

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด
(Design and construction of a low-speed closed-loop wind tunnel)



T104075

โดย

นายธนวัฒน์ สุขพานิช
นายนันทวัช อ่วมเจริญ
นางสาวศุภกัญญา ขุนจัน

อาจารย์ที่ปรึกษา
สยาม สวงรัมย์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...104075
วัน,เดือน,ปี... 2 8 ต.ค. 2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

Design and construction of a low-speed closed-loop wind tunnel

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| 1. นายธนวัฒน์ สุขพานิช | รหัสประจำตัว 49015494 |
| 2. นายนนท์ธวัช อ่วมเจริญ | รหัสประจำตัว 49015496 |
| 3. นางสาวสุกัญญา ขุนจัน | รหัสประจำตัว 49015547 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

นายธนวัฒน์ สุขพานิช 49015494

นายนนท์วิช อ่วมเจริญ 49015496

นางสาวสุกัญญา ขุนจัน 49015547

สยาม สงวนรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของปริญญาพนธ์เล่มนี้คือการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิดขนาดเล็ก โดยการใช้อุปกรณ์ของอุโมงค์ลมแบบเปิดที่มีอยู่แล้ว เพื่อใช้เป็นห้องทดลองอากาศพลศาสตร์ที่ภาควิชาของเรา อุโมงค์ลมมีหน้าตัดทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีความยาวด้าน 0.3 เมตร ความยาวของหน้าตัดทดสอบเป็น 0.6 เมตร ต้นกำลังเป็นมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 6.2 กิโลวัตต์ และสามารถปรับความเร็วจาก 0 ถึง 20 เมตรต่อวินาที ด้วยลินี่ปิกซีเสื่อ การออกแบบอยู่บนพื้นฐานของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้และไม่คำนึงถึงความหนืด หลังจากการสร้าง อุโมงค์ลมเสร็จสมบูรณ์ด้วยต้นทุน 11,000 บาท การออกแบบอุโมงค์ลมแบบปิดช่วยให้ได้ความเร็วลมสูงสุดมากกว่าความเร็วลมสูงสุดของอุโมงค์ลมแบบเปิดที่ใช้ต้นกำลังและใบพัดขนาดเดียวกัน 5 เมตรต่อวินาที อุโมงค์ลมสามารถทำงานได้ในย่านความเร็วลมที่ต้องการ นอกจากนั้น อุโมงค์ลมมีเสียงดิ่งน้อยลงและใช้พลังงานน้อยลงที่ความเร็วลมเดียวกัน สุดท้ายอุโมงค์ลมจะใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับการศึกษาและการทดสอบแรงอากาศพลศาสตร์ ในอนาคตจะใช้อุโมงค์ลมตัวนี้เพื่อการวิจัยและพัฒนาอุโมงค์ลมขนาดเล็กให้ดียิ่งขึ้น

Design and Construction of a Low-Speed Closed-Loop Wind Tunnel

Tanawat Sukphanit	49015494
Nonthawat Aumcharoen	49015496
Sukanya Khunjan	49015547
Sayam Saganrum	Advisor

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to design and construction a small low-speed closed-loop wind tunnel for aerodynamic laboratory at our department. The wind tunnel has a square testing section, $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$. It is driven by 6.2 kW three-phase motor, and is able to adjust wind speed from 0 to 20 m/s. Because of wind generated is low speed, the design is based on invicid and incompressible flow.

After construction, the wind tunnel is finished within budget 11,000 baht. The tunnel can perform wind speed as design, more than the maximum speed of the old wind tunnel used the same motor at 15 m/s. Moreover, the wind tunnel is quieter, and consumes less energy at the same wind speed. Finally, this wind tunnel will be in service at the Department for learning and testing some aerodynamic device, as well as, doing further research to develop and improve the design of small wind tunnels.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คงมีอาจเสร็จลงได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือและความร่วมมือจากหลาย ๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงคือ อาจารย์ สยาม สงวนรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ อธิบายหลักการและแนวทางต่าง ๆ จนนักศึกษาเข้าใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการ ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ อาจารย์ จารุวัตร เจริญสุข ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วัดต่าง ๆ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำโครงการชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 แนวคิดและหลักการของอุโมงค์ลม	
1.1 บทนำ	1
1.2 ชนิดของอุโมงค์ลม	2
บทที่ 2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิดและแบบเปิด	
2.1 อุโมงค์ลมแบบเปิด	4
2.2 อุโมงค์ลมแบบปิด	5
บทที่ 3 หลักการออกแบบอุโมงค์ลม	
3.1 การพิจารณากำลัง	6
3.2 การออกแบบและคำนวณค่าการสูญเสีย	8
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด	
4.1 แนวคิดและวัตถุประสงค์ของการออกแบบอุโมงค์ลม	17
4.2 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม	17
4.3 อุปกรณ์วัด	17
4.4 ขนาดที่ออกแบบ	17
4.5 รายการวัสดุที่ใช้สร้างอุโมงค์ลม	31
4.6 ขั้นตอนการประกอบอุโมงค์ลม	31
4.7 ภาพแสดงส่วนต่าง ๆ ของอุโมงค์ลม	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	
5.1 การทดลองหาความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometers)	38
บทที่ 6 การทดสอบอุโมงค์ลมเทียบกับค่ามาตรฐาน	
6.1 การทดสอบอุโมงค์ลมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับค่ามาตรฐาน	42
6.2 การทดสอบหาค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย	46
บทที่ 7 สรุปผลการทดลอง	48
ภาคผนวก	50
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุโมงค์แบบเปิด	4
2-2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุโมงค์แบบปิด	5
3-1 ตารางแสดงกำลังต่อหน่วยพื้นที่	7
3-2 ตารางแสดงการสูญเสียรวม	16
5-1 ค่าความเร็วจากเครื่องทดสอบ	39
6-1 ผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน	44
6-2 ผลการทดลองการหาความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย	47



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1-1 อุโมงค์ลมแบบเปิด	2
1-2 อุโมงค์ลมแบบปิด	3
2-1 อุโมงค์ลมแบบเปิด	4
2-2 อุโมงค์ลมแบบปิด	5
3-1 กราฟแสดงกำลังต่อหน่วยพื้นที่กับความเร็ว	7
3-2 อุโมงค์แบบปิด	7
3-3 หน้าตัดทดสอบ	8
3-4 คิวฟิวเซอร์	10
3-5 ลักษณะของเวนไกด์	12
3-6 ลักษณะต่างๆ ของตัวปรับการไหล (Honeycombs or Turbulence screen)	14
4-1 ชุดบังคับทิศทางการไหลก่อนติดตั้ง	32
4-2 แผงกรองการไหลแนวตรงชุดที่ 1	32
4-3 แผงกรองการไหลแนวตรงชุดที่ 2	33
4-4 หน้าตัดทดสอบ	33
4-5 แผงไฟฟ้าควบคุมโบลเวอร์	34
4-6 ด้านข้างของอุโมงค์ลม	34
4-7 การประกอบอุโมงค์ลม	35
4-8 การประกอบอุโมงค์ลม	35
4-9 การประกอบอุโมงค์ลม	36
4-10 การประกอบอุโมงค์ลม	36
4-11 อุโมงค์ลมที่เสร็จสมบูรณ์	37
4-12 ก่อนติดตั้งเครื่องมือวัด	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5-1 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer)	38
5-2 โพรไฟล์แสดงการกระจายความเร็วการไหล	40
6-1 ภาพการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน	42
6-2 Free body diagram	43
6-3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ค่าเรย์โนลด์ต่าง ๆ	45



สัญลักษณ์

a	ความเร็วเสียง (m/s)
c_d	สัมประสิทธิ์แรงต้าน
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)
f	ตัวประกอบความเสียดทาน
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
h_L	การสูญเสียที่ตำแหน่งต่างๆ (m)
k	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ
K_{ex}	สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากการขยายหน้าตัด
K_f	สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากความเสียดทาน
K_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ตำแหน่งต่างๆ
K_{mesh}	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของตะแกรง
l	ความยาวของพื้นผิวทดสอบ (m)
Ma	เลขมัค
P_a	กำลังที่ของไหลได้รับ (kW)
Re	เลขเรย์โนลด์ส์
T	อุณหภูมิของอากาศ (K)
V	ความเร็วลม (m/s)
V_1	ความเร็วลมที่ได้จากมานอมิเตอร์ (m/s)
w_w	ความกว้างหนึ่งช่องของตะแกรง (m)
β_s	สัมประสิทธิ์ความพรุนของตะแกรง
γ	ความถ่วงจำเพาะของอากาศ (N/m^3)
μ	ความหนืดสัมบูรณ์ ($N.s/m^2$)
ν	ความหนืดจลน์ (m^2/s)
θ_e	มุมเอียงสมมูล
ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

แนวคิดและหลักการของอุโมงค์ลม

1.1 บทนำ

ก่อนจะกล่าวถึงแนวคิดในการสร้างอุโมงค์ลมให้มีความเร็วที่เหมาะสมตามต้องการ ควรจะตั้งคำถามก่อนสร้างว่า อะไรคือสิ่งกระตุ้นให้สร้างและพัฒนาอุโมงค์ลมมาจนถึงปัจจุบันนี้

โลกเรานั้นถูกห่อหุ้มด้วยมหาสมุทร โดยมีน้ำและอากาศห่อหุ้มอยู่ ประชาชนเกือบทั้งหมดต้องใช้น้ำในการอุปโภคและบริโภคและใช้อากาศในการหายใจ โดยธรรมชาติแล้วผลกระทบของลมไม่ว่าจะเป็น ลมอ่อน ๆ ลมแรงหรือพายุย่อมมีผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชน แต่ลมก็ยังมิประโยชน์ในการเดินทางโดยใช้ลมควบคุมทิศทางในการเล่นเรือใบ และแน่นอนคนเรายังประหลาดใจที่จะอธิบายถึงความว่องไวของนกและปลาในการบินและว่ายน้ำได้ เมื่อร้อยปีมาแล้วได้มีผู้ประสบความสำเร็จในการสร้างเครื่องบินเป็นครั้งแรก ต่อมาได้มีการพัฒนาการออกแบบเครื่องบิน โดยที่ปลายด้านหลังของปีกเครื่องบินสามารถปรับมุมขึ้นลงได้ เพื่อช่วยในการต้านอากาศขณะลงจอดและใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน รูปร่างของปีกเครื่องบินนั้นต้องพิจารณาจากหลักอากาศพลศาสตร์ที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงมิติในการบิน รวมทั้งร่อนนับล้านคันที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ รูปทรงภายนอกของมันมีผลกับแรงทางอากาศพลศาสตร์ทั้งสิ้น โดยนักออกแบบต้องคำนึงถึงแรงต้านอากาศและแรงยกของอากาศให้เหมาะสมกับการใช้งาน นักออกแบบอาคารสูงก็ต้องคำนึงถึงหลักอากาศพลศาสตร์ในการออกแบบด้วย ชิ้นส่วนที่จะนำไปใช้ในการสร้างอาคารจะถูกนำไปทดสอบความแข็งแรงจากผลกระทบของลมที่มีความเร็วสูง ซึ่งหากชิ้นส่วนนั้นผ่านการทดสอบและได้รับการยอมรับก็สามารถนำไปสร้างอาคารในพื้นที่ ที่มีลมแรงหรือมีพายุได้ เช่นรัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา รูปทรงของเรือและระบบขับเคลื่อนจะถูกคำนวณเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุดแต่ใช้พลังงานน้อยที่สุด การพิจารณาทางอากาศพลศาสตร์เป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการออกแบบและสร้างสะพานขนาดใหญ่ แรงที่เกิดขึ้นจากผลกระทบจากการเคลื่อนที่ของอากาศได้มีการศึกษา ค้นคว้าและทดลองอย่างต่อเนื่อง จนได้มีการสร้างเครื่องมือชนิดหนึ่งขึ้นในปี 1960 และใช้ต่อเนื่องกันมาจนถึงปัจจุบัน การค้นพบครั้งนี้ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเครื่องมือชิ้นแรกสำหรับการทดลองทางอากาศพลศาสตร์ คืออุโมงค์ลม คุณสมบัติเฉพาะและผลที่ได้จากการทดลองโดยทั่วไปจะนำไปใช้คำนวณเกี่ยวกับหลักอากาศพลศาสตร์ เพื่อความสะดวกในการออกแบบ การวางแผนการทดลอง และการอธิบายเกี่ยวกับข้อมูลผลลัพธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

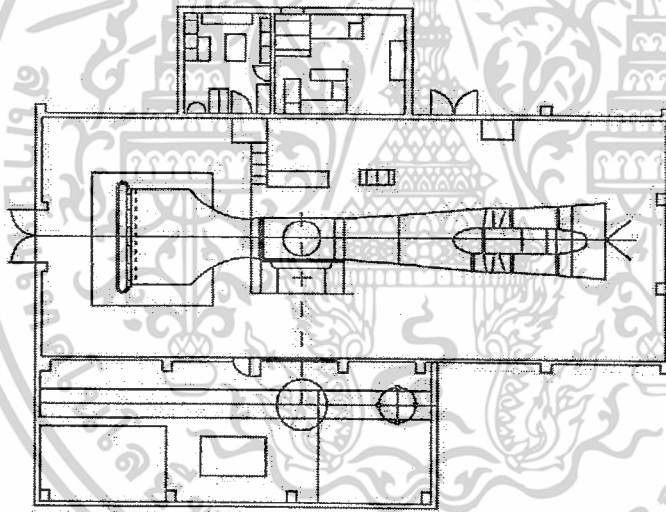
1.2 ชนิดของอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือระบบเปิดและระบบปิด แล้วเรายังสามารถแบ่งหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลมออกเป็น 2 แบบ คือหน้าตัดทดสอบแบบเปิดและแบบปิด

1.2.1 อุโมงค์ลมแบบเปิด

หลักการทำงาน

อากาศจากภายนอกจะถูกดูดโดยโบลเวอร์ผ่านแผงกรองการไหล อากาศที่ไหลออกอย่างสม่ำเสมอจากแผงกรองการไหล จะไหลเข้าออสซิลเพื่อเพิ่มความเร็วก่อนไหลเข้าหน้าตัดทดสอบ หลังจากออกจากหน้าตัดทดสอบก็จะถูกลดความเร็วโดยดิฟฟิวเซอร์แล้วไหลออกสู่ภายนอก



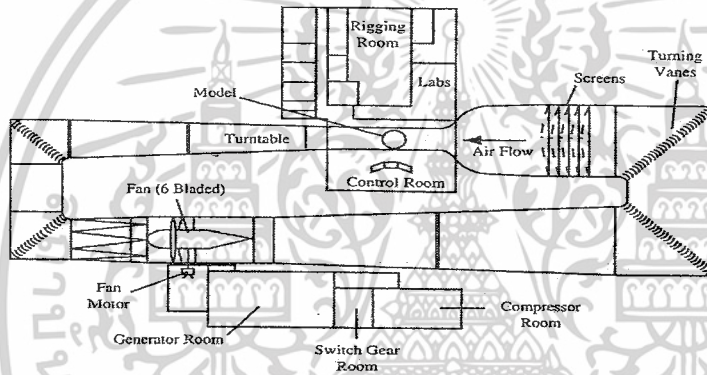
รูปที่ 1-1 อุโมงค์ลมแบบเปิด

1.2.2 อุโมงค์ลมแบบปิด

หลักการทำงาน

อากาศภายในอุโมงค์ลมจะหมุนวนอย่างต่อเนื่องเพื่อเสริมความเร็วลมแก่รอบการทำงานต่อไป ซึ่งอาจมีการแลกเปลี่ยนอากาศจากภายนอกเพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่มีการแลกเปลี่ยนเลย

อุโมงค์ลมแบบปิดส่วนใหญ่ที่นิยมใช้กันมักเป็นแบบหมุนวนทางเดียว ถึงแม้จะมีการสร้างอุโมงค์ลมแบบเปิดที่อากาศหมุนวนกลับได้ 2 ทางก็ตามและหน้าตัดทดสอบจะใช้แบบหน้าตัดทดสอบแบบปิดหรือแบบเปิดก็ได้ การสร้างอุโมงค์ลมส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานและต้นทุนเป็นหลัก

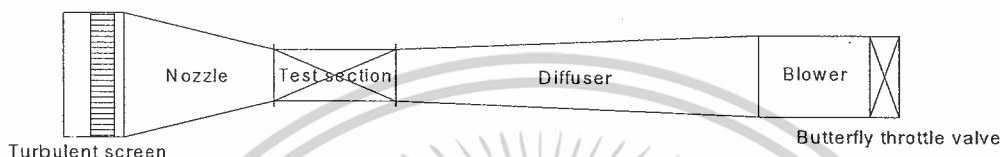


รูปที่ 1-2 อุโมงค์ลมแบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำ แบบปิดและแบบเปิด

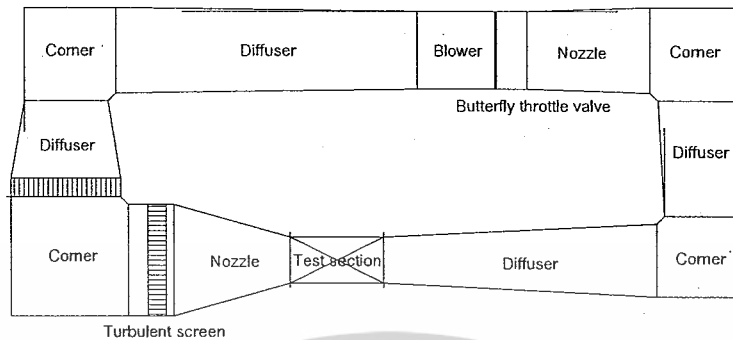


รูปที่ 2-1 อุโมงค์ลมแบบเปิด

2.1 อุโมงค์ลมแบบเปิด

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุโมงค์ลมแบบเปิด

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ค่าใช้จ่ายในการสร้างมีราคาถูกกว่าระบบปิด	1. ทางเข้าและทางออกเปิดสู่บรรยากาศ สภาพอากาศที่อุณหภูมิต่ำมีผลต่อการทดลอง
2. ทำความสะอาดง่ายเมื่อทดสอบลักษณะการไหลของอากาศโดยฉีดควันเข้าไปเพราะควันที่ถูกฉีดเข้าไปเมื่อผ่านการทดสอบแล้วจะระบายออกสู่บรรยากาศ	2. ต้องใช้พลังงานมากในการสร้างความเร็วการไหลเพราะกระแสลมหลังการทดสอบถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ
	3. เสี่ยงจากการทดสอบจะดึงรวมนบุคคลภายนอก



รูปที่ 2-2 อุโมงค์ลมแบบปิด

2.2 อุโมงค์ลมแบบปิด

ตารางที่ 2-2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของอุโมงค์ลมแบบปิด

ข้อดี	ข้อเสีย
1. กระแสลมจะไหลเวียนในอุโมงค์ลม โดยผ่านมุมเหลี่ยมและแผงกรองการไหลซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพการไหลได้ และไม่มีผลกระทบจากสภาพอากาศภายนอก	1. ต้นทุนในการสร้างสูงกว่าระบบเปิดเพราะต้องสร้างชุดที่ทำลมกลับมาใช้งานอีกครั้ง
2. ขณะอุโมงค์ลมถูกใช้งาน เสียงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบจะเงียบกว่าระบบเปิด	2. มีความยุ่งยากในการทำความสะดวกมากกว่าระบบเปิด
3. ในการสร้างความเร็วลมจะใช้พลังงานที่น้อยกว่าระบบเปิด เพราะพลังงานที่ทำให้ลมเคลื่อนที่ในรอบแรกยังคงเหลืออยู่ทำให้พลังงานที่ใช้เพิ่มความเร็วลมในรอบต่อ ๆ ไปน้อยลง	3. ถ้าต้องการใช้อุโมงค์ลมให้เกิดประโยชน์สูงสุด จำเป็นต้องรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการทดสอบให้ได้ตามค่าที่กำหนด เพราะหากทำการทดสอบเป็นเวลานานจะเกิดความร้อนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการออกแบบอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมถูกออกแบบและสร้างเพื่อเป็นอุปกรณ์ในการทดสอบแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ เช่น ใช้ทดสอบโครงสร้างของปีก หรือทดสอบการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านยานพาหนะ

สิ่งแรกที่ถูกพิจารณาในการออกแบบอุโมงค์ลมคือขนาดและรูปร่างของหน้าตัดทดสอบ เพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการวางแผนการออกแบบชิ้นส่วนต่อ ๆ ไป ส่วนใหญ่แล้วอุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ใช้ทดสอบยานพาหนะ เพื่อศึกษาสมรรถนะ ประสิทธิภาพ การสิ้นเปลืองน้ำมัน และความแข็งแรงของโครงสร้าง และยังมีพิจารณาขอบเขตของความดัน การไหลของอากาศ และตัวแปรอื่น ๆ ประกอบด้วย

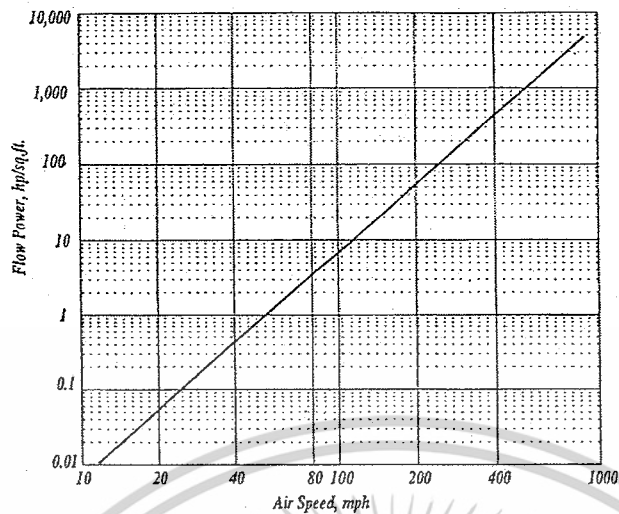
พื้นที่หน้าตัดทดสอบเป็นพื้นฐานในการพิจารณาส่วนประกอบทั้งหมด ขนาดหน้าตัดทดสอบและความเร็วที่ต้องการจะถูกพิจารณาจากกำลังของโบลเวอร์ และลำดับต่อจากนั้นคือการพิจารณาเลขเรย์โนลด์ส์และงบประมาณในการสร้าง

3.1 การพิจารณากำลัง

กำลังที่นำมาพิจารณาที่บริเวณหน้าตัดทดสอบ สามารถแสดงในเทอมของความหนาแน่น พื้นที่หน้าตัด และความเร็วการไหลที่ผ่านหน้าตัดทดสอบ แสดงโดยสมการ

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (3.1)$$

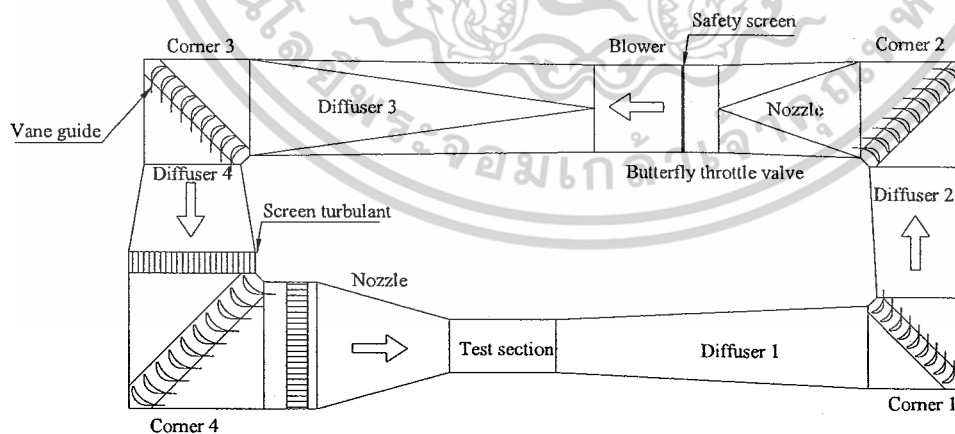
จากสมการ (3.1) ได้กำลังที่ต้องการสำหรับความเร็วลมที่ 20 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 0.419 กิโลวัตต์



รูปที่ 3-1 กราฟแสดงกำลังต่อหน่วยพื้นที่กับความเร็ว

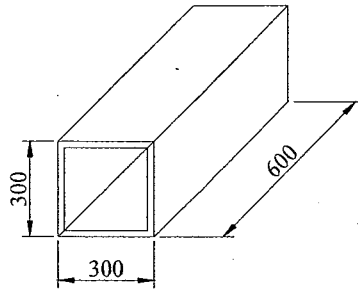
ตารางที่ 3-1 ตารางแสดงกำลังต่อหน่วยพื้นที่

V (mph)	V (m/s)	Mach Number	hp/ft ²	kW/m ²
20	8.94	0.026	0.055	0.44
50	22.35	0.066	0.85	6.88
100	44.7	0.131	6.82	54.72
200	89.4	0.263	54.56	437.3
300	134.1	0.394	184.15	1476.2
400	178.8	0.525	436.51	3499.9



รูปที่ 3-2 อุโมงค์ลมแบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-3 หน้าตัดทดสอบ

3.2 การออกแบบและคำนวณค่าการสูญเสีย [3]

เมื่อเปิดเครื่องกำเนิดลม (Blower) ลมจะไหลผ่านดิวีเซอร์ชุดที่ 3 เพื่อลดความเร็วลมและลดการสูญเสียก่อนเข้ามมูเลี้ยวที่ 3 หลังจากผ่านมมูเลี้ยวที่ 3 ลมจะไหลผ่านดิวีเซอร์ชุดที่ 4 และไหลผ่านชุดกรองการไหลชุดที่ 1 เพื่อปรับความสม่ำเสมอของลมก่อนเข้ามมูเลี้ยวที่ 4 หลังจากผ่านมมูเลี้ยวที่ 4 ลมจะไหลผ่านชุดกรองการไหลชุดที่ 2 และผ่านนอสเซิลเพื่อปรับความสม่ำเสมอของลมและเพิ่มความเร็วลมก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบ หลังจากลมไหลผ่านหน้าตัดทดสอบก็จะถูกลดความเร็วและลดการสูญเสียโดยดิวีเซอร์อีก 2 ชุด ก่อนจะผ่านนอสเซิลและเข้าเครื่องกำเนิดลมเพื่อทำงานในรอบต่อไป

ในการออกแบบอุโมงค์ลมจะมีส่วนที่จะนำมาพิจารณาถึงการสูญเสียที่มีผลทำให้ความเร็วลมลดลงคือ หน้าตัดทดสอบ ดิวีเซอร์ มมูเลี้ยว นอสเซิล ตัวปรับการไหล และตะแกรงนิรภัย

3.2.1 หน้าตัดทดสอบ (Test-section)

หน้าตัดทดสอบจะมีทั้งที่เป็นหน้าตัดกลมและหน้าตัดเหลี่ยม ขึ้นอยู่กับการใช้งาน แต่โดยทั่วไปจะใช้หน้าตัดสี่เหลี่ยมเพราะง่ายต่อการติดตั้งชิ้นงานทดสอบ

การสูญเสียในหน้าตัดทดสอบ

ปกติค่าการสูญเสียในหน้าตัดทดสอบอาจจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากถ้าเป็นวัตถุผิวเรียบ แต่ในกรณีที่ใช้ทดสอบกับความเร็วสูง ๆ ก็จะได้เห็นว่าค่าการสูญเสียจะมีค่าเพิ่มขึ้น ในการออกแบบสามารถป้องกันได้โดยการทำให้หน้าตัดทดสอบมีขนาดไม่ยาวมากนัก

ความสัมพันธ์ของตัวแปรสำหรับหน้าตัดทดสอบกรณีมีการไหลแบบสม่ำเสมอสมการหาการสูญเสียของหน้าตัดทดสอบจะใช้สมการเดียวกันกับหน้าตัดกลม

$$\frac{\Delta p}{\rho} = f \frac{LV^2}{D_h 2} \quad (3.2)$$

เมื่อ	Δp	คือความดันลดตลอดความยาวหน้าตัดทดสอบ
	L	คือความยาวหน้าตัดทดสอบ
	V	คือความเร็วเฉลี่ยที่หน้าตัดทดสอบ
	f	คือตัวประกอบความเสียดทาน
	ρ	คือความหนาแน่นของอากาศ
	D_h	คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) เป็นตัวประกอบรวมที่ใช้กับทุก ๆ กรณีซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของหน้าตัด

กรณีหน้าตัดกลม $D_h \equiv 2\sqrt{A/\pi}$ (3.3)

กรณีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยม $D_h = \frac{2ab}{a+b}$ (3.4)

เมื่อ	A	คือพื้นที่หน้าตัด
	a	คือความกว้าง
	b	คือความยาว

การออกแบบหน้าตัดทดสอบจะต้องออกแบบให้หน้าตัดทดสอบมีความยาว ≥ 2 เท่าของ D_h (Hydraulic diameter) วัสดุที่ใช้ทำหน้าตัดส่วนใหญ่ใช้แผ่นอะคริลิก การสูญเสีย (loss) จะขึ้นอยู่กับความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

สมการหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียของหน้าตัดทดสอบ

$$K_f = f \frac{L}{D_h} \quad (3.5)$$

สูตรที่ใช้หาค่าตัวประกอบความเสียดทานคือ

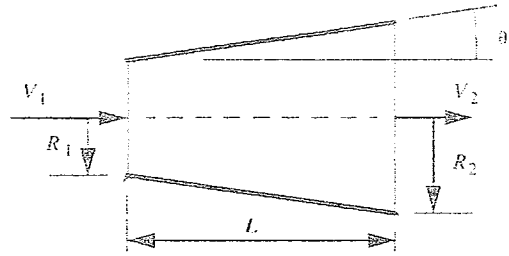
$$f = [2 \log_{10}(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8]^2 \quad (3.6)$$

จากสมการ (3.3) ถึง (3.6) ได้ค่าดังนี้

$$D_h = 0.3 \text{ เมตร} \quad f = 0.0136 \quad K_f = 0.0264$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)



รูปที่ 3-4 ดิฟฟิวเซอร์

ดิฟฟิวเซอร์มีส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนที่รับลมจากหน้าตัดทดสอบ และส่วนรับลมจากโบลเวอร์เรียกว่า รีเทิร์นดักต์ (Return duct) ดิฟฟิวเซอร์ติดตั้งไว้เพื่อลดความเร็วลม และทำให้การสูญเสียน้อยลงและเป็นส่วนประกอบที่ทำให้เกิดการไหลที่ความเร็วไม่เท่ากัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหน้าตัด ซึ่งจะเกิดเป็นช่วงหรือตลอดช่วงก็ได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ส่งผลให้เกิดการส่ายของใบพัด มีผลให้ความเร็วบริเวณหน้าตัดทดสอบเกิดเป็นระลอกคลื่น (Surging) ซึ่งเป็นเหตุทำให้การสูญเสียเพิ่มขึ้น

แต่การสั่นบางครั้งอาจมาจากการติดตั้งที่มีความหักเหไม่ตรงตามแนวทำให้เป็นสาเหตุหนึ่งของการสั่น

- ก. โดยทั่วไปจะออกแบบให้มุมอยู่ในช่วง 2 ถึง 3.5 องศา หรืออาจจะมีค่าน้อยกว่าก็ได้ สำหรับความยาวของดิฟฟิวเซอร์ต้องยาวอย่างน้อย 3 ถึง 4 เท่าของความยาวหน้าตัดทดสอบ
- ข. อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 เท่า หรืออาจจะมีน้อยกว่าก็ได้

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} \quad (3.7)$$

- ค. ความยาว L ต้องยาวอย่างน้อย 3 ถึง 4 เท่าของหน้าตัดทดสอบ
- ง. คำนวณหามุมเอียงสมมูล (Equivalent cone angle) จากสมการ

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{R_2 - R_1}{L} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R} - 1}{L/D_1} \right) \quad (3.8)$$

θ_e : มุมเอียงสมมูล (Equivalent cone angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียของคิฟิวเซอร์

ส่วนประกอบของคิฟิวเซอร์จะเกิดการสูญเสียสองส่วนด้วยกันคือการสูญเสียที่เกิดจากแรงเสียดทานและการสูญเสียที่เกิดจากการขยายหน้าตัด

$$K_d = K_f + K_{ex} \quad (3.9)$$

K_f คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียจากความเสียดทาน (Friction loss coefficient)

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2}\right) \frac{f}{8 \sin \theta} \quad (3.10)$$

สำหรับตัวประกอบความเสียดทานคำนวณในกรณีที่เป็นหน้าตัดคงที่ใช้เลขเรย์โนลด์ส์ตรงทางเข้าของคิฟิวเซอร์

K_{ex} คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียจากการขยายหน้าตัด (Expansion loss coefficient)

$$K_{ex} = K_e(\theta) \left(\frac{A_R - 1}{A_R}\right)^2 \quad (3.11)$$

$K_e(\theta)$ ต้องคำนึงถึงรูปร่างของหน้าตัดคิฟิวเซอร์และมุมเอียงสมมูล (Equivalