambahan seperti spoiler, sayap juga melekat pada mobil-mobil untuk meningkatkan aerodinamis. Terowongan angin digunakan untuk menganalisis aerodinamis mobil, selain itu perangkat lunak juga digunakan untuk memastikan desain aerodinamis yang optimal.

A. Aerodinamika

Salah satu aspek dalam perancangan bodi kendaraan adalah aerodinamika. Ketika objek bergerak melalui udara, terdapat gaya yang dihasilkan oleh gerakan relatif antara udara dan permukaan bodi. Studi tentang gaya-gaya yang dihasilkan oleh

udara disebut aerodinamika. Aerodinamika didefinisikan sebagai dinamika dari gas-gas, khususnya interaksi antara objek yang bergerak dengan udara sekitarnya (*Anderson, 2005*). Berdasarkan arus, lingkungan aerodinamis dapat diklasifikasikan menjadi dua macam yaitu aerodinamis eksternal dan aerodinamis internal. Aerodinamis eksternal adalah aliran di sekitar benda padat dengan berbagai bentuk, dimana aerodinamis internal adalah aliran melalui bagian dalam benda padat, misalnya aliran udara melalui mesin jet. Perilaku perubahan aliran udara tergantung pada rasio aliran dengan kecepatan suara. Rasio ini disebut *Mach Number*, berdasarkan nomor *mach* ini masalah aerodinamik dapat diklasifikasikan sebagai berikut yaitu, *subsonic* jika kecepatan aliran lebih kecil dari kecepatan suara, *transonic* jika kecepatan sama dengan kecepatan suara, *supersonic* jika karakteristik aliran lebih besar dari kecepatan suara dan disebut *hipersonic* jika aliran sangat jauh lebih besar dari pada kecepatan suara. Aerodinamis memiliki ruang lingkup aplikasi yang luas terutama di bidang teknik penerbangan, dalam perancangan mobil, prediksi gaya-gaya yang terjadi pada kapal, di bidang teknik sipil seperti dalam desain jembatan dan bangunan lainnya.

B. Sejarah dan Evolusi Aerodinamika

Pada awal abad 20 banyak usaha dilakukan agar kendaraan bisa melaju lebih cepat. Sebelumnya aerodinamika tidak berpengaruh pada kendaraan yang berjalan dengan kecepatan lambat, tetapi dengan peningkatan kebutuhan untuk kecepatan mobil agar menjadi lebih cepat, sehingga menghasilkan penemuan struktural seperti pengenalan kaca depan, penggabungan roda ke dalam tubuh dan *insetting* dari lampu depan ke bagian depan mobil. Ini mungkin perkembangan tercepat dalam sejarah

mobil, mayoritas pekerjaan penelitian adalah untuk mengurangi hambatan aerodinamis. Hal ini terjadi sampai dengan tahun 1950-an. Sebelum 1950, desainer berusaha untuk membuat mobil yang se-efisien mungkin untuk meringankan beban mesin, namun mereka membatasi tata letak interior mobil. Setelah tahun 1950, tingkat *drag* aerodinamis naik karena mobil-mobil untuk keluarga berdimensi besar sehingga tidak mungkin untuk mencapai tingkat terendah dari nilai drag. Bentuk persegi panjang mobil lebih diarahkan untuk keluarga sehingga dapat dikatakan bahwa setelah 1950, merancang mobil adalah untuk membantu gaya hidup keluarga yang lebih besar. Walaupun ini merupakan hal yang baik bagi keluarga, tidak lama kemudian masalah aerodinamis kembali dibahas dalam hubungan terhadap efisiensi bahan bakar. Selama tahun 1970-an terjadi krisis bahan bakar dan permintaan untuk mobil lebih ekonomis menjadi lebih besar, yang menyebabkan perubahan desain aerodinamis mobil. Jika mobil memiliki aerodinamis jelek maka mesin harus mengeluarkan tenaga yang lebih besar untuk pergi ke jarak yang sama dengan mobil yang memiliki aerodinamika yang lebih baik. Jadi jika mesin bekerja semakin berat akan membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk memungkinkan mesin melakukan pekerjaan, dan oleh karena itu mobil dengan nilai aerodinamis lebih baik akan menggunakan bahan bakar lebih irit dari mobil lain. Hal ini dengan cepat menyebabkan meningkatnya permintaan publik untuk mobil dengan drag aerodinamis lebih rendah agar lebih ekonomis bagi keluarga.

Sekarang hampir semua mobil yang diproduksi berbodi aerodinamis, salah satu kesalahpahaman aerodinamika adalah mobil yang lebih cepat. Hal tersebut benar tetapi tidak semua tentang kecepatan. Dengan merancang mobil aerodinamis bisa

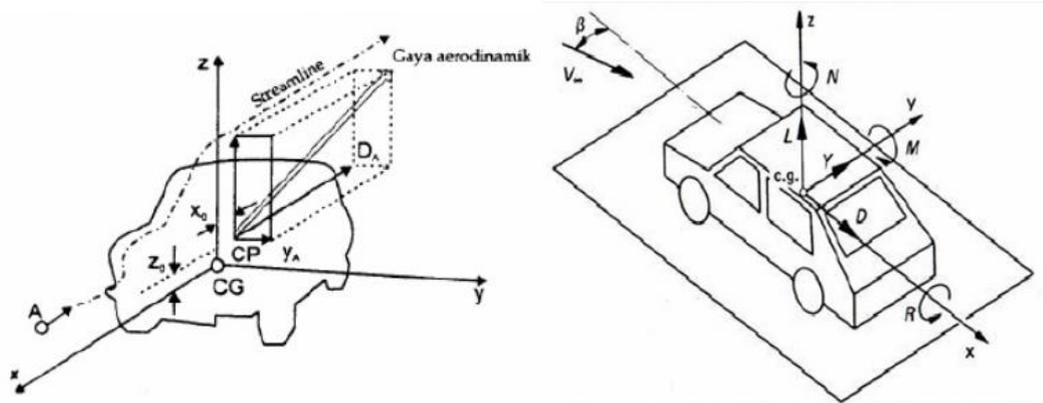
dikurangi gesekan, sehingga tenaga yang diperlukan oleh mesin lebih ringan dan bahan bakar yang dikonsumsi lebih sedikit. Di era modern dimana sumber bahan bakar minyak bumi semakin menipis, serta semua upaya untuk mencari sumber energi alternatif yang sedang dilakukan membuat aerodinamis pada mobil sangat penting karena semua orang ingin memiliki mobil yang gaya hambat maupun konsumsi bahan bakar dapat ditekan seminimum mungkin.

C. Studi Aerodinamika Pada Mobil

Dalam rangka meningkatkan aerodinamis pada mobil terlebih dahulu harus mengetahui bagaimana aliran udara melewati mobil, kalau dibayangkan sebuah mobil bergerak melalui udara. Seperti diketahui diperlukan energi untuk membuat mobil melaju, dan energi ini digunakan untuk melawan gaya-gaya aerodinamis yang terjadi pada mobil.

Penyebab utama dari timbulnya gaya-gaya aerodinamis pada kendaraan adalah :

- Adanya distribusi tekanan pada permukaan bodi kendaraan yang akan bekerja pada arah normal terhadap permukaan kendaraan.
- Adanya distribusi tegangan geser pada permukaan bodi kendaraan yang akan bekerja pada arah tangensial terhadap permukaan kendaraan.



Gambar 1. Gaya aerodinamik pada kendaraan. [Melania]

Apabila distribusi tekanan dan tegangan tersebut diintegrasikan maka akan dihasilkan gaya-gaya aerodinamis, yaitu :

1. Gaya angkat aerodinamis (*Lift Force*)
2. Gaya hambat aerodinamis (*Drag Force*)
3. Gaya samping aerodinamis (*Side Force*)
4. Gaya akibat pusaran udara (*Turbulence Force*)

Keempat gaya di atas saling berkaitan satu dengan yang lainnya dalam menciptakan gaya aerodinamis, dan sangat dipengaruhi oleh bentuk bodi kendaraan.

1. Gaya Angkat (*Lift Force*)

Lift force disebabkan oleh efek bernouli yang menyatakan semakin cepat udara bergerak maka semakin kecil tekanannya. Artinya kecepatan udara pada permukaan bagian atas lebih cepat dibanding kecepatan udara pada permukaan bagian bawah. Karena kecepatannya lebih cepat maka tekanannya lebih kecil dari pada tekanan udara yang melewati permukaan bagian bawah. Karena perbedaan tekanan inilah maka timbul gaya angkat (*Lift*) pada objek yang bergerak.

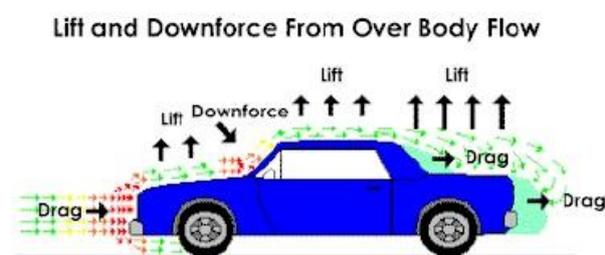
Dalam buku *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge* disebutkan bahwa pada pesawat terbang *lift force* dipengaruhi oleh sudut serang sayap (*Angle of Attack*). Jika *angle of attack* bertambah maka *lift force* akan bertambah juga (jika faktor lain tetap konstan). Ketika pesawat mencapai *angle of attack* maksimum, maka *lift force* akan hilang dengan cepat, ini yang disebut dengan *stalling angle of attack* atau *burble point*. Efek *stall* mengindikasikan sudut serang yang paling maksimal yang dapat digunakan untuk menghasilkan gaya angkat, apabila dilakukan peningkatan sudut serang maka gaya angkat tidak akan bertambah, bahkan sebaliknya akan berkurang diikuti dengan penambahan nilai gaya hambat (*Irsyad, 2010*). Sayap pesawat biasanya diruncingkan (*tapered*) pada *planform* dan ketebalan sayap dan terdiri dari *flap* dan *slots* depan maupun belakang untuk menghasilkan gaya angkat yang tinggi (*Anton, 2006*). Pada kendaraan karena sudut serangnya tetap maka gaya angkat yang dihasilkan akan tetap tergantung bentuk bodi tiap kendaraan dan aksesoris yang ditambahkan pada kendaraan.

Satu istilah yang sering terdengar dikalangan pebalap adalah *down force*. *Down force* merupakan gaya yang sama dengan gaya yang dialami oleh sayap pesawat yaitu *lift force*. Hanya saja pada *down force* gaya ini bertindak untuk menekan, bukan untuk mengangkat. Setiap objek yang bergerak melalui udara menciptakan gaya angkat dan gaya tekan ke bawah. Mobil balap, menggunakan sayap terbalik untuk memaksa mobil lebih menekan atau mencengkram ke jalan. Mobil jalanan rata-rata cenderung lebih menciptakan gaya angkat. Hal ini karena bentuk body mobil itu sendiri yang menghasilkan wilayah tekanan rendah di daerah atas mobil.

Pada bagian depan mobil terjadi tekanan frontal dimana udara bertekanan tinggi menabrak gril depan mobil, dan sebagai hasilnya lebih banyak molekul yang berada

dalam ruangan yang lebih kecil. Setelah berhenti pada titik di depan mobil, udara tersebut mencari daerah tekanan rendah, seperti sisi, atas dan bawah mobil. Sebagian udara yang mengalir di atas kap mobil akan kehilangan tekanan, tetapi ketika mencapai kaca depan muncul lagi penghalang dan udara akan mencapai tekanan yang lebih tinggi. Daerah tekanan rendah di atas kap mobil menciptakan sebuah gaya angkat kecil, sementara daerah bertekanan lebih tinggi pada depan kaca depan mobil akan menciptakan sebuah gaya tekan pada mobil.

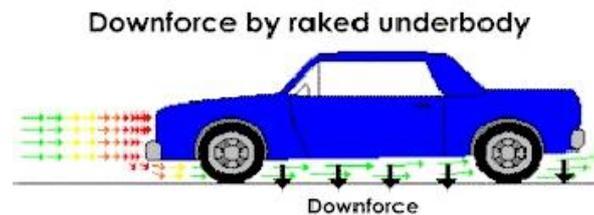
Tekanan yang terjadi di kaca depan, sebagian akan mengalir di atas atap mobil dengan kecepatan tinggi sehingga tekanannya menjadi rendah dan akan menciptakan gaya angkat pada atap mobil saat udara melalui atap mobil. Hal buruk akan terjadi ketika udara melalui kaca belakang. Aliran yang dibuat oleh kaca belakang akan membuat kekosongan dan membuat ruang tekanan rendah yang tidak mampu terisi udara, sehingga akan menciptakan gaya angkat yang terjadi pada bagasi. Hal ini akan menciptakan ketidakstabilan dalam berkendara. Gambar berikut merupakan ilustrasi aliran yang terjadi pada mobil.



Gambar 2. Komponen gaya yang bekerja pada saat mobil melaju. [Azizi, 2010]

Pada bagian bawah mobil juga mempunyai andil dalam menciptakan gaya angkat dan gaya tekan ke bawah. Jika ujung depan mobil lebih rendah dari bagian belakang, maka jarak antara bagian bawah dan jalanan akan menciptakan kevakuman atau daerah tekanan rendah, sehingga akan terjadi gaya tekan ke bawah yang kuat. Bagian bawah di

depan mobil secara efektif membatasi aliran udara di bawah mobil, sementara aliran udara di atas mobil penuh dengan daerah tekanan tinggi, hal ini menunjukkan bahwa bodi mobil secara alami akan menciptakan gaya tekan ke bawah. Gambar berikut menunjukkan gaya tekan ke bawah pada bagian bawah mobil.



Gambar 3. *Down force* pada bagian bawah mobil. [Azizi, 2010]

Secara matematik gaya angkat dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_{lift} = (1/2)cl\rho V^2 A \dots\dots\dots (1)$$

2. Gaya Hambat (*Drag Force*)

Drag force adalah gaya kebelakang, mendorong mundur dan disebabkan oleh gangguan aliran udara pada bodi kendaraan dan parallel dengan arah angin. Definisi lainnya adalah *drag* merupakan studi aerodinamis aliran udara yang ada di sekitar dan melalui kendaraan, terutama jika berada pada posisi bergerak. Dengan kata lain *drag* merupakan jumlah semua gaya eksternal dalam aliran fluida yang melawan arah gerak objek dan disebabkan oleh aliran udara turbulen di sekitar benda yang melawan gerak maju objek melalui gas atau cairan.

Dalam buku *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge* *drag* atau hambatan dalam penerbangan terdiri dari dua jenis yaitu :

- *Parasite drag*

Disebut *parasit drag* karena tidak ada fungsinya sama sekali untuk membantu pesawat untuk dapat terbang. *Parasit drag* sendiri terdiri dari tiga komponen, yaitu :

- *Form drag*, yang terjadi karena gangguan pada aliran udara melalui badan pesawat.
- *Skin friction*, yaitu hambatan yang terjadi karena gesekan dengan kulit pesawat.
- *Interference drag*, yaitu gabungan antara *form drag* dan *skin friction*.

Dari ketiga jenis *parasite drag* di atas, *form drag* merupakan hambatan yang paling mudah untuk dikurangi pada waktu merancang sebuah pesawat. Secara umum, makin *sreamline* bentuk pesawat maka akan menghasilkan bentuk yang akan mengurangi *parasite drag*.

Skin friction merupakan jenis *parasite drag* yang paling sulit untuk dikurangi. Tidak ada permukaan yang halus secara sempurna. Bahkan permukaan yang dibuat dengan mesin pada waktu diperiksa menggunakan alat atau kaca pembesar, mempunyai permukaan yang kasar dan tidak rata. Permukaan yang kasar ini akan membelokkan aliran *sreamline* udara pada permukaan bodi dan akan menghasilkan hambatan pada aliran. *skin friction* ini dapat dikurangi dengan memakai cat atau *finish glossy* yang rata serta mengurangi kepala rivet yang menyembul keluar.

Ada satu lagi elemen yang harus ditambahkan pada waktu membahas *Parasite drag* yaitu, *interference drag*. Jika dua buah benda diletakkan bersebelahan,

maka turbulensi yang terjadi bisa mencapai 50 – 200 persen lebih besar dibandingkan jika kedua benda tersebut di tes secara terpisah.

Tiga elemen di atas dihitung untuk menentukan *parasite drag* pada pesawat. Selain itu bentuk sebuah objek merupakan factor yang penting dalam *parasite drag*, *indicated air speed* (kecepatan yang terbaca) juga sama pentingnya dalam *parasite drag*.

- *Induced drag*

Jenis ke dua dari *drag* adalah *induced drag*. Seperti kita ketahui dalam ilmu fisika tidak ada sistem mekanik yang bisa 100 persen efisien. Maksudnya, apapun bentuk dari sebuah sistem, sebuah usaha akan memerlukan usaha tambahan yang akan diserap atau hilang dalam sistem tersebut. Makin efisien sebuah sistem, makin sedikit kehilangan usaha ini.

Bentuk aerodinamis sayap memberikan gaya angkat yang diperlukan dalam penerbangan, namun hal ini harus dibayar dengan kemunculan *induced drag*. *Induced drag* selalu muncul ketika sayap menghasilkan gaya angkat dan kenyataannya *drag* ini tidak dapat dipisahkan dari gaya angkat. Sayap pesawat menghasilkan gaya angkat dengan menggunakan energi dari aliran udara bebas. Ketika menghasilkan gaya angkat, tekanan di permukaan bawah sayap lebih besar dari permukaan atas, hasilnya udara akan mengalir dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Di ujung sayap, perbedaan tekanan ini akan menjadi seimbang disebabkan aliran lateral yang keluar dari sayap bagian bawah ke bagian atas. Aliran lateral ini membuat kecepatan yang berputar di ujung sayap dan akan mengalir ke belakang sayap, maka akan terbentuk dua aliran vortex di

sekitar ujung sayap yang mengalir dibelakang pada saat terbang. Aliran vortex ini akan menghasilkan aliran udara ke atas setelah melewati ujung sayap, dan aliran udara ke bawah di belakang *trailing edge* dari sayap. Aliran udara ke bawah ini sama sekali tidak dibutuhkan untuk menghasilkan gaya angkat. Inilah sumber *induced drag*, makin besar ukuran dan kekuatan vortex-vortex ini maka aliran udara ke bawah yang telah melewati sayap juga semakin besar, dan berdampak pada besarnya efek dari *induced drag*. Efek lain yang ditimbulkan oleh aliran udara ke bawah di atas ujung sayap ini adalah membelokkan vektor gaya angkat ke belakang. Karena itu gaya angkat akan sedikit berbelok ke arah belakang sejajar dengan arah udara dan menghasilkan komponen *lift* yang arahnya ke belakang. Inilah yang disebut dengan *induced drag*.

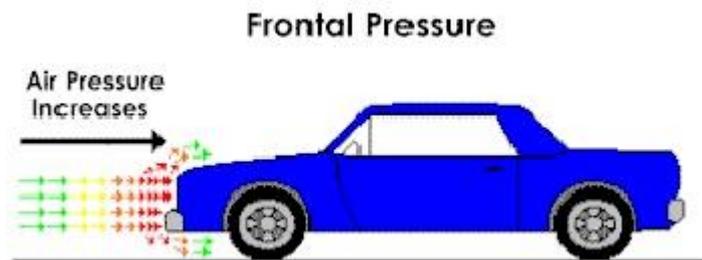
Drag pada sebuah objek yang berdiri pada posisi yang tetap relative terhadap aliran udara yang diberikan, akan bertambah secara kuadrat dari kecepatan udaranya. Menambah kecepatan dua kali akan menambah *drag* empat kali. Hubungan ini hanya berlaku pada kecepatan subsonik, di bawah kecepatan suara. Pada kecepatan yang sangat tinggi, rasio profil *drag* yang biasanya bertambah sejalan dengan penambahan kecepatan, ternyata akan bertambah dengan lebih cepat lagi.

Dalam sebuah tulisan disebutkan bahwa penurunan gaya *drag* pada sebuah mobil mengakibatkan penurunan konsumsi bahan bakar karena mobil dengan gaya *drag* yang rendah mampu melakukan perjalanan lebih cepat dibanding dengan mobil yang memiliki gaya *drag* tinggi (Azizi, 2010).

Drag pada kendaraan terdiri dari dua macam, yaitu :

- *Frontal pressure*

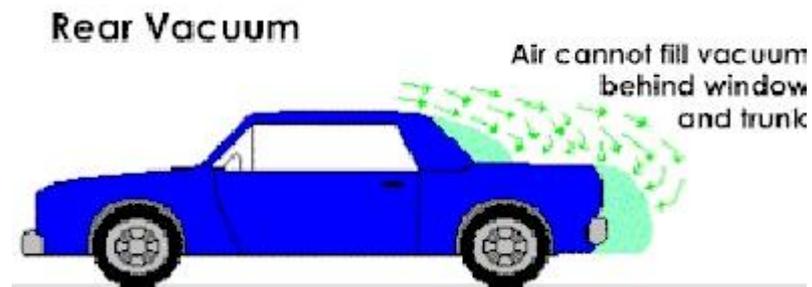
Frontal pressure disebabkan oleh tekanan udara untuk aliran di sekitar bagian depan mobil. Jutaan molekul udara menghadang grill depan mobil dan mengakibatkan tekanan udara di depan mobil meningkat. Pada saat yang sama, molekul udara yang bertekanan ini akan mencari jalan keluar di sekitar sisi, atas dan bawah mobil. Berikut merupakan gambar profil aliran pada bagian depan mobil.



Gambar 4. *Frontal pressure* yang terjadi pada mobil. [Azizi, 2010]

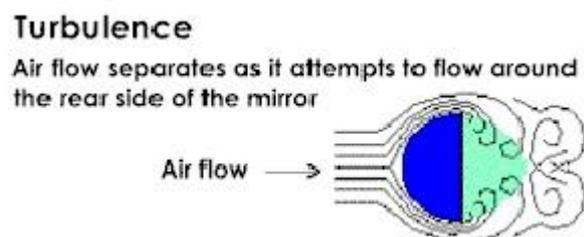
- *Vaccum rear*

Vaccum rear atau *rear end* disebabkan oleh ruang yang terbentuk di udara saat kendaraan melaju dan dipengaruhi oleh kecepatan, sehingga menyerupai ruang hampa pada bagian belakang. Hal ini dapat terjadi karena molekul udara tidak dapat mengisi ruang tadi akibat kendaraan yang melaju cepat. Molekul-molekul udara ini berusaha mengisi ruang ini namun kendaraan melaju lebih cepat dari kecepatan molekul udara untuk mengisi ruang ini, hasilnya terbentuklah ruang hampa pada daerah belakang yang selalu menghisap berlawanan dengan arah laju kendaraan. Ketidak mampuan ini disebut arus detasemen. Berikut adalah gambar dari fenomena ini.



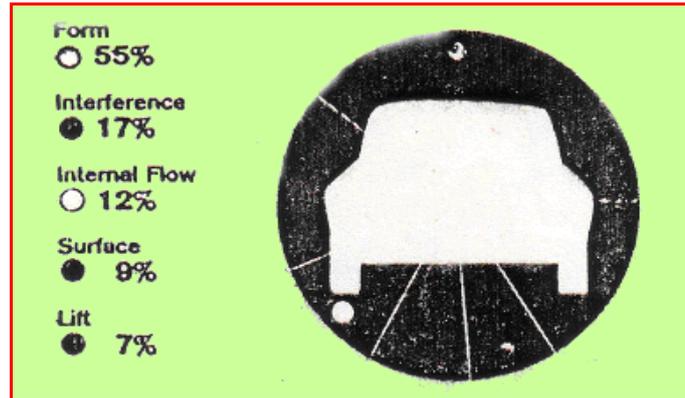
Gambar 5. Kevakuman daerah belakang mobil. [Azizi, 2010]

Arus detasemen termasuk bagian dari *drag* dan hanya berlaku untuk bagian *vacuum* di belakang karena molekul udara sulit mengisi ruang dan mengikuti bentuk bodi belakang. Hal ini menjadi penting karena gaya yang diciptakan oleh ruang hampa ini jauh melebihi dengan yang diciptakan oleh tekanan frontal. Masalah ini dapat dikaitkan dengan turbulensi yang diciptakan oleh arus detasemen tersebut. Berikut adalah gambar dari efek arus terhadap turbulensi pada bagian belakang.



Gambar 6. Turbulensi pada bagian belakang benda yang melaju. [Azizi, 2010]

Ketika kendaraan berjalan dan melaju dengan kecepatan tertentu terdapat beberapa hambatan aerodinamis yang terjadi. Gambar berikut menunjukkan distribusi hambatan aerodinamis kendaraan.



