

# 9

## Aliran Melewati Benda Terendam



Pada bab ini kita akan meninjau berbagai aspek dari aliran yang melalui benda-benda yang terendam di dalam fluida. Contoh-contohnya mencakup aliran udara di sekitar pesawat terbang, mobil, dan gumpalan salju yang turun, atau aliran air di sekitar kapal selam dan ikan. Dalam situasi seperti ini benda-benda tersebut dikelilingi seluruhnya oleh fluida dan alirannya disebut sebagai *aliran luar*.

Aliran luar yang melibatkan udara sering disebut sebagai aerodinamika untuk menunjukkan arti penting dari aliran luar yang dihasilkan ketika sebuah obyek seperti sebuah pesawat terbang menjelajah atmosfer. Meskipun bidang kajian aliran luar aerodinamika ini sangat penting, masih banyak contoh-contoh lain yang juga sama pentingnya. Gaya fluida (gaya angkat (*lift*) dan gaya seret (*drag*)) pada permukaan kendaraan (mobil, truk, sepeda) telah menjadi topik yang sangat penting. Merancang mobil dan truk secara benar memungkinkan kita untuk mengurangi konsumsi bahan bakar dan meningkatkan karakteristik pengendalian kendaraan. Upaya-upaya yang serupa telah berhasil meningkatkan kualitas kapal-kapal, baik kapal yang bergerak di permukaan air (dikelilingi oleh dua fluida, udara dan air), maupun kapal selam (yang seluruhnya dikelilingi oleh air).

Aplikasi lain dari aliran luar melibatkan benda-benda yang tidak seluruhnya dikelilingi oleh fluida, meskipun benda-benda tersebut diletakkan dalam suatu bentuk aliran luar. Sebagai contoh, perancangan yang tepat sebuah gedung (baik itu rumah Anda atau gedung pencakar langit) harus menyertakan pertimbangan berbagai pengaruh angin.

Seperti halnya bidang-bidang lain dari mekanika fluida, dua pendekatan (teoretis dan eksperimental) digunakan untuk memperoleh informasi mengenai gaya-gaya fluida yang terbentuk oleh aliran luar. Teknik teoretis (meliputi kajian analitis dan numerik) dapat memberikan banyak informasi yang diperlukan mengenai aliran-aliran serupa itu. Namun demikian, karena kompleksitas persamaan pengaturnya dan kompleksitas dari bentuk geometris benda yang terlibat, banyaknya informasi yang diperoleh secara teoretis murni

Banyak situasi praktis yang melibatkan aliran melewati benda.

sangat terbatas. Dengan kemajuan saat ini dan yang akan datang di bidang komputasi mekanika fluida, tampaknya prediksi komputer mengenai gaya-gaya dan pola aliran yang rumit akan dapat lebih cepat diperoleh.

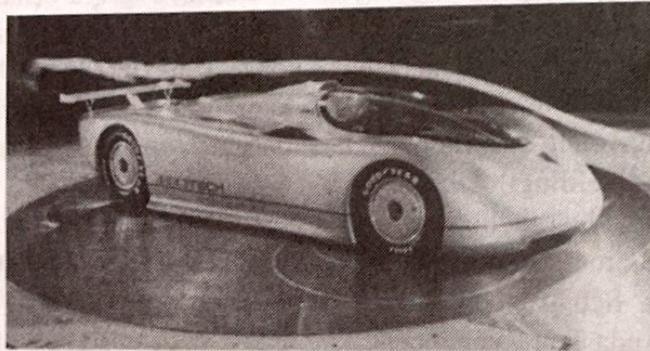
Kebanyakan informasi mengenai aliran luar berasal dari eksperimen-eksperimen yang dilakukan, sebagian besarnya, pada model-model yang diskala dari benda sebenarnya. Pengujian tersebut menggunakan pengujian terowongan angin dari model-model pesawat terbang, bangunan-bangunan dan bahkan seluruh kota. Dalam beberapa hal, justru benda sebenarnya, bukannya model, yang diuji di terowongan angin. Gambar 9.1 menunjukkan pengujian kendaraan di dalam terowongan angin. Mobil, sepeda, dan berbagai objek lain yang performanya lebih baik telah dihasilkan dari pengujian di terowongan angin ini. Penggunaan terowongan air dan tangki *towing* juga memberikan informasi yang berguna mengenai aliran di sekitar kapal dan benda-benda lainnya.

Dalam bab ini kita akan meninjau karakteristik dari aliran luar yang melewati berbagai benda. Kita akan mengkaji aspek-aspek kualitatif dari aliran-aliran serupa itu dan mempelajari cara menentukan berbagai gaya pada benda yang dikelilingi oleh cairan yang bergerak.

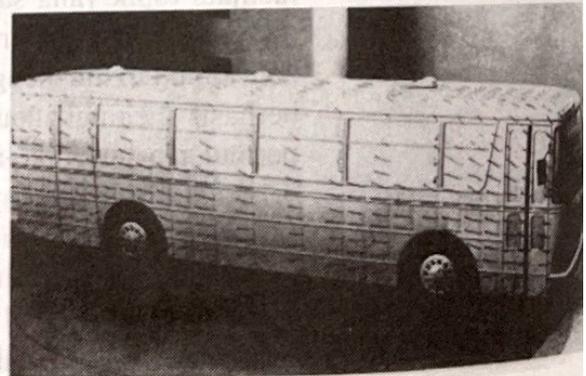
## 9.1 Karakteristik Aliran Luar Secara Umum

*Untuk aliran luar, biasanya paling mudah untuk menggunakan sistem koordinat yang dibuat tetap pada benda.*

Sebuah benda yang terendam di dalam fluida yang bergerak mengalami gaya-gaya resultan akibat interaksi antara benda dengan fluida di sekelilingnya. Dalam beberapa situasi (seperti pesawat yang terbang melewati udara yang diam), fluida yang berada jauh dari benda berada dalam keadaan diam dan benda tersebut bergerak melalui fluida dengan kecepatan  $U$ . Dalam situasi lainnya (seperti angin yang bertiup melewati sebuah bangunan), benda dalam keadaan diam dan fluida mengalir melewati benda tersebut dengan kecepatan  $U$ . Pada kasus manapun, kita dapat menetapkan sistem koordinat pada benda

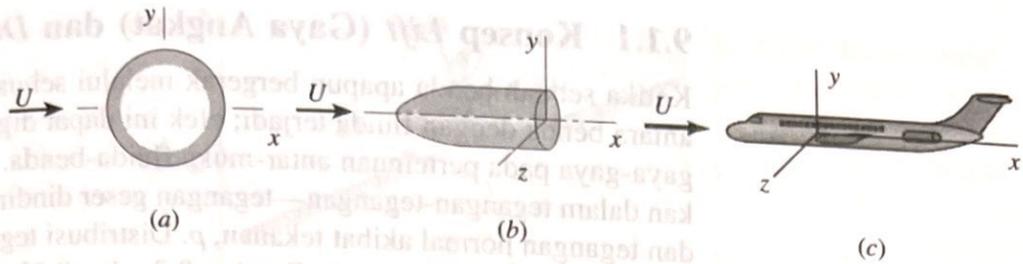


(a)



(b)

■ **GAMBAR 9.1** (a) Aliran melewati sebuah mobil ukuran penuh di dalam terowongan angin laboratorium aerodinamika GM, dengan penampang uji berukuran  $18 \times 34$  ft yang digerakkan oleh fan berdiameter 43 ft dan daya 4000 hp (Hak foto pada General Motors Corporation) (b) Aliran permukaan pada sebuah model kendaraan seperti yang diindikasikan oleh tuft yang dipasang pada permukaan (Dicetak ulang atas izin dari Society of Automotive Engineers, Ref. 28).



■ GAMBAR 9.2 Klasifikasi aliran: (a) dua-dimensi, (b) simetri sumbu, (c) tiga-dimensi.

dan memperlakukan situasi tersebut seperti fluida mengalir melewati benda yang diam dengan kecepatan  $U$ , yang disebut *kecepatan hulu*. Untuk keperluan buku ini, kita akan mengasumsikan bahwa kecepatan hulu konstan baik menurut waktu maupun tempatnya. Artinya, terdapat fluida dengan kecepatan seragam dan tetap yang mengalir melewati benda tersebut. Dalam situasi sesungguhnya, hal ini seringkali tidak benar. Sebagai contoh, angin yang mengalir melewati sebuah cerobong asap hampir selalu turbulen dan bergejolak (tidak tunak) dan mungkin kecepatannya tidak seragam dari atas sampai dasar cerobong. Biasanya ketidak-tunakan dan ketidakseragaman tidak begitu penting.

Bahkan dengan aliran hulu yang seragam dan tunak, aliran di sekitar benda dapat menjadi tak-tunak. Contoh perilaku seperti ini mencakup gerak periodik secara cepat (*flutter*) dalam aliran yang melewati airfoil (sayap), osilasi beraturan dari kabel telepon yang “bernyanyi” akibat tiupan angin, dan fluktuasi turbulen yang tidak beraturan di daerah olakan (*wake*) di belakang benda.

Struktur dari aliran luar dan tingkat kemudahan di mana aliran dapat digambar dan dianalisa sering tergantung pada sifat alamiah dari benda di dalam aliran. Tiga kategori umum dari benda ditunjukkan pada Gambar 9.2. Termasuk di dalamnya adalah (a) benda dua-dimensi (panjang tak terhingga dengan bentuk dan ukuran penampangnya yang konstan), (b) benda simetris sumbu (terbentuk dengan merotasi bentuk penampangnya terhadap sumbu simetrinya), dan (c) benda tiga-dimensi yang mungkin memiliki atau tidak memiliki sebuah garis atau bidang simetri. Dalam prakteknya tidak terdapat benda-benda yang benar-benar dua-dimensi—tidak ada yang memiliki panjang tak terhingga. Namun demikian, banyak benda yang cukup panjang sehingga efek-efek ujungnya sedemikian kecil dan dapat diabaikan.

Klasifikasi lain dari bentuk benda dapat tergantung pada apakah benda tersebut dibuat mulus mengikuti garis arus (*streamlined*) atau tumpul. Karakteristik aliran sangat tergantung pada seberapa banyak bagian yang dibuat mulus tersebut. Secara umum, *benda-benda streamlined* (seperti airfoil, mobil balap, dan lain-lain.) memiliki pengaruh kecil pada fluida yang mengelilinginya, dibandingkan dengan pengaruh yang dimiliki *benda tumpul* (misalnya, parasut, gedung-gedung, dan lain-lain.) pada fluida. Biasanya, tapi tidak selalu, akan lebih mudah untuk mendorong sebuah *benda streamlined* melewati suatu fluida daripada mendorong sebuah benda tumpul yang ukurannya sama agar bergerak dengan kecepatan yang sama. Terdapat beberapa pengecualian penting untuk aturan dasar ini.



V9.1 Pesawat ulang-alik sedang mendarat.

Bentuk dari sebuah benda mempengaruhi karakteristik aliran.

### 9.1.1 Konsep Lift (Gaya Angkat) dan Drag (Gaya Seret)

Ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida, suatu interaksi antara benda dengan fluida terjadi; efek ini dapat digambarkan dalam bentuk gaya-gaya pada pertemuan antar-muka fluida-benda. Hal ini dapat digambarkan dalam tegangan-tegangan—tegangan geser dinding,  $\tau_w$ , akibat efek viskositas dan tegangan normal akibat tekanan,  $p$ . Distribusi tegangan geser dan tekanan yang biasa ditunjukkan pada Gambar 9.3a dan 9.3b. Baik  $\tau_w$  dan  $p$  bervariasi besar dan arahnya di sepanjang permukaan.

Seringkali berguna jika kita mengetahui distribusi terperinci dari tegangan geser dan tekanan di seluruh permukaan benda, meskipun informasi serupa itu sulit didapatkan. Namun demikian, seringkali yang diperlukan berupa efek resultan secara keseluruhan. Gaya resultan dalam arah yang sama dengan kecepatan hulu disebut sebagai drag (gaya seret),  $\mathcal{D}$ , dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai lift (gaya angkat),  $\mathcal{L}$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.3c. Untuk beberapa benda tiga-dimensi, mungkin juga terdapat sebuah gaya samping yang tegak lurus terhadap bidang yang memuat  $\mathcal{D}$  dan  $\mathcal{L}$ .

Resultan dari tegangan geser dan distribusi tekanan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan pengaruh-pengaruh dari kedua besaran ini pada permukaan benda seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.4. Komponen  $x$  dan  $y$  dari gaya fluida pada elemen luas kecil sebesar  $dA$  adalah

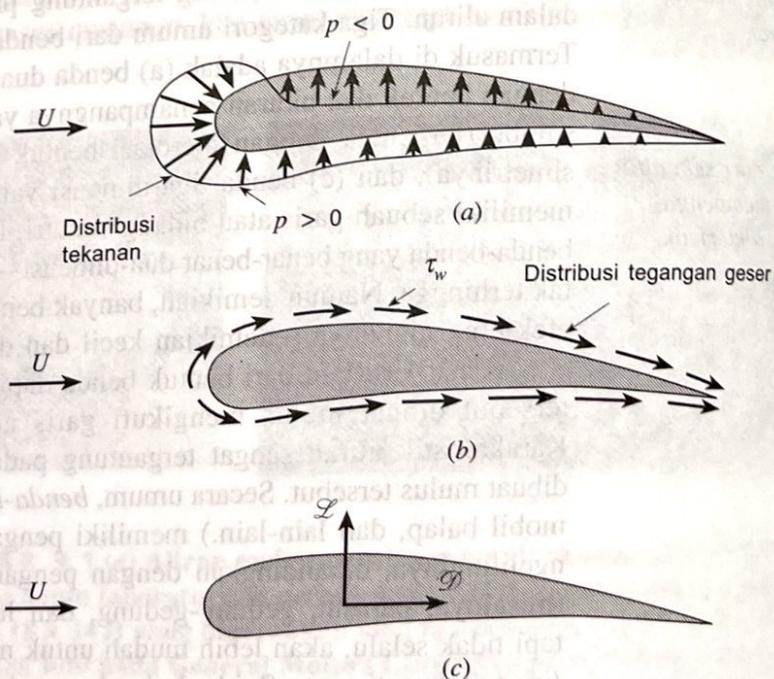
$$dF_x = (p \, dA) \cos \theta + (\tau_w \, dA) \sin \theta$$

dan

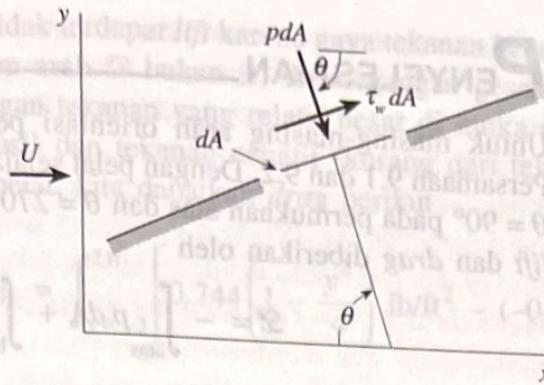
$$dF_y = -(p \, dA) \sin \theta + (\tau_w \, dA) \cos \theta$$

Jadi, komponen  $x$  dan  $y$  netto dari gaya pada benda adalah

Sebuah benda berinteraksi dengan fluida sekelilingnya melalui tekanan dan tegangan geser.



■ GAMBAR 9.3 Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: (a) gaya tekanan, (b) gaya viskos, (c) gaya resultan (lift dan drag).



■ GAMBAR 9.4 Gaya tekanan dan gaya geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan sebuah benda.

$$\mathcal{D} = \int dF_x = \int p \cos \theta \, dA + \int \tau_w \sin \theta \, dA \quad (9.1)$$

dan

$$\mathcal{L} = \int dF_y = - \int p \sin \theta \, dA + \int \tau_w \cos \theta \, dA \quad (9.2)$$

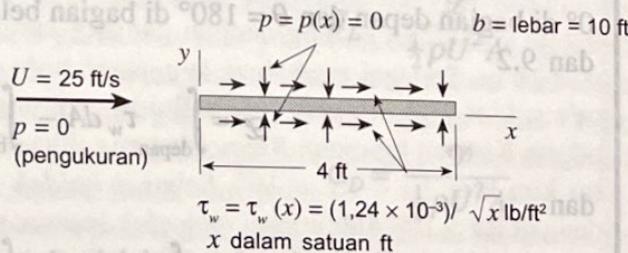
Lift dan drag pada suatu bagian benda tergantung pada orientasi dari permukaan.

Tentu saja untuk melakukan pengintegralan dan menentukan lift dan drag, kita harus mengetahui bentuk benda (yaitu,  $\theta$  sebagai suatu fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi dari  $\tau_w$  dan  $p$  di sepanjang permukaan. Distribusi-distribusi ini seringkali sangat sulit didapatkan, baik secara eksperimental maupun secara teoretis. Distribusi tekanan dapat diperoleh secara eksperimental tanpa banyak kesulitan dengan menggunakan serangkaian tap tekanan statik sepanjang permukaan benda. Di sisi lain, biasanya sangat sulit untuk mengukur distribusi tegangan geser dinding.

Kelihatannya baik tegangan geser maupun tekanan sama-sama memberikan kontribusi terhadap lift dan drag, karena untuk sembarang benda  $\theta$  tidak nol ataupun  $90^\circ$  pada benda. Pengecualian adalah untuk pelat datar yang diatur baik sejajar terhadap aliran hulu ( $\theta = 90^\circ$ ) atau tegak lurus terhadap aliran hulu ( $\theta = 0$ ) seperti yang dibahas dalam Contoh 9.1.

## CONTOH 9.1

Udara pada kondisi standar mengalir melewati sebuah pelat datar seperti yang ditunjukkan dalam Gambar C9.1. Pada kasus (a) pelat sejajar dengan aliran hulu, dan (b) pelat tegak lurus aliran hulu. Jika distribusi tekanan dan tegangan geser pada permukaan benda seperti yang ditunjukkan (diperoleh baik dengan eksperimen atau secara teori), tentukan lift dan drag pada pelat.



■ GAMBAR C9.1

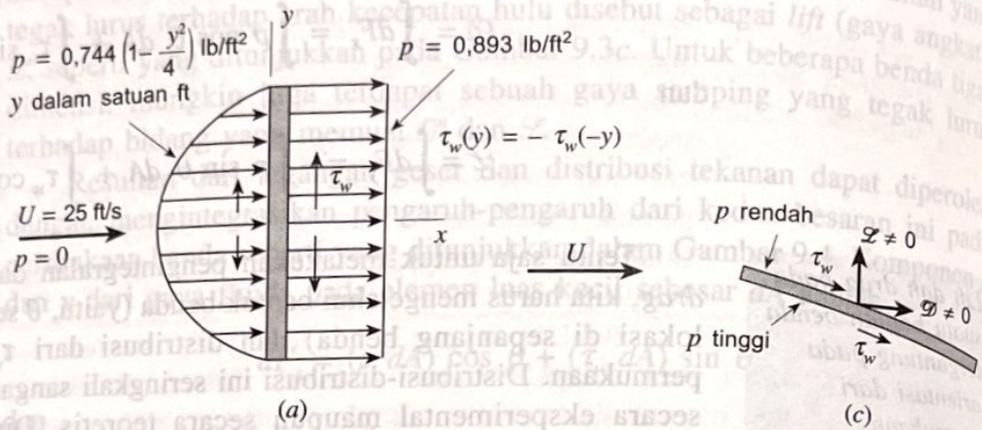
# PENYELESAIAN

Untuk masing-masing arah orientasi pelat, *lift* dan *drag* diperoleh dari Persamaan 9.1 dan 9.2. Dengan pelat sejajar terhadap arus hulu, kita dapatkan  $\theta = 90^\circ$  pada permukaan atas dan  $\theta = 270^\circ$  pada permukaan bawah sehingga *lift* dan *drag* diberikan oleh

$$\mathcal{L} = - \int_{\text{atas}} p \, dA + \int_{\text{bawah}} p \, dA = 0$$

dan

$$\mathcal{D} = \int_{\text{atas}} \tau_w \, dA + \int_{\text{bawah}} \tau_w \, dA = 2 \int_{\text{atas}} \tau_w \, dA \quad (1)$$



■ GAMBAR C9.1 (lanjutan)

di mana kita telah menggunakan fakta bahwa karena kesimetrisan, distribusi tegangan geser sama pada permukaan atas dan permukaan bawah, demikian juga tekanannya [baik jika kita gunakan tekanan pengukuran ( $p = 0$ ) atau tekanan mutlak ( $p = p_{atm}$ )]. Tidak terdapat *lift* yang dihasilkan—pelat tersebut tidak naik atau turun. Dengan distribusi tegangan geser yang diberikan, Persamaan 1 menjadi

$$\mathcal{D} = 2 \int_{x=0}^{4 \text{ ft}} \left( \frac{1,24 \times 10^{-3}}{x^{1/2}} \text{ lb/ft}^2 \right) (10 \text{ ft}) \, dx$$

atau

$$\mathcal{D} = 0,0992 \text{ lb} \quad (\text{Jawaban})$$

Dengan pelat yang tegak lurus terhadap aliran hulu, kita dapatkan  $\theta = 0^\circ$  di bagian depan dan  $\theta = 180^\circ$  di bagian belakang. Jadi dari Persamaan 9.1 dan 9.2

$$\mathcal{L} = \int_{\text{depan}} \tau_w \, dA - \int_{\text{belakang}} \tau_w \, dA = 0$$

dan

$$\mathcal{D} = \int_{\text{depan}} p \, dA - \int_{\text{belakang}} p \, dA$$

Lagi-lagi tidak terdapat *lift* karena gaya tekanan bekerja sejajar dengan aliran hulu (dalam arah  $\mathcal{D}$  bukan  $\mathcal{L}$ ) dan tegangan geser simetris terhadap pusat titik stagnasi) dan tekanan negatif (kurang dari tekanan hulu) pada bagian belakang pelat, kita dapatkan *drag* berikut

$$\mathcal{D} = \int_{y=-2}^{2} \left[ 0,744 \left( 1 - \frac{y^2}{4} \right) \text{ lb/ft}^2 - (-0,893) \text{ lb/ft}^2 \right] (10 \text{ ft}) dy$$

atau

$$\mathcal{D} = 55,6 \text{ lb}$$

(Jawaban)

Jelas bahwa terdapat dua mekanisme yang bertanggung jawab terhadap *drag*. Untuk benda yang sangat *streamlined* (pelat datar dengan ketebalan nol sejajar dengan aliran) *drag* seluruhnya disebabkan oleh gaya geser pada permukaan, dan dalam contoh ini, relatif kecil. Untuk benda yang sangat tumpul (sebuah pelat datar yang tegak lurus terhadap aliran hulu), *drag* seluruhnya disebabkan oleh perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang dari benda, dan dalam contoh ini, relatif besar.

Jika pelat datar tersebut diarahkan pada suatu sudut sembarang relatif terhadap aliran hulu seperti yang ditunjukkan pada Gambar C9.1c, akan terdapat *lift* dan *drag*, yang masing-masingnya akan tergantung pada tegangan geser dan tekanan. Distribusi tekanan dan tegangan geser sama-sama akan berbeda untuk permukaan atas dan bawah.

Meskipun Persamaan 9.1 dan 9.2 berlaku untuk benda apapun, kesulitan dalam pemakaiannya terletak pada bagaimana mendapatkan distribusi tegangan geser dan tekanan yang sesuai pada permukaan benda. Banyak sekali upaya telah dilakukan dalam menentukan besaran-besaran ini, tetapi karena berbagai kerumitan yang terlibat, informasi mengenai hal tersebut hanya tersedia untuk beberapa situasi sederhana.

Tanpa informasi terperinci yang berkaitan dengan distribusi tegangan geser dan tekanan pada sebuah benda, Persamaan 9.1 dan 9.2 tidak dapat digunakan. Alternatif yang banyak digunakan adalah dengan mendefinisikan koefisien *lift* dan *drag* yang tak berdimensi dan menentukan nilai-nilai perkiraannya dengan cara-cara baik menggunakan analisis yang disederhanakan, atau dengan beberapa teknik numerik, atau eksperimen yang sesuai. Koefisien *lift*,  $C_L$ , dan koefisien *drag*,  $C_D$ , didefinisikan sebagai:

$$C_L = \frac{\mathcal{L}}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$$

dan

$$C_D = \frac{\mathcal{D}}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$$

di mana  $A$  adalah luas karakteristik dari benda (lihat Bab 7). Biasanya,  $A$  ditetapkan sebagai *luas frontal*—luas proyeksi yang dilihat oleh orang yang

Koefisien lift dan koefisien drag adalah bentuk-bentuk tak berdimensi dari lift dan drag.

memandang benda dari suatu arah yang sejajar dengan kecepatan hulu,  $U$ . Luas itu adalah luas bayangan dari benda yang diproyeksikan pada sebuah layar yang tegak lurus dengan kecepatan hulu yang dibentuk dengan sebuah cahaya yang bersinar sepanjang aliran hulu. Dalam situasi lainnya  $A$  ditetapkan sebagai *luas planform*—luas proyeksi yang dilihat oleh seorang pengamat yang memandang benda dari sebuah arah tegak lurus terhadap kecepatan hulu (yaitu "dari atas" benda tersebut). Jelas, luas karakteristik yang digunakan dalam definisi dari koefisien-koefisien *lift* dan *drag* harus dinyatakan dengan jelas.

### 9.1.2 Karakteristik Aliran Melewati Sebuah Benda

Aliran-aliran luar yang melewati benda-benda meliputi berbagai variasi fenomena mekanika fluida yang sangat beragam. Jelas bahwa karakter dari medan aliran adalah sebuah fungsi dari bentuk benda. Aliran-aliran yang melewati bentuk-bentuk geometri yang relatif sederhana (misalnya bola atau silinder bundar) diperkirakan memiliki medan-medan aliran yang lebih sederhana dibandingkan aliran yang melewati sebuah bentuk yang lebih seperti sebuah pesawat terbang atau sebuah pohon. Meskipun demikian, bahkan benda yang bentuknya paling sederhana sekalipun menghasilkan aliran-aliran yang agak kompleks.

Untuk benda-benda dengan bentuk yang diberikan, karakteristik alirannya sangat tergantung pada berbagai parameter seperti ukuran, orientasi, kecepatan dan sifat fluida. Seperti yang didiskusikan dalam **Bab 7**, menurut argumen analisis dimensional, karakter aliran akan tergantung pada berbagai parameter tak berdimensi yang terlibat. Untuk aliran luar yang biasa, yang paling penting dari parameter-parameter ini adalah bilangan Reynolds,  $Re = \rho U \ell / \mu = U \ell / \nu$ , bilangan Mach,  $Ma = U/c$  dan untuk aliran-aliran dengan sebuah permukaan bebas (yaitu aliran-aliran dengan suatu antar-muka antara dua fluida, seperti aliran yang melewati permukaan sebuah kapal), dipakai bilangan Froude,  $Fr = U/(\sqrt{g\ell})$ . (Ingat kembali bahwa  $\ell$  adalah suatu panjang karakteristik dari benda dan  $c$  adalah kecepatan suara.)

Untuk saat ini, kita meninjau bagaimana aliran luar dan *lift* serta *drag* yang berkaitan bervariasi sebagai sebuah fungsi dari bilangan Reynolds. Ingat kembali bahwa bilangan Reynolds menyatakan perbandingan dari efek inersia terhadap efek viskos. Tanpa adanya seluruh efek viskos ( $\mu = 0$ ), bilangan Reynolds menjadi tak terhingga. Sebaliknya, dengan tidak adanya efek inersia (massa diabaikan atau  $\rho = 0$ ), bilangan Reynolds adalah nol. Jelas, aliran yang aktual akan memiliki bilangan Reynolds antara (tetapi tidak termasuk) dua nilai ekstrim ini. Sifat alamiah dari aliran yang melewati sebuah benda sangat tergantung apakah  $Re \gg 1$  atau  $Re \ll 1$ .

Kebanyakan aliran luar yang biasa kita hadapi berkaitan dengan benda-benda berukuran sedang dengan panjang karakteristik dalam orde  $0,01 \text{ m} < \ell < 10 \text{ m}$ . Sebagai tambahan, kecepatan hulu yang biasa dalam kisaran  $0,01 \text{ m/s} < U < 100 \text{ m/s}$  dan fluida-fluida yang terlibat biasanya adalah air atau udara. Kisaran bilangan Reynolds yang dihasilkan untuk aliran-aliran seperti itu kira-kira  $10 < Re < 10^9$ . Sebagai *kaidah umum (rule of thumb)*, aliran dengan  $Re > 100$  didominasi oleh efek inersia, sedangkan aliran-aliran dengan  $Re < 1$  didominasi oleh efek viskos. Jadi, kebanyakan aliran-aliran luar yang biasa kita hadapi didominasi oleh inersia.

Karakter dari aliran melewati benda tergantung dari nilai bilangan Reynolds-nya.

Sebaliknya, banyak aliran luar yang bilangan Reynoldnya sangat kurang dari 1, yang menunjukkan bahwa gaya-gaya viskos lebih penting dari gaya-gaya inersia. Penumpukan secara perlahan-lahan dari partikel-partikel kotoran di danau atau arus sungai diatur oleh prinsip-prinsip aliran berbilangan Reynolds rendah karena diameter partikel yang kecil dan kecepatannya yang rendah. Sama halnya, bilangan Reynolds adalah kecil karena  $\mu$  besar untuk benda-benda yang bergerak melalui minyak berviskositas besar. Perbedaan umum antara aliran dengan bilangan Reynolds kecil dan besar yang mengalir melewati benda yang *streamlined* dan tumpul dapat diilustrasikan dengan meninjau aliran yang melewati dua benda—yang satu adalah pelat datar sejajar dengan kecepatan hulu dan yang lain adalah silinder bundar.

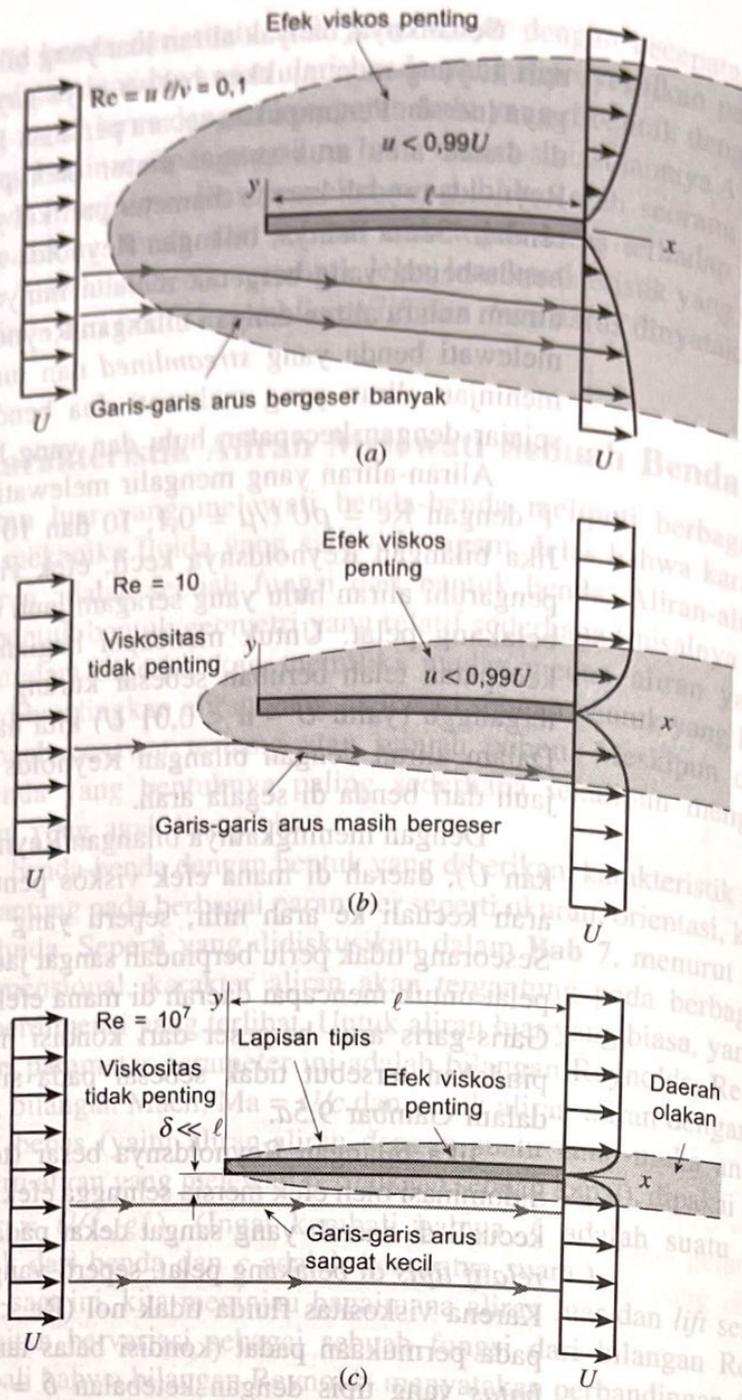
Aliran-aliran yang mengalir melewati tiga pelat datar yang panjangnya  $\ell$  dengan  $Re = \rho U \ell / \mu = 0,1, 10$  dan  $10^7$  ditunjukkan dalam Gambar 9.5. Jika bilangan Reynoldnya kecil, efek viskos relatif kuat dan pelat mempengaruhi aliran hulu yang seragam jauh di depan, di atas, di bawah dan di belakang pelat. Untuk mencapai bagian medan aliran tersebut di mana kecepatan telah berubah sebesar kurang dari 1% dari nilainya yang tidak terganggu (yaitu  $U - u < 0,01 U$ ) kita harus berada relatif jauh dari pelat. Dalam aliran dengan bilangan Reynolds rendah, efek viskos dapat terasa jauh dari benda di segala arah.

Dengan meningkatnya bilangan Reynolds (misalnya dengan meningkatkan  $U$ ), daerah di mana efek viskos penting menjadi lebih kecil di segala arah kecuali ke arah hilir, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.5b. Seseorang tidak perlu berpindah sangat jauh ke depan, ke atas atau ke bawah pelat untuk mencapai daerah di mana efek viskos dari pelat tidak terasakan. Garis-garis arus bergeser dari kondisi hulunya yang seragam, tetapi perpindahan tersebut tidak sebesar pada situasi  $Re = 0,1$  yang ditunjukkan dalam Gambar 9.5a.

Jika bilangan Reynoldnya besar (tetapi bukan tak terhingga), aliran didominasi oleh efek inersia sehingga efek viskos dapat diabaikan di manapun kecuali di daerah yang sangat dekat pada pelat dan di daerah *olakan yang relatif tipis* di belakang pelat, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.5c. Karena viskositas fluida tidak nol ( $Re < \infty$ ), maka fluida harus menempel pada permukaan padat (kondisi batas tanpa slip). Terdapat sebuah *lapisan batas* yang tipis dengan ketebalan  $\delta = \delta(x) \ll \ell$  (yaitu relatif tipis dibandingkan dengan panjang pelat) di dekat pelat di mana kecepatan fluida berubah dari nilai hulunya  $u = U$  menjadi nol pada pelat. Ketebalan lapisan ini meningkat dalam arah aliran, mulai dari nol pada ujung muka atau ujung depan pelat. Aliran dalam lapisan batas mungkin laminar atau turbulen, tergantung pada berbagai parameter yang terlibat.

Garis-garis arus aliran di luar lapisan batas hampir sejajar dengan pelat. Seperti yang akan kita lihat pada subbab berikutnya, sedikit perpindahan dari garis-garis arus luar yang berada di luar lapisan batas disebabkan oleh menebalnya lapisan batas dalam arah aliran. Keberadaan pelat memberikan sedikit efek pada garis arus di luar lapisan batas—baik di depan, di atas atau di bawah pelat. Sebaliknya daerah olakan disebabkan seluruhnya oleh interaksi viskos antara fluida dan pelat.

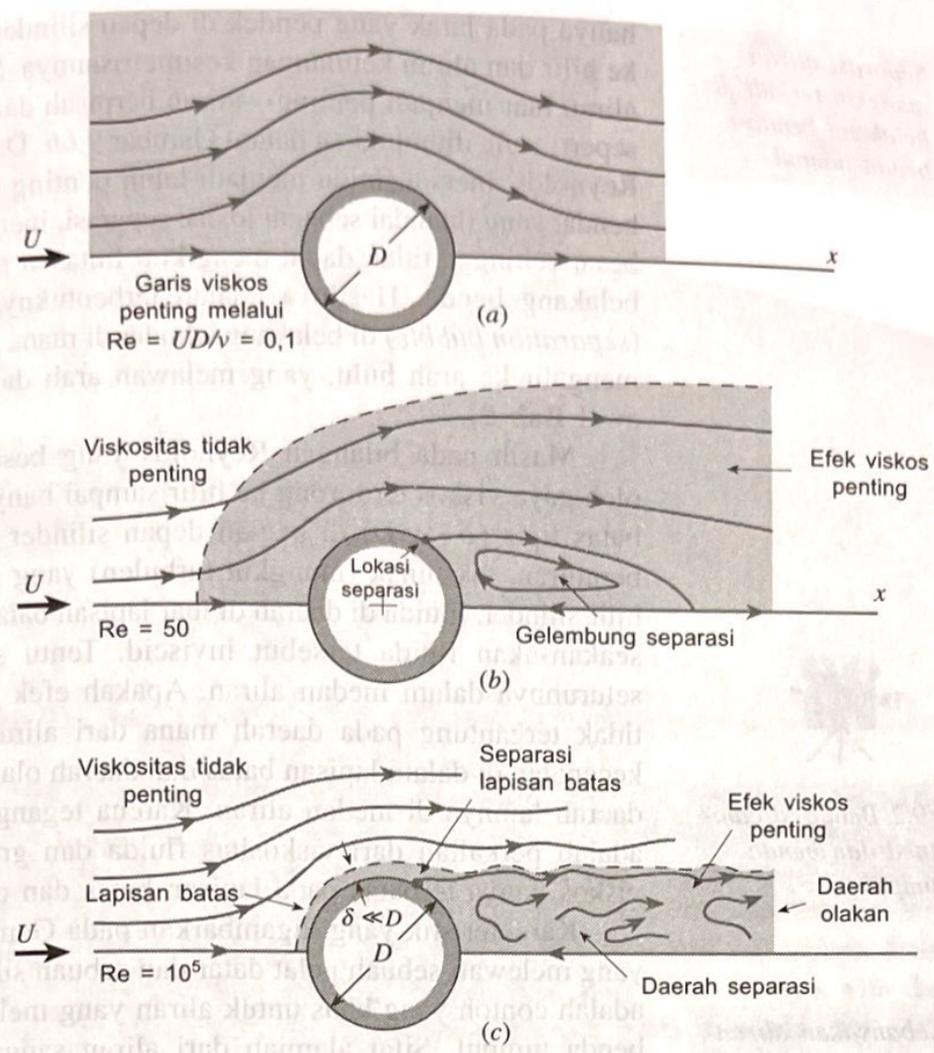
Sebuah pencapaian yang hebat dalam mekanika fluida terjadi pada tahun 1904 sebagai hasil dari pemikiran **Ludwig Prandtl** (1875 - 1953), seorang fisikawan dan ahli aerodinamika Jerman. Dia memiliki gagasan mengenai



■ GAMBAR 9.5 Karakter aliran viskos, tunak melewati sebuah pelat datar sejajar terhadap kecepatan hulu: (a) aliran dengan bilangan Reynolds rendah, (b) aliran dengan bilangan Reynolds sedang, (c) aliran dengan bilangan Reynolds besar.

Lapisan batas yang tipis dapat berkembang di dalam aliran dengan bilangan Reynolds besar.

lapisan batas—sebuah daerah tipis di permukaan suatu benda di mana efek viskos sangat penting dan di luarnya fluida berperilaku seakan-akan inviscid. Jelas bahwa viskositas fluida aktual adalah sama seluruhnya; hanya saja arti penting relatif dari efek viskos (karena gradien kecepatan) berbeda di dalam atau di luar lapisan batas ini. Seperti yang dibahas dalam subbab berikut, dengan menggunakan hipotesis seperti itu, dimungkinkan untuk menyederhanakan analisis dari aliran dengan bilangan Reynolds yang besar, sehingga kita dapat menyelesaikan persoalan aliran luar yang jika tidak demikian masih tidak terpecahkan.



■ GAMBAR 9.6 Karakter aliran tunak viskos melewati sebuah silinder bundar: (a) aliran dengan bilangan Reynolds rendah, (b) aliran dengan bilangan Reynolds sedang, (c) aliran dengan bilangan Reynolds besar.

Seperti pada aliran yang melewati pelat datar yang digambarkan di atas, aliran melewati sebuah benda yang tumpul (seperti silinder bundar) juga bervariasi sesuai bilangan Reynolds. Secara umum, semakin besar bilangan Reynoldnya, semakin kecil daerah di dalam medan aliran di mana efek viskos menjadi penting. Namun demikian untuk benda-benda yang tidak cukup *streamlined*, karakteristik tambahan dari aliran dapat terlihat. Hal ini disebut sebagai *separasi aliran* dan diilustrasikan dalam Gambar 9.6.

Aliran dengan bilangan Reynolds rendah ( $Re = UD/v < 1$ ) yang melewati silinder bundar dicirikan oleh kenyataan bahwa adanya silinder dan efek viskos yang menyertainya dapat dirasakan pada bagian relatif besar dari medan aliran. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.6a, untuk  $Re = UD/v = 0,1$ , efek viskos penting dalam beberapa diameter pada segala arah dari silinder. Suatu karakteristik yang mengejutkan dari aliran ini adalah bahwa garis-garis arus pada dasarnya simetris terhadap pusat silinder—pola garis arus sama di depan dan di belakang silinder.

Dengan bilangan Reynolds yang meningkat, daerah di depan silinder di mana efek viskos penting menjadi lebih kecil, dengan daerah viskos berada

Separasi aliran mungkin terjadi di belakang benda-benda tumpul.

hanya pada jarak yang pendek di depan silinder. Efek viskos dikonveksikan ke hilir dan aliran kehilangan kesimetrisannya. Sebuah karakteristik lain dari aliran luar menjadi penting—aliran berpisah dari benda pada lokasi lain dari seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.6*b*. Dengan meningkatnya bilangan Reynolds, inersia fluida menjadi lebih penting dan di beberapa tempat pada benda, yang ditandai sebagai lokasi separasi, inersia fluida tersebut sedemikian besar sehingga tidak dapat mengikuti lintasan melengkung di sekitar bagian belakang benda. Hasilnya adalah terbentuknya suatu gelembung separasi (*separation bubble*) di belakang silinder di mana sebagian fluida sesungguhnya mengalir ke arah hulu, yang melawan arah dari aliran hulu. (Lihat foto di awal Bab 9).



V9.2 Benda stream-lined dan benda tumpul.

Kebanyakan aliran yang biasa kita hadapi melibatkan bilangan Reynolds besar.

Masih pada bilangan Reynolds yang besar, daerah yang dipengaruhi oleh gaya viskos terdorong ke hilir sampai hanya melibatkan sebuah lapisan batas tipis ( $\delta \ll D$ ) di bagian depan silinder dan daerah olakan yang tak beraturan, tak tunak (mungkin turbulen) yang membentang sampai jauh ke hilir silinder. Fluida di daerah di luar lapisan batas dan daerah olakan mengalir seakan-akan fluida tersebut inviscid. Tentu saja, viskositas fluida mengalir seluruhnya dalam medan aliran. Apakah efek viskos tersebut penting atau tidak tergantung pada daerah mana dari aliran yang kita tinjau. Gradien kecepatan di dalam lapisan batas dan daerah olakan jauh lebih besar daripada daerah lainnya di medan aliran. Karena tegangan geser (yaitu efek viskos) adalah perkalian dari viskositas fluida dan gradien kecepatan, maka efek viskos hanya terbatas pada lapisan batas dan daerah olakan.

Karakteristik yang digambarkan pada Gambar 9.5 dan 9.6 untuk aliran yang melewati sebuah pelat datar dan sebuah silinder bundar masing-masing adalah contoh yang khas untuk aliran yang melewati benda *streamlined* dan benda tumpul. Sifat alamiah dari aliran sangat tergantung pada bilangan Reynolds. (Lihat Referensi 31 untuk berbagai contoh yang mengilustrasikan perilaku ini.) Kebanyakan aliran yang biasa kita hadapi menyerupai aliran-aliran berbilangan Reynolds besar seperti yang digambarkan dalam Gambar 9.5*c* dan 9.6*c*, dibandingkan dengan situasi aliran dengan bilangan Reynolds kecil. (Lihat foto di awal Bab 7 dan 11.) Pada bagian selanjutnya dari bab ini kita akan mengkaji lebih mendalam lagi gagasan-gagasan ini dan menentukan cara menghitung gaya-gaya pada benda terendam.

## CONTOH 9.2

Kita ingin menentukan berbagai karakteristik dari aliran melewati sebuah mobil. Pengujian-pengujian berikut dapat dilakukan: (a)  $U = 20$  mm/s, aliran gliserin melewati sebuah model dengan skala yang berukuran tinggi 34 mm, panjang 100 mm dan lebar 40 mm, (b)  $U = 20$  mm/s, udara mengalir melewati model tersebut atau (c)  $U = 25$  m/s udara mengalir melewati mobil yang sesungguhnya, yang tingginya 1,7 m, panjang 5 m dan lebarnya 2 m. Akankah karakteristik aliran untuk ketiga situasi ini serupa? Jelaskan.

## PENYELESAIAN

Karakteristik aliran melewati sebuah benda tergantung pada bilangan Reynolds. Dalam hal ini, kita dapat mengambil panjang karakteristik sebagai tinggi,  $h$ , lebar,  $w$ , atau panjang,  $\ell$ , dari mobil untuk mendapatkan tiga bilangan

Reynolds yang mungkin,  $Re_h = Uh/\nu$ ,  $Re_b = Ub/\nu$ , dan  $Re_\ell = U\ell/\nu$ . Bilangan-bilangan ini akan berbeda karena tiga nilai yang berbeda dari  $h$ ,  $b$ , dan  $\ell$ . Sekali kita menetapkan secara sembarang panjang yang kita akan gunakan sebagai panjang karakteristik, kita harus tetap memakai nilai tersebut untuk seluruh perhitungan ketika menggunakan perbandingan antara model dan prototipe.

Dengan nilai dari viskositas kinematika untuk udara dan gliserin yang diperoleh dari Tabel 1.8 dan 1.6 sebesar  $\nu_{\text{udara}} = 1,46 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  dan  $\nu_{\text{gliserin}} = 1,19 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , kita mendapatkan bilangan-bilangan Reynolds berikut untuk aliran yang digambarkan.

Bilangan Reynolds	(a) Model dalam Gliserin	(b) Model dalam Udara	(c) Mobil dalam Udara
$Re_h$	0,571	46,6	$2,91 \times 10^6$
$Re_b$	0,672	54,8	$3,42 \times 10^6$
$Re_\ell$	1,68	137,0	$8,56 \times 10^6$

Jelas, bilangan Reynolds untuk ketiga aliran ini sangat berbeda (tidak tergantung pada panjang karakteristik apa yang dipilih). Berdasarkan pembahasan sebelumnya yang berkaitan dengan aliran melewati pelat datar atau aliran melewati silinder bundar, kita dapat memperkirakan bahwa aliran melewati mobil aktual akan berperilaku dalam beberapa hal serupa dengan aliran yang ditunjukkan dalam Gambar 9.5c atau 9.6c. Artinya, kita dapat memperkirakan suatu tipe karakteristik lapisan batas di mana efek viskos akan terbatas di dalam lapisan yang relatif tipis di dekat permukaan mobil dan daerah olakan di belakangnya. Apakah mobil tersebut akan berperilaku lebih menyerupai sebuah pelat datar atau sebuah silinder akan tergantung pada jumlah bagian yang dibentuk streamline pada rancangan mobil tersebut.

Karena bilangan Reynolds yang terlibat kecil, aliran melewati model mobil di gliserin akan didominasi oleh efek viskos, yang dalam beberapa hal menyerupai aliran yang digambarkan dalam Gambar 9.5a atau 9.6a. Demikian pula, dengan bilangan Reynolds sedang pada aliran udara melewati model, karakteristik aliran yang serupa dengan yang ditunjukkan dalam Gambar 9.5b dan 9.6b dapat diperkirakan. Efek viskos akan penting —tidak sepenting pada aliran gliserin, tetapi lebih penting dibandingkan dengan mobil berukuran penuh.

Bukanlah suatu keputusan yang bijaksana untuk memperkirakan bahwa aliran yang melewati mobil berukuran penuh akan serupa dengan aliran yang melewati salah satu model. Kesimpulan yang sama akan dihasilkan tanpa tergantung dari apakah kita menggunakan  $Re_h$ ,  $Re_b$ , atau  $Re_\ell$ . Seperti ditunjukkan dalam Bab 7, aliran yang melewati model mobil dan prototipe ukuran penuh tidak akan sama kecuali jika bilangan Reynolds untuk model dan prototipe sama. Bukanlah suatu hal yang mudah dilakukan untuk memastikan kondisi ini. Satu solusi (mahal) adalah dengan menguji prototipe skala penuh di dalam sebuah terowongan angin yang sangat besar (lihat Gambar 9.1)