

## เครื่องวัดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของวัตถุตันขนาดเล็ก Aerodynamic Drag Measurement Machine of Small Solid Object

สัมพันธุ์ ไชยเทพ และ ชานชัย เจริญริน

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

โทร 053-942004, โทรสาร 053-941352, E-mail sumpun@eng.cmu.ac.th

Sumpun Chaitep and Chanchai Charoenruen

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University 50200, Thailand

Tel. 053-942004, Fax. 053-941352, E-mail sumpun@eng.cmu.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมแบบดูดอากาศจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง เพื่อศึกษาแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของวัตถุตันขนาดเล็ก ภายในอุโมงค์ลมจะมีแขนรองรับตัวอย่างทดสอบเป็นแบบยึดแน่นทำตำแหน่งให้อยู่ในเส้นกระแสการไหลของอากาศ แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างทดสอบจะเกิดโมเมนต์ดัดกระทำต่อแขนรองรับนั้น ซึ่งจะสามารถอ่านค่าขนาดของโมเมนต์ดัดโดยสเตรนเกจ เมื่อมีแรงกระทำจะทำให้วงจรบริดจ์ของโหลดเซลล์อันประกอบด้วยสเตรนเกจเกิดความไม่สมดุลจะเกิดสัญญาณความเครียด สัญญาณนี้จะถูกแปลงให้เป็นแรงกระทำและเก็บบันทึกโดยเครื่อง Weight Transmitter กับเครื่อง Online Datalogger จากนั้นเครื่องจะส่งข้อมูลผ่านพอร์ต RS232 เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกค่า การทดสอบได้กระทำกับเม็ดพลาสติกทรงกลมจำนวน 5 เม็ดความเร็วของอากาศที่ทดสอบจะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 14-50 m/s

จากการทดสอบค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรง ซึ่งมีค่าความเป็นทรงกลมโดยเฉลี่ย 98.95% ได้กราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์เทียบกับเรย์โนลด์สเบอร์ มีค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์เท่ากับ 0.419 โดยเฉลี่ย ในช่วงของเรย์โนลด์สเบอร์ 5,811 ถึง 11,381 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) 0.8964 ซึ่งค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ที่ได้จะมีค่าคลาดเคลื่อน 8.60% จากทรงกลมทางทฤษฎี [11]

### ABSTRACT

A down-draught suction type wind tunnel was designed and constructed for investigation an aerodynamic drag of small solid object. The wind tunnel consisted of a supporting cantilever arm for fixing position of a test specimen with respect to the air stream. Drag forces acting on the test specimen caused by air motion were detected by a set of strain gage attached in the cantilever beam. Consequently weight transmitter and datalogger with software online were used for collecting the strain signal to

computer through a serial port RS232. The experiment was conducted by using plastic balls as a base reference. Air velocity setting in the experiment was varied from 14 to 50 meters per second.

Experimental results of aerodynamic drag of the reference plastic balls with average sphericity of 98.95 percent showed 8.60 percent of error of drag coefficient compared to a smooth sphere reported in texts elsewhere [11]. The experimental drag coefficient of sphere was obtained at 0.419 in the range of Reynolds number from 5,811 to 11,381 with coefficient of determination at 0.8964.

### 1. บทนำ

การวิเคราะห์และการสร้างเครื่องการวัดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ที่ใช้วัดค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลมนี้จะใช้สเตรนเกจแบบเต็มบริดจ์ (Full Bridge) เป็นตัวส่งสัญญาณความเครียดและเปลี่ยนเป็นค่าแรงที่กระทำกับทรงกลม ซึ่งจะถูกเก็บบันทึกโดยคอมพิวเตอร์ แล้วนำค่าแรงที่ได้ไปคำนวณหาค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น และยังสามารถนำเครื่องมือนี้ไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของวัสดุอื่นๆ ได้

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 คานยื่น

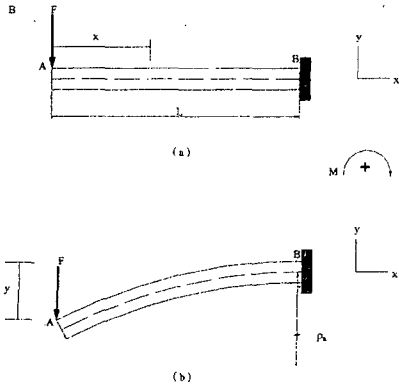
จากที่ทราบมาว่าคานที่อยู่ภายใต้โมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียว ในช่วงยืดหยุ่นของคานจะโค้งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นรอบวงที่มีรัศมีเท่ากับ  $\rho_b$  ความโค้งของคานเป็นกลางของคานยื่น [9] คือ

$$\frac{1}{\rho_b} = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

เมื่อคานอยู่ภายใต้แรงกระทำตามขวางของคาน ซึ่งค่าของโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานจะแปรไปตามระยะ  $x$  โดยวัดจากปลายคาน

ด้านซ้าย และพิจารณาว่าเป็นคานายึดปลายข้างเดียว ยาว  $L$  มีแรง  $F$  กระทำที่ปลายอิสระ [9] ดังรูปที่ 1(a) จะได้

$$\frac{1}{\rho_b} = \frac{-F x}{E I} \quad (2)$$



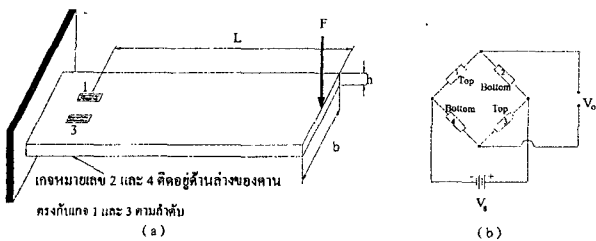
รูปที่ 1 คานายึดที่มีแรงกระทำที่ปลายคานและการโก่งลงของคานายึด [9]

การโก่งลงของคานายึดดังรูปที่ 1(b) ซึ่งจะสัมพันธ์กับแรง  $F$  ที่กระทำ [9] จะได้

$$F = \frac{-3 E I}{L^3} y \quad (3)$$

## 2.2 บีบไทป์โหลดเซลล์ (Beam Type Load Cell)

จากรูปที่ 2(a) เป็นรูปคานายึดซึ่งมีสเตรนเกจสองอันติดอยู่ที่ผิวด้านบนของคานาและอีกสองอันติดที่ผิวด้านล่างของคานา สเตรนเกจทั้งหมดติดอยู่ในแนวขนานกับแกนของคานา ซึ่งทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนยืดหยุ่นและเป็นเครื่องส่งสัญญาณสำหรับการทดลองนี้ ซึ่งเกจจะต่อกันเป็นวงจรบริดจ์ดังรูปที่ 2(b)



รูปที่ 2 การติดตั้งสเตรนเกจบนคานายึดและการต่อวงจรของสเตรนเกจ [10]

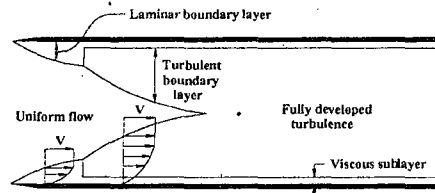
การที่เลือกใช้วัสดุโตนบริดจ์แบบนี้จะเป็นเอกที่เพิกทั้งสี่ตัว โดยสเตรนเกจจะต่อเข้ากับแขนบริดจ์แขนละเกจ ดังนั้นอัตราส่วนความต้านทาน  $r = R_2/R_1 = 1$  ขณะที่เกจติดตั้งอยู่บนคานา เมื่อคานายึดเกิดการโก่งลงด้วยแรง  $F$  จะเกิดความเครียดดึงบนเกจหนึ่งและสามซึ่งติดอยู่ที่ผิวด้านบนของคานาและความเครียดอัดบนเกจสองและสี่ซึ่งติดอยู่ที่ผิวด้านล่างของคานา

เมื่อภาระ  $F$  กระทำที่คานายึดจะทำให้เกิดโมเมนต์  $M = Fx$  ที่ตำแหน่ง  $x$  ทำให้เกิดความเครียด ( $\epsilon$ ) ขึ้นในคานายึด [10] จะได้

$$\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon_4 = \frac{6 M}{E b h^2} = \frac{6 F x}{E b h^2} \quad (4)$$

## 2.3 ชั้นการไหลของของไหล

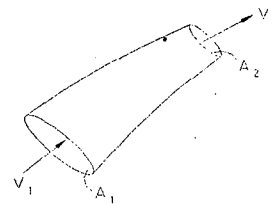
เมื่อของไหลไหลผ่านผิวของของแข็งความเร็วของของไหลที่จุดสัมผัสกับของแข็งจะเป็นศูนย์ Velocity Gradient ที่จุดนี้จะมากที่สุดและความเค้นเฉือนจะสูงที่สุด ทั้งนี้ถ้าหากของไหลไม่มีความหนืดเลย ( $\mu = 0$ ) ความเค้นเฉือนก็ไม่มีและไม่มีการไถสระหว่างชั้นของของไหล



รูปที่ 3 ชั้นการไหลของของไหลในท่อ [11]

พิจารณารูปที่ 3 ซึ่งเป็นการไหลที่ความเร็วของไหลผ่านเข้าสู่ท่ออันหนึ่ง การไหลของของไหลเกิดขึ้นที่ผนังท่อตอนเริ่มเข้า และความหนาจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปจนกระทั่งเจอกับชั้นที่เกิดจากผนังตรงข้ามของท่อ ณ จุดศูนย์กลางของท่อ โดยเรียกจุดนี้ว่าจุด Fully Developed Turbulence ซึ่งจะพบที่ประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ความหนาสูงสุดของชั้นการไหลของของไหล ในกรณีของท่อจะเป็นรัศมีภายในท่อนั่นเอง ลักษณะการไหลเมื่อเกิดเป็นชั้นการไหลของของไหลที่จุดต่างๆ ภายในท่อ อาจจะเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของไหล ความหนืดของของไหล เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ และความเร็วของของไหล

## 2.4 สมการการไหลต่อเนื่อง



รูปที่ 4 ลำการไหลที่ถูกควบคุมปริมาตร [1]

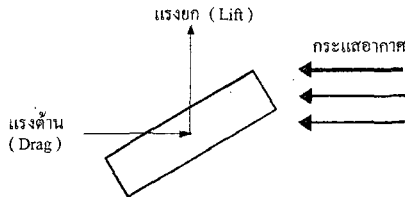
สมการการไหลต่อเนื่องสามารถพิสูจน์ได้จากลำการไหลขนาดเล็กซึ่งประกอบขึ้นด้วยเส้นที่ไหลจำนวนมากเป็นผนังของการไหล ไม่มีความเร็วในแนวตั้งฉากกับเส้นการไหล และไม่มีความเร็วของไหลเล็ดลอดผ่านผนังของลำการไหลได้ จะผ่านได้เฉพาะด้านปลายทั้งสองเท่านั้น บริเวณที่ถูกจำกัดระหว่างปลายทั้งสองของลำการไหลนี้คือ ปริมาตรกำหนด (Control Volume) หรือลำการไหลที่ถูกควบคุมปริมาตรนั่นเอง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 กล่าวได้ว่าปริมาณมวลสารในระบบไม่มีการสูญหาย

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (5)$$

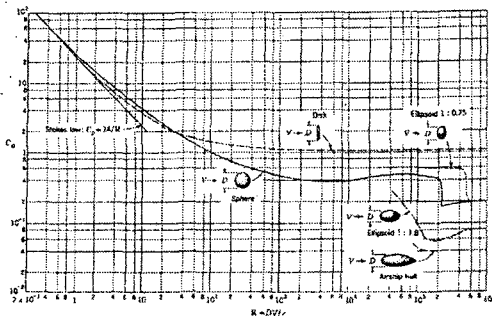
## 2.5 แรงที่เกิดกับวัตถุที่จมอยู่ในของไหล

แรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นต่อวัตถุที่จมอยู่ในของไหลซึ่งของไหลอาจจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ หรือปั่นป่วน หรือเป็นแบบผสมของทั้งสองอย่างก็ได้ แรงที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. แรงต้านเป็นแรงในทิศตรงข้ามกับแนวการเคลื่อนที่ของของไหล
2. แรงยกเป็นแรงที่มีทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่นั้น



รูปที่ 5 แรงที่เกิดกับวัตถุที่จมอยู่ในของไหล [6]



รูปที่ 4 กราฟแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของทรงกลม [11]

สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์

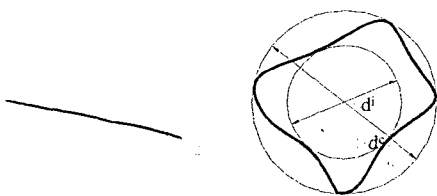
$$C_d = \frac{2 F_D D}{A V Re \mu} \quad (6)$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์  $Re$  [11]

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{D V}{\nu} \quad (7)$$

## 2.6 การประมาณค่าความเป็นทรงกลม (Sphericity)

จากทฤษฎีของเรชาคณิตพบว่าขั้นตอนในการหาความเป็นทรงกลม จะขึ้นอยู่กับเส้นรอบรูปของทรงกลม การประมาณค่าความเป็นทรงกลม อธิบายได้โดยสมการ (8)



รูปที่ 6 การประมาณค่าความเป็นทรงกลม [14]

$$Sphericity = \frac{d_i}{d_s} \quad (8)$$

จากการทดลองการหาความเป็นทรงกลมจะมีความสัมพันธ์กับการหาปริมาตรของทรงกลม โดยสมมุติว่าปริมาตรของทรงกลมมีค่าเท่ากับปริมาตรที่ได้จากขนาดตามแนวแกน  $X Y Z$  ที่มีขนาด  $a, b, c$  ตามลำดับ และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นรอบรูปทรงกลม [14]

$$Sphericity = \left( \frac{\text{Volume of solid}}{\text{Volume of circumscribed sphere}} \right)^{1/3}$$

$$Sphericity = \left[ \frac{\left( \frac{\pi}{6} \right) a b c}{\left( \frac{\pi}{6} \right) a^3} \right]^{1/3} = \left( \frac{b c}{a^2} \right)^{1/3} \quad (9)$$

$$Sphericity = \frac{\text{geometric mean diameter}}{\text{major diameter}}$$

$$Sphericity = \frac{(a b c)^{1/3}}{a} \quad (10)$$

## 2.7 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือที่สร้างการไหลของอากาศที่สามารถควบคุมการไหลทั้งความเร็วของการไหลและการบังคับให้การไหลเกิดความราบเรียบมีความปั่นป่วนน้อยที่สุด โดยอุโมงค์ลมที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้นจะเป็นแบบดูดอากาศทางด้านบน ซึ่งอากาศจะเข้าทางด้านบนโดยแรงดูดของพัดลม อากาศที่ถูกดูดเข้ามาในอุโมงค์ลมโดยผ่านปากกรวยเพื่อบีบเส้นกระแสของอากาศเข้าหากันเป็นการลดความปั่นป่วนของอากาศ อากาศผ่านห้องทดสอบแล้วถูกดูดออกไปโดยพัดลม ที่ต้นทางของท่อที่ดูดอากาศออกจากอุโมงค์ลมซึ่งอยู่ในอุโมงค์ลมนั้นจะเจาะเป็นรูเล็กๆ รอบๆ ท่อไว้เพื่อลดการคงของอากาศในช่วงห้องทดสอบ อัตราการไหลของอากาศสามารถปรับได้

## 3. วิธีดำเนินการทดสอบ

เพื่อให้การทดสอบดำเนินการไปอย่างถูกต้องและประสบผลสำเร็จ จำเป็นต้องทราบถึงวัตถุประสงค์ของการทดสอบ อุปกรณ์การทดสอบ วิธีการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ มีรายละเอียดดังนี้

### 3.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ

3.1.1 ออกแบบและสร้างเครื่องวัดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์

3.1.2 ศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม

### 3.2 ตัวแปรสำหรับการทดสอบ

3.2.1 เม็ดพลาสติกทรงกลมจำนวน 5 เม็ด โดยเม็ดพลาสติกทรงกลมที่ใช้ในการทดสอบจะมีการวัดขนาดของเม็ดพลาสติกโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์แบบดิจิตอลวัดขนาด โดยจะวัดขนาดตามแนวแกน  $X Y Z$  ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน [13] และเม็ดพลาสติกทรงกลมมีความเป็นทรงกลม ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 10 ค่าความเป็นทรงกลม

โดยเฉลี่ยของเม็ดพลาสติกเป็น 98.95% ดังตารางที่ 1

3.2.2 ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดสอบจะเปลี่ยนความเร็ว

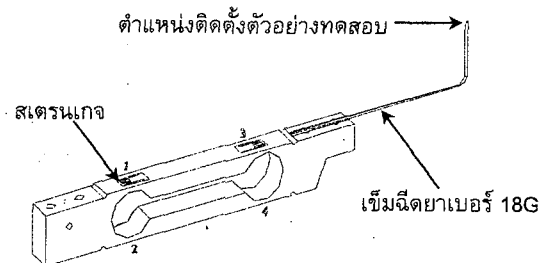
ของอากาศในห้องทดสอบ เป็นจำนวน 7 ค่า โดยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

ตารางที่ 1 ขนาดของเม็ดพลาสติกทรงกลม

| ลำดับที่ | เส้นผ่าศูนย์กลางตามแนวแกน (mm) |      |      | เฉลี่ย (mm) | ความเป็นทรงกลม (%) |
|----------|--------------------------------|------|------|-------------|--------------------|
|          | X                              | Y    | Z    |             |                    |
| 1        | 5.04                           | 4.91 | 4.84 | 4.93        | 97.80              |
| 2        | 4.95                           | 4.88 | 4.93 | 4.92        | 99.39              |
| 3        | 4.97                           | 4.78 | 4.95 | 4.90        | 98.58              |
| 4        | 4.95                           | 4.92 | 4.92 | 4.93        | 99.60              |
| 5        | 4.93                           | 4.89 | 4.88 | 4.90        | 99.39              |

### 3.3 อุปกรณ์การทดสอบ

3.3.1 โหลดเซลล์ (Load Cell) มีคุณสมบัติดังนี้สามารถวัดน้ำหนักได้สูงสุด 500 กรัม (4.905 นิวตัน) ค่า Rate Output 1 mV/V ความผิดพลาด  $\pm 0.015\%$  ของค่า Rate Output แรงดันกระตุ้นวงจรบริดจ์เป็นกระแสไฟตรง (DC) 5 ถึง 12 โวลต์ โหลดเซลล์จะเป็นแบบ Beam Type Load Cell สามารถทำมาจากอลูมิเนียม มีสเตอรนเกจติดตั้งทั้งหมดสี่ตัวซึ่งเป็นแบบเต็มบริดจ์ โหลดเซลล์จะติดตั้งอยู่นอกห้องทดสอบจะมีเฉพาะส่วนที่เป็นเข็มฉีดยาเบอร์ 18G เท่านั้นที่ยื่นเข้าไปในห้องทดสอบเป็นระยะ 20 mm



รูปที่ 7 โหลดเซลล์

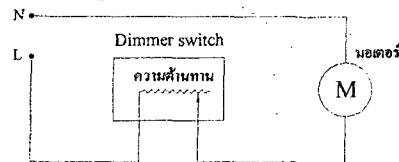
3.3.2 ส่วนบันทึกข้อมูล จะประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกัน คือ

3.3.2.1 เครื่อง Weight Transmitter (WT95) มีคุณสมบัติดังนี้ ยี่ห้อ Wisco เป็นส่วนขยายข้อมูล สามารถใช้งานร่วมกับโหลดเซลล์ที่มีค่า Rate Output ได้ตั้งแต่ 0.4 ถึง 3 mV/V รับสัญญาณเข้าได้ทั้งสัญญาณดิจิตอล (Digital) และสัญญาณอนาล็อก (Analog) จ่ายแรงดันไฟกระตุ้นโหลดเซลล์เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ปรับขยายสัญญาณแรงดันออกจากเครื่อง Weight Transmitter เป็นไฟฟ้ากระแสตรงตั้งแต่ 0 ถึง 10 โวลต์ ใช้แรงดันไฟฟ้ากระตุ้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรท์ ความผิดพลาด  $< 0.1\%$  ของ Span เครื่อง Weight Transmitter จะเป็นส่วนที่รับสัญญาณจากโหลดเซลล์ซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก ขยายและกรองสัญญาณให้เรียบโดย Filter แล้วส่งสัญญาณต่อไปยังเครื่อง Online Excel Datalogger (OD95)

3.3.2.2 เครื่อง Online Excel Datalogger (OD95) มีคุณสมบัติดังนี้ ยี่ห้อ Wisco ทำหน้าที่ เป็นส่วนรับสัญญาณโดยจะรับสัญญาณจากเครื่อง Weight Transmitter สามารถรับสัญญาณอนาล็อกได้ 8 ช่องสัญญาณ และแบบดิจิตอล 4 ช่องสัญญาณ ใช้แรงดันไฟ

กระตุ้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรท์ จะทำงานโดยรับสัญญาณจากเครื่อง Weight Transmitter แล้วส่งสัญญาณข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์โดยผ่านพอร์ต RS232 เพื่อแสดงผลและบันทึกในคอมพิวเตอร์ในรูปแบบไฟล์ข้อมูล File.dat

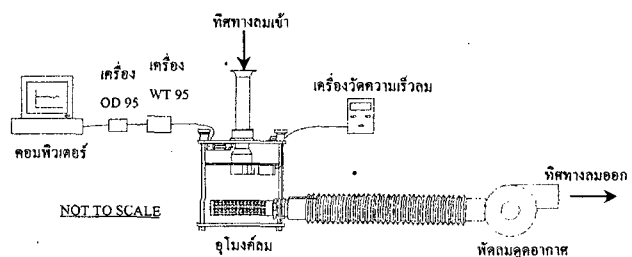
3.3.3 Dimmer switch มีคุณสมบัติดังนี้ ยี่ห้อ O - Sawa เป็น Dimmer Switch ชนิดความต้านทานปรับค่าได้ มีขนาด 500 วัตต์ ใช้สำหรับควบคุมอัตราความเร็วของอากาศที่จะออกจากอุโมงค์ลม ซึ่งจะควบคุมการจ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์ โดยการปรับค่าความต้านทานที่ Dimmer Switch เมื่อความต้านทานเปลี่ยนก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไป มอเตอร์จะมีความเร็วรอบที่เปลี่ยนไป เมื่อความต้านทานมีค่ามากขึ้นมอเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วรอบลดลง



รูปที่ 8 การต่อ Dimmer Switch กับ มอเตอร์ [5]

3.3.4 พัดลมดูดอากาศ มีรายละเอียดดังนี้ เป็นแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส แบบอินดักชันมอเตอร์ (Induction Motor) ชนิดคาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor) [5] แรงดันไฟกระตุ้นเป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิรท์ มีความเร็วรอบหมุนขณะทำงานเต็มที่ 2,000 รอบต่อนาที

3.3.5 เครื่องวัดความเร็วลม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ ยี่ห้อ Digicon รุ่น DA-43 มีช่วงการวัดความเร็วลมตั้งแต่ 0 ถึง 50 m/s ความผิดพลาด  $\pm 2\%$  ของค่าที่อ่านได้ ความละเอียดของการวัด 0.1 m/s สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 ถึง 50°C ความผิดพลาด 0.8°C ความละเอียดของการวัด 0.1°C ช่วงการทำงานของเครื่องมีอัตราที่อุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 50°C เปอร์เซ็นต์ความชื้นน้อยกว่า 80% หัววัดความเร็วลมเป็นแบบใบพัดจำนวน 8 ใบ หัววัดอุณหภูมิซึ่งติดตั้งไว้ภายในหัววัดความเร็วลมจะเป็น Thermocouple ชนิด K เครื่องมีอัตราวัดความเร็วลมนี้จะใช้แรงดันกระตุ้นเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 9 โวลต์



รูปที่ 9 อุปกรณ์การทดสอบและเครื่องมีวัด

### 3.3 วิธีการวิเคราะห์ผล

3.3.1 คุณสมบัติของอากาศในห้องทดสอบ

ก่อนที่จะทำการศึกษาวิจัย จะต้องทราบคุณลักษณะของ

อากาศในห้องทดสอบของอุโมงค์ลม ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็ว ความดัน และความหนาแน่น การวัดอุณหภูมิของอากาศสามารถวัดได้โดยตรง (จากเครื่องมือวัดความเร็วลม)

ความเร็วของอากาศในห้องทดสอบสามารถคำนวณได้จาก

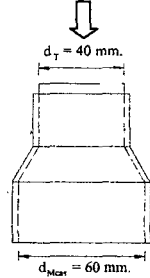
$$\rho_r A_r V_r = \rho_{Mass} A_{Mass} V_{Mass} \quad (11)$$

เมื่อ  $\rho_r \approx \rho_{Mass}$  จะได้

$$A_r V_r = A_{Mass} V_{Mass} \quad (12)$$

$$V_r = \frac{A_{Mass}}{A_r} V_{Mass} \quad (13)$$

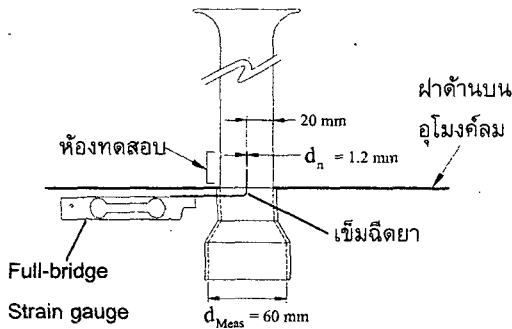
ห้องทดสอบ



เครื่องมือวัดความเร็วลม

รูปที่ 10 ข้อต่อเครื่องมือวัดความเร็วลม

3.3.1.1 ความเร็วลมในห้องทดสอบ กรณีของเข็มฉีดยาสำหรับติดตั้งตัวอย่างทดสอบ (ไม่มีการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ)



รูปที่ 11 เข็มฉีดยาที่อยู่ในห้องทดสอบ

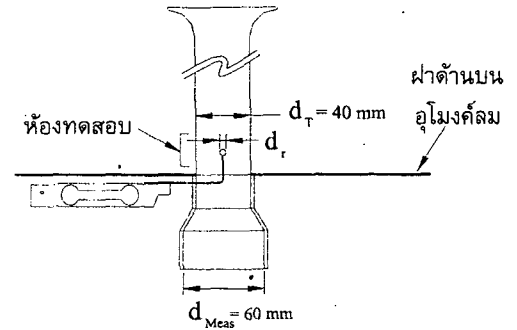
$$V_r = \frac{A_{Mass}}{A_r - A_n} V_{Mass} \quad (14)$$

$$V_r = \frac{(d_{Mass})^2}{(d_r - d_n)^2} V_{Mass} \quad (15)$$

3.3.1.2 ความเร็วลมในห้องทดสอบ กรณีติดตั้งทรงกลมทดสอบ

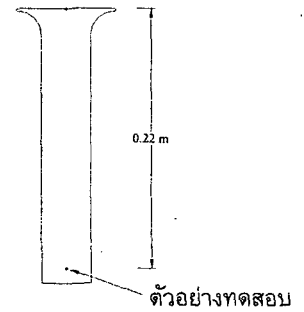
$$V_r = \frac{A_{Mass}}{A_r - A_r} V_{Mass} \quad (16)$$

$$V_r = \frac{(d_{Mass})^2}{(d_r - d_r)^2} V_{Mass} \quad (17)$$



รูปที่ 12 ทรงกลมที่อยู่ในห้องทดสอบ

ความดันอากาศ ( $P_r$ ) และความหนาแน่นของอากาศ ( $\rho_r$ ) ภายในห้องทดสอบ หาได้จากการวัดความดันบรรยากาศ วัดโดย Barometer ส่วนความดันในห้องทดสอบของอุโมงค์ลมจะมีความดันสูญเสียที่ท่อทางเข้า ในที่นี้ปากแตรจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย  $K = 0.05$  [13]

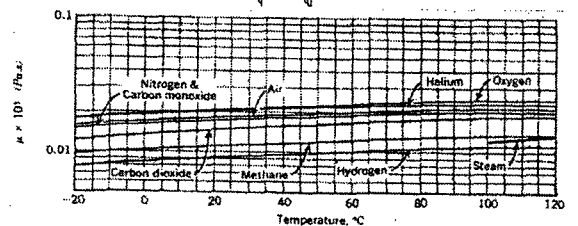


รูปที่ 13 ระยะจากปากแตรถึงตัวอย่างทดสอบ

$$P_r = \frac{573.6(t_s + 273.15)P_{atm}}{573.6(t_s + 273.15) + 1.05V_r^2 - 4.3164} \quad (18)$$

$$\rho_r = \frac{2P_{atm}}{573.6(t_s + 273.15) + 1.05V_r^2 - 4.3164} \quad (19)$$

ความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศในห้องทดสอบ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศในห้องทดสอบ ซึ่งความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศอธิบายได้จากกราฟรูปที่ 14 จากกราฟจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศและอุณหภูมิจะมีความชันเป็นเส้นตรง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทั้งสองที่อุณหภูมิในช่วง  $20 - 30^\circ\text{C}$



รูปที่ 14 ค่าความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศ [15]

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดสัมบูรณ์ของอากาศและอุณหภูมิ จะเป็นไปตามสมการ

$$\mu_r = C_1 t_o + C_2 \quad (20)$$

โดยที่  $t_o = 20^\circ\text{C}$  มีค่า  $\mu_r = 1.81 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

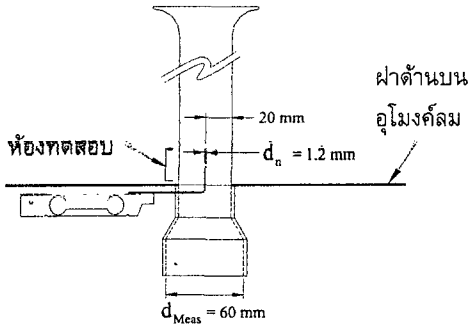
$t_o = 30^\circ\text{C}$  มีค่า  $\mu_r = 1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

เมื่อ  $C_1$  และ  $C_2$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น

$$\mu_r = 5 \times 10^{-8} t_o + 1.71 \times 10^{-5}$$

สำหรับช่วง อุณหภูมิ  $20^\circ\text{C} \leq t_o \leq 30^\circ\text{C}$  (21)

3.3.2 เรย์โนลด์สเบอร์ของเข็มฉีดยาที่อยู่ในห้องทดสอบที่เกิดจากแรงดันติดตัว



รูปที่ 15 เข็มฉีดยาสำหรับติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

$$Re_L = \frac{\rho_r V_n d_n}{\mu_r} \quad (22)$$

โดยที่  $d_n$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มฉีดยาเบอร์ 18G ที่ติดอยู่ที่ปลายโพลีเอทิลีนเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$Re_L = 1.2 \times 10^{-3} \left( \frac{\rho_r V_n}{\mu_r} \right) \quad (23)$$

3.3.3 สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเข็มฉีดยาที่อยู่ในห้องทดสอบ

$$C_{dL} = \frac{2F_L}{\rho_r A_n V_n^2} \quad (24)$$

โดยที่  $A_n$  คือ พื้นที่ฉายของเข็มฉีดยาที่ติดอยู่ที่ปลายโพลีเอทิลีนอยู่ในห้องทดสอบ

$$A_n = d_n \times \frac{1}{2} d_T = 2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$C_{dL} = \frac{F_L}{2.4 \times 10^{-5} \rho_r V_n^2} \quad (25)$$

3.3.4 เรย์โนลด์สเบอร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม

$$Re_r = \frac{\rho_r V_r d_r}{\mu_r} \quad (26)$$

3.3.5 สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม

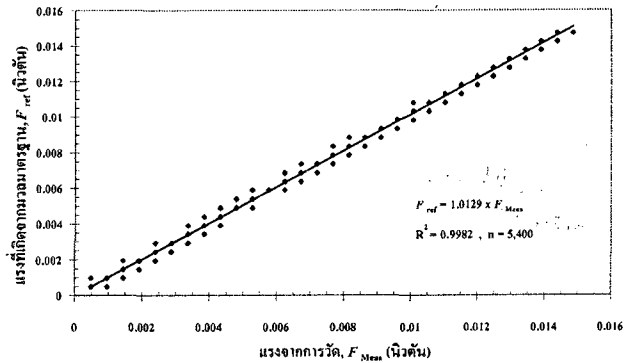
$$C_{Dr} = \frac{2(F_r - F_L)}{\rho_r A_r V_r^2} \quad (27)$$

#### 4. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบการสร้างเครื่องวัดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์สามารถแยกได้ดังนี้

##### 4.1 ผลเปรียบเทียบค่าของเครื่องวัดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์กับน้ำหนักมาตรฐาน

น้ำหนักมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ตั้งแต่ 0 ถึง 1.5 กรัม (แรงเนื่องจากน้ำหนักมาตรฐาน 0 ถึง 0.014715 นิวตัน) โดยจะเพิ่มน้ำหนักมาตรฐานขึ้นครั้งละ 0.05 กรัม



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบเครื่องวัดต้านทางอากาศพลศาสตร์กับน้ำหนักมาตรฐาน

จากรูปที่ 16 จะเห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงที่ได้จากการวัด  $F_{Meas}$  เทียบกับค่าแรงที่เกิดจากน้ำหนักมาตรฐาน  $F_{ref}$  ได้ดังสมการ

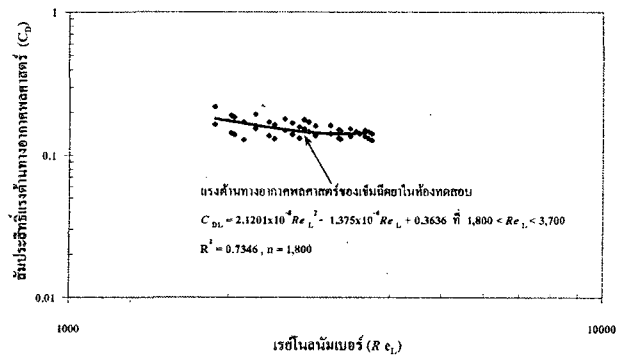
$$F_{ref} = 1.0129 \times F_{Meas} \quad (28)$$

เมื่อนำค่า  $F_{Meas}$  ที่ได้จากสมการที่ 28 เทียบกับค่า  $F_{ref}$  ที่ใช้จากข้อมูลพบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.15% โดยเฉลี่ย

##### 4.2 ค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเข็มที่อยู่ในห้องทดสอบ

จากรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเข็มจะมีค่าลดลงเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นโดยที่ค่าจะกระจายอยู่ในช่วง 0.1-0.3 และจะได้ค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ ดังสมการ

$$C_{oL} = 2.1201 \times 10^{-8} Re_L^2 - 1.375 \times 10^{-4} Re_L + 0.3036 \quad (29)$$

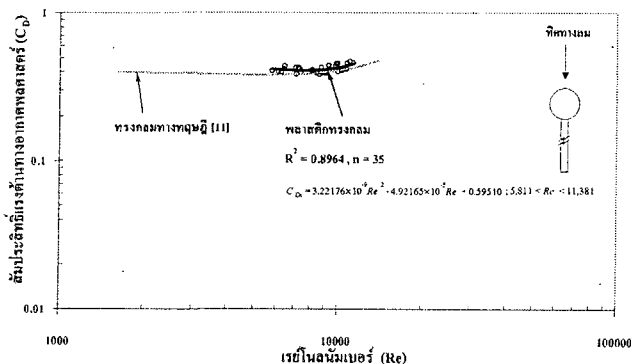


รูปที่ 17 สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเข็มน้ำในห้องทดสอบที่อยู่ในห้องทดสอบ

สมการที่ 29 ใช้สำหรับหาค่า  $C_{DL}$  ที่มีค่าเรย์โนลด์สเบอร์อยู่ในช่วง  $1,800 < Re_L < 3,700$

นำค่า  $C_{DL}$  ที่ได้จากสมการที่ 29 เทียบกับค่า  $C_{DL}$  ที่ได้จากข้อมูลพบว่ามีความคลาดเคลื่อนประมาณ 6.48% โดยเฉลี่ย

#### 4.3 ค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม



รูปที่ 18 สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม

จากรูปที่ 18 จะเห็นว่าค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์เท่ากับ 0.419 โดยเฉลี่ย ในช่วงของเรย์โนลด์สเบอร์ 5,811 ถึง 11,381 จะมีค่าคลาดเคลื่อน 8.60% จากทรงกลมทางทฤษฎี [11]

#### 5. สรุปผลการศึกษาวิจัย

5.1. ความเร็วของอากาศในอุโมงค์ลมจะมีอิทธิพลโดยตรงกับค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของตัวอย่างทดสอบโดยพิจารณาว่ากระแสอากาศเป็นการไหลแบบปั่นป่วนน้อยๆ เพราะ

5.1.1 อากาศที่ไหลผ่านวัตถุต้นลงไปสะสมทางด้านล่างของอุโมงค์ลมก่อนที่จะถูกดูดออกสู่บรรยากาศทำให้การไหลของอากาศที่เข้าอุโมงค์ลมมีการไหลสม่ำเสมอ และความขรุขระของท่อทางเข้าซึ่งเป็นท่อแก้วจึงมีผลน้อย

5.1.2 ตำแหน่งของตัวอย่างทดสอบในห้องทดสอบจะมีระยะห่างน้อย (ประมาณ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ จากรูปที่ 13) จาก

ปากทางเข้าของอุโมงค์ลม ดังนั้นจึงไม่มีจุด Fully Develop ของขอบเขตนี้

5.2 จากการทดสอบค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม ค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์เท่ากับ 0.419 โดยเฉลี่ย ในช่วงของเรย์โนลด์สเบอร์ 5,811 ถึง 11,381 ซึ่งค่าแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ที่ได้จะมีค่าคลาดเคลื่อน 8.60% จากทรงกลมทางทฤษฎี [11] ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของเงื่อนไขการทดสอบต่างๆ ดังนี้ เงื่อนไขของกระแสอิสระ การรบกวนจากจุดติดตั้งการทดสอบ และความขรุขระของผิวของเม็ดพลาสติกทรงกลม

#### 6. อักษรย่อและสัญลักษณ์

- A พื้นที่ของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล ( $m^2$ )
- $A_{Meas}$  พื้นที่หน้าตัดของเครื่องมือวัดความเร็วลม ( $m^2$ )
- $A_n$  พื้นที่เงาของเข็มน้ำในห้องทดสอบ ( $m^2$ )
- $A_r$  พื้นที่เงาเม็ดพลาสติกทรงกลมในห้องทดสอบ ( $m^2$ )
- $A_T$  พื้นที่หน้าตัดของห้องทดสอบ ( $m^2$ )
- b ความกว้างของหน้าตัดคาน ( $m$ )
- C ค่าคงที่
- $C_D$  สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์
- $C_{DL}$  สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเข็มน้ำที่อยู่ในห้องทดสอบ
- $C_{Dr}$  สัมประสิทธิ์แรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม
- D เส้นผ่าศูนย์กลางของวัตถุที่ของไหลไหลผ่าน ( $m$ )
- $d_{Meas}$  เส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดความเร็วลม ( $m$ )
- $d_n$  เส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มน้ำในห้องทดสอบ ( $m$ )
- $d_r$  เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดพลาสติกทรงกลม ( $m$ )
- $d_T$  เส้นผ่าศูนย์กลางของห้องทดสอบ ( $m$ )
- E ดัชนีความยืดหยุ่น ( $N/m^2$ )
- $F_D$  แรงต้านทั้งหมด (N)
- $F_L$  แรงที่กระทำกับเข็มน้ำในห้องทดสอบ (N)
- $F_r$  แรงที่กระทำกับเม็ดพลาสติกทรงกลม (N)
- h ความหนาของหน้าตัดคาน ( $m$ )
- l โมเมนต์ความเฉื่อย ( $m^4$ )
- K ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของปากแตรมีค่าเท่ากับ 0.05
- L ความยาวของคาน ( $m$ )
- M โมเมนต์ดัด (Nm)
- m จำนวนครั้งของการทดสอบ
- n จำนวนของตัวอย่างทดสอบ
- $P_{atm}$  ความดันบรรยากาศ ( $N/m^2$ )
- $P_T$  ความดันในห้องทดสอบ ( $N/m^2$ )
- R ความต้านทานของสเตรนเกจ (Ohm)
- Re เรย์โนลด์สเบอร์
- $Re_L$  เรย์โนลด์สเบอร์ของเข็มน้ำในห้องทดสอบ
- $Re_r$  เรย์โนลด์สเบอร์ของเม็ดพลาสติกทรงกลม
- $t_c$  อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

|               |                                                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| $V$           | ความเร็วเฉลี่ยของของไหล ( $\text{m/s}^2$ )                                               |
| $V_{Meas}$    | ความเร็วลมจากการวัด ( $\text{m/s}^2$ )                                                   |
| $V_T$         | ความเร็วลมในห้องทดสอบ ( $\text{m/s}^2$ )                                                 |
| $V_{TL}$      | ความเร็วลมในห้องทดสอบกรณีของเข็มฉีดยาที่ใช้สำหรับติดตั้งตัวอย่างทดสอบ ( $\text{m/s}^2$ ) |
| $V_{Tr}$      | ความเร็วลมในห้องทดสอบกรณีติดตั้งทรงกลมทดสอบ ( $\text{m/s}^2$ )                           |
| $x$           | ระยะทางตามแกน x (m)                                                                      |
| $y$           | ระยะทางตามแกน y (m)                                                                      |
| $\rho$        | ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )                                                 |
| $\rho_B$      | ความโค้งของคานาผิวเป็นกลาง (m)                                                           |
| $\rho_T$      | ความหนาแน่นของของไหลในห้องทดสอบ ( $\text{kg/m}^3$ )                                      |
| $\varepsilon$ | ความเครียด ( $\text{N/m}^2$ )                                                            |
| $\mu$         | ความหนืดสัมบูรณ์ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )                                            |
| $\mu_T$       | ความหนืดสัมบูรณ์ในห้องทดสอบ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )                                 |
| $\nu$         | ความหนืดจลน์ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )                                                   |

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ขวัญชัย สันทิพย์สมบูรณ์ และ วศิษฐ์ จาตุรमान. *กลศาสตร์ของไหล*. กรุงเทพฯ: หจก. เอช-เอน การพิมพ์, 2526.
- [2] ขวัญชัย เจริญรัตน์. "การวัดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของเมล็ดข้าวเปลือก". *วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2544
- [3] บริษัท Wisco จำกัด. *คู่มือการใช้งานเครื่อง WT95 OD95 และโปรแกรม Online Excel Datalogger*. กรุงเทพฯ
- [4] สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ. *กลศาสตร์ของแข็ง*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
- [5] สุวรรณ บุญทิพย์. *ไฟฟ้าอุตสาหกรรมเบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บ. ไดมอนด์ พรินต์ติ้ง จำกัด, 2539.
- [6] สัมพันธ์ ไชยเทพ. *กลศาสตร์ของของไหล*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2524
- [7] สัมพันธ์ ไชยเทพ. *อากาศพลศาสตร์เบื้องต้น*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2525.
- [8] สัมพันธ์ ไชยเทพ. *การทดลองสร้าง ปรับปรุงและประเมินประสิทธิภาพของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2527.
- [9] Beer, F.P. and Johnston, E.R. *Mechanics of Materials*. 2<sup>nd</sup> ed. Singapore: McGraw - Hill, 1992.
- [10] Dally, J.W. ; Riley, W.F. and McConnell K.G. *Instrumentation for Engineering Measurements*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [11] Daugherty, R.L. ; Franzini, J.B. and Finnemore E.J. *Fluid mechanics with engineering applications*. 8<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw - Hill, 1985.
- [12] Doebelin, E.O. *Measurement systems application and design*. 4<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw - Hill, 1990.
- [13] Janna, W.S. *Introduction to fluid mechanics*. 3<sup>rd</sup> ed. USA: PWS Publishing, 1993
- [14] Mohsenin, N.N. *Physical properties of plant and animal materials*. 2 Revised and Updated Edition. USA: Gordon and Breach science publishers, 1986
- [15] Vannard, J.K. and Street, R.L. *Elementary fluid mechanics*. 6<sup>th</sup> ed. USA: John Wiley & Sons, 1982