Gambar 7. Distribusi Hambatan Aerodinamik Kendaraan. [Herminarto, 2009]

Secara matematis gaya hambat dapat dituliskan sebagai berikut.

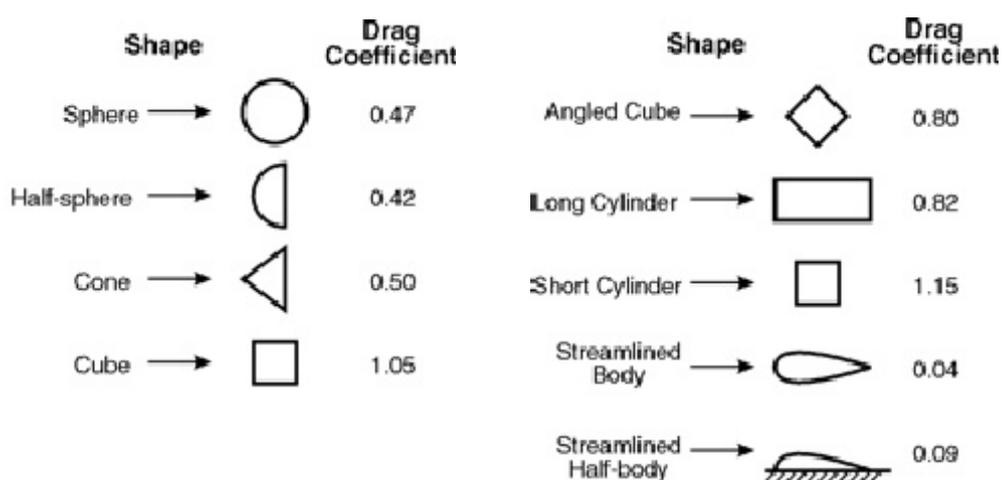
$$F_{\text{drag}} = (1/2)cd\rho V^2 A \dots\dots\dots (2)$$

Ini adalah gaya aerodinamik yang paling penting karena dapat mempengaruhi kecepatan maksimum serta konsumsi bahan bakar pada kendaraan yang melaju dengan kecepatan tinggi.

Gaya hambat dipengaruhi oleh besar cd (*drag coefficient*). Koefisien hambat (cd) merupakan koefisien hambatan aerodinamik yang dipengaruhi oleh faktor bentuk dan kehalusan permukaan kendaraan. Koefisien hambat (cd) dari sebuah kendaraan dapat dianggap sebagai beban aero terhadap gerakan maju. Semakin besar nilai cd maka semakin besar pula hambatan aerodinamiknya. Bentuk bodi kendaraan yang mempunyai nilai cd yang kecil dikatakan sebagai bentuk aerodinamis dimana bentuknya adalah *stramline* yang mengikuti arah aliran udara yang melewati permukaan bodinya. Besarnya nilai cd dapat ditentukan dari percobaan terhadap model kendaraan di dalam suatu alat pengujian *wind tunnel* (terowongan angin). Berikut ini adalah nilai cd dari beberapa kendaraan dan bentuk.

Tabel 1. Nilai c_d berbagai kendaraan.

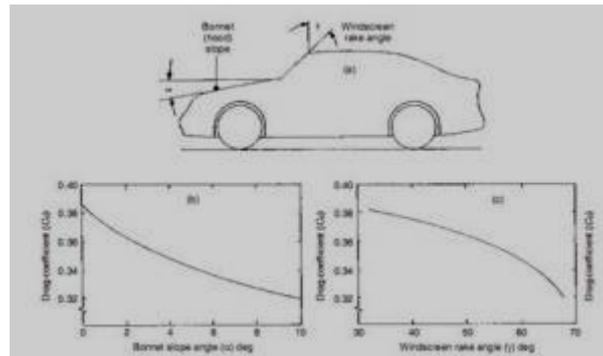
Bentuk/ model kendaraan	Nilai c_d	Model Alfa Romeo Giulia 1970	0.34
Bentuk open convertible	0.5–0.7	Model VW Passat 1978	0.41
Bentuk van/jeep commando	0.5–0.7	Model Peugeot 504	0.39
Bentuk bus/minibus	0.6–0.8	Model BMW 520	0.43
Bentuk ponton (sedan kotak)	0.4–0.55	Model Volvo 244 G1	0.52
Bentuk lancip, sport	0.3–0.4	Model Mercedes 280	0.45
Model Masda 323 1975	0.52	Model Porche 1924	0.37
Model Fiat 127 1975	0.41	Model Renault Vesta	0.19
Model Citroen GS 1971	0.30		

**Gambar 8.** Bentuk frontal area pada benda dan koefisien drag-nya. [Fox, 2003]

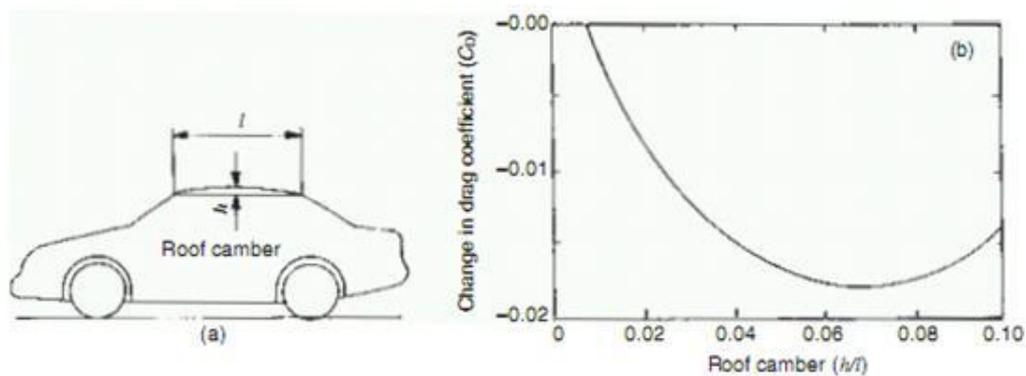
D. Upaya Untuk Mengatasi Gaya Hambat Aerodinamika

1. Menyempurnakan Desain Bodi Kendaraan

Perbaikan pada bagian depan dapat dilakukan dengan membuat ujung bagian depan dibuat dengan halus dengan kurva kontinu yang berasal dari garis bumper depan. Perbaikan juga dapat dilakukan dengan membuat atap melengkung dan sudut antara kap mobil dengan kaca dibuat landai. Berikut adalah gambar pengaruh sudut antara kap mobil dan kaca depan serta kelengkungan atap terhadap koefisien *drag*.

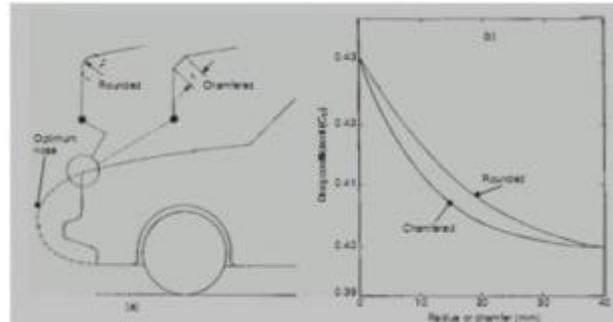


Gambar 9. Pengaruh *Slope* pada *Hood* (kap mobil) dan *Windscreen* (kaca depan) Terhadap Koefisien *Drag*. [Heisler, 2002]

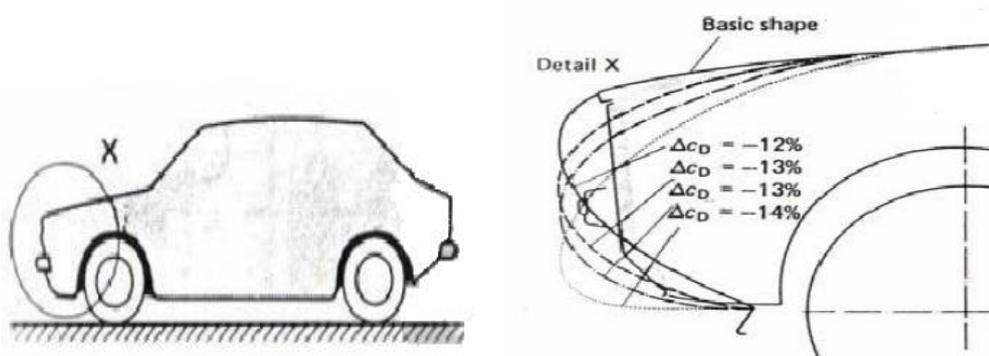


Gambar 10. Pengaruh Kelengkungan *Roof* Terhadap *cd*. [Heisler, 2002]

Berdasarkan penelitian yang dilakukan **General Motor** membulatkan bidang frontal bodi kendaraan baik pada kabin maupun bagian yang menonjol dapat mengurangi gaya hambat sebesar 32%. Hal yang sama juga dapat dilakukan dengan menghilangkan atau membulatkan perlengkapan yang menonjol seperti spion. Gambar di bawah ini adalah efek dari pembulatan bagian depan mobil dan bentuk depan mobil terhadap koefisien *drag*.

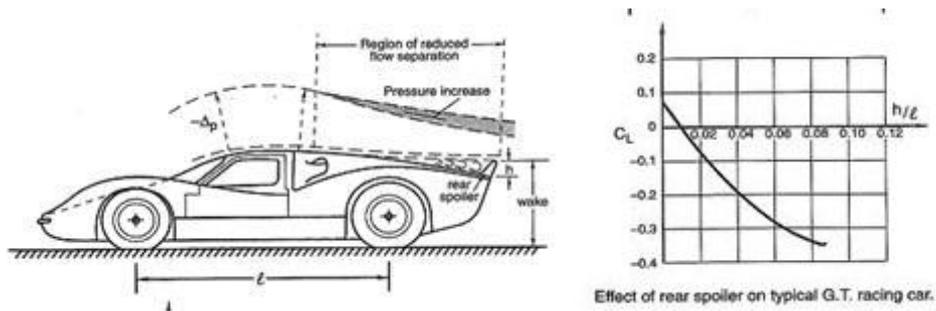


Gambar 11. Pengaruh *Rounding* dan *Chamfering* pada *Front Hood* Terhadap Koefisien *Drag*. [Heisler, 2002]



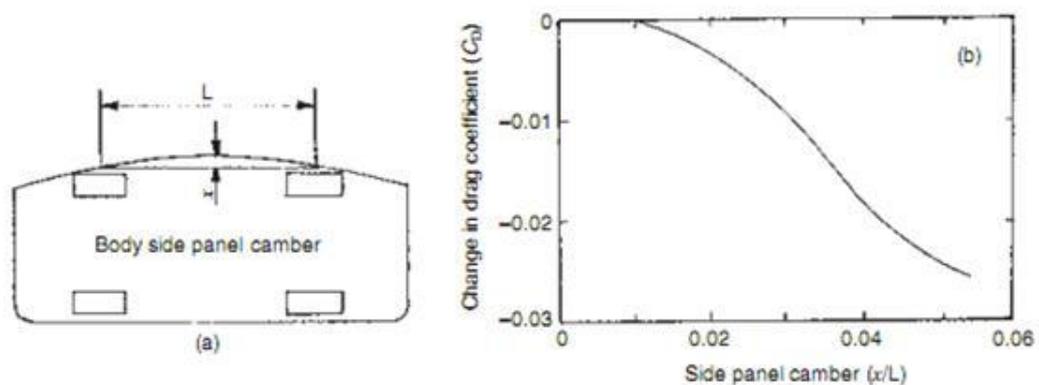
Gambar 12. Pengaruh Bentuk Ujung Bagian Depan Mobil Terhadap Koefisien *Drag*. [Aerodinamika Mobil]

Desain bodi kendaraan juga dapat disempurnakan dengan jalan merancang bodi kendaraan yang *streamline* yang menyerupai desain pesawat terbang. Agar tercapai efisiensi bahan bakar yang optimum, maka kita harus mengurangi faktor-faktor penghambat laju kendaraan, salah satunya adalah *drag force* yang sangat ditentukan oleh bentuk permukaan bodi kendaraan. Untuk mengurangi *drag force* langkah yang harus dilakukan yaitu mendesain bodi agar *streamline* dan mengurangi luas kontak tegak lurus arah aliran fluida/laju kendaraan. Berikut adalah gambar bodi *streamline*.

