



**LAPORAN
PROJEK TAHUN AKHIR**

**ANALISIS KITARAN MELALUI KERAJANG AIRFOIL
NACA (LAPISAN SEMPADAN) DAN KAWASAN PUSARAN**

Oleh:

Affandy Bin Md. Ali

**Disertasi ini dikemukakan kepada
UNIVERSITI SAINS MALAYSIA**

**Sebagai memenuhi sebahagian daripada syarat keperluan
untuk ijazah dengan kepujian**

SARJANA MUDA KEJURUTERAAN (KEJURUTERAAN MEKANIK)

**Pusat Pengajian Kejuruteraan Mekanik
Universiti Sains Malaysia**

Jan 2000

PENGHARGAAN

Bersyukur ke hadrat Allah S.W.T kerana dengan limpah kurnia Nya dapat saya menyiapkan disertasi Projek Tahun Akhir ini. Saya ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada semua orang yang telah memberikan kerjasama mereka di dalam sebarang pertolongan yang saya perlukan dengan tujuan untuk menyiapkan projek saya ini. Jutaan terima kasih saya ucapkan kepada mereka yang berikut:

- ☞ Prof. Madya Zoeb Husain kerana kesediaan beliau untuk menerima saya untuk mengambil projek ini. Kesabaran beliau di dalam memberi nasihat dan tunjuk ajar kepada saya dengan pengalamannya, adalah faktor utama yang memberikan semangat untuk saya belajar dan gigih untuk menyiapkan laporan ini dengan jayanya.
- ☞ Dr. Mohd Zulkifly Abdullah sebagai pemeriksa kedua saya yang telah memberikan nasihat dan bantuan untuk saya lebih memahami di dalam kerja-kerja eksperimen.
- ☞ Cik Azuraien Japper, pelajar Ph.D kerana kesediaannya untuk membantu saya semasa dalam keadaan keliru dan telah memberikan semangat kepada saya untuk menyiapkan laporan ini.
- ☞ Encik Said Saidin sebagai juruteknik yang telah memberikan kemudahan dari segi peralatan dan mengajar saya bagaimana untuk menggunakan Terowong Angin.

Akhir sekali, saya amat bersukacita kerana sahabat-sahabat saya telah membantu sepanjang tempoh sebelum laporan ini siap sama ada semasa saya dalam kesusahan dan ataupun dalam keadaan dukacita.

KANDUNGAN

PENGHARGAAN		i	
KANDUNGAN		ii	
ABSTRAK		iii	
ABSTRACT		iv	
OBJEKTIF		v	
BAB 1	:	KERAJANG UDARA	1
1.1		Pengenalan	
1.2		Kitaran Udara	
1.3		Kes Tekanan	
1.4		Penerbangan Terbalik, Lengkungan dan Aifoil Simetri	
1.5		Sayap Nipis	
1.6		Sudut Tuju dan Keadaan Puncak	
1.7		Maklumat Airfoil	
BAB 2	:	AERODINAMIK	16
2.1		Pengenalan	
2.2		Daya-daya Aerodinamik	
2.3		Kesan Bentuk Kepada Daya Angkat	
2.4		Aplikasi Teorem Bernoulli	
2.5		Perkara-perkara Aerodinamik	
2.6		Daya Angkat	

- 2.7 Daya Seretan
- 2.8 Kandungan Gas
- 2.9 Konsep Daya Angkat dan Daya Seretan

BAB 3 : LAPISAN SEMPADAN 31

- 3.1 Pengenalan
- 3.2 Lapisan Sempadan di Permukaan Plat Rata
- 3.3 Ketebalan Lapisan Sempadan
- 3.4 Lapisan Sempadan Pada Keadaan Laminar
- 3.5 Lapisan Sempadan Pada Keadaan Bergelora
- 3.6 Kecerunan Tekanan Pada Lapisan Sempadan
- 3.7 Kitaran Pada Permukaan Melengkung

BAB 4 : TEROWONG ANGIN 46

- 4.1 Pengenalan
- 4.2 Terowong Angin Kitaran Terbuka
 - 4.2.1 Kawasan Masukan
 - 4.2.2 Kawasan Pengecutan
 - 4.2.3 Kawasan Ujian
 - 4.2.4 Kawasan Pengembangan
 - 4.2.5 Kipas
- 4.3 Cara Operasi Terowong Angin
- 4.4 Alatan yang digunakan

4.5 Pengiraan Halaju

BAB 5 : EKSPERIMEN 1 54

5.1 Pengenalan

5.2 Eksperimen Yang Dijalankan

5.3 Pengiraan

5.4 Keputusan Eksperimen

5.5 Graf

5.6 Perbandingan Diantara Ketebalan Lapisan Sempadan Teori dan Eksperimen

BAB 6 : EKSPERIMEN 2 67

6.1 Pengenalan

6.2 Eksperimen Yang Dijalankan

6.3 Graf

KESIMPULAN

RUJUKAN

ABSTRAK

Eksperimen ini adalah berdasarkan kepada tajuk; “Analisis kitaran melalui kerajang airfoil NACA(lapisan sempadan) dan kawasan pusaran”. Kecenderungan adalah untuk mencari perkembangan lapisan sempadan pada kerajang airfoil NACA dan melihat perbezaannya diantara satu sama lain.

Untuk melihat perbezaan tersebut, empat kerajang airfoil NACA, iaitu NACA 0015, 4412, 23012 dan 653218 diuji. Perkembangan lapisan sempadan diambil pada beberapa titik di permukaan airfoil tersebut.

Di kawasan pusaran, cuma NACA 23012 dipilih. Minat kita adalah untuk mencari profil ataupun bentuk kitaran di kawasan tersebut. Ujian dilakukan daripada bucu belakang NACA 23012 ke suatu jarak darinya.

ABSTRACT

This experiment is according to the title; “Flow analysis over selected NACA airfoils (boundary layer) and wake region. It interested to find boundary layer growth on some NACA airfoils and see the differences with each other.

To find the different, four NACA airfoils, namely NACA 0015, 4412, 23012 and 653218 were being tested. Boundary layer growth was taken at some points at the surface of airfoil.

At the wake region, only NACA 23012 was chosen. We are interested to know the profile of flow at the wake region. Tests was done from trailing edge of NACA 23012 to some distance of it.

OBJEKTIF

- ☞ Menentukan jumlah tekanan dan kecerunan halaju di lapisan sempadan pada permukaan atas kerajang NACA airfoil terpilih.
- ☞ Untuk mencari perkembangan lapisan sempadan pada setiap kerajang airfoil.
- ☞ Perbandingan antara ketebalan lapisan sempadan pada keadaan laminar dan gelora dengan eksperimen.
- ☞ Menentukan jumlah tekanan dan kecerunan halaju pada kawasan bergelora di belakang kerajang airfoil NACA 23012.
- ☞ Untuk melukis profil halaju pada kawasan pusaran dengan ujian dilakukan di terowong angin menggunakan alat Cobra.

1. Airfoil

1.1 Pengenalan

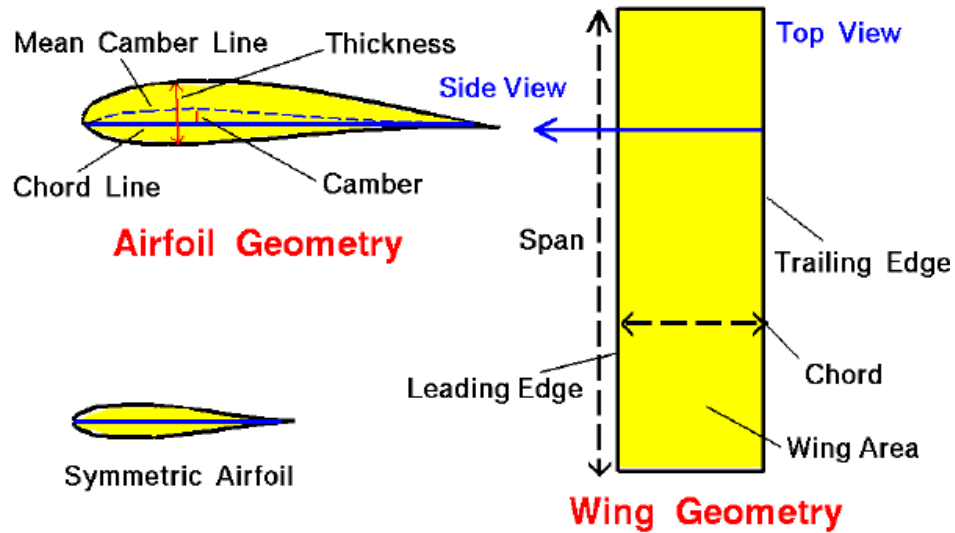
Aliran udara yang melalui suatu jasad dipanggil aliran luaran. Kajian tentang aliran luaran adalah amat penting bagi seorang jurutera aeroangkasa di dalam analisa tentang aliran pada pelbagai komponen kapalterbang, contohnya pada kerajang airfoil. Kebanyakan dari maklumat tentang aliran luaran datangnya dari eksperimen yang dijalankan pada kebanyakan bahagian, pada model berskala dari bentuk asal pada terowong angin. Kadang-kadang, asap digunakan untuk melihat aliran yang ada dengan jelas.

Aliran luaran boleh dibahagikan kepada tiga kategori utama iaitu:

- (a) Aliran tak boleh mampat yang melibatkan objek-objek tertentu seperti automobil, helikopter, bangunan dan bilah turbin.
- (b) Aliran bagi cecair, yang melibatkan permukaan bebas seperti kapal ataupun jambatan.
- (c) Aliran boleh mampat yang melibatkan objek pada kelajuan yang tinggi dengan kelajuan melebihi 100m/s seperti kapalterbang, peluru berpandu dan lain-lain.

Maka, dalam projek ini, aliran luaran dipilih dalam kategori aliran tak boleh mampat yang melibatkan kerajang airfoil NACA, untuk mencari lapisan sempadan dan kawasan pusaran. Aliran tak mampat dibahagikan kepada dua kategori: aliran pada objek tumpul dan aliran pada objek pipih. Aliran pada objek pipih ini hanya akan dibincangkan. Contoh bagi objek pipih adalah kerajang airfoil. Sebarang bahagian pada sayap kapalterbang yang dipotong secara selari pada badan kapalterbang dipanggil kerajang airfoil. Kesenian pada aliran sesuatu jasad ialah pada membentuk kontur supaya

perpisahan(*separation*) dan pusaran (*wake*) dihilangkan ataupun paling tidak ianya dikurangkan kepada satu bahagian pada jasad.



Rajah 1.1 Potongan bahagian pada sayap menghasilkan kerajang airfoil

Rajah (1.1) menunjukkan geometri sayap secara ringkas, seperti yang didapati pada kapal terbang ringan. Bahagian hadapan sayap tersebut, pada bahagian kiri dipanggil bucu depan (*leading edge*), dan di bahagian belakang sayap tersebut dipanggil bucu belakang (*trailing edge*). Jarak dari bucu depan ke bucu belakang dipanggil garis rentas (*chord*). Pada hujung sebuah sayap dipanggil tip hujung, dan jarak dari satu tip hujung ke tip hujung yang lain dipanggil rentangan (*span*). Bentuk bagi sayap, apabila dilihat dari atas, ia dipanggil planform. Dalam rajah di atas, planform tersebut adalah dalam bentuk segiempat dan untuk sayap yang berbentuk segiempat, panjang garis rentas pada setiap kedudukan di sepanjang rentangan adalah sama. Pada kebanyakan planform yang lain, panjang garis rentas adalah berbeza sepanjang rentangan. Luas bagi sayap adalah luas pada planform dan dibatasi oleh bucu depan dan bucu belakang serta tip hujung sayap.

Juga kita dapat melihat iaitu luas sayap bukannya jumlah keseluruhan keluasan permukaan bagi sayap. Jumlah keseluruhan permukaan adalah merangkumi kedua-dua bahagian permukaan atas dan bawah. Kawasan bagi keluasan sayap adalah kawasan pancaran dan ia adalah separuh daripada jumlah keseluruhan permukaan.

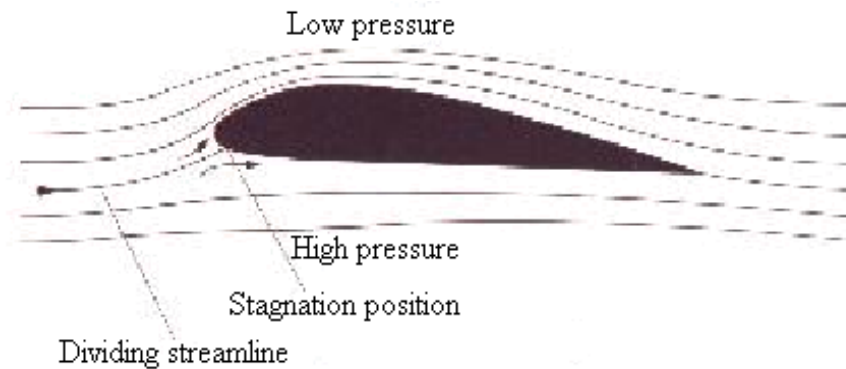
Jika kita memotong secara menegak pada sayap melalui bucu depan dan bucu belakang, ia akan menunjukkan keratan rentas bagi sayap. Seperti mana yang telah diberitahu, keratan rentas ini dipanggil *airfoil*. Ia mempunyai definisi geometrinya yang tersendiri. Garisan lurus dilukis dari bucu depan ke bucu belakang airfoil dipanggil garisan garis rentas (*chord line*). Garisan garis rentas ini memotong airfoil kepada permukaan atas dan permukaan bawah. Jika kita memplotkan titik-titiknya, dimana ia memanjang separuh diantara permukaan atas dan bawah, kita akan memperolehi satu lengkungan dipanggil garisan purata melengkung (*mean camber line*). Untuk airfoil yang simetri (permukaan atas adalah sama bentuknya dengan permukaan di bawah), garisan purata melengkung akan jatuh pada atas garisan garis rentas. Tetapi bagi kebanyakan kes, terdapat dua garisan terpisah. Jarak maksimum di antara dua garisan dipanggil lengkungan (*camber*), di mana ia diukur berdasarkan kepada bentuk airfoil tersebut (lebih tinggi lengkungannya lebih tinggi bentuk melengkung airfoil). Jarak maksimum diantara permukaan atas dan bawah dipanggil ketebalan.

Kebiasaannya kita dapat melihat semua kuantiti ini dibahagikan kepada panjang garis rentas untuk menghasilkan nombor yang tidak berdimensi. Airfoil boleh didatangkan

dengan pelbagai kombinasi kelengkungan dan ketebalan. Maka kita akan dapat melihat maklumat bagi kandungan geometri bagi sesuatu airfoil.

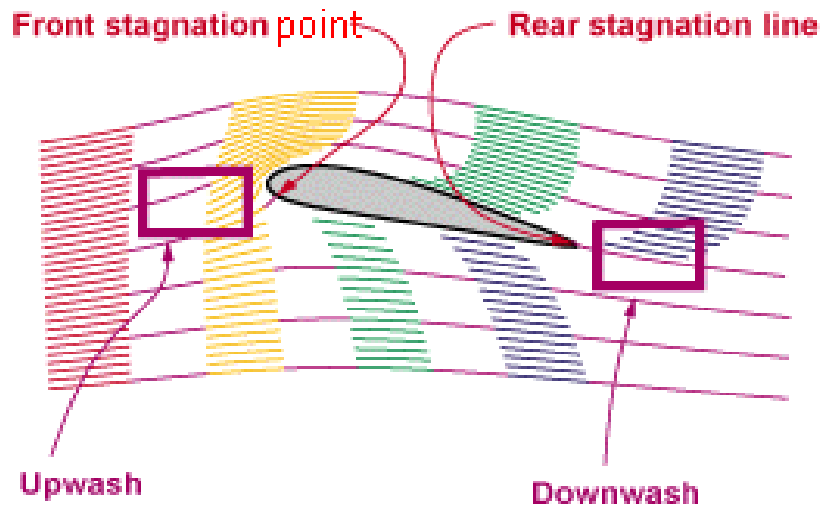
1.2 Aliran Udara

Sekarang saya akan menerangkan beberapa perkara tentang bagaimana kelakuan udara semasa ia melalui airfoil. Rajah (1.2) menunjukkan bentuk aliran udara melalui bahagian kerajang airfoil pada sudut tujahan (*angle of attack*) yang kecil.



Rajah 1.2 Aliran udara pada airfoil

Aliran udara tersebut boleh dilihat apabila kita menguji airfoil tersebut di dalam terowong angin. Aliran menunjukkan garisan arus udara dan ia bergerak dari kiri ke kanan, dan jika arus tersebut berada dalam keadaan stabil, ia akan menunjukkan juga laluan yang partikel akan melaluinya. Apakah yang dikatakan tentang sudut tujahan? Sudut tujahan adalah sudut di antara permukaan bagi sayap (garis rentas airfoil) dan arah bagi laluan (kelajuan udara biasa). Sudut tujahan boleh diubah untuk menambahkan ataupun mengurangkan daya angkat yang bertindak pada sayap tersebut.



Rajah 1.3 Kenaikan dan penurunan

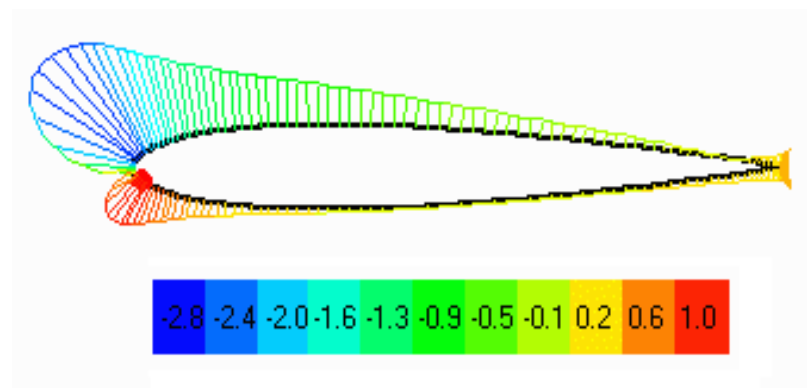
Rajah (1.3) menunjukkan beberapa kandungan yang penting tentang bentuk aliran udara. Udara pada bahagian bucu belakang bergerak bukannya setakat dari kiri ke kanan tetapi bergerak secara ke bawah, ini dipanggil penurunan (*downwash*). Penurunan di belakang kerajang airfoil mudah untuk difahami, keseluruhan tujuan bagi sayap adalah untuk memberikan pergerakan ke bawah kepada udara. Soalan timbul: Kenapa aliran udara adalah berwarna? Ia adalah cuma untuk menunjukkan bagaimana aliran bergerak melalui kerajang airfoil tersebut, dan ini boleh dijuruskan dengan bantuan jarak yang kecil di antara garisannya.

Kenaikan pada bahagian hadapan airfoil tersebut adalah lebih menarik. Sebagaimana yang kita tahu, tekanan udara adalah amat mempengaruhi udara, walaupun udara adalah pada keadaan yang tenang pada bahagian hadapan sayap. Di sepanjang bucu hadapan airfoil tersebut, ada dipanggil garisan genangan (*stagnation line*) yang membahagi

garisan udara yang melalui bahagian atas dan bawah airfoil. Pada sebuah kapal terbang, garisan genangan melalui disepanjang panjang sayapnya, tetapi sejak rajah (1.3) menunjukkan cuma keratan rentas bagi sayap, kita cuma dapat melihat garisan genangan adalah satu titik sahaja. Garisan genangan yang lain melalui disepanjang panjang bucu belakang. Ia menunjukkan tempat di mana udara yang mengalir di bahagian atas sayap akan bersambungan dengan udara yang mengalir dibawah sayap tersebut. Apabila sudut tujahan meningkat, garisan genangan hadapan didapati betul-betul di bahagian bucu hadapan sayap. Udara yang bertemu dengan sayap betul-betul di atas garisan genangan akan berpatah balik dan menuju ke atas bucu hadapan serta akan terus mengalir di bahagian lengkungan atas airfoil tersebut.

