

PERHITUNGAN GAYA DRAG PADA BENDA UJI PELAT PERSEGI DATAR MENGGUNAKAN LOW SPEED WIND TUNNEL

Muchammad^{*)}

Abstrak

Aerodinamika merupakan salah satu cabang ilmu dinamika fluida yang mempelajari khususnya gaya-gaya yang bekerja pada suatu benda yang berada di dalam suatu aliran fluida. Pemecahan masalah-masalah aerodinamika pada umumnya melibatkan penghitungan berbagai macam sifat dari aliran yang terjadi, seperti kecepatan, tekanan, masa jenis ataupun temperatur, sebagai suatu fungsi terhadap ruang dan waktu. Dengan mempelajari pola-pola aliran yang ada, maka akan memungkinkan untuk menghitung ataupun memperkirakan gaya dan momen yang bekerja pada benda yang terdapat pada aliran tersebut. Informasi secara eksperimen yang berguna dalam pemecahan masalah aerodinamika dapat diperoleh melalui bermacam metode, dan salah satu metode tersebut yaitu dengan menggunakan wind tunnel. Karena dengan metode ini memungkinkan untuk penggunaan model dan pembuatannya relatif mudah, wind tunnel menjadi suatu alat yang ekonomis serta akurat dalam rangka penelitian aerodinamika.

Wind tunnel yang digunakan adalah low speed wind tunnel tipe terbuka. Prinsip kerja dari wind tunnel ini adalah menggerakkan udara dengan fan hisap dibagian belakang dan meletakkan benda uji pada external balance yang berfungsi untuk mengukur gaya yang bekerja pada benda tersebut. Disini pengujian dilakukan pada pelat tipis persegi, terbuat dari logam galvanis dengan panjang sisinya adalah 70 mm. Dari pengujian ini, untuk variasi kecepatan dari 10.21 m/s sampai dengan 20.69 m/s, pada benda uji berbentuk pelat datar persegi diperoleh nilai gaya drag (F_D) pada kisaran 0.35 N - 1.36 N, bilangan Reynolds (Re) pada kisaran 68000 - 139000, dan nilai koefisien drag (C_D) pada kisaran 1.16 s/d 1.27.

Kata kunci : Low Speed Wind Tunnel, Square Flat Plate, External Balance, Drag, Coefficient of Drag, Reynolds Number

Pendahuluan

Aerodinamika, sebagai salah satu cabang ilmu pengetahuan, mengalami perkembangan teknologi seperti cabang-cabang ilmu pengetahuan yang lain. Aerodinamika dapat diartikan sebagai suatu cabang ilmu yang mempelajari interaksi antara aliran fluida dengan benda-benda *solid* yang bergerak secara relatif di dalam aliran tersebut. Salah satu penerapan aerodinamika digunakan dalam rangka perancangan maupun peningkatan kemampuan pesawat terbang serta kendaraan bergerak lainnya, baik darat maupun air seperti kapal, mobil dan lain-lainnya, selain itu ilmu aerodinamika diterapkan juga pada bangunan-bangunan statis seperti jembatan maupun gedung-gedung bertingkat.

Wind tunnel atau terowongan angin merupakan salah satu alat percobaan yang cukup penting dalam mempelajari ilmu aerodinamika, namun seiring perkembangan teknologi maka terdapat juga metode lain yang digunakan dalam mempelajari ilmu aerodinamika, yaitu dengan penggunaan simulasi terhadap gaya-gaya aerodinamika menggunakan bantuan komputer, metode ini lebih dikenal sebagai *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Adapun dalam tugas akhir ini, perhitungan gaya drag pada benda uji pelat persegi menggunakan low speed wind tunnel dilakukan secara percobaan (*experimental*) menggunakan alat percobaan berupa wind tunnel dengan spesifikasi low speed wind tunnel.

Wind tunnel sebagai alat uji aerodinamika terdiri dari beberapa bagian penting yaitu bagian seksi uji (*Test Section*), yang

^{*)} Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudarto, SH Tembalang Semarang. e-mail: m_mad5373@yahoo.com

transparan, *honeycomb* sebagai penyearah aliran udara yang masuk kedalam seksi uji, kipas penyedot angin berupa motor penggerak dan *fan*, serta *external balance* sebagai alat ukur gaya yang terjadi pada benda kerja. Adapun pada pengujian ini digunakan benda kerja berupa pelat persegi datar dengan tujuan dapat menghitung gaya drag akibat aliran udara yang mengenai permukaan benda uji dengan bentuk dasar pelat persegi datar.

Tujuan utama dari pengujian aerodinamika model pelat persegi dengan *low speed wind tunnel* ini adalah:

1. Untuk mengetahui gaya-gaya yang bekerja pada benda uji meliputi gaya drag, bilangan Reynolds, dan koefisien drag.
2. Untuk mengetahui pengaruh bentuk benda uji terhadap aliran udara yang melewatinya serta gaya-gaya yang berpengaruh.
3. Untuk mengetahui visualisasi aliran dari benda uji pelat persegi datar.

Batasan masalah yang ada:

1. Benda kerja yang digunakan adalah pelat persegi datar dengan panjang sisi 70 mm, terbuat dari logam galvanis.
2. Pengukuran gaya drag dilakukan dengan menggunakan *external balance* dengan 11 variasi kecepatan aliran angin.
3. Kondisi aliran yang dipilih adalah *laminar, steady, dan incompressible*.
4. Desain dan konstruksi *wind tunnel* tidak dibahas dalam tugas akhir ini.

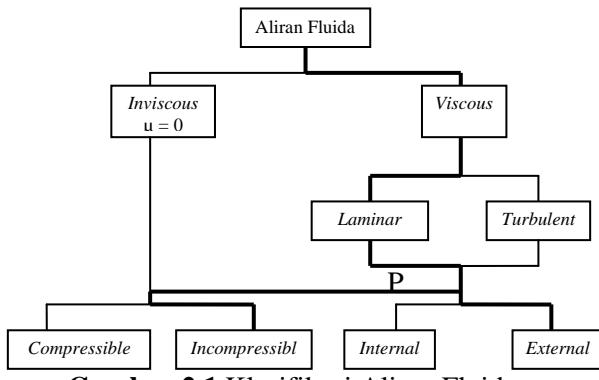
Klasifikasi Aliran Fluida

Dalam aerodinamika, kita mempelajari interaksi antara aliran fluida dengan benda *solid* yang bergerak secara relatif di dalam aliran fluida tersebut. Adapun fluida merupakan suatu zat yang berubah bentuknya secara kontinyu yang dikarenakan adanya gaya geser tangensial (*shear*). Karena adanya sifat ini fluida cenderung untuk mengalir jika ada gaya geser tangensial yang bekerja. Fluida yang mengalir didefinisikan sebagai fluida yang *continuum*, fluida dianggap sebagai kumpulan molekul yang tergabung secara keseluruhan dan tidak dilihat atau dianalisa secara molekul. Pada kebanyakan aplikasi *engineering*, yang menjadi perhatian utama adalah efek fluida secara makroskopik, dimana fluida diperlakukan sebagai zat yang tidak dapat dibagi-bagi atau dipecah-pecah. Akibatnya sifat-sifat fluida seperti massa jenis, suhu, kecepatan

dan sebagainya memiliki sifat yang kontinyu terhadap posisi dan waktu.