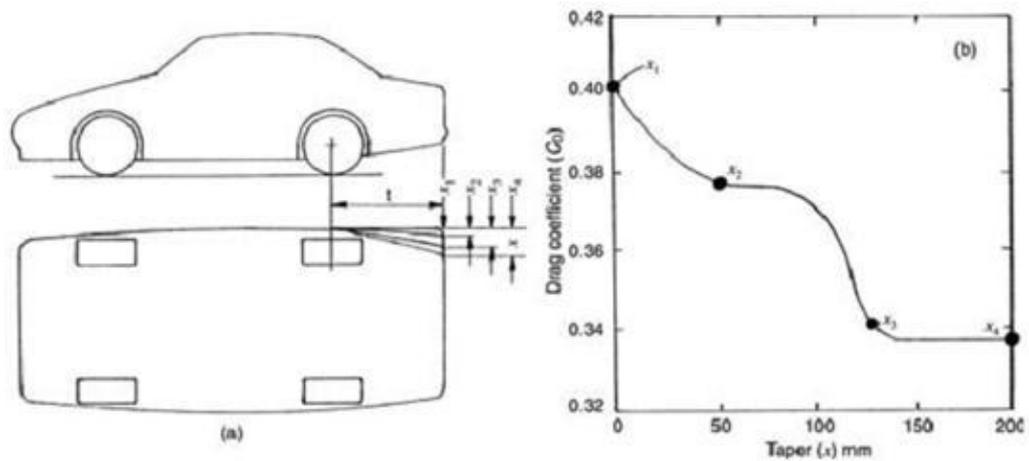


Gambar 13. Tipikal Aliran yang Terjadi Pada Bodi *Streamline*. [Fathonah, 2012]

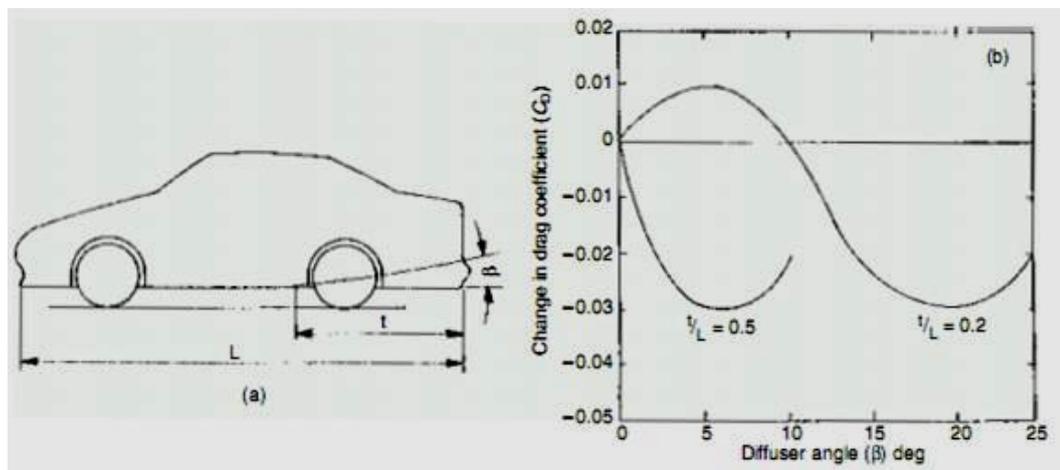
Kelengkungan pada bagian sisi mobil juga berpengaruh terhadap besar *drag force*. Bagian belakang mobil juga dapat dibentuk menyerupai perahu yaitu menyempit di bagian belakang jika dilihat dari atas. Hal ini akan mengurangi area turbulensi di belakang yang dihasilkan saat mobil melaju. Berikut merupakan gambar pengaruh kecembungan sisi dan bentuk bodi belakang mobil terhadap koefisien *drag*.



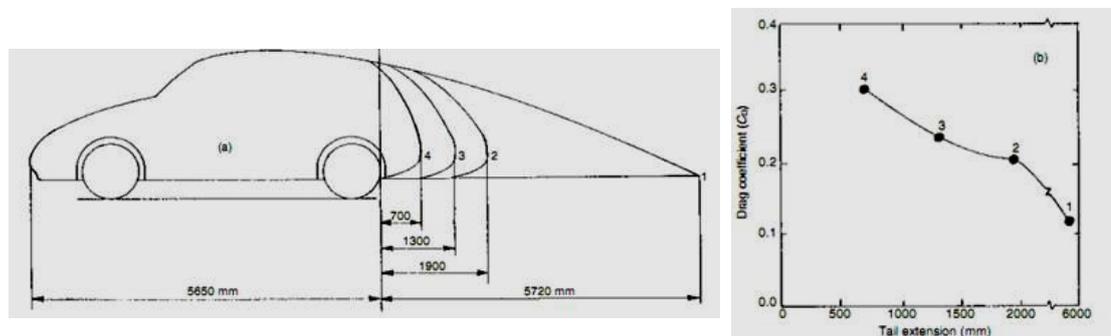
Gambar 14. Pengaruh Kelengkungan *Side Panel* Terhadap Koefisien *Drag*. [Heisler, 2002]



Gambar 15. Pengaruh Ketirusan *Rear Side Panel* Terhadap Koefisien Drag. [Heisler, 2002]



Gambar 16. Pengaruh Ketirusan *Underbody Rear End* Terhadap Koefisien Drag. [Heisler, 2002]



Gambar 17. Pengaruh Ketebalan *Rear End Tail* Terhadap Koefisien Drag. [Heisler, 2002]

2. Memasang Alat Bantu Yang Mendukung

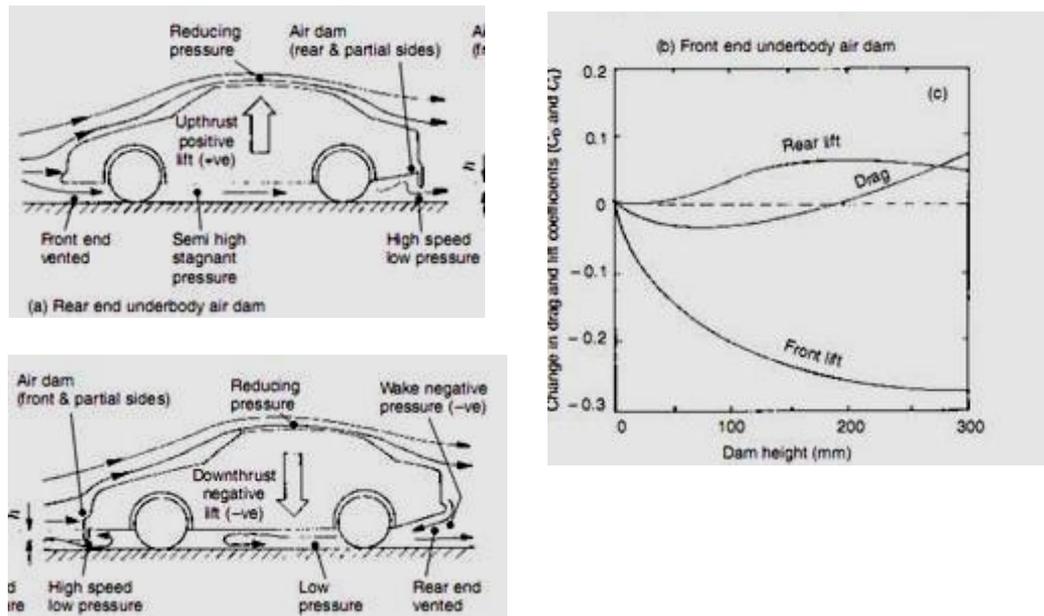
1. *Air Dam*

Tujuan dari pemasangan *air dam* pada kendaraan adalah untuk mempercepat aliran udara di bagian kolong mobil, sehingga aliran udara tersebut bertambah cepat. Berdasarkan prinsip bernouli maka tekanan kendaraan pada jalan akan semakin besar sehingga kedudukan mobil semakin kokoh. Berikut adalah contoh dari *air dam* dan profil alirannya.



Gambar 18. Profil Aliran Udara Pada Mobil Dengan dan Tanpa *Air Dam*. [Herminarto, 2009]

Sementara itu, penambahan *underbody air dam* pada *rear end* dapat menimbulkan gaya *lift* ke atas. Akibatnya gaya berat mobil menjadi tereduksi sehingga gesekan yang diderita ban akan berkurang sehingga kendaraan dapat melaju dengan lebih bebas. Berikut merupakan gambar efek dari penambahan *air dam* terhadap koefisien *drag* (Heisler, 2002).



Gambar 19. Pengaruh Penambahan *Underbody Air Dam* Terhadap Koefisien *Drag* dan *Lift*. [Heisler, 2002]

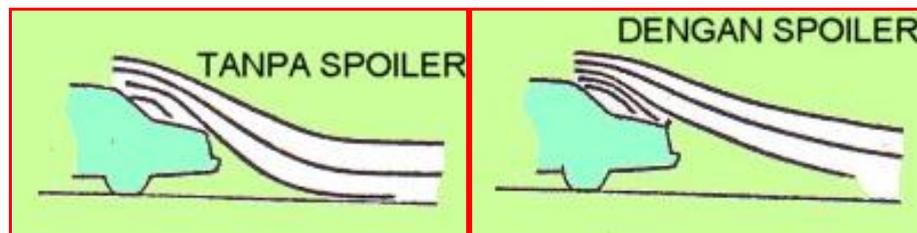
2. Spoiler

Komponen ini terletak pada bagian belakang, dipasangkan pada bagian bodi paling belakang yang bertujuan untuk menampung tekanan gerak udara yang mengalir dari arah depan melalui atas mobil sehingga tekanan udara akan semakin kuat dan menambah daya cengkram ban maka pengendalian akan lebih mantap.

Spoiler digunakan terutama pada mobil jenis sedan. *Spoiler* bertindak seperti hambatan aliran udara, dalam rangka membangun tekanan udara yang lebih tinggi di atas *spoiler* tersebut. Hal ini berguna karena mobil sedan membutuhkan *down force* yang besar pada kecepatan tinggi. Gambar di bawah merupakan penambahan *spoiler* dan profil alirannya



Gambar 20. Penambahan *Spoiler* Pada Mobil Sedan. [Azzi, 2010]



Gambar 21. Profil Aliran Udara Pada Mobil Dengan dan Tanpa *Spoiler*. [Herminarto, 2009]

Spoiler sangat berkaitan dengan koefisien *drag* pada kendaraan. Topik ini banyak diteliti sejak disadari bahwa gaya ini berhubungan dengan pemakaian bahan bakar. Dari hasil penelitian sebelumnya menyimpulkan sekitar 75% daya yang dipakai untuk menggerakkan roda mobil digunakan untuk mengatasi tahanan atau gaya *drag* ketika mobil tersebut bergerak dengan kelajuan sekitar 145 km/jam (Crouse *et al.*, 1985).

3. Sayap

Pemasangan sayap bertujuan untuk memperbaiki aliran udara saat akan meninggalkan bodi kendaraan sehingga efek dari turbulensi udara di belakang bodi dapat dicegah. Keistimewaan sayap ini bisa diatur sehingga dapat menimbulkan efek *negative lift/down force* (gaya tekan

ke bawah) maupun *positive lift* (gaya angkat ke atas) saat kendaraan melaju.

Sayap difungsikan untuk mencegah pemisahan aliran dan mencegah pembentukan pusaran serta membantu untuk mengisi kekosongan di bagian belakang sehingga lebih efektif mengurangi *drag*. Cara kerja dari sayap adalah membuat udara yang lewat di bawah menempuh jarak lebih jauh dari udara yang lewat di atas (*Azizi, 2010*).

Secara prinsip sayap pada mobil pada dasarnya sama dengan *spoiler*, namun sayap bekerja lebih efisien dibanding dengan *spoiler*, karena alasan praktis dan sederhana *spoiler* banyak digunakan pada mobil sedan. Berikut adalah gambar pemasangan sayap pada mobil.



Gambar 22. Sayap Pada Kendaraan. [*Herminarto, 2009*]

4. *Side Skirts*

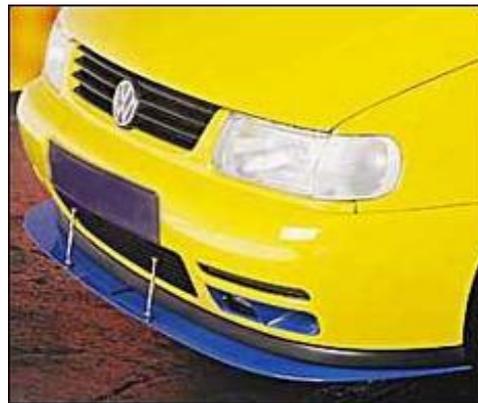
Tujuan dari pemasangan alat ini adalah untuk mencegah masuknya udara ke area bertekanan rendah yang umumnya tercipta di bagian bawah mobil. Hal ini akan menaikkan daya lekat bagian bawah mobil (*under car suction*). Berikut adalah gambar *side skirt* pada mobil.



