



# KALIBRASI ANEMOMETER

- Hot-wire Anemometer
- Vane Anemometer

Disampaikan oleh  
Ahmad Atsari Sujud

# APLIKASI

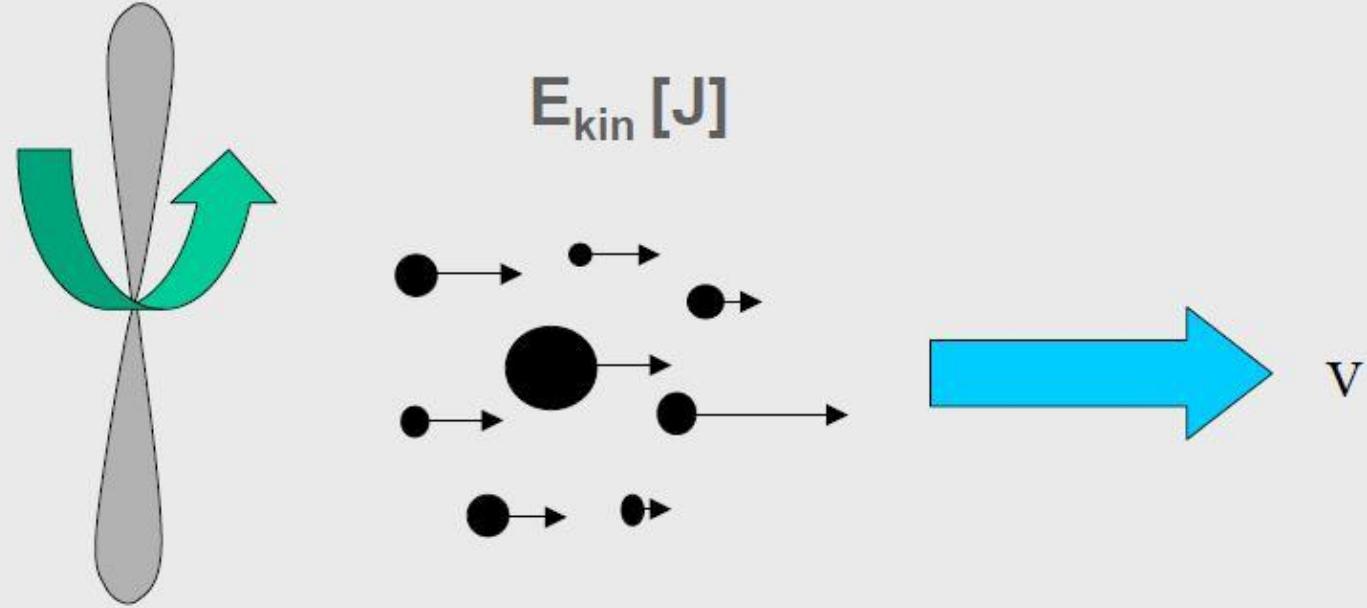




APLIKASI

BTMETER BT-866A

Air = Mixture of gas molecules ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar,  $CO_2$ , ...)



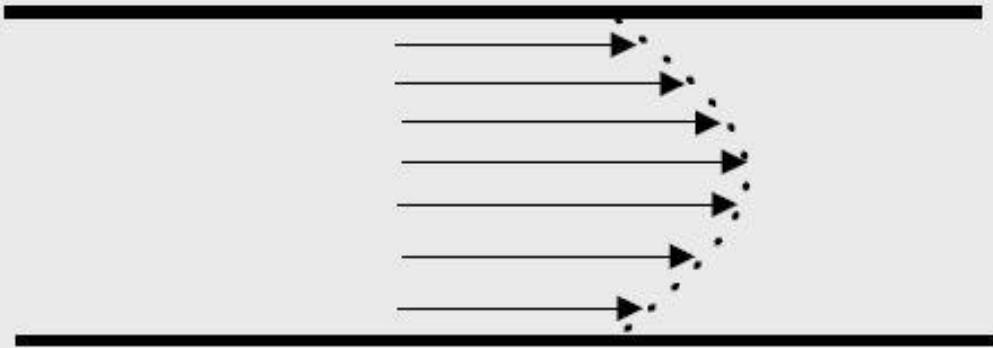
Air velocity  $v$  [m/s] =

mean travelled distance per time of an air molecule

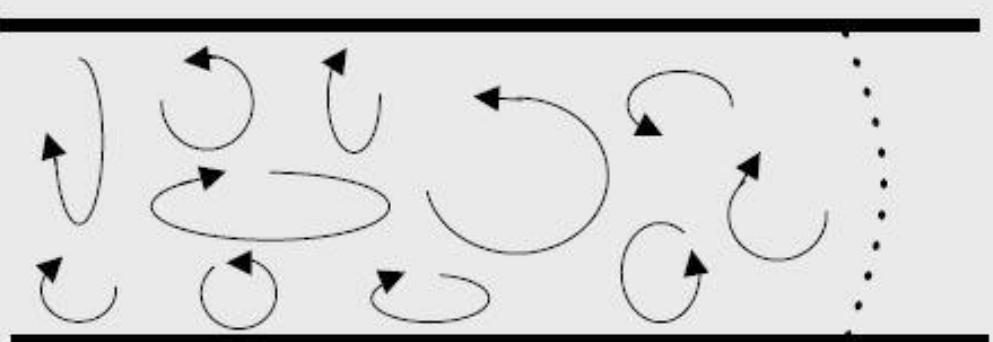
PENGUKURAN  
LAJU ALIR  
UDARA

(Air Flow  
*anemometer*  
Measurement)

„low“ velocity → regular (“ laminar ”) flow

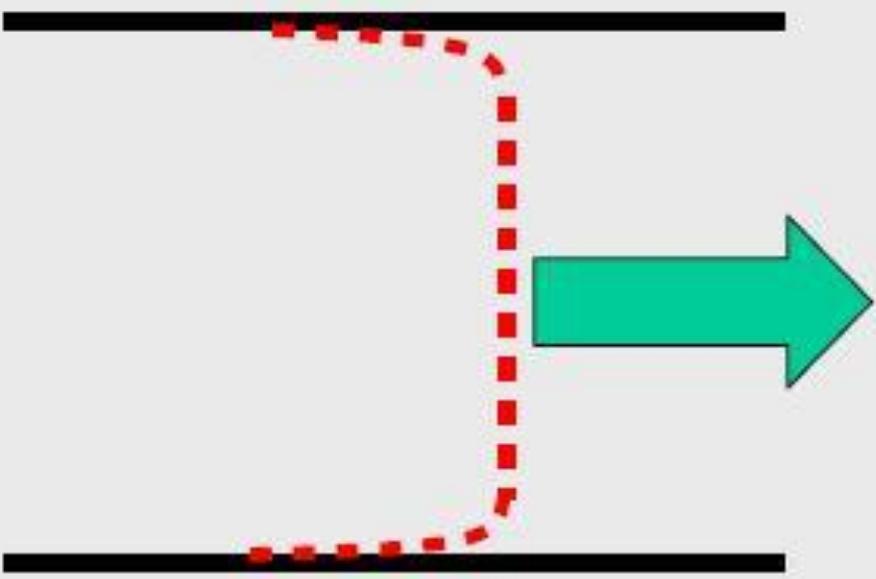


„high“ velocity → irregular (“ turbulent flow ”)



PENGUKURAN  
LAJU ALIR  
UDARA  
(Air Flow  
Measurement)

## PENGUKURAN LAJU ALIR UDARA



**special tunnel design for  
laminar, uniform flow in  
test section**

(Air Flow Measurement)

# TUJUAN

- Panduan Kalibrasi EURAMET ini adalah untuk menguraikan persyaratan teknis dasar untuk kalibrasi Thermal Anemometers (TA) untuk laboratorium kalibrasi dan untuk badan akreditasi.
- Pedoman ini memberi pengguna TA informasi dasar yang diperlukan untuk menetapkan dan menerapkan prosedur kalibrasi. Pedoman ini berlaku untuk semua jenis TA dan terbatas pada aplikasi kalibrasi di udara.

Guidelines on the Calibration  
of Solid Anemometers  
Part 2: Thermal Anemometers  
EURAMET Calibration Guide No. 25  
Version 1.0 (02/2021)



## UMUM

**Kalibrasi dilakukan dalam peralatan kalibrasi yang sesuai, mis. terowongan angin (wind tunnel), tangki penarik (towing tank) atau lengan berputar (rotating arm), di mana kecepatan diukur dengan instrumen referensi atau metode referensi.**

**Tujuan kalibrasi adalah untuk menentukan baik deviasi kecepatan ( $\Delta v$ ) antara referensi dan TA atau koefisien kalibrasi (KTA) dari TA sesuai dengan Persamaan (1) atau (2). Deviasi kecepatan ( $\Delta v$ ) atau koefisien kalibrasi (KTA) harus ditentukan di seluruh rentang kalibrasi.**

$$\Delta v = v_{TA} - v_{reference} \quad (1)$$

$$K_{TA} = \frac{v_{reference}}{v_{TA}} \quad (2)$$

**Dimana :**

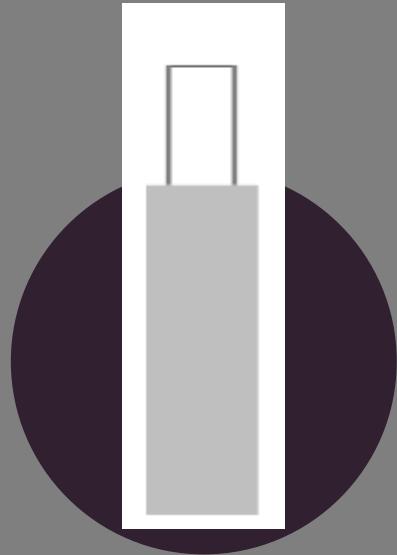
$v_{TA}$  adalah kecepatan yang diukur oleh TA (m/s)

$v_{reference}$  adalah kecepatan referensi yang diukur dengan perangkat atau metode referensi (m/s).

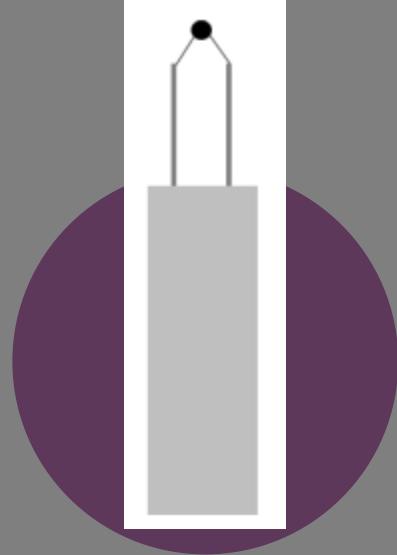
# JENIS THERMAL ANEMOMETER

- Jenis TA yang paling umum adalah anemometer bola panas (hot-ball), kawat panas (hot-wire), dan film panas (hot-film).
- Prinsip kerja utama mereka adalah pendinginan resistensi yang dipanaskan secara listrik oleh aliran udara. Ini memberikan hubungan antara daya yang disimpan (deposited power) dan kecepatan aliran.
- Dengan anemometer bola panas, dimungkinkan untuk merekam besaran kecepatan tanpa memperhatikan arah aliran, sementara anemometer kawat panas tunggal dan film panas tunggal merekam hanya satu komponen. Oleh karena itu, anemometer kawat panas dan film panas menunjukkan ketergantungan orientasi.

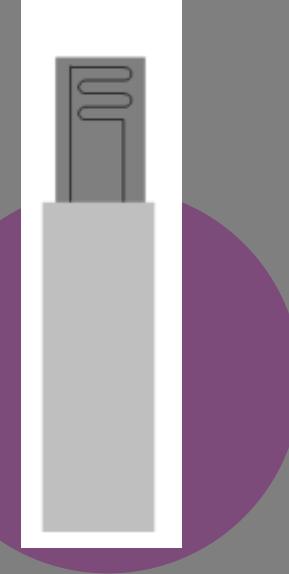
# TAMPILAN SKEMATIS



ANEMOMETER BOLA  
PANAS (HOT-BALL)



ANEMOMETER  
KAWAT PANAS (HOT-  
WIRE)



ANEMOMETER FILM  
PANAS (HOT-FILM)



## ANEMOMETER TERMAL DENGAN KELUARAN DIGITAL DALAM SATUAN KECEPATAN

TA dianggap sebagai alat ukur lengkap yang pengukurannya langsung dikonversi dan ditampilkan dalam satuan kecepatan. Jika koreksi untuk tekanan aktual, suhu dan kelembaban udara dimasukkan dalam pembacaan meter, maka  $v_{TA}$ , diganti dengan  $v_{display}$  dalam hasil kalibrasi menurut Persamaan (1) atau (2).

$$v_{TA} = v_{display} \quad (3)$$

**Dimana :**

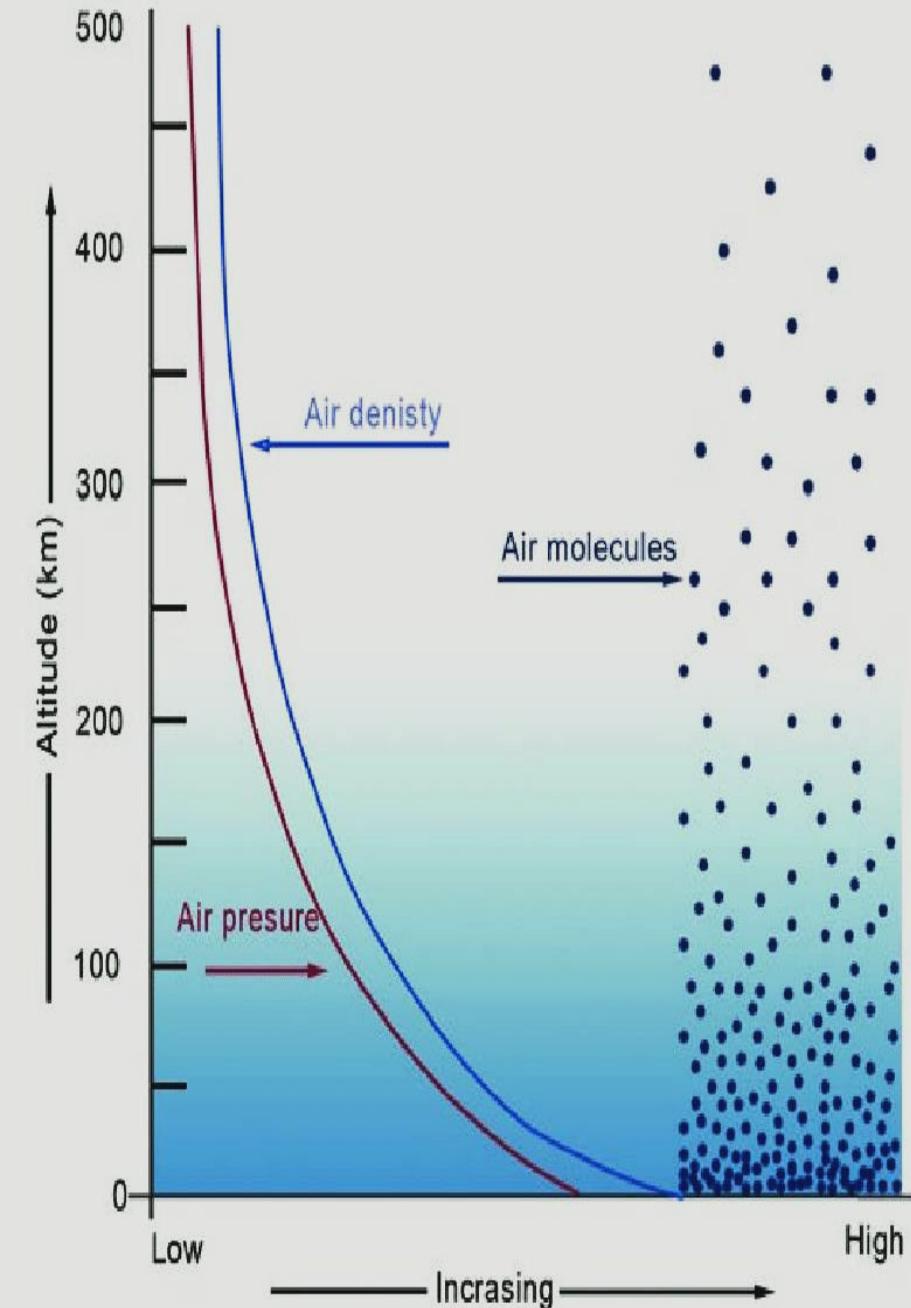
$v_{TA}$  adalah kecepatan yang ditunjukkan oleh perangkat yang dikoreksi untuk kondisi suhu, tekanan, dan kelembapan yang sebenarnya

$v_{reference}$  adalah output kecepatan dari tampilan perangkat

## ANEMOMETER TERMAL DENGAN OUTPUT ANALOG DALAM SATUAN TEGANGAN, ARUS, ATAU FREKUENSI

Untuk TA, output analog biasanya ditentukan dalam satuan tegangan, arus atau frekuensi. Jika output analog digunakan, maka kontribusi ketidakpastian tambahan dari konversi analog ke digital atau metode pembacaan ke anggaran ketidakpastian harus dipertimbangkan.

*Jika koreksi untuk kondisi kalibrasi tidak dimasukkan dalam pembacaan meter, maka koreksi menurut rekomendasi pabrikan harus diterapkan.*



## PENENTUAN KERAPATAN UDARA (AIR DENSITY)

- Hubungan antara kecepatan udara dan keluaran TA saling bergantung, selain dari konstanta instrumental, juga bergantung viskositas udara dan konduktivitas termal udara: konduktivitas termal udara bergantung pada kerapatan udara.
- Oleh karena itu, kerapatan udara di mana kalibrasi dilakukan harus dicatat. Ini menyiratkan bahwa tekanan, suhu dan kelembaban harus ditentukan.
- Untuk setiap titik kalibrasi nilai kerapatan udara rata-rata selama waktu pengukuran harus ditentukan dan ketidakpastian yang sesuai harus ditentukan. Dalam hal udara, rumus yang disajikan dalam referensi [1] dapat digunakan. Selain itu, mungkin perlu untuk menerapkan koreksi yang terkait dengan kerapatan udara pada keluaran TA sesuai dengan rekomendasi pabrik.

[1] Davis R.S., *Equation for the Determination of the Density of Moist Air*<sup>12</sup> (1981/91), *Metrologia* 1992, 29, 67-70.

- ❑ Karena TA adalah instrumen berdasarkan pertukaran panas, semua parameter yang mempengaruhi pertukaran panas akan mempengaruhi respon mereka.
- ❑ Tentu saja, pengaruh utama akan datang dari koefisien pertukaran panas, yang pada dasarnya adalah parameter yang dikalibrasi, tetapi pengaruh sekunder berasal dari kapasitas panas fluida yang menumbuk, yaitu dari sifat dan densitasnya.
- ❑ Berikut ini akan diasumsikan bahwa TA dikalibrasi di udara, dan pengaruh kelembaban pada kapasitas panas spesifik akan dianggap dapat diabaikan, oleh karena itu hanya efek densitas yang akan dipertimbangkan.

**KOREKSI**  
pada kondisi  
pengoperasian

- ❑ Koreksi yang disebutkan sesuai untuk perubahan kondisi tekanan, suhu dan kelembaban, tetapi tidak untuk gas yang berbeda dari yang dirancang untuk perangkat tersebut.
- ❑ Selanjutnya beberapa TA dapat diatur ke kondisi yang telah ditentukan sebelumnya. ini berarti bahwa kondisi tersebut ditetapkan sebagai default dalam meter dan meter menghitung output kecepatan dari itu jika kondisi sebenarnya tidak disuplai ke meter.
- ❑ Kondisi aktual dapat diukur baik oleh TA itu sendiri atau dengan instrumen eksternal dan diatur dalam TA.
- ❑ Pengguna harus menghubungi pabrikan untuk mendapatkan informasi tentang jenis koreksi yang akan diterapkan.

**KOREKSI**  
pada kondisi  
pengoperasian

## TA DENSITY CORRECTION

Jika tidak ada opsi untuk mengubah nilai suhu, tekanan, dan kelembapan yang telah ditentukan sebelumnya, maka perlu diperhatikan bahwa kecepatan yang ditampilkan tidak mengacu pada kondisi aktual, tetapi ke kondisi referensi yang telah ditentukan sebelumnya. Kondisi referensi telah ditentukan sebelumnya oleh pabrikan. Koreksi berikut kemudian harus diterapkan untuk mengonversi nilai tampilan ke nilai referensi aktual:

$$v_{TA} = v_{display} \cdot \frac{\rho_{display}}{\rho_{actual}} \quad (4)$$

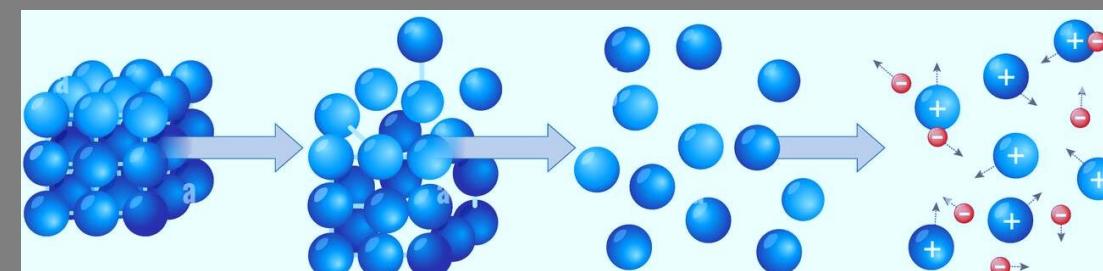
Dimana :

$v_{TA}$  adalah kecepatan yang ditunjukkan oleh perangkat yang dikoreksi untuk kondisi suhu, tekanan, dan kelembapan yang sebenarnya.

$v_{display}$  adalah output kecepatan dari tampilan perangkat

$\rho_{actual}$  adalah densitas fluida dalam kondisi sebenarnya

$\rho_{display}$  adalah densitas fluida dalam kondisi yang telah ditentukan



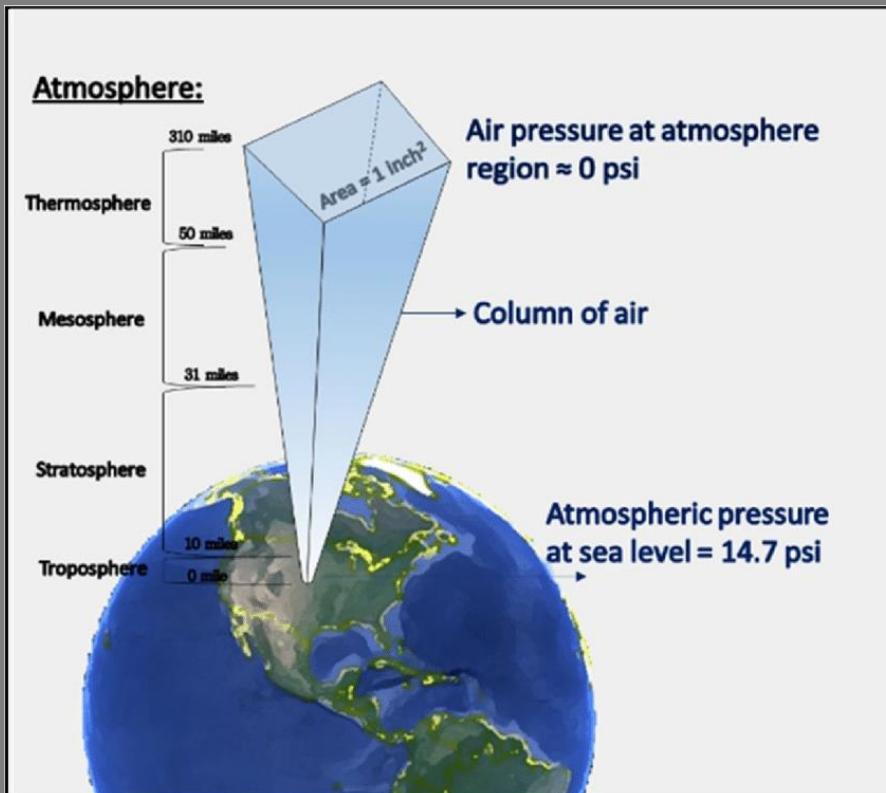
## TA DENGAN PENGUKURAN TEKANAN, SUHU, DAN RH YANG DITERAPKAN

- Jika nilai suhu, tekanan dan kelembaban diukur oleh unit yang dievaluasi, maka biasanya nilai kecepatan dapat ditampilkan dalam kondisi sebenarnya.
- Jadi, jika mode yang sesuai dipilih, tidak ada koreksi lebih lanjut yang harus diterapkan.



## TA PRESSURE CORRECTION

Karena prinsip operasinya, sebagian besar anemometer termal memiliki pengukuran suhu yang diterapkan dan suhu dikoreksi secara internal. Jika tambahan, pengaruh kelembaban dianggap dapat diabaikan, hanya koreksi tekanan yang dapat diterapkan. Misalnya, pengaruh kelembaban dapat diabaikan jika ketidakpastian lebih besar dari 1% mencukupi.



$$v_{TA} = v_{display} \cdot \frac{P_{display}}{P_{actual}} \quad (4)$$

**Dimana :**

$v_{TA}$  adalah kecepatan yang ditunjukkan oleh perangkat yang dikoreksi untuk kondisi tekanan, yang sebenarnya.

$v_{display}$  adalah output kecepatan dari tampilan perangkat

$P_{actual}$  adalah tekanan udara dalam kondisi sebenarnya

$P_{display}$  adalah tekanan udara dalam kondisi yang telah ditentukan



# PROSEDUR KALIBRASI

# PENGOPERASIAN AWAL (SEBELUM KALIBRASI)

PRELIMINARY

Operasi Awal Petunjuk berikut harus dipertimbangkan saat memasang instrumen:

- Tempatkan TA di lokasi yang sesuai di rig uji sesuai dengan karakterisasi yang dilakukan di mana profil aliran yang stabil dan homogen tercapai, mis. lokasi dengan tingkat turbulensi rendah dan nilai kecepatan yang stabil dari waktu ke waktu.
- Posisi penempatan TA yang relevan adalah pusat elemen penginderaan kecuali dinyatakan lain oleh pabrikan.
- Penjajaran TA harus dilakukan dengan hati-hati. Rekomendasi pabrikan atau pengukuran ketergantungan orientasi harus dipertimbangkan. Penyimpangan yang dihasilkan dari indikasi meteran karena ketidaksejajarannya harus dipertimbangkan dalam evaluasi ketidakpastian.
- Berhati-hatilah terhadap sensitivitas arah aliran udara dari meteran. Khususnya pada rentang aliran rendah, aliran udara horizontal dapat memberikan penyimpangan dari aliran udara vertikal. Oleh karena itu TA harus dikalibrasi pada posisi yang digunakan.

# PENGOPERASIAN AWAL (SEBELUM KALIBRASI)

**PRELIMINARY**

Operasi Awal Petunjuk berikut harus dipertimbangkan saat memasang instrumen:

- TA biasanya digunakan untuk kecepatan rendah, sehingga ruang pengukuran tertutup lebih disarankan untuk mencapai ketidakpastian yang rendah.
- Kalibrasi suhu TA dapat dilakukan sebelum uji coba dalam kondisi stasioner atau selama uji coba jika referensi suhu yang sesuai tersedia.
- Kontaminasi sensor dengan partikel penyemaian (seeding particles) yang diperlukan untuk pengukuran referensi LDA dapat menyebabkan hasil pengukuran yang salah. Adalah wajib untuk menggunakan partikel penyemaian yang tidak mempengaruhi pengukuran TA.

# PENGOPERASIAN AWAL (SEBELUM KALIBRASI)

**PRELIMINARY**

Sebelum kalibrasi, data berikut juga harus dicatat:

- Parameter identifikasi instrumen referensi dan semua instrumen yang digunakan untuk mengukur sinyal keluaran.
- Parameter identifikasi perangkat yang akan dikalibrasi. Nomor identifikasi dan/atau nomor seri harus dicantumkan pada TA.
- Kedalaman penyisipan di terowongan angin – karena ketergantungan kedalaman penyisipan seperti yang dijelaskan dalam Lampiran 1 atau jika posisi TA menyimpang dari instruksi dalam prosedur standar yang digunakan untuk kalibrasi.
- Melakukan penyetelan nol pada TA, jika memungkinkan – aliran panas sisa di terowongan angin harus dipertimbangkan. Kesalahan penyesuaian memberikan kontribusi terhadap bujet ketidakpastian pengukuran.



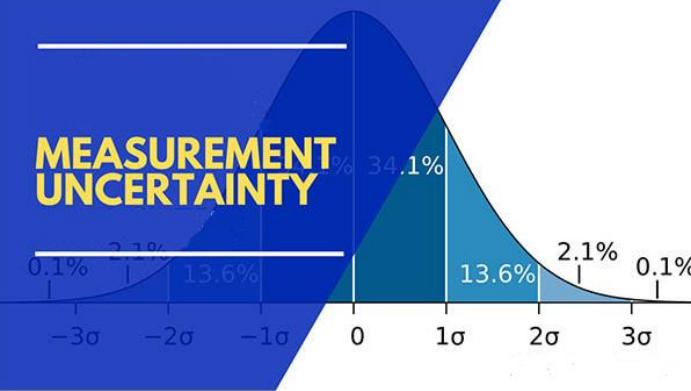
# KALIBRASI

Kalibrasi dapat dilakukan dengan pengukuran referensi dan TA secara simultan atau berurutan. Pada setiap titik kalibrasi, data berikut harus dicatat:

- Kecepatan yang ditunjukkan oleh instrumen referensi (atau elemen yang diperlukan untuk menghitung kecepatan terukur).
- Kecepatan atau keluaran yang ditunjukkan oleh TA.
- Hasil pengukuran suhu udara, tekanan statis, kelembaban di terowongan angin untuk perhitungan densitas fluida.
- Pengulangan sistem referensi dan TA.
- Posisi meter referensi dan TA (diperlukan untuk koreksi posisi, koreksi penyumbatan dan koreksi karena kedalaman penyisipan).

# EVALUASI

# KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN



Komponen utama yang harus diperhitungkan untuk evaluasi ketidakpastian hasil kalibrasi untuk TA adalah:

## REFERENCE INSTRUMENT

Ketidakpastian instrumen atau metode referensi dalam kondisi penggunaan

## REPEATABILITY

Ketidakpastian karena pengulangan pengukuran

## RESOLUTION

Ketidakpastian karena resolusi atau daya baca TA

## AIR DENSITY

Ketidakpastian perhitungan kerapatan udara, dengan mempertimbangkan:

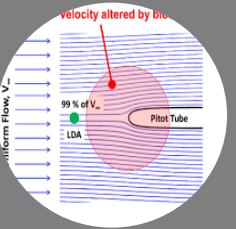
1. ketidakpastian alat ukur (suhu, tekanan, kelembaban)
2. ketidakpastian rumus yang digunakan

## GEOMETRICAL SETUP

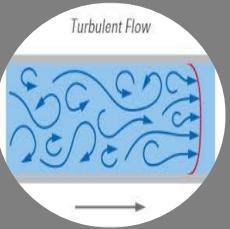
Ketidakpastian karena pengaturan geometris TA yang diuji di fasilitas kalibrasi (efek penyumbatan, koreksi posisi, misalignment sudut, kedalaman penyisipan, aliran horizontal/vertikal)

*Prosedur pengukuran laboratorium kalibrasi harus menjelaskan bagaimana kontribusi terhadap bujet ketidakpastian yang dihasilkan dari komponen ini ditentukan.*

# SUMBER SUMBER KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN



**BLOCKAGE EFFECT**  
Ketidakpastian efek penyumbatan



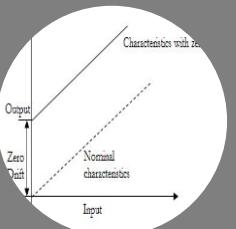
**TURBULENCE EFFECT**  
Ketidakpastian efek turbulensi



**SWIRL EFFECT**  
Ketidakpastian efek pusaran



**REFERENCE SENSOR**  
Ketidakpastian sensor acuan



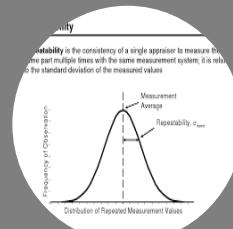
**DRIFT**  
Drift sensor acuan



**ENVIRONMENTAL EFFECTS**  
Ketidakpastian pengaruh lingkungan



**RESOLUTION**  
Resolusi atau daya baca alat dan standar



**REPEATABILITY**  
Pengulangan pengukuran

# Calibration Uncertainty

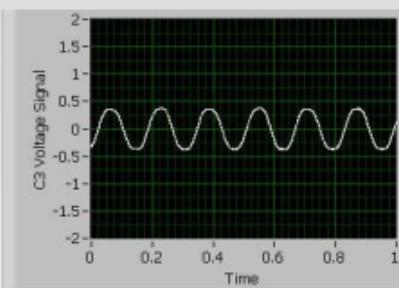
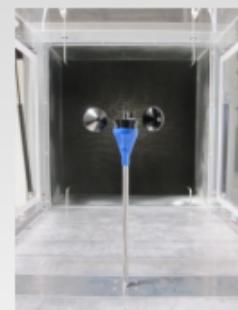
Anemometer calibration uncertainty consists of the propagation of errors from three general areas

$$U_{cal} = \sqrt{(U_V)^2 + (U_{IUT})^2 + (U_{LR})^2}$$

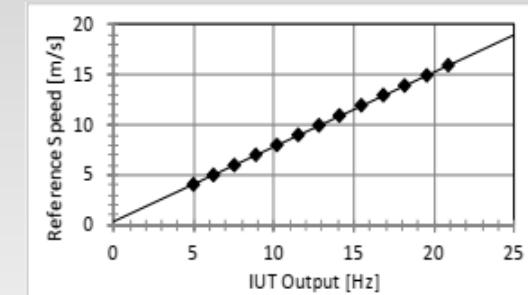
Reference wind speed



Test sensor output



Calibration linearity



Uncertainty in each area includes systematic or Type B errors ( $B_i$ ) and random or Type A errors ( $S_i$ )

$$U_i = \sqrt{B_i^2 + (tS_i)^2}$$

Coverage factor at 95% confidence

# Calibration Uncertainty

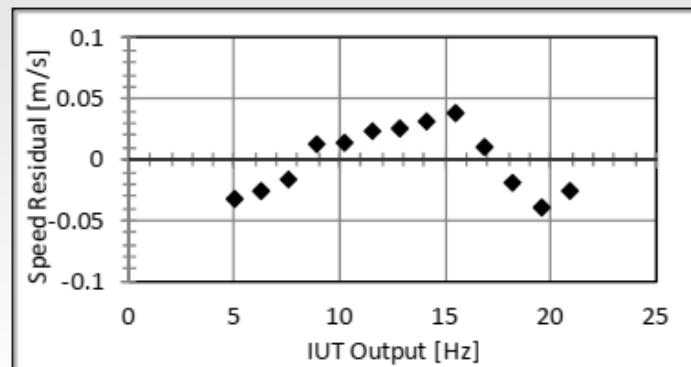
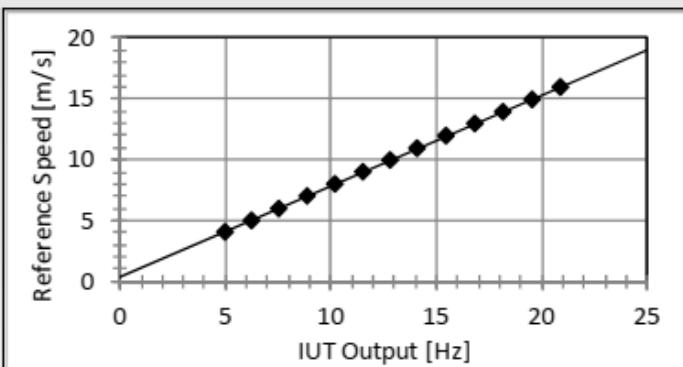
## Uncertainty in test sensor output

$$U_{IUT} = \sqrt{B_{IUT}^2 + (tS_{IUT})^2}$$

- Type B errors are acquired from data acquisition system.
- Type A errors are quantified by the standard deviations in the test sensor reading.

## Uncertainty in calibration linearity

$$U_{LR} = \sqrt{(tV_{res})^2}$$



# REFERENCE INSTRUMENTS

Terowongan angin dengan Laser Doppler Anemometer (LDA) atau Pitot Static Tube (PST), tangki penarik atau lengan berputar dapat digunakan sebagai instrumen referensi. Jika meter referensi lain digunakan, maka hal ini dapat mengakibatkan ketidakpastian pengukuran yang lebih tinggi.

Untuk mendapatkan ketidakpastian dalam rentang 0,4% hingga 0,8% ( $k = 2$ ) untuk seluruh kalibrasi disarankan untuk menggunakan LDA sebagai referensi. Untuk mendapatkan ketidakpastian terendah, kondisi berikut harus diperhatikan:

- Pengukuran profil (pengaruh TA terhadap profil aliran) dan penentuan kontribusi ketidakpastian akibat efek penyumbatan.
- Menerapkan koreksi posisi jika terjadi perbedaan posisi LDA dan TA.
- Dalam hal pengukuran referensi dan TA berurutan, stabilitas alat uji harus didokumentasikan, atau koreksi yang sesuai harus diterapkan.
- Pengukuran keselarasan.
- Penentuan kerapatan udara.
- Penentuan ketergantungan kedalaman penyisipan dan koreksi yang diperlukan karena ketergantungan ini.
- Ruang pengukuran tertutup lebih disukai untuk kecepatan rendah.



# WIND TUNNEL



## MAIN CONSTRUCTION OF WIND TUNNEL

### 1. Bell Mouth

Aliran seragam (uniform flow)

Ini mencegah hilangnya daya hisap (loss of suction)

### 2. Honeycomb

Mengurangi efek pusaran (swirl effect)

Mengurangi efek turbulensi (turbulence effect)

### 3. Screen

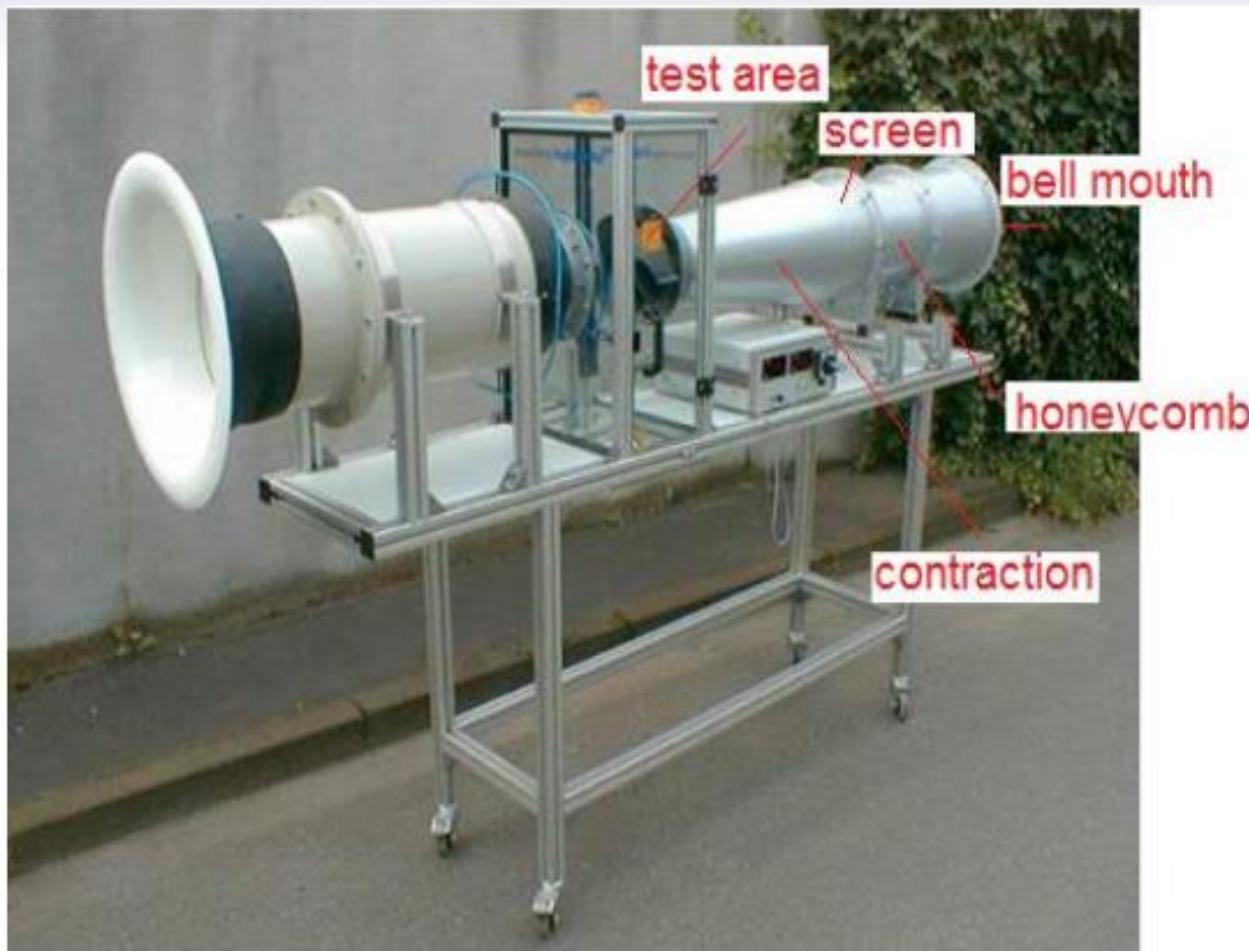
Keseimbangan tekanan total dengan mengurangi distribusi kecepatan

Membuat resistensi hidrodinamik

### 4. Contraction

Memberikan laju aliran yang seragam dengan meningkatkan kecepatan angin

### 5. Test Area



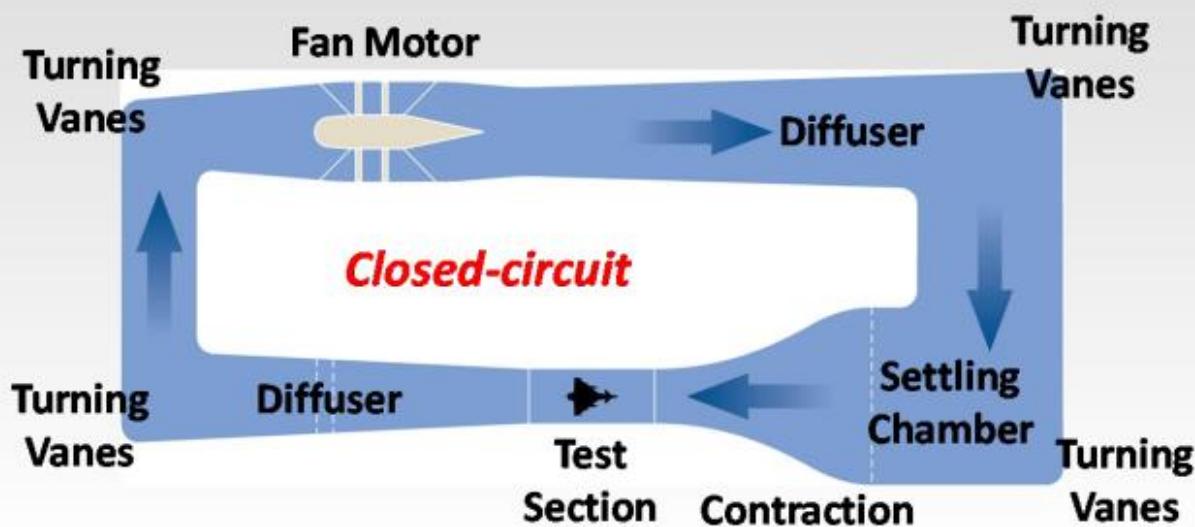
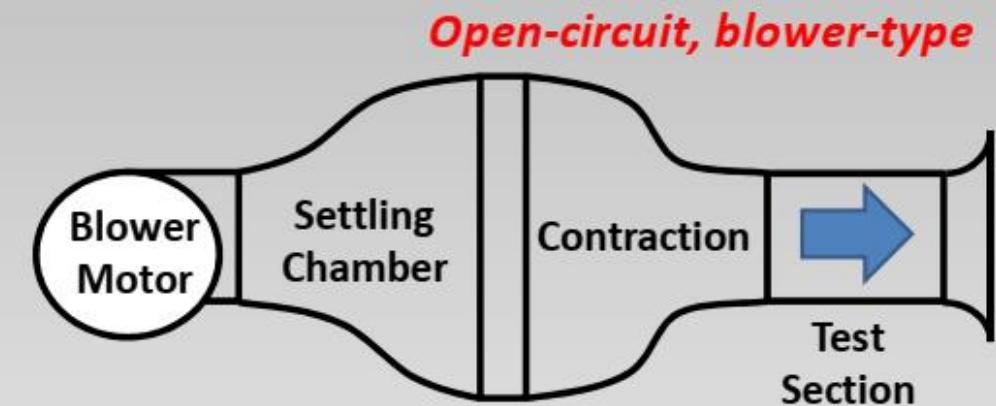
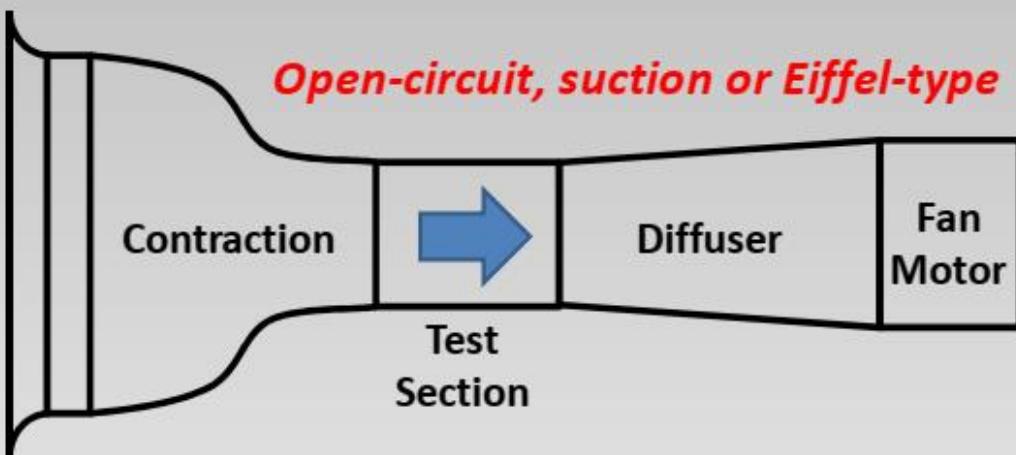
## Open Jet



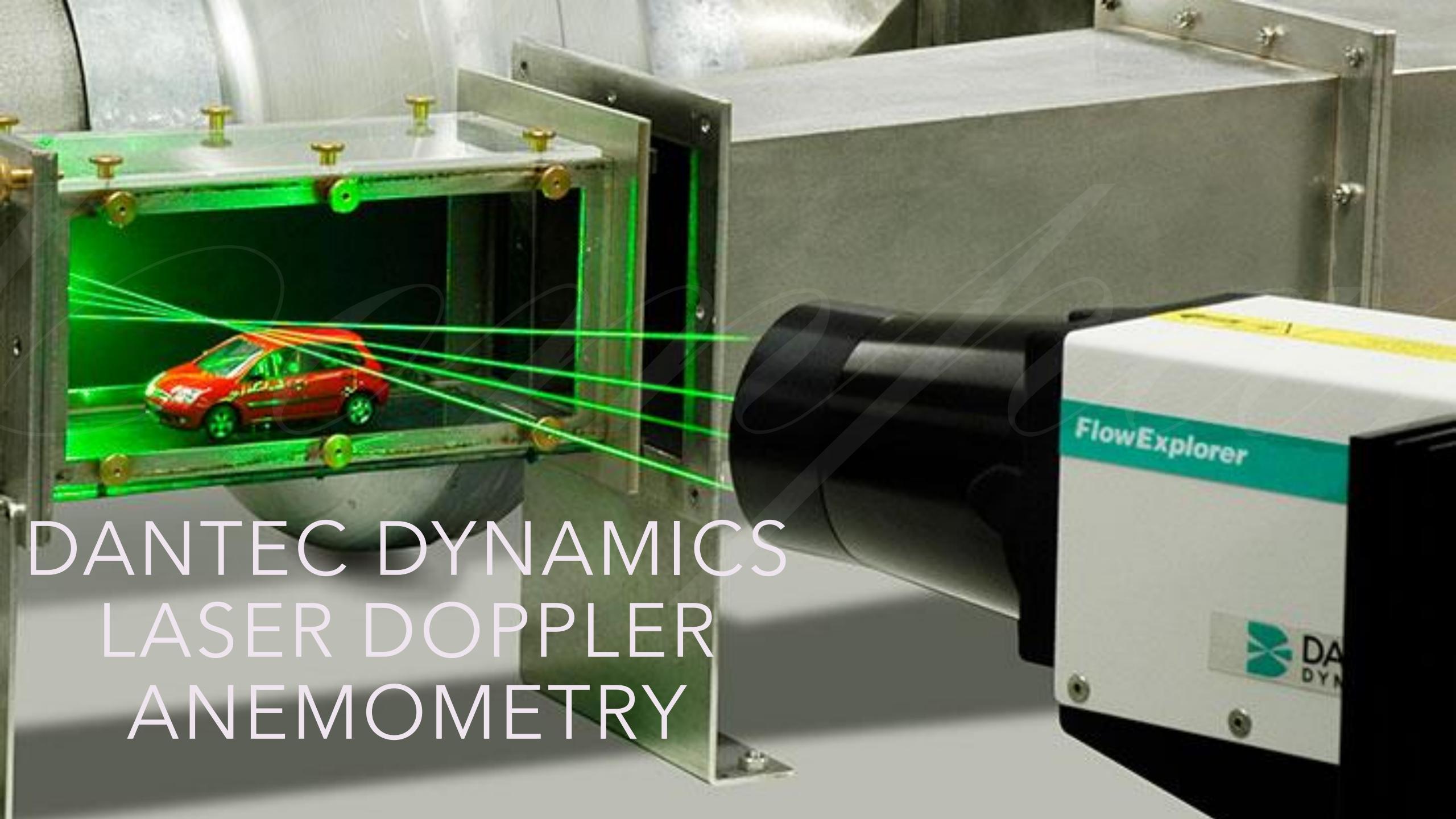
## Closed Jet

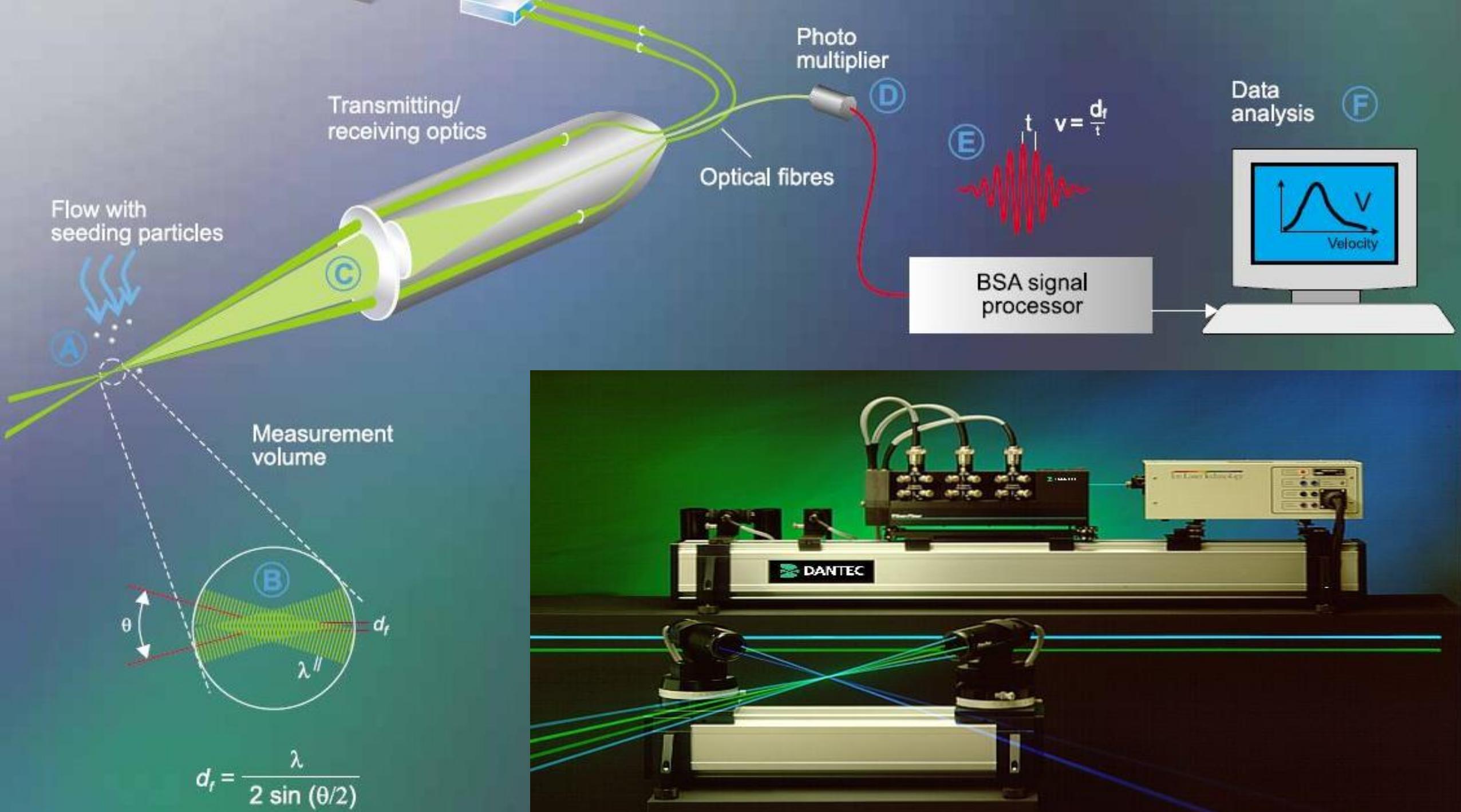
# Test Facility Requirements

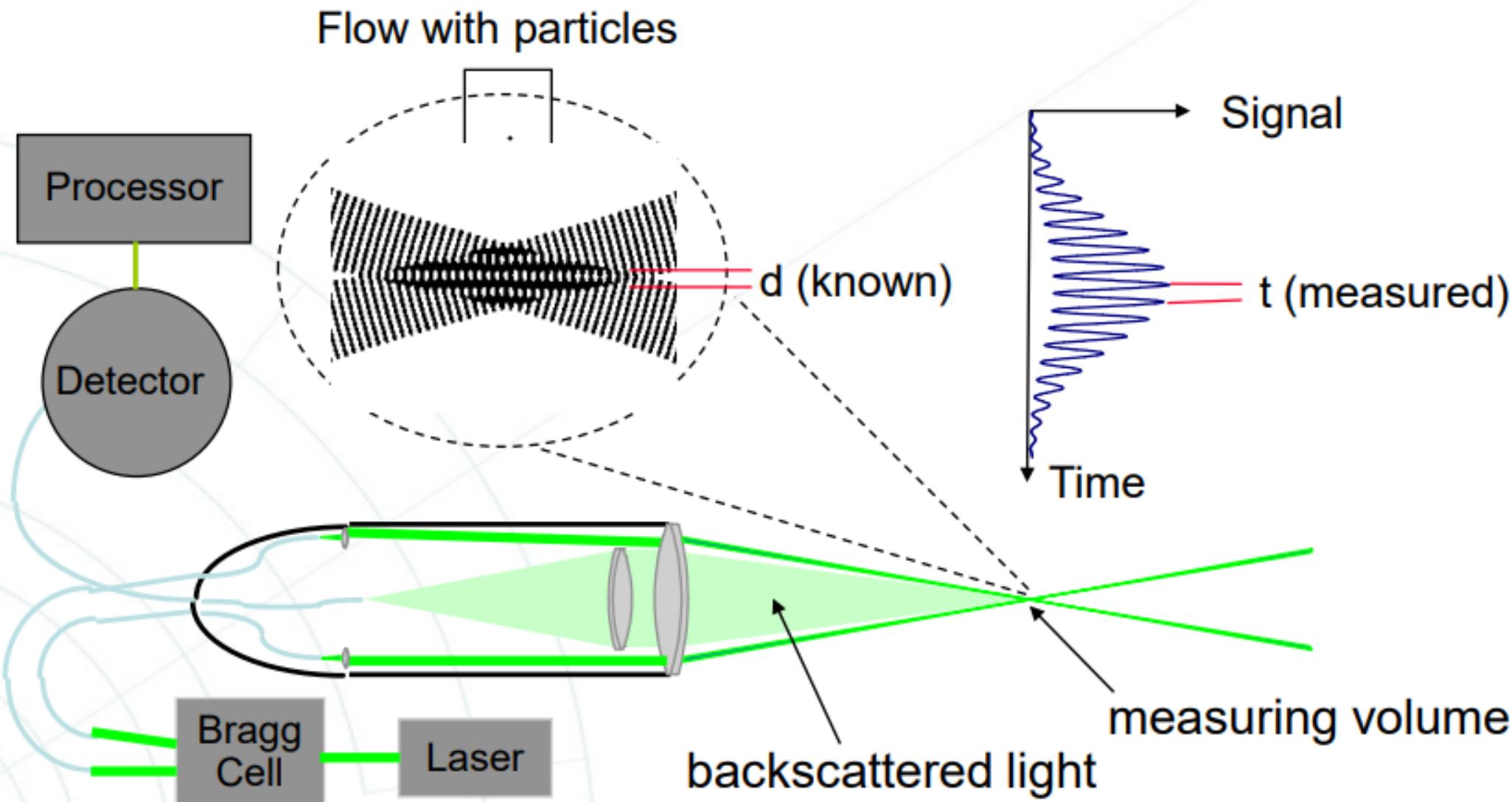
## Common Wind Tunnel Configurations



# DANTEC DYNAMICS LASER DOPPLER ANEMOMETRY

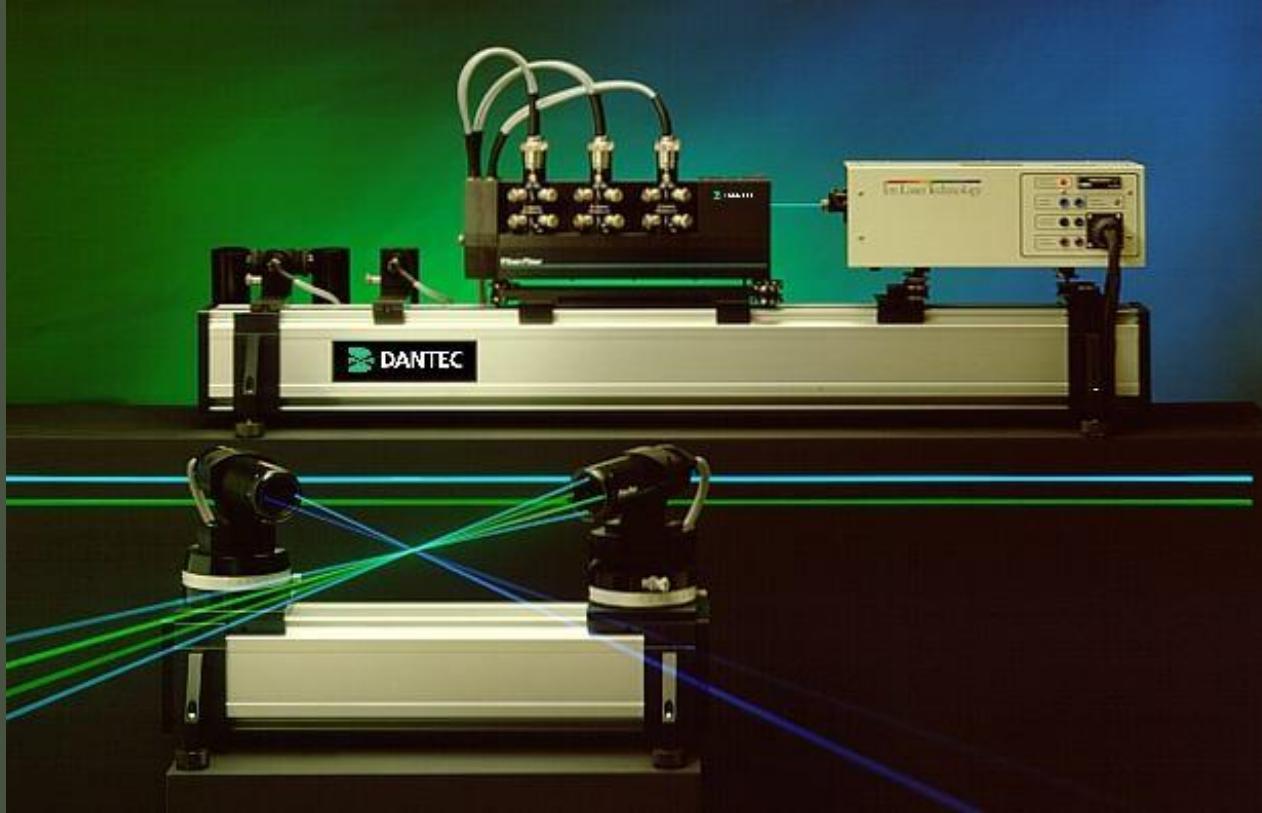






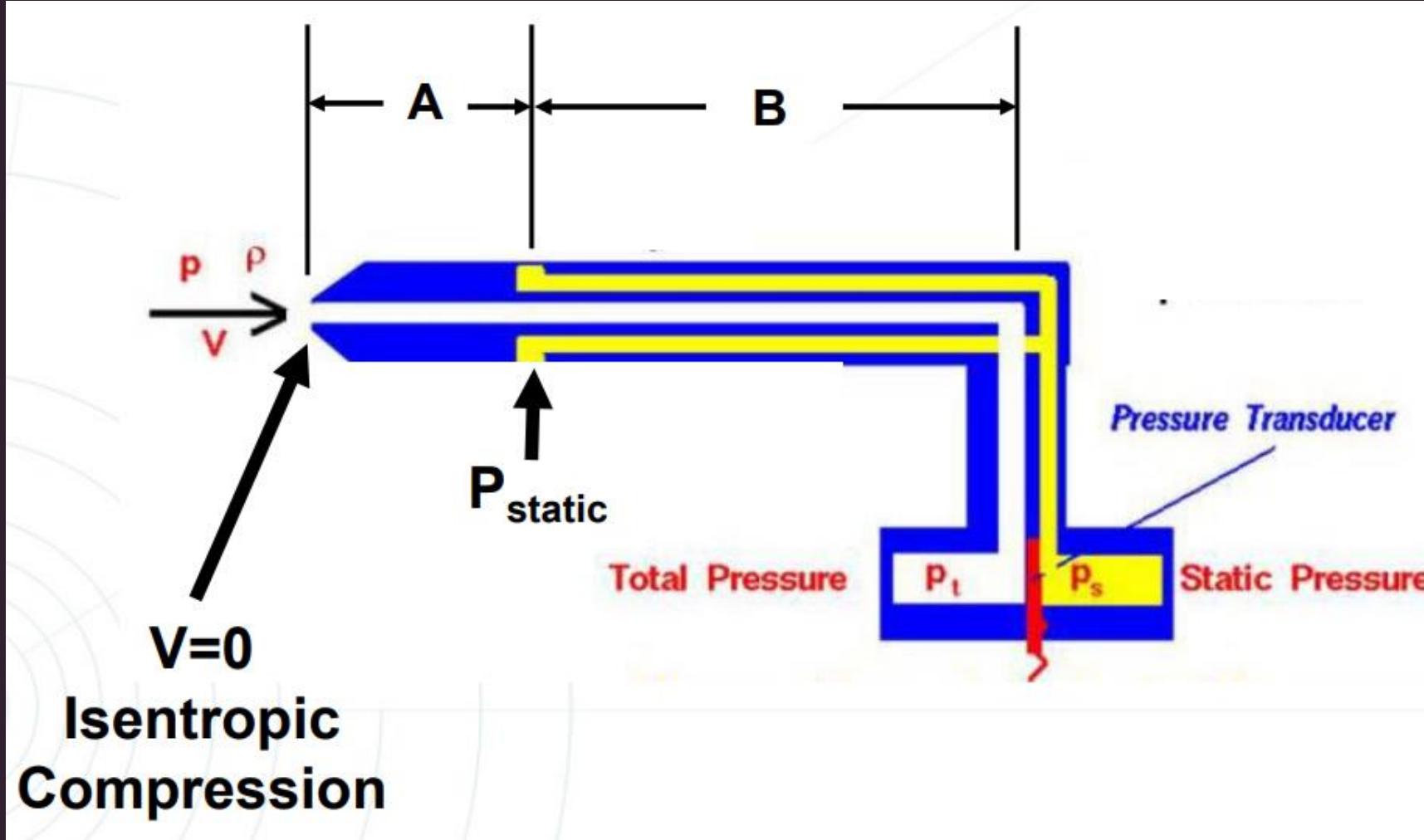
# LASER DOPPLER ANEMOMETER

- Yang terbaik untuk semua rentang kecepatan udara
- Pengukuran non-intrusif (teknik optik)
- Ketidakpastian yang sangat rendah
- Resolusi spasial yang sangat tinggi karena volume pengukuran yang kecil
- Turbulensi sangat rendah
- Tidak mempengaruhi kondisi lingkungan
- Tidak perlu kalibrasi atau zero drift



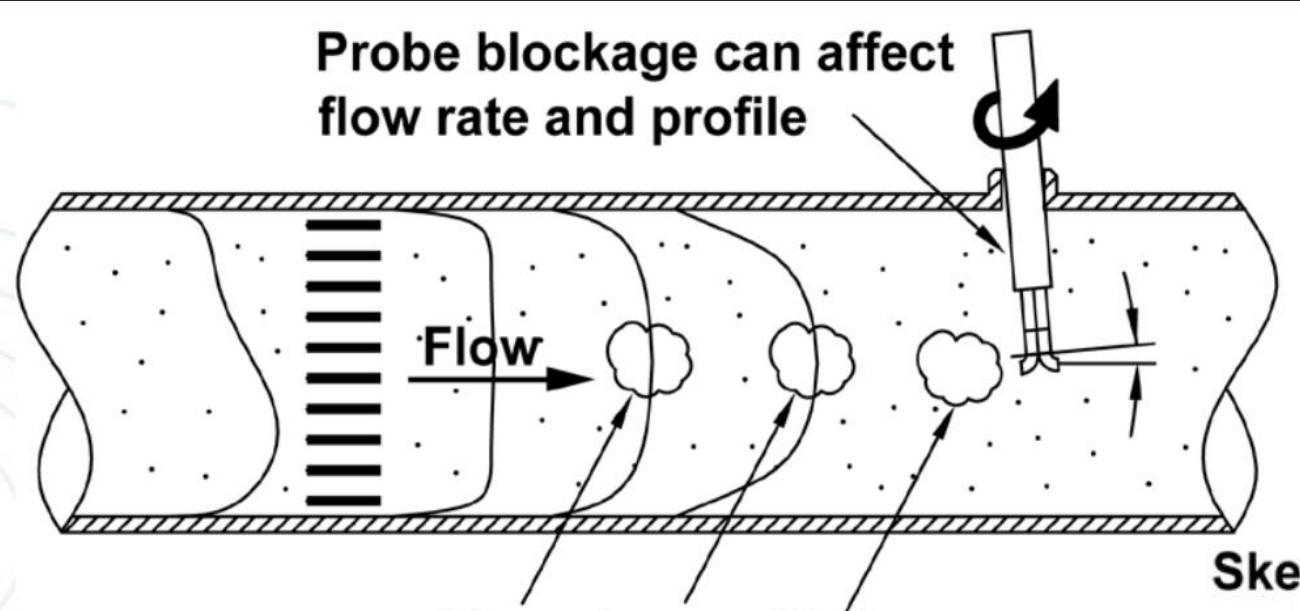


# PITOT STATIC TUBE ANEMOMETER

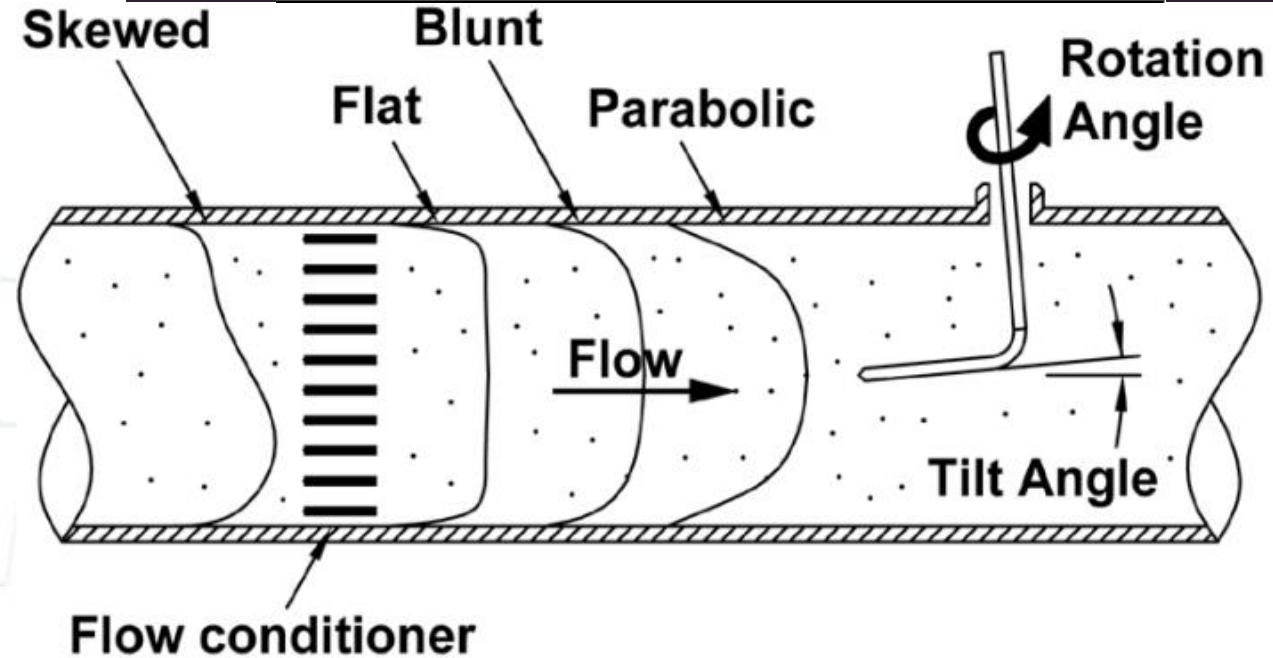
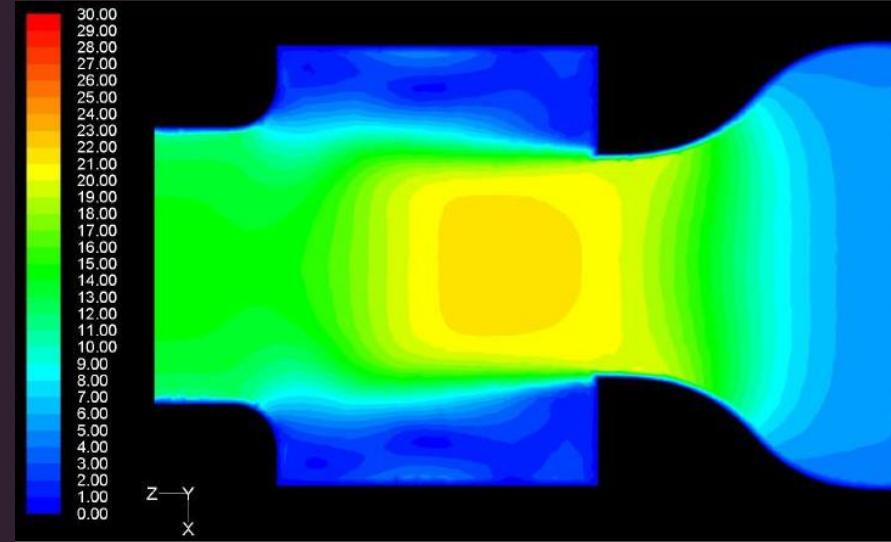


# PITOT STATIC TUBE ANEMOMETER

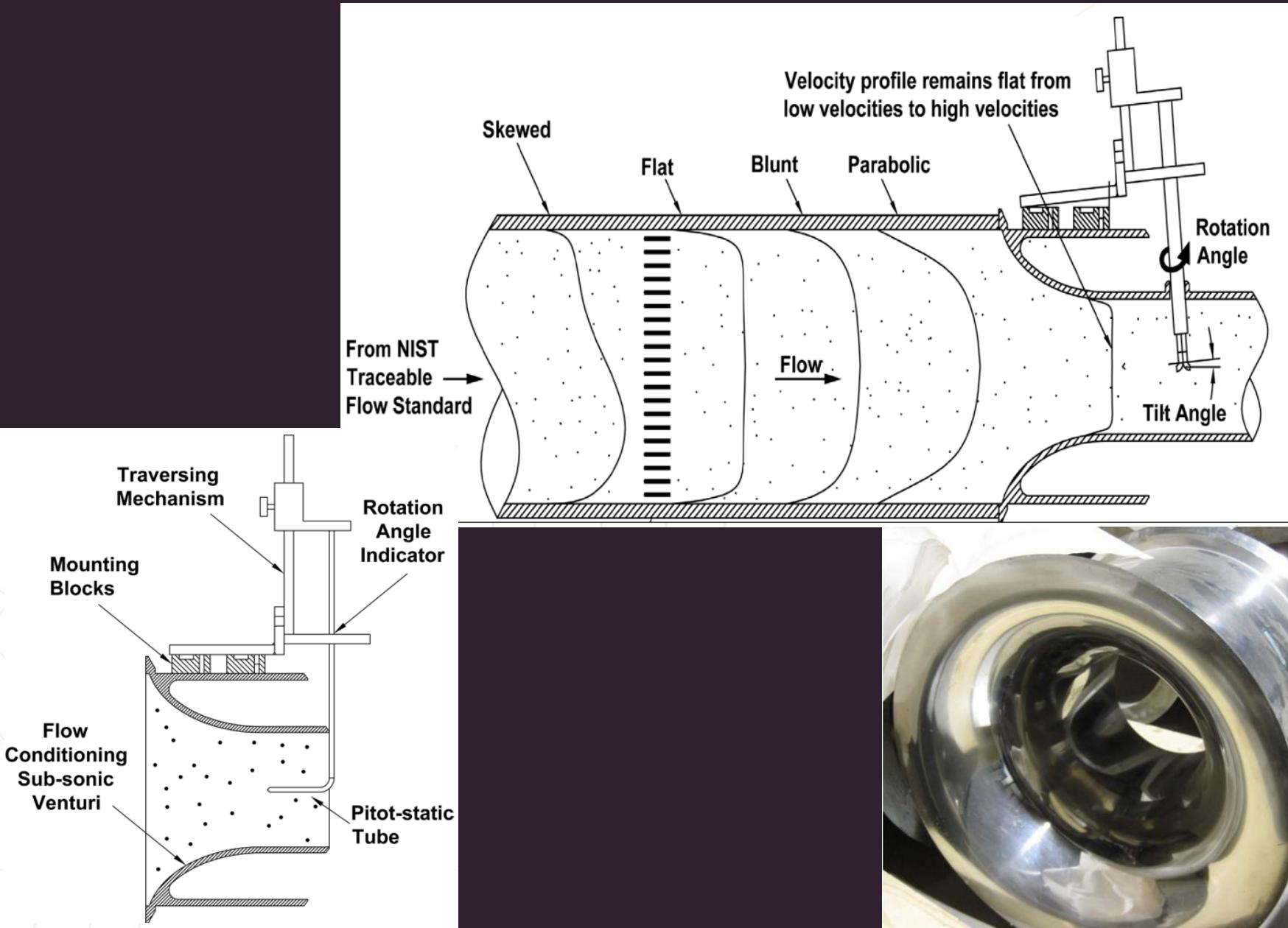
# Perangkap (pitfalls) yang harus dihindari dalam kalibrasi anemometer

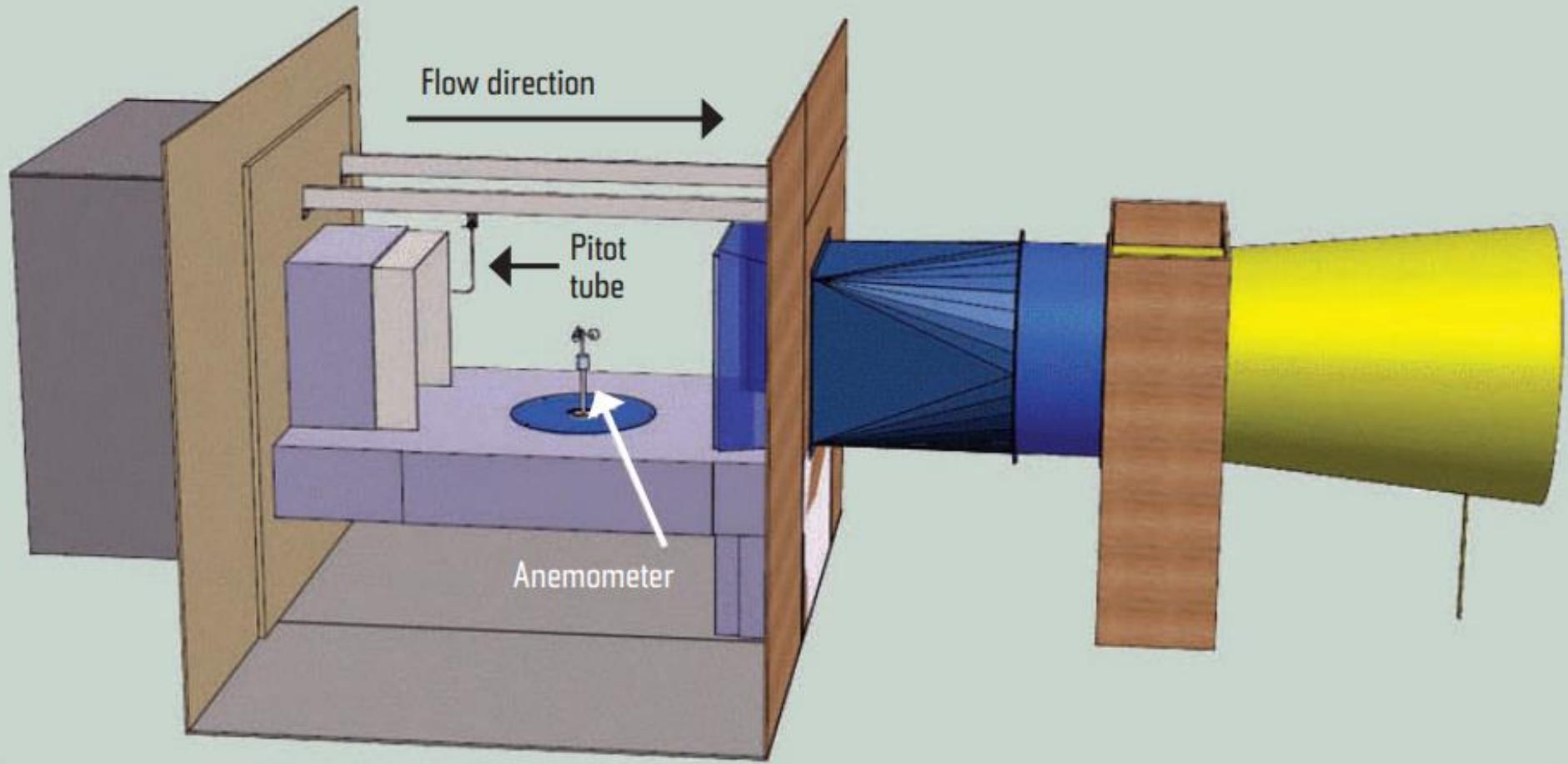


Changing profile is a function of velocity



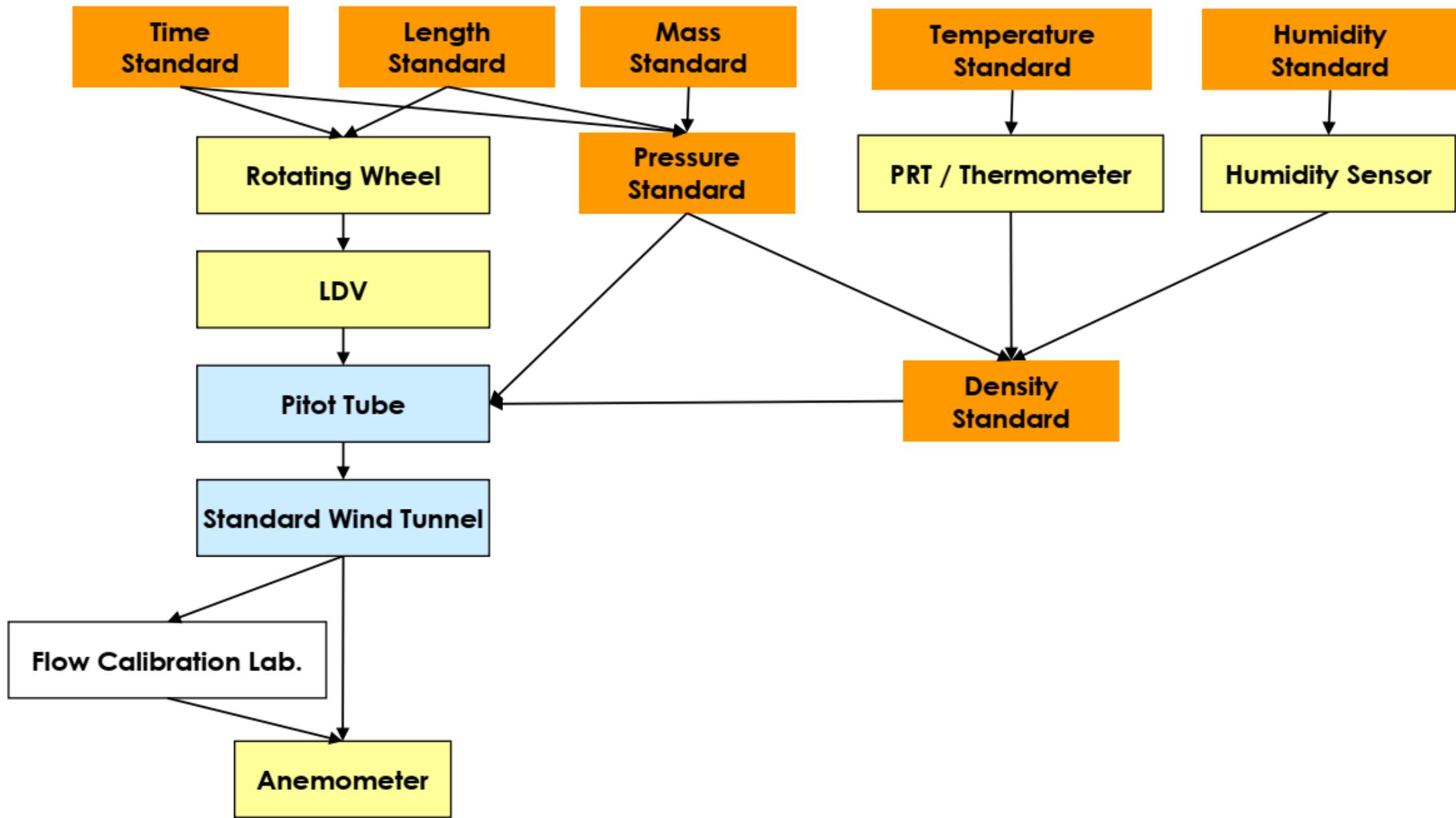
# Perangkap (pitfalls) yang harus dihindari dalam kalibrasi anemometer





# ILUSTRASI CHAMBER DI WIND TUNNEL

## ● Air Speed traceability to the national standard



**Scope of Accreditation**  
**For**  
**Alliance Calibration**

11402 Reading Road  
 Cincinnati, OH 45241  
 Sidney Taylor  
 513.765.1200

In recognition of a successful assessment to ISO/IEC 17025:2005 to the following Calibration and Measurement Capabilities, accreditation has been granted to Alliance Calibration for the following:

Accreditation granted through September 15, 2017

**Calibration**

**Acoustic, Ultrasound, and Vibration – Vibration**

Calibration Parameter/Equipment <sup>3</sup>	Range	Expanded Uncertainty of Measurement ( $t_{95}\%$ ) <sup>4</sup>	Remarks
Accelerometer Sensitivity (0 to 5,000 mV/g)	50 Hz to 10 kHz	(0.75 ± 0.0025)% of reading	Master Accelerometer

**Electrical – Capacitance**

Calibration Parameter/Equipment <sup>3</sup>	Range	Expanded Uncertainty of Measurement ( $t_{95}\%$ ) <sup>4</sup>	Remarks
Capacitance - Source	0.33 to 3.30 pF at 1 kHz (0.33 to 3.30) $\mu$ F at 100 Hz	(0.024 ± 0.0043) pF (0.031 ± 0.0092) $\mu$ F	Fluke 5500A

**Electrical – Current**

Calibration Parameter/Equipment <sup>3</sup>	Range	Expanded Uncertainty of Measurement ( $t_{95}\%$ ) <sup>4</sup>	Remarks
DC Current - Measure	Up to 3A (0 to 200) A	(0.00067 ± 0.0133) mA (1.5 ± 0.0161) A	Agilent 34401A Fluke 306
DC Current - Source	Up to 30 mA (0.33 to 11) A (11 to 200) A	(0.000065 ± 0.000133) mA (0.00014 ± 0.00113) A (0.14 ± 0.00913) A w/ Cal	Fluke 5500A

# MENYATAKAN LINGKUP KALIBRASI

Ruang lingkup yang dinyatakan oleh laboratorium untuk kalibrasi anemometer padat, terutama TA, harus menyatakan parameter berikut:

**RENTANG**

Rentang pengukuran,  
mis. 0.5 m/s – 40 m/s

**KETIDAKPASTIAN**

Ketidakpastian  
pengukuran dalam  
seluruh rentang, mis.  
 $0.004 \text{ m/s} + 0.0047 \cdot v_{reference}$

**KONDISI  
LINGKUNGAN**

Kondisi sekitar (tekanan,  
suhu, kelembaban), mis.  
 $(980,5 \pm 0,5) \text{ hPa}$ ,  $(22,3 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ ,  $(43 \pm 1) \% \text{rh}$

**ARAH ALIRAN**

Arah aliran, mis. aliran  
horizontal

**JENIS PROBE**

Jenis probe, mis. hot-  
film anemometer

# SERTIFIKAT KALIBRASI

Bersama dengan persyaratan umum standar ISO/IEC 17025, laporan kalibrasi untuk TA harus mencakup informasi minimum sebagai berikut:

- Deskripsi fasilitas,
- Jenis standar acuan,
- Deskripsi prosedur kalibrasi atau referensi ke prosedur internal yang digunakan untuk kalibrasi,
- Deskripsi TA,
- Hasil kalibrasi dapat digambarkan baik sebagai acuan dan nilai TA secara terpisah atau sebagai acuan dan simpangan ( $\Delta v$ ) antara acuan dan TA atau sebagai acuan dan koefisien kalibrasi, K.
- Ketidakpastian pengukuran
  - Dalam kasus TA, ketidakpastian pengukuran yang dinyatakan adalah ketidakpastian koefisien kalibrasi TA atau pengukuran .
  - Nilai ketidakpastian harus diberikan dengan maksimal dua digit signifikan.
- Informasi tambahan dapat diberikan seperti:
  - Posisi TA mengenai aliran.
  - Jika pernyataan kesesuaian dengan spesifikasi dibuat, ini harus mengidentifikasi spesifikasi mana yang terpenuhi atau tidak terpenuhi.o Indikasi malfungsi atau anomali yang terdeteksi.

