

การพัฒนาชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก

Development of a testing bench for small wind turbines

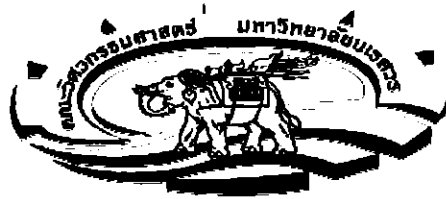
| | | |
|--------------|----------|---------------|
| นายวันชัย | อุ้นเพชร | รหัส 51380811 |
| นายสุพิศ | แพงสี | รหัส 51380934 |
| นายสิริวัฒน์ | เสาร์แดน | รหัส 51383690 |

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2554

| |
|------------------------------|
| ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ |
| วันที่รับ..... 1 / ๓.๑. / ๕๕ |
| เลขทะเบียน..... ๑๖๐๒๒๘๕๖ |
| เลขเรียกหนังสือ..... นร. |
| มหาวิทยาลัยนเรศวร ๖ 4๒๗ ๑ |

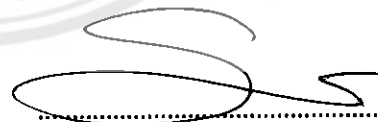
2๕๕4



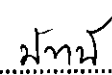
ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ : พัฒนาชุดทดสอบก้างหินขนาดเล็ก
ผู้ดำเนินโครงการ : นายวันชัย อุ่นเพชร รหัสบัณฑิต 51380811
นายสุพิศ แพงสี รหัสบัณฑิต 51380934
นายสิริวัฒน์ เสาร์แดน รหัสบัณฑิต 51383690
ที่ปรึกษาโครงการ : ดร.ศลิษา วีรพันธุ์
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2554

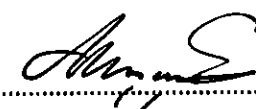
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการ

(ดร.ศลิษา วีรพันธุ์)

.....กรรมการ

(รศ.ดร.มัทนี สงวนเสริมศรี)

.....กรรมการ

(ดร.ภาณุ พุทธรังค์)

ชื่อหัวข้อโครงการ : การพัฒนาชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก
ผู้ดำเนินโครงการ : นายวันชัย อุ่นเพชร รหัสนิสิต 51380811
นายสุพิศ แพงสี รหัสนิสิต 51380934
นายสิริวัฒน์ เสาร์แดน รหัสนิสิต 51383690
ที่ปรึกษาโครงการ : ดร.ศลิษา วีรพันธุ์
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2554

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมแบบเปิด ประเภทความดันปกติ ซึ่งเป็นอุโมงค์ลมชนิดดูดลมเข้า ที่มีขนาดส่วนปฏิบัติงาน $0.5 \text{ m} \times 1.15 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ระบาย ภายในส่วนปฏิบัติงาน

ผลการทดสอบอุโมงค์ลมที่ใช้พัดลมอุตสาหกรรม ใบพัด 24 ขนาดมอเตอร์ $1/3$ แรงม้า เป็นต้นกำลัง พบว่า อุโมงค์ลมสามารถทำความเร็วถึง 5 m/s มีเลขมัคอยู่ที่ 0.016 ทำให้ทราบว่าเป็นอุโมงค์ลมชนิดอัตราเร็วต่ำ ลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน $Re=1.536 \times 10^5$ ที่ระบายทดสอบ A ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.075 m ได้ความเร็วอยู่ในช่วง $0-5.71 \text{ m/s}$ ระบายทดสอบ B ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.4 m ได้ความเร็วอยู่ในช่วง $0-5.66 \text{ m/s}$ ระบายทดสอบ C ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.7 m ได้ความเร็วอยู่ในช่วง $0-5.57 \text{ m/s}$ และระบายทดสอบ D ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 1 m ได้ความเร็วอยู่ในช่วง $0-5.73 \text{ m/s}$ ระบายที่เหมาะสมแก่การติดตั้งชิ้นงานทดสอบ คือ ระบาย C เพราะมีค่าการกระจายตัวของความเร็วลมค่อนข้างน้อย ทำให้มีความสม่ำเสมอของการไหลมากกว่าระบายอื่น

Project Title : Development of testing bench for small wind turbine
Name : Mr.Wanchai Oonphet ID. 51380811
: Mr.Supit Pangsee ID. 51380934
: Mr.Siriwat Saodan ID. 51383690
Project advisor : Dr.Salisa Veerapun
Major : Mechanical Engineering
Department : Mechanical Engineering
Academic year : 2011

Abstract

The objective of this project is to design and construct wind tunnel Kind of pressure. The suction-type wind tunnel with the size of the 0.5 m x 1.15 m x 0.5 m and the experiment is divided into 4 plane test Section.

The wind tunnel tests showed with Blower rotor 24" and motor 1/3horsepower. The wind tunnel can be made up to 5 m/s 0.016 Mach number, keeping in mind that the low-speed wind tunnel. The flow is turbulent at $Re= 1.536 \times 10^5$, A from the plane of the front test Section is 0.075 m speed in the range of 0-5.71 m/s ,B test plane 0.4 m away from the front test section of the speeds in the range of 0-5.66 m/s ,C test plane 0.7 m away from the front test section of the speeds in the range of 0-5.57 m/s. and D test plane 1 m away from the front test section of the speeds in the range of 0-5.73 m/s. Plane is the plane of the specimen is C, because the distribution of wind speed is relatively low. It has the consistency of the flow than other planes.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากหลายฝ่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.ศลิษา วีรพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น และตรวจสอบโครงการวิจัยฉบับนี้ให้กับคณะผู้จัดทำ รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนโครงการและมอบเงินเพื่อใช้ในการทำโครงการนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือและให้ความร่วมมือในการปฏิบัติงานจนทำให้โครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ท้ายสุดนี้ขอมอบความดีของโครงการนี้ เพื่อเป็นกตเวทิตาคุณแด่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่าน พร้อมกันนี้คณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการฉบับนี้จะก่อประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติสืบไป

คณะผู้จัดทำโครงการ

| | |
|--------------|----------|
| นายวันชัย | อุ้นเพชร |
| นายสุพิศ | แพงสี |
| นายสิริวัฒน์ | เสาร์แดน |

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| ใบรับรองปริญญาโท..... | ก |
| บทคัดย่อ..... | ข |
| Abstract..... | ค |
| กิตติกรรมประกาศ | ง |
| สารบัญ..... | จ |
| สารบัญรูป..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| ลำดับสัญลักษณ์ | ญ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของโครงการ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการ..... | 1 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 1 |
| 1.5 สถานที่ปฏิบัติงาน | 2 |
| 1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน | 2 |
| 1.7 งบประมาณที่ใช้ | 2 |
| 1.8 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน | 3 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 สมบัติของของไหล | 4 |
| 2.2 จลศาสตร์ของของไหล..... | 5 |
| 2.3 อุโมงค์ลมความเร็วต่ำ..... | 11 |
| 2.4 ขนาดของอุโมงค์ลม..... | 13 |
| 2.5 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม..... | 15 |
| | |
| บทที่ 3 การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ..... | 18 |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน | 18 |
| 3.2 เลือกรูปแบบอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ..... | 19 |
| 3.3 การออกแบบอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ | 19 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|-----------|
| 3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ | 24 |
| 3.5 วัสดุที่ใช้ในการสร้าง | 26 |
| 3.6 การสร้างและประกอบอุโมงค์ลม | 26 |
| 3.7 รูปแบบของอุโมงค์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์..... | 30 |
| บทที่ 4 การทดสอบอุโมงค์ลม..... | 32 |
| 4.1 การทดลองเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมดูดอากาศ | 32 |
| 4.2 การทดสอบเพื่อหาผลต่างของความดันเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดทดสอบในระยะต่างๆ..... | 36 |
| บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ | 42 |
| 5.1 ความเร็วที่ได้จากการทดสอบ | 42 |
| 5.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 45 |
| 5.3 สรุปผลการทดสอบ | 46 |
| บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ..... | 47 |
| บรรณานุกรม..... | 48 |
| ภาคผนวก ก การทดสอบเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมดูดอากาศ | 49 |
| ภาคผนวก ข การทดสอบเพื่อหาผลต่างของความดันเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดทดสอบในระยะต่างๆ..... | 56 |
| ภาคผนวก ค ตารางสมบัติฟิสิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ..... | 74 |
| ภาคผนวก ง การคำนวณ | 76 |
| ภาคผนวก จ คู่มือการใช้ Manometer | 82 |
| ภาคผนวก ฉ แบบร่างอุโมงค์ลม..... | 86 |
| ประวัติผู้ดำเนินโครงการ..... | 94 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 บริเวณปากทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ..... | 4 |
| รูปที่ 2.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน..... | 6 |
| รูปที่ 2.3 เส้นการไหลในสนามการไหล..... | 9 |
| รูปที่ 2.4 สนามการไหลและลำการไหล..... | 9 |
| รูปที่ 2.5 สนามการไหล 2 มิติ ผ่านปีกเครื่องบิน..... | 10 |
| รูปที่ 2.6 สนามการไหล 3 มิติ..... | 10 |
| รูปที่ 2.7 อุโมงค์ลมชนิดลมดูดและชนิดลมเป่า..... | 12 |
| รูปที่ 2.8 อุโมงค์แบบปิด..... | 13 |
| รูปที่ 2.9 อุโมงค์ลมขนาดใหญ่และขนาดเล็ก..... | 14 |
| รูปที่ 2.10 รูปร่างของอุโมงค์ลมที่มีส่วนอากาศแพร่ออก..... | 14 |
| รูปที่ 2.11 รูปแบบจำลองอุโมงค์ลม..... | 15 |
| รูปที่ 2.12 ส่วนอากาศแพร่เข้า..... | 15 |
| รูปที่ 2.13 ส่วนปฏิบัติงาน..... | 16 |
| รูปที่ 2.14 ส่วนอากาศแพร่ออก..... | 16 |
| รูปที่ 2.15 ลักษณะของรังผึ้ง (Honeycomb)..... | 17 |
| รูปที่ 2.16 ส่วนกำลัง..... | 17 |
| รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ..... | 18 |
| รูปที่ 3.2 อุโมงค์ลมที่ประกอบแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน..... | 19 |
| รูปที่ 3.3 ขนาดของอุโมงค์ลม..... | 20 |
| รูปที่ 3.4 ส่วนอากาศแพร่เข้าที่ออกแบบ..... | 20 |
| รูปที่ 3.5 ส่วนปฏิบัติงานที่ออกแบบ..... | 21 |
| รูปที่ 3.6 ส่วนอากาศแพร่ออกที่ออกแบบ..... | 21 |
| รูปที่ 3.7 รังผึ้งที่ออกแบบ..... | 22 |
| รูปที่ 3.8 ส่วนกำลัง..... | 23 |
| รูปที่ 3.9 กำหนดสภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 24 |
| รูปที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์ของความเร็วแต่ละระนาบทดสอบ..... | 25 |
| รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งในการวัด..... | 25 |
| รูปที่ 3.12 รูปส่วนอากาศแพร่เข้าที่สร้างขึ้น..... | 26 |
| รูปที่ 3.13 ส่วนปฏิบัติงานที่สร้างขึ้น..... | 27 |
| รูปที่ 3.14 ส่วนอากาศแพร่ออกที่สร้างเสร็จ..... | 27 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.15 รั้งผึ้งที่สร้างเสร็จ | 28 |
| รูปที่ 3.16 นำส่วนปฏิบัติงานวางลงบนฐานรับอุโมงค์ลม | 28 |
| รูปที่ 3.17 ประกอบส่วนปฏิบัติงานเข้ากับส่วนอากาศแพร่ออก | 29 |
| รูปที่ 3.18 นำรั้งผึ้งเข้าใส่ด้านหน้าของส่วนอากาศแพร่เข้า | 29 |
| รูปที่ 3.19 รั้งผึ้งที่ติดไว้ด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน | 29 |
| รูปที่ 3.20 ประกอบส่วนอากาศแพร่เข้ากับส่วนปฏิบัติงานเข้าด้วยกัน | 30 |
| รูปที่ 3.21 อุโมงค์ลมที่ประกอบแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน | 30 |
| รูปที่ 3.22 อุโมงค์ลมที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านหลัง | 30 |
| รูปที่ 3.23 อุโมงค์ลมที่เสร็จสมบูรณ์ | 31 |
| รูปที่ 4.1 พัดลมอุตสาหกรรม ขนาด 24 นิ้ว | 32 |
| รูปที่ 4.2 เครื่องวัดความเร็วลม | 33 |
| รูปที่ 4.3 Dimmer control | 33 |
| รูปที่ 4.4 ฉากกำหนดตำแหน่ง | 33 |
| รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัด | 34 |
| รูปที่ 4.6 การวัดความเร็วลม | 34 |
| รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและระดับ Dimmer Control | 35 |
| รูปที่ 4.8 พัดลมอุตสาหกรรม ขนาด 24 นิ้ว | 36 |
| รูปที่ 4.9 หัววัด Pitot tube | 36 |
| รูปที่ 4.10 เครื่องวัดมานอิมิเตอร์ | 37 |
| รูปที่ 4.11 Dimmer control | 37 |
| รูปที่ 4.12 การกำหนดระยะของระนาบหน้าตัดที่จะทำการวัดการไหลของลม | 37 |
| รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งในการวัดของระนาบทดสอบ | 38 |
| รูปที่ 4.14 การติดตั้งหัววัด Pitot tube ในส่วนปฏิบัติงาน | 38 |
| รูปที่ 4.15 หัววัด Pitot tube ที่ติดตั้งเสร็จ | 39 |
| รูปที่ 4.16 ค่าผลต่างของความดันที่ได้จากมานอิมิเตอร์ | 39 |
| รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแต่ละระนาบทดสอบ | 43 |
| รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 44 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1.1 งบประมาณที่ใช้..... | 2 |
| ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน | 3 |
| ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ในแบบจำลอง..... | 24 |
| ตารางที่ 3.2 กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขต..... | 24 |
| ตารางที่ 3.3 ความเร็วที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ | 26 |
| ตารางที่ 3.4 วัสดุที่ใช้ในการสร้าง..... | 26 |
| ตารางที่ 4.1 สรุปผลความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้จากการวัดตำแหน่งต่างๆบริเวณหน้าพัดลมดูดอากาศ..... | 35 |
| ตารางที่ 4.2 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ A ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.075 m | 40 |
| ตารางที่ 4.3 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ B ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.4 m..... | 40 |
| ตารางที่ 4.4 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ C ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.7 m..... | 40 |
| ตารางที่ 4.5 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ D ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 1 m..... | 41 |
| ตารางที่ 5.1 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ A..... | 42 |
| ตารางที่ 5.2 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ B | 42 |
| ตารางที่ 5.3 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ C..... | 43 |
| ตารางที่ 5.4 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ D..... | 43 |
| ตารางที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง..... | 45 |
| ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง..... | 45 |
| ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง..... | 45 |
| ตารางที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง..... | 46 |

ลำดับสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย |
|-----------|---|
| A | พื้นที่หน้าตัดของการไหล (m^2) |
| D | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m) |
| Ma | อัตราส่วนของค่าความเร็วของการไหลเฉพาะที่ (local flow) ต่ออัตราเร็วเสียง |
| P | กำลังมอเตอร์ (W) |
| Re | ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ |
| V | ความเร็วของของไหล (m/s) |
| ρ | ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3) |
| μ | ความหนืดสัมบูรณ์ ($N \cdot s/m^2$) |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหาและความสำคัญของโครงการ

อุโมงค์ลม เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการทดสอบการไหลของของไหลผ่านรูปร่างต่างๆ ในห้องปฏิบัติการมากที่สุดชิ้นหนึ่ง เพราะการสร้างแบบจำลองขึ้นมาแล้วนำไปทดสอบพฤติกรรมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุ และลักษณะของความเร็วของการไหลที่เกิดขึ้น ล้วนเป็นสิ่งที่วิศวกรต้องการทราบก่อนการสร้างต้นแบบที่มีราคาแพงมากขึ้นมา

จากปริญญาณิพนธ์ศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้กังหันลมขนาดเล็กแบบพกพาได้ ของสะท้อนภพ และคณะ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2553 ในการทดสอบกังหันลมไม่ได้ใช้อุโมงค์ลมในการทดสอบ ทั้งนี้ได้มีข้อเสนอแนะให้ทดสอบกังหันลมในอุโมงค์ลม เพื่อลดตัวแปรที่เกี่ยวข้องจากสภาพแวดล้อม จากข้อเสนอแนะดังกล่าว จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบ และพัฒนาชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็กหรืออุโมงค์ลมที่สามารถสร้างความเร็วของอากาศก่อนหน้าตัดทดสอบได้ในช่วง 3-5 m/s เพื่อใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมขนาดเล็กซึ่งมีปริมาตรทดสอบ 50 cm x 115 cm x 50 cm ซึ่งคาดว่าจะลดความคลาดเคลื่อนในการทดสอบ และยังสามารถใช้ทดสอบแบบจำลองที่มีขนาดเล็กรูปร่างต่างๆได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาอุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่ทำระดับความเร็วได้ 3-5 m/s

1.2.2 ออกแบบและสร้างชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก ให้มีความเร็วที่ระนาบทดสอบอยู่ในช่วง 3-5 m/s และมีการกระจายความเร็วลมอย่างสม่ำเสมอ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

ศึกษาออกแบบและสร้างชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก ที่มีส่วนปฏิบัติงานขนาดปริมาตร 50 x cm x 115 cm x 50 cm โดยมีความเร็วลมในช่วง 3-5 m/s และมีการกระจายลมสม่ำเสมอที่หน้าตัดทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก ที่ทำความเร็วได้ 3-5 m/s ที่หน้าตัดทดสอบ

1.4.2 ได้แนวทางในการพัฒนาอุโมงค์ลมต่อไปในอนาคต

1.4.3 ฝึกทักษะกระบวนการคิดการวางแผน การแก้ปัญหา และการทำงานเป็นทีม

1.5 สถานที่ปฏิบัติงาน

อาคารปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
จังหวัดพิษณุโลก

1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

1.6.1 พัดลมอุตสาหกรรม ขนาด 24 นิ้ว ชนิดใบดुकกลับ

1.6.2 อุโมงค์ลม

1.6.3 เครื่องวัดความเร็วลม

1.6.4 หัววัด Pitot tube

1.6.5 เครื่องวัดमानอมิเตอร์ (manometer)

1.7 งบประมาณที่ใช้

ตารางที่ 1 1 งบประมาณที่ใช้

| ลำดับ | รายการ | ราคา | หน่วย |
|-------|--------------------------------------|-------|-------|
| 1 | ค่าอุปกรณ์ทำชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก | 6,800 | บาท |
| 2 | ค่าใช้จ่ายในการทำรูปเล่มรายงาน | 1,500 | บาท |
| 3 | ค่าวัสดุอุปกรณ์อื่นๆ | 1,000 | บาท |
| | รวม | 9,300 | บาท |

1.8 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1 2 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

| รายละเอียดการปฏิบัติงาน | พ.ศ.2554 | | | | | | | พ.ศ.2555 | | | | | | |
|--|----------|------|------|------|------|------|------|----------|------|-------|-------|------|--|--|
| | มิ.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. | พ.ค. | | |
| 1.ค้นหาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.ศึกษาหลักการทำงานของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.เขียนแบบเสนอโครงการ | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.ทำการออกแบบชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็กและเขียนแบบ (Drawing) | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.สร้างชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.ทดสอบความเร็วลมและการกระจายลมภายในชุดทดสอบ | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.วิเคราะห์ข้อมูลและเขียนรายงาน | | | | | | | | | | | | | | |

บทที่ 2

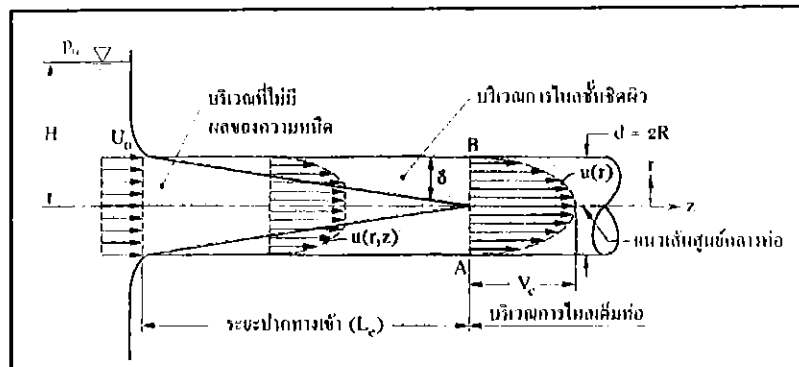
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของของไหลที่จะต้องพิจารณาในส่วนของไหลในอุโมงค์ลม รวมถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับอุโมงค์ลม ชนิด รูปแบบ รวมถึงส่วนประกอบและลักษณะพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอุโมงค์ลม ที่จะใช้ประกอบการพิจารณาในการออกแบบ และจัดสร้างให้เหมาะสมกับชิ้นงานทดสอบที่กำหนด

2.1 สมบัติของของไหล

2.1.1 ลักษณะทั่วไปสำหรับการไหลภายในท่อ

การไหลภายในท่อจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้นั้นจะต้องมีความดันแตกต่างกันระหว่างจุดทั้งสองของไหลจึงจะสามารถไหลผ่านท่อไปได้ ในรูปที่ 2.1 เป็นการไหลเข้าท่อด้วยความเร็วคงตัว U_0 ผลของความหนืดบริเวณใกล้กับผนังท่อจะเกิดความต้านทานต่อการไหล ทำให้เกิดชั้นขีตผิวในบริเวณใกล้กับผนังท่อนั้นภายใต้สมมติฐานว่าไม่มีการสั่นไหลที่ผนังท่อ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งตามความยาวท่อในบริเวณใกล้ๆ ทางเข้าท่อนั้นพบว่าความเร็วเปลี่ยนแปลงกับระยะทางที่วัดในแนวตั้งฉากกับผนังท่อ และเกิดความเค้นเฉือนกระทำต่อของไหลในทิศตรงกันข้ามกับของไหล และในบริเวณนี้ยังพบว่าโปรไฟล์ความเร็วเปลี่ยนแปลงในทิศการไหลอีกด้วย บริเวณดังกล่าวนี้เรียกว่า บริเวณปากทางเข้า (entrance region) เมื่อของไหลไหลผ่านท่อในช่วงต่อไป ชั้นขีตผิวจะพัฒนาจนความหนาชั้นขีตผิว (δ) เพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงแนวเส้นศูนย์กลางท่อ (หน้าตัด AB) สำหรับบริเวณที่อยู่ภายนอกบริเวณการไหลชั้นขีตผิวจะเป็นบริเวณที่ไม่มีผลของความหนืด (inviscid core) ในบริเวณปากทางเข้านั้นการกระจายความเร็วจะเปลี่ยนแปลงตามระยะพิกัด r และระยะในทิศการไหลตามพิกัด z ($u = u(r, z)$) เมื่อของไหลไหลพ้นบริเวณปากทางเข้าความเร็วจะไม่ขึ้นกับระยะทางในทิศการไหล แต่ความเร็วจะขึ้นกับพิกัด r เท่านั้น การไหลในบริเวณนี้เรียกว่า บริเวณการไหลเต็มท่อ (fully developed region) และพบว่า การกระจายความเร็วที่หน้าตัดของท่อที่ตำแหน่งใดๆ ตามความยาวเท่านั้นจะเป็นฟังก์ชันของระยะตามพิกัด r เท่านั้น $u = u(r)$ ทำให้โปรไฟล์ความเร็วไม่เปลี่ยนแปลงตามทิศการไหลในบริเวณการไหลเต็มท่อนี้



รูปที่ 2.1 บริเวณปากทางเข้าและบริเวณการไหลเต็มท่อสำหรับการไหลภายในท่อ

2.1.2 การไหลแบบยุบตัวได้และการไหลแบบยุบตัวไม่ได้

การไหลที่ไม่คำนึงถึงผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหล จะเรียกว่า การไหลแบบยุบตัวได้ (incompressible flow) สำหรับการไหลที่มีผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหล จะเรียกว่า การไหลแบบยุบตัวไม่ได้ (compressible flow) หากพิจารณาของไหลสามารถแบ่งออกเป็นของเหลวและแก๊ส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการไหลของของเหลวจะพิจารณาเป็นของไหลแบบยุบตัวไม่ได้ และการไหลของแก๊สจะพิจารณาเป็นของไหลแบบยุบตัวได้ ในทางปฏิบัติสำหรับการไหลของของเหลวส่วนใหญ่จะเป็นการไหลแบบยุบตัวไม่ได้ทั้งสิ้น แต่ในบางสภาวะของของเหลว เช่น เกิดโพรงในของเหลว และการกระทบก้นของน้ำ (water hammering) นั้นผลของสภาพยุบตัวได้ของของเหลวมีผลต่อการไหล สำหรับแก๊สก็เช่นกัน โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาการไหลของแก๊สเป็นการไหลแบบยุบตัวได้ เว้นเสียแต่อัตราการไหลของแก๊สนั้นต่ำกว่าอัตราเร็วเสียงมากๆ ในที่นี้กำหนดด้วย $Ma < 0.3$ ซึ่งจะพบว่าความหนาแน่นของแก๊สมีค่าต่ำกว่า 2% ของค่าความหนาแน่นเฉลี่ย ดังนั้นการไหลของแก๊สที่มี $Ma < 0.3$ นั้นจะพิจารณาเป็นการไหลแบบยุบตัวไม่ได้

2.1.3 เลขมัค

สภาพยุบตัวได้ในการไหลของของไหลจะถูกกำหนดด้วยเลขมัค (Mach number, Ma) เลขมัคคือ อัตราส่วนของค่าความเร็วของการไหลเฉพาะที่ (local flow) ต่ออัตราเร็วเสียง สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (2.1)$$

พิจารณาการไหลแบบยุบตัวได้ ความเร็วของการไหล (V) อาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าอัตราเร็วเสียง (c) ถ้าการไหลที่มี $Ma < 1$ พบว่าเป็นการไหลที่ความเร็วได้เสียง (subsonic flow) และถ้าการไหลที่มี $Ma > 1$ พบว่าเป็นการไหลที่ความเร็วเหนือเสียง (supersonic flow)

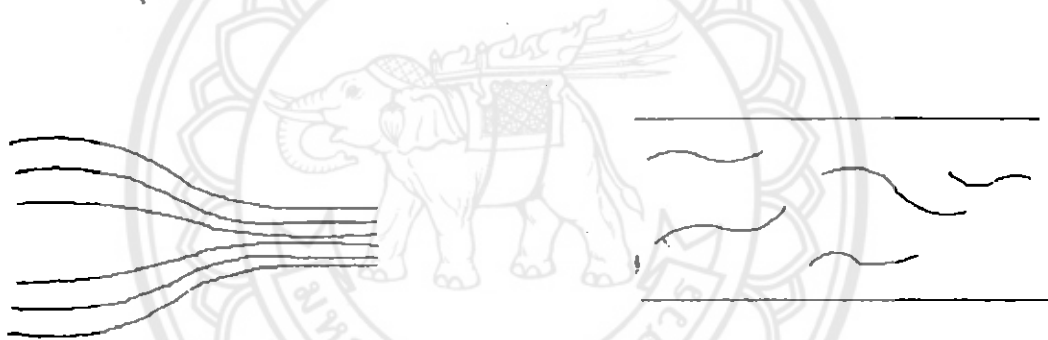
2.2 จลศาสตร์ของของไหล

จลศาสตร์ (Kinematics) เป็นแขนงวิชากลศาสตร์ที่อธิบายเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของสสารโดยไม่คำนึงถึงแรงกระทำอันเป็นสาเหตุของการเคลื่อนที่ ในที่นี้จะกล่าวถึงส่วนของวิธีการอธิบายการเคลื่อนที่ของของไหล การอธิบายการเคลื่อนที่ในที่นี้ประกอบด้วย การเปลี่ยนตำแหน่ง (Displacement) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) การเคลื่อนที่ของของไหลมักเรียกว่าการไหล (Flow) การอธิบายการไหลโดยการเปลี่ยนสภาพของการไหลสามารถทำได้หลายวิธีการ เช่น การไหลเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วน (Laminar or Turbulent Flow) การไหลเป็นแบบคงตัวหรือไม่คงตัว (Steady or Unsteady Flow) การไหลแบบสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอ (Uniform or Non-uniform Flow) เป็นต้น

2.2.1 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flow)

จากการทดลองของ Osborne Reynolds ในปี ค.ศ. 1883 โดยเปิดให้น้ำไหลผ่านท่อแก้วใส แล้วฉีดสีเข้าไปเพื่อให้มองเห็นสภาพการไหลในท่อแก้ว เมื่อเปิดวาล์วให้มีการไหลผ่านท่อแก้วน้อยๆ (อัตราการไหลต่ำๆ และความเร็วของการไหลน้อยๆ) เส้นสีจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดท่อเมื่อเปิดวาล์วให้มีอัตราส่วนการไหลเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เส้นสีจะเริ่มแปรปรวนเป็นลูกคลื่นจนในที่สุดเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นไปอีก เส้นสีจะแตกและกระจายออกทั่วหน้าตัดท่อ

การไหลในช่วงแรกๆ ที่เส้นสีมีลักษณะเป็นเส้นตรงนั้นเรียกว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งอนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบและมีลักษณะเป็นชั้นบางๆ มีการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างชั้นน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ส่วนการไหลในช่วงหลังที่เส้นสีเริ่มแปรปรวนเป็นลูกคลื่นจนกระทั่งแตกกระจายในที่สุดเรียกว่าการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) การไหลแบบนี้อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบและมีการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างโมเลกุลมาก



รูปที่ 2.2 (ก)

รูปที่ 2.2 (ข)

รูปที่ 2.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน

จากวิชากลศาสตร์ของไหลนั้นพารามิเตอร์ ที่ใช้เชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและแรงจากความเฉื่อยที่มาทำให้การไหลเปลี่ยนจาก Laminar ไปเป็น Turbulent คือ Reynolds Number มีค่าเป็น

$$Re_x = \frac{\rho v_\infty x}{\mu} = \frac{v_\infty x}{\nu} \quad (2.2)$$

เมื่อ Re_x คือ Reynolds Number ตรงจุดที่อยู่ห่างจากต้นของไหลเป็นระยะทาง x , ไร้มิติ

v_∞ คือ ความเร็วของไหลอิสระ, m/s

x คือ ระยะที่วัดจากขอบทางด้านต้นของของไหล, m

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m³

μ คือ ความหนืดไดนามิกส์, N.s/m²

ν คือ ความหนืดเนแมติกส์, m²/s

การไหลในท่อเป็นการไหลที่สำคัญมาก การไหลในท่อจะเป็น Laminar หรือ Turbulent ขึ้นกับค่า Reynolds Number

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (2.3)$$

เมื่อ Re คือ Reynolds Number ที่หาจากเส้นผ่านศูนย์กลาง D ของท่อ, ν มีมิติ ν คือ ความเร็วเฉื่อยของของไหล, m/s
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ, m กรณีการไหลในท่อจะเปลี่ยนจาก Laminar เมื่อ $Re_D = 2,300$ และเมื่อ $Re_D = 6,000$ แล้วการไหลจะเป็น Turbulent โดยสมบูรณ์และ $2,000 < Re_D < 4,000$ เป็นช่วง Transition ปกติค่า Reynolds Number ขึ้นอยู่กับความเรียบของผิวท่อ และระดับความเป็น Turbulent ของของไหล

ในกรณีที่ไม่ใช่ท่อกลม จำเป็นต้องใช้รัศมีไฮดรอลิก R_h (Hydraulic Radius) ในการหาค่า Reynolds Number โดยที่

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (2.4)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของการไหล
 P คือ เส้นขอบเปียก (Wetted Parameter) ซึ่งเป็นความยาวของเส้นขอบหน้าตัดที่ของเหลวสัมผัสกับผิวของท่อ

ในกรณีท่อกลมจะได้ว่า

$$R_h = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} \text{ หรือ } \frac{D}{4} \quad (2.5)$$

จะเห็นได้ว่ารัศมีไฮดรอลิกไม่ใช่รัศมีของท่อ ดังนั้นถ้าหากไม่เป็นท่อกลมจะคำนวณค่า R โดยแทนค่า D ด้วย $4 R_h$

$$\begin{aligned} \text{หรือ} \quad R_h &= \frac{D_H}{4} \\ \text{หรือ} \quad D_H &= 4 \frac{A}{P} \end{aligned} \quad (2.6)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัด
 P คือ เส้นขอบเปียก

2.2.2 การไหลแบบคงตัวและการไหลแบบสม่ำเสมอ (Steady And Uniform Flow)

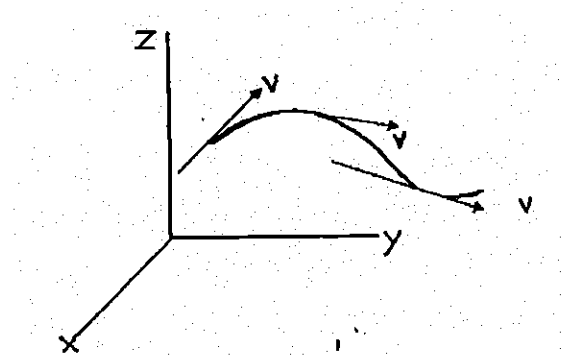
การไหลแบบคงตัว (Steady Flow) คือการไหลที่มีสภาพการไหล ณ จุดใดจุดหนึ่งในสนามการไหลคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ทั้งนี้ที่ตำแหน่งอื่นอาจแตกต่างจากตำแหน่งนี้ได้ ส่วนการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow) คือการไหลที่มีความเร็ว ณ ทุกๆจุดในสนามการไหลคงที่ทั้งขนาดและทิศทางในเวลาใดเวลาหนึ่ง กล่าวคือ การไหลแบบสม่ำเสมอมีสภาพการไหลที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ส่วนการไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) และการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Flow) คือการไหลที่มีสภาพแตกต่างจากที่กล่าวข้างต้น ตามลำดับ อาจกล่าวได้ว่าการไหลแบบคงตัวจะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อสภาพการไหลเป็นแบบราบเรียบเท่านั้น

จากคำจำกัดความข้างต้น จะพบว่า การไหลในสภาพต่างๆ ไปจะเกิดจากการผนวกการไหลทั้ง 4 ประเภทเข้าด้วยกันคือ การไหลแบบคงตัว การไหลแบบไม่คงตัว การไหลแบบสม่ำเสมอ และการไหลแบบไม่สม่ำเสมอ เกิดเป็นการไหล 4 สภาพดังนี้

- การไหลคงตัวแบบสม่ำเสมอ (Steady Uniform Flow) เช่น การไหลด้วยอัตราคงที่ผ่านท่อตรงที่ยาวมาก
- การไหลคงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Steady Non-uniform Flow) เช่น การไหลด้วยอัตราคงที่ผ่านท่อที่มีขนาดค่อยๆขยายใหญ่ขึ้น
- การไหลไม่คงตัวแบบสม่ำเสมอ (Unsteady Uniform Flow) เช่น การไหลในท่อตรงที่มีอัตราการไหลไม่คงที่
- การไหลไม่คงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ (Unsteady Non-uniform Flow) เช่น การไหลในอัตราไม่คงที่ผ่านท่อที่ค่อยๆขยายใหญ่ขึ้น

2.2.3 รูปแบบการไหล (Flow Pattern)

รูปแบบการไหลสามารถอธิบายด้วยเส้นการไหล (Streamline) เส้นทางไหล (Part Line) และเส้นใยการไหล (Steak Line) โดยที่เส้นการไหลคือเส้นต่างๆ ที่ลากสัมผัสกับเวกเตอร์ความเร็ว (Velocity Vector) ของการไหลทุกๆ จุดในช่วงเวลาขณะหนึ่งของการไหล สำหรับการไหลแบบคงตัว เส้นการไหลคือเส้นที่แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามการไหลนั่นเอง และเนื่องจากไม่มีความเร็วในแนวตั้งฉากกับเส้นการไหล ดังนั้นจึงไม่มีการไหลข้ามเส้น เมื่อพิจารณาเส้นการไหลของอนุภาคทั้งหมดก็จะได้เส้นการไหลจำนวนมาก ซึ่งรูปแบบการไหลที่มีเส้นการไหลประกอบกันเป็นจำนวนมากนี้เรียกว่า สนามการไหล (Flow Field) ดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 เส้นการไหลในสนามการไหล

ถ้าหากพิจารณากลุ่มของเส้นการไหล จะพบว่าเนื้อที่ระหว่างเส้นการไหลจะมีลักษณะเป็นลำท่อ (Tube) คล้ายๆ กับท่อน้ำซึ่งเรียกว่า ลำการไหล (Steam Tube) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ลำการไหล อาจจะได้หีบยกออกมาจากสนามการไหลเพื่อพิจารณาคคุณสมบัติการไหลเป็นพิเศษได้ ทั้งนี้เพราะลำการไหลประกอบขึ้นด้วยผนังเส้นการไหล และไม่มีความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับเส้นการไหลจึงไม่มีการไหลผ่านผนังของลำการไหล ดังนั้นของไหลที่ไหลเข้าลำการไหลเป็นจำนวนเท่าใดก็ย่อมจะต้องไหลออกเป็นปริมาณเท่าเดิม จะเห็นว่าลำการไหลมีประโยชน์ในการวิเคราะห์การไหลในหลายๆ ด้านแต่จะต้องเป็นเฉพาะกรณีของการไหลแบบคงตัวเท่านั้นจึงจะมีลำการไหลคงที่



รูปที่ 2.4 สนามการไหลและลำการไหล

เส้นการไหล (Path Line) คือ เส้นซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหลเพียงอนุภาคเดียวในเวลาที่กำหนด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า เส้นทางไหลแสดงให้เห็นถึงทิศทางของความเร็วของอนุภาคหนึ่งในช่วงเวลานั้น ในการไหลแบบคงตัวนั้นจะมีเส้นทางไหลและเส้นการไหลที่เป็นเส้นเดียวกัน เพราะอนุภาคเคลื่อนที่ตามเส้นการไหล และเส้นการไหลนี้ก็แสดงให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเวลาเดียวกันด้วย ส่วนในกรณีการไหลแบบไม่คงตัวนั้นเวกเตอร์ความเร็วที่จุดต่างๆ จะเปลี่ยนแปลงไปตามการเวลา เส้นการไหลจึงเปลี่ยนตำแหน่งไปเรื่อยๆ ทำให้เส้นการไหลกับเส้นทางไหลแตกต่างกันออกไป

เส้นใยการไหล (Streak Line) เป็นเส้นซึ่งให้ภาพการไหลในชั่วขณะใดๆ ที่แสดงตำแหน่งของอนุภาคของไหลที่ผ่านจุดกำหนด เปรียบเสมือนกับการถ่ายรูป เส้นใยการไหลมักจะได้มาจากการทดลอง

2.3 อุโมงค์ลมความเร็วต่ำ

2.3.1 แบ่งตามความดัน

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

2.3.1.1 ประเภทความดันปกติ อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันเท่ากับ ความดันบรรยากาศซึ่งทำได้โดยการใช้พัดลมดูดหรือเป่าอากาศผ่านวัสดุทดสอบ

2.3.1.2 ประเภทความดันสูง อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศทำได้โดยการใช้ถังลมอัดอากาศแล้วเป่าผ่านวัสดุทดสอบ

2.3.2 แบ่งตามอัตราเร็วของลมที่ตัวอุโมงค์สามารถทำได้

2.3.2.1 อุโมงค์ลมชนิด V/STOL เป็นอุโมงค์ลมชนิดพิเศษที่จะมีส่วนการทดลอง (Test section) ขนาดใหญ่ที่มีอัตราเร็วต่ำมากเพื่อใช้ทำการทดลองเครื่องบินที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลงในแนวตั้ง และเครื่องบินที่สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงในระยะทางที่สั้น (Vertical/Short Takeoff and Landing) อัตราเร็วของลมในส่วนการทดลอง (Test section) มักจะมีค่าเลขมัคตั้งแต่ 0.026 ถึง 0.13

2.3.2.2 อุโมงค์ลมชนิดอัตราเร็วต่ำ เป็นอุโมงค์ที่สามารถสร้างอัตราเร็วของลมอยู่ในช่วงค่าเลขมัคไม่เกิน 0.39

2.3.2.3 อุโมงค์ลมชนิด transonic เป็นอุโมงค์ลมที่สามารถสร้างอัตราเร็วของลมในส่วนการทดลอง (Test section) ให้มีค่าเลขมัคอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1.4 ส่วนการทดลอง (Test section) ของอุโมงค์ลมชนิดนี้จะถูกล้อมรอบด้วยห้อง (plenum chamber) ขนาดใหญ่ และผนังของส่วนการทดลองจะมีการออกแบบให้มีช่องระบาย (ventilation slot) เพื่อให้ตัวคลื่นช็อก (shock wave) สามารถเกิดขึ้นบริเวณแบบจำลองเมื่ออัตราเร็วของการไหลเข้าใกล้อัตราเร็วเสียง

2.3.2.4 อุโมงค์ลมชนิด supersonic เป็นอุโมงค์ลมที่สามารถสร้างอัตราเร็วของลมในส่วนการทดลอง (Test section) ให้มีค่าตัวเลขมัคอยู่ในช่วง 1.0 ถึง 5

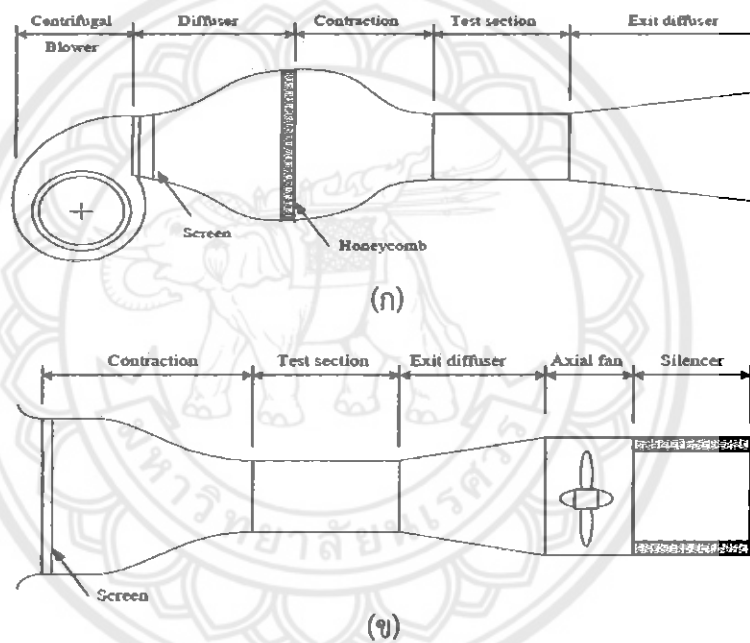
2.3.2.5 อุโมงค์ลมชนิด hypersonic เป็นอุโมงค์ลมที่สามารถสร้างอัตราเร็วของลมในส่วนการทดลอง (Test section) ให้มีค่าตัวเลขมัคอยู่ในช่วง 5 ถึง 15 โดยในระหว่างการขยายการไหลก็จะทำให้เกิดความร้อนที่เกิดขึ้น ดังนั้นจำเป็นต้องมีการป้องกันการหลอมละลายที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ด้วย

2.3.2.6 อุโมงค์ลมชนิด nonaeronautical เป็นอุโมงค์ลมที่ถูกออกแบบเพื่อทำการทดลองผลของลมที่มีต่ออาคาร รถยนต์และวัตถุที่ไม่บิน (nonflying object) อื่นๆ อุโมงค์ลมชนิดนี้จะมีขนาดและรูปร่างพิเศษ เช่น อุโมงค์ลมสำหรับงานอุตุนิยมวิทยา (meteorological wind tunnel) ที่มีส่วนการทดลองยาวเป็น 10 ถึง 15 เท่า ของความสูงของส่วนการทดลอง เป็นต้น

2.3.2.7 อุโมงค์ลมชนิด hypervelocity เป็นอุโมงค์ลมที่สามารถสร้างอัตราเร็วและอุณหภูมิของลมสูงกว่าความสามารถของอุโมงค์ลมชนิด hypersonic อัตราเร็วของลมในส่วนการทดลอง (Test section) ที่สามารถสร้างได้จะอยู่ในช่วงตัวเลขมัคจาก 1 ถึง 25

2.3.3 แบ่งตามลักษณะการเคลื่อนที่

2.3.3.1 อุโมงค์ลมแบบเปิด คืออุโมงค์ลมที่มีบริเวณส่วนทางเข้าและทางออกของลมเปิดสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งอาจอยู่ภายในหรือภายนอกตัวอาคารที่ใช้ก่อสร้าง มีข้อดีคือ ประหยัดงบประมาณและพื้นที่ในการก่อสร้าง แต่ต้องมีพื้นที่ยาวมากและบริเวณรอบๆ จะต้องไม่มีลมกระทบมายังทางเข้าและทางออกขณะทดสอบได้ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณรอบๆ ก็ส่งผลถึงการทดสอบทันทีเนื่องจากเป็นระบบเปิด การสร้างอุโมงค์ลมแบบนี้สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ อุโมงค์ลมชนิดเป่า (Blower tunnel) พัดลมจะอยู่บริเวณต้นทางก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ดังรูปที่ 2.7 ก และอุโมงค์ลมชนิดลมดูด (Suction tunnel) พัดลมจะอยู่บริเวณด้านหลังส่วนทดสอบ ซึ่งมีข้อดีคือ กระแสลมที่เข้ามาหาส่วนทดสอบจะปั่นป่วนน้อยกว่าการนำพัดลมไว้ด้านหน้า ดังรูปที่ 2.7 ข



รูปที่ 2.7 อุโมงค์ลมชนิดลมดูดและชนิดลมเป่า

ข้อดี

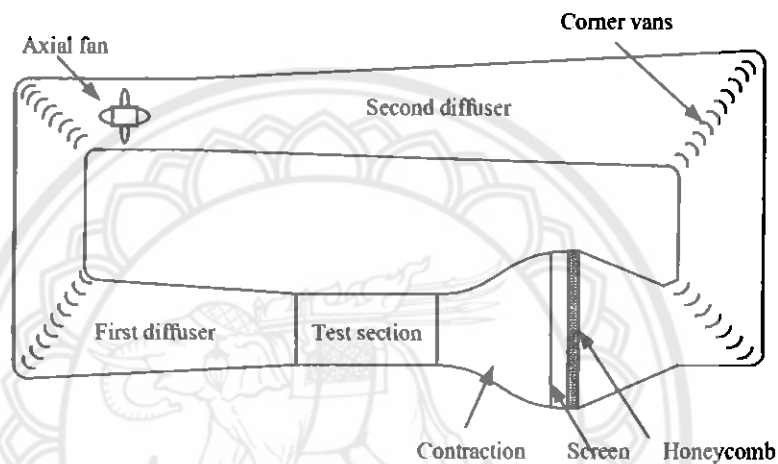
- งบประมาณในการจัดสร้างน้อยกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด
- ถ้าหากมีการทดสอบโดยใช้แบบควัน (Smoke Test) ก็สามารถสร้างควันพลอยที่ส่วนอากาศแพร่เข้าได้เลย

ข้อเสีย

- ในกรณีห้องสถานที่ตั้งอุโมงค์ลม จำเป็นต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับตัวอุโมงค์ลม และมีฉากกันสภาวะของลมตามธรรมชาติ เพื่อจะได้ประสิทธิภาพในการทดสอบ
- ขนาด และความเร็วภายในอุโมงค์ลม จะต้องใช้พลังงานในการเดินเครื่องมากกว่าอุโมงค์ลมแบบปิด

- เกิดเสียงดังกว่าอุโมงค์แบบเปิด

2.3.3.2 อุโมงค์ลมแบบปิด เป็นอุโมงค์ลมที่นำเอาลมที่พัดผ่านแบบจำลองในส่วนทดสอบไปแล้ววนกลับมาบริเวณทางเข้าโดยใช้พัดลมตัวเดียว ทำให้ไม่ต้องรับอากาศจากภายนอกเข้ามา กระแสอากาศที่ได้จึงมีความราบเรียบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดค่าต่างๆ สูงกว่าอุโมงค์ลมแบบเปิดเนื่องจากสามารถควบคุมการไหลของลมที่ไหลกลับมาใหม่ได้ และไม่ได้รับผลกระทบจากอากาศบริเวณรอบๆ อุโมงค์ลมชนิดนี้ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดสอบได้ แต่การสร้างต้องใช้งบประมาณสูง และต้องมีพื้นที่กว้างในการรองรับโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 อุโมงค์ลมแบบปิด

ข้อดี

- ใช้พลังงานในการสร้างความเร็วลมให้กับห้องทดสอบน้อย
- ไม่มีเสียงดัง

ข้อเสีย

- งบประมาณในการจัดสร้างค่อนข้างสูง

2.4 ขนาดของอุโมงค์ลม

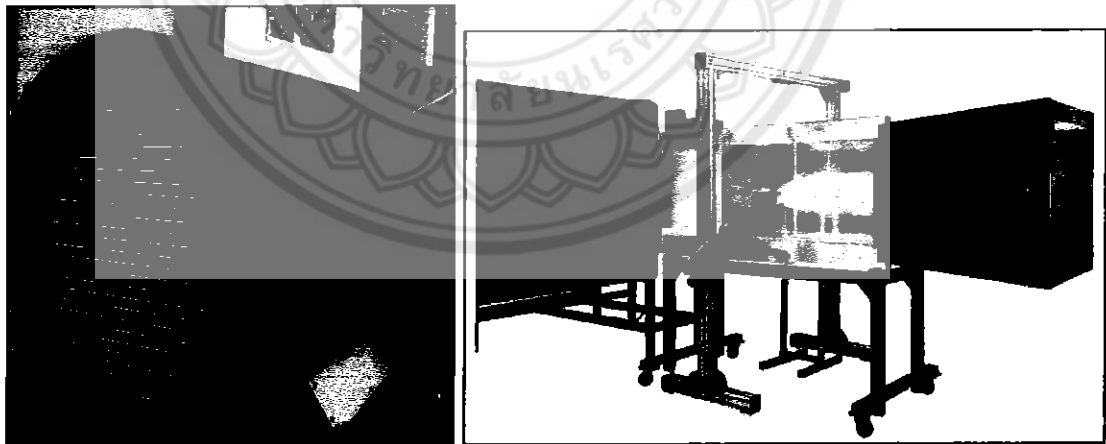
การกำหนดขนาดของอุโมงค์ลมส่วนใหญ่จะถูกเรียกหรือถูกกำหนดขนาดโดยขนาดส่วนปฏิบัติงาน (Test Section Size) ที่ใช้งาน และขนาดของตัวอุโมงค์ลมนั้นไม่ได้ถูกกำหนดขนาดที่แน่นอนโดยจะขึ้นอยู่กับความต้องการของการใช้งานในการทดสอบ หรือขนาดของสิ่งที่จะนำมาทดสอบว่ามีขนาดเล็ก หรือใหญ่ ซึ่งในปัจจุบันมีขนาดของห้องทดสอบที่มีตั้งแต่ พื้นที่หน้าตัด 1 ft. x 1 ft. (หรืออาจจะมีเล็กกว่าแต่ก็น้อยมาก) ถึงขนาดที่สามารถนำรถยนต์หรือเครื่องบินขนาดใหญ่เข้าไปได้ภายในห้องทดสอบเพื่อทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลมได้ เช่น อุโมงค์ลมที่สถาบัน NASA เป็นต้น



รูปที่ 2.9 อูโมงค์ลมขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

แต่อย่างไรก็ตาม ขนาดของตัวอูโมงค์ลมที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดของห้องทดสอบ ที่เท่ากันก็มีใช้ว่าจะมีขนาดโดยรวมทั้งหมดของตัวอูโมงค์ลมที่เท่ากันเสมอไปโดยขนาดโดยรวมก็จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบอื่นๆ อีกเช่นกัน แล้วแต่กรณีของการออกแบบ เช่น ความยาวของห้องทดสอบและส่วนอื่นๆ ขนาดของพื้นที่หน้าตัดส่วนแพร่เข้า (Contraction) ต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดทดสอบ หรือขนาดของพื้นที่หน้าตัดส่วนแพร่ออก (Diffuser) ต่อขนาดของพื้นที่หน้าตัดห้องทดสอบ เป็นต้น

ลักษณะของตัวของอูโมงค์ลม ไม่ได้กำหนดไว้เป็นลักษณะรูปร่างที่แน่นอนตายตัว แต่จะขึ้นอยู่กับ การออกแบบนั้นๆ เช่น ลักษณะของอากาศของส่วนที่อากาศแพร่ออก ที่จะมีรูปร่างต่างกันออกไปไม่ว่าจะเป็นทรงกระบอกกลม หรือแม้แต่รูปร่างทรงเป็นสี่เหลี่ยมยาว ดังรูป 2.10

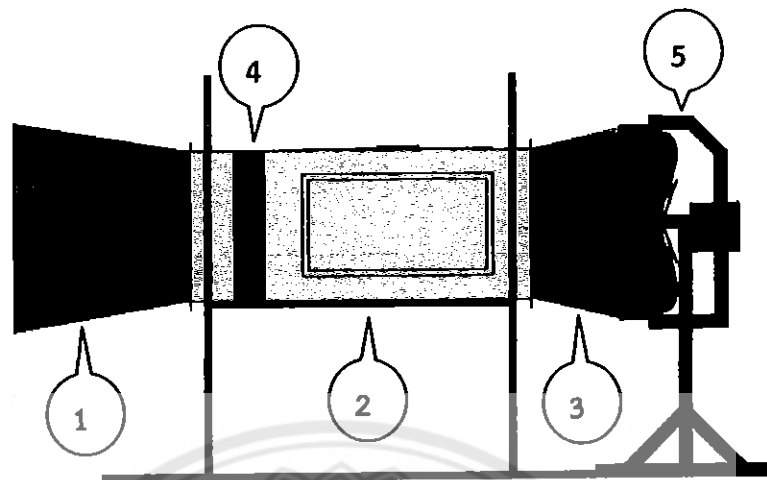


(ก)

(ข)

รูปที่ 2.10 รูปร่างของอูโมงค์ลมที่มีส่วนอากาศแพร่ออกเป็นทรงกระบอก (ก) และเป็นสี่เหลี่ยมยาว (ข)

2.5 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม

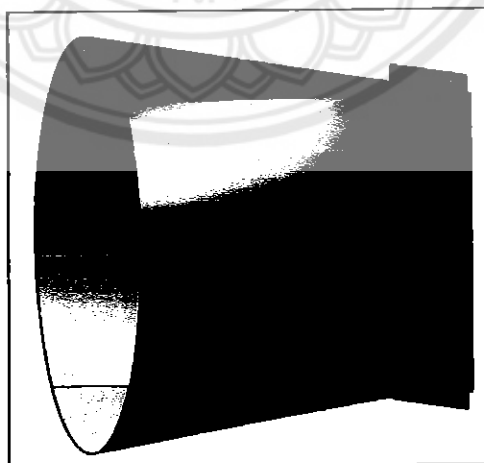


รูปที่ 2.11 รูปแบบจำลองอุโมงค์ลม

ส่วนประกอบที่สำคัญของอุโมงค์ลมประเภทความดันปกติแบบเปิด ตามรูปที่ 2.10 จะแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ

2.5.1 ส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction)

ส่วนอากาศแพร่เข้านี้จะเป็นส่วนแรกที่อากาศจะไหลเข้าสู่อุโมงค์ลมชนิดดูด โดยทั่วไปจะนิยมทำให้ปากทางอากาศเข้าเป็นรูวงกลมหรือวงรี แล้วจะลดพื้นที่หน้าตัดลงอย่างสม่ำเสมอจนกระทั่งถึงส่วนปฏิบัติงาน ซึ่งมีหน้าที่การทำงานคล้ายกับหัวฉีด เพื่อให้กระแสอากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และลมที่ไหลเข้ามาก็จะถูกทำให้มีความราบเรียบและสม่ำเสมอมากขึ้น จนถึงปากทางเข้าส่วนปฏิบัติงาน

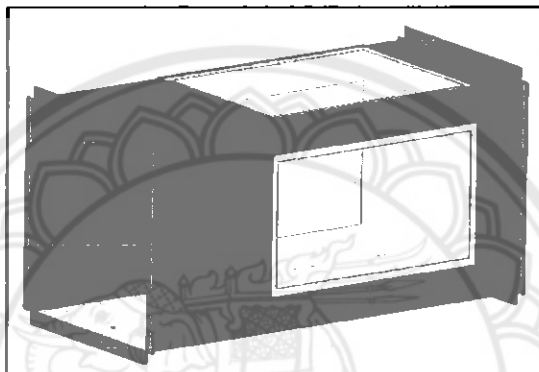


รูปที่ 2.12 ส่วนอากาศแพร่เข้า

2.5.2 ส่วนปฏิบัติงาน (Test Section)

สิ่งแรกที่เป็นตัวกำหนดในการใช้งานอุโมงค์ลมนั้น ต้องรู้มิติต่างๆ ของแบบจำลองหรือสิ่งที่นำมาทดสอบ แต่วก่อนอื่นใดในการที่จะออกแบบเราจะต้องทราบว่า ต้องการขนาดของส่วนปฏิบัติงาน (Test Section) และสามารถสร้างความเร็วลม (Velocity) ภายในห้องทดสอบได้เท่าใด

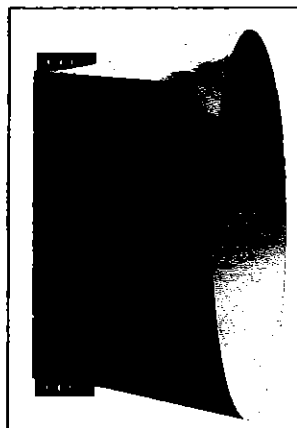
โดยขนาดส่วนปฏิบัติงาน (Test Section) นั้นจะต้องมีความเหมาะสมกับความเร็วที่ต้องการ เนื่องจากถ้าหากขนาดของส่วนปฏิบัติงาน นั้นมีขนาดใหญ่เกินไปแล้ว ก็จะส่งผลถึงความต้องการในการใช้พลังงานของชุดตัวขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นตามขนาดของส่วนปฏิบัติงาน ที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าขนาดของส่วนปฏิบัติงานมีความสำคัญที่จะออกแบบให้มีความเหมาะสมที่สุดในการออกแบบอุโมงค์ลม



รูปที่ 2.13 ส่วนปฏิบัติงาน

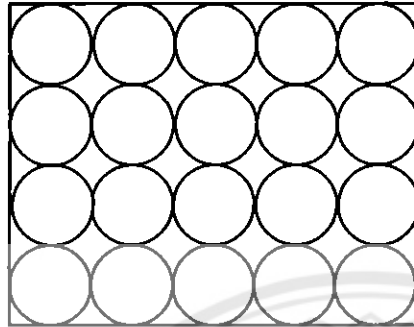
2.5.3 ส่วนอากาศแพร่ออก (diffuser)

ส่วนอากาศแพร่ออกนี้เป็นส่วนที่รับของไหลต่อจากส่วนของห้องทดสอบ จะทำหน้าที่ในการลดความเร็วของลมหรือของไหลที่จะไหลออกจากจากตัวอุโมงค์ลม เนื่องจากลมที่ไหลออกถ้าหากไม่ได้ผ่านส่วนอากาศแพร่ออกนี้แล้วจะทำให้ลมที่ไหลออกมีความเร็วที่สูง ก่อให้เกิดเสียงดัง และส่วนที่อากาศแพร่ออกนี้ยังเป็นตัวช่วยในการลดการใช้พลังงานในชุดของส่วนกำลังอีกด้วย โดยทั่วไปจะนิยมทำให้ปากทางอากาศออกเป็นรูวงกลมหรือวงรี พื้นที่หน้าตัดของส่วนอากาศแพร่ออกนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ส่วนที่ต่อกับส่วนปฏิบัติงานจนถึงปากทางอากาศแพร่ออก

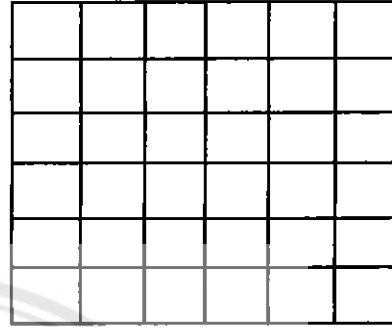


2.5.4 รังผึ้ง (Honey-comb)

ส่วนรังผึ้งนี้จะติดตั้งไว้หน้าส่วนอากาศแพร่เข้าสำหรับอุโมงค์ลมชนิดดูด ส่วนรังผึ้งนี้จะทำหน้าที่ทำให้สภาพลมก่อนเข้าส่วนปฏิบัติงานมีสภาพที่สม่ำเสมอและราบเรียบที่สุด มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม หรือวงกลม แล้วแต่การออกแบบ



(ก)

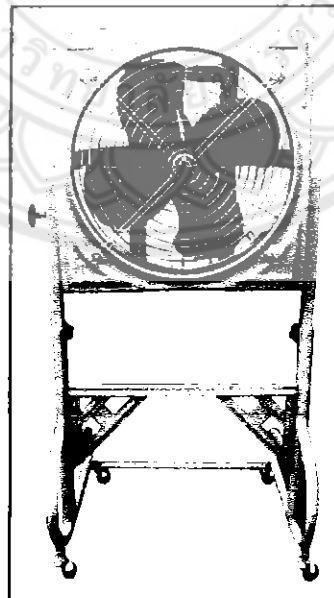


(ข)

รูปที่ 2.15 ลักษณะของรังผึ้ง (Honeycomb) (ก) วงกลม (ข) สี่เหลี่ยม

2.5.5 ส่วนกำลัง (Power section)

ส่วนกำลังนี้จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้แก่อากาศที่ไหลผ่านอุโมงค์ลม ประกอบด้วย มอเตอร์ ใบพัด และอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ ส่วนกำลังนี้จะอยู่ท้ายสุดสำหรับอุโมงค์ลมชนิดดูด พลังงานที่อากาศไหลจากมอเตอร์จะอยู่ในรูปพลังงานจลน์



รูปที่ 2.16 ส่วนกำลัง

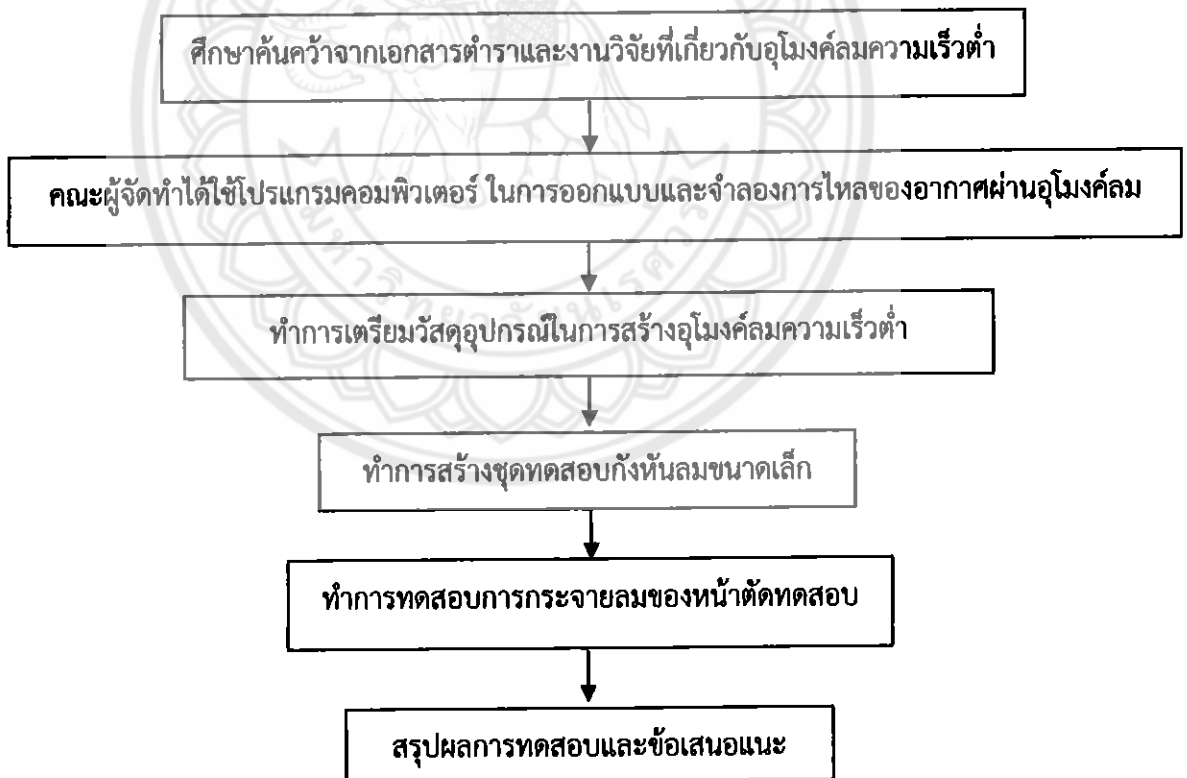
บทที่ 3

การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ

การทำโครงการนี้เป็นการสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำชนิดดูดลมเข้า ที่สามารถทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก ที่มีปริมาตรทดสอบตั้งแต่ $30 \times 30 \times 30$ เซนติเมตร ลงมาโดยที่ทำความเร็วในการทดสอบในช่วง 3-5 เมตรต่อวินาที ดังนั้นเพื่อให้การดำเนินโครงการเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการจึงได้ดำเนินโครงการดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินโครงการมีการสร้างชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็กโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการออกแบบ และจำลองการไหลผ่านของอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่ทดสอบในหน้าตัดต่างๆ และมีการทดสอบความเร็วลมไหลผ่านหน้าตัดต่างๆ ว่ามีความเร็วลมอยู่ในช่วง 3-5 m/s โดยมีขั้นตอนการดำเนินโครงการแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

3.2 เลือกรูปแบบอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำสามารถแบ่งได้แบ่ง 2 แบบใหญ่ๆ คือ

- ประเภทความดันปกติ อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งทำได้โดยใช้พัดลมดูดหรือเป่าอากาศผ่านวัสดุทดสอบ
- ประเภทความดันสูง อุโมงค์ลมประเภทนี้จะใช้อากาศที่มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศทำได้โดยการใช้ถังลมอัดอากาศแล้วเป่าผ่านวัสดุทดสอบ

นอกจากนี้แล้วอุโมงค์ลมทั้งสองประเภทข้างต้นยังสามารถแบ่งได้อีกเป็น 2 แบบ คือ

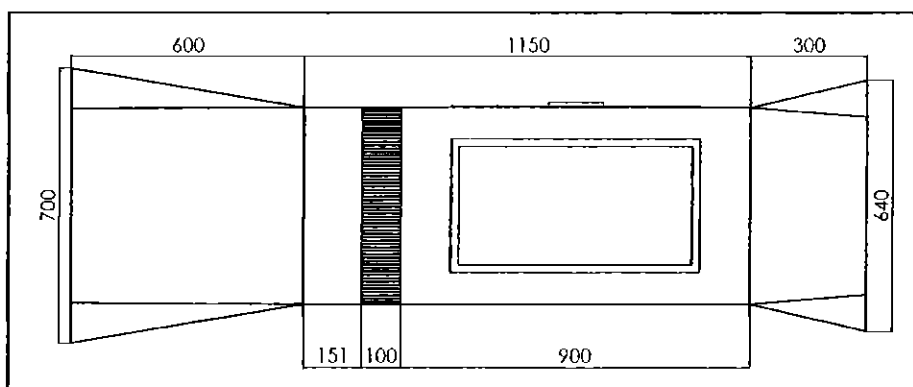
- อุโมงค์ลมแบบเปิด อุโมงค์ลมประเภทนี้จะให้อากาศไหลเข้าที่ปลายข้างหนึ่งผ่านส่วนปฏิบัติงานแล้วไหลออกปลายอีกข้างหนึ่ง
- อุโมงค์ลมแบบปิด อุโมงค์ลมแบบนี้จะให้อากาศไหลหมุนเวียนอยู่ภายในตลอดเวลา

อุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นเป็น ประเภทความดันปกติ แบบเปิด ชนิดดูดลมเข้า มีเลขมัคอยู่ที่ 0.016 จึงเป็นอุโมงค์ลมชนิดอัตราเร็วต่ำ และอากาศที่ไหลผ่านอุโมงค์ลมมี $Re = 1.536 \times 10^5$ ซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ที่ส่วนปฏิบัติงานที่สามารถทำการทดลองชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาตรทดสอบที่ขนาด $30 \times 30 \times 30$ เซนติเมตรหรือเล็กกว่าได้ สามารถทำความเร็วลมที่ผ่านส่วนปฏิบัติงานได้อยู่ในช่วง 3-5 เมตรต่อวินาที โดยการออกแบบนั้นได้ทำการออกแบบในแต่ละชิ้นดังนี้

3.3 การออกแบบอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ



รูปที่ 3.2 อุโมงค์ลมที่ประกอบแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.3 ขนาดของอุโมงค์ลม

3.3.1 ส่วนอากาศแพร่เข้า (Effuser หรือ Contraction)

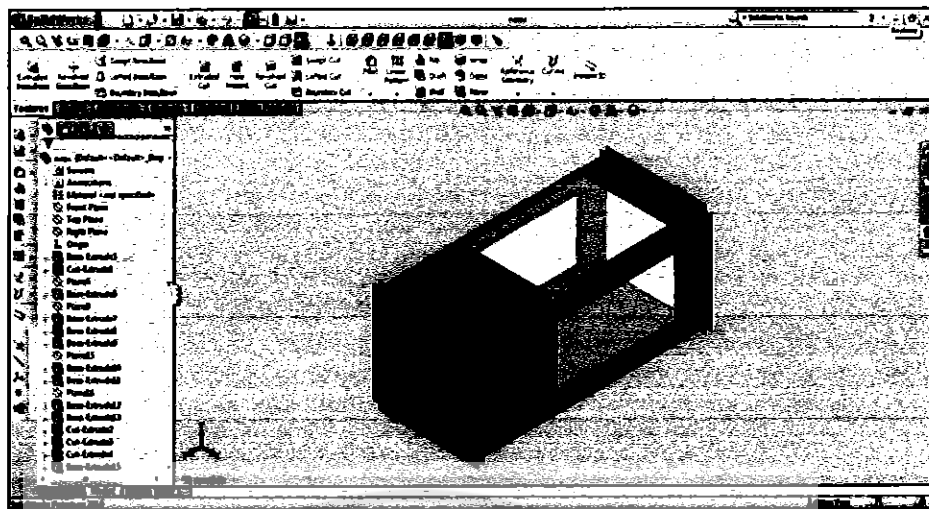
ส่วนอากาศแพร่เข้าจะเป็นส่วนแรกที่อากาศจะไหลเข้าสู่อุโมงค์ลมชนิดดูด ส่วนของอากาศแพร่เข้าจะมีปากทางเข้าที่มีหน้าตัดค่อนข้างใหญ่และจะค่อยๆลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดลงอย่างสม่ำเสมอจะกระทั่งถึงส่วนปฏิบัติงานเพื่อให้กระแสอากาศมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 3.4 ส่วนอากาศแพร่เข้าที่ออกแบบ

3.3.2 ส่วนปฏิบัติงาน (Test Section)

ส่วนปฏิบัติงาน (Test Section) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของอุโมงค์ลมเพราะเป็นส่วนที่ใช้ในการทดสอบวัสดุทดลองหรือแบบจำลอง เพื่อให้กระแสผ่านส่วนปฏิบัติงานมีค่าคงที่จึงต้องทำให้พื้นที่หน้าตัดส่วนนี้มีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด ซึ่งอาจมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม วงรี หรือรูปสี่เหลี่ยมก็ได้ และวัสดุที่ใช้ทำนิยมใช้วัสดุโปร่งใสเพื่อให้สามารถสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุทดสอบหรือแบบจำลองได้



รูปที่ 3.5 ส่วนปฏิบัติงานที่ออกแบบ

3.3.3 ส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

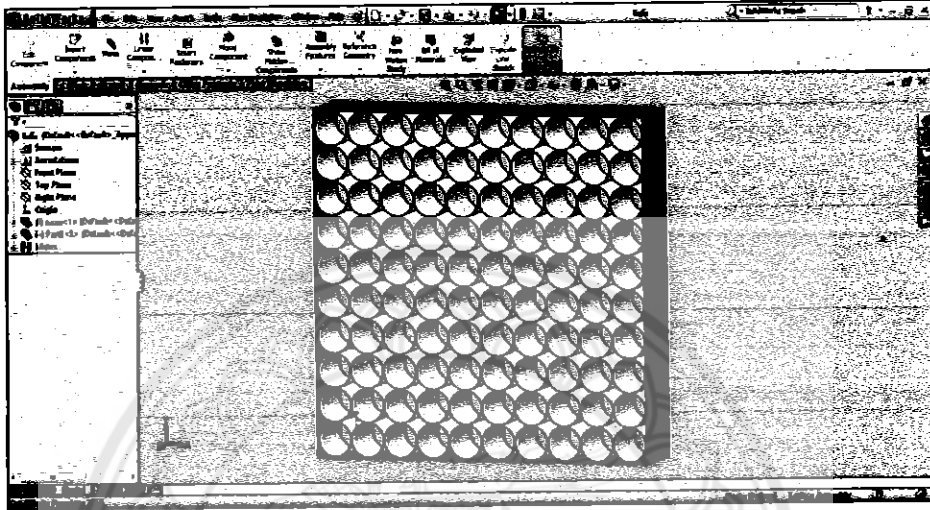
ส่วนอากาศแพร่ออกนี้จะเป็นส่วนสุดท้ายที่อากาศจะไหลออกสำหรับอุโมงค์ลมชนิดดูด พื้นที่หน้าตัดของส่วนอากาศแพร่ออกนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ส่วนที่ต่อกับส่วนปฏิบัติงานจนถึงปากทางอากาศแพร่ออก



รูปที่ 3.6 ส่วนอากาศแพร่ออกที่ออกแบบ

3.3.4 รังผึ้ง (Honey-comb)

ส่วนรังผึ้งนี้จะติดตั้งไว้หน้าส่วนอากาศแพร่เข้าสำหรับอุโมงค์ลมชนิดดูด ส่วนรังผึ้งนี้จะทำหน้าที่ทำให้อากาศที่ไหลเข้าสู่อุโมงค์ลมเป็นลำและเป็นระเบียบ นอกจากนี้ยังลดการกระชอกของกระแสที่ไหลเข้าสู่อุโมงค์ลม อาจมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม หรือวงกลม แล้วแต่การออกแบบ



รูปที่ 3.7 รังผึ้งที่ออกแบบ

3.3.4 ส่วนกำลัง (Power Section)

ส่วนกำลังนี้จะทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้แก่อากาศที่ไหลผ่านอุโมงค์ ประกอบด้วย มอเตอร์ ใบพัด และอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ ส่วนนี้จะเป็นส่วนท้ายสุดของอุโมงค์ลมชนิดดูด พลังงานที่อากาศได้จากมอเตอร์จะอยู่ในรูปของพลังงานจลน์ ดังนั้นจากหลักการคงตัวของพลังงานและสมการความต่อเนื่อง (equation of continuity) จะได้

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3.2)$$

P แทนกำลังมอเตอร์

A แทนพื้นที่หน้าตัด

V แทนอัตราเร็วของกระแสอากาศที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด

ρ แทนความหนาแน่นของอากาศ

ส่วนกำลังที่ใช้ประกอบด้วย

- มอเตอร์ขนาด 1/3 แรงม้า 220 V 3.3 A 1400 RPM
- ใบพัดชนิด ใบดุดกลับ 4 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว
- อุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์

การคำนวณหาคำลังมอเตอร์

$$\text{กำหนดให้ } A = 0.29 \text{ m}^2$$

$$V = 5 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1.1455 \text{ kg/m}^3$$

จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P = \frac{1}{2} (1.1455)(0.29)(5)^3$$

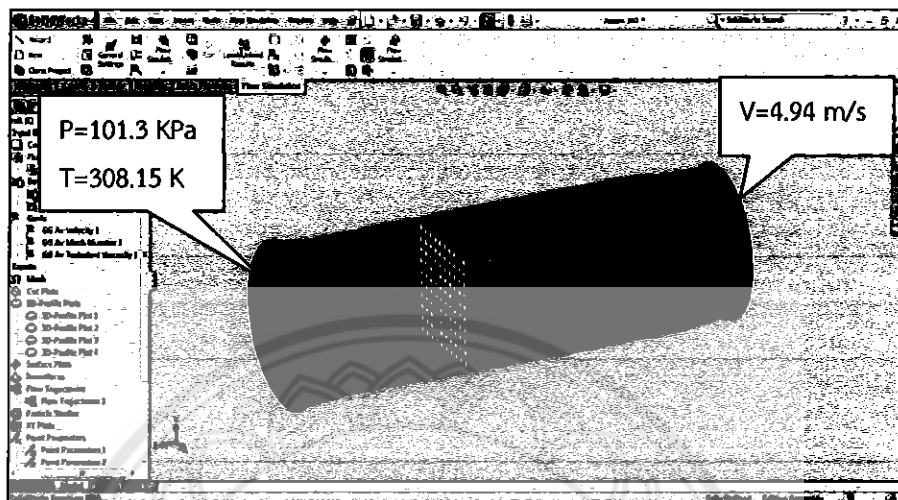
$$P = 20.9 \text{ W}$$



รูปที่ 3.8 ส่วนกำลัง

3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

นำชุดทดสอบที่ประกอบเสร็จ เข้าไปวิเคราะห์ความเร็วลมในโปรแกรม Solid Works Flow Simulation



รูปที่ 3.9 กำหนดสภาวะเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.4.1 กำหนดคุณสมบัติของแบบจำลอง

3.4.1.1 คุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ของแบบจำลองเป็นไปตามในตารางที่ 3.1
ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ในแบบจำลอง

| วัสดุ | Thermal conductivity (W/m ² ·K) | Specific heat (J/kg·K) | Mass density (kg/m ³) |
|------------|---|---------------------------|--------------------------------------|
| Zinc Ac43A | 104.7 | 418.7 | 6,600 |
| Plastics | 0.151 | 2090 | 1,020 |

ที่มา : Dewitt Bergmann Lavine (2007)

3.4.1.2 กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์
ตารางที่ 3.2 กำหนดสภาวะเงื่อนไขขอบเขต

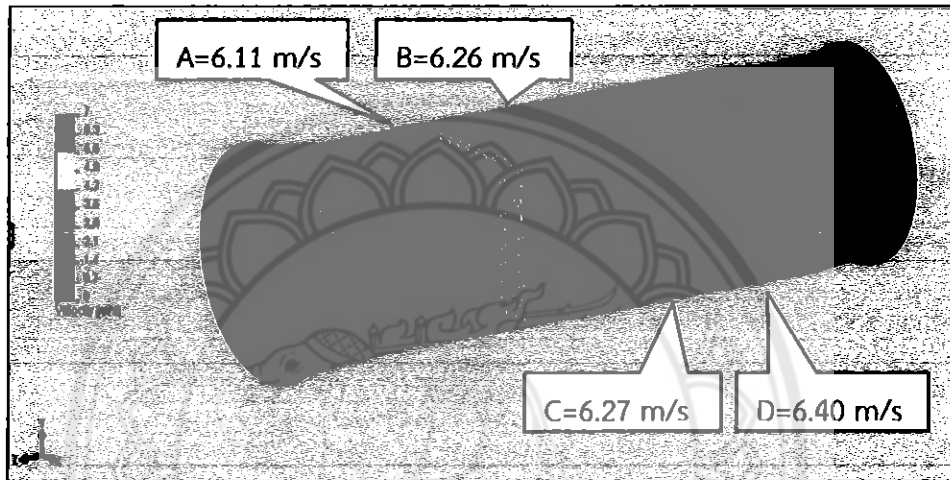
| ด้านส่วนอากาศแพร่เข้า | ด้านส่วนอากาศแพร่ออก |
|---|----------------------|
| Environment Pressure P=101.3 kPa T=308.15 K | V=4.94 m/s |

อุณหภูมิและความดันที่ส่วนอากาศแพร่เข้า วัดได้จากขณะทำการทดลองวัดความเร็วบริเวณหน้าพัดลม

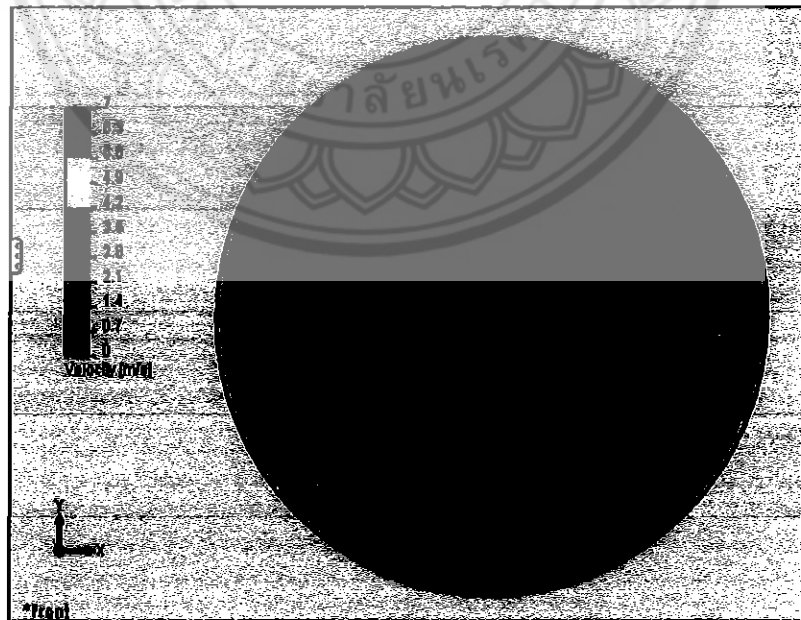
ความเร็วที่ส่วนอากาศแพร่ออก คือความเร็วเฉลี่ยบริเวณหน้าพัดลมที่ 4.94 m/s หรือที่ Dimmer Control ระดับ 5

3.4.2 ผลจากการวิเคราะห์

กำหนดระยะทดสอบตามความยาวของส่วนปฏิบัติงาน โดยให้ด้านหน้าของส่วนปฏิบัติงาน เป็นระยะเริ่มต้น ที่ระยะทดสอบ A ห่างจากระยะเริ่มต้น 0.075 m ที่ระยะทดสอบ B ห่างจากระยะเริ่มต้น 0.4 m ที่ระยะทดสอบ C ห่างจากระยะเริ่มต้น 0.7 m ที่ระยะทดสอบ D ห่างจากระยะเริ่มต้น 1 m



รูปที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์ของความเร็วแต่ละระยะทดสอบ



รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งในการวัด

i602 2856

ms.

94279

2994

ตารางที่ 3.3 ความเร็วที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

| ระนาบทดสอบ | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| A | 6.13 | 6.10 | 6.13 | 6.11 | 6.06 | 6.11 | 6.14 | 6.11 | 6.14 | 6.11 | 6.14 | 6.06 | 0.03 |
| B | 6.34 | 6.18 | 6.31 | 6.30 | 6.09 | 6.27 | 6.34 | 6.18 | 6.34 | 6.26 | 6.34 | 6.09 | 0.07 |
| C | 6.35 | 6.23 | 6.32 | 6.26 | 6.11 | 6.23 | 6.36 | 6.23 | 6.35 | 6.27 | 6.36 | 6.14 | 0.08 |
| D | 6.38 | 6.25 | 6.35 | 6.28 | 6.11 | 6.26 | 6.39 | 6.26 | 6.38 | 6.40 | 6.39 | 6.11 | 0.09 |

จากการวิเคราะห์พบว่ารูปแบบอุโมงค์ลมที่ทำการออกแบบ สามารถทำความเร็วที่ระนาบทดสอบ A ได้ความเร็วเฉลี่ย 6.11 m/s ระนาบทดสอบ B ได้ความเร็วเฉลี่ย 6.26 m/s ระนาบทดสอบ C ได้ความเร็วเฉลี่ย 6.27 m/s ระนาบทดสอบ D ได้ความเร็วเฉลี่ย 6.40 m/s ซึ่งความเร็วแต่ละระนาบได้ตามที่ต้องการ เมื่อกำหนดความเร็วหน้าพัดลม (ส่วนอากาศแพร่ออก) ที่ 4.94 m/s หรือที่ Dimmer Control เบอร์ 5

3.5 วัสดุที่ใช้ในการสร้าง

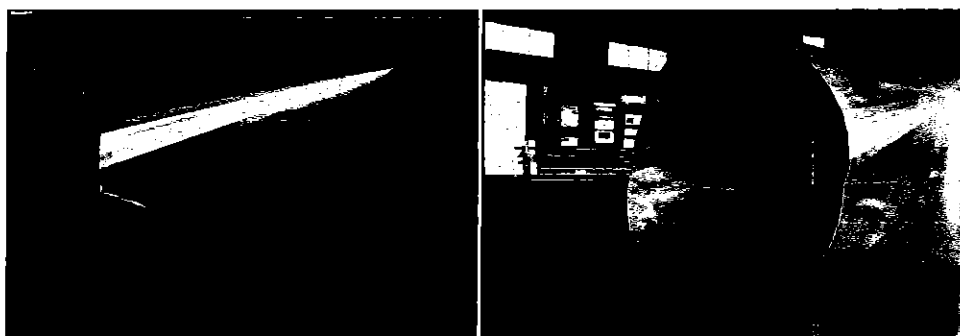
ตารางที่ 3.4 วัสดุที่ใช้ในการสร้าง

| รายการ | จำนวน | ราคา (บาท) |
|---------------------------------------|-------------|------------|
| 1.พัดลมอุตสาหกรรม ใบพัด 24 นิ้ว | 1 ตัว | 4,500 |
| 2.สังกะสีแผ่นเรียบ หนา 0.55 มิลลิเมตร | 2 แผ่น | 1,200 |
| 3.แผ่นอะคริลิกใส หนา 3 มิลลิเมตร | 3 แผ่น | 650 |
| 4.หลอดฮาโลเจน | 4 แพนช์ใหญ่ | 400 |

3.6 การสร้างและประกอบอุโมงค์ลม

3.6.1 ส่วนอากาศแพร่เข้า (Effuser หรือ Contraction)

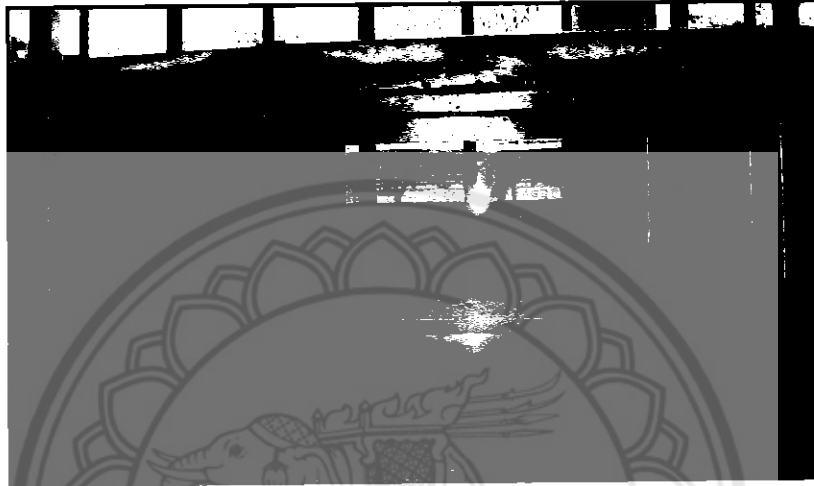
ส่วนอากาศแพร่เข้าที่สร้างขึ้นทำด้วยสังกะสีแผ่นเรียบ เบอร์ 24 หนา 0.55 มิลลิเมตร ด้านหน้าเป็นรูปวงกลม มีพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.70 เมตร ส่วนด้านหลังเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหน้าตัดขนาด 0.50 x 0.50 ตารางเมตร ส่วนอากาศแรกเข้ามีความยาว 0.60 เมตร



รูปที่ 3.12 รูปส่วนอากาศแพร่เข้าที่สร้างขึ้น

3.6.2 ส่วนปฏิบัติงาน (Test Section)

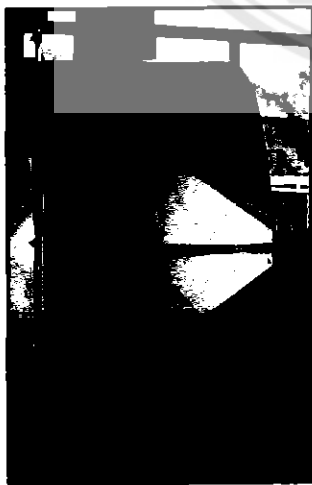
ส่วนปฏิบัติงานที่สร้างขึ้น ทำด้วยแผ่นสังกะสีเรียบเบอร์ 24 ทหนา 0.55 มิลลิเมตร พับเป็นรูปสี่เหลี่ยม ขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.50×0.50 ตารางเมตร ยาว 1.15 เมตร ด้านบนทำเป็นฝาปิดรูปสี่เหลี่ยม เพื่อเป็นช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ ด้านข้างทั้งสองข้างตัดเป็นช่องโปร่งใส เพื่อให้สามารถสังเกตชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.13 ส่วนปฏิบัติงานที่สร้างขึ้น

3.6.3 ส่วนอากาศแพร่ออก (Diffuser)

ส่วนอากาศที่แพร่ออกที่สร้างขึ้นทำด้วยแผ่นสังกะสีเรียบเบอร์ 24 ทหนา 0.55 มิลลิเมตร ด้านหน้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดพื้นที่ 0.55×0.55 ตารางเมตร ส่วนด้านหลังเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 เมตร ส่วนของอากาศแพร่ออกนี้มีความยาว 0.30 เมตร



(ก)

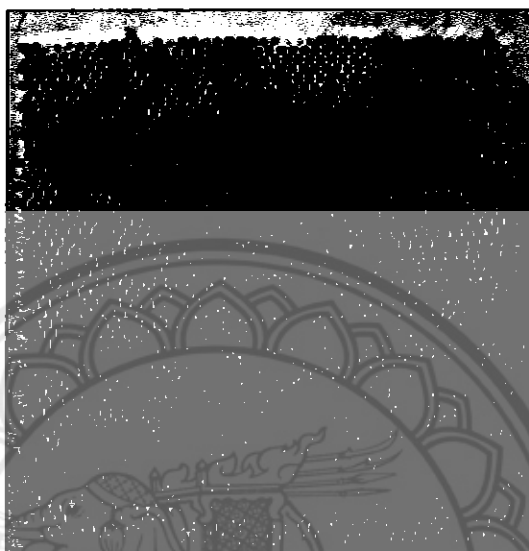


(ข)

รูปที่ 3.14 ส่วนอากาศแพร่ออกที่สร้างเสร็จ (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านหลัง

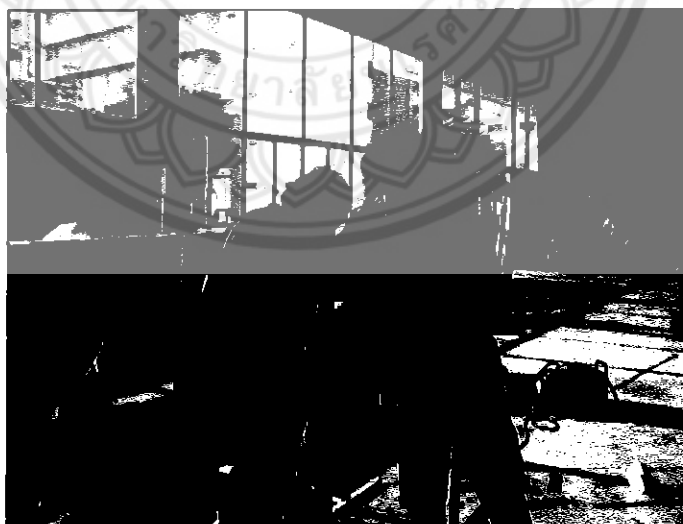
3.6.4 รังผึ้ง (Honey-comb)

รังผึ้งที่สร้างขึ้นทำด้วยหลอดชาไข่มุกมีขนาดความยาว 10 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร และนำมาติดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสให้มีขนาด 0.50 x 0.50 ตารางเมตร และนำไปติดไว้ด้านหน้าของส่วนปฏิบัติงาน



รูปที่ 3.15 รังผึ้งที่สร้างเสร็จ

3.6.5 ประกอบแต่ละส่วนของอุโมงค์ลมเข้าด้วยกัน



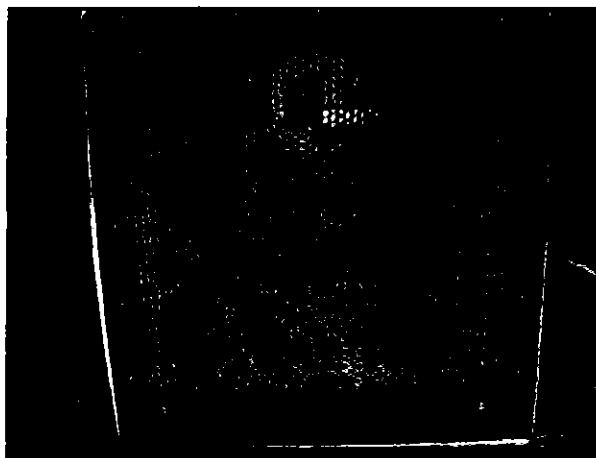
รูปที่ 3.16 นำส่วนปฏิบัติงานวางลงบนฐานรับอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.17 ประกอบส่วนปฏิบัติงานเข้ากับส่วนอากาศแพร่ออก



รูปที่ 3.18 นำรังผึ้งเข้าใส่ด้านหน้าของส่วนอากาศแพร่เข้า



รูปที่ 3.19 รังผึ้งที่ติดไว้ด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน

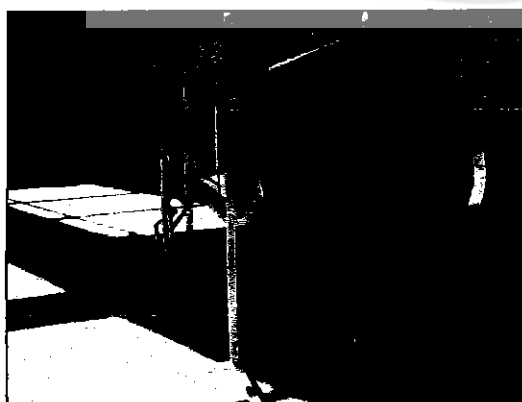


รูปที่ 3.20 ประกอบส่วนอากาศแพร่เข้ากับส่วนปฏิบัติงานเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.21 อุโมงค์ลมที่ประกอบแต่ละส่วนเข้าด้วยกัน

3.7 รูปแบบของอุโมงค์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

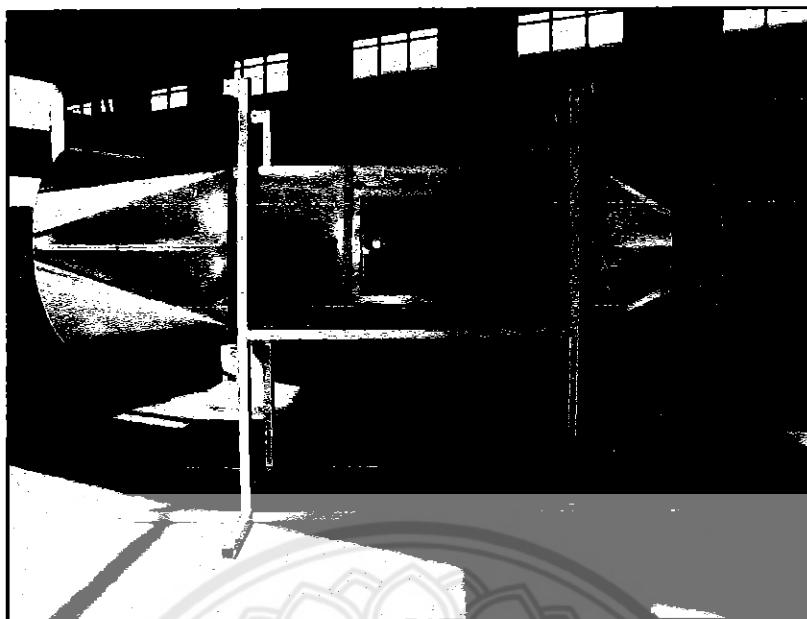


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.22 อุโมงค์ลมที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ก) ด้านหน้า และ (ข) ด้านหลัง



รูปที่ 3.23 อุโมงค์ลมที่เสร็จสมบูรณ์

อุโมงค์ลมที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ มีขนาดความยาวของตัวอุโมงค์ลม 2.05 เมตร สร้างจากสังกะสีแผ่นเรียบ จำนวน 2 แผ่น ส่วนปฏิบัติงานด้านข้างจะเป็นช่องโปร่งใสเพื่อดูชิ้นงานทดสอบ ส่วนกำลังใช้พัดลมใบแดง ชนิดใบดุดกลับ ขนาด 24 นิ้ว มอเตอร์ขนาด 1/3 แรงม้า 220 V 3.3 A 1400 RPM ราคาวัสดุที่ใช้สร้างรวมทั้งหมด 6,750 บาท

บทที่ 4

การทดสอบอุโมงค์ลม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบพื้นฐานของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่สร้างขึ้น มีการทดสอบอยู่ 2 การทดสอบด้วยกันคือ 1. การทดสอบเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมดูดอากาศ 2. การทดสอบอุโมงค์ลมเพื่อวัดค่าผลต่างของความดันในส่วนปฏิบัติงาน

4.1 การทดลองเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมดูดอากาศ

4.1.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ

4.1.1.1 เพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมที่ระยะห่าง 0.05 m จากหน้าพัดลม

4.1.1.2 เพื่อหาความเร็วลมในช่วง 3-5 m/s เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

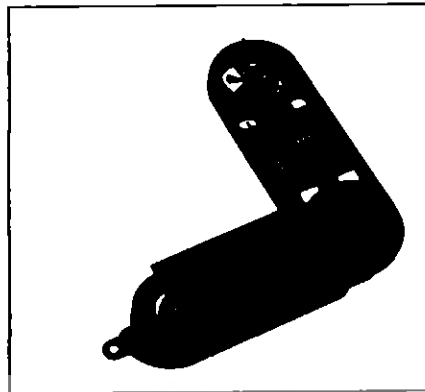
4.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.2.1 พัดลมอุตสาหกรรม ชนิดใบดูดกลับขนาด 24 นิ้ว มอเตอร์ขนาด 1/3 แรงม้า



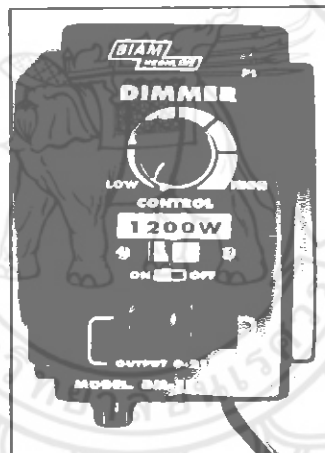
รูปที่ 4.1 พัดลมอุตสาหกรรม ขนาด 24 นิ้ว

4.1.2.2 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ DIGICON รุ่น DA-40



รูปที่ 4.2 เครื่องวัดความเร็วลม

4.1.2.3 เครื่องปรับกระแสไฟ DIMMER



รูปที่ 4.3 Dimmer control

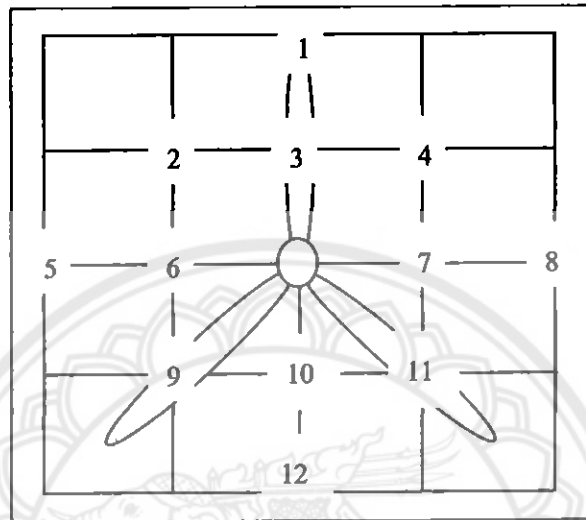
4.1.2.4 ฉากกำหนดตำแหน่งในการวัด



รูปที่ 4.4 ฉากกำหนดตำแหน่ง

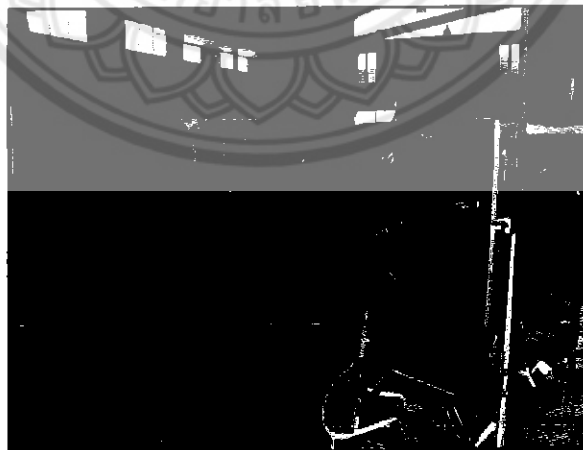
4.1.3 ขั้นตอนการทดสอบ

4.1.3.1 กำหนดตำแหน่งในการวัดความเร็วลมบริเวณหน้าพัดลม ซึ่งได้กำหนดตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอยู่ 12 จุด แต่ละจุดห่างกัน 15 เซนติเมตร เพื่อควบคุมแนวการวัดในแต่ละครั้งให้คงที่



รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัด

4.1.3.2 ทำการวัดหาความเร็วลมในช่วง 3-5 m/s ได้กำหนดให้ฉากวัดห่างจากหน้าพัดลม 0.05 m โดยใช้ Dimmer control ที่ระดับ 1 ถึง 6 ในการปรับความเร็วรอบของพัดลม ดูดอากาศ

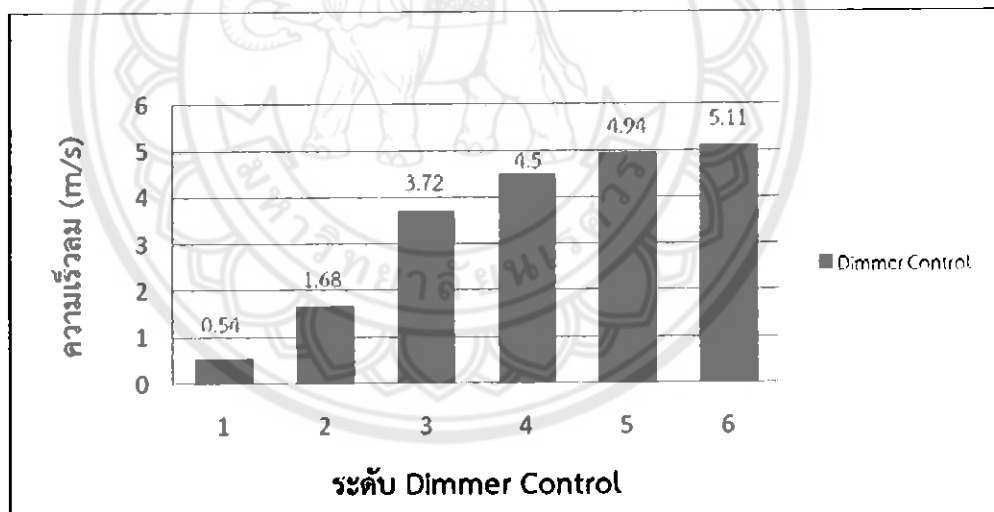


รูปที่ 4.6 การวัดความเร็วลม

4.1.4 ผลการทดสอบการปรับความเร็วรอบของพัดลมโดยใช้ Dimmer control

ตารางที่ 4.1 สรุปผลความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้จากการวัดตำแหน่งต่างๆบริเวณหน้าพัดลมดูดอากาศ

| Dimmer control | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | | เฉลี่ย |
|----------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 1 | 0.53 | 0.63 | 0.63 | 0.56 | 0.36 | 0.53 | 0.66 | 0.33 | 0.7 | 0.73 | 0.53 | 0.36 | 0.54 |
| 2 | 1.6 | 1.9 | 1.7 | 1.9 | 1.7 | 1.9 | 1.8 | 1.3 | 1.9 | 1.9 | 1.8 | 0.8 | 1.68 |
| 3 | 3.3 | 3.83 | 3.77 | 4.0 | 3.53 | 4.13 | 4.13 | 3.20 | 3.93 | 3.77 | 3.83 | 3.23 | 3.72 |
| 4 | 4 | 4.5 | 4.2 | 4.47 | 3.93 | 4.73 | 4.67 | 4.23 | 4.93 | 5 | 4.87 | 4.47 | 4.5 |
| 5 | 4.4 | 5.07 | 4.73 | 4.6 | 4.6 | 5.2 | 5.33 | 4.8 | 5.4 | 5.27 | 5.33 | 4.63 | 4.94 |
| 6 | 4.53 | 5.07 | 5 | 5.17 | 4.9 | 5.3 | 5.27 | 5.1 | 5.46 | 5.4 | 5.47 | 4.70 | 5.11 |



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและระดับ Dimmer Control

4.1.5 สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่อยู่ในช่วง 3-5 m/s จากการวัดพัดลมใบพัดแดง ชนิดใบดูดกลับ ขนาด 24 นิ้ว มอเตอร์ขนาด 1/3 แรงม้า 220 V 3.3 A 1400 RPM โดยใช้ Dimmer Control ปรับความเร็วรอบหมุนของพัดลม 6 ระดับ และทำการวัดที่หน้าพัดลม 12 จุด พบว่าความเร็วลมที่ต้องการในช่วง 3-5 m/s จะต้องปรับ Dimmer Control ที่ระดับ 3-6 และจะใช้ Dimmer Control ที่ระดับ 5 ไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.2 การทดสอบเพื่อหาผลต่างของความดันเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดทดสอบในระยะต่างๆ

4.2.1 วัตถุประสงค์การทดสอบ

4.2.1.1 เพื่อหาผลต่างของความดันในตำแหน่งต่างๆ ภายในส่วนปฏิบัติงาน

4.2.1.2 นำผลต่างของความดันไปคำนวณหาความเร็วลม

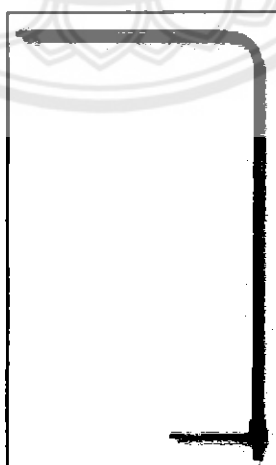
4.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.2.2.1 พัดลมอุตสาหกรรม ชนิดใบดุดกลับ ขนาด 24 นิ้ว มอเตอร์ขนาด 1/3 แรงม้า



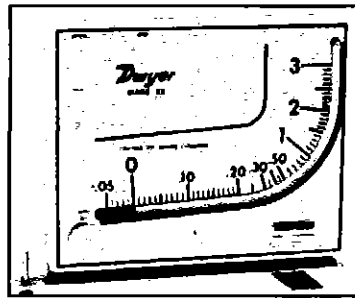
รูปที่ 4.8 พัดลมอุตสาหกรรม ขนาด 24 นิ้ว

4.2.2.2 หัววัดแบบ Pitot tube



รูปที่ 4.9 หัววัด Pitot tube

4.2.2.3 เครื่องวัดमानอมิเตอร์ (manometer)



รูปที่ 4.10 เครื่องวัดमानอมิเตอร์

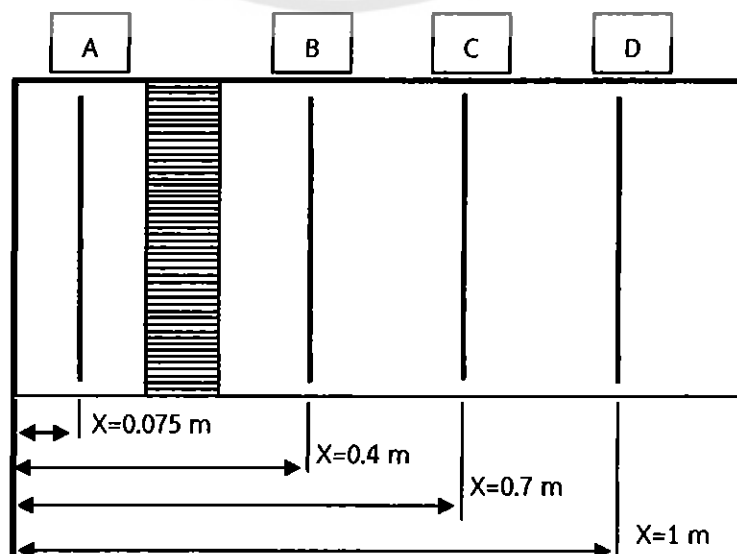
4.2.2.4 เครื่องปรับกระแสไฟ DIMMER



รูปที่ 4.11 Dimmer control

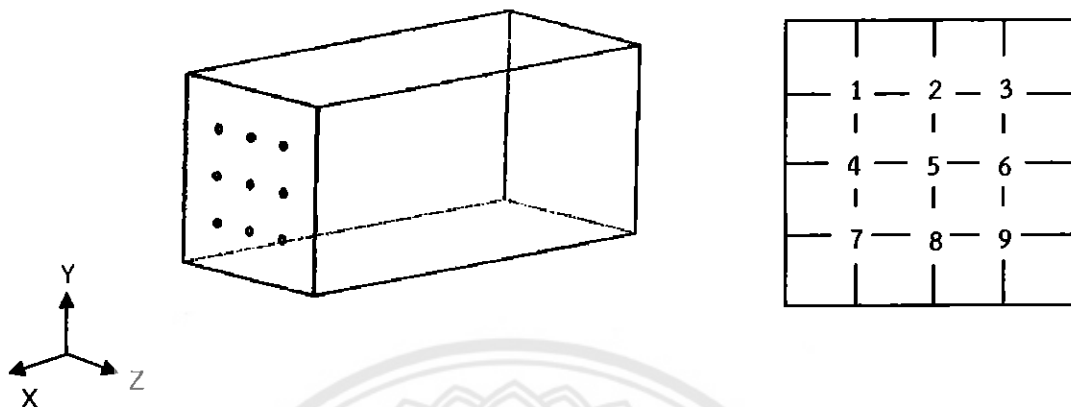
4.2.3 ขั้นตอนการทดสอบ

4.2.3.1 ตั้งชื่อระนาบทดสอบ และกำหนดระยะทดสอบต่างๆ ตามความยาวของระยะความยาวส่วนปฏิบัติงาน โดยระยะเริ่มต้นเริ่มจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน



รูปที่ 4.12 การกำหนดระยะของระนาบหน้าตัดที่จะทำการวัดการไหลของลม

4.2.3.2 ที่ระนาบทดสอบ A กำหนดจุดที่จะวัดทั่วทั้งระนาบ 9 จุด แต่ละจุดห่างกัน 0.125 m ในการวัดจะใช้ Dimmer Control ปรับความเร็วรอบของพัดลม 6 ระดับ



รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งในการวัดของระนาบทดสอบ

4.2.3.3 ทำเหมือนขั้นตอนในข้อ 2 แต่เปลี่ยนระยะทดสอบ $X=0.4$ m $X=0.7$ m และ $X=1$ m ตามลำดับ

4.2.3.4 ติดตั้งหัววัด Pitot tube และมานอมิเตอร์ เพื่อวัดผลต่างของความดัน



รูปที่ 4.14 การติดตั้งหัววัด Pitot tube ในส่วนปฏิบัติงาน



รูปที่ 4.15 หัววัดPitot tube ที่ติดตั้งเสร็จ



รูปที่ 4.16 ค่าผลต่างของความดันที่ได้จากมานอมิเตอร์

4.2.3.5 บันทึกค่าผลต่างของความดัน

4.2.4 ผลการทดสอบผลต่างของความดัน

ตารางที่ 4.2 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ A ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.075 m

| Dimmer Control | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.005 | 0.010 | 0.008 | 0.010 | 0.008 | 0.010 |
| 2 | 0.017 | 0.018 | 0.013 | 0.015 | 0.018 | 0.013 | 0.012 | 0.020 | 0.017 |
| 3 | 0.050 | 0.047 | 0.038 | 0.050 | 0.050 | 0.040 | 0.050 | 0.050 | 0.042 |
| 4 | 0.070 | 0.075 | 0.053 | 0.070 | 0.077 | 0.060 | 0.067 | 0.080 | 0.062 |
| 5 | 0.073 | 0.082 | 0.062 | 0.075 | 0.085 | 0.063 | 0.070 | 0.085 | 0.060 |
| 6 | 0.075 | 0.080 | 0.073 | 0.073 | 0.083 | 0.073 | 0.070 | 0.080 | 0.070 |

ตารางที่ 4.3 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ B ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.4 m

| Dimmer Control | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0.010 | 0.010 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 2 | 0.020 | 0.015 | 0.015 | 0.018 | 0.017 | 0.010 | 0.020 | 0.020 | 0.012 |
| 3 | 0.045 | 0.040 | 0.048 | 0.045 | 0.045 | 0.042 | 0.047 | 0.042 | 0.040 |
| 4 | 0.065 | 0.065 | 0.068 | 0.065 | 0.065 | 0.065 | 0.067 | 0.065 | 0.065 |
| 5 | 0.072 | 0.070 | 0.073 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 6 | 0.072 | 0.070 | 0.080 | 0.072 | 0.070 | 0.080 | 0.072 | 0.070 | 0.080 |

ตารางที่ 4.4 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ C ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.7 m

| Dimmer Control | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0.010 | 0.008 | 0.008 | 0.010 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.010 | 0.010 |
| 2 | 0.008 | 0.010 | 0.010 | 0.008 | 0.010 | 0.010 | 0.013 | 0.015 | 0.015 |
| 3 | 0.013 | 0.015 | 0.015 | 0.043 | 0.048 | 0.045 | 0.045 | 0.048 | 0.046 |
| 4 | 0.062 | 0.070 | 0.067 | 0.065 | 0.068 | 0.070 | 0.065 | 0.068 | 0.070 |
| 5 | 0.067 | 0.073 | 0.072 | 0.070 | 0.072 | 0.070 | 0.067 | 0.073 | 0.070 |
| 6 | 0.073 | 0.072 | 0.070 | 0.070 | 0.072 | 0.073 | 0.068 | 0.072 | 0.073 |

ตารางที่ 4.5 ผลต่างของความดันที่ระนาบทดสอบ D ห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 1 m

| Dimmer Control | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | |
|----------------|--|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 0.008 | 0.010 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.010 | 0.008 | 0.010 | 0.010 |
| 2 | 0.017 | 0.020 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.015 |
| 3 | 0.048 | 0.048 | 0.043 | 0.048 | 0.048 | 0.045 | 0.045 | 0.050 | 0.047 |
| 4 | 0.068 | 0.0730 | 0.063 | 0.068 | 0.075 | 0.068 | 0.065 | 0.077 | 0.070 |
| 5 | 0.073 | 0.080 | 0.067 | 0.072 | 0.077 | 0.072 | 0.070 | 0.083 | 0.068 |
| 6 | 0.075 | 0.077 | 0.075 | 0.072 | 0.078 | 0.075 | 0.070 | 0.078 | 0.073 |

4.2.5 สรุปผลการทดสอบ

จากตาราง สรุปผลการทดสอบหาผลต่างของความดันในส่วนปฏิบัติงาน โดยทำการทดสอบที่ระยะ 0.075 , 0.4 , 0.7 และ 1 m แต่ละระยะจะกำหนดจุดวัดผลต่างความดัน 9 จุด ใช้Dimmer Control ปรับความเร็วรอบของพัดลม พบว่าภายในส่วนปฏิบัติงานจะมีผลต่างความดันเพิ่มขึ้นตามระดับของDimmer Control ที่มากขึ้น ผลต่างของความดันที่ระยะต่างๆทุกระดับDimmer Control มีค่าใกล้เคียงกัน และในพื้นที่หน้าตัดทดสอบทั้ง 9 จุดของแต่ละระดับDimmer Control จะมีค่าใกล้เคียงกัน และผลต่างของความดันจะอยู่ในช่วง 0.005–0.085 (in-H₂O) ซึ่งจะนำค่าผลต่างของความดันนี้ไปคำนวณหาความเร็วลม และเปรียบเทียบกับความเร็วลมของแบบจำลองต่อไป

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในเนื้อหาบทนี้จะกล่าวถึงความเร็วลมที่ได้จากการทดลอง และเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะทำการวิเคราะห์ที่ Dimmer Control ที่ระดับ 5 ซึ่งมีความเร็วที่หน้าพัดลม 4.94 m/s ซึ่งเป็นความเร็วใกล้เคียง 5 m/s มากที่สุด

5.1 ความเร็วที่ได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ A

| Dimmer Control | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|-------------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| 1 | 1.47 | 2.08 | 2.08 | 1.47 | 2.08 | 1.86 | 2.08 | 1.86 | 2.08 | 1.90 | 2.08 | 1.47 | 0.26 |
| 2 | 2.71 | 2.79 | 2.37 | 2.55 | 2.79 | 2.37 | 2.28 | 2.94 | 2.71 | 2.61 | 2.94 | 2.28 | 0.23 |
| 3 | 4.66 | 4.51 | 4.06 | 4.66 | 4.66 | 4.16 | 4.66 | 4.66 | 4.27 | 4.48 | 4.66 | 4.06 | 0.25 |
| 4 | 5.51 | 5.70 | 4.79 | 5.51 | 5.78 | 5.10 | 5.39 | 5.89 | 5.18 | 5.43 | 5.89 | 4.79 | 0.35 |
| 5 | 5.63 | 5.96 | 5.18 | 5.70 | 6.07 | 5.23 | 5.51 | 6.07 | 5.10 | 5.61 | 6.07 | 5.10 | 0.38 |
| 6 | 5.70 | 5.89 | 5.63 | 5.63 | 6.00 | 5.63 | 5.51 | 5.89 | 5.51 | 5.71 | 6.00 | 5.51 | 0.18 |

ตารางที่ 5.2 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ B

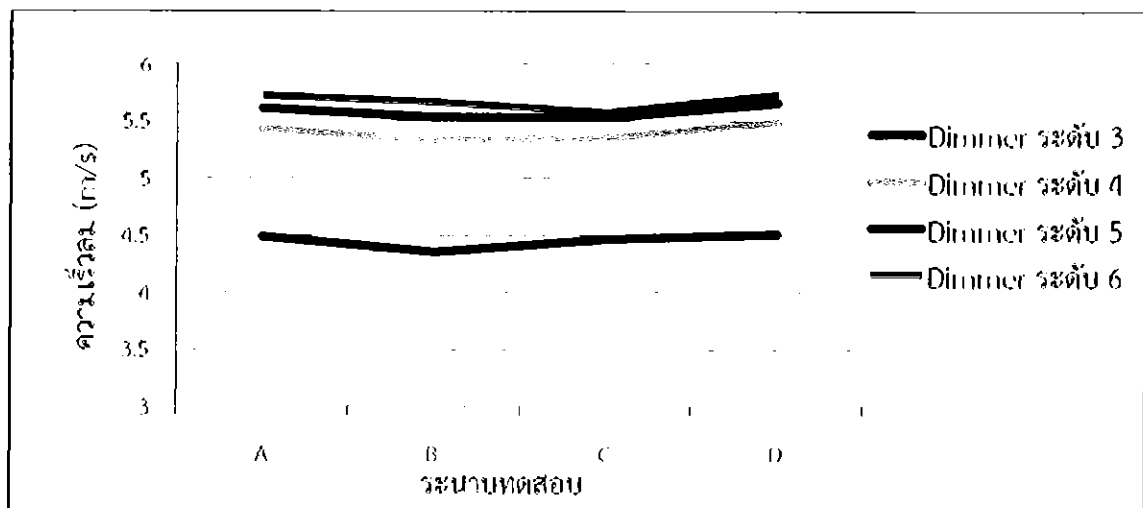
| Dimmer Control | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|-------------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| 1 | 2.08 | 2.08 | 1.86 | 1.86 | 1.86 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.01 | 2.08 | 1.86 | 0.11 |
| 2 | 2.94 | 2.55 | 2.55 | 2.79 | 2.71 | 2.08 | 2.94 | 2.94 | 2.28 | 2.64 | 2.94 | 2.08 | 0.31 |
| 3 | 4.42 | 4.16 | 4.56 | 4.42 | 4.42 | 4.27 | 4.51 | 4.27 | 4.16 | 4.35 | 4.56 | 4.16 | 0.15 |
| 4 | 5.31 | 5.31 | 5.43 | 5.31 | 5.31 | 5.31 | 5.39 | 5.31 | 5.31 | 5.33 | 5.43 | 5.31 | 0.05 |
| 5 | 5.59 | 5.51 | 5.63 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.53 | 5.63 | 5.51 | 0.05 |
| 6 | 5.59 | 5.51 | 5.89 | 5.51 | 5.59 | 5.81 | 5.70 | 5.81 | 5.51 | 5.66 | 5.89 | 5.51 | 0.15 |

ตารางที่ 5.3 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ C

| Dimmer Control | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|-------------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| 1 | 2.08 | 1.86 | 1.86 | 2.08 | 1.86 | 1.86 | 1.86 | 2.08 | 2.08 | 1.96 | 2.08 | 1.86 | 0.12 |
| 2 | 2.37 | 2.33 | 2.28 | 2.28 | 2.55 | 2.55 | 2.37 | 2.55 | 2.55 | 2.43 | 2.55 | 2.28 | 0.12 |
| 3 | 4.42 | 4.56 | 4.42 | 4.33 | 4.56 | 4.42 | 4.42 | 4.56 | 4.47 | 4.46 | 4.56 | 4.33 | 0.08 |
| 4 | 5.18 | 5.51 | 5.39 | 5.31 | 5.43 | 5.51 | 5.23 | 5.31 | 5.31 | 5.35 | 5.51 | 5.18 | 0.11 |
| 5 | 5.39 | 5.63 | 5.59 | 5.51 | 5.59 | 5.51 | 5.39 | 5.63 | 5.51 | 5.53 | 5.63 | 5.39 | 0.09 |
| 6 | 5.63 | 5.59 | 5.51 | 5.51 | 5.59 | 5.63 | 5.43 | 5.59 | 5.63 | 5.57 | 5.63 | 5.43 | 0.07 |

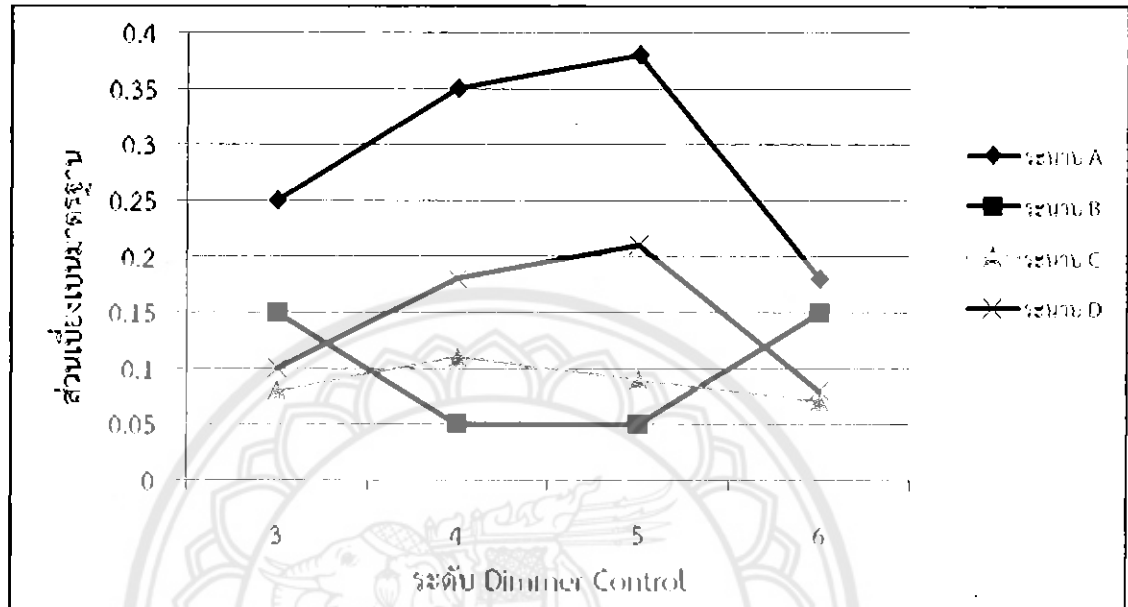
ตารางที่ 5.4 ผลความเร็วลมจากระนาบทดสอบ D

| Dimmer Control | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|-------------|-------------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| 1 | 1.86 | 2.08 | 1.86 | 1.86 | 1.86 | 2.08 | 1.86 | 2.08 | 2.08 | 1.96 | 2.08 | 1.86 | 0.11 |
| 2 | 2.71 | 2.94 | 2.55 | 2.55 | 2.79 | 2.71 | 2.37 | 2.79 | 2.71 | 2.68 | 2.94 | 2.37 | 0.17 |
| 3 | 4.56 | 4.56 | 4.32 | 4.56 | 4.56 | 4.42 | 4.42 | 4.66 | 4.51 | 4.51 | 4.66 | 4.32 | 0.10 |
| 4 | 5.43 | 5.63 | 5.23 | 5.43 | 5.70 | 5.43 | 5.31 | 5.78 | 5.51 | 5.49 | 5.78 | 5.23 | 0.18 |
| 5 | 5.63 | 5.89 | 5.39 | 5.59 | 5.78 | 5.59 | 5.51 | 6.00 | 5.43 | 5.65 | 6.00 | 5.39 | 0.21 |
| 6 | 5.70 | 5.78 | 5.70 | 5.59 | 5.81 | 5.70 | 5.81 | 5.81 | 5.63 | 5.73 | 5.81 | 5.59 | 0.08 |



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแต่ละระนาบทดสอบ

จากรูปที่ 5.1 พบว่าที่ระดับ Dimmer Control เดียวกันจะได้ค่าความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ที่ Dimmer Control ระดับ 3 ได้ความเร็วอยู่ในช่วง 3-5 m/s และที่ Dimmer Control ระดับ 4 ขึ้นไป ได้ความเร็วเกิน 5 m/s



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากรูปที่ 5.2 พบว่าที่ระนาบทดสอบ A มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.18-0.38 ระนาบนี้มีค่าการกระจายตัวของค่าความเร็วลมมาก เพราะเป็นระนาบที่อยู่หน้ารังผึ้ง ที่ระนาบทดสอบ B มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.05-0.15 ที่ระนาบทดสอบ C มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.07-0.12 จะเห็นว่าระนาบนี้จะมีการกระจายตัวของความเร็วลมค่อนข้างน้อย ซึ่งทำให้ทราบว่ามีความสม่ำเสมอของการไหลที่มาก ที่ระนาบทดสอบ D มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในช่วง 0.08-0.21 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ที่แต่ละระนาบทดสอบมีความเร็วถึงช่วงที่ต้องการคือ 3-5 m/s ในการทดสอบ กังหันลมควรจะใช้ Dimmer Control ระดับที่ 3 ขึ้นไป เพื่อให้ได้ความเร็วลมอยู่ในช่วงที่ต้องการ และควรจะใช้ระนาบทดสอบ C เป็นระยะติดตั้งชิ้นงานทดสอบ เพราะเป็นระยะที่ค่าการกระจายตัวของค่าความเร็วลมน้อยที่สุด จึงมีความสม่ำเสมอของการไหลมากที่สุด

5.2 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้ Dimmer Control ระดับ 5 ซึ่งมีความเร็วหน้าพัดลม 4.94 m/s ซึ่งเป็นความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วที่ต้องการในการทดลอง เป็นตัวเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 5.5 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองที่ระนาบทดสอบ A

| สิ่งเปรียบเทียบ | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|-----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| ผลการทดลอง | 5.63 | 5.96 | 5.18 | 5.70 | 6.07 | 5.23 | 5.51 | 6.07 | 5.10 | 5.61 | 6.07 | 5.10 | 0.38 |
| แบบจำลอง | 6.13 | 6.1 | 6.13 | 6.10 | 6.06 | 6.11 | 6.12 | 6.10 | 6.14 | 6.11 | 6.14 | 6.06 | 0.02 |

จากตารางที่ 5.5 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = 8.18%

ตารางที่ 5.6 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองที่ระนาบทดสอบ B

| สิ่งเปรียบเทียบ | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|-----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| ผลการทดลอง | 5.59 | 5.51 | 5.63 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.51 | 5.53 | 5.63 | 5.51 | 0.05 |
| แบบจำลอง | 6.34 | 6.18 | 6.31 | 6.30 | 6.09 | 6.27 | 6.34 | 6.18 | 6.34 | 6.25 | 6.34 | 6.09 | 0.09 |

จากตารางที่ 5.6 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = 11.52%

ตารางที่ 5.7 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลองที่ระนาบทดสอบ C

| สิ่งเปรียบเทียบ | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|-----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| ผลการทดลอง | 5.39 | 5.63 | 5.59 | 5.51 | 5.59 | 5.51 | 5.39 | 5.63 | 5.51 | 5.53 | 5.63 | 5.39 | 0.09 |
| แบบจำลอง | 6.35 | 6.23 | 6.32 | 6.26 | 6.11 | 6.23 | 6.36 | 6.23 | 6.35 | 6.27 | 6.36 | 6.11 | 0.08 |

จากตารางที่ 5.7 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = 11.80%

ตารางที่ 5.8 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง
ที่ระนาบทดสอบ D = 1 m

| สิ่ง เปรียบเทียบ | ความเร็วที่ตำแหน่ง (m/s) | | | | | | | | | \bar{V} (m/s) | V max (m/s) | V min (m/s) | ค่า SD |
|---------------------|--------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | | | | |
| ผลการ ทดลอง | 5.63 | 5.89 | 5.39 | 5.59 | 5.78 | 5.59 | 5.51 | 6.00 | 5.43 | 5.65 | 6.00 | 5.39 | 0.21 |
| แบบจำลอง | 6.38 | 6.25 | 6.35 | 6.28 | 6.11 | 6.26 | 6.39 | 6.26 | 6.38 | 6.30 | 6.39 | 6.11 | 0.09 |

จากตารางที่ 5.8 มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = 11.32%

จากตาราง การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง
ที่ความเร็วหน้าพัดลมที่ 4.94 m/s หรือ Dimmer Control ระดับ 5 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความ
คลาดเคลื่อนจากค่าความเร็วเฉลี่ย ของแต่ละระนาบทดสอบ พบว่า ที่ระนาบทดสอบ A มีเปอร์เซ็นต์
ความคลาดเคลื่อนที่ 8.91% ที่ระนาบทดสอบ B มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ 13.02%
ที่ระนาบทดสอบ C มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ 13.38% ที่ระนาบทดสอบ D มีเปอร์เซ็นต์
ความคลาดเคลื่อนที่ 11.50%

5.3 สรุปผลการทดสอบ

5.3.1 การทดสอบหาความเร็วลมที่ต้องการในช่วง 3-5 เมตรต่อวินาที ได้ผลออกมาตามนี้

ที่ระนาบทดสอบ A ปรับ Dimmer Control ระดับ 3-6 มีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 4.27-
5.51 เมตร/วินาที ค่า SD อยู่ในช่วง 0.18-0.38

ที่ระนาบทดสอบ B ปรับ Dimmer Control ระดับ 3-6 มีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 4.35-
5.66 เมตร/วินาที ค่า SD อยู่ในช่วง 0.05-0.15

ที่ระนาบทดสอบ C ปรับ Dimmer Control ระดับ 3-6 มีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 4.46-
5.57 เมตร/วินาที ค่า SD อยู่ในช่วง 0.07-0.11

ที่ระนาบทดสอบ D ปรับ Dimmer Control ระดับ 3-6 มีค่าความเร็วอยู่ในช่วง 4.49-
5.73 เมตร/วินาที ค่า SD อยู่ในช่วง 0.08-0.21

5.3.2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนผลการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

กำหนดค่าความเร็วหน้าพัดลมที่ 4.94 m/s หรือที่ Dimmer Control ระดับที่ 5 เป็นตัวเปรียบเทียบ

ที่ระนาบทดสอบ A มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 8.18%

ที่ระนาบทดสอบ B มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 11.52%

ที่ระนาบทดสอบ C มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 11.80%

ที่ระนาบทดสอบ D มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 11.32%

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่สร้างขึ้นมานี้ เพื่อใช้ทดสอบประสิทธิภาพของกังหันลมขนาดเล็ก ชนิด แกนแนวตั้ง และแกนแนวนอน ซึ่งได้กำหนดขอบเขตการสร้างส่วนปฏิบัติงานให้มีขนาดปริมาตรทดสอบ $0.5 \text{ m} \times 1.15 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ โดยมีความเร็วลมไหลผ่านชิ้นงานทดสอบในช่วง $3-5 \text{ m/s}$ พบว่า

เพื่อต้องการหาความเร็วลมในช่วงที่ต้องการ จึงแบ่งการทดสอบในส่วนปฏิบัติงานออกเป็น 4 ระบาย และใช้ Dimmer Control ในการปรับความเร็วรอบของพัดลม พบว่า อุโมงค์ลมสามารถทำ ความเร็วตั้งแต่ $1.90-5.73 \text{ m/s}$ ซึ่งเกินกว่าช่วงความเร็วที่ต้องการ แต่ความเร็วลมที่อยู่ในช่วงที่ต้องการ นั้น ทุกระบายจะใช้ Dimmer Control ระดับที่ 3 ขึ้นไป ซึ่งสามารถใช้ในการทดสอบกังหันลมขนาดเล็กได้ และระบายทดสอบ C เป็นระบายที่มีค่าการกระจายตัวของค่าความเร็วลมที่น้อยที่สุด และ ความเร็วสม่ำเสมอของการไหลที่มากที่สุด เหมาะแก่การเป็นบริเวณติดตั้งชิ้นงานทดสอบมากที่สุด

การคำนวณหาระยะปากทางเข้า (L_e) ได้ 16.10 m ซึ่งการคำนวณไม่ได้คิดผลจากการใส่รังผึ้ง ไว้ที่ด้านหน้าส่วนปฏิบัติงานที่ช่วยให้การกระจายของความเร็วลมสม่ำเสมอ จึงทำให้โปรไฟล์ความเร็ว บริเวณที่ไหลเต็มท่อเกินระยะของส่วนปฏิบัติงานที่ออกแบบไว้ หลังจากที่ได้สร้างเสร็จแล้วค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานที่ระยะห่างจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน 0.7 m ได้อยู่ช่วง $0.07-0.12$ ถือว่าค่าการกระจายตัว ของความเร็วลมค่อนข้างน้อย ทำให้มีความสม่ำเสมอของการไหลมากกว่าระยะอื่น จึงเหมาะที่จะเป็น ระยะที่ติดตั้งชิ้นงานทดสอบ

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำที่สร้างขึ้นนี้ มีขนาดส่วนปฏิบัติงาน $0.5 \text{ m} \times 1.15 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ สามารถ ทำความเร็วลมได้ในช่วง $3-5 \text{ m/s}$ เลขมัคอยู่ที่ 0.016 ลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน $Re = 1.536 \times 10^5$ โดยใช้พัดลมอุตสาหกรรม ขนาดใบพัด 24 นิ้ว มอเตอร์ 1/3 แรงม้า เป็นต้นกำลัง ที่ ส่วนปฏิบัติงานใส่ชิ้นงานทดสอบจากด้านบน สามารถทดสอบชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่สุดมีปริมาตร $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$

ข้อเสนอแนะ

1. อุโมงค์ลมเครื่องนี้ไม่สามารถดูเส้นการไหลของอากาศได้ ควรจะมีการพัฒนาต่อไป
2. ถ้าต้องการให้อุโมงค์ลมมีความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น ควรจะเปลี่ยนมอเตอร์ให้มีกำลังแรงม้าและ รอบที่สูงขึ้น
3. ในการออกแบบไม่ได้ออกแบบให้ชุดต้นกำลังติดกับส่วนอากาศพร้อออก จึงส่งผลให้ 2 ส่วนนี้ ปิดกันไม่สนิท ควรจะมีการพัฒนาต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] สมศักดิ์ ไชยะภินันท์. (2552). กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] มนตรี พิรุณเกษตร. (2552). กลศาสตร์ของไหล. กรุงเทพฯ: วิทย์พัฒนา.
- [3] สมโภชน์ อิมเอิบ. อุโมงค์ลมอัตราเร็วต่ำ. คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ.
- [4] Marcel Escudier. (1989). Engineering Fluid Mechanics. Printed and bound in Great Britain by Biddles Ltd, Guildford.
- [5] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/tunpart.html>





ภาคผนวก ก
การทดสอบเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมดูดอากาศ

การทดลองเพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมดูดอากาศ

วัตถุประสงค์การทดสอบ

1. เพื่อหาความเร็วลมเฉลี่ยของพัดลมที่ระยะห่าง 0.05 m จากหน้าตะแกรงพัดลม
2. เพื่อหาความเร็วลมในช่วง 3-5 m/s เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. พัดลมอุตสาหกรรม ขนาด 24 นิ้ว ใบดुकกลับ ขนาด 1/3 แรงม้า



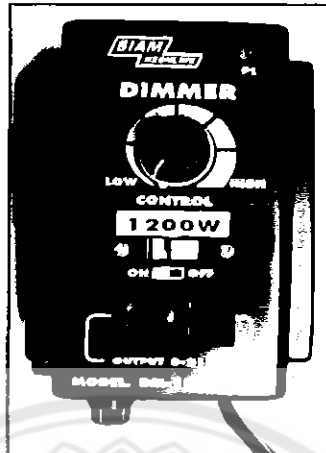
รูปที่ 1 พัดลมอุตสาหกรรม

2. เครื่องวัดความเร็วลม



รูปที่ 2 เครื่องวัดความเร็วลม

3. เครื่องปรับกระแสไฟ DIMMER



รูปที่ 3 Dimmer control

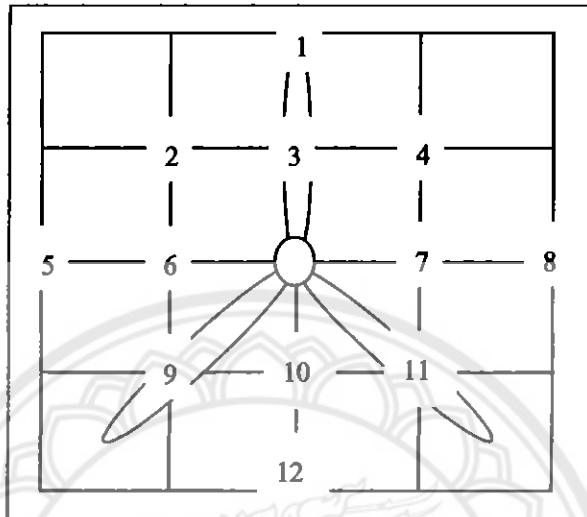
4. ฉากกำหนดตำแหน่งในการวัด



รูปที่ 4 ฉากกำหนดตำแหน่ง

ขั้นตอนการทดสอบ

1. กำหนดตำแหน่งในการวัดความเร็วลมบริเวณหน้าพัดลม ซึ่งได้กำหนดตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอยู่ 12 จุด แต่ละจุดห่างกัน 15 เซนติเมตร เพื่อควบคุมแนวการวัดในแต่ละครั้งให้คงที่



รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัด

2. ทำการวัดหาความเร็วลมในช่วง 3-5 m/s ได้กำหนดให้ฉากวัดห่างจากหน้าพัดลม 0.05 m โดยใช้ Dimmer control ที่ระดับ 1 ถึง 6 ในการปรับความเร็วรอบของพัดลมดูดอากาศ



รูปที่ 6 การวัดความเร็วลม

ผลการทดสอบการปรับความเร็วรอบพัดลมโดยใช้ Dimmer Control

ตาราง แสดงผลความเร็วที่ได้จากการวัดในตำแหน่งต่างๆ

Dimmer Control ระดับที่ 1

| ครั้งที่ | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 0.4 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.1 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.3 |
| 2 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.5 |
| 3 | 0.6 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | 0.3 | 0.5 | 0.7 | 0.3 | 0.7 | 0.8 | 0.5 | 0.3 |
| เฉลี่ย | 0.53 | 0.63 | 0.63 | 0.56 | 0.36 | 0.53 | 0.66 | 0.33 | 0.7 | 0.73 | 0.53 | 0.36 |

Dimmer Control ระดับที่ 2

| ครั้งที่ | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 1.7 | 2.3 | 2.0 | 2.0 | 1.3 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.1 | 2.1 | 2.3 | 1.9 |
| 2 | 1.6 | 1.9 | 1.7 | 1.9 | 1.7 | 1.9 | 1.8 | 1.3 | 1.9 | 1.9 | 1.8 | 0.8 |
| 3 | 1.6 | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 1.6 | 1.8 | 2.0 | 1.5 | 1.8 | 2.0 | 1.9 | 1.7 |
| เฉลี่ย | 1.63 | 2.06 | 1.90 | 2.00 | 1.53 | 1.87 | 1.90 | 1.57 | 1.93 | 2.00 | 2.00 | 1.47 |

Dimmer Control ระดับที่ 3

| ครั้งที่ | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 3.0 | 3.9 | 3.5 | 3.7 | 3.1 | 4.1 | 4.0 | 2.9 | 3.6 | 3.4 | 3.5 | 2.9 |
| 2 | 3.7 | 3.9 | 4.0 | 4.3 | 4.0 | 4.4 | 4.5 | 3.7 | 4.5 | 4.6 | 4.6 | 3.7 |
| 3 | 3.2 | 3.7 | 3.8 | 4.0 | 3.5 | 3.9 | 3.9 | 3.0 | 3.7 | 3.3 | 3.4 | 3.1 |
| เฉลี่ย | 3.30 | 3.83 | 3.77 | 4.00 | 3.53 | 4.13 | 4.13 | 3.20 | 3.93 | 3.77 | 3.83 | 3.23 |

Dimmer Control ระดับที่ 4

| ครั้งที่ | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 4.4 | 4.9 | 4.3 | 4.7 | 4.0 | 5.0 | 5.1 | 4.4 | 5.2 | 5.3 | 5.0 | 4.7 |
| 2 | 3.7 | 4.4 | 4.1 | 4.2 | 3.9 | 4.5 | 4.4 | 4.0 | 4.7 | 4.9 | 4.7 | 4.0 |
| 3 | 3.9 | 4.2 | 4.2 | 4.5 | 3.9 | 4.7 | 4.5 | 4.3 | 4.9 | 4.8 | 4.9 | 4.7 |
| เฉลี่ย | 4.00 | 4.50 | 4.20 | 4.47 | 3.93 | 4.73 | 4.67 | 4.23 | 4.93 | 5.00 | 4.87 | 4.47 |

Dimmer Control ระดับที่ 5

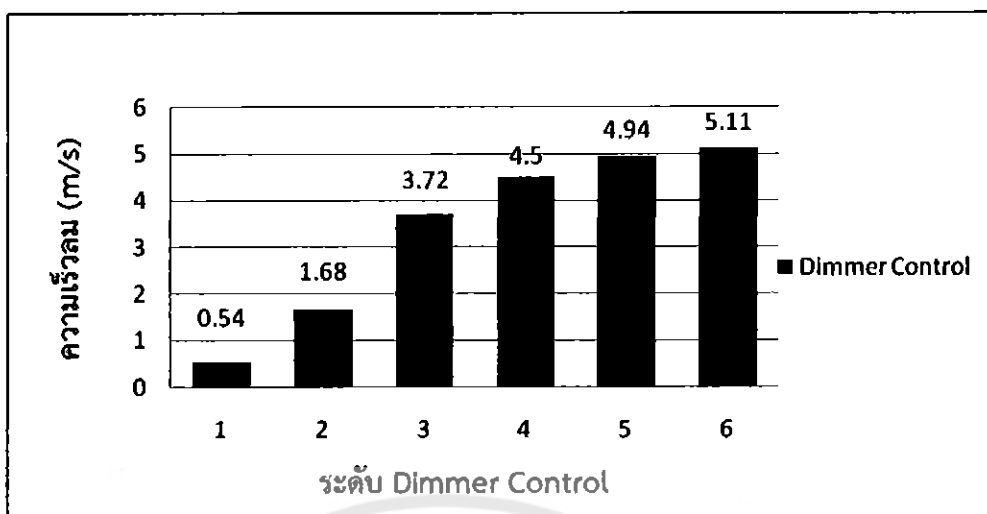
| ครั้งที่ | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 4.6 | 5.3 | 4.8 | 4.6 | 4.5 | 5.3 | 5.5 | 4.8 | 5.7 | 5.4 | 5.5 | 4.5 |
| 2 | 4.1 | 4.8 | 4.6 | 4.5 | 4.6 | 5.1 | 5.3 | 4.7 | 5.1 | 5.3 | 5.2 | 4.6 |
| 3 | 4.5 | 5.1 | 4.8 | 4.7 | 4.7 | 5.2 | 5.2 | 4.9 | 5.4 | 5.1 | 5.3 | 4.8 |
| เฉลี่ย | 4.40 | 5.07 | 4.73 | 4.60 | 4.60 | 5.20 | 5.33 | 4.80 | 5.40 | 5.27 | 5.33 | 4.63 |

Dimmer Control ระดับที่ 6

| ครั้งที่ | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 4.4 | 5.2 | 4.9 | 5.0 | 4.9 | 5.3 | 5.3 | 5.2 | 5.9 | 5.5 | 5.6 | 4.4 |
| 2 | 4.5 | 5.1 | 5.0 | 5.1 | 4.8 | 5.4 | 5.2 | 5.0 | 5.3 | 5.2 | 5.5 | 4.8 |
| 3 | 4.7 | 4.9 | 5.1 | 5.4 | 5.0 | 5.2 | 5.3 | 5.1 | 5.2 | 5.5 | 5.3 | 4.9 |
| เฉลี่ย | 4.53 | 5.07 | 5.00 | 5.17 | 4.90 | 5.30 | 5.27 | 5.10 | 5.46 | 5.40 | 5.47 | 4.70 |

ตาราง สรุปผลความเร็วลมเฉลี่ยที่ได้จากการวัดตำแหน่งต่างๆบริเวณหน้าพัดลม

| Dimmer control | ความเร็วลมหน้าพัดลมจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | | | | เฉลี่ย |
|----------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 1 | 0.53 | 0.63 | 0.63 | 0.56 | 0.36 | 0.53 | 0.66 | 0.33 | 0.70 | 0.73 | 0.53 | 0.36 | 0.54 |
| 2 | 1.60 | 1.90 | 1.70 | 1.90 | 1.70 | 1.90 | 1.80 | 1.30 | 1.90 | 1.90 | 1.80 | 0.80 | 1.68 |
| 3 | 3.30 | 3.83 | 3.77 | 4.00 | 3.53 | 4.13 | 4.13 | 3.20 | 3.93 | 3.77 | 3.83 | 3.23 | 3.72 |
| 4 | 4.00 | 4.5 | 4.20 | 4.47 | 3.93 | 4.73 | 4.67 | 4.23 | 4.93 | 5.00 | 4.87 | 4.47 | 4.50 |
| 5 | 4.40 | 5.07 | 4.73 | 4.60 | 4.60 | 5.20 | 5.33 | 4.80 | 5.40 | 5.27 | 5.33 | 4.63 | 4.94 |
| 6 | 4.53 | 5.07 | 5.00 | 5.17 | 4.90 | 5.30 | 5.27 | 5.10 | 5.46 | 5.40 | 5.47 | 4.70 | 5.11 |



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมและระดับ Dimmer Control

สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบหาความเร็วลมเฉลี่ยที่อยู่ในช่วง 3-5 m/s จากการวัดพัดลมใบพัดแดง ชนิดใบดุดกลับ โดยใช้ Dimmer Control ปรับรอบการหมุนของพัดลม 6 ระดับ และทำการวัดที่หน้าพัดลม 12 จุด พบว่าความเร็วลมที่ต้องการในช่วง 3-5 m/s จะใช้ Dimmer Control ระดับที่ 3-6



ภาคผนวก ข

การทดสอบเพื่อหาผลต่างของความดันเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดทดสอบในระยะต่างๆ

การทดสอบเพื่อหาผลต่างของความดันเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดทดสอบในระยะต่างๆ

วัตถุประสงค์การทดสอบ

1. เพื่อหาผลต่างของความดันในตำแหน่งต่างๆ ภายในส่วนปฏิบัติงาน
2. นำผลต่างของความดันไปคำนวณหาความเร็วลม

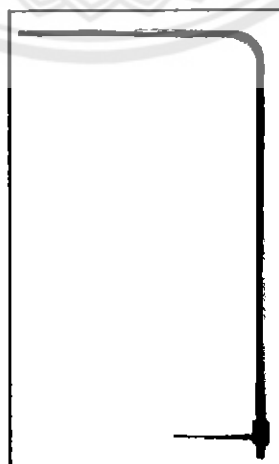
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. พัดลมอุตสาหกรรม ขนาด 24 นิ้ว ใบดูดกลับ ขนาด 1/3 แรงม้า



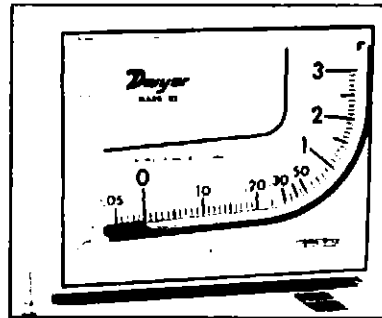
รูปที่ 1 พัดลมอุตสาหกรรม

2. หัววัดแบบ Pitot tube



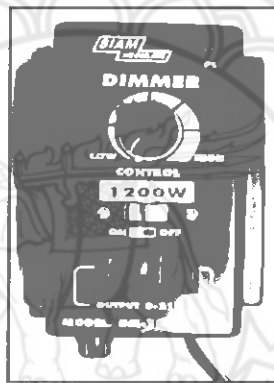
รูปที่ 2 Pitot tube

3. เครื่องวัดमानอมิเตอร์ (manometer)



รูปที่ 3 เครื่องวัดमानอมิเตอร์

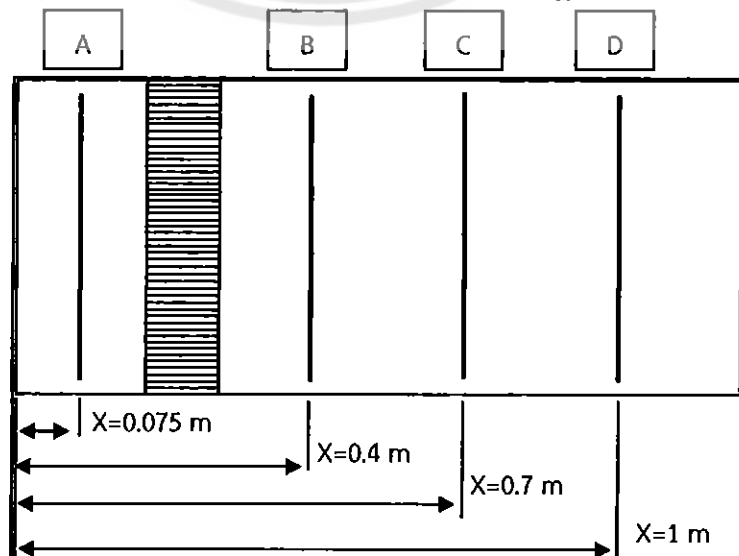
4. เครื่องปรับกระแสไฟ DIMMER



รูปที่ 4 Dimmer Control

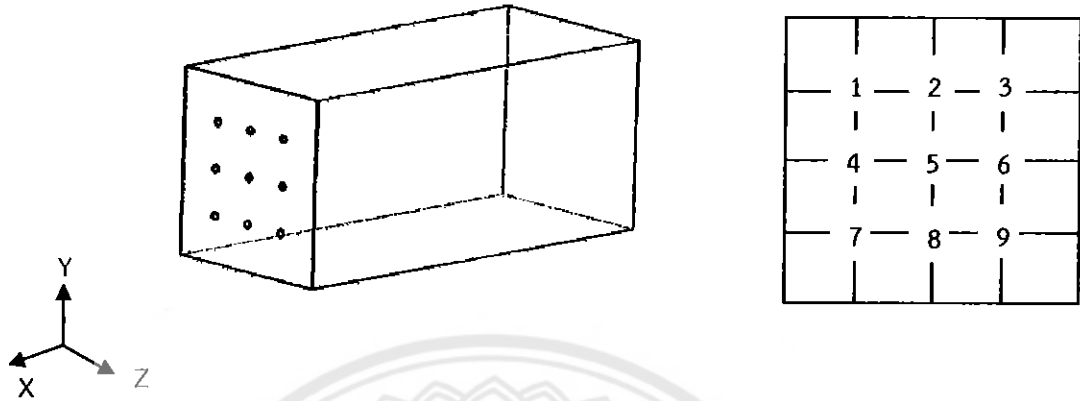
ขั้นตอนการทดสอบ

1. ตั้งชื่อระนาบทดสอบ และกำหนดระยะทดสอบต่างๆ ตามความยาวของระยะความยาวส่วนปฏิบัติงาน โดยระยะเริ่มต้นเริ่มจากด้านหน้าส่วนปฏิบัติงาน



รูปที่ 5 การกำหนดระยะของระนาบหน้าตัดที่จะทำการวัดการไหลของลม

2. ที่ระยะระนาบทดสอบ A กำหนดจุดที่จะวัดทั่วทั้งระนาบ 9 จุด ในการวัดจะใช้ Dimmer Control ปรับความเร็วรอบของพัดลม 6 ระดับ



รูปที่ 6 แสดงตำแหน่งในการวัดของพื้นที่หน้าตัดทดสอบ

3. ทำเหมือนขั้นตอนในข้อ 2 แต่เปลี่ยนระยะทดสอบ $X=0.4$ m $X=0.7$ m และ $X=1$ m ตามลำดับ

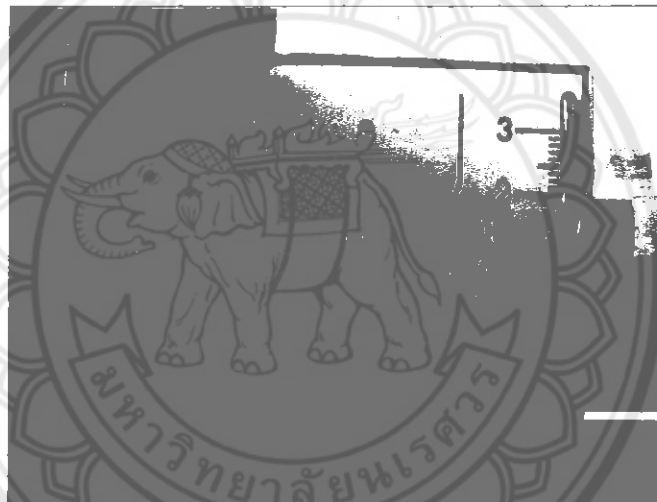
4. ติดตั้งหัววัด Pitot tube และมานอมิเตอร์ เพื่อวัดผลต่างของความดัน



รูปที่ 7 การติดตั้งหัววัด Pitot tube ในส่วนปฏิบัติงาน



รูปที่ 8 หัววัดPitot tube ที่ติดตั้งเสร็จ



รูปที่ 9 ค่าผลต่างของความดันที่ได้จากมานอมิเตอร์

4. บันทึกค่าผลต่างของความดันดังตารางนี้

ตารางบันทึกผลการทดสอบ

ระนาบทดสอบ.....

Dimmer Control ระดับที่ การทดสอบครั้งที่

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|----------|----------|
| จุดที่ 1 | จุดที่ 2 | จุดที่ 3 |
| จุดที่ 4 | จุดที่ 5 | จุดที่ 6 |
| จุดที่ 7 | จุดที่ 8 | จุดที่ 9 |

รูปที่ 10 ตารางบันทึกผล

ผลการทดสอบผลต่างของความดันที่ระยะต่างๆ ภายในส่วนปฏิบัติงานของอุโมงค์

ตาราง แสดงผลต่างของความดันในพื้นที่ส่วนปฏิบัติงาน

| <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.010</td> <td>0.005</td> <td>0.010</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.005 | 0.010 | <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.020</td> <td>0.020</td> <td>0.020</td> </tr> <tr> <td>0.015</td> <td>0.020</td> <td>0.015</td> </tr> <tr> <td>0.015</td> <td>0.020</td> <td>0.020</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.015 | 0.020 | 0.015 | 0.015 | 0.020 | 0.020 |
|--|--|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.010 | 0.005 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.020 | 0.020 | 0.020 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.015 | 0.020 | 0.015 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.015 | 0.020 | 0.020 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>0.010</td> <td>0.005</td> <td>0.010</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.005 | 0.010 | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.005 | 0.010 | 0.005 | 0.010 | <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.015</td> <td>0.020</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.015</td> <td>0.015</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.010</td> <td>0.020</td> <td>0.015</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.015 | 0.020 | 0.010 | 0.015 | 0.015 | 0.010 | 0.010 | 0.020 | 0.015 |
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.005 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.005 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.010 | 0.005 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.015 | 0.020 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.015 | 0.015 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.010 | 0.020 | 0.015 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.010</td> <td>0.010</td> <td>0.010</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | 0.010 | <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.015</td> <td>0.015</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.015</td> <td>0.020</td> <td>0.015</td> </tr> <tr> <td>0.010</td> <td>0.020</td> <td>0.015</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.015 | 0.015 | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.015 | 0.010 | 0.020 | 0.015 |
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.015 | 0.015 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.015 | 0.020 | 0.015 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.010 | 0.020 | 0.015 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 1</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.010</td> </tr> <tr> <td>0.005</td> <td>0.010</td> <td>0.008</td> </tr> <tr> <td>0.010</td> <td>0.008</td> <td>0.010</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.005 | 0.010 | 0.008 | 0.010 | 0.008 | 0.010 | <p>ระนาบทดสอบ A</p> <p>ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 2</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">ผลต่างของความดัน (in-H₂O)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.017</td> <td>0.018</td> <td>0.013</td> </tr> <tr> <td>0.015</td> <td>0.018</td> <td>0.013</td> </tr> <tr> <td>0.012</td> <td>0.020</td> <td>0.017</td> </tr> </tbody> </table> | ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | 0.017 | 0.018 | 0.013 | 0.015 | 0.018 | 0.013 | 0.012 | 0.020 | 0.017 |
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.005 | 0.010 | 0.008 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.010 | 0.008 | 0.010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.017 | 0.018 | 0.013 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.015 | 0.018 | 0.013 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.012 | 0.020 | 0.017 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ระนาบทดสอบ A
Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.050 | 0.040 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ A
Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.075 | 0.050 |
| 0.070 | 0.070 | 0.060 |
| 0.070 | 0.080 | 0.065 |

ระนาบทดสอบ A
Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.050 | 0.045 | 0.035 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ A
Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.075 | 0.050 |
| 0.070 | 0.080 | 0.060 |
| 0.065 | 0.080 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ A
Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.050 | 0.045 | 0.040 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |
| 0.050 | 0.050 | 0.045 |

ระนาบทดสอบ A
Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.075 | 0.060 |
| 0.070 | 0.080 | 0.060 |
| 0.065 | 0.080 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ A
ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.050 | 0.047 | 0.038 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |
| 0.050 | 0.050 | 0.042 |

ระนาบทดสอบ A
ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 4

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.075 | 0.053 |
| 0.070 | 0.077 | 0.060 |
| 0.067 | 0.080 | 0.062 |

ระนาบทดสอบ A

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.080 | 0.065 |
| 0.075 | 0.085 | 0.065 |
| 0.070 | 0.085 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ A

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.080 | 0.070 |
| 0.070 | 0.080 | 0.075 |
| 0.070 | 0.080 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ A

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.085 | 0.060 |
| 0.075 | 0.085 | 0.065 |
| 0.070 | 0.085 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ A

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.080 | 0.075 |
| 0.075 | 0.085 | 0.070 |
| 0.070 | 0.080 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ A

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.080 | 0.060 |
| 0.075 | 0.085 | 0.060 |
| 0.070 | 0.085 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ A

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.080 | 0.075 |
| 0.075 | 0.085 | 0.075 |
| 0.070 | 0.080 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ A

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 5

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.073 | 0.082 | 0.062 |
| 0.075 | 0.085 | 0.063 |
| 0.070 | 0.085 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ A

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 6

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.080 | 0.073 |
| 0.073 | 0.083 | 0.073 |
| 0.070 | 0.080 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.010 | 0.005 |
| 0.010 | 0.005 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.020 | 0.015 | 0.015 |
| 0.015 | 0.020 | 0.010 |
| 0.020 | 0.020 | 0.015 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.005 | 0.010 | 0.005 |
| 0.005 | 0.010 | 0.005 |
| 0.010 | 0.005 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.020 | 0.015 | 0.015 |
| 0.020 | 0.015 | 0.010 |
| 0.020 | 0.020 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.020 | 0.015 | 0.015 |
| 0.020 | 0.015 | 0.010 |
| 0.020 | 0.020 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ B

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.010 | 0.008 |
| 0.008 | 0.008 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ B

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.020 | 0.015 | 0.015 |
| 0.018 | 0.017 | 0.010 |
| 0.020 | 0.020 | 0.012 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.040 | 0.050 |
| 0.045 | 0.045 | 0.045 |
| 0.045 | 0.045 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.065 | 0.065 | 0.070 |
| 0.065 | 0.065 | 0.065 |
| 0.065 | 0.065 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.040 | 0.050 |
| 0.045 | 0.045 | 0.040 |
| 0.050 | 0.040 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.060 | 0.065 | 0.070 |
| 0.065 | 0.065 | 0.065 |
| 0.070 | 0.065 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.040 | 0.045 |
| 0.045 | 0.045 | 0.040 |
| 0.045 | 0.040 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.065 | 0.065 |
| 0.065 | 0.065 | 0.065 |
| 0.065 | 0.065 | 0.065 |

ระนาบทดสอบ B

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.040 | 0.048 |
| 0.045 | 0.045 | 0.042 |
| 0.047 | 0.042 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ B

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 4

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.065 | 0.065 | 0.068 |
| 0.065 | 0.065 | 0.065 |
| 0.067 | 0.065 | 0.065 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.070 | 0.080 |
| 0.070 | 0.075 | 0.075 |
| 0.075 | 0.080 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.070 | 0.075 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.070 | 0.080 |
| 0.070 | 0.070 | 0.080 |
| 0.075 | 0.080 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.070 | 0.075 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.070 | 0.080 |
| 0.070 | 0.070 | 0.080 |
| 0.075 | 0.075 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 5

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.072 | 0.070 | 0.073 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ B

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 6

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.072 | 0.070 | 0.080 |
| 0.070 | 0.072 | 0.078 |
| 0.075 | 0.078 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ C
Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.005 | 0.005 |
| 0.010 | 0.010 | 0.005 |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ C
Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.015 | 0.015 |
| 0.010 | 0.015 | 0.015 |
| 0.005 | 0.015 | 0.015 |

ระนาบทดสอบ C
Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ C
Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.015 | 0.015 | 0.010 |
| 0.010 | 0.015 | 0.015 |
| 0.015 | 0.015 | 0.015 |

ระนาบทดสอบ C
Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 0.010 | 0.005 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ C
Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.015 | 0.015 | 0.010 |
| 0.015 | 0.015 | 0.015 |
| 0.010 | 0.015 | 0.015 |

ระนาบทดสอบ C
ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.008 | 0.008 |
| 0.010 | 0.008 | 0.008 |
| 0.008 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ C
ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.013 | 0.015 | 0.012 |
| 0.012 | 0.015 | 0.015 |
| 0.013 | 0.015 | 0.015 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.050 | 0.045 |
| 0.045 | 0.050 | 0.045 |
| 0.040 | 0.045 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.060 | 0.070 | 0.070 |
| 0.065 | 0.065 | 0.070 |
| 0.065 | 0.065 | 0.065 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.050 | 0.045 |
| 0.040 | 0.045 | 0.045 |
| 0.045 | 0.050 | 0.045 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.065 | 0.070 | 0.065 |
| 0.065 | 0.070 | 0.070 |
| 0.060 | 0.065 | 0.065 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.045 | 0.045 |
| 0.045 | 0.050 | 0.045 |
| 0.050 | 0.050 | 0.050 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.060 | 0.070 | 0.065 |
| 0.065 | 0.070 | 0.070 |
| 0.065 | 0.065 | 0.065 |

ระนาบทดสอบ C

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.048 | 0.045 |
| 0.043 | 0.048 | 0.045 |
| 0.045 | 0.048 | 0.046 |

ระนาบทดสอบ C

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 4

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.062 | 0.07 | 0.067 |
| 0.065 | 0.068 | 0.07 |
| 0.063 | 0.065 | 0.065 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.075 | 0.070 |
| 0.070 | 0.075 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.075 | 0.070 |
| 0.070 | 0.075 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|------|
| 0.065 | 0.075 | 0.07 |
| 0.070 | 0.070 | 0.07 |
| 0.065 | 0.075 | 0.07 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.075 | 0.070 |
| 0.070 | 0.070 | 0.075 |
| 0.065 | 0.070 | 0.075 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.065 | 0.075 | 0.075 |
| 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| 0.065 | 0.070 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ C

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.070 | 0.070 |
| 0.070 | 0.070 | 0.075 |
| 0.070 | 0.070 | 0.075 |

ระนาบทดสอบ C

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 5

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.067 | 0.073 | 0.072 |
| 0.070 | 0.072 | 0.070 |
| 0.067 | 0.073 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ C

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 6

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.073 | 0.072 | 0.070 |
| 0.070 | 0.072 | 0.073 |
| 0.068 | 0.072 | 0.073 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.005 | 0.010 | 0.010 |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.015 | 0.020 | 0.010 |
| 0.015 | 0.015 | 0.010 |
| 0.010 | 0.020 | 0.015 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |
| 0.010 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.015 | 0.020 | 0.020 |
| 0.015 | 0.020 | 0.020 |
| 0.015 | 0.020 | 0.020 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 1 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.010 | 0.010 | 0.005 |
| 0.010 | 0.005 | 0.010 |
| 0.005 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 2 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.020 | 0.020 | 0.015 |
| 0.015 | 0.020 | 0.020 |
| 0.015 | 0.015 | 0.015 |

ระนาบทดสอบ D

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.008 | 0.010 | 0.008 |
| 0.008 | 0.008 | 0.010 |
| 0.008 | 0.010 | 0.010 |

ระนาบทดสอบ D

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.017 | 0.020 | 0.015 |
| 0.015 | 0.018 | 0.017 |
| 0.013 | 0.018 | 0.017 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.050 | 0.045 | 0.035 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |
| 0.050 | 0.050 | 0.040 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.075 | 0.050 |
| 0.070 | 0.080 | 0.060 |
| 0.065 | 0.080 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.045 | 0.050 | 0.050 |
| 0.050 | 0.045 | 0.050 |
| 0.040 | 0.050 | 0.050 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.065 | 0.070 | 0.075 |
| 0.065 | 0.065 | 0.075 |
| 0.065 | 0.075 | 0.075 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 3 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.050 | 0.050 | 0.045 |
| 0.045 | 0.050 | 0.045 |
| 0.045 | 0.050 | 0.050 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 4 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.075 | 0.065 |
| 0.070 | 0.080 | 0.070 |
| 0.065 | 0.075 | 0.075 |

ระนาบทดสอบ D

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.048 | 0.048 | 0.043 |
| 0.048 | 0.048 | 0.045 |
| 0.045 | 0.050 | 0.047 |

ระนาบทดสอบ D

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 4

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.068 | 0.073 | 0.063 |
| 0.068 | 0.075 | 0.068 |
| 0.065 | 0.077 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.085 | 0.060 |
| 0.075 | 0.085 | 0.065 |
| 0.070 | 0.085 | 0.060 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 1

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.080 | 0.075 |
| 0.075 | 0.085 | 0.070 |
| 0.070 | 0.080 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.070 | 0.075 | 0.075 |
| 0.070 | 0.070 | 0.080 |
| 0.070 | 0.080 | 0.075 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 2

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.075 | 0.075 |
| 0.070 | 0.070 | 0.080 |
| 0.070 | 0.080 | 0.075 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 5 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.080 | 0.065 |
| 0.070 | 0.075 | 0.070 |
| 0.070 | 0.085 | 0.070 |

ระนาบทดสอบ D

Dimmer Control ระดับที่ 6 การทดสอบครั้งที่ 3

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.075 | 0.075 |
| 0.070 | 0.070 | 0.075 |
| 0.070 | 0.075 | 0.075 |

ระนาบทดสอบ D

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 5

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.073 | 0.080 | 0.067 |
| 0.072 | 0.077 | 0.072 |
| 0.070 | 0.083 | 0.068 |

ระนาบทดสอบ D

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 6

| ผลต่างของความดัน (in-H ₂ O) | | |
|--|-------|-------|
| 0.075 | 0.077 | 0.075 |
| 0.072 | 0.078 | 0.075 |
| 0.070 | 0.078 | 0.073 |

สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบหาผลต่างของความดันในส่วนปฏิบัติงาน โดยทำการทดสอบที่ระยะ 0.075 , 0.4 , 0.7 และ 1 m แต่ละระยะจะกำหนดจุดวัดผลต่างความดัน 9 จุด ใช้Dimmer Control ปรับความเร็วรอบของพัดลม พบว่าภายในส่วนปฏิบัติงานจะมีผลต่างความดันที่เพิ่มขึ้นตามระดับของDimmer Control ที่มากขึ้น ผลต่างของความดันที่ระยะต่างๆทุกระดับDimmer Control มีค่าใกล้เคียงกัน และในพื้นที่หน้าตัดทดสอบทั้ง 9 จุดของแต่ละระดับDimmer Control จะมีค่าใกล้เคียงกัน และผลต่างของความดันจะอยู่ในช่วง 0.005–0.085 (in-H₂O) ซึ่งจะนำค่าผลต่างของความดันนี้ไปคำนวณหาความเร็วลม และเปรียบเทียบกับความเร็วลมของแบบจำลอง





ภาคผนวก ค

ตาราง สมบัติพิธีกรรมของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

ตาราง สมบัติทางฟิสิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (หน่วยเอสไอ)

| อุณหภูมิ (°C) | ความหนาแน่น ρ (kg/m ³) | น้ำหนักจำเพาะ γ (N.s/m ³) | ความหนืด พลวัต μ (N.s/m ²) | ความหนืดจลน์ ν (m ² /s) | อัตราเร็วเสียง c (m/s) |
|------------------|---|--|---|--|--------------------------------|
| -40 | 1.514 | 14.85 | 1.57×10^{-5} | 1.04×10^{-5} | 306.2 |
| -20 | 1.395 | 13.68 | 1.63×10^{-5} | 1.17×10^{-5} | 319.1 |
| 0 | 1.292 | 12.67 | 1.71×10^{-5} | 1.32×10^{-5} | 331.4 |
| 5 | 1.269 | 12.45 | 1.73×10^{-5} | 1.36×10^{-5} | 334.4 |
| 10 | 1.247 | 12.23 | 1.76×10^{-5} | 1.41×10^{-5} | 337.4 |
| 15 | 1.225 | 12.01 | 1.80×10^{-5} | 1.47×10^{-5} | 340.4 |
| 20 | 1.204 | 11.81 | 1.82×10^{-5} | 1.51×10^{-5} | 343.3 |
| 25 | 1.184 | 11.61 | 1.85×10^{-5} | 1.56×10^{-5} | 346.3 |
| 30 | 1.165 | 11.43 | 1.86×10^{-5} | 1.60×10^{-5} | 349.1 |
| 40 | 1.127 | 11.05 | 1.87×10^{-5} | 1.66×10^{-5} | 354.7 |
| 50 | 1.109 | 10.88 | 1.95×10^{-5} | 1.76×10^{-5} | 360.3 |
| 60 | 1.060 | 10.40 | 1.97×10^{-5} | 1.86×10^{-5} | 365.7 |
| 70 | 1.060 | 10.09 | 2.03×10^{-5} | 1.97×10^{-5} | 371.2 |
| 80 | 0.999 | 9.803 | 2.07×10^{-5} | 2.07×10^{-5} | 376.6 |
| 90 | 0.972 | 9.533 | 2.14×10^{-5} | 2.20×10^{-5} | 381.7 |
| 100 | 0.946 | 9.278 | 2.17×10^{-5} | 2.29×10^{-5} | 386.9 |
| 200 | 0.746 | 7.317 | 2.53×10^{-5} | 3.39×10^{-5} | 434.5 |
| 300 | 0.616 | 6.040 | 2.98×10^{-5} | 3.48×10^{-5} | 476.3 |

ที่มา Bruce R. Munson and Others, Fundamentals of Fluid Mechanics, 2nd editlon, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.



1. การคำนวณหาความเร็วลมที่ได้จากผลต่างของความดัน

จากคู่มือวิธีการใช้ MARK II MANOMETER

AIR VELOCITY CALCULATIONS:

$$\text{Air Velocity} = 1096.2 \times \sqrt{\frac{P_v}{D}} \quad (1)$$

Where P_v = velocity pressure in inches of water

D = Air density in lb/ft^3

$$\text{Air Density} = 1.325 \times \frac{P_B}{T}$$

Where P_B = Barometric Pressure in inches of mercury

T = Absolute Temperature (indicated temperature $^{\circ}\text{F}$ plus 460)

จากตาราง คุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

ที่อุณหภูมิ 35°C วัดจากอุณหภูมิขณะทำการทดลอง

วิธีการหาค่าความหนาแน่นของอากาศ โดยวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นตรง (Linear Interpolation)

$$\frac{40 - 35}{40 - 30} = \frac{1.127 - D}{1.127 - 1.164}$$

$$D = 1.1455 \text{ kg}/\text{m}^3 = 0.0715 \text{ lb}/\text{ft}^3$$

นำค่าความหนาแน่นของอากาศ (lb/ft^3) ที่ได้ไปแทนในสมการที่ 1

นำค่าผลต่างของความดัน ($\text{in}-\text{H}_2\text{O}$) ที่ได้จากการทดสอบไปแทนในสมการที่ 1

จากผลการคำนวณจะได้ความเร็วออกมาในรูป (ft/min) ฉะนั้นต้องแปลงมาเป็น (m/s) คือ นำผลที่ได้จากคำนวณไปคูณด้วย $0.00508 \text{ m}/\text{s}$

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ระนาบทดสอบ A

ค่าเฉลี่ยของ Dimmer Control ระดับที่ 1

| ผลต่างของความดัน ($\text{in}-\text{H}_2\text{O}$) | | |
|---|-------|-------|
| 0.005 | 0.010 | 0.010 |
| 0.005 | 0.010 | 0.008 |
| 0.010 | 0.008 | 0.010 |

$$\begin{aligned} \text{ที่จุดที่ 1 } V &= 1096.2 \times \sqrt{\frac{0.005}{0.0715}} \\ &= 289.88 \text{ (ft/min)} \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } 289.88 \times 0.00508 = 1.47 \text{ m/s}$$

2. เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Errors)

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Absolute error)

$$= |\text{ค่าที่ได้จากการทดลอง} - \text{ค่าที่ได้จากแบบจำลอง}|$$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน = $\frac{\text{ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์} \times 100\%}{\text{ค่าที่ได้จากแบบจำลอง}}$

ค่าที่ได้จากแบบจำลอง

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้ความเร็วเฉลี่ย พัดลม 4.94 m/s หรือ Dimmer Control ระดับ 5 ในการทดลอง เป็นตัวเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ที่ระนาบทดสอบ A

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} &= \frac{5.61 - 6.11}{6.11} \times 100\% \\ &= 8.18\% \end{aligned}$$

ที่ระนาบทดสอบ B

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} &= \frac{5.53 - 6.25}{6.25} \times 100\% \\ &= 11.52\% \end{aligned}$$

ที่ระนาบทดสอบ C

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} &= \frac{5.53 - 6.27}{6.27} \times 100\% \\ &= 11.80\% \end{aligned}$$

ที่ระนาบทดสอบ D

$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} &= \frac{5.65 - 6.30}{6.30} \times 100\% \\ &= 10.32\% \end{aligned}$$

3. การคำนวณหาค่า Reynolds Number

จากสมการที่ 2.3.
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

การหาค่า D จากหน้าตัดทรงสี่เหลี่ยม 50×50 cm

จากสมการที่ 2.6
$$D_H = 4 \frac{A}{P}$$

$$= 4 \times \frac{(0.5 \times 0.5)}{(0.5 + 0.5 + 0.5 + 0.5)}$$

$D_H = 0.5 \text{ m}$

กำหนดให้ ความเร็วของอากาศ = 5 m/s

จากตาราง คุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

ที่ อุณหภูมิ (T) = 35 °C

$$\rho = 1.146 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.865 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$$

จะได้

$$Re = \frac{1.146 \times 5 \times 0.5}{1.865 \times 10^{-5}}$$

$$= 1.536 \times 10^5 \quad (>4000, \text{ การไหลแบบปั่นป่วน})$$

4. การคำนวณระยะปากทางเข้า (Entrance length, L_e)

ระยะปากทางเข้า (L_e) นั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อยต่อแรงหนืดเนื่องจากความหนืด

(เลขเลย์โนลด์ส์, Re) โดยพิจารณาจาก

$$\frac{L_e}{D} = 4.4 Re^{1/6} \quad \text{การไหลแบบปั่นป่วน} \quad (1)$$

จากสมการ (1) จะได้

$$\frac{L_e}{D} = 4.4 Re^{1/6} = 4.4 (1.536 \times 10^5)^{1/6} = 32.20$$

$$L_e = 32.20 (0.5) = 16.10 \text{ m}$$

ระยะปากทางเข้าเท่ากับ 16.10 m ถ้าการไหลไหลพ้นจุดนี้ไปแล้วจะเป็นการไหลเต็มท่อ

5 ผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตาราง การคำนวณความเร็ว ที่ระนาบทดสอบ A

| จำนวนครั้ง | ความเร็วจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | SD |
|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 1 | 6.133 | 6.099 | 6.134 | 6.106 | 6.055 | 6.107 | 6.135 | 6.101 | 6.138 | 0.027 |
| 2 | 6.135 | 6.104 | 6.129 | 6.110 | 6.063 | 6.103 | 6.138 | 6.101 | 6.138 | 0.025 |
| 3 | 6.132 | 6.099 | 6.131 | 6.105 | 6.062 | 6.107 | 6.136 | 6.101 | 6.139 | 0.025 |
| ค่าเฉลี่ย | 6.134 | 6.101 | 6.130 | 6.107 | 6.062 | 6.105 | 6.137 | 6.101 | 6.138 | 0.025 |

ตาราง การคำนวณความเร็ว ที่ระนาบทดสอบ B

| จำนวนครั้ง | ความเร็วจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | SD |
|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 1 | 6.335 | 6.173 | 6.314 | 6.296 | 6.071 | 6.262 | 6.348 | 6.182 | 6.340 | 0.096 |
| 2 | 6.346 | 6.177 | 6.301 | 6.303 | 6.107 | 6.264 | 6.324 | 6.186 | 6.341 | 0.085 |
| 3 | 6.326 | 6.178 | 6.315 | 6.299 | 6.094 | 6.279 | 6.338 | 6.174 | 6.325 | 0.087 |
| ค่าเฉลี่ย | 6.336 | 6.176 | 6.310 | 6.299 | 6.091 | 6.268 | 6.337 | 6.181 | 6.336 | 0.089 |

ตาราง การคำนวณความเร็ว ที่ระนาบทดสอบ C

| จำนวนครั้ง | ความเร็วจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | SD |
|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 1 | 6.350 | 6.223 | 6.322 | 6.259 | 6.092 | 6.239 | 6.360 | 6.225 | 6.347 | 0.087 |
| 2 | 6.361 | 6.229 | 6.316 | 6.256 | 6.116 | 6.222 | 6.351 | 6.231 | 6.351 | 0.081 |
| 3 | 6.340 | 6.226 | 6.318 | 6.248 | 6.107 | 6.236 | 6.365 | 6.219 | 6.342 | 0.082 |
| ค่าเฉลี่ย | 6.351 | 6.226 | 6.319 | 6.255 | 6.105 | 6.233 | 6.359 | 6.225 | 6.347 | 0.083 |

ตาราง การคำนวณความเร็ว ที่ระนาบทดสอบ D

| จำนวนครั้ง | ความเร็วจุดที่ (m/s) | | | | | | | | | SD |
|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 1 | 6.382 | 6.249 | 6.356 | 6.287 | 6.103 | 6.266 | 6.393 | 6.255 | 6.380 | 0.093 |
| 2 | 6.394 | 6.258 | 6.353 | 6.284 | 6.118 | 6.250 | 6.382 | 6.259 | 6.383 | 0.090 |
| 3 | 6.372 | 6.251 | 6.352 | 6.278 | 6.116 | 6.264 | 6.398 | 6.250 | 6.373 | 0.089 |
| ค่าเฉลี่ย | 6.382 | 6.253 | 6.354 | 6.283 | 6.113 | 6.260 | 6.391 | 6.255 | 6.379 | 0.090 |

6. การคำนวณเลขมัค

เลขมัคคือ อัตราส่วนของค่าความเร็วของการไหลเฉพาะที่ (local flow) ต่ออัตราเร็วเสียง

$$\text{จากสมการที่ 2.1} \quad Ma = \frac{V}{c}$$

ความเร็วของการไหล (V) (m/s)

อัตราเร็วเสียง (c) (m/s)

จากตารางสมบัติฟิสิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ

ที่อุณหภูมิขณะทำการทดสอบ (T) = 35 °C

$$c = 351.9 \text{ m/s}$$

ที่ระนาบทดสอบ A

ที่ Dimmer control ระดับ 6 $V = 5.71 \text{ m/s}$

$$\text{จะได้} \quad Ma = \frac{5.71}{351.9} = 0.016$$

ที่ระนาบทดสอบ B

ที่ Dimmer control ระดับ 6 $V = 5.66 \text{ m/s}$

$$\text{จะได้} \quad Ma = \frac{5.66}{351.9} = 0.016$$

ที่ระนาบทดสอบ C

ที่ Dimmer control ระดับ 6 $V = 5.57 \text{ m/s}$

$$\text{จะได้} \quad Ma = \frac{5.57}{351.9} = 0.016$$

ที่ระนาบทดสอบ D

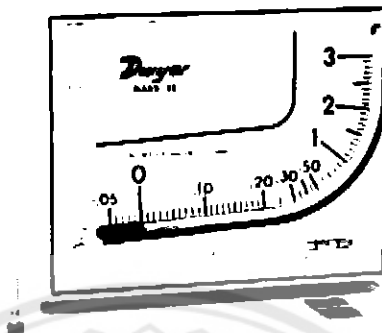
ที่ Dimmer control ระดับ 6 $V = 5.73 \text{ m/s}$

$$\text{จะได้} \quad Ma = \frac{5.73}{351.9} = 0.016$$

ผลจากการคำนวณที่แต่ละระนาบทดสอบ โดยใช้ Dimmer Control ระดับ 6 พบว่า เลขมัค $Ma < 1$ จึงเป็นการไหลที่ความเร็วใต้เสียง (subsonic flow)



Dwyer Mark II Series Molded Plastic Manometers
 Specifications - Instructions and Operation



Mark II Model No. 25
 inclined-vertical manometer,
 (shown with optional A-612 portable stand)

Dwyer Mark II Manometers come in a variety of ranges. Make sure the oil being used is for the correct manometer.

Mark II #25, 27, MM-80 and M-700 Pa use red gage oil (specific gravity 0.826).

Mark II #26, 28 and MM180 use blue gage oil (specific gravity 1.9).

If additional oil is required, call or fax nearest Dwyer office listed at bottom of page.

INSTALLATION

Position manometer on a vertical surface. Drill two 1/8" or 9/64" holes on a vertical line 315/16" apart. Loosely mount manometer with self-tapping screws provided. Adjust gage until level bubble is centered in level vial, then secure the manometer tightly.

For portable use, order optional A-612 Portable Stand.

FILLING

Turn the zero set knob counterclockwise until it stops, then turn clockwise 3 full turns. This puts zero in approximately the middle of the travel adjustment in either direction. Remove the fill plug and fill with gage fluid until fluid reaches zero on scale. Minor adjustments can be made to adjust zero by adjusting zero knob. Replace fill plug. If gage is overfilled, remove excess by inserting pipe cleaner through the fill port to blot up excess oil.

MAINTENANCE

Check oil level regularly and adjust zero with zero adjust knob. Be sure tubing connections are disconnected and gage is open to atmosphere before adjusting zero.

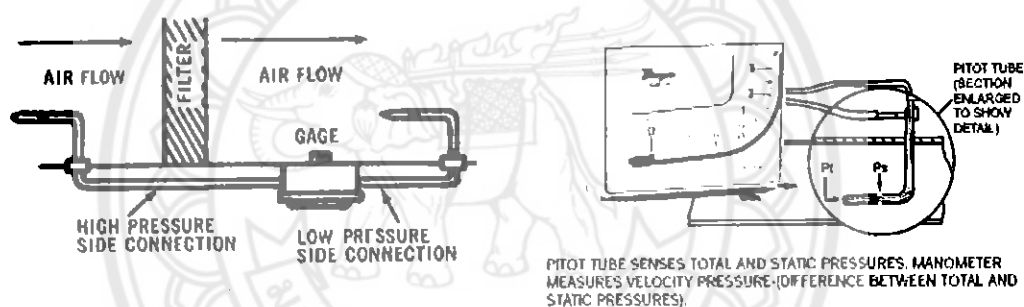
Clean with mild soap and water. Avoid any cleaning fluids which may result in damaging the gage.

ACCESSORIES

Each Mark II manometer includes two tubing connectors for 1/8" pipe or sheet metal ducts, two mounting screws, 3/4 oz. bottle of indicating fluid, red and green pointer flags, 8' of double column tubing and instructions.

APPLICATIONS

MARK II MANOMETER



AIR FILTER GAGE

Mount gage within 3 ft. of filter bank. Install tubing adapters on each side of filter. Run tubing from clean side of filter to positive pressure side of gage (left fitting). Run downstream side to low pressure side of gage (right fitting). Install green and red arrows adjacent to indicating tube to indicate filter condition.

AIR VELOCITY METER

A pitot tube should be used for air velocity readings. Install the pitot tube and gage carefully to ensure accuracy. Select a location for the pitot tube with at least four diameters of smooth straight sections of duct both upstream and downstream. Install pitot tube in the center of duct with tip directed into air stream. Connect the right angle (leg parallel to tip) to negative (right fitting) and straight pitot tube connection to positive (left connection) of gage. The velocity reading shown on the gage is the center or maximum velocity. For average velocity across the full area, multiply by a factor of 0.9.

No's. 27 and 28 require pitot tube at additional cost. See Bulletin F-41-F.

The velocity indicated is for dry air at 70°F, 29.9" barometric pressure and a resulting density of 0.075 lb/ft³. For variation from these standard conditions, corrections may be based upon the following data.

AIR VELOCITY CALCULATIONS:

$$\text{Air Velocity} = 1096.2 \times \sqrt{\frac{P_v}{D}}$$

where P_v = velocity pressure in inches of water

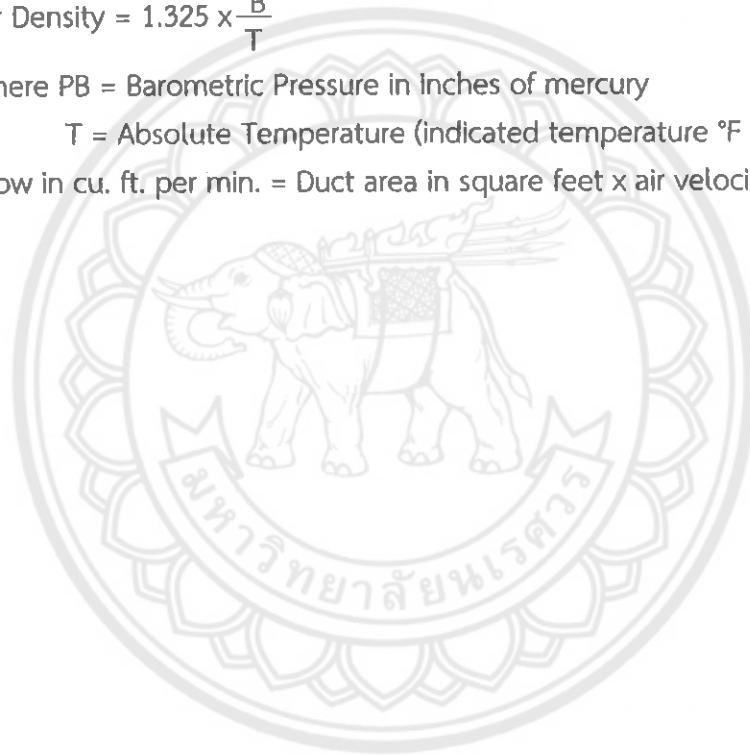
D = Air density in lb/ft³

$$\text{Air Density} = 1.325 \times \frac{P_B}{T}$$

where P_B = Barometric Pressure in Inches of mercury

T = Absolute Temperature (indicated temperature °F plus 460)

Flow in cu. ft. per min. = Duct area in square feet x air velocity in ft. per min.

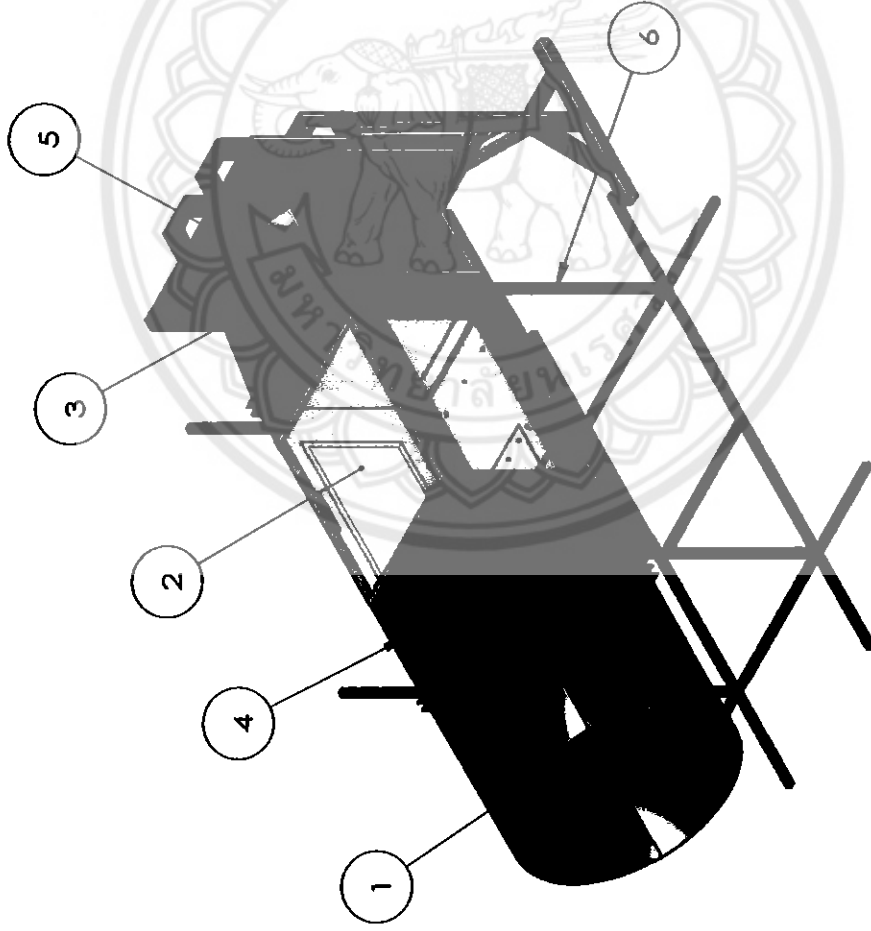




ภาคผนวก จ

แบบร่างอุโมงค์ลม

มหาวิทยาลัยนเรศวร



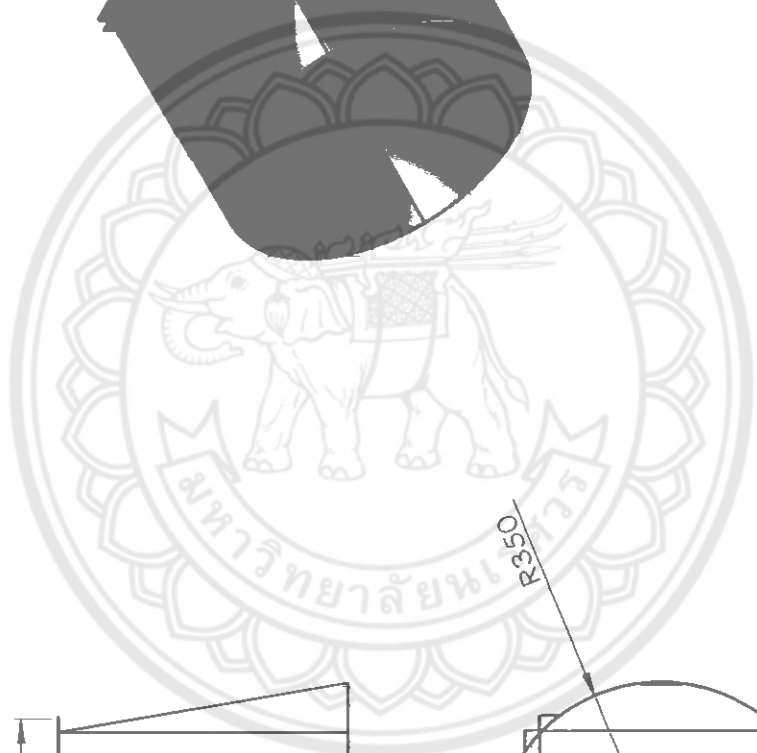
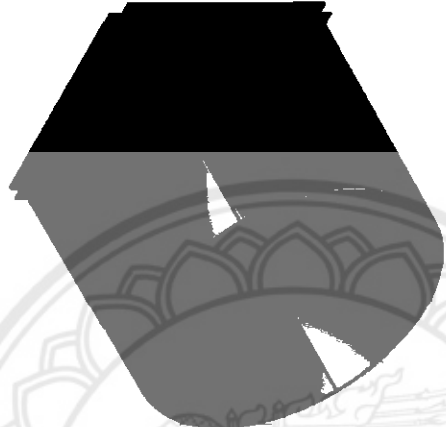
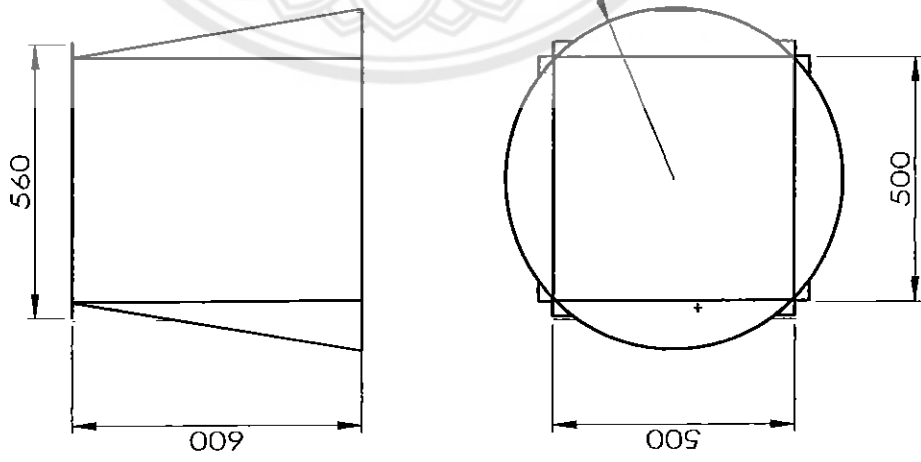
| NO. | PART NAME |
|-----|-------------------------|
| 1 | ส่วนอากาศแพะเข้า |
| 2 | ส่วนปฏิบัติงาน |
| 3 | ส่วนอากาศแพะออก |
| 4 | รังผึ้ง |
| 5 | ส่วนกำลัง |
| 6 | โครงสร้างรองรับชุดทดสอบ |

FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY

Name : ชุดทดสอบกังหันลมขนาดเล็ก

DN BY: Mechanical Project SCALE : 1:15 A 4

Dimension : mm DATE : 10/05/12 PLATE: 1/7



FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY

Name : ส่วนอากาศแพรงเค้า (Contraction)

DN BY: Mechanical Project SCALE : 1:15 A 4

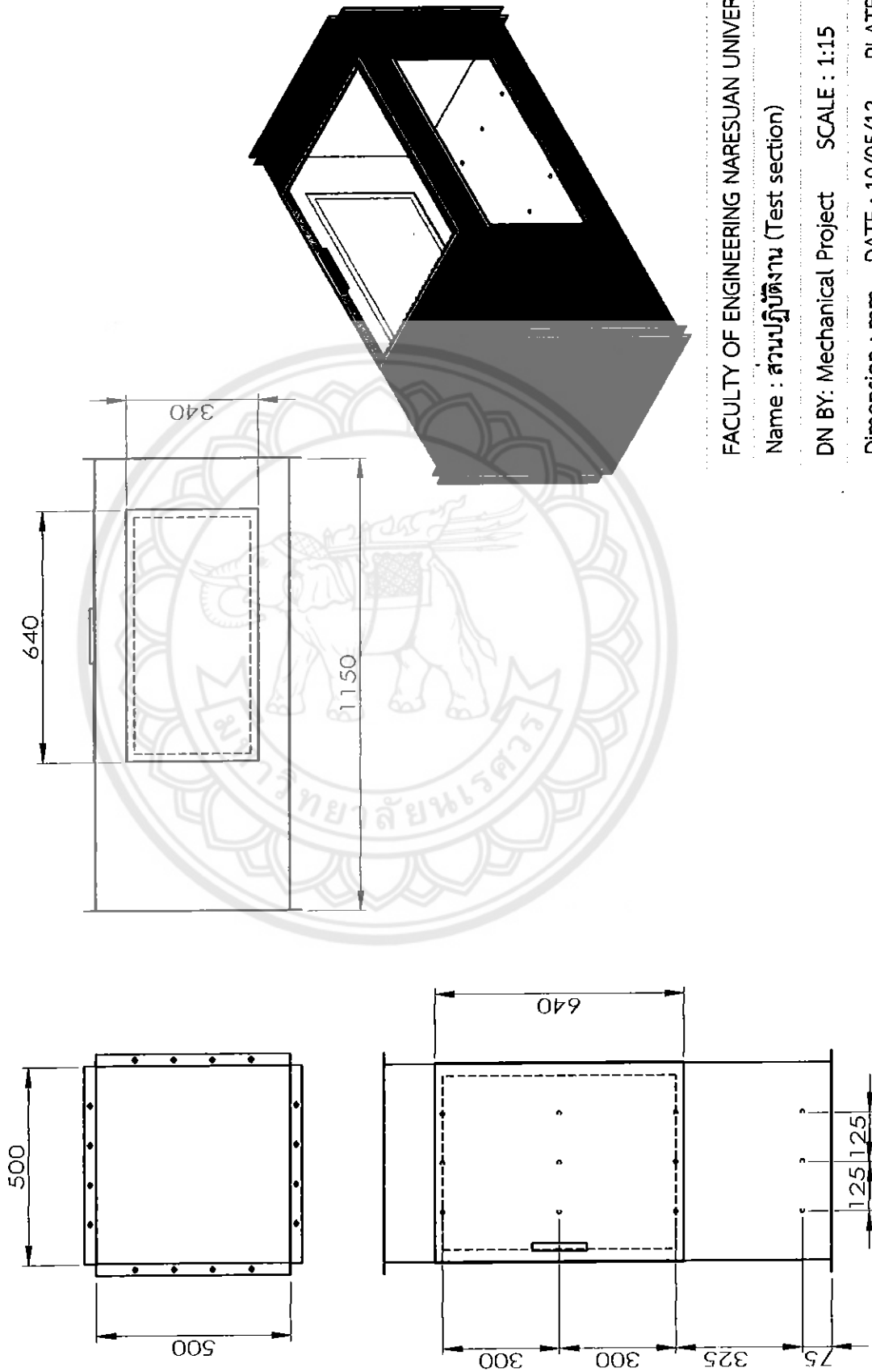
Dimension : mm DATE : 10/05/12 PLATE: 2/7

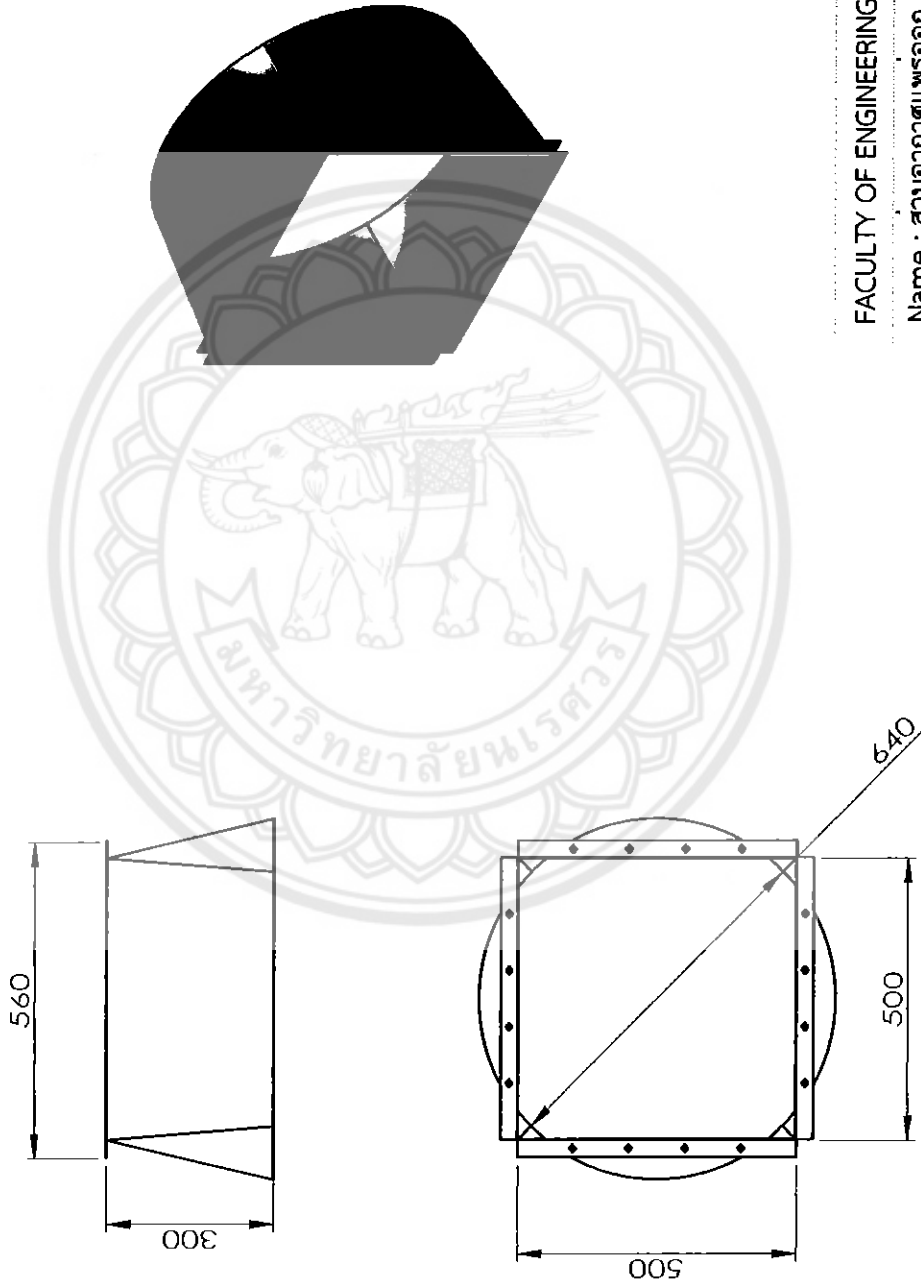
FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY

Name : ส่วนปฏิบัติงาน (Test section)

DN BY: Mechanical Project SCALE : 1:15 A 4

Dimension : mm DATE : 10/05/12 PLATE: 3/7



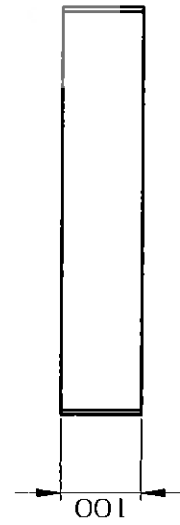
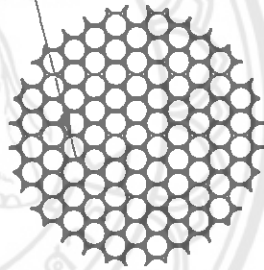
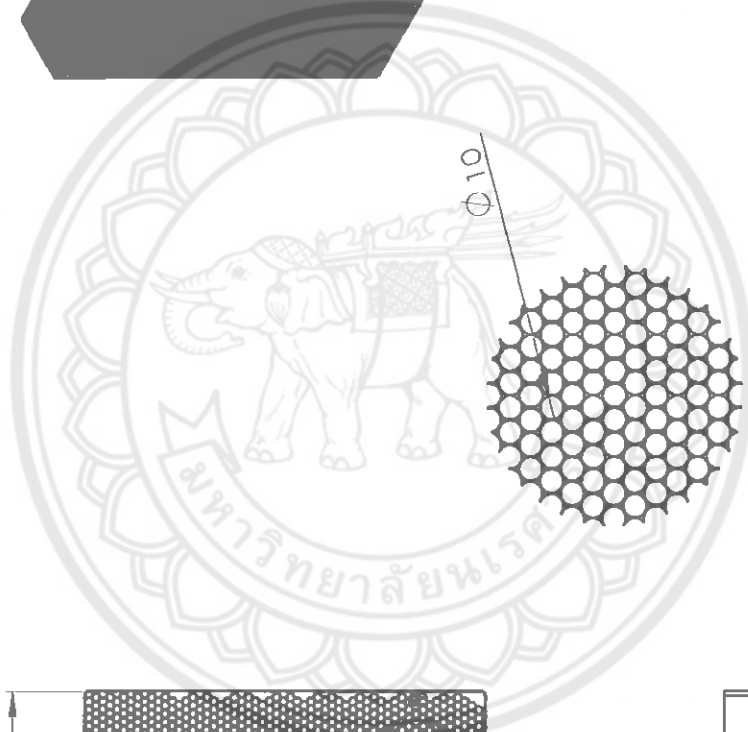
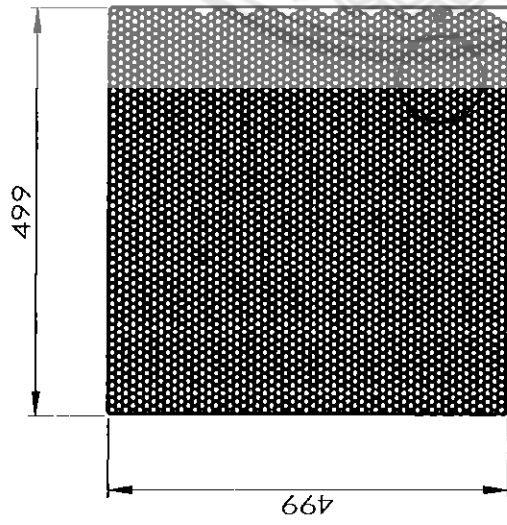


FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY

Name : ส่วนอากาศแพร่อก (Diffuser)

DN BY: Mechanical Project SCALE : 1:15 A 4

Dimension : mm DATE : 10/05/12 PLATE: 4/7



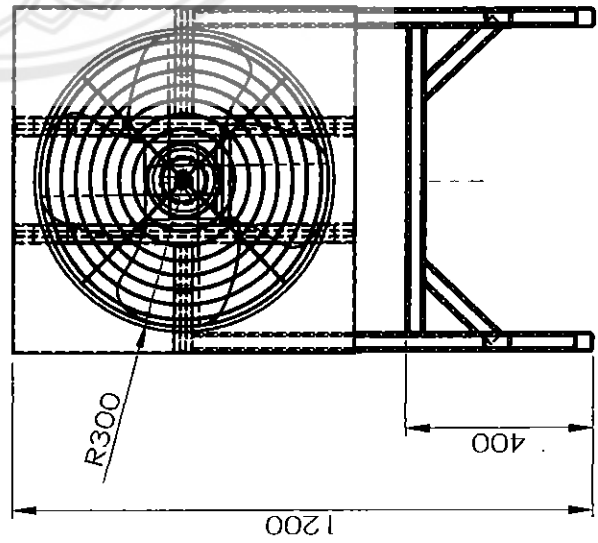
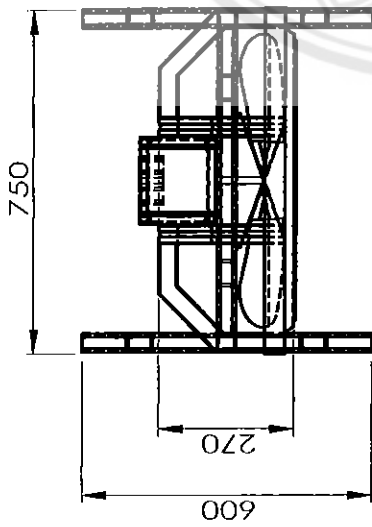
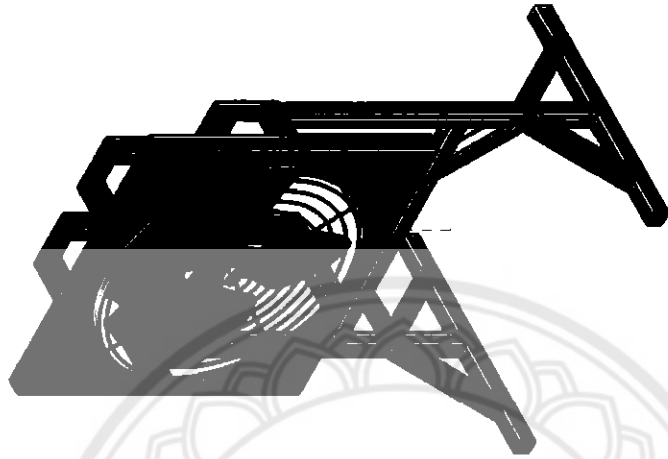
FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY

Name : รัชนี (Honey-comb)

DN BY: Mechanical Project SCALE : 1:15 A 4

Dimension : mm DATE : 10/05/12 PLATE: 5/7

DETAIL B
SCALE 1 : 3

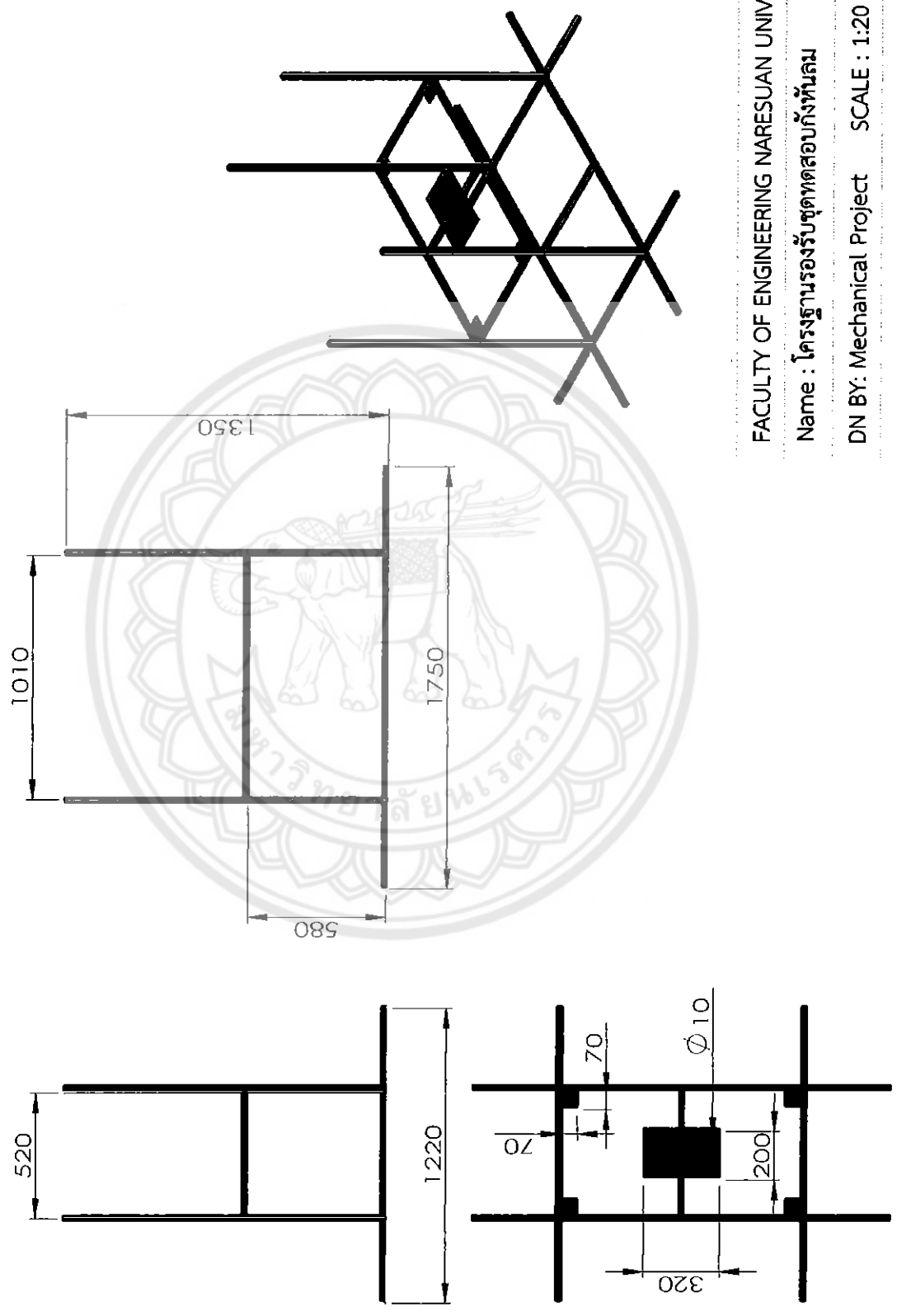


FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY

Name : สอนกำลัง (Power Section)

DN BY: Mechanical Project SCALE : 1:15 A 4

Dimension : mm DATE : 10/05/12 PLATE: 6/7



FACULTY OF ENGINEERING NARESUAN UNIVERSITY

Name : โครงการรองรับชุดทดสอบกังหันลม

DN BY: Mechanical Project SCALE : 1:20 A 4

Dimension : mm DATE : 10/05/12 PLATE: 7/7