Gambar 23. *Side Skirt* Pada Kendaraan. [Herminarto, 2009]

5. *Splitter*

Alat ini berguna untuk menangkap udara yang datang dari bagian depan mobil dan mencegah udara memasuki bagian bawah. Udara dipaksa untuk mengalir ke atas atau bagian samping mobil. Berikut adalah *splitter* pada mobil.

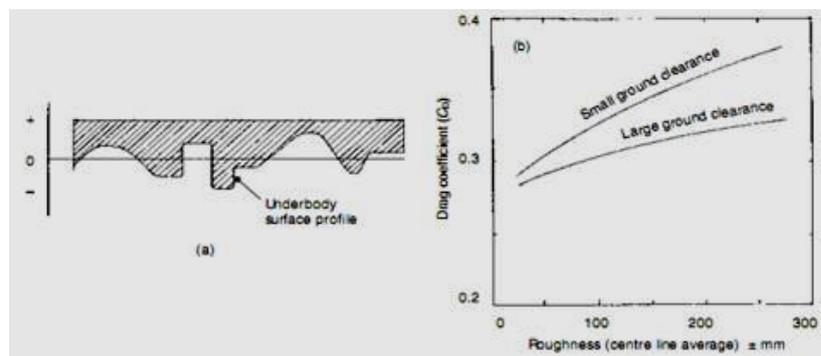


Gambar 24. *Splitter* Pada Kendaraan. [Herminarto, 2009]

6. Profil bagian bawah mobil

Pada *drag force* terdapat dua komponen gaya yaitu *shear surface stress (friction drag)* dan *pressure drag*. Kecendrungan yang terjadi pada bodi kendaraan yang semakin kasar ialah semakin besarnya *friction drag*. Ini berarti memicu terjadinya titik separasi lebih awal

sehingga terbentuk daerah *wake* (Heisler, 2002). Karena adanya daerah ini *drag force* yang terjadi semakin besar karena adanya perbedaan tekanan yang besar antara daerah muka bodi dengan buritan sehingga memunculkan tekanan balik (*adverse pressure*) sehingga timbul komponen *drag force* yang ke-dua yaitu *pressure drag*. Semakin luas daerah *wake* ini maka gaya *pressure drag* akan semakin meningkat. Berdasarkan penelitian, kekasaran permukaan yang memberikan efek signifikan terhadap timbulnya *drag force* ialah pada daerah *underbody*. Karena itu, kekasaran pada daerah itu haruslah diminimalisir sampai dengan ukuran tertentu. Mobil yang memiliki bagian bawah rata akan mendapat keuntungan dari daerah *underbody* yang bertekanan rendah, dan akan mereduksi gaya angkat. Berikut adalah gambar pengaruh kekasaran permukaan bawah mobil terhadap koefisien *drag* dan solusinya dengan penambahan penutup.



Gambar 25. Pengaruh Kekasaran Daerah *Underbody* Terhadap Koefisien *Drag*. [Heisler, 2002]



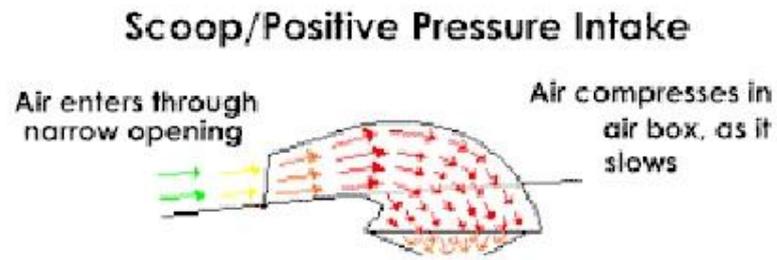
Gambar 26. Penambahan Penutup *Underbody* Pada Kendaraan. [Herminarto, 2009]

7. *Scoop*

Scoop atau *positive pressure intake* berguna ketika volume aliran udara yang tinggi sangat dibutuhkan pada kendaraan, dan hampir semua mobil balap menggunakan perangkat tersebut. *Scoop* bekerja berdasarkan prinsip bahwa aliran udara di dalam kotak akan menjadi bertekanan ketika mengalami aliran udara konstan. Kotak udara memiliki pembuka yang memungkinkan volume udara yang memadai untuk masuk dan di bagian dalam kotak udara terdapat ruang yang lebih luas untuk meningkatkan tekanan di dalam kotak. Berikut adalah contoh *scoop* pada mobil balap dan profil alirannya.



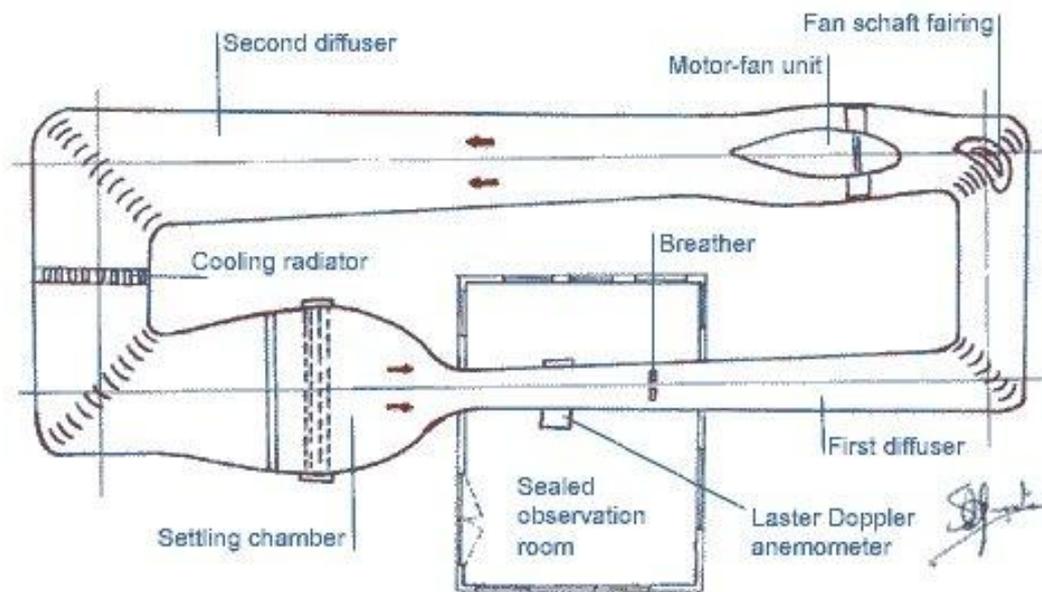
Gambar 27. *Scoop* Pada Mobil Balap. [Azizi, 2010]



Gambar 28. Profil Aliran Pada *Scoop*. [Azizi, 2010]

E. Wind Tunnel

Sebuah terowongan angin (*wind tunnel*) adalah alat yang dikembangkan untuk membantu penelitian dengan mempelajari efek udara bergerak di sekitar benda padat. Udara dihembuskan melalui saluran yang dilengkapi port dan instrumentasi dimana model alat atau bentuk-bentuk geometris sudah terpasang untuk diuji dan dipelajari. Berbagai teknik kemudian digunakan untuk mengetahui aliran yang sebenarnya di sekitar model dan membandingkannya dengan hasil teoritis, yang memperhitungkan bilangan Reynolds dan bilangan Mach pada tiap pengujian. Berikut merupakan contoh skema dari *wind tunnel*.



Gambar 29. Skema *wind tunnel*. [Ilmu Terbang.Com]

Untuk mengetahui karakteristik dari suatu mobil perlu diadakan pengujian menggunakan suatu alat yang disebut terowongan angin (*wind tunnel*). Pengujian pada terowongan angin ini dapat memberikan informasi gaya-gaya aerodinamis dari mobil, meliputi gaya *drag*, gaya *lift*, serta gaya *side*.

Secara umum terdapat lima bagian penting dari terowongan angin yaitu ruang penenang, kontraksi, seksi uji, *diffuser*, dan motor listrik (Anderson, 1985).

Masing-masing dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Ruang penenang (*setting chamber*)

Ruang penenang berfungsi untuk mengurangi turbulensi aliran di dalam terowongan, disinilah tempat arah datangnya angin yang dihisap kipas.

2. Kontraksi (*nossel*)

Kontraksi adalah bagian yang sangat menentukan dalam pembentukan keseragaman kecepatan aliran udara pada seksi uji. Secara prinsip fungsi

kontraksi adalah untuk mempercepat aliran udara yang masuk pada kecepatan rendah dari ruang penenang menjadi kecepatan yang diinginkan di seksi uji.

3. Seksi uji (*test section*)

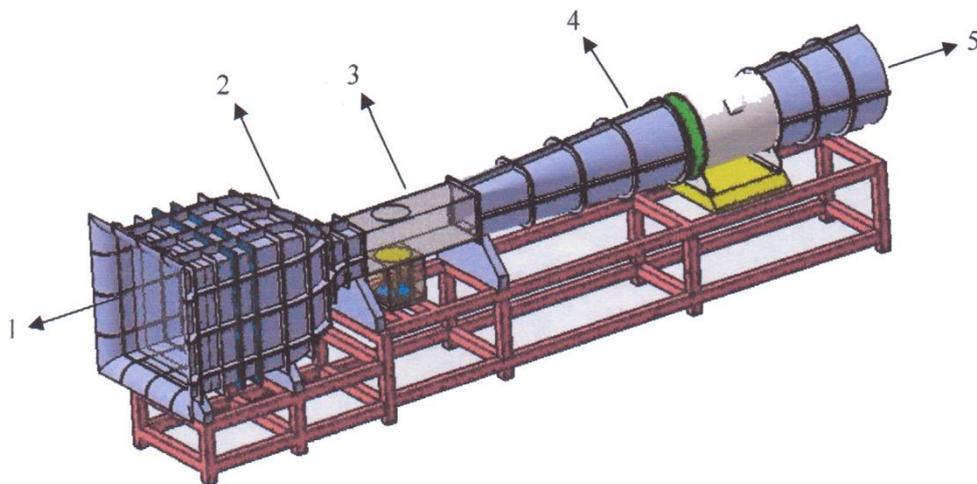
Seksi uji adalah bagian dari terowongan angin untuk menempatkan model yang akan diuji serta dilengkapi dengan dudukan model dan sensor alat ukur.

4. *Diffuser*

Diffuser berfungsi untuk memperkecil lapisan batas yang terjadi akibat gesekan angin dengan dinding terowongan angin.

5. *Fan house*

Fan house adalah bagian dari terowongan angin dimana terdapat kipas yang berfungsi untuk menyedot angin dari arah ruang penenang. Kipas tersebut digerakkan oleh motor listrik.



Gambar 30. Terowongan angin saluran terbuka. [LAGG, 2007]

Keterangan gambar :

- | | |
|-------------------|---|
| 1. Ruang penenang | 4. <i>Diffuser</i> |
| 2. Kontraksi | 5. Motor listrik dan saluran keluar udara |
| 3. Seksi uji | |

Sebuah terowongan angin terdiri dari bagian yang berbentuk tabung yang tertutup dan dengan benda uji dipasang di tengah. Udara dihembuskan oleh sistem kipas yang kuat melewati benda uji. Kipas ini harus memiliki sudu pengarah untuk melancarkan aliran agar stabil. Benda uji dilengkapi dengan alat keseimbangan untuk mengukur gaya yang dibangkitkan aliran udara, atau dengan menginjeksikan asap atau bahan lain ke aliran udara untuk melihat perilaku aliran yang mengalir di sekitar benda uji. Gambar berikut merupakan contoh penggunaan *wind tunnel*.



Gambar 31. Pengujian pada *wind tunnel*. [Wikipedia]

1. Pengukuran Gaya Aerodinamis

Kecepatan udara dan tekanan diukur melalui beberapa cara pada *wind tunnel*. Kecepatan udara yang melalui tempat uji ditentukan berdasarkan prinsip Bernoulli. Pengukuran tekanan dinamis, tekanan statis, dan peningkatan suhu pada aliran udara dapat diketahui. Arah aliran udara di sekitar model dapat ditentukan dengan seutas benang yang dipasang pada permukaan benda uji. Arah aliran udara yang mendekati permukaan dapat dilihat dengan cara menambahkan perlakuan pada aliran udara di bagian

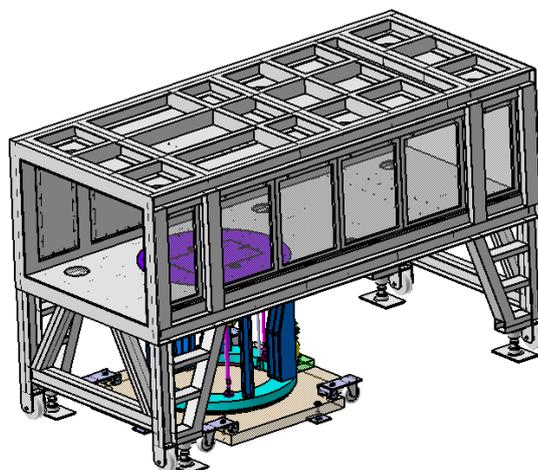
depan dan belakang dari benda uji. Asap dan sejumlah cairan dapat diterapkan pada aliran dibagian hulu dari benda uji, dan bentuk dari alur asap yang melaju disekitar model dapat diabadikan dengan foto.

Gaya aerodinamis pada benda uji biasanya diukur menggunakan batang keseimbangan, yang terhubung pada benda uji melalui batang, kabel, atau benang. Distribusi tekanan yang melewati benda uji dapat diukur dengan jalan membuat banyak lubang sepanjang jalur aliran udara, dan menggunakan *multi tube manometers* untuk mengukur tekanan pada tiap lubang. Distribusi tekanan dapat juga diketahui lebih baik dengan menggunakan cat yang sensitif terhadap tekanan, dimana tekanan lokal yang tinggi diindikasikan dengan memudarnya warna cat pada tempat tertentu. Distribusi tekanan juga dapat diketahui dengan sabuk yang sensitif terhadap tekanan, pada perkembangan selanjutnya digunakan beberapa modul sensor tekanan *ultra-miniaturized* yang diintegrasikan pada pita fleksibel. Pita dipasang pada permukaan benda uji menggunakan solasi, dan akan mengirimkan sinyal yang menggambarkan distribusi tekanan pada permukaan (SAE, 2009).

Gaya – gaya aerodinamika yang terjadi pada model di terowongan angin juga bisa diukur dengan timbangan luar. Timbangan luar pada dasarnya adalah suatu sistem mekanik dan elektronik, dimana gaya/momen diukur oleh sensor/transducer yang berupa kombinasi *strain-gauge* atau *load-cell* (LC). Data analog yang berupa tegangan akan dikeluarkan oleh LC, yang besarnya berbanding lurus dengan besaran fisiknya (gaya/momen

terukur). Data analog (voltase) selanjutnya dikondisikan oleh unit pengkondisi sinyal (CU) agar dapat dibaca oleh perangkat *analog to digital converter* (ADC) yang terhubung dengan komputer, dimana suatu program komputer selanjutnya akan membaca data ADC ini dan mengembalikannya ke data analog atau besaran fisika (gaya/momen).

Karena LC tersebut dipasang secara terintegrasi melalui *platform*, maka pada sistem timbangan setiap satu LC yang bekerja pada sumbu tertentu tidak lagi mengukur satu komponen gaya/momen secara terisolasi, tapi masing-masing LC akan mengalami kopling dengan LC lainnya. Dengan kata lain jika satu komponen dibebani maka komponen tersebut dapat terukur pada lebih dari satu LC, karena gaya/momen yang terukur pada LC bukan hanya pada satu komponen yang dibebani saja, tetapi juga dipengaruhi interferensi atau interaksi dari komponen lainnya. Besarnya interferensi gaya-gaya lain terhadap komponen yang dibebani merupakan salah satu parameter yang menentukan kualitas timbangan luar. Berikut merupakan letak timbangan luar pada terowongan angin.

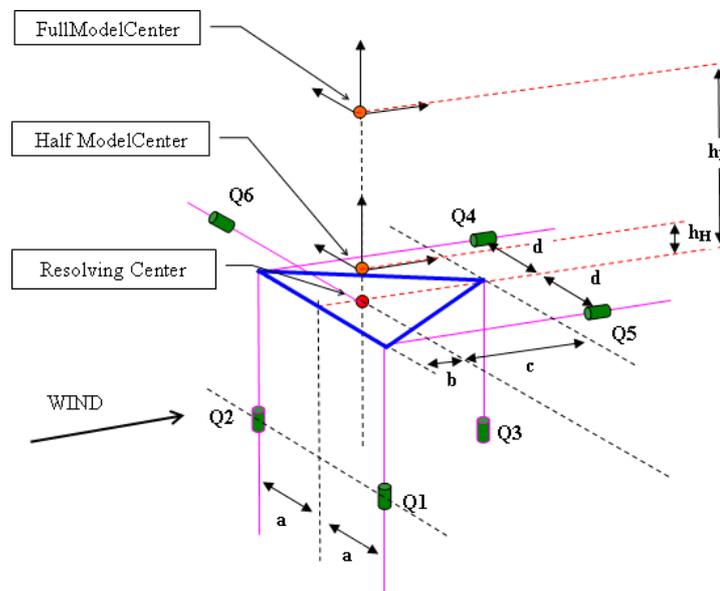


Gambar 32. Letak timbangan luar pada terowongan angin. [Fariduzzaman, 2011]

Pada sistem pengukuran gaya-gaya aerodinamika di terowongan angin, dikenal tiga sumbu koordinat (*Fariduzzaman, 2007*), yaitu :

- ✓ Karena gaya diukur oleh LC yang terpasang di rangka timbangan luar, maka pusat sumbu koordinat akan ada di rangka timbangan. Dalam hal ini adalah suatu titik di *platform*, dimana terjadi pertemuan gaya yang bekerja di LC. Pusat sumbu koordinat di *platform* ini disebut dengan sumbu kestabilan atau sumbu timbangan (*balance axis*).
- ✓ Gaya timbangan luar selanjutnya harus ditransformasikan ke sumbu koordinat model, agar diperoleh gaya/momen model. Sistem sumbu ini disebut *body axis*.
- ✓ Jika data gaya memerlukan koreksi efek dinding seksi uji atau interferensi lainnya, maka koreksi merupakan fungsi gaya dalam sumbu angin (*wind axis*).

Berikut merupakan sketsa platform timbangan luar.

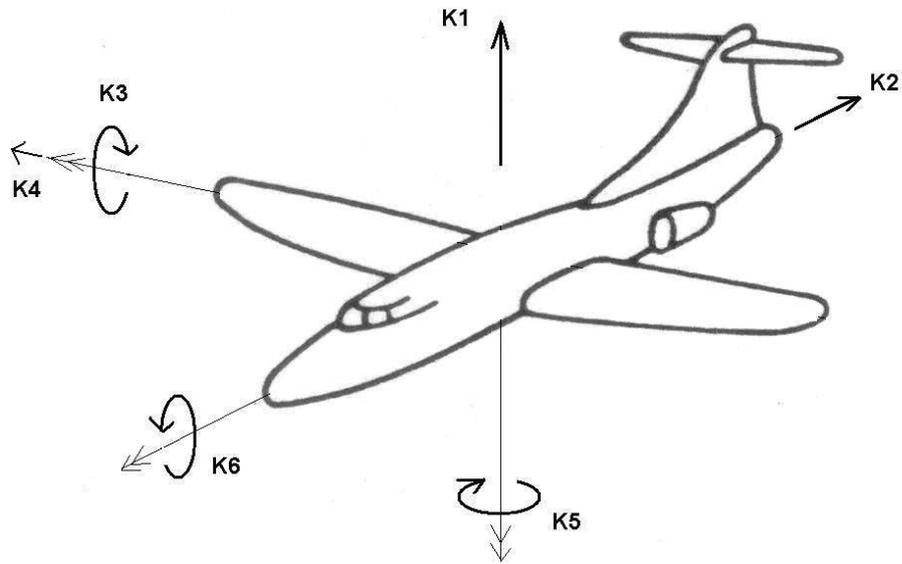


Gambar 33. Sketsa platform timbangan luar. [*Fariduzzaman, 2011*]

Jika gaya yang terukur di masing-masing LC dinyatakan dengan F_1 untuk LC 1, F_2 untuk LC 2, dan seterusnya. Serta data analog (volt) dari masing-masing LC dinyatakan dengan V_1 untuk LC 1, V_2 untuk LC 2, dan seterusnya. Maka secara fisik setiap gaya terukur LC akan memiliki hubungan linier dengan tegangan keluarannya. Selanjutnya jika :

- ✓ K1 adalah komponen gaya-normal yang diukur timbangan luar.
- ✓ K2 adalah komponen gaya-axial yang diukur timbangan luar.
- ✓ K3 adalah komponen momen-angguk (*pitch*) yang diukur timbangan luar.
- ✓ K4 adalah komponen gaya-lateral (*side*) yang diukur timbangan luar.
- ✓ K5 adalah komponen momen-geleng (*yaw*) yang diukur timbangan luar.
- ✓ K6 adalah komponen momen-guling (*roll*) yang diukur timbangan luar.

Berdasarkan gambar 33, jika didefinisikan bahwa gaya *compression* di LC adalah positif dan gaya *tension* adalah negatif, maka dengan merujuk pada konfigurasi sistem timbangan luar, pada saat komponen gaya/momen model adalah positif berdasarkan gambar berikut, maka secara analitis hubungan diagram gaya/momen terukur timbangan luar dapat dihitung secara matematis.



Gambar 34. Arah positif dari komponen gaya/momen pada model. [Fariduzzaman, 2011]

- ✓ Ketika K1 positif maka LC₁, LC₂, LC₃ mendapatkan gaya *tension*, maka
$$K1 = -F_1 - F_2 - F_3$$
- ✓ Ketika K2 positif maka LC₄, LC₅ mendapat gaya *compression*, maka
$$K2 = F_4 + F_5$$
- ✓ Ketika K3 positif maka LC₁, LC₂, LC₄, dan LC₅ mendapatkan gaya *tension*, sedangkan LC₃ *compression*, maka
$$K3 = -bF_1 - bF_2 + cF_3 - hF_4 - hF_5$$
- ✓ Ketika K4 positif maka LC₆ mendapatkan gaya *compression*, maka
$$K4 = F_6$$
- ✓ Ketika K5 positif maka LC₄ mendapat *compression* dan LC₅ mendapatkan gaya *tension*, maka
$$K5 = dF_4 - dF_5$$
- ✓ Ketika K6 positif maka LC₁ dan LC₆ mendapatkan gaya *tension*, sedangkan LC₂ mendapat *compression*, maka
$$K6 = -aF_1 + aF_2 - hF_6$$

Persamaan di atas kemudian dapat ditulis dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ -b & -b & c & -h & -h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & d & -d & 0 \\ -a & a & 0 & 0 & 0 & -h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix}$$

$$[K] = [X] [F] \dots\dots\dots (3)$$

[X] merupakan matriks koefisien yang menghubungkan gaya di masing-masing LC dan komponen timbangan luar. Namun hubungan tersebut hanya berlaku apabila input ke matriks [X] adalah gaya [F] dan satuan fisiknya sama. Pada kenyataannya, untuk memperoleh matriks [K] akan lebih mudah apabila langsung ditransformasi dari pembacaan masing-masing LC dalam volt (V_1, V_2, V_3) sehingga dalam hal ini satuan fisiknya tidak sama. Dengan kata lain, proses transformasi [V] ke [F] dan selanjutnya ke [K] menjadi tidak perlu. Begitu pula masing-masing LC bukanlah instrumen individual yang terpisah, melainkan terintegrasi dalam satu sistem timbangan luar, dan satu sama lainnya akan saling berpengaruh (ada kopling). Terjadinya interaksi dapat dilihat dari koefisien matriks yang tidak bernilai nol.

Maka secara praktis, persamaan (3) dalam implementasinya berubah menjadi persamaan di bawah ini, dimana data tegangan V dari LC (volt) dikonversi langsung ke data gaya/momen K.

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix}$$

$$[K] = [C][V] \dots\dots\dots (4)$$

Jadi matriks [X] di persamaan (3) tidak sama dengan matriks [C] pada persamaan di atas. Matriks pada persamaan di atas tidak dapat diperoleh dari perhitungan analitik (dengan mengukur panjang jarak antar LC), melainkan harus dengan kalibrasi timbangan luar. Matriks [C] disebut juga matriks kalibrasi, yang menyatakan hubungan matematis antara data volt yang dibaca masing-masing LC dengan data gaya/momen aerodinamika. Matriks [C] tersebut dapat diperoleh dari proses kalibrasi timbangan luar.