**DEUTSCHE WINGUARD**  
Deutsche WindGuard  
Wind Tunnel Services GmbH

IECRE and MEASNET approved test laboratory

accredited by the / akkreditiert durch die

**Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH**  
as calibration laboratory in / als Kalibrierlaboratorium im

**Deutschen Kalibrierdienst** **DKD**

Calibration certificate  
Kalibrierschein

**Object** Cup Anemometer

**Manufacturer** Navis Elektronika d.o.o.  
SI-1241 Kamnik

**Type** WSS100-PS-FC

**Serial number** S1646

**Customer** Navis Elektronika d.o.o.  
SI-1241 Kamnik

**Order No.** 1091

**Project No.** VT170497

**Number of pages** 4

**Date of Calibration** 25.04.2017

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).  
The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the Economic Organization for Accreditation (EAO) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.  
The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.  
Diese Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).  
Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übervereinbarungen zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.  
Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

**Date**  
Datum 05.05.2017

**Head of the calibration laboratory**  
Leiter des Kalibrierlaboratoriums  
*D. Westermann*  
Dipl. Phys. Dieter Westermann

**Person in charge**  
Bereowiediger  
*H. Westermann*  
Heiko Westermann, B. Sc.



**Deutsche WindGuard**  
Wind Tunnel Services GmbH



IECRE and MEASNET approved test laboratory

accredited by the / akkreditiert durch die

**Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH**

as calibration laboratory in the / als Kalibrierlaboratorium im

**Deutschen Kalibrierdienst**



Calibration certificate  
Kalibrierschein

Calibration mark  
Kalibrierzeichen

1721107
D-K-
15140-01-00

04/2017

**Object**  
Gegenstand

Cup Anemometer

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI). The DAkkS is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

**Manufacturer**  
Hersteller

Navis Elektronika d.o.o.  
SI-1241 Kamnik

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

**Type**  
Typ

WSS100-PS-FC

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

**Serial number**  
Fabrikat/Serien-Nr.

S1646

Die DAkkS ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.

**Customer**  
Auftraggeber

Navis Elektronika d.o.o.  
SI-1241 Kamnik

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

**Order No.**  
Auftragsnummer

1091

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein wurde elektronisch erzeugt.

**Project No.**  
Projektnummer

VT170497

The reference flow speed measurement is traceable to the German NMI (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) standard for flow speed. It is realized by using a PTB owned and calibrated Laser Doppler Anemometer (Standard Uncertainty 0.2 %, k=2)

**Number of pages**  
Anzahl der Seiten

4

The expanded uncertainty assigned to the measurement results is obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k = 2$ . It has been determined in accordance with DAkkS-DK3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

**Date of Calibration**  
Datum der Kalibrierung

25.04.2017

The reference flow speed measurement is traceable to the German NMI (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) standard for flow speed. It is realized by using a PTB owned and calibrated Laser Doppler Anemometer (Standard Uncertainty 0.2 %, k=2)

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the German Accreditation Body and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid. This calibration certificate has been generated electronically.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Deutschen Akkreditierungsstelle als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift haben keine Gültigkeit. Dieser Kalibrierschein wurde elektronisch erzeugt.

**Date**  
Datum

05.05.2017

The reference flow speed measurement is traceable to the German NMI (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) standard for flow speed. It is realized by using a PTB owned and calibrated Laser Doppler Anemometer (Standard Uncertainty 0.2 %, k=2)

*J. Westermann*  
Dipl. Phys. Dieter Westermann

The reference flow speed measurement is traceable to the German NMI (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) standard for flow speed. It is realized by using a PTB owned and calibrated Laser Doppler Anemometer (Standard Uncertainty 0.2 %, k=2)

*H. Westermann*  
Heiko Westermann, B.Sc.

**Calibration object**  
Kalibriergegenstand

Cup Anemometer

**Calibration procedure**  
Kalibrierverfahren

- Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services: QM-KL-AK-VA
- Based on following standards:
- MEASNET: Anemometer calibration procedure
- IEC 61400-12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines
- IEC 61400-12-2: Power performance of electricity producing wind turbines based on nacelle anemometry
- ISO 3966: Measurement of fluid in closed conduits
- ISO 16622: Meteorology - Sonic anemometers/thermometers

**Place of calibration**  
Ort der Kalibrierung

Windtunnel of Deutsche WindGuard WindTunnel Services GmbH, Varel

**Test conditions**  
Messbedingungen

wind tunnel area	10000 cm <sup>2</sup>
anemometer frontal area	150 cm <sup>2</sup>
diameter of mounting pipe	20 mm
blockage ratio <sup>1)</sup>	0.015 [-]
software version	7.7

<sup>1)</sup> Due to the special construction of the test section no blockage correction is necessary.

**Ambient conditions**  
Umgebungsbedingungen

air temperature	23.2 °C ± 0.1 °C
air pressure	1005.1 hPa ± 0.3 hPa
relative air humidity	31.5 % ± 2.0 %

**Measurement uncertainty**  
Messunsicherheit

The expanded uncertainty assigned to the measurement results is obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor  $k = 2$ . It has been determined in accordance with DAkkS-DK3. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%. The reference flow speed measurement is traceable to the German NMI (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) standard for flow speed. It is realized by using a PTB owned and calibrated Laser Doppler Anemometer (Standard Uncertainty 0.2 %, k=2)

**Additional remarks**  
Zusätzliche Anmerkungen

Revision 1.0 (replaces certificate dated 25.04.2017)

1721107  
D-K-  
15140-01-00  
04/2017

**Calibration result**  
*Kalibrierergebnis*

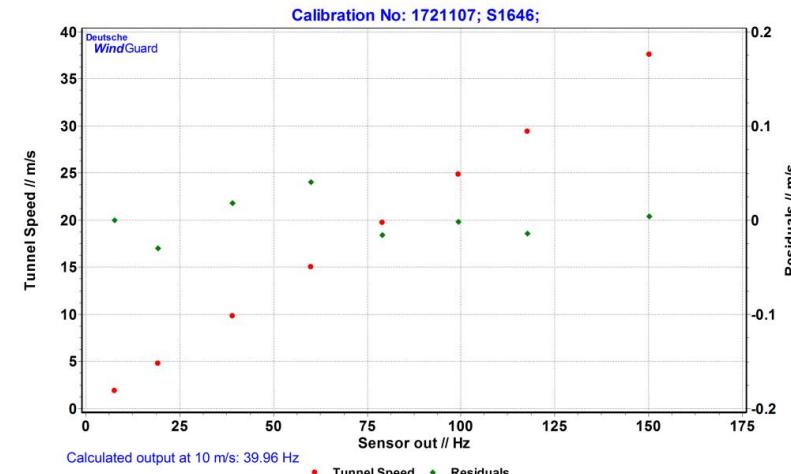
Sensor out Hz	Tunnel Speed m/s	Uncertainty (k=2) m/s
7.554	1.891	0.050
19.271	4.793	0.050
39.179	9.822	0.050
59.986	15.051	0.050
79.046	19.764	0.100
99.346	24.857	0.100
117.734	29.446	0.100
150.130	37.570	0.100

File: 1721107

<b>Statistical analysis</b>	<b>Slope</b>	$0.25022 \text{ (m/s)/(Hz)} \pm 0.00018 \text{ (m/s)/(Hz)}$
	<b>Offset</b>	$0.0008 \text{ m/s} \pm 0.015 \text{ m/s}$
	<b>Standard error (Y)</b>	$0.018 \text{ m/s}$
	<b>Correlation coefficient</b>	$0.999998$

1721107  
D-K-  
15140-01-00  
04/2017

**Graphical representation of the result**  
*Grafische Darstellung des Ergebnisses*



**Photo of the measurement setup**  
*Foto des Messaufbaus*



Remark: The proportions of the set-up may not be true to scale due to imaging geometry.

# CERTIFICADO DE CALIBRACION

Certificate of Calibration



Número 24173AC  
Number

Página 1 de 5 páginas  
Page 1 of 5 pages

Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva"  
Laboratorio de Calibración en Túnel Aerodinámico, LAC, IDR/UPM  
E.T.S.I. Aeronáutica y del Espacio  
Plaza del Cardenal Cisneros, 3, E-28040 Madrid  
Tel.: 91 336 63 53, Fax: 91 336 63 63  
<http://www.idr.upm.es>, email: lac@idr.upm.es



OBJETO  
Item Cup Anemometer

MARCA  
Mark THIES CLIMA

MODELO  
Model 4.3351.10.000

IDENTIFICACION  
Identification 06162207

SOLICITANTE  
Applicant KINTECH INGENIERIA, S.L.  
Avda. Anselmo Clavé, nº 37-45, local bajo  
50004 Zaragoza

FECHA DE CALIBRACION  
Date of Calibration July 15, 2016

Signatarios autorizados  
Authorized signatories Fecha de emisión:  
Date of issue July 15, 2016  
Firmado digitalmente por VEGA RAMIRO, ENRIQUE (FIRMA)  
Fecha: 2016.07.15 11:04:06 +02'00'



Sello/Seal

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de acreditación concedidas por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales e internacionales.

ENAC es firmante de Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite.

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC, which has assessed the measurements capability of the laboratory and its traceability to national or international standards.

ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory.



Laboratorio de Calibración en Túnel Aerodinámico, LAC, IDR/UPM  
Instituto Universitario de Microgravedad "Ignacio Da Riva"

Página 2 de 5  
Page 2 of 5  
24173AC

## 1. ORDER IDENTIFICATION

Order reference number: 2016090165  
Arrival date: 05/07/2016

## 2. MEASUREMENTS

Measurements were made at the Wind Tunnel of LAC, IDR/UPM following procedure PE-02 of LAC, IDR/UPM, according to the guidelines set by the MEASNET network.

The reference velocity was measured using a Pitot tube ISO3966.

The anemometer was placed on the mounting pilar of the wind tunnel test section which is rectangular of 0.9 m height and 0.9 m width. Before calibration, the anemometer was run at a steady wind tunnel velocity of 10 m/s for 5 minutes in order to avoid the effect that the temperature variations may have on the mechanical friction of the anemometer bearings. Calibration was performed under both rising and falling wind speed in the range of 4 to 16 m/s. The sampling frequency was 10 Hz and the sampling interval was 30 s. Before collecting data at each wind speed, 1 minute delay was allowed for stable conditions to become established.

The calibration campaign is described in Report "ANEMOMETER CALIBRATION REPORT. CAMPAIGN 2000".

## 3. LIST OF EQUIPMENT USED

Instrument	Manufacturer	Type	Serial Number	Code	Calibration	
					Date	Traceability
Pitot Tube	AIRFLOW	0.48	N.A.	9410011	27/10/2010	PTB-1.41-4049848
Pressure Transducer	DRUCK	LPM 9481	30066	7111008	25/09/2015	EUROPASCAL S 5093
Digital Multimeter	KEITHLEY	2000	0980771	1011007	13/09/2014	ENAC 1250-307058846
Barometer Transmitter	Vaisala	PTU 303	C4840003	9711004	31/03/2015	ENAC 94008
Temp.-humid. Sensor		PTU 303	C4840003		26/03/2015	ENAC 93959
Universal Counter	AGILENT	53131A	MY40003942	2011003	19/09/2014	ENAC 1250-307058845



Sello/Seal



#### 4. AMBIENT CONDITIONS

		Mean	Min.	Max.
Air temperature:	[°C]	27.38	27.09	27.63
Air pressure:	[hPa]	948.65	948.60	948.71
Air humidity:	[%]	23.3	23.0	23.5

#### 5. RESULTS

The results included in this certificate are only applicable to the calibrated instrument and to the time instant and conditions at which the calibration was carried out.

**Table 1. Calibration Results**

Anemometer Output F [Hz]	Reference Wind Speed V [m/s]	Uncertainty of V (k=2) [m/s]	Residuals*
85.343	4.20	0.10	-0.0180
125.258	6.03	0.10	-0.0233
167.577	8.01	0.10	0.0125
210.939	10.00	0.10	0.0117
253.801	12.00	0.12	0.0471
299.433	14.05	0.14	-0.0013
342.429	15.98	0.16	-0.0453
320.716	15.02	0.15	-0.0087
276.770	13.03	0.13	0.0187
233.406	11.02	0.11	-0.0002
189.932	9.02	0.10	-0.0036
145.586	7.01	0.10	0.0262
103.235	5.02	0.10	-0.0158

\* Residuals: difference between the anemometer output and the linear regression result. These calculations are not covered by the accreditation.

"The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k = 2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The standard uncertainty of measurement has been determined in accordance with EAL Publication EA -4/02".



Sello/Seal



#### Linear Regression Results\*\*

The statistical uncertainty is given by

$$\sigma(y_a) = \left\{ x_a^2 \sigma_A^2 + \sigma_B^2 + 2x_a \text{ COV}(A, B) \right\}^{1/2}.$$

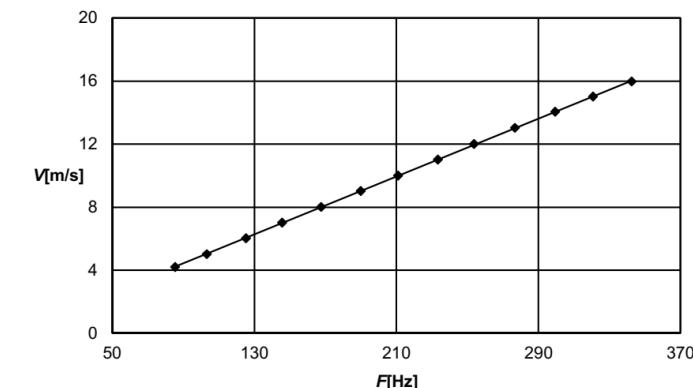
For 10 m/s wind speed the statistical uncertainty  $\sigma(y_a)$  is 0.0069 [m/s].

**Table 2. Linear Regression Results**

$$V[\text{m/s}] = A ([\text{m/s}]/[\text{Hz}]) * F[\text{Hz}] + B[\text{m/s}]$$

Parameter	Value	sd	Comments
<i>A</i>	0.04593	0.00009	Slope
<i>B</i>	0.29871	0.01934	Offset
<i>r</i>	0.99998		Regression Coefficient
sd( <i>V</i> )	0.02488		Standard Deviation

\*\*The linear regression has been carried out by using a least squares fitting. These calculations are not covered by the accreditation.



Sello/Seal



**Photo of the Anemometer in the Wind Tunnel**



**Remarks:**

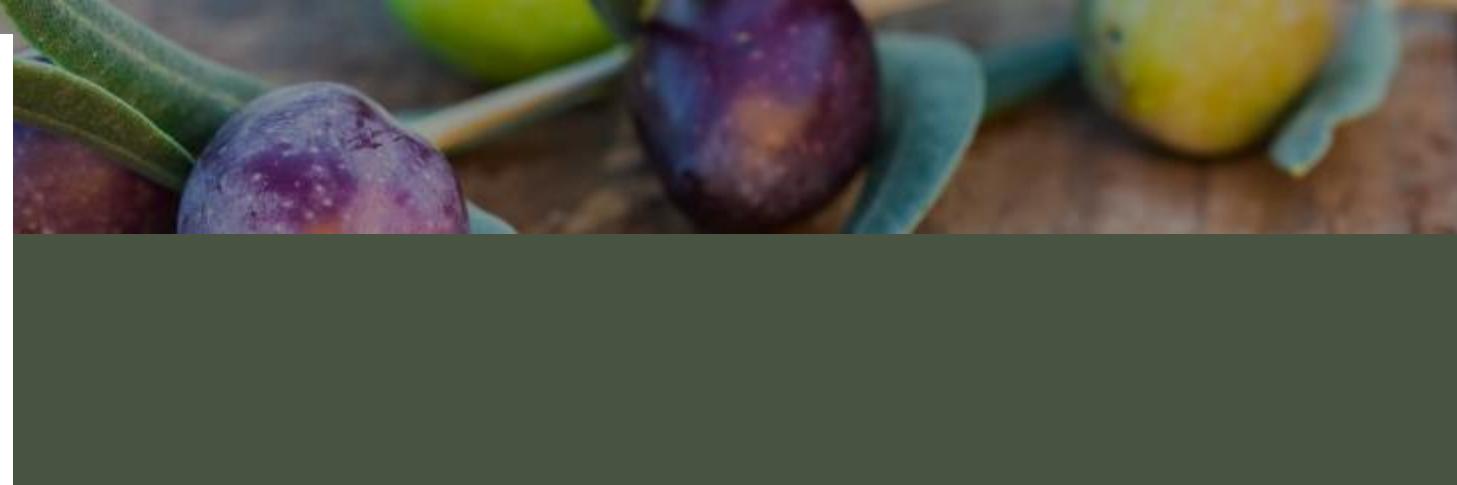
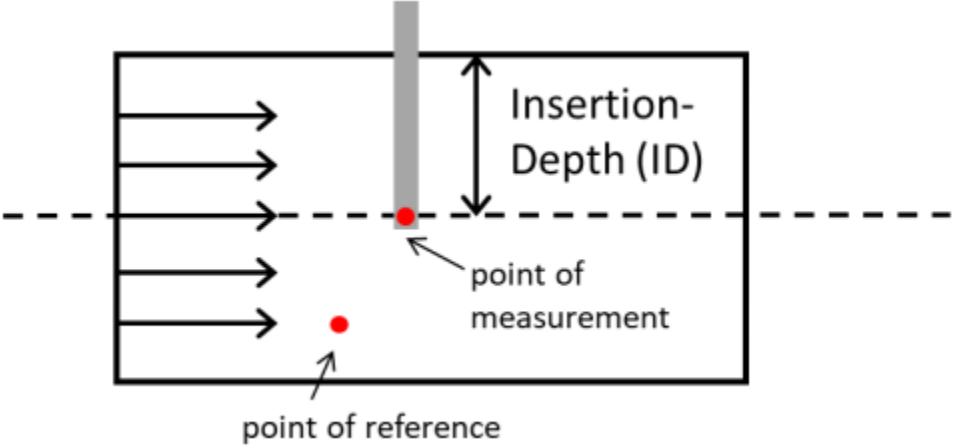
The photo does not correspond to the actual calibration but shows a representative arrangement of the mounting of that type of anemometers.

**References**

Nikolai A. Bezdenejnykh, "Anemometer Calibration Report. Campaign 2000", Ref. T/ICC/C0011



Sello/Seal



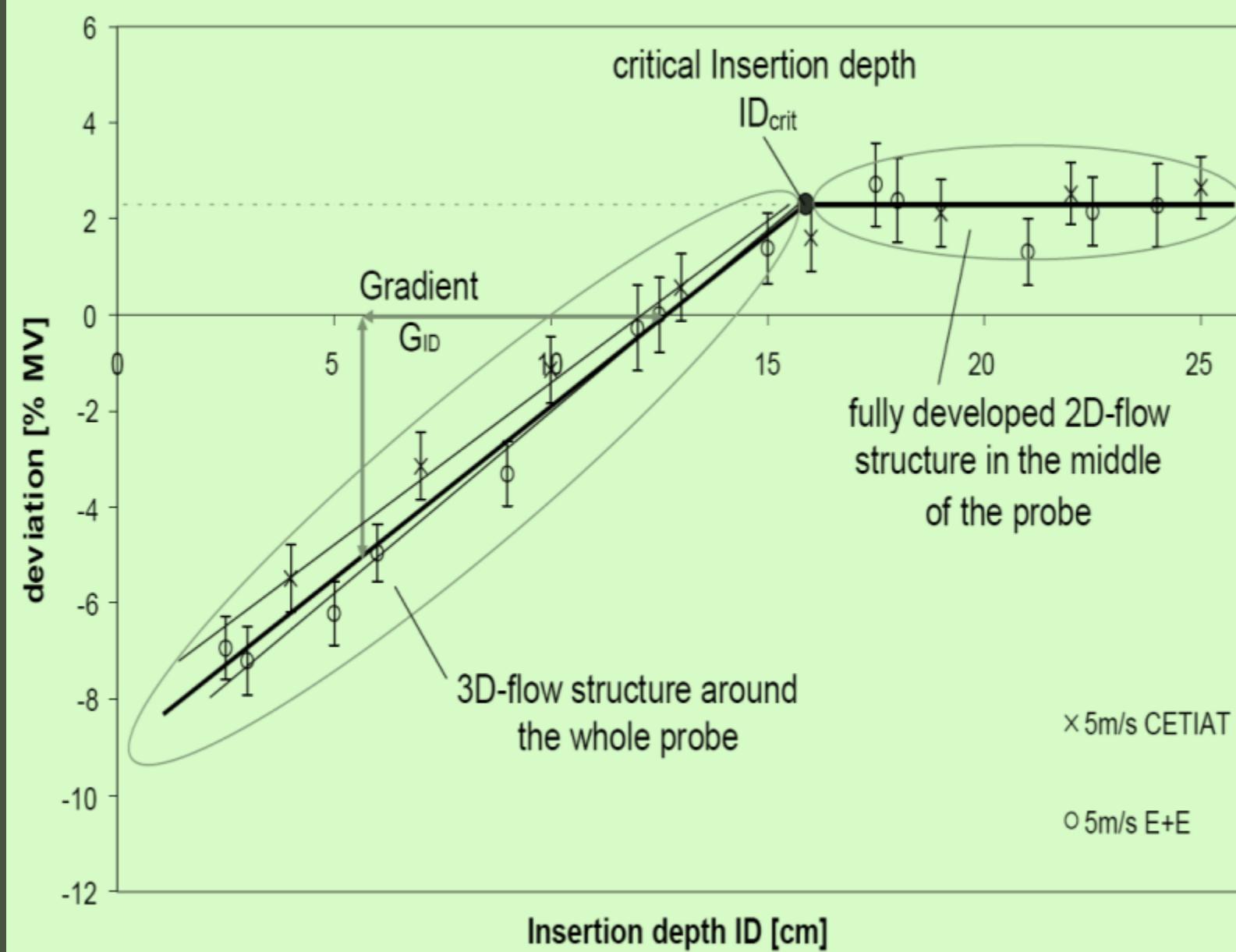
## LAMPIRAN A KETERGANTUNGAN KEDALAMAN PENYISIPAN

Biasanya, hasil pengukuran anemometer, seperti TA, dipengaruhi secara signifikan dari pemasangan geometrisnya di terowongan angin. Namun, jika TA ditempatkan pada kedalaman penyisipan yang sama (seperti yang ditunjukkan pada Gambar diatas), hasil kalibrasi di terowongan angin yang benar-benar berbeda secara geometris menunjukkan kesesuaian yang sangat baik.

# LAMPIRAN A

## KETERGANTUNGAN KEDALAMAN PENYISIPAN

Karakteristik yang diamati pada Gambar disamping – deviasi versus kedalaman penyisipan – menunjukkan bahwa jenis terowongan angin yang berbeda dan dimensi bagian uji yang berbeda, mis. pada CETIAT dan BEV/E+E, tidak berpengaruh signifikan terhadap hasil kalibrasi.



# LAMPIRAN A

## KETERGANTUNGAN KEDALAMAN PENYISIPAN

Kurva karakteristik pada Gambar slide sebelumnya dapat dibagi menjadi dua bagian utama.

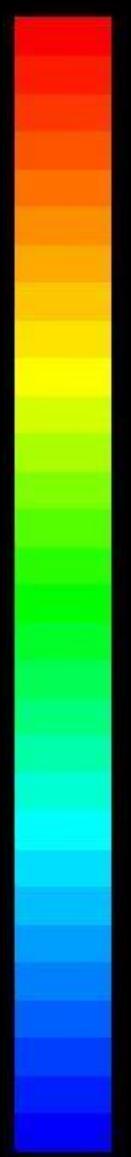
- Di bawah kedalaman penyisipan kritis  $ID_{crit}$ , aliran di sekitar seluruh probe adalah 3 dimensi. Aliran di sekitar kepala silinder dan hasil kalibrasi karena itu bergantung pada kedalaman penyisipan, menunjukkan peningkatan yang mendekati linier dengan gradien  $G_{ID}$ .
- Di atas kedalaman penyisipan  $ID_{crit}$ , daerah aliran kuasi-2D dikembangkan di tengah probe. Dengan demikian, hasil kalibrasi tidak tergantung pada kedalaman penyisipan [lihat dokumen referensi].

- Kesimpulannya, parameter nondimensi  $\left(\frac{l}{d}\right)_{crit}$  didefinisikan, untuk menentukan kedalaman penyisipan kritis dari terowongan angin yang diberikan. ( $l$  - panjang TA,  $d$  - diameter TA,  $Re$  - Reynolds Number, - ketebalan lapisan batas)

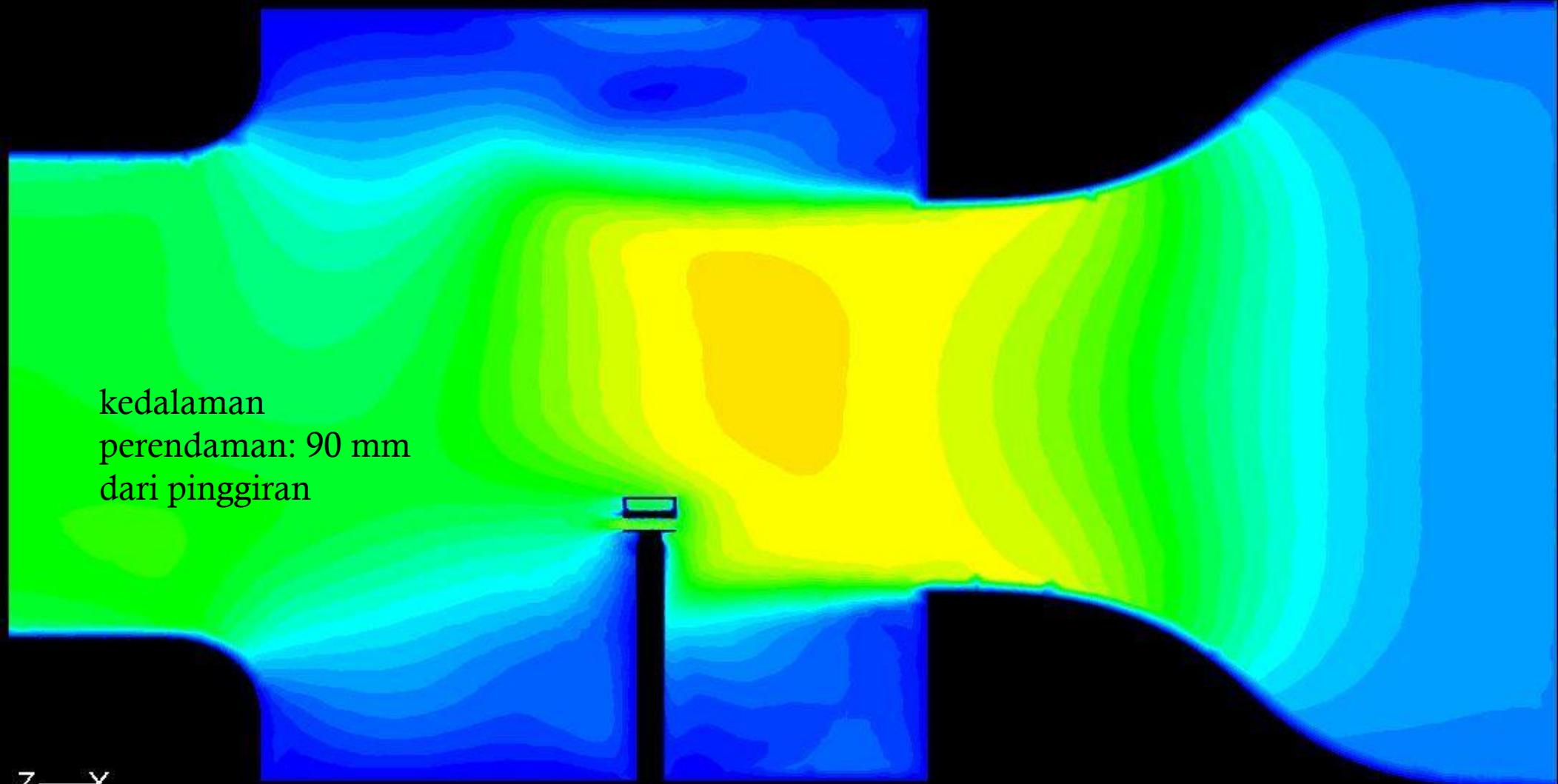
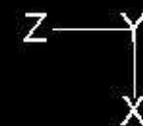
$$\left(\frac{l}{d}\right)_{crit} = \frac{ID_{crit}}{d} = F\left(\frac{\delta}{l}, Re\right)$$

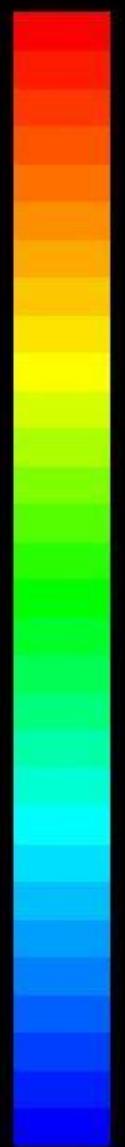
## Pengaruh kedalaman penyisipan/perendaman (immersion depth)

- Jika kita menempatkan anemometer di wind tunnel, resistansi test bed meningkat dan aliran volume berkurang.
- Oleh karena itu: Anemometer akan menunjukkan nilai yang lebih rendah.
- Namun semakin dalam anemometer berada di dalam aliran udara, semakin tinggi nilai yang ditampilkan.
- Selama kalibrasi anemometer ditempatkan di bagian pengukuran. Anemometer dan bagian dari tiang (pole extend ) memanjang ke penampang nosel.
- Udara mengalir melalui baling-baling dan di sekitar kutub, tidak hanya radial di sekitar kutub tetapi juga aksial.
- Aliran udara aksial mengarah ke kepala anemometer dan mempercepat baling-baling. Tampilan menunjukkan nilai + nilai pengaruh tiang.

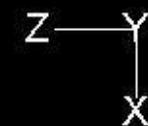


30.00  
29.00  
28.00  
27.00  
26.00  
25.00  
24.00  
23.00  
22.00  
21.00  
20.00  
19.00  
18.00  
17.00  
16.00  
15.00  
14.00  
13.00  
12.00  
11.00  
10.00  
9.00  
8.00  
7.00  
6.00  
5.00  
4.00  
3.00  
2.00  
1.00  
0.00

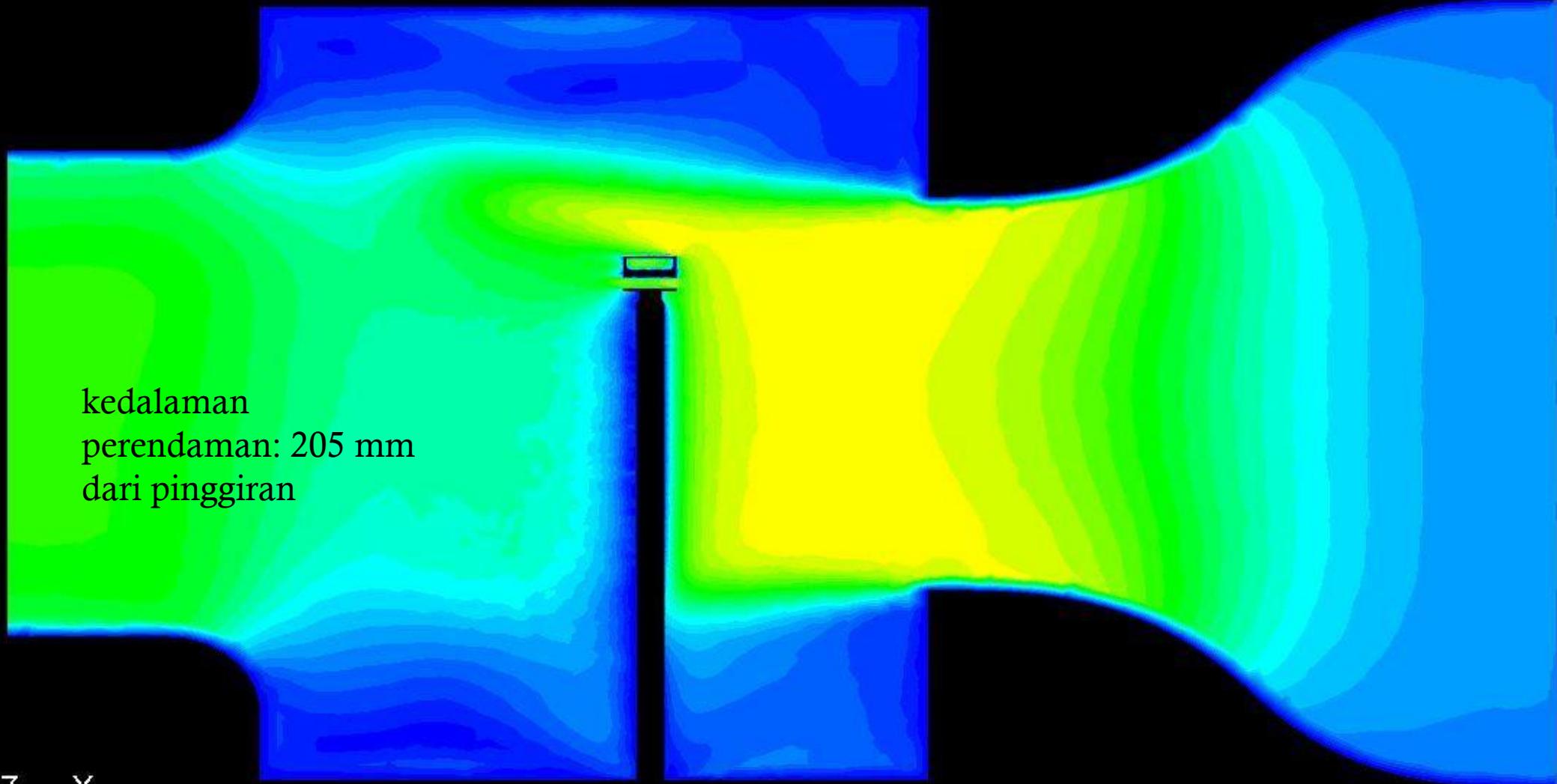




30.00  
29.00  
28.00  
27.00  
26.00  
25.00  
24.00  
23.00  
22.00  
21.00  
20.00  
19.00  
18.00  
17.00  
16.00  
15.00  
14.00  
13.00  
12.00  
11.00  
10.00  
9.00  
8.00  
7.00  
6.00  
5.00  
4.00  
3.00  
2.00  
1.00  
0.00



kedalaman  
perendaman: 205 mm  
dari pinggiran



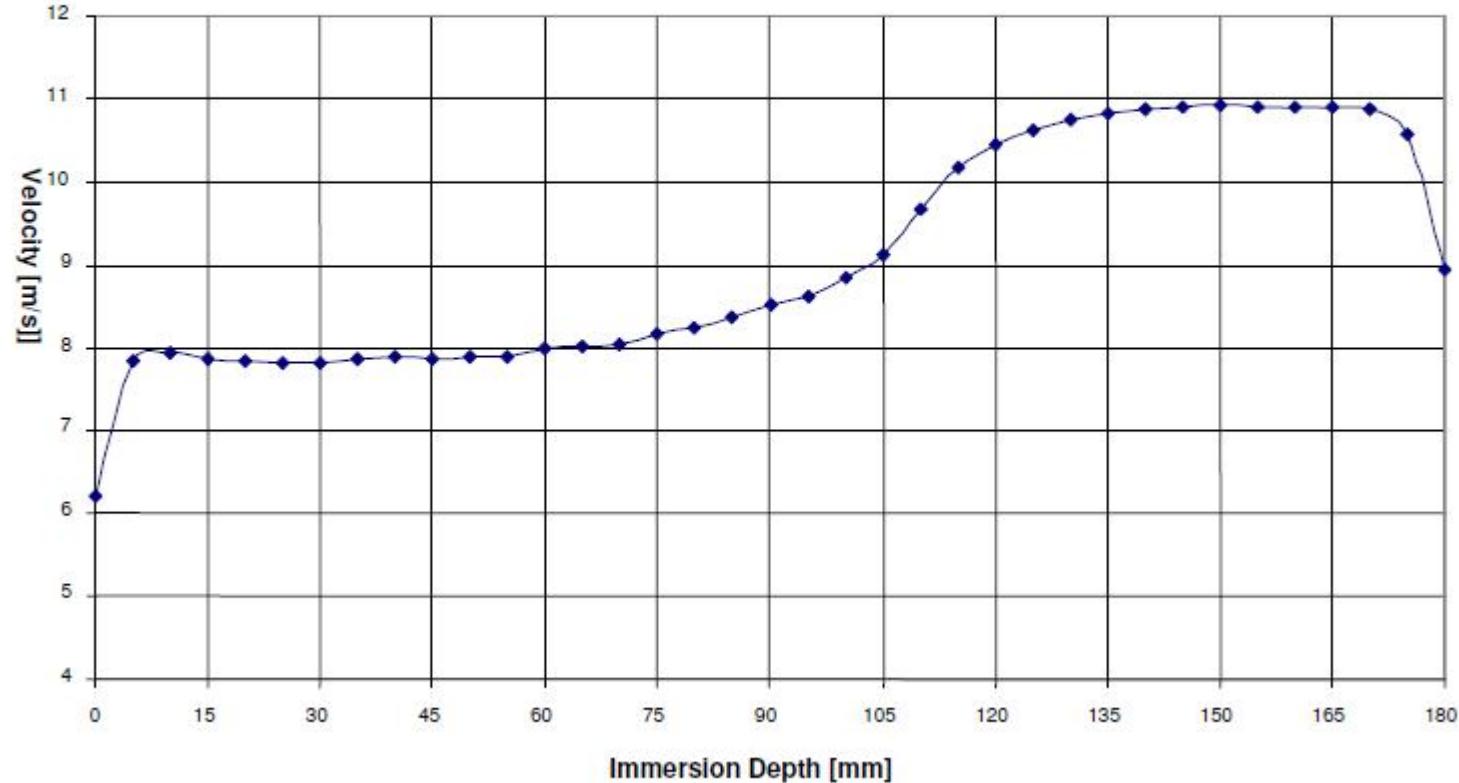
# Pengaruh kedalaman penyisipan/perendaman (immersion depth)

Pengaruhnya  
tergantung pada:

- Geometri anemometer
- Struktur badan tiang
- Penampang nozel

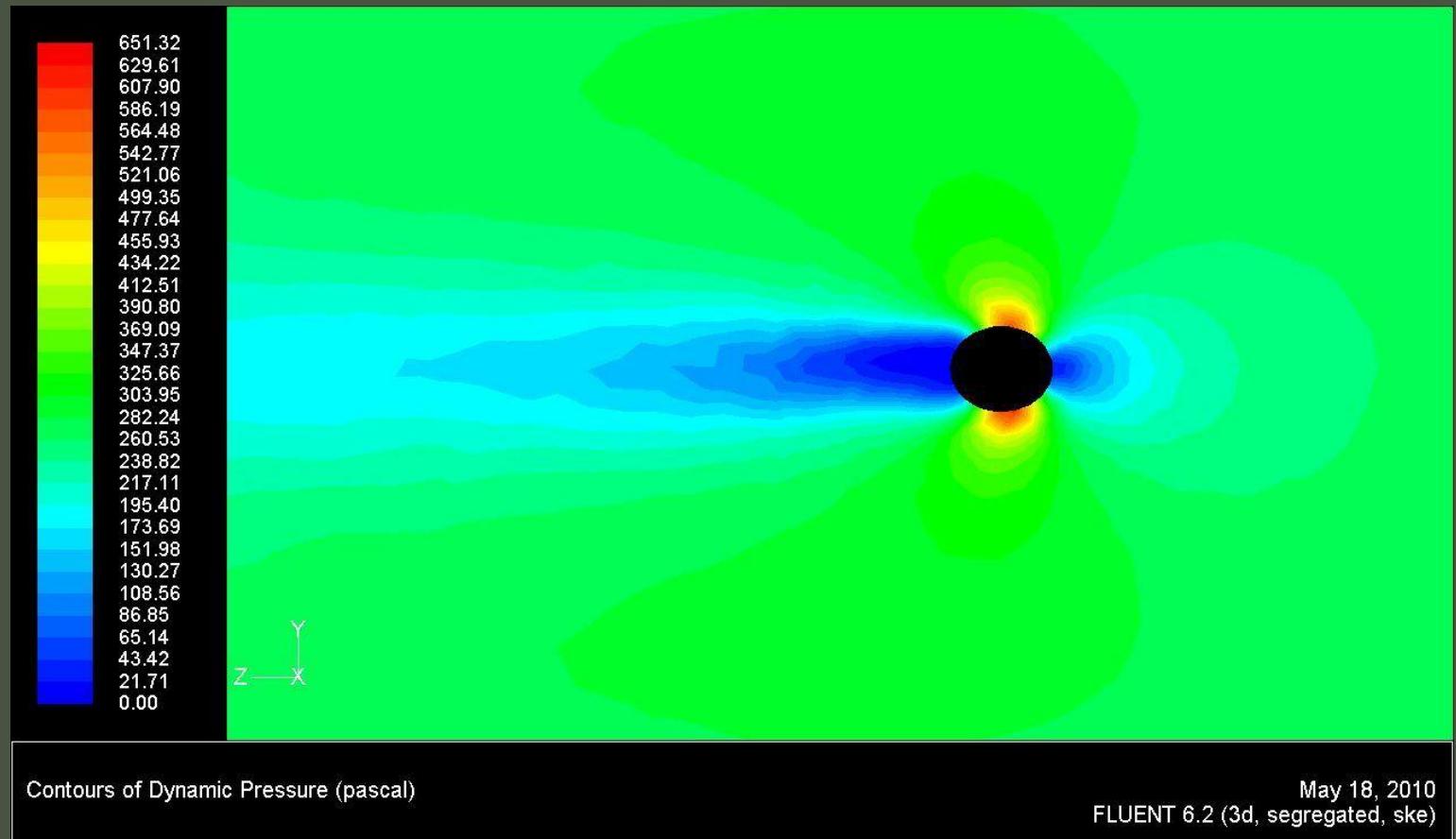
Thermo electrical anemometer, 180 mm Nozzle outlet

Reference velocity 10 m/s



# Pengaruh penyumbatan (The blockage effect)

- Efek ini dipengaruhi oleh kedalaman pencelupan dan ukuran anemometer.
- Pada dasarnya: semakin besar kepala dan kutub anemometer semakin tinggi efek penyumbatan di medan aliran.
- Efek ini mempengaruhi terowongan angin serta kalibrasi



## Pengaruh penyumbatan (The blockage effect)

Apa yang terjadi di dalam wind tunnel

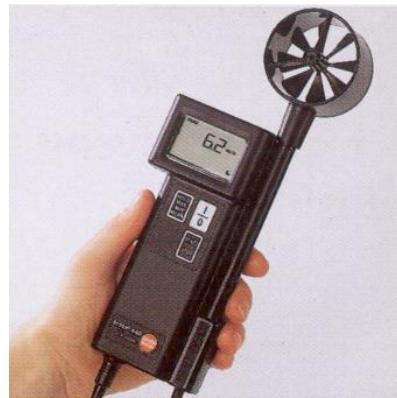
- Tekanan terakumulasi melawan arah aliran. Dimungkinkan berpengaruh pada hasil pembacaan anemometer.
- Resistansi ruang pengukuran di wind tunnel meningkat dan aliran volume menurun.
- Di bagian pengukuran tertutup, kecepatan udara meningkat di sekitar probe. Nilai pada display meningkat.
- Di bagian pengukuran terbuka, aliran udara membesar di sekitar probe. Nilai di display berkurang.

# Parameters influencing test results



## ■ Use of different instruments

test results : same hood, same flow rate and same sash height



	Hot wire	Vane Anemometer	
		Person 1	Person 2
V avg	0.55m/s (100 fpm)	0.72m/s (144 fpm)	0.59m/s (118 fpm)
V min	0.32m/s (64 fpm)	0.61m/s (122 fpm)	0.41m/s (82 fpm)
V max	0.71m/s (142 fpm)	0.89m/s (188 fpm)	0.74m/s (148 fpm)

# KARAKTERISASI WIND TUNNEL

- Pengukuran titik di test section wind tunnel dilakukan dengan mengukur kecepatan angin pada bagian dan titik tertentu menggunakan Anemometer.
- Sebaran titik ukur dapat dilihat pada gambar 4.1
- Posisi titik ukur dapat dilihat pada gambar 4.2
- Proses karakterisasi wind tunnel menggunakan anemometer dapat dilihat pada gambar 4.3.

Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Vol. 4 No. 3, Nopember 2017

## PROTOTIPE WIND TUNNEL SEBAGAI KALIBRATOR ANEMOMETER PROTOTYPE WIND TUNNEL AS CALIBRATOR ANEMOMETER

Muhammad Reza Maulana Aliva<sup>1\*</sup>, Hapsoro A. Nugroho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta  
Email : rezaaliva7@gmail.com

### ABSTRAK

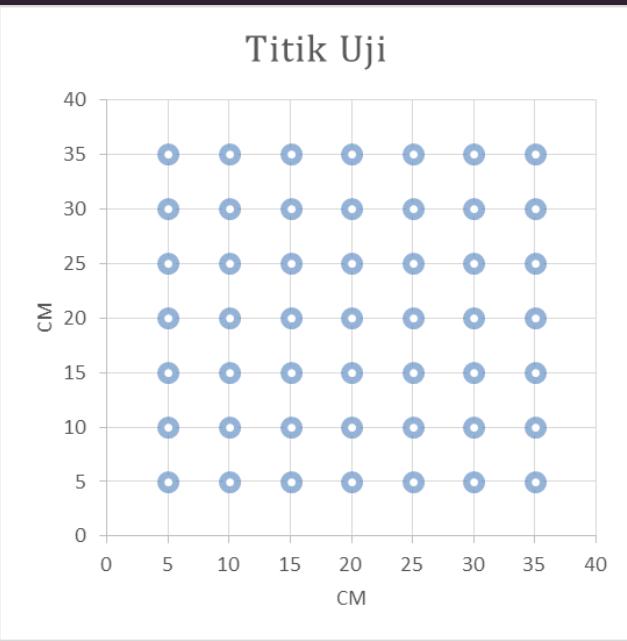
Informasi kecepatan angin merupakan salah satu parameter yang diperlukan BMKG yang diukur dengan menggunakan anemometer. Oleh karena itu diperlukan kalibrasi terhadap anemometer agar menghasilkan data kecepatan angin yang tepat dan akurat dengan menggunakan wind tunnel. Wind tunnel atau terowongan angin adalah suatu alat untuk melakukan studi dan penelitian mengenai interaksi antara gerakan udara dengan benda-benda yang ada didalam aliran udara. Wind Tunnel dalam kalibrasi perlatan meteorologi adalah alat kalibrator untuk kecepatan angin yang dapat menghasilkan angin laminar yang kecepatannya dapat dikontrol sehingga dapat digunakan untuk kalibrasi sensor kecepatan angin. Penelitian ini dilakukan untuk perancangan prototipe wind tunnel, dimana profil kecepatan angin diukur untuk mengetahui intensitas turbulensi dengan mengendalikan kecepatan motor kipas pada wind tunnel. Perancangan prototype ini bertujuan untuk memenuhi kegiatan belajar praktek kalibrasi peralatan meteorologi di STMKG agar taruna/i mengetahui proses kalibrasi anemometer menggunakan wind tunnel. Wind tunnel hasil rancangan dan implementasi memiliki panjang total 150 cm dengan intensitas turbulensi antara 3.11 % sampai 6.55 %. Anemometer Casella dengan nilai koreksi 0.05 m/s setelah proses kalibrasi digunakan sebagai standar dalam melakukan proses kalibrasi.

*Kata Kunci : Wind tunnel, anemometer, kalibrasi, intensitas turbulensi*

### ABSTRACT

Wind speed information is one of the required parameters of BMKG and is measured using an anemometer. Therefore, calibration of an anemometer is required to produce precise and accurate wind speed data using wind tunnel. Wind tunnel is a vehicle to studies and research on the interaction between air movement with objects in the air flow. Wind Tunnel in calibration of meteorologi equipment is a calibrator for wind speed which can produce laminar wind which its speed can be controlled so that it can be used for wind speed sensor calibration. This research was conducted to design the wind tunnel prototype, where the wind velocity profile is measured to know the intensity of turbulence by controlling the speed of fan motor in wind tunnel. The design of this prototype aims to support the learning activity of calibration practice of meteorology equipment in STMKG so that cadets know the calibration process of anemometer using wind tunnel. The design and implementation wind tunnel has a total length of 150 cm with intensity of turbulence between 3.11% to 6.55%. Casella anemometer with a correction 0.05 m/s after the calibration process is used as a standard in performing the calibration process.

*Keyword : Wind tunnel, anemometer, calibration, intensity of turbulence*



GAMBAR 4.1  
SEBARAN  
TITIK UKUR



GAMBAR 4.2  
POSISI UJI  
TITIK



GAMBAR 4.3  
PROSES  
KARAKTERISASI

## KARAKTERISASI WIND TUNNEL

- Karakterisasi dilakukan dengan meletakkan anemometer pada bagian uji dan anemometer Casella pada bagian tengah test section. Kecepatan angin diatur sampai pembacaan anemometer Casella (standar) menunjukkan set point tertentu.
- Hasil pengujian titik bagian 2 dengan set point 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s dapat dilihat pada tabel 4.1.

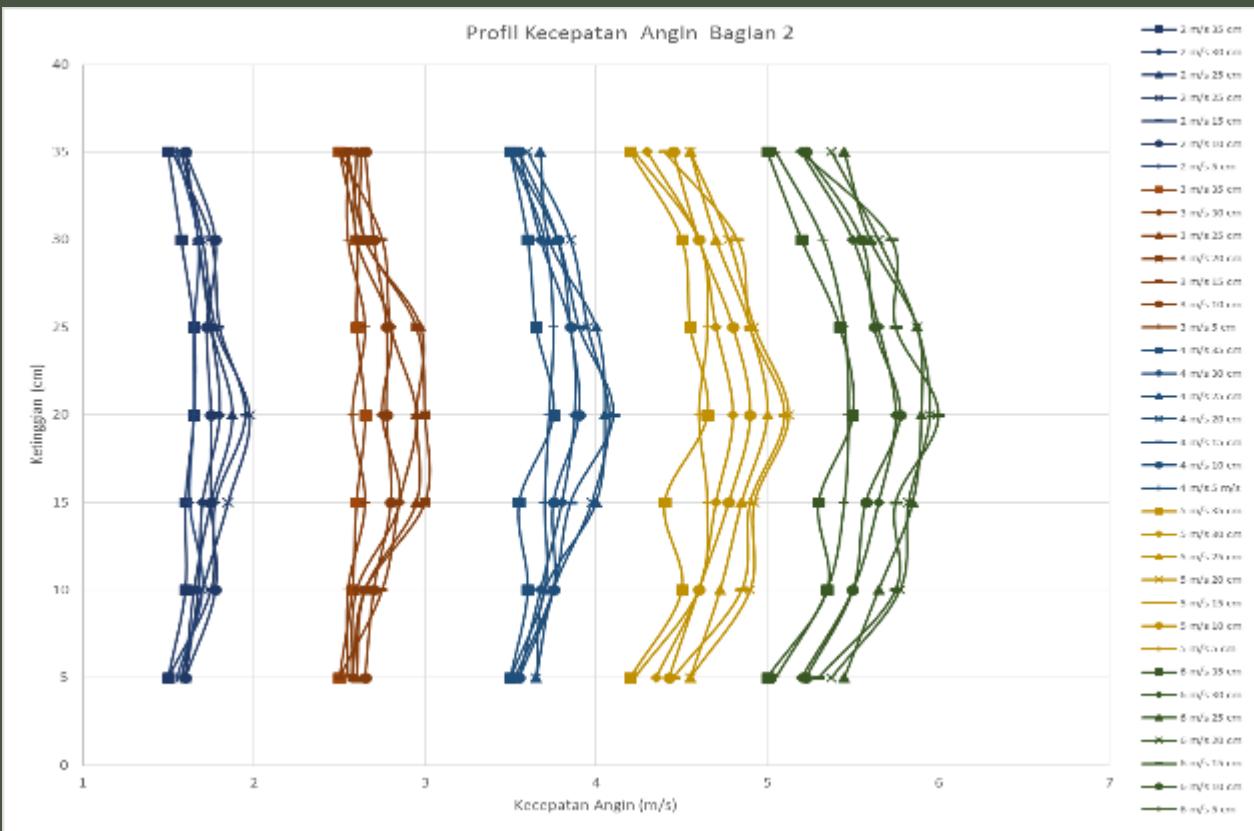
Kecepatan Angin	Tinggi Titik (cm)	Jarak Titik (cm)						
		5	10	15	20	25	30	35
2.04 m/s	35	1.50	1.60	1.60	1.58	1.53	1.60	1.55
	30	1.58	1.68	1.68	1.70	1.75	1.78	1.68
	25	1.65	1.75	1.75	1.78	1.80	1.73	1.65
	20	1.65	1.80	1.88	1.98	1.95	1.75	1.65
	15	1.60	1.70	1.75	1.85	1.78	1.75	1.63
	10	1.60	1.68	1.65	1.70	1.75	1.78	1.70
	5	1.50	1.60	1.60	1.58	1.50	1.60	1.55
3.01 m/s	35	2.50	2.58	2.60	2.58	2.50	2.65	2.55
	30	2.58	2.60	2.65	2.65	2.75	2.70	2.55
	25	2.60	2.85	2.95	3.00	2.85	2.80	2.65
	20	2.65	2.75	2.95	3.00	2.95	2.78	2.58
	15	2.60	2.80	2.98	2.95	2.80	2.78	2.65
	10	2.60	2.60	2.65	2.65	2.75	2.70	2.55
	5	2.50	2.60	2.63	2.55	2.50	2.65	2.55
4.06 m/s	35	3.50	3.55	3.65	3.65	3.53	3.55	3.50
	30	3.60	3.68	3.70	3.75	3.75	3.75	3.70
	25	3.55	3.80	4.00	3.98	3.85	3.75	3.70
	20	3.75	3.88	4.05	4.08	4.10	3.90	3.73
	15	3.65	3.85	4.00	3.95	3.90	3.85	3.75
	10	3.60	3.68	3.73	3.85	3.78	3.78	3.70
	5	3.50	3.55	3.68	3.60	3.50	3.55	3.50
5.04 m/s	35	4.20	4.35	4.55	4.55	4.45	4.43	4.23
	30	4.50	4.60	4.73	4.90	4.85	4.60	4.60
	25	4.40	4.70	4.85	4.93	4.90	4.78	4.65
	20	4.65	4.80	5.00	5.13	5.10	4.90	4.60
	15	4.55	4.70	4.90	4.93	4.90	4.80	4.65
	10	4.50	4.60	4.70	4.78	4.83	4.60	4.60
	5	4.20	4.30	4.55	4.55	4.40	4.45	4.23
6.01 m/s	35	5.00	5.20	5.45	5.38	5.30	5.23	5.05
	30	5.35	5.50	5.65	5.78	5.75	5.50	5.35
	25	5.30	5.65	5.85	5.83	5.75	5.58	5.45
	20	5.50	5.75	5.90	5.95	6.00	5.78	5.48
	15	5.43	5.65	5.88	5.88	5.75	5.63	5.45
	10	5.20	5.50	5.60	5.65	5.73	5.55	5.33
	5	5.00	5.20	5.45	5.38	5.20	5.23	5.05

Tabel 4.1 Data hasil pengujian titik.

# Casella Anemometer



# KARAKTERISASI WIND TUNNEL



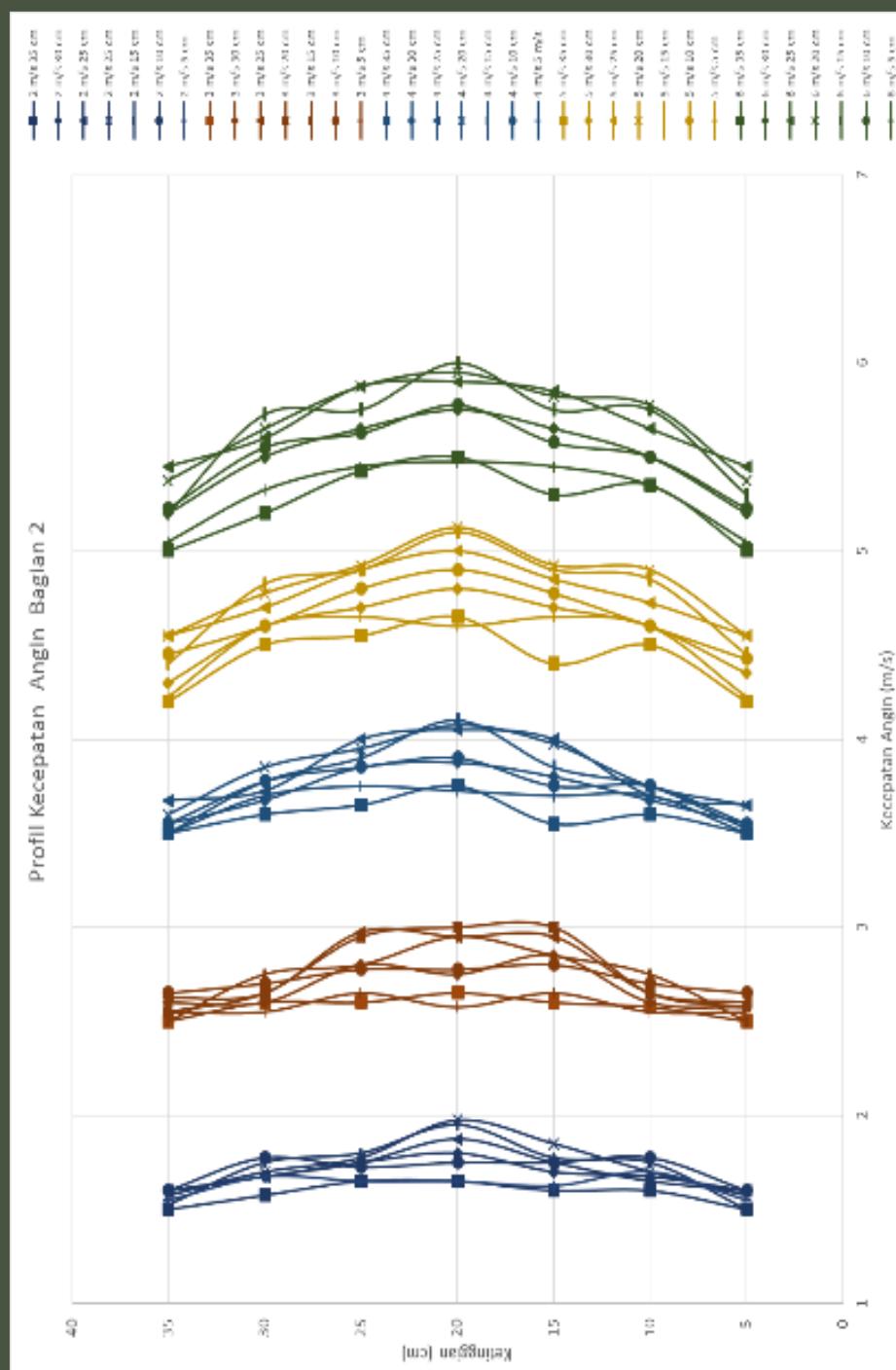
**Gambar 4.4** Grafik profil kecepatan angin

- Karakterisasi dilakukan dengan meletakkan anemometer pada bagian uji dan anemometer Casella pada bagian tengah test section. Kecepatan angin diatur sampai pembacaan anemometer Casella (standar) menunjukkan set point tertentu.
- Data hasil pengujian tersebut digambarkan dalam bentuk grafik pada gambar 4.4 untuk melihat profil kecepatan setiap ketinggian.

## KARAKTERISASI WIND TUNNEL

- Analisis dari data hasil pengukuran kecepatan angin setiap titik uji meliputi rata-rata selisih setiap ketinggian, kesalahan setiap ketinggian, rata-rata kesalahan, standar deviasi, kecepatan rata-rata, kecepatan maksimum, dan kecepatan minimum.
- Profil kecepatan angin pada tabel 4.2 merupakan analisis dari tabel 4.1 menunjukkan kecepatan angin tertentu menghasilkan kecepatan angin di titik uji yang berfluktuasi dengan kecepatan minimum dan maksimum yang berbeda-beda setiap ketinggian.
- Rata-rata selesih kecepatan angin tersebut sudah masuk dalam batas toleransi yang ditetapkan yaitu sebesar  $\pm 0.5$  m/s meskipun pada ketinggian 5 cm dan 35 cm untuk kecepatan 4.06 m/s, 5.04 m/s dan 6.01 m/s selisihnya berada di luar batas toleransi.
- Intensitas turbulensi terkecil yaitu 4.56% pada kecepatan 4.06 m/s dan intensitas turbulensi terbesar yaitu 6.55% pada kecepatan 2.04 m/s.