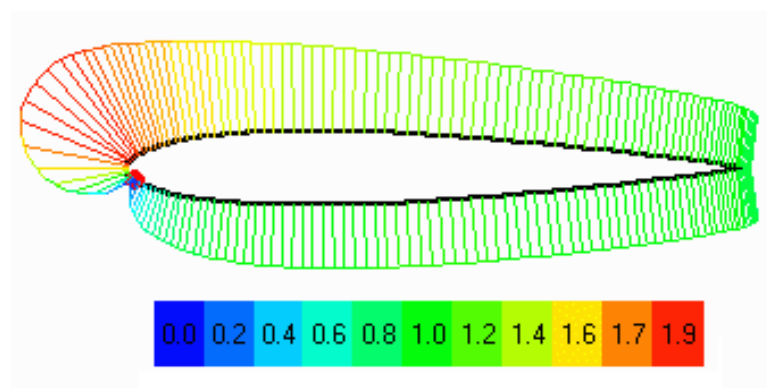
1.3 Kes Tekanan

Untuk sebarang sayap kapal terbang, menghasilkan tekanan yang lebih tinggi di bawah sayap dari atasnya akan menghasilkan daya angkat. Peningkatan dalam halaju aliran udara adalah berkaitan dengan pengurangan tekanan, maka halaju udara relatif adalah tinggi. Ia adalah prinsip Bernoulli. Kapal terbang yang dalam penerbangan boleh diambil kira sebagai suatu objek yang dimasukkan di dalam udara yang sedang bergerak. Molekul udara bergerak di atas permukaan atas lengkungan akan melalui jarak yang panjang, dan ia perlu bergerak lebih cepat untuk mencapai rentak molekul yang melalui bahagian bawah sayap. Kelajuan udara yang dicapai pada bahagian atas akan menyebabkan kejatuhan tekanan. Perbezaan tekanan ini diantara permukaan atas dan bawah akan menghasilkan daya angkat. Contoh bagi pengagihan tekanan pada permukaan pada airfoil yang bersimetri pada aliran udara yang seragam ditunjukkan pada rajah (1.4).



Rajah 1.4 Pengagihan tekanan pada permukaan airfoil

Pastinya kita akan memikirkan bagaimana pula pengagihan halaju pada airfoil. Untuk memahami dengan jelas, rajah (1.5) menunjukkan pengagihan halaju pada permukaan airfoil yang bersimetri dibawah aliran udara yang seragam.



Rajah 1.5 Pengagihan halaju pada permukaan airfoil

Kita dapat melihat pada bahagian bucu hadapan, halaju adalah tinggi daripada bahagian lain airfoil. Ini adalah berlainan dengan rajah pengagihan tekanan. Menurut persamaan Bernoulli, ia mengatakan bahawa apabila tekanan adalah kurang, maka halaju adalah tinggi.

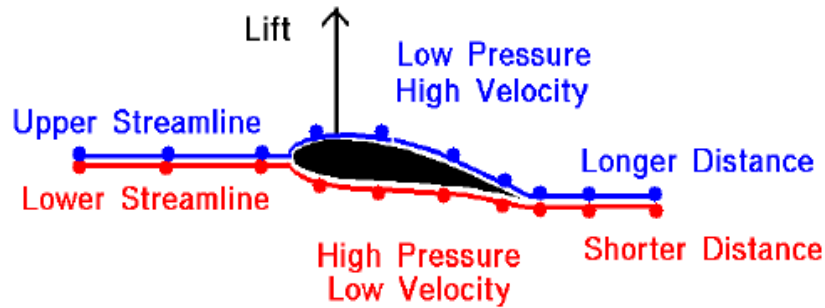
1.3 Penerbangan Terbalik, Lengkungan dan Airfoil yang Simetri

Kebanyakan dari semua orang telah diberitahu bahawa airfoil menghasilkan daya angkat kerana ia berbentuk lengkung (*camber*) pada bahagian atas dan menegak pada bahagian bawah. Tetapi tidakkah kita perasan bahawa juruterbang pada pertunjukan udara pada kebiasaannya akan terbang agak lama secara terbalik? Tidakkah ini membuatkan kita ragu-ragu iaitu mungkin ada kesilapan tentang cadangan pada permukaan atas melengkung dan tegak pada permukaan bawahnya?



Rajah 1.6 Penerbangan terbalik

Sayap yang biasa boleh terbang secara terbalik. Ia nampak pelik apabila terbang dengan permukaan tegak di bahagian atas dan melengkung di bahagian bawah, tetapi ia menjadi. Kesilapan konsep yang biasa berlaku iaitu sayap perlu lengkung di bahagian atas dan tegak di bahagian bawah. Perkara ini dikaitkan dengan kesilapan konsep iaitu udara diperlukan untuk melepasi bahagian atas dan bawah airfoil adalah pada masa yang sama. Malahan airfoil yang terbalik juga menghasilkan daya angkat yang sama dengan prinsip pada airfoil yang normal.



Rajah 1.7 Teori laluan panjang

Tentang teori “laluan panjang”, seperti yang ditunjukkan pada rajah (1.7), teori tersebut mengandaikan iaitu airfoil dibentuk dengan permukaan atas adalah lebih panjang dari permukaan di bawah. Maka, molekul udara perlu bergerak jauh pada bahagian atas daripada di bahagian bawah. Untuk molekul (bebola kecil yang diwarnakan) yang berpasangan pada bucu hadapan perlu bertemu di bahagian bucu belakang, molekul pada bahagian atas perlu bergerak pantas daripada molekul pada bahagian bawah. Laluan pada bahagian atas adalah lebih panjang, maka molekul perlu bergerak pantas. Disebabkan aliran pada bahagian atas adalah lebih pantas, maka dari persamaan Bernoulli, tekanan adalah rendah. Perbezaan pada tekanan melalui airfoil akan menghasilkan angkatan (*lift*).

Airfoil direkabentuk dengan permukaan atas adalah lebih panjang dari yang di bawah. Ada diantara airfoil yang menghasilkan angkatan di mana bahagian bawah adalah lebih panjang dari yang di atas. Malahan, airfoil yang simetri (iaitu permukaan atas adalah sama bentuk dengan permukaan bawah) akan menghasilkan angkatan apabila ia dalam keadaan bersudut dari udara yang mengalir. Jika teori ini adalah betul, tiada kapal terbang yang akan terbang secara terbalik, dimana ia biasanya berlaku pada pertunjukan udara.

Bahagian teori ini mungkin timbul disebabkan pada awal airfoil ia mempunyai bentuk dan lengkung dengan jarak lebih panjang di bahagian atas. Ada diantara airfoil yang memang akan menghasilkan banyak pusingan aliran (*flow turning*), tetapi yang penting adalah pusingannya, bukannya jarak.

1.4 Sayap Nipis

Untuk mendapatkan beberapa perbezaan, kita cuba berbalik kepada sejarah. Sayap yang digunakan oleh adik-beradik Wright adalah nipis, lengkungan yang tinggi dan agak melengkung di bahagian bawahnya. Ini ditunjukkan pada rajah (1.8).



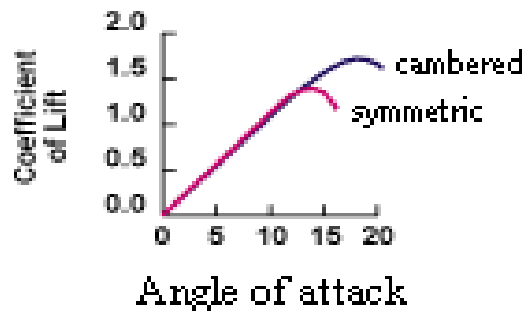
Rajah 1.8 Airfoil Wright pada tahun 1903

Tiada perkara yang luarbiasa perbezaannya diantara permukaan atas dan permukaan bawah seperti panjang dan bentuknya. Malah, sayap tersebut menghasilkan angkatan, dengan menggunakan prinsip yang sama dengan airfoil yang lain. Dengan ini diharap kenyataan bahawa sayap menghasilkan sayap kerana perbezaan panjang diantara permukaan di atas dan di bawah. Malahan, objek plat yang nipis akan menghasilkan angkatan jika angin melaluinya pada sudut tujahan yang sesuai. Tetapi kepentingan bagi

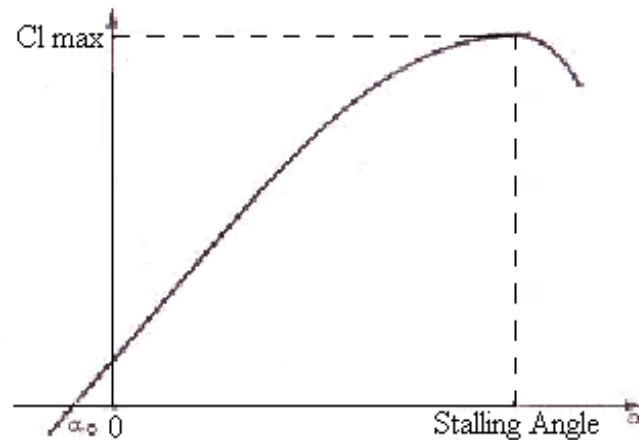
bentuk melengkung membantu untuk mengurangi seretan (*drag*) dan ia juga memberi kesan terhadap pusingan aliran.

1.5 Sudut Tujahan dan Keadaan *Stall*

Dari maklumat yang didapati, pada sudut tujahan yang kecil, airfoil yang simetri berfungsi dengan lebih baik daripada airfoil yang mempunyai lengkungan yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada sudut tujahan yang besar, airfoil yang mempunyai lengkungan yang lebih tinggi berfungsi dengan lebih baik dari airfoil bersimetri. Contoh bagi perkara ini ditunjukkan pada rajah (1.9). Airfoil yang simetri dan melengkung menghasilkan angkatan yang sama pada keadaan awal dan bertukar apabila sudut tujahan semakin meningkat. Maka, ini membuatkan airfoil yang melengkung mempunyai angkali angkatan (*coefficient of lift*) yang tinggi. Pada sudut tujahan yang tinggi, bucu hadapan bagi sayap yang melengkung akan melalui angin pada sudut yang lebih kecil berbanding dengan sayap yang simetri.



Rajah 1.9 Airfoil melengkung dan simetri pada keadaan *stall*

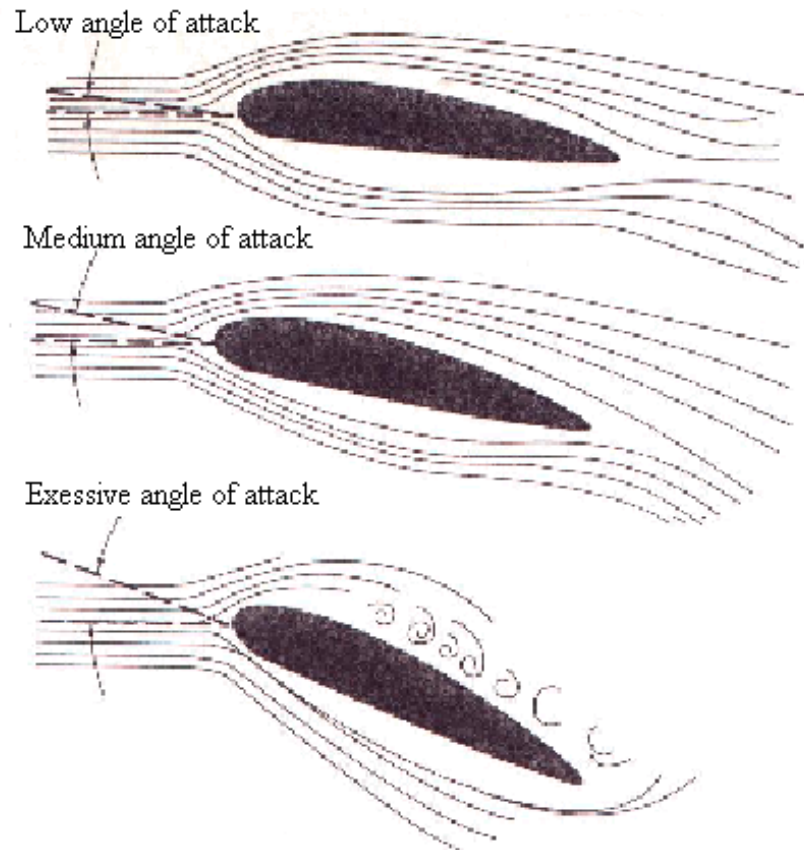


Rajah 1.10 Lekuk angkatan pada keadaan *stall*

Pada rajah (1.10), ia menunjukkan cara lain untuk difinasi bagi angkali angkatan pada keadaan *stall*. Kenapa garisan tersebut tidak memotong pada sudut tujahan $\alpha = 0$, seperti yang ditunjukkan pada rajah (1.9). Penerangan ini mungkin dapat membantu. Pada sudut tujahan yang kecil kepada sederhana, C_L adalah berkadar terus dengan α . Pada kawasan ini aliran angin bergerak dengan tenang melalui airfoil. Walaupun begitu, sedang α menjadi semakin tinggi, aliran angin cuba berpisah daripada bahagian atas permukaan airfoil tersebut, menghasilkan pusaran (*wake*) di bahagian belakang airfoil seperti yang ditunjukkan pada rajah (1.11).

Pada kawasan terpisah ini, aliran tersebut sedang berputar, dan sebahagian dari aliran tersebut sebenarnya sedang bergerak pada arah yang bertentangan dengan arah aliran sebenar. Lanjutan dari aliran angin yang terpisah ini pada sudut α yang tinggi akan berkurangan pada angkatan dan akan meningkatkan seretan. Keadaan inilah yang dipanggil *stall*. Nilai maksimum bagi C_L yang berlaku selepas dari *stall* dinyatakan

sebagai C_{Lmax} . Ia adalah salah satu aspek yang penting bagi prestasi airfoil kerana ia menentukan kelajuan *stall* bagi sebuah kapalterbang.



Rajah 1.11 Pelbagai sudut tujah

Berbalik kepada soalan, kita melihat pada rajah (1.10) bahawa angkatan melalui kosong apabila airfoil mempunyai nilai sudut tujah negatif. Maka, nilai bagi α apabila angkatan adalah bersamaan dengan kosong dipanggil sudut tujah angkatan kosong (*zero lift angle of attack*) dan ianya dinyatakan sebagai $\alpha_{L=0}$. Untuk airfoil yang bersimetri, $\alpha_{L=0} = 0$, tetapi bagi semua airfoil yang mempunyai lengkungan yang positif (iaitu lengkungan

berada di atas garisan rentas), $\alpha_{L=0}$ adalah bernilai negatif. Untuk rajah (1.10) menunjukkan ianya adalah untuk airfoil yang melengkung.

1.7 Data Airfoil

Kebanyakan data airfoil yang diperolehi dari eksperimen, telah disatukan sepanjang tahun oleh Pertubuhan Penasihat Kebangsaan untuk Aeronotik (NACA), di mana ia telah diserapkan pada Pengurusan Angkasa dan Aeronotik Kebangsaan (NASA) pada tahun 1958. Terdapat pelbagai klasifikasi, empat, lima dan enam siri NACA pada bahagian sayap.

(i) NACA Empat Digit

Integer pertama menunjukkan nilai maksimum bagi garisan melengkung purata pada peratus bagi garis rentas. Integer kedua menandakan jarak dari bucu hadapan ke lengkungan maksimum kepada persepuluh dari garis rentas. Dua nilai terakhir pula menandakan ketebalan maksimum kepada peratus garis rentas. Sebagai contoh, NACA 2412 diterangkan sebagai bentuk yang mempunyai lengkungan maksimum sebanyak 2 peratus dari garis rentas (integer pertama). Lengkungan maksimum berlaku pada kedudukan 0.4 garis rentas dari bucu hadapan (integer kedua), dan ketebalan maksimum adalah 12 peratus (dua nilai terakhir). Jika NACA 0010, ia adalah airfoil simetri dan ketebalan maksimum berlaku pada 10 peratus garis rentas.

(ii) NACA Lima Digit

Keluarga kedua bagi NACA adalah siri lima digit, seperti NACA 23012. Di sini, integer pertama didarab dengan $3/2$ akan memberikan angkali angkatan per sepuluh. Dua integer seterusnya apabila dibahagi dengan 2 akan memberikan kedudukan lengkung maksimum

sepanjang rentas dari bucu hadapan dalam perseratus dari rentas. Dua digit terakhir memberikan tebal maksimum dalam perseratus dari rentas. Untuk NACA 23012, angkali angkatan adalah 0.3, kedudukan lengkungan maksimum pada 0.15c dan airfoil mempunyai 12 peratus ketebalan maksimum.

(iii) NACA Enam Digit

Contoh bagi NACA enam digit adalah NACA 65-218. Digit pertama menunjukkan siri, digit kedua adalah lokasi bagi tekanan minimum dalam persepuluh rentas dari bucu hadapan (untuk pengagihan ketebalan simetri pada angkatan sifar). Digit ketiga pula adalah angkali angkatan dalam persepuluh, dan dua digit terakhir memberikan ketebalan maksimum dalam perseratus rentas. Untuk NACA 65-218, angka 6 menandakan nombor siri, tekanan minimum berlaku pada 0.5c, angkali angkatan rekabentuk adalah 0.2 dan ketebalan airfoil adalah 18 peratus.

Klasifikasi ini yang telah diperkenalkan dapat membantu mereka yang berminat dengan airfoil dan juga oleh pengeluar. Ia juga dapat membantu untuk mengkaji tentang teori airfoil dan aplikasinya.

2. Aerodinamik

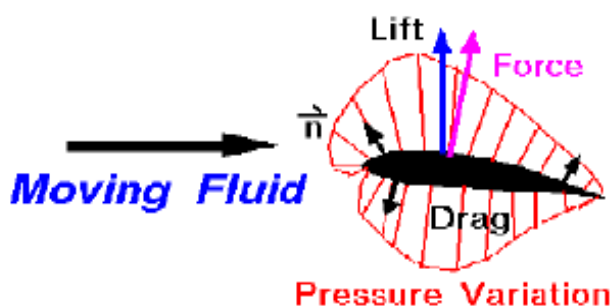
2.1 Pengenalan

Apakah aerodinamik? Aerodinamik datang dari dua patah perkataan Greek: aerios, yang melibatkan udara, dan dynamis, bermakna berkuasa. Daripada definisi, aerodinamik adalah kajian tentang daya-daya dan hasil gerakan oleh objek melalui udara. Dari sejarah, manusia mempunyai minat dalam aerodinamik dan penerbangan sejak beribu tahun. Walaupun objek yang diterbangkan adalah lebih berat dari udara, ia tidak mustahil untuk dibuat. Kejayaan yang diperolehi adalah lebih kurang seratus tahun yang lepas. Mengapa kita perlu mempelajari aerodinamik? Kita perlu mempelajarinya kerana ia berkaitan dengan kedua-dua pergerakan objek dan tindak balas dengan udara. Untuk mengaitkannya teori ini dengan projek saya, ia membantu menerangkan bagaimana airfoil bertindak bila mengalir di udara dan daya-daya yang terlibat.

2.2 Daya-daya Aerodinamik

Apabila dua objek yang padu berinteraksi dalam proses mekanikal, daya-daya akan dipindahkan ataupun ia akan diaplikasikan pada titik pertemuan objek tersebut. Tetapi apabila objek yang padu berinteraksi dengan cecair (*fluid*), terdapat kesukaran untuk diterangkan kerana cecair boleh menukar bentuk. Bagi jasad padu yang berada dalam cecair, titik pertemuan berada pada setiap titik pada permukaan jasad tersebut. Cecair tersebut adalah bebas untuk mengubah bentuk, sama ada mengalir melalui jasad dan sentiasa menjaga pertemuan fizikalnya dengan setiap titik pada permukaan jasad tersebut.

Magnitud bagi daya yang bertindak pada satu bahagian kecil suatu objek adalah bersamaan dengan tekanan kali luas bahagian, $\vec{F} = \sum \vec{n} \Delta A$. Ini kerana unit dari tekanan kali dengan luas akan memberikan Newton, N. Seperti yang diketahui, tekanan adalah kuantiti skalar yang berkaitan dengan momentum bagi molekul bagi cecair. Tekanan adalah suatu kuantiti vektor, mempunyai kedua-dua magnitud dan arah, maka kita perlu menentukan arah bagi daya. Tekanan bertindak secara seranjang (ataupun normal) dengan permukaan pejal bagi suatu objek. Maka, arah bagi daya bagi bahagian kecil objek adalah di sepanjang normal pada permukaan. Kita tandakan arah ini dengan tanda \vec{n} .



Rajah 2.1 Daya tekanan bertindak normal (seranjang) dengan permukaan

Dari rajah (2.1), arah normal pada tiga lokasi pada airfoil ditunjukkan dengan \vec{n} . Perhatikan bahawa arah normal berubah dari bahagian depan airfoil kepada bahagian belakang dan dari bahagian atas ke bawah. Untuk mendapatkan daya mekanikal bersih pada keseluruhan objek pejal, kita perlu untuk menjumlahkannya bagi semua bahagian kecil. Cecair adalah dalam pergerakan, maka kita boleh menakrifkan arah aliran disepanjang pergerakan. Komponen bagi daya bersih seranjang (normal) kepada arah aliran dipanggil angkat, manakala komponen disepanjang arah aliran dipanggil seretan.

2.3 Kesan Bentuk Kepada Angkat



Rajah 2.2 Pusingan aliran udara pada bahagian belakang airfoil pada dua airfoil berlainan

Rajah (2.2) di atas menunjukkan kawasan aliran bagi dua airfoil yang berlainan. Airfoil bagi rajah (2.2a) adalah simetri, iaitu bentuk pada bahagian bawah dan atas adalah sama. Airfoil pada rajah (2.2b) adalah melengkung dekat bahagian belakang airfoil. Garisan yang diliputi pada airfoil menunjukkan aliran udara mengalir dari kiri ke kanan. Rajah (a) menunjukkan tiada pusingan bagi aliran dan tidak menghasilkan angkatan. Rajah (b) pula menunjukkan pusingan aliran yang banyak dan menghasilkan jumlah angkatan yang banyak. Di bahagian depan bagi kedua-dua airfoil adalah lebih kurang sama. Di bahagian belakang airfoil pada (b) menghasilkan pusingan yang banyak.

2.4 Aplikasi Teorem Bernoulli

Tekanan statik + tekanan dinamik = jumlah tekanan = konstan

$$P + \rho \times \frac{V^2}{2} = P_1$$

$$(P + \rho \times \frac{V^2}{2})_1 = (P + \rho \times \frac{V^2}{2})_2$$

Persamaan ini muncul pada banyak buku fizik, pada buku mekanik bendalir dan rujukan buku penerbangan. Bagaimana kita menggunakan persamaan ini? Perkara penting apabila mengaplikasikan persamaan ini adalah kita perlu berhati-hati dengan kekangan yang digunakan. Aliran perlu tak likat, tak boleh mampat (halaju kurang), mengalir secara tenang dan tiada tambahan haba. Molekul bagi cecair adalah mengalir secara rawak seragam dan berlanggar sesama sendiri dan dinding objek. Pergerakan bagi molekul memberikan molekul tersebut momentum linear. Tekanan adalah ukuran bagi momentum ini. Jika gas berada dalam keadaan rehat, kesemua pergerakan molekul tersebut adalah secara rawak dan tekanan yang dikesan adalah jumlah tekanan bagi gas tersebut. Jika gas disetkan mengalir, beberapa komponen rawak tersebut akan berubah halajunya mengikut hala tuju pengalirannya. Kita panggil hala tuju yang diarahkan adalah bertentangan dengan pergerakan rawak tanpa pengarah.

Kita boleh menggabungkan tekanan dengan momentum bagi aliran gas yang diarahkan. Tekanan ini dipanggil tekanan dinamik. Baki dari pergerakan rawak bagi molekul masih lagi menghasilkan tekanan yang dipanggil tekanan statik. Dari hukum keabadian tenaga dan momentum, penambahan bagi tekanan statik dan tekanan dinamik adalah bersamaan dengan jumlah tekanan asal pada aliran (andaikan kita tidak menambah atau membuang tenaga yang mengalir). Kekangan bagi persamaan ini adalah benar disepanjang aliran tunggal, tetapi mungkin berubah dari aliran ke aliran yang lain. Jika pengaliran tidak berputar, maka konstan tersebut tidak benar berubah dari aliran ke aliran yang lain asalkan perbezaan ketinggian adalah kecil.

Jika kita hendak mengaplikasikan teori ini dengan projek, kita dapat melihat disepanjang kerajang udara yang berhalaju rendah, alirannya adalah tak boleh mampat dan ketumpatannya adalah kekal sama. Persamaan Bernoulli kemudian dikurangkan kepada hubungan yang mudah diantara halaju dan tekanan statik. Halaju boleh berubah disepanjang aliran, maka persamaan ini boleh digunakan untuk mengira perubahan dalam tekanan. Tekanan statik sekiranya dikamirkan disepanjang keseluruhan permukaan kerajang udara akan memberikan jumlah daya aerodinamik pada jasad tersebut. Maka, daya ini boleh dipecahkan kepada angkat dan seretan bagi kerajang udara.

2.5 Hukum-hukum Aerodinamik

Mari kita kaitkan aliran udara dan angkatan dengan hukum aerodinamik. Pada kebiasaannya, sayap dianalisa dengan mempertimbangkan keadaan fizik suatu bendalir. Terdapat tiga hukum yang diketahui bagi keadaan penerbangan biasa. Ianya adalah hukum keabadian jisim, momentum dan tenaga. Hukum-hukum ini dapat memberitahu apa yang menyebabkan angkatan pada kerajang udara.

Selalunya aliran diandaikan sebagai tak boleh mampat (ketumpatan udara adalah seragam) dan tak likat (kita tahu kelikatan menyebabkan seretan). Andaian ini tidak mempengaruhi kenyataan keabadian tenaga tetapi ia memang memberikan kesan kepada keabadian tenaga dan momentum. Apakah hukum keabadian jisim? Ia boleh diterangkan dengan melihat kepada aliran udara. Pada aliran yang tenang, aliran udara adalah selari dengan vektor halaju, arah halaju pada setiap titik pada aliran. Udara diantara dua aliran adalah disekat diantar dua lapisan udara tersebut. Tiada udara yang boleh keluar

merentasi aliran udara tersebut. Maka, dua aliran udara tersebut berfungsi sama dengan ruangan pejal. Keabadian tenaga memberitahu bahawa apabila aliran udara mengalir melalui suatu ruang, ia akan bergerak pantas apabila luas keratan rentas adalah kecil dan lambat apabila luas keratan rentas adalah besar (kita mengambil kira ketumpatan adalah sama).

Pertimbangkan keadaan aliran udara pada kerajang udara yang terangkat. Aliran udara adalah rapat daripada aliran udara pada permukaan bawah kerajang udara tersebut. Aliran udara berdekatan dengan titik tak bergerak (*stagnation point*) dimana halaju adalah sifar adalah agak jauh. Maka kita dapat mengandaikan bahawa aliran pada permukaan atas adalah laju daripada permukaan bawah. Cuba pertimbangkan kerajang udara yang simetri pada sudut sifar. Aliran udara pada permukaan atas adalah sama dengan aliran udara pada permukaan bawah. Apabila sudut ditambah, titik tak bergerak akan berubah pada permukaan bawah. Aliran udara pada titik tersebut adalah agak jauh (halaju kurang). Aliran udara sekarang cuba untuk dekat pada bahagian hadapan kerajang udara (halaju bertambah). Maka, keabadian jisim menentukan kawasan aliran bergantung kepada bentuk kerajang udara dan orientasi aliran udara yang mendatang. Oleh itu, syarat-syarat dibawah boleh diandaikan:

1. Pada titik tak bergerak, aliran udara cuba untuk bergerak jauh.
2. Apabila aliran cuba untuk pusing kepada arah aliran lain, maka aliran udara tersebut cuba untuk mendekati antara satu sama lain.
3. Apabila aliran cuba untuk pusing kepada arah aliran jauh daripada arah aliran, maka aliran udara tersebut cuba menjauhi antara satu sama lain.

Sekarang, apakah pula keabadian momentum? Hukum ini berurusan dengan daya yang bertindak pada bendalir. Ia berkaitan dengan kadar perubahan momentum dalam bendalir kepada daya yang bertindak pada permukaan dalam bendalir. Kadar perubahan momentum boleh dikaitkan dengan pecutan dan nyahpecutan bagi partikel bendalir. Apabila udara yang bergerak dalam aliran udara memecut atau mengurangkan pecutannya, perubahan kepada momentum akan berlaku. Apakah kesannya jika perubahan momentum berlaku? Hukum keabadian tenaga memberitahu perubahan momentum memberi kesan kepada daya disebabkan tekanan dan daya disebabkan kelikatan. Dibawah andaian terhadap aliran tak likat dan tak mampat, maka hukum ini menjadi persamaan Bernoulli. Persamaan Bernoulli terbitan algebra yang mengaitkan halaju kepada tekanan. Bagi memudahkannya, peningkatan pada halaju menyebabkan pengurangan pada tekanan dan sebaliknya.

Bagaimana pula dengan hukum keabadian tenaga? Keabadian tenaga memberitahu bagaimana haba dan tenaga berubah dikendalikan dan ditukarkan dalam bendalir. Ia tidak memberi kesan kepada angkatan bagi bendalir yang tak mampat. Bagi nombor Mach yang besar, ia begitu penting. Oleh itu saya tidak akan mengulas dengan lebih lanjut berkenaan perkara ini kerana ia hanya penting pada penerbangan yang laju.

Dengan mencantumkan semua, apabila udara berputar dalam aliran, halaju akan bertambah dan tekanan akan berkurangan dan sebaliknya. Tekanan berdekatan dengan permukaan menyebabkan daya untuk bertindak pada permukaan. Tekanan adalah suatu pengagihan daya. Daya selalunya bertindak pada arah permukaan (bertentangan dengan

arah normal permukaan). Apabila kita menambahkan daya yang teragih pada kawasan kerajang udara terangkat, jumlah daya adalah angkat.

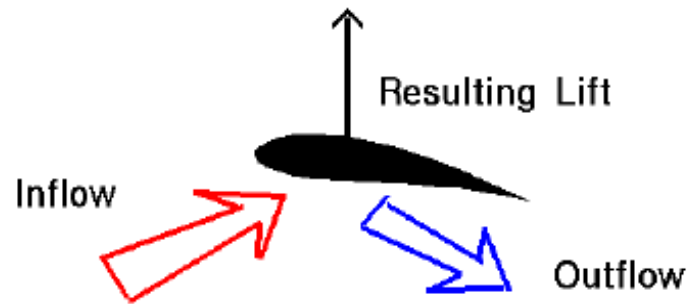
2.6 Angkat

Apakah dia angkat (*lift*)?. Angkat adalah daya yang bertindak seranjang kepada arah penerbangan. Angkat adalah bersamaan dengan ketumpatan bendalir didarab dengan putaran pada kerajang udara dan halaju aliran biasa. Sekiranya kapal terbang sedang dalam penerbangan, angkat yang dibina oleh kapal terbang tersebut mestilah sama dengan berat bagi keseluruhan kapal terbang itu. Maka, angkat yang dihasilkan oleh sayap memberi kesan kepada kerajang udara. Angkat bergantung kepada nilai pekali angkat. Pekali angkat, C_L , adalah nombor yang digunakan oleh pakar aerodinamik untuk memodelkan kebergantungan kompleks bagi angkat pada bentuk, kenaikan dan beberapa syarat aliran. Persamaan ini adalah susunan bagi pekali angkat dimana kita menyelesaikan pekali angkat pada pembolehubah yang lain daripada prinsipal analisis perbezaan.

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

Formula ini adalah sama dengan persamaan seretan tetapi perbezaannya adalah untuk mencari daya angkat, L dan pekali angkat, C_L . Pekali angkat mengandungi bukan sahaja kebergantungan kompleks bentuk objek dan kenaikan, tetapi juga kesan terhadap kelikatan udara dan kemampatan (*compressibility*). Untuk menggunakan pekali angkat, kita perlu memastikan kesan kelikatan dan kemampatan adalah sama antara kes yang dikira dan kes yang diandaikan. Jika tidak, andaian yang dibuat menjadi tidak tepat.

Disebabkan itulah projek saya cuma menerangkan aliran pada halaju yang rendah ($<100\text{m/s}$). Bagi kerajang udara yang berhalaju rendah, aliran adalah tak mampat dan kesan kemampatan diabaikan kerana ketumpatan bendalir tetap sama. Situasi ini adalah sama dengan seretan.



Rajah 2.3 Gambaran bagi Prinsip Newton

Cuba kita membincangkan teori yang berdasarkan kepada idea bahawa angkat adalah reaksi daya kepada molekul udara yang menghentam pada bahagian bawah kerajang udara semasa ia sedang bergerak melalui udara. Disebabkan ia berdasarkan kepada hukum Newton iaitu pada setiap tindakan terdapat tindak balas yang sama dan berlawanan, dan ia dinamakan sebagai teori angkatan.

Masalah utama dengan teori ini adalah ia mengabaikan kandungan fizikal bagi bendalir. Angkat adalah dibina dengan pusingan bendalir yang bergerak, dan kesemua bahagian bagi objek yang pejal boleh menentukan bendalir tersebut. Secara jelas, teori ini menitikberatkan cuma halaju bagi objek, ketumpatan udara dan bentuk permukaan bawah kerajang udara. Permukaan atas kerajang udara tidak terlibat langsung dengan teori.