Proses kalibrasi dilakukan dengan cara membebani timbangan luar menggunakan beban yang diketahui beratnya (terkalibrasi) pada masing-masing komponen K. Kemudian dicatat data volt yang terukur di masing-masing LC. Atau secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \\ K_5 \\ K_6 \end{bmatrix}$$

$$[V] = [A][K] \dots\dots\dots (5)$$

Matriks [A] adalah matriks koefisien, yang menyatakan hubungan matematis yang linier antara beban dengan tegangan output LC [V]. matriks [A] juga mengandung faktor kopling antar masing-masing komponen. Matriks [K] adalah beban yang diberikan saat kalibrasi. Sehingga untuk mendapatkan koefisien a_{11} , a_{21} , a_{31} , a_{41} , a_{51} , a_{61} diperlukan sekurang-kurangnya 6 persamaan simultan. Begitupun untuk koefisien matriks lainnya.

Dengan demikian, kalibrasi timbangan dapat dilakukan dengan memberikan sejumlah beban individual pada masing-masing komponen [K] secara bergantian. Ketika satu komponen K dibebani dengan sejumlah beban maka komponen K lainnya tidak dibebani. Setiap beban yang diberikan, akan mengeluarkan data tegangan (volt) dari semua LC. Data inilah yang harus dicatat sebagai data analog.

Jika beban diberikan di komponen K_1 , misalnya B, maka matriks tersebut akan menjadi,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sehingga diperoleh hubungan berikut,

$$V_1 = B \times a_{11} \quad \text{atau} \quad a_{11} = V_1/B$$

Dari pembebanan di K_1 tersebut juga akan diperoleh a_{21} , a_{31} , a_{41} , a_{51} , a_{61} . selanjutnya dengan pembebanan pada komponen berikut,

$K_2 = B$ maka akan dapat diperoleh $a_{12}, a_{22}, a_{32}, a_{42}, a_{52}$ dan a_{62} .

$K_3 = B$ maka akan dapat diperoleh $a_{13}, a_{23}, a_{33}, a_{43}, a_{53}$ dan a_{63} .

$K_4 = B$ maka akan dapat diperoleh $a_{14}, a_{24}, a_{34}, a_{44}, a_{54}$ dan a_{64} .

$K_5 = B$ maka akan dapat diperoleh $a_{15}, a_{25}, a_{35}, a_{45}, a_{55}$ dan a_{65} .

$K_6 = B$ maka akan dapat diperoleh $a_{16}, a_{26}, a_{36}, a_{46}, a_{56}$ dan a_{66} .

Jadi pada saat pengukuran dengan timbangan luar, suku-suku [V] adalah variabel bebas dan [K] adalah variabel tak bebas. Sedangkan pada saat kalibrasi, suku-suku [V] adalah variable tak bebas dan [K] adalah variabel bebas. Dengan demikian untuk memperoleh matrik kalibrasi [C], maka matrik yang diperoleh pada saat kalibrasi [A], harus diinverskan.

$$[C] = [A]^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

Pada timbangan luar, LC berhubungan satu sama lainnya melalui *platform* (terintegrasi). Akibatnya jika dibebani satu komponen gaya/momen, maka data yang terukur di masing-masing LC akan sangat sulit mendekati nol. Masing-masing komponen akan saling mempengaruhi komponen lainnya (terjadi kopleng). Dengan kata lain, matriks [A] tidak akan diagonal. Beban angin pun akan memberikan gaya/momen aerodinamika secara serempak (*lift, drag, momen*) tidak lagi satu persatu seperti saat kalibrasi.

Aspek lain yang harus diperhatikan adalah *tare-volt* dari sistem elektronik, yakni sistem elektronik mungkin sudah memberikan angka volt tertentu, sekalipun model belum dipasang. Eliminasi *tare-volt* ini harus dilakukan, baik saat kalibrasi maupun saat pengukuran.

Selain *tare-volt* ada juga *tare-gaya*, yakni data gaya/momen yang telah terukur pada saat angin-nol dan model telah terpasang. Maka untuk eliminasi ini perlu dilakukan pengukuran pendahuluan (*tare force measurement*). Pada proses pengukuran ini efek berat model dan penyangga akan disimpan di basis-data untuk koreksi data pengujian.

2. Cara Kerja

Udara dihembuskan atau dihisap melalui saluran yang dilengkapi dengan tempat untuk melihat dan sejumlah perlengkapan dimana model yang dipasang akan dipelajari. Biasanya udara bergerak melalui terowongan menggunakan sejumlah kipas. Untuk *wind tunnel* yang sangat besar, penggunaan sebuah kipas yang besar tidaklah praktis, lebih baik menggunakan susunan beberapa kipas secara paralel untuk mencukupi aliran udara yang diperlukan. Akibat volum geser dan dibutuhkan udara yang bergerak dengan cepat, kipas mungkin digerakkan menggunakan *turbofan* dari pada motor elektrik.

Aliran udara yang dihembuskan kipas dan masuk ke terowongan adalah aliran yang memiliki turbulensi yang besar akibat pergerakan sudu kipas, maka dari itu aliran ini kurang berguna untuk mendapatkan hasil pengukuran yang akurat. Aliran udara yang mengalir pada terowongan ini membutuhkan aliran laminar dan bebas turbulensi. Untuk memperbaiki masalah ini, digunakan bilah udara yang berdampingan secara vertikal dan horizontal untuk memperhalus aliran yang turbulen sebelum mencapai benda uji.

Karena efek viskositas, pada bagian persilangan dari *wind tunnel* biasanya melingkar bukan kotak, karena pada terowongan berbentuk kotak akan menciptakan aliran konstiksi yang lebih besar pada sudut-sudutnya sehingga alirannya menjadi turbulen. Terowongan yang melingkar menghasilkan aliran lebih halus.

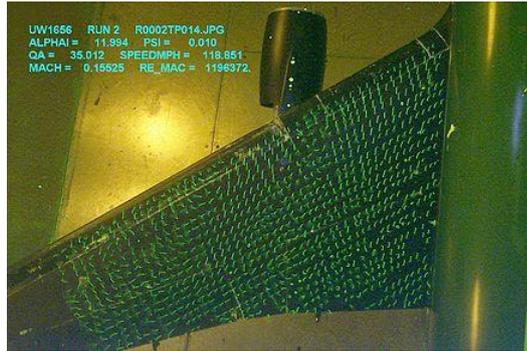
Pada permukaan dinding bagian dalam *wind tunnel* biasanya dibuat sehalus mungkin, untuk mengurangi *surface drag* dan turbulensi yang akan berpengaruh pada keakuratan pengujian. Bahkan dinding yang halus sekalipun membangkitkan sejumlah hambatan pada aliran udara, maka dari itu objek yang akan di uji biasanya diletakkan di tengah dari terowongan, dengan sejumlah ruang kosong diantara objek dan dinding terowongan. Untuk itu ada faktor koreksi terkait pengujian *wind tunnel* terhadap hasil dari pengujian udara terbuka.

3. Visualisasi Aliran

Karena udara tidak dapat dilihat atau transparan maka akan sulit untuk mengamati secara langsung pergerakan dari udara. Maka, sejumlah metode diterapkan untuk mendapatkan visualisasi aliran pada pengujian *wind tunnel*.

1. Benang

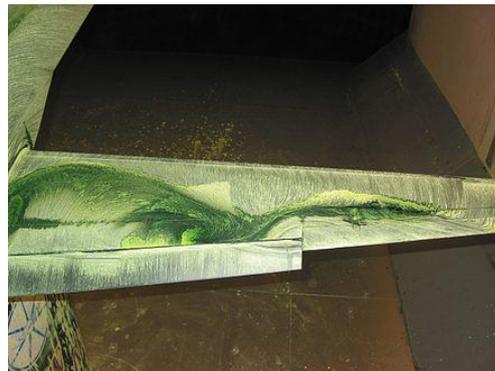
Benang diaplikasikan pada model dan tetap tertambat selama pengujian. Benang dapat digunakan sebagai pengukur pola aliran udara dan pemisahan aliran. Berikut merupakan gambar pengaplikasian dari benang pada model.



Gambar 35. Penggunaan benang dalam pengujian. [Wikipedia]

2. *Evaporating Suspensions*

Evaporating suspensions merupakan campuran sederhana dari sejumlah serbuk, bedak, atau tanah liat yang dicampur ke cairan yang memiliki panas laten penguapan yang rendah. Ketika angin berhembus campuran tadi akan cepat menguap meninggalkan jejak tanah liat yang menunjukkan karakteristik aliran udara. Berikut adalah contoh penggunaan *clay* pada model.

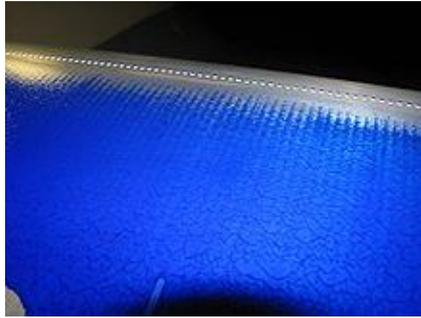


Gambar 36. Penggunaan *clay* pada benda uji. [Wikipedia]

3. Minyak

Ketika minyak di gunakan dalam pengujian dengan mengaplikasikannya pada permukaan model maka akan terlihat jelas

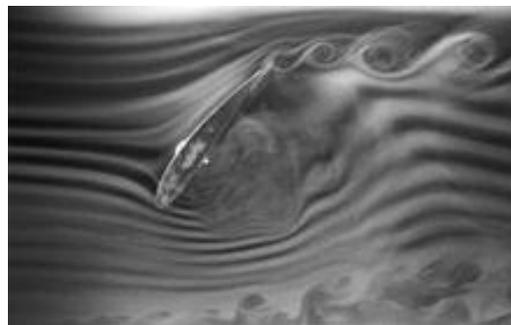
gambaran aliran transisi dari laminar ke turbulen pada saat pemisahan. Gambar di bawah adalah contoh penggunaan minyak dalam pengujian.



Gambar 37. Penggunaan minyak dalam pengujian. [Wikipedia]

4. Kabut

Kabut dibuat dengan *Ultrasonic Piezoelectric Nebulizer*. Kabut disalurkan ke dalam *wind tunnel* (biasanya pada *wind tunnel* tipe tertutup). Sebuah pemanas listrik disertakan sebelum pengujian yang akan membuat partikel air menguap disekitarnya dan membentuk lembaran kabut. Fungsi lembaran kabut ini sebagai alur arus pada benda uji ketika diselubungi lembaran tipis. Gambar berikut merupakan contoh penggunaan kabut dalam pengujian.



Gambar 38. Pengujian menggunakan media kabut. [Wikipedia]

4. Jenis *Wind Tunnel* Berdasarkan Penggunaannya

1. *Aeronautical Wind Tunnel*

a. *High Reynold's Number Tunnel*

Reynold's number adalah salah satu parameter yang mengatur persamaan untuk simulasi aliran pada *wind tunnel*. Untuk nilai *Mach Number* kurang dari 0,3 bilangan ini merupakan parameter utama yang mengatur karakteristik aliran. Terdapat tiga jalan utama untuk menyimulasikan bilangan ini, karena tidak praktis menentukan bilangan ini pada penggunaan skala penuh dari kendaraan.

- *Pressurized tunnel*. Pada alat ini gas yang diuji ditambah tekanannya untuk meningkatkan bilangan ini.
- *Heavy gas tunnel*. Gas yang lebih berat seperti Freon dan R134a digunakan sebagai gas uji.
- *Cryogenic tunnel*. Pada alat ini gas didinginkan untuk meningkatkan bilangan ini.

b. *V/STOL Tunnel*

V/STOL Tunnel memerlukan bagian persilangan yang besar, tetapi dengan kecepatan yang kecil. Karena daya dipengaruhi kecepatan kubik, daya yang dibutuhkan untuk operasi ini juga berkurang.

c. *Spin Tunnel*

Pesawat memiliki kecendrungan untuk berputar ketika mengalami efek *stall*. Terowongan ini digunakan untuk mempelajari fenomena ini.

2. *Automobile Tunnel*

Automobile tunnel terdiri dari dua kategori

a. *External flow tunnel*. Digunakan untuk mempelajari aliran eksternal yang melewati *chassis*.

b. *Climatic tunnel*. Digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pintu, sistem rem, dan lain-lain pada berbagai kondisi *climatic*.

Kebanyakan perakitan mobil memiliki *climatic wind tunnel* sendiri.

3. *Aeroacoustic Tunnel*

Terowongan ini digunakan untuk mempelajari suara yang dibangkitkan oleh aliran dan redamannya.

5. **Studi Model dan Kesamaan Aliran**

Di dalam pengujian aerodinamika, model pengujian biasanya mempunyai ukuran yang lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran sebenarnya. Agar berguna, model tes harus mengekstrak data yang dapat diskalakan untuk menentukan gaya, momen, dan beban dinamik yang muncul pada prototipe skala penuh, maka pengujian aerodinamika harus dilakukan pada asas similaritas/kesamaan. Kondisi apa yang harus dipenuhi untuk menjamin kesamaan aliran model dengan prototipe.

Tentu saja yang paling dibutuhkan adalah kesamaan geometri dari model dan prototipe. Kesamaan geometri memerlukan kesamaan bentuk antara model dan prototipe, dan semua dimensi linear dari model dikaitkan dengan dimensi dari prototipe berdasarkan konstanta faktor skala.

Hal ke-dua yang diperlukan adalah kesamaan kinematik antara aliran model dan prototipe. Dua aliran disebut sama secara kinematik apabila kecepatan pada titik yang berkaitan dalam arah yang sama dan hanya dibedakan oleh konstanta faktor skala. Dua aliran yang memiliki kesamaan aliran secara kinematik juga memiliki pola *streamline* yang berkaitan dengan konstanta faktor skala. Karena bentuk batas terikat secara *streamline*, aliran yang secara kinematik sama sudah tentu memiliki kesamaan geometri.

Kesamaan kinematik membutuhkan rezim aliran yang sama antara model dan prototipe. Jika *Compressibility* atau efek kavitasi, yang mungkin berubah bahkan pada pola aliran kebanyakan, tidak dihadirkan pada aliran prototipe, dan harus di hindari pada aliran model.

Ketika dua aliran memiliki distribusi gaya yang identik tipe gaya dan paralel serta terkait besarnya dengan konstanta skala faktor pada semua titik yang berkaitan, maka alirannya disebut memiliki kesamaan dinamik.

Untuk membangun kondisi yang diperlukan pada kesamaan dinamik secara komplit, semua gaya yang penting pada situasi aliran harus dipertimbangkan. Maka efek dari gaya viskos, gaya tekan, gaya tegangan permukaan, dan lainnya, harus dipertimbangkan. Kondisi tes harus dibangun berdasarkan semua gaya yang penting dan terkait dengan kesamaan faktor skala antara aliran model dan prototipe. Ketika kesamaan dinamik muncul, pengukuran data aliran pada model mungkin terkait secara kuantitatif dari kondisi aliran pada prototipe. Kondisi apa yang

harus dipenuhi untuk menjamin kesamaan dinamik aliran model dengan prototipe.

Teorema Pi *Buckingham* dapat digunakan untuk menentukan dan menyelesaikan grup *dimensionless* untuk fenomena aliran ini. Untuk mendapatkan kesamaan dinamik antara tiap aliran yang memiliki kesamaan geometri, kita harus menjamin tiap grup *dimensionless* yang bebas memiliki kesamaan nilai pada model dan prototipe. Maka tidak hanya kesamaan gaya yang penting, tetapi juga grup *dimensionless* terikat juga akan memiliki nilai yang sama pada model dan prototipe.

Parameter similaritas yang penting untuk mengendalikan besarnya gaya dan momen aerodinamika adalah bilangan *reynolds* dan bilangan *mach* (**Barlow, 1999**). Bilangan *reynolds* yaitu bilangan yang menghubungkan viskositas terhadap gaya-gaya inersia. Similaritasnya menjadi penting bila efek-efek gesekan yang disebabkan viskositas fluida diperhatikan. Bilangan *mach* adalah bilangan yang menghubungkan kompresibilitas terhadap gaya-gaya inersia. Similaritasnya menjadi penting bila terjadi pada kecepatan aliran yang tinggi, variasi massa jenis dan suhu yang terjadi dapat terukur. Hal ini terjadi pada kecepatan transonik dan yang lebih tinggi lagi.

Dalam buku disebutkan *drag force* pada bola merupakan fungsi dari diameter, kecepatan fluida, viskositas fluida, dan densitas fluida pada bola yang halus (**Fox, 2003**). Dan dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F = f(D, V, \mu, \rho) \dots\dots\dots (7)$$

Teorema Pi *Buckingham* memprediksi hubungan fungsi di atas menjadi.

$$\frac{F}{\rho V^2 D^2} = f \left(\frac{\rho V D}{\mu} \right) \dots\dots\dots (8)$$

Sesuai dengan teori yang disebutkan di atas maka hubungan antara model dan prototipe menjadi.

$$\left(\frac{\rho V D}{\mu} \right)_{\text{model}} = \left(\frac{\rho V D}{\mu} \right)_{\text{prototipe}} \dots\dots\dots (9)$$

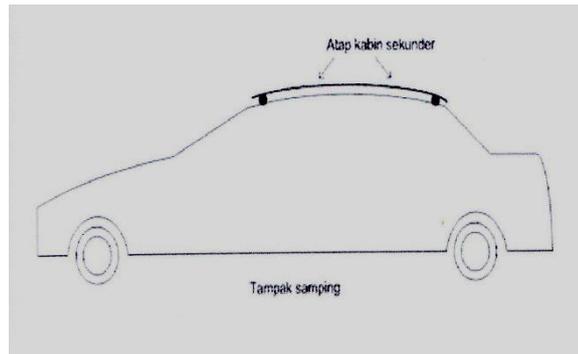
$$Re_{\text{model}} = Re_{\text{prototipe}}$$

$$\left(\frac{F}{\rho V^2 D^2} \right)_{\text{model}} = \left(\frac{F}{\rho V^2 D^2} \right)_{\text{prototipe}} \dots\dots\dots (10)$$

maka, hasil yang diperoleh dari model dapat digunakan untuk memprediksi *drag* pada prototipe skala penuh.

F. Secondary Cabin Roof (SCR)

SCR merupakan aksesoris tambahan pada mobil berupa atap kabin sekunder yang dipasang diatas atap utama mobil. SCR ini dirancang dengan maksud mengurangi panas yang masuk ke dalam kabin karena sinar matahari ketika sebuah mobil sedang diparkir ditempat terbuka ataupun sedang berjalan, sehingga akan membantu meringankan kerja ac mobil ketika ac dihidupkan. Hasil penelitian yang telah dilakukan, SCR mampu menurunkan temperature didalam kabin mobil hingga 3⁰ C tanpa AC mobil dihidupkan dan dapat membantu menurunkan temperature hingga 9⁰ C pada saat AC dihidupkan. Pengujian yang telah dilakukan terhadap SCR hanya berupa pengujian statis artinya mobil tidak dalam keadaan berjalan. Berikut adalah gambar SCR pada mobil (*Su'udi, 2010*).



Gambar 39. Skema pemasangan SCR pada mobil. [Su'udi, 2010]

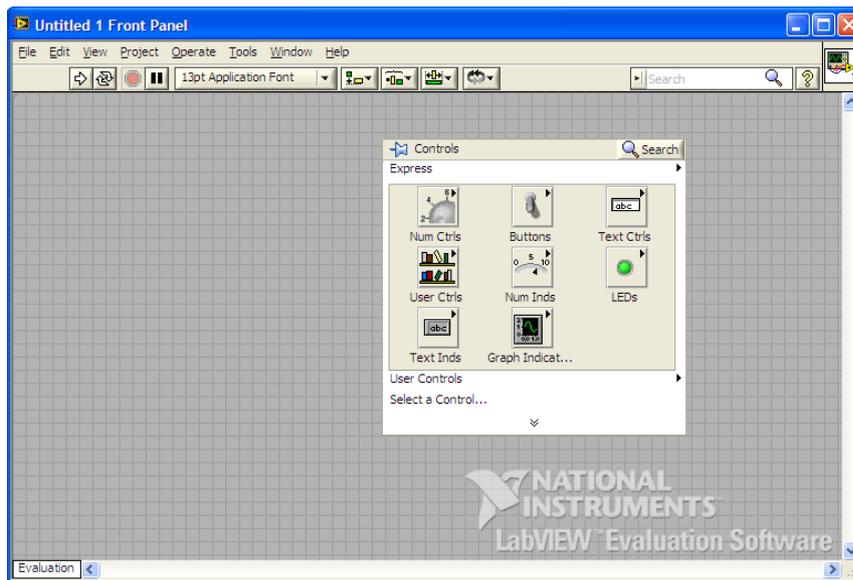
G. LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) merupakan perangkat lunak (*software*) buatan *National Instruments* yang menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis atau diagram blok sementara bahasa pemrograman C++ atau *Matlab* menggunakan basis teks. Hal ini memudahkan pengguna untuk memahami atau membuat suatu program, karena fungsi-fungsi yang digunakan direpresentasikan melalui suatu gambar atau simbol (*ITB, 2003*)



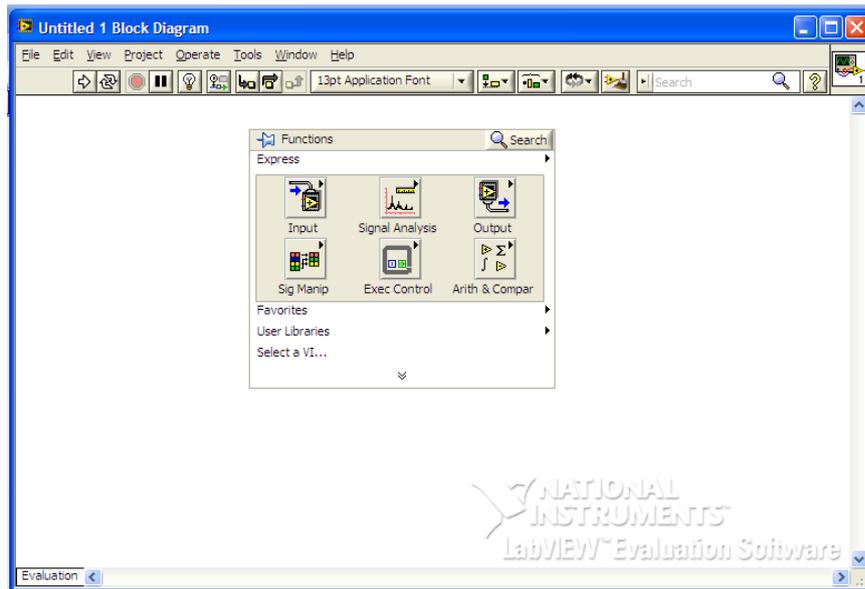
Gambar 40. Tampilan depan *software LabVIEW*. [National Instruments, 2009]

Saat program *LabVIEW* dibuka, akan muncul tampilan seperti gambar di atas. Klik *Blank VI* untuk memulai pemrograman baru, lalu akan muncul dua jendela, yakni *Front Panel* dan *Block Diagram*. *Front Panel* merupakan suatu *interface* untuk pengguna yang akan mensimulasikan panel untuk instrumen, sedangkan *Block Diagram* berisi sumber kode (*source code*) yang dibuat dan disusun sedemikian rupa dalam bentuk diagram sebagai instruksi untuk *Front Panel*.



Gambar 41. Tampilan *Front Panel* pada *LabVIEW*. [National Instruments, 2009]

Dalam *Front Panel* terdapat tombol-tombol kontrol, saklar, knop, dan tampilan indicator berupa angka atau lampu menyerupai instrumen pada umumnya. Namun, tombol-tombol tersebut bersifat semu (*virtual*) yang digerakkan oleh mouse. Karena itulah untuk setiap *file* program aplikasi yang dibuat, *LabVIEW* memberi *extension .vi* (*virtual instrument*). Pada *Block Diagram* ditunjukkan bagan alir proses.



Gambar 42. Tampilan *Block Diagram* pada *LabVIEW*. [National Instruments, 2009]

Kelebihan *software LabVIEW* adalah (ITB, 2003):

1. Mudah mendebug atau mendeteksi kesalahan
2. Mudah mengikuti jalannya aliran VI
3. Program dibuat secara hierarki dan modular, artinya setiap VI dapat digunakan sebagai sub VI dari VI lainnya
4. Mudah membuat simulasi yang menampilkan GUI (*Graphical User Interface*)
5. Berbagai aplikasi dapat dibuat dengan menggunakan *LabVIEW*, seperti akuisisi data dan kontrol suatu instrument, pemrosesan gambar (*image processing*), pengolahan sinyal digital (*Digital Signal Processing*), hingga aplikasi internet.