Pengujian aliran fluida dengan benda uji *low speed wind tunnel* menggunakan fluida berupa udara. Udara dalam kondisi normal merupakan suatu fluida *newtonian*. Yaitu fluida yang mengalami tegangan geser (*shear stress*) berbanding langsung terhadap tingkat deformasi yang terjadi. Pengujian *wind tunnel* sendiri termasuk dalam bahasan bidang dinamika fluida (*fluid dynamics*).

Aliran fluida dapat diklasifikasikan seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Pengujian aliran fluida pada benda uji dalam *low speed wind tunnel* termasuk dalam tipe menurut garis tebal pada Gambar 2.1 yaitu aliran *viscous, incompressible, laminar* dan *external*.



Gambar 2.1 Klasifikasi Aliran Fluida

Wind Tunnel

Wind tunnel atau terowongan angin merupakan salah satu alat percobaan dasar yang cukup penting dalam mempelajari ilmu aerodinamika, namun seiring perkembangan teknologi maka terdapat juga metode lain yang digunakan dalam mempelajari ilmu aerodinamika, yaitu dengan penggunaan simulasi terhadap gaya-gaya aerodinamika menggunakan bantuan komputer, metode ini lebih dikenal sebagai *Computational Fluid Dynamics* atau disingkat sebagai CFD. Perhitungan gaya drag pada benda uji pelat persegi dilakukan secara *experimental* (percobaan) menggunakan alat percobaan berupa *wind tunnel* dengan spesifikasi *low-speed wind tunnel*.

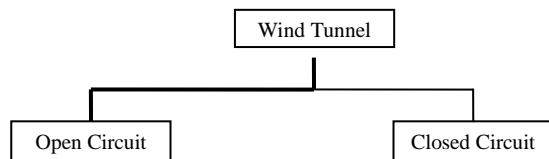
Informasi secara eksperimen sangat diperlukan dalam menyelesaikan masalah-masalah aerodinamika, informasi secara eksperimen dapat dicapai dengan berbagai cara, dari pengujian terbang, pengujian jatuh, terowongan air, tuas berputar, penerbangan roket, uji balistik, serta *subsonic, nearsonic, transonic*,

supersonic, dan *hypersonic wind tunnel* yang semuanya memiliki keunggulan masing-masing.

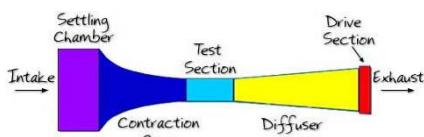
Tipe Wind Tunnel

Ada dua tipe dasar *wind tunnel*. Pertama, disebut *open-circuit* ("Eiffel" atau "NPL") tunnel, tidak memiliki pengarah balik udaranya dapat dilihat pada Gambar 2.3a. Setelah udara meninggalkan *diffuser*, udara tersebut terlepas langsung ke udara bebas. Apabila tunnel mengambil udara langsung dari atmosfer, maka udara yang diambil adalah udara segar yang baru.

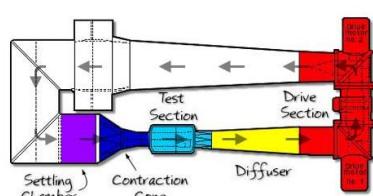
Tipe kedua, disebut *closed-circuit* atau "Prandtl", "Göttingen", atau "return-flow" tunnel Gambar 2.3b, sesuai nama yang terakhir, udara yang keluar dari *diffuser* diarahkan kembali untuk masuk ke *entrance cone*. Tipe *wind tunnel* yang akan digunakan disini adalah tipe *wind tunnel open-circuit* dimana udara yang sudah lewat tidak diarahkan kembali namun langsung menuju udara bebas. Adapun secara garis besarnya ada 2 tipe dasar *wind tunnel* yang dapat dilihat pada Gambar 2.2. Kelebihan dari sistem ini karena lebih ekonomis dan dapat meminimalisir kerugian energi dan turbulensi.



Gambar 2.2 Tipe Wind Tunnel



Gambar 2.3a Open Circuit Tunnel



Gambar 2.3b Closed- Circuit Tunnel

Klasifikasi Wind Tunnel

Wind tunnel diklasifikasikan berdasarkan kecepatan udara yang dihasilkan dari terowongan udara itu sendiri. Terdapat empat jenis *wind tunnel* berdasarkan klasifikasi tersebut. *Subsonic wind tunnel* digunakan pada operasi bilangan Mach yang sangat rendah, dengan kecepatan di *test section* (seksi uji) sampai dengan 400 km/jam ($M = 0,3$). Tipe mereka adalah *open-circuit tunnel*, atau *closed-circuit tunnel*. Udaranya bergerak dengan sistem penggerak yang terbuat dari kipas aksial yang dapat meningkatkan tekanan dinamik untuk mengatasi kerugian viskositas. *High subsonic wind tunnel* ($0,4 < M < 0,75$) atau *Transonic wind tunnel* ($0,75 < M < 1,2$) didesain dengan prinsip yang sama dengan *subsonic wind tunnel*. *Transonic wind tunnel* dapat mencapai kecepatan mendekati kecepatan suara. Kecepatan tertinggi dicapai pada *test section* (seksi uji). *Supersonic wind tunnel* adalah *wind tunnel* yang dapat memproduksi kecepatan supersonik ($1,2 < M < 5$). Untuk memproduksi kecepatan supersonik maka digunakan desain yang tepat dari *convergent divergent nozzle*. *Hypersonic wind tunnel* didesain untuk menghasilkan aliran dengan kecepatan *hypersonic* ($5 < M < 15$) di seksi uji.

| Speed Regime | Typical flow (model) | Nozzle/test section | Compression ratio | Drive system |
|----------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|--------------|
| Subsonic ($M = 0$ to 0.7) | | | 1.0+ | |
| Transonic ($M = 0.7$ to 1.2) | | | 1.1 | |
| Supersonic ($M = 1.2$ to 5) | | | 2 ($M = 2$) | |
| Hypersonic ($M > 5$) | | Nozzle Test section | 20 ($M = 5$) | |

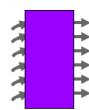
Gambar 2.4 Klasifikasi Wind Tunnel

Bagian-Bagian dari Wind Tunnel

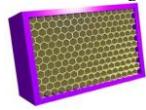
Pada sebuah unit *wind Tunnel* terdapat berbagai macam bagian, namun secara garis besarnya ada lima bagian utama, dibagian paling depan terdapat *settling chamber* yang didalamnya terdapat *honeycomb*, lalu udara masuk melalui *contraction cone* menuju *test section*, lalu udara keluar melalui *diffuser*, dan dibagian belakang terdapat *drive section* yang didalamnya terdapat fan dan motor penggeraknya. Adapun instrumen pendukungnya antara lain *breather*, *corner*, dan sebagai alat ukurnya digunakan *external balance*.

Settling Chamber

Fungsi *settling chamber* yaitu untuk menyeragamkan aliran udara. Karena aliran turbulen dapat menyebabkan gaya menjadi tidak dapat diperkirakan dan diukur di dalam seksi uji. Didalam *settling chamber* terdapat *honeycomb*, yang berfungsi untuk mengembangkan atau menghasilkan aliran udara yang halus pada seksi ujinya sehingga aliran udaranya dapat lebih linier. *Honeycomb* ini harus digunakan karena pengaruhnya dalam mengembangkan aliran udara sangat besar [Alan Pope, 1966]. Pada *wind tunnel* tipe terbaru dengan nilai rasio kontraksi tinggi jarak membutuhkan *honeycomb*, bahkan terkadang pada kasus tertentu *honeycomb* tidak membantu untuk menurunkan turbulensi.



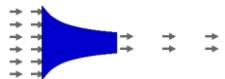
Gambar 2.5 Settling Chamber



Gambar 2.6 Honeycomb

Contraction Cone

Contraction cone berfungsi untuk mengambil udara yang memiliki kecepatan rendah bervolume besar dan menguranginya menjadi udara yang memiliki kecepatan tinggi bervolume kecil. Semakin ukuran *contraction cone* mengecil semakin tinggi kecepatan udaranya.



Gambar 2.7 Contraction Cone

Test Section (Seksi Uji)

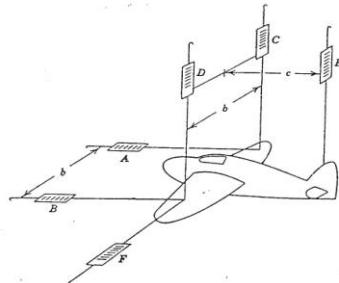
Test section berfungsi sebagai tempat untuk menempatkan model sebuah sayap atau pesawat atau benda yang ingin kita uji. Saat aliran udara berdasarkan kecepatan yang diinginkan, sensor untuk mengukur gaya dalam hal ini *external balance*, seperti gaya *lift* dan *drag* ditempatkan juga di *test section*. *Lift* adalah gaya pada sayap yang berlawanan dengan gaya gravitasi. *Lift* menahan pesawat di udara. *Drag* adalah gaya pada sayap searah dengan aliran udara.



Gambar 2.8 Test Section

Sensor untuk mengukur gaya dalam hal ini *external balance*, seperti gaya *lift* dan *drag* ditempatkan pada di *test section*. Dalam suatu pengujian aerodinamika, selain *lift* (gaya angkat), *drag* (gaya hambatan), dan *pitching moment*, masih terdapat gaya atau momen lain, terutama pada bentuk-bentuk yang mulai rumit seperti pesawat terbang. Gaya atau momen tersebut meliputi *rolling moment*, *yawing moment*, dan *side force*. [Alan Pope, 1966]

Keenam gaya dan momen inilah yang harus dapat ditentukan dan diukur oleh sebuah *balance* dalam sebuah terowongan udara.

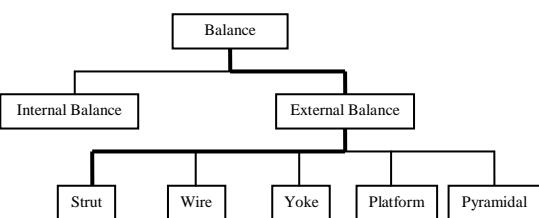


Gambar 2.9 Diagram Wind Tunnel Balance

Keterangan :

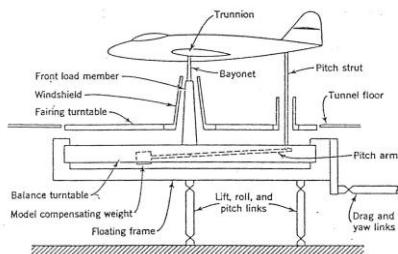
- | | |
|--------------------|---------------------------|
| 1. Lift | $-L = C + D + E$ |
| 2. Drag | $D = A + B$ |
| 3. SideForce | $Y = F$ |
| 4. Rolling Moment | $RM = (C - D) \times b/2$ |
| 5. Yawing Moment | $YM = (A - B) \times b/2$ |
| 6. Pitching Moment | $M = E \times c$ |

Secara umum terdapat dua macam balance yang sering digunakan, pertama adalah *internal balance*, dimana posisinya terletak dalam model atau benda kerja yang nantinya akan mengirim data melalui sistem elektronik, dan yang kedua adalah *external balance*, dimana memiliki beban diluar terowongan udara sebelum dilakukan pengukuran. *External balance* sendiri memiliki lima macam tipe sesuai dengan caranya memegang benda kerja seperti *strut*, *wire*, *yoke*, *platform*, dan *pyramidal*. Adapun *balance* yang nantinya digunakan adalah *external balance* tipe *strut*. Klasifikasi balance dapat dilihat pada Gambar 2.10 berikut ini.



Gambar 2.10 Klasifikasi Balance

Pada *external balance* tipe *strut*, yang menjadi ciri khasnya adalah penggunaan satu atau dua buah *strut* (penyangga) untuk benda kerjanya, sedangkan tipe *platform* juga menggunakan penyangga namun jumlahnya lebih dari dua. Pada *external balance* tipe *strut* memiliki keunggulan yaitu kepresisian yang cukup tinggi, minim terjadinya defleksi, dan biaya yang tidak terlalu mahal.



Gambar 2.11 Contoh Bentuk External Balance Tipe Strut

Diffuser

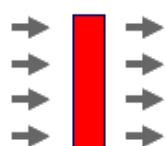
Diffuser berfungsi untuk memperlambat laju udara yang keluar dari seksi uji sebelum menuju keluaran atau dalam *closed-circuit tunnel* untuk sirkulasi kembali. Perlambatan laju udara disebabkan karena bentuk dari *diffuser*.



Gambar 2.12 Diffuser

Drive Section

Drive section berfungsi untuk menyediakan gaya yang dapat menyebabkan udara bergerak melewati terowongan. Gaya ini secara biasanya didapat dari fan yang besar. Sedangkan *wind tunnel* yang membutuhkan kecepatan yang sangat tinggi dan yang dapat menghasilkan angin yang melebihi kecepatan suara dengan menggunakan *pressurized gases* (gas yang ditekan) atau *vacuum cylinders* (silinder vakum).



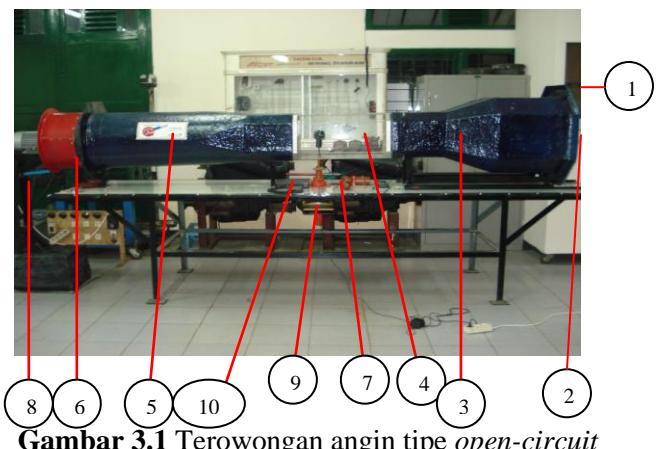
Gambar 2.13 Drive Section



Gambar 2.14. Fan

Deskripsi Wind Tunnel

Dalam pengujian aerodinamika pada benda uji berupa pelat persegi, digunakan terowongan angin tipe *open-circuit* yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Terowongan angin tipe *open-circuit*

Keterangan Gambar:

1. *Settling Chamber*
Settling chamber berfungsi untuk menyeragamkan aliran udara yang masuk menuju *test section*.
2. *Honeycomb*
Honeycomb berfungsi untuk mengembangkan atau menghasilkan aliran udara yang halus pada seksi uji sehingga aliran udaranya dapat lebih linier.
3. *Contraction Cone*
Contraction cone berfungsi untuk mengambil udara yang memiliki kecepatan rendah bervolume besar dan menguranginya menjadi udara yang memiliki kecepatan tinggi bervolume kecil.
4. *Test Section*
Test section berfungsi sebagai tempat untuk menempatkan, sensor untuk mengukur gaya dalam hal ini *external*

- balance*, seperti gaya lift dan drag ditempatkan juga di *test section*.
5. *Diffuser*
Diffuser berfungsi untuk memperlambat laju udara yang keluar dari seksi uji.
 6. *Exhaust Fan*
Exhaust fan berfungsi untuk menyediakan gaya yang dapat menyebabkan udara bergerak melewati terowongan.
 7. *External Balance*
External balance berfungsi untuk mengukur gaya-gaya yang terjadi pada benda uji yang diletakkan di *test section* meliputi gaya *lift* dan gaya *drag*.
 8. Motor Penggerak
Motor penggerak berfungsi sebagai pemberi daya untuk menggerakkan fan dan merupakan satu bagian dengan *drive section*.
 9. Timbangan Digital 1
Timbangan digital 1 berfungsi untuk mengukur gaya *lift* yang terjadi pada benda kerja yang berada di *test section*.
 10. Timbangan Digital 2
Timbangan digital 2 berfungsi untuk mengukur gaya *drag* yang terjadi pada benda kerja yang berada di *test section*.

Settling Chamber

Dalam pengujian ini digunakan *settling chamber* dengan bentuk segi delapan, seperti pada Gambar 3.2. Bagian dalam dari *settling chamber* dicat dan di pernis untuk mengurangi gesekan permukaan sehingga dapat mengurangi terjadinya turbulensi di daerah permukaan. *Honeycomb* berbentuk lingkaran. *Contraction cone* juga dicat dan di pernis untuk mengurangi gesekan permukaan.



Gambar 3.2 Settling Chamber

Test Section

Pada seksi uji ini karena bentuknya menyerupai dengan ducting maka bentuknya pun mengikuti bentuk segi delapan dari *contraction*

cone. Bahan yang digunakan adalah akrilik transparan 5 mm yang diperkuat pelat aluminium di kedua sisinya. Dibagian bawahnya terdapat celah untuk memasukkan benda uji dan anemometer.



Gambar 3.3 Test Section

External Balance

Dalam aliran udara pada wind tunnel ini, benda akan memiliki gaya-gaya dan momen yang bekerja diukur dengan *external balance* yang kemudian diteruskan pada 2 buah timbangan digital, sehingga didapat besaran dalam skala berat. Adapun yang harus diperhatikan dalam instalasinya adalah kerataan dari tuas tuas penekannya.



Gambar 3.4 External Balance

Anemometer

Untuk mengukur kecepatan udara dalam *wind tunnel*, anemometer yang digunakan dalam pengujian ini adalah anemometer digital Lutron AM-4206 dengan spesifikasi sebagai berikut:

Air Velocity Range: 0,4-25,00 m/s
Resolution: 0,01 m/s
Accuracy: $\pm(2\% + 0,2 \text{ m/s})$
Air Temperature Range: 0°-50°C
Power Consumption: Approx DC 8,3 mA



Gambar 3.5 Anemometer

Timbangan Digital



Gambar 3.6 Timbangan digital TIF 9010A

Adapun spesifikasi dari timbangan digital TIF 9010A series adalah sebagai berikut:
 Capacity / Weighing Range : 0,000 to 55,000 kg
 Normal Resolution : 2 gram
 Accuracy : $\pm 0,5\%$ of reading ± 1 digit
 Power Supply : one 9V alkaline battery.
 Operating Temperature : 0°C - 49°C

**Gambar 3.7** Timbangan digital Sartorius Basic B310S

Spesifikasi dari timbangan digital sartorius basic B 310 S series adalah sebagai berikut:
 Capacity / Weighing Range : 310 gram
 Readability : 0,001 gram
 Tare Range : 310 gram
 Standard Deviation : $\pm 0,001$ gram
 Stabilization Time : 2 second
 Ambient Temperature Range: 0° - 40° C
 Allowable Humidity : 15 - 85 %
 Pan Size : Ø130 mm

Benda Uji

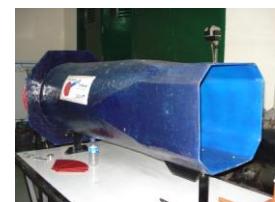
Benda uji yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah pelat persegi dengan spesifikasi sebagai berikut

| | |
|---------|--------------------|
| Dimensi | : 70 x 70 mm |
| | (pelat persegi) |
| Bahan | : Galvanized Metal |
| Berat | : 70 gram |

**Gambar 3.8** Benda uji pelat persegi datar

Diffuser

Pada *diffuser* ini karena bentuknya menyatu dengan *test section* maka bentuknya pun mengikuti bentuk segi delapan dari *test section*. Bahan yang digunakan adalah fiber glass yang dilapisi cat dan di pernis untuk mengurangi gesekan permukaan.

**Gambar 3.9** Diffuser

Exhaust Fan

Untuk mengalirkan udara dari luar masuk kedalam seksi uji digunakan *exhaust fan*, dimana digunakan motor dinamo dengan karakteristik sebagai berikut:

| | |
|-------------|-----------------|
| Merk | : POWER |
| Tipe | : 3 Phase AC |
| Serial | : Y90L-2 |
| Speed | : 2840 rpm |
| Daya | : 3 HP |
| Volt/Ampere | : 380 V / 4,8 A |

**Gambar 3.10** Exhaust Fan

Pengujian

Prosedur Pengujian

Langkah Langkah yang dilakukan dalam pengujian gaya drag pada pelat persegi adalah sebagai berikut :

1. Menghitung keadaan awal pada laboratorium. Meliputi: temperatur udara, kelembaban udara, tekanan udara, kerapatan udara, dan koefisien viskositas.
2. Memasang anemometer pada titik tengah dari seksi uji
3. Melakukan penyetelan pada *damper* untuk mendapatkan kecepatan yang dikehendaki.
4. Menyalakan *fan*.
5. Membaca kecepatan yang terbaca pada anemometer.
6. Mematikan *fan*.
7. Melepas anemometer.
8. Memasang *strut* pada dudukan atas *external balance*, kencangkan baut pengunci.
9. Melakukan *leveling* pada kedua sumbu *external balance* dengan mengacu pada dua buah *waterpass* yang berada di bagian atas dengan mengatur dua buah bandul pemberat yang berada pada sisi berlawanan dari batang penekan.

10. Menurunkan baut penekan pada batang penekan *external balance* hingga menyentuh permukaan timbangan digital.
11. Melakukan setting nol pada timbangan
12. Menghidupkan motor dinamo, tunggu sesaat hingga alirannya stabil.
13. Membaca gaya yang tertera pada timbangan digital TIF 9010A. Ambil 5 sampel data.
14. Mematikan kipas.
15. Memasang model pelat persegi ke *strut*-nya.
16. Mengulangi langkah 11 sampai 15 untuk mengukur gaya *drag* pada pelat persegi.
17. Mengulangi langkah 2 sampai 16 untuk 10 macam variasi kecepatan yang lain.

Data Pengujian

Data hasil pengujian digunakan sebagai data untuk melakukan perhitungan dan hasil perhitungan tersebut nantinya digunakan sebagai acuan untuk menghasilkan analisa. Data pengujian ini memiliki 11 variasi kecepatan dengan range antar 10 m/s sampai dengan 20 m/s yang pada masing-masing variasi kecepatan diambil 5 sampel data yang terbaca pada timbangan digital. Tabel 4.1 memberikan informasi kepada kita bahwa variasi kecepatan yang berbeda dapat menghasilkan besar gaya yang berbeda berdasarkan tingkat kecepatan yang melewati benda kerja.

Tabel 4.1 Data Pengujian

Variasi 1

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 20.73 | 236 | 28 |
| 20.66 | 236 | 28 |
| 20.74 | 234 | 26 |
| 20.66 | 234 | 28 |
| 20.67 | 232 | 26 |
| 20.692 | 234.4 | 27.2 |

Variasi 3

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 18.6 | 194 | 20 |
| 18.67 | 194 | 20 |
| 18.72 | 194 | 22 |
| 18.78 | 192 | 22 |
| 18.75 | 192 | 22 |
| 18.704 | 193.2 | 21.2 |

Variasi 5

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 16.31 | 144 | 16 |
| 16.4 | 142 | 18 |
| 16.44 | 142 | 16 |
| 16.42 | 142 | 16 |
| 16.48 | 144 | 16 |
| 16.41 | 142.8 | 16.4 |

Variasi 2

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 19.86 | 216 | 24 |
| 19.78 | 218 | 24 |
| 19.79 | 216 | 22 |
| 19.82 | 214 | 24 |
| 19.76 | 214 | 24 |
| 19.802 | 215.6 | 23.6 |

Variasi 4

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 17.17 | 154 | 18 |
| 17.2 | 158 | 20 |
| 17.25 | 152 | 20 |
| 17.23 | 150 | 18 |
| 17.22 | 150 | 20 |
| 17.214 | 152.8 | 19.2 |

Variasi 6

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 15.33 | 128 | 14 |
| 15.48 | 126 | 14 |
| 15.43 | 126 | 16 |
| 15.38 | 126 | 14 |
| 15.46 | 128 | 14 |
| 15.416 | 126.8 | 14.4 |

Variasi 7

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 14.22 | 106 | 10 |
| 14.3 | 108 | 12 |
| 14.31 | 108 | 14 |
| 14.34 | 106 | 12 |
| 14.37 | 108 | 12 |
| 14.308 | 107.2 | 12 |

Variasi 8

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 13.79 | 102 | 10 |
| 13.79 | 100 | 10 |
| 13.8 | 100 | 12 |
| 13.71 | 100 | 12 |
| 13.86 | 102 | 10 |
| 13.79 | 100.8 | 10.8 |

Variasi 9

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 12.29 | 82 | 8 |
| 12.37 | 80 | 8 |
| 12.38 | 82 | 10 |
| 12.43 | 80 | 10 |
| 12.39 | 80 | 10 |
| 12.372 | 80.8 | 9.2 |

Variasi 10

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 11.69 | 70 | 8 |
| 11.7 | 72 | 10 |
| 11.78 | 70 | 8 |
| 11.82 | 72 | 8 |
| 11.76 | 72 | 8 |
| 11.75 | 71.2 | 8.4 |

Variasi 11

| Kecepatan (m/s) | W Total (gram) | Wstrut (gram) |
|-----------------|----------------|---------------|
| 10.21 | 58 | 4 |
| 10.15 | 58 | 4 |
| 10.22 | 56 | 4 |
| 10.26 | 58 | 4 |
| 10.24 | 58 | 4 |
| 10.216 | 57.6 | 4 |

Pengolahan Data Pengujian

Data hasil pengujian memerlukan pengolahan lebih lanjut dikarenakan hasil yang tertera dalam timbangan bukan hasil akhir. Data tersebut akan dikonversikan ke dalam gaya yang sebenarnya terjadi pada benda uji pelat persegi.

Perhitungan Gaya Terbaca Pada Alat Ukur

Dari Tabel 4.1 yaitu data pengujian, didapatkan rata-rata kecepatan dari masing-masing variasi kecepatan dan rata-rata gaya yang diterima oleh timbangan digital dalam satuan gram, bila dikonversikan ke dalam skala Newton dengan gaya gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$ sehingga didapatkan nilai sebagai berikut:

Tabel 4.2 Gaya Terbaca Pada Alat Ukur

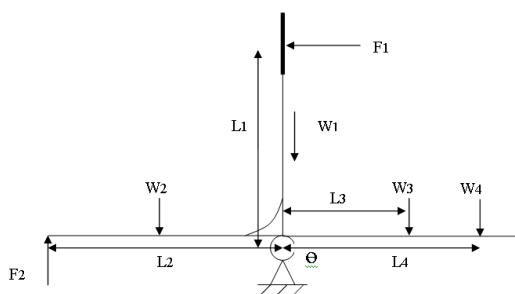
Gaya Terbaca pada alat ukur

| m total (g) | m strut (g) | m pelat (g) | F _d total (N) | F _d strut (N) | F _d pelat (N) |
|-------------|-------------|-------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 57.60 | 4.00 | 53.60 | 0.565056 | 0.039240 | 0.525816 |
| 71.20 | 6.00 | 65.20 | 0.698472 | 0.058860 | 0.639612 |
| 80.00 | 6.80 | 73.20 | 0.784800 | 0.066708 | 0.718092 |
| 100.80 | 8.00 | 92.80 | 0.988848 | 0.078480 | 0.910368 |
| 107.20 | 9.20 | 98.00 | 1.051632 | 0.090252 | 0.96138 |
| 126.80 | 10.80 | 116.00 | 1.243908 | 0.105948 | 1.13796 |
| 142.80 | 12.40 | 130.40 | 1.400868 | 0.121644 | 1.279224 |
| 152.80 | 14.40 | 138.40 | 1.498968 | 0.141264 | 1.357704 |
| 192.80 | 16.80 | 176.00 | 1.891368 | 0.164808 | 1.726656 |
| 215.60 | 20.00 | 195.60 | 2.115036 | 0.196200 | 1.918836 |
| 234.40 | 24.40 | 210.00 | 2.299464 | 0.239364 | 2.0601 |

Keterangan : m=gaya dalam gram

Dari diagram benda bebas *external balance* dibawah ini dapat diperhitungkan gaya aktual yang terjadi pada benda kerja dengan

mengambil titik acuan pada titik pusat benda uji *pelat persegi*.



Gambar 4.1. Diagram Benda Bebas *External Balance*

Dimana :

F_1 = Gaya aktual pada benda kerja

F_2 = Gaya terbaca pada alat ukur

L_1 = Jarak titik pusat *pelat persegi* dengan titik tumpu Θ

L_2 = Jarak batang penekan dengan titik tumpu Θ

L_3 = Jarak pusat berat batang penyeimbang dgn titik tumpu Θ

L_4 = Jarak titik berat bandul penyeimbang dgn titik tumpu Θ

W_1 = Berat keseluruhan sistem pada sumbu y

W_2 = Berat batang penekan

W_3 = Berat batang penyeimbang

W_4 = Berat bandul penyeimbang

Dengan diasumsikan bahwa sistem dalam keadaan setimbang, sehingga persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\Sigma M_\Theta = 0$$

$$F_1 L_1 + \frac{1}{2} W_2 L_2 = F_2 L_2 + W_3 L_3 + W_4$$

L_4

Dikarenakan dilakukan reset pada timbangan sesudah *leveling* maka gaya berat yang dikarenakan berat batang penekan tidak diperhitungkan, sehingga persamaannya menjadi:

$$F_1 L_1 = F_2 L_2$$

Dimana besar $L_1 = 0,320$ meter

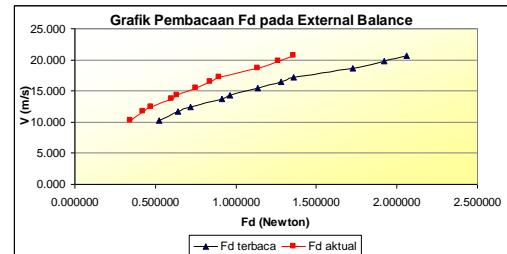
$$L_2 = 0,211 \text{ meter}$$

Sehingga didapatkan nilai F_D aktual seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.3

Gaya Terbaca dan Aktual Pada Benda Kerja

| TERBACA | | | AKTUAL | | |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| FD total (N) | FD strut (N) | FD PELAT (N) | FD total (N) | FD strut (N) | FD PELAT (N) |
| 0.565056 | 0.03924 | 0.525816 | 0.372583800 | 0.025873875 | 0.346709925 |
| 0.698472 | 0.05886 | 0.639612 | 0.460554975 | 0.038810813 | 0.421744163 |
| 0.784800 | 0.06671 | 0.718092 | 0.517477500 | 0.043985588 | 0.473491913 |
| 0.988848 | 0.07848 | 0.910368 | 0.652021650 | 0.05174775 | 0.6002739 |
| 1.051632 | 0.09025 | 0.961380 | 0.693419850 | 0.059509913 | 0.633909938 |
| 1.243908 | 0.10595 | 1.137960 | 0.820201838 | 0.069859463 | 0.750342375 |
| 1.400868 | 0.12164 | 1.279224 | 0.923697338 | 0.080209013 | 0.843488325 |
| 1.498968 | 0.14126 | 1.357704 | 0.988382025 | 0.09314595 | 0.895236075 |
| 1.891368 | 0.16481 | 1.726560 | 1.247120775 | 0.108670275 | 1.1384505 |
| 2.115036 | 0.19620 | 1.918836 | 1.394601863 | 0.129369375 | 1.265232488 |
| 2.299464 | 0.23936 | 2.060100 | 1.516209075 | 0.157830638 | 1.358378438 |



Grafik 4.1. Perbandingan Gaya Drag Terbaca Dengan Gaya Drag Aktual Pada Sistem *External Balance*

Perhitungan Koefisien Drag dan Bilangan Reynolds

Untuk menentukan koefisien drag dan bilangan Reynolds, hal yang pertama harus kita ketahui adalah besar densitas udara dengan menggunakan persamaan:

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

dengan nilai $P = 92300 \text{ kg/s}^2$

$$R = 287 \text{ kg/m}^\circ\text{K}$$

$$T = 301 \text{ K}$$

Sehingga didapat nilai $\rho = 1,068 \text{ kg/m}^3$

Lalu menentukan besar koefisien viskositas udara dengan menggunakan persamaan:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{To} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{To + 110}{T + 110} \right)$$

Sehingga didapat nilai $\mu = 1,1173 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$

Kemudian menentukan debit aliran udara dengan menggunakan persamaan:

$$q = \frac{\rho V^2}{2}$$

Dari perhitungan diatas digunakan untuk menghitung Re dan C_d dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$ = $\rho L/\mu \times V$ dimana $\rho L/\mu$ untuk kondisi *steady* merupakan suatu tetapan, sehingga untuk pelat persegi Re didapat :

$$Re = 6691.13 \times V$$

$$Cd = \frac{Fd}{qA}$$
 di dapat dari

$$Fd = Cd \times qA \text{ dimana } q = \frac{\rho V^2}{2} \text{ sehingga}$$

$$Fd = Cd \frac{\rho V^2}{2} A$$

Sehingga didapatkan nilai Re dan Cd pada masing-masing variasi kecepatan adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4. Tabel perhitungan Re dan Cd

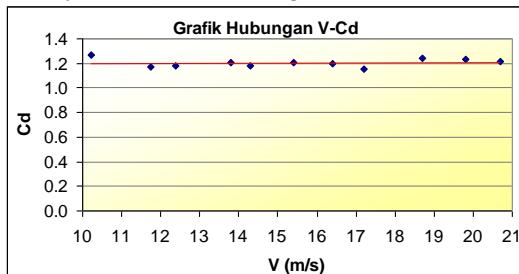
| Variasi | V_{rata}^1 (m/s) | q (kg/ms ²) | Re | F_d pelat (N) | Cd pelat |
|---------|--------------------|---------------------------|---------------|-----------------|-------------|
| 1 | 10.216 | 55.731794 | 68356.584080 | 0.346709925 | 1.269600745 |
| 2 | 11.75 | 73.725375 | 78620.777500 | 0.421744163 | 1.167443872 |
| 3 | 12.372 | 81.737449 | 82782.660360 | 0.473491913 | 1.182212115 |
| 4 | 13.79 | 101.547629 | 92270.682700 | 0.6002739 | 1.206378507 |
| 5 | 14.308 | 109.319873 | 95736.688040 | 0.633909938 | 1.183402167 |
| 6 | 15.416 | 126.906732 | 103150.460080 | 0.750342375 | 1.206642821 |
| 7 | 16.41 | 143.799845 | 109801.443300 | 0.843488325 | 1.197083863 |
| 8 | 17.214 | 158.235839 | 115181.111820 | 0.895236075 | 1.154613524 |
| 9 | 18.704 | 186.814355 | 125150.895520 | 1.1384505 | 1.243677644 |
| 10 | 19.802 | 209.391655 | 132497.756260 | 1.265232488 | 1.233147099 |
| 11 | 20.692 | 228.636833 | 138452.861960 | 1.358378438 | 1.212490941 |

Analisa

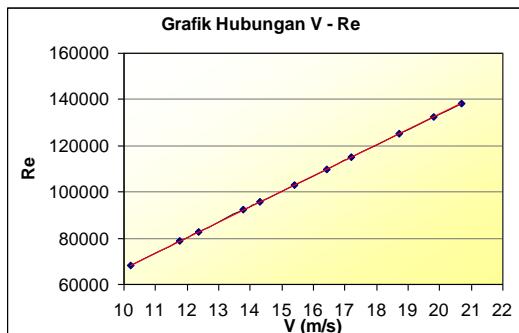
Dari Tabel 4.4, dapat dilihat bahwa gaya drag meningkat seiring dengan pertambahan kecepatan. Sedangkan untuk koefisien drag mengalami kenaikan yang cukup kecil seiring dengan makin tingginya kecepatan. Hal ini disebabkan oleh makin besarnya bilangan Reynolds ketika kecepatannya bertambah. Hal ini dapat dilihat pada Grafik 4.3 hubungan kecepatan dan bilangan Reynolds, dimana antara kecepatan dan bilangan Reynolds berbanding lurus.

Peningkatan nilai koefisien drag tersebut dapat dilihat pada Grafik 4.2. Dari referensi sendiri seharusnya koefisien drag untuk pelat persegi dikatakan konstan atau tetap, yaitu pada saat bilangan Reynolds (berdasarkan dari tinggi dimensi pelat) lebih dari 10^3 , koefisien drag dapat dikatakan tidak terpengaruh oleh bilangan Reynolds hal ini dikarenakan adanya titik separasi yang tetap pada geometri. Pada benda dengan bentuk pelat persegi besarnya gaya drag yang terjadi seluruhnya adalah murni di

karenakan oleh tahanan bentuk, gaya tersebut berasal dari koefisien tekanan negatif yang timbul pada bagian depan pelat, meskipun sebenarnya terjadi gaya tarik viskos, namun gaya tarik viskos tersebut hanya bekerja pada permukaan pelat, sehingga tidak ada komponen gaya dorong depan untuk memungkinkan timbulnya *skin-friction* drag..

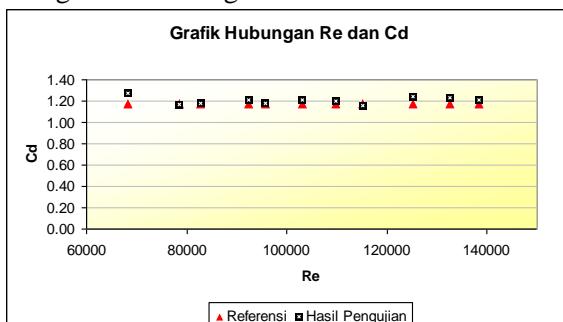


Grafik 4.2 Hubungan Kecepatan dan Koefisien Drag



Grafik 4.3 Grafik Hubungan Kecepatan dan Bilangan Reynolds

Dari pengolahan data pengujian didapatkan grafik hubungan antara bilangan Reynold dan koefisien drag yang cenderung mengalami kenaikan cukup kecil atau dapat dikatakan konstan yang sesuai dengan referensi yaitu pada saat bilangan Reynolds (berdasarkan dari tinggi dimensi pelat) lebih dari 10^3 , koefisien drag dapat dikatakan tidak terpengaruh oleh bilangan. Hal ini digambarkan dalam Grafik 4.4.

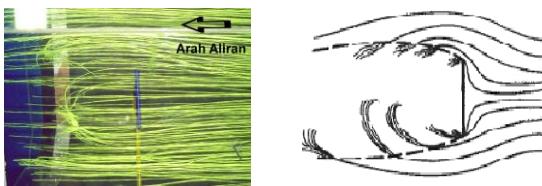


Grafik 4.4 Hubungan Antara Koefisien Drag dan Bilangan Reynolds

Visualisasi Aliran

Di samping melakukan perhitungan gaya drag pada benda uji, dilakukan juga pengujian visualisasi aliran. Visualisasi aliran dilakukan dengan menggunakan benang yang disusun pada *grid-grid*, seperti terlihat pada gambar 4.2, sehingga pada saat benda uji terkena aliran angin dapat terlihat pola aliran di sekitar benda uji tersebut. Dari hasil visualisasi ini kemudian dilakukan perbandingan hasil visualisasi percobaan dengan visualisasi dari referensi untuk mengetahui jenis aliran yang terjadi beserta fenomena-fenomena aliran lainnya, seperti *wake* serta pola aliran pada benda uji dengan bentuk pelat persegi.

Adapun hasil dari visualisasi dari pelat persegi dapat dilihat pada gambar 4.3. Pada gambar tersebut dapat dilihat pola aliran sebelum mengenai benda kerja berbentuk segaris dengan pola yang rapi yang menunjukkan bahwa aliran yang terjadi pada wind tunnel merupakan aliran yang sudah *laminar*. Kemudian setelah pola aliran mengenai benda uji, maka dapat diketahui pola aliran pada pelat persegi tersebut. Di belakang pelat persegi terjadi *wake* yang ditandai dengan pola aliran yang tidak teratur serta turbulensi pada belakang pelat tipis persegi yang menunjukkan adanya aliran balik pada belakang pelat persegi tersebut.



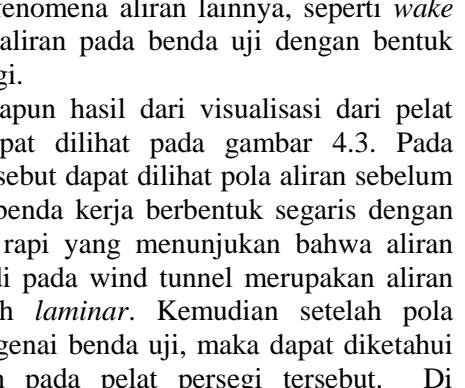
Gambar 4.2 Perbandingan visualisasi aliran pada pelat persegi hasil percobaan dengan visualisasi aliran pada referensi.

Kesimpulan

- ## Visualisasi Aliran

Di samping melakukan perhitungan gaya drag pada benda uji, dilakukan juga pengujian visualisasi aliran. Visualisasi aliran dilakukan dengan menggunakan benang yang disusun pada *grid-grid*, seperti terlihat pada gambar 4.2, sehingga pada saat benda uji terkena aliran angin dapat terlihat pola aliran di sekitar benda uji tersebut. Dari hasil visualisasi ini kemudian dilakukan perbandingan hasil visualisasi percobaan dengan visualisasi dari referensi untuk mengetahui jenis aliran yang terjadi beserta fenomena-fenomena aliran lainnya, seperti *wake* serta pola aliran pada benda uji dengan bentuk pelat persegi.

Adapun hasil dari visualisasi dari pelat persegi dapat dilihat pada gambar 4.3. Pada gambar tersebut dapat dilihat pola aliran sebelum mengenai benda kerja berbentuk segaris dengan pola yang rapi yang menunjukkan bahwa aliran yang terjadi pada wind tunnel merupakan aliran yang sudah *laminar*. Kemudian setelah pola aliran mengenai benda uji, maka dapat diketahui pola aliran pada pelat persegi tersebut. Di belakang pelat persegi terjadi *wake* yang ditandai dengan pola aliran yang tidak teratur serta turbulensi pada belakang pelat tipis persegi yang menunjukkan adanya aliran balik pada belakang pelat persegi tersebut.



Gambar 4.2 Perbandingan visualisasi aliran pada pelat persegi hasil percobaan dengan visualisasi aliran pada referensi.

Kesimpulan

 1. Dari hasil pengujian aerodinamika pada pelat persegi dengan dimensi 70x70 mm dengan variasi kecepatan 10.21 m/s sampai dengan 20.69 m/s didapat nilai koefisien drag dengan *range* 1.16 s/d 1.27, dengan nilai koefisien drag rata-rata sebesar 1.20.
 2. Dari perhitungan diketahui bahwa nilai koefisien drag pada benda uji pelat persegi secara pengujian dan teoritis tidak tergantung secara signifikan terhadap bilangan Reynolds dan Kecepatan.
 3. Dari perhitungan diketahui bahwa untuk variasi kecepatan antara 10.21 m/s sampai dengan 20.69 m/s maka bilangan Reynoldsnya berkisar antara 68000 sampai dengan 139000, dimana pada kisaran bilangan Reynolds ini aliran yang terjadi adalah aliran *laminar*.
 4. Dari percobaan visualisasi aliran dengan menggunakan benang, diketahui bentuk pola aliran pada benda uji pelat persegi sesuai dengan referensi.

Saran

 1. Penggunaan *damper* sebagai pengatur kecepatan sangat berpengaruh pada besarnya getaran pada *wind tunnel* yang juga berpengaruh pada pembacaan timbangan, sehingga perlu ditambahkan sistem peredaman pada dudukan *fan* maupun meja.
 2. Untuk pengembangannya nanti, akan lebih baik jika dilengkapi dengan *smoke generator*, sehingga dapat diketahui visualisasi aliran yang lebih jelas.

Daftar Pustaka

 1. Anderson, John D. *Fundamental Of Aerodynamics*. McGraw-Hill Book Companies Inc. Singapore, 1991.
 2. Fox, Robert W and Alan T. Mc Donald, *Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition, SI Version*. John Wiley & Sons Inc. Canada, 1994.
 3. Houghton, E.L, *Aerodynamics for engineering students, 5th edition*. Butterworth-Heinemann, 2003.
 4. Gerhart, Philip M. and Gross, Richard J., *Fundamental Of Fluid Mechanics*, 1985.
 5. Pope, Alan and John J. Harper. *Low Speed Wind Tunnel*, John Wiley & Sons, Inc. Canada, 1966.
 6. White, Frank M. *Fluid Mechanics, 3rd. Edition*, McGraw-Hill Inc. 1994.
 7. "Advanced Topics in Aerodynamics: The Wind Tunnel" (2003). diambil pada 25 Januari 2007: <http://aerodyn.org/WindTunnel/>
 8. "Aerodynamics" (2007). Answers Corporation. diambil pada 25 Januari 2007: <http://www.answers.com/topic/Aerodynamic>

Saran

1. Penggunaan *damper* sebagai pengatur kecepatan sangat berpengaruh pada besarnya getaran pada *wind tunnel* yang juga berpengaruh pada pembacaan timbangan, sehingga perlu ditambahkan sistem peredaman pada dudukan *fan* maupun meja.
 2. Untuk pengembangannya nanti, akan lebih baik jika dilengkapi dengan *smoke generator*, sehingga dapat diketahui visualisasi aliran yang lebih jelas.

Daftar Pustaka

1. Anderson, John D. *Fundamental Of Aerodynamics*. McGraw-Hill Book Companies Inc. Singapore, 1991.
 2. Fox, Robert W and Alan T. Mc Donald, *Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition, SI Version*. John Wiley & Sons Inc. Canada, 1994.
 3. Houghton, E.L, *Aerodynamics for engineering students, 5th edition*. Butterworth-Heinemann, 2003.
 4. Gerhart, Philip M. and Gross, Richard J., *Fundamental Of Fluid Mechanics*, 1985.
 5. Pope, Alan and John J. Harper. *Low Speed Wind Tunnel*, John Wiley & Sons, Inc. Canada, 1966.
 6. White, Frank M. *Fluid Mechanics, 3rd. Edition*, McGraw-Hill Inc. 1994.
 7. “Advanced Topics in Aerodynamics: The Wind Tunnel” (2003). diambil pada 25 Januari 2007: <http://aerodyn.org/WindTunnel/>
 8. “Aerodynamics” (2007). Answers Corporation. diambil pada 25 Januari 2007: <http://www.answers.com/topic/Aerodynamic>