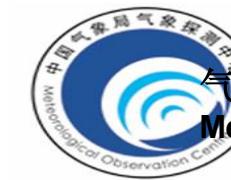
Kecepatan Angin (m/s)	Tinggi (cm)	Kecepatan Min (m/s)	Kecepatan Max (m/s)	Kecepatan Rata-rata (m/s)	Selisih (m/s)	Standar Deviasi (m/s)	Intensitas Turbulensi (%)
2.04	35	1.68	1.75	1.83	0.30	0.11	5.78
	30	1.70	1.90		0.16		
	25	1.75	2.00		0.08		
	20	1.78	2.00		0.09		
	15	1.80	2.00		0.11		
	10	1.75	1.90		0.18		
	5	1.68	1.80		0.30		
3.01	35	2.60	2.78	2.78	0.47	0.14	5.18
	30	2.63	2.90		0.31		
	25	2.70	2.98		0.18		
	20	2.70	3.10		0.21		
	15	2.80	3.00		0.25		
	10	2.60	2.90		0.31		
	5	2.60	2.80		0.48		
4.06	35	3.50	3.75	3.85	0.46	0.18	4.67
	30	3.65	4.00		0.23		
	25	3.70	4.10		0.08		
	20	3.83	4.10		0.13		
	15	3.90	4.10		0.14		
	10	3.68	4.00		0.22		
	5	3.50	3.80		0.47		
5.04	35	4.30	4.65	4.77	0.70	0.24	4.94
	30	4.45	4.90		0.41		
	25	4.65	5.00		0.33		
	20	4.65	5.20		0.26		
	15	4.90	5.13		0.18		
	10	4.48	4.93		0.42		
	5	4.30	4.65		0.71		
6.01	35	5.30	5.58	5.73	0.76	0.26	4.62
	30	5.40	5.90		0.47		
	25	5.65	5.95		0.43		
	20	5.83	6.20		0.23		
	15	5.85	6.18		0.15		
	10	5.38	5.93		0.48		
	5	5.30	5.58		0.77		

Tabel 4.2 Analisi profil kecepatan angin

# Sumber-sumber (komponen) Ketidakpastian Pengukuran

Ketidakpastian anemometer yang dikalibrasi terutama berasal dari aspek-aspek berikut:

- ✓ Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh koefisien kalibrasi tabung statis Pitot standar kelas satu diperlakukan sebagai evaluasi tipe B.
- ✓ Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh manometer mikro terkompensasi kelas satu diperlakukan sebagai evaluasi tipe B.
- ✓ Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh koreksi densitas udara diperlakukan sebagai evaluasi tipe B.
- ✓ Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh kinerja medan aliran terowongan angin diperlakukan sebagai evaluasi tipe B.
- ✓ Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh operator diperlakukan sebagai evaluasi tipe B.



气象探测中心  
Meteorological Observation Center

## Model Matematika

Menurut persamaan Bernoulli fluida ideal dalam mekanika fluida dan dengan mempertimbangkan faktor-faktor desain dan keragaman produksi tabung statis Pitot standar, ketika tabung statis Pitot digunakan untuk mengukur kecepatan angin, berikut ini rumus sederhananya (1)

$$v = 1.278 \sqrt{P_v \xi k_p} \quad (1)$$

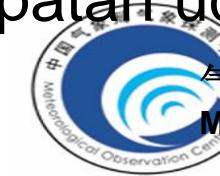
Dalam rumus ini,

V adalah kecepatan udara;

$P_v$  adalah selisih nilai antara tekanan total dan tekanan statis tabung statis Pitot, yaitu pembacaan mikro-anometer;

$\xi$  adalah koefisien kalibrasi tabung statis Pitot;

$K_p$  adalah singkatan dari koefisien koreksi kerapatan udara.

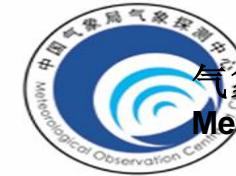


气象探测中心  
Meteorological Observation Center

## Model Matematika

Dalam proses kalibrasi anemometer, kinerja medan aliran terowongan angin dan pembacaan dari operator yang berbeda memiliki pengaruh masing-masing pada ketidakpastian anemometer yang dikalibrasi, dan hubungan antara besaran pengaruh yang disebabkan oleh perangkat dan instrumen standar dan kedua besaran pengaruh ini adalah jumlah aljabar. Tentukan dan sebagai dua besaran yang mempengaruhi masing-masing, fungsi transfer peralatan standar dapat dituliskan sebagai:

$$V = 1.278 \sqrt{P_V \xi k_p} + l + \beta \quad (2)$$



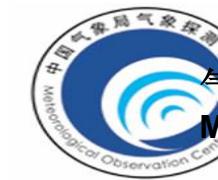
# Model Matematika

Karena item pertama dari rumus (2) adalah perkalian fungsi pangkat, kami memilih untuk menggunakan ketidakpastian relatif dalam perhitungannya. Jika kita menulis ketidakpastian standar relatif dari variabel yang disebutkan dalam rumus (2), dan tiga item komponen ketidakpastian standar relatif di sebelah kanan rumus (2) dalam hal  $u_{r1}, u_{r2}, u_{r3}$ , maka ketidakpastian standar relatif gabungan dari alat verifikasi diperoleh

$$u_r = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2} \quad (3)$$

Dimana ketidakpastian standar relatif gabungan adalah

$$u_{r1} = \sqrt{p_1^2 u_r^2(\xi) + p_2^2 u_r^2(P_v) + p_3^2 u_r^2(k_p)} \quad (4)$$



气象探测中心  
Meteorological Observation Center

## Model Matematika

Pada persamaan (4),  $u_r(\xi)$ ,  $u_r(P_V)$  dan  $u_r(k_p)$  berturutan mewakili ketidakpastian baku relative komponen-komponen disebabkan oleh calibration coefficient dari Pitot tube  $\xi$ , pembacaan micro-manometer  $P_V$  dan koreksi koefisien dari densitas udara  $k_p$ .

Sesuai metode acuan JJF1059 dan persamaan (1),

diketahui  $p_1 = \frac{1}{2}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$ ,  $p_3 = 1$ .



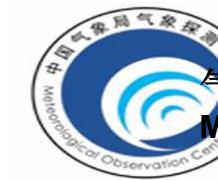
# Evaluasi Ketidakpastian

1. Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh koefisien kalibrasi tabung statis Pitot standar kelas satu

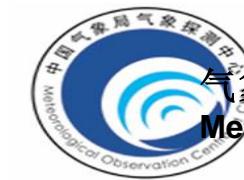
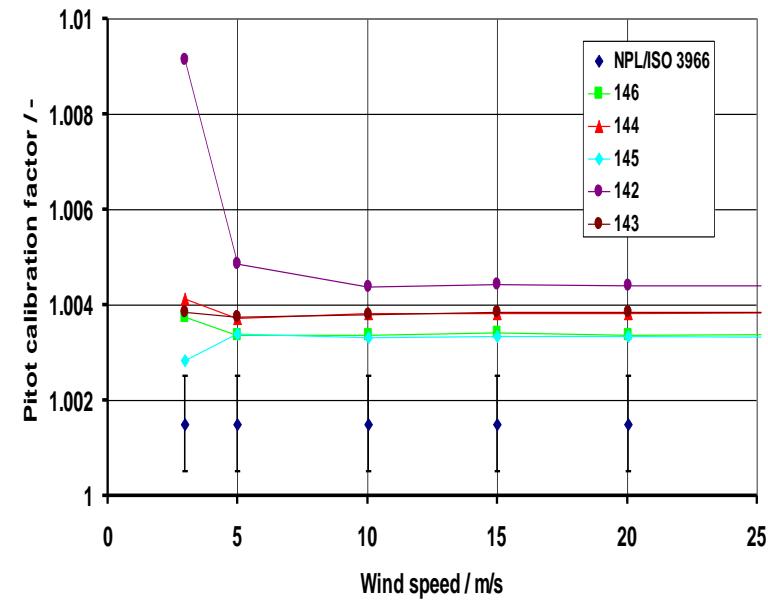
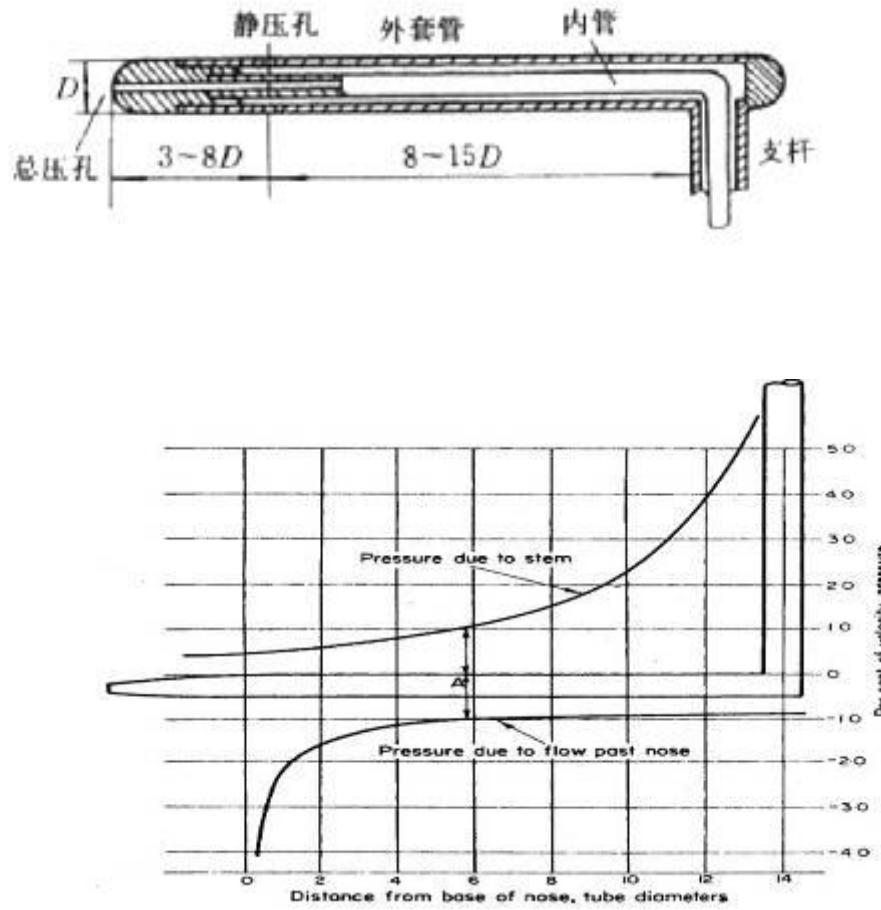
$$\xi = 1.003 \pm 0.001 \quad (5)$$

$$u_r(\xi) = 0.001 / 0.003 = 0.1\% \quad (6)$$

$$v_{\xi} = \frac{1}{2 \left[ \frac{\sigma[u_r(\xi)]}{u_r(\xi)} \right]^2} = \frac{1}{2 \times 0.25^2} = 8 \quad (7)$$



气象探测中心  
Meteorological Observation Center

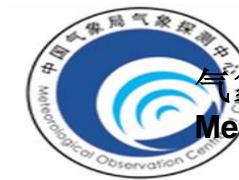


气象探测中心  
Meteorological Observation Center

## 2. Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh manometer mikro terkompensasi kelas satu

$$u_r(P_V) = \frac{0.4/3}{R} = \frac{0.133}{R} = \frac{13.3}{R} \% \quad (8)$$

$$\nu_P = \frac{1}{2 \left[ \frac{\sigma[u_r(P_V)]}{u_r(P_V)} \right]^2} = \frac{1}{2 \times 0.1^2} = 50 \quad (9)$$



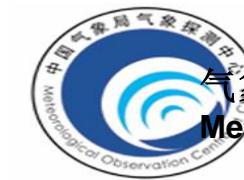
气象探测中心  
Meteorological Observation Center

### 3. Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh koreksi kerapatan udara

$$k_p = \sqrt{\frac{1013.25(273.15 + t)}{288.15(P - 0.378ue_w)}} \quad (10)$$

$$u_{r1} = \sqrt{p_1^2 u_r^2(\xi) + p_2^2 u_r^2(P_V) + p_3^2 u_r^2(k_p)} = \sqrt{0.0025 + \frac{44.22}{R^2}} \% \quad (11)$$

$$\nu_{eff1} = \frac{\frac{u_{r1}^4}{[p_1 u_r(\xi)]^4 + [p_2 u_r(P_V)]^4}}{\nu_\xi} = \frac{\left(0.0025 + \frac{44.22}{R^2}\right)^2 \times 10^{-8}}{\frac{0.05^4 \times 10^{-8}}{8} + \frac{\left(\frac{6.67}{R}\right)^4 \times 10^{-8}}{50}} \quad (12)$$



气象探测中心  
Meteorological Observation Center

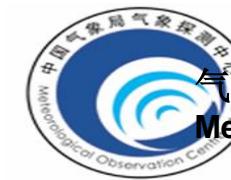
#### **4. Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh kinerja medan aliran terowongan angin (wind tunnel flow field)**

(1) Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh medan aliran yang tidak seragam

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{q_i / q}{\bar{q}} - 1 \right)^2}{n-1}} \quad (13)$$

$$u_r(\mu) = \frac{1}{2} \times 0.43\% = 0.215\% \quad (14)$$

$$v_\mu = n-1 = 145 - 1 = 144 \quad (15)$$



气象探测中心  
Meteorological Observation Center

#### 4. Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh kinerja medan aliran terowongan angin (wind tunnel flow field)

(2) Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh medan aliran yang tidak tetap

$$\eta = \frac{|q_i - \bar{q}|_{\max}}{\bar{q}} \quad (16)$$

$$u_r(\eta_q) = \frac{|q_i - \bar{q}|_{\max}}{k\bar{q}} \quad (17)$$

$$u_r(\eta_q) = 0.6\% \times \frac{1}{2.73} = 0.22\% \quad (18)$$

$$u_r(\eta_V) = \frac{1}{2} \times 0.22\% = 0.11\% \quad (19)$$

$$\nu_\eta = m \times (n-1) = 5 \times (3-1) = 10 \quad (20)$$

$$u_r(\eta_V) = \frac{1}{2} \times 0.11\% = 0.06\% \quad (21)$$

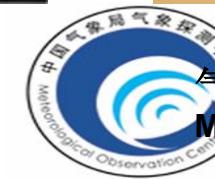
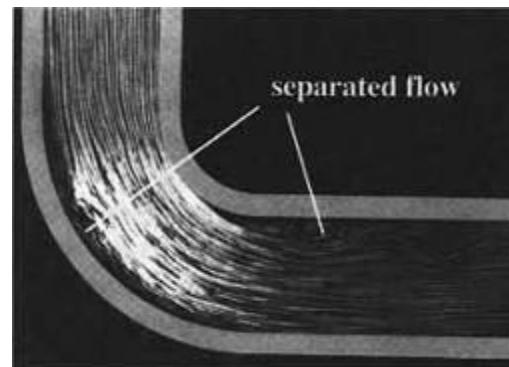
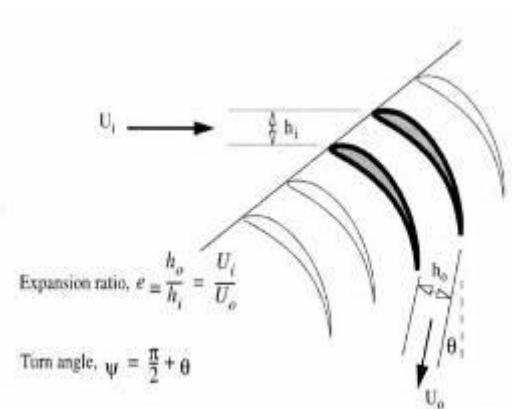


气象探测中心  
Meteorological Observation Center

## 4. Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh kinerja medan aliran terowongan angin (wind tunnel flow field)

### (3) Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh intensitas turbulensi aliran

Intensitas turbulensi aliran udara memiliki pengaruh langsung terhadap tekanan total dan nilai tekanan statis yang diukur dengan tabung statis Pitot, dan semakin besar intensitas turbulensi, semakin besar pengaruh yang akan ditimbulkan. Data referensi yang diberikan oleh informasi yang relevan menunjukkan bahwa, sehubungan dengan 10% intensitas turbulensi, kecepatan yang diukur dengan tabung statis Pitot akan berkurang 0,5%. Dalam lebih dari satu uji lapangan aliran, indeks intensitas turbulensi terowongan angin 0,8 meter di stasiun kami kurang dari atau sama dengan 0,4%, jauh dari data referensi yang disediakan oleh standar internasional, sehingga komponen ketidakpastian ini harus diabaikan.



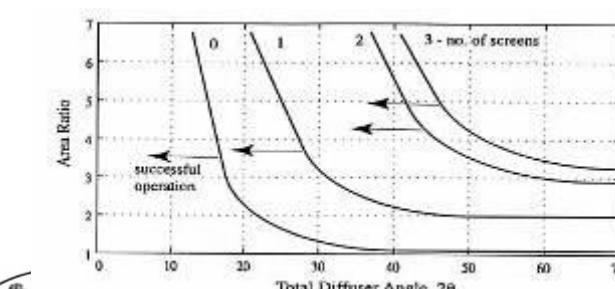
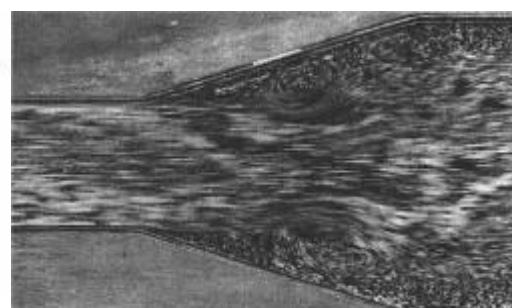
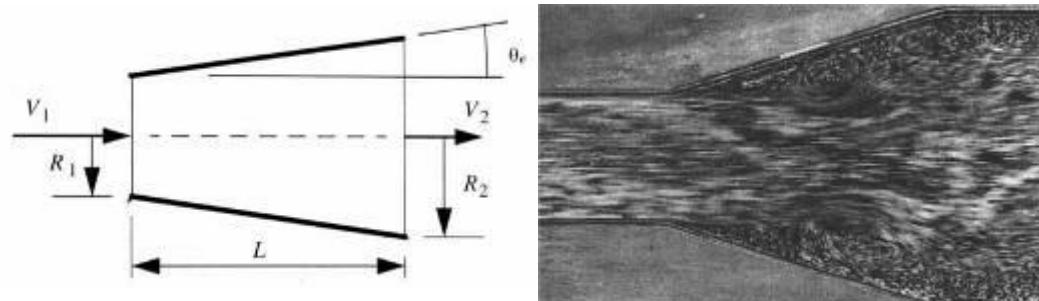
## 4. Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh kinerja medan aliran terowongan angin (wind tunnel flow field)

### (4) Komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh sudut defleksi aliran udara

Menurut Standar Internasional ISO3966, ketika sudut defleksi aliran udara kurang dari  $3^\circ$ , sudut tersebut tidak perlu dikoreksi. Dalam beberapa uji lapangan aliran, indeks sudut defleksi aliran udara terowongan angin 0,8 meter di stasiun kami kurang dari atau sama dengan  $1^\circ$ , sehingga kami juga dapat mengabaikan komponen ketidakpastian yang disebabkan oleh sudut defleksi aliran udara.

$$u_{r2} = \sqrt{u_r^2(\mu) + u_r^2(\eta_V)} = \sqrt{0.215^2 + 0.006^2} \% = 0.223\% \quad (22)$$

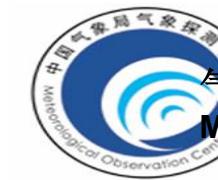
$$\nu_{eff2} = \frac{\frac{u_{r2}^4}{\nu_\mu}}{\left[u_r(\mu)\right]^4 + \left[u_r(\eta_V)\right]^4} = \frac{\frac{(0.223\%)^4}{144}}{\frac{(0.215\%)^4}{10} + \frac{(0.06\%)^4}{10}} = 154 \quad (23)$$



## 5. Ketidakpastian komponen yang disebabkan oleh operator

Menurut data empiris (berdasarkan banyak percobaan), komponen ketidakpastian  $u_{r3}$  yang disebabkan oleh pembacaan dari operator yang berbeda adalah 0,05%, dan nilai estimasi ketidakpastian relatif  $u_{r3}$  adalah 10%, derajat kebebasan  $\nu_{eff3}$  komponen ketidakpastian tersebut adalah

$$\nu_{eff3} = \frac{1}{2 \left[ \frac{\sigma[u_{r3}]}{u_{r3}} \right]^2} = \frac{1}{2 \times 0.1^2} = 50 \quad (24)$$



气象探测中心  
Meteorological Observation Center

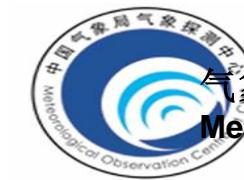
## 6. Sintesis ketidakpastian total yang disebabkan oleh alat yang di kalibrasi

Dari analisis di atas, ketidakpastian standar relatif gabungan dari alat yang dikalibrasi  $u_r$  adalah:

$$u_r = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r2}^2 + u_{r3}^2} = \sqrt{0.0025 + \frac{44.22}{R^2} + 0.223^2 + 0.05^2 \%} = \sqrt{0.055 + \frac{44.22}{R^2} \%} \quad (25)$$

Derajat kebebasan relative  $v_{eff}$  dari  $u_r$  adalah

$$v_{eff} = \frac{\frac{u_r^4}{[u_{r1}]^4 + [u_{r2}]^4 + [u_{r3}]^4}}{\frac{v_{eff1}}{v_{eff1}} + \frac{v_{eff2}}{v_{eff2}} + \frac{v_{eff3}}{v_{eff3}}} = \frac{\left(0.055 + \frac{44.22}{R^2}\right)^2}{\frac{0.05^4}{8} + \left(\frac{6.67}{R}\right)^4 \times \frac{1}{50} + \frac{0.223^4}{154} + \frac{0.05^4}{50}} \quad (26)$$



气象探测中心  
Meteorological Observation Center



# TERIMA KASIH

Ahmad Atsari Sujud

+6281230278753

aasujud@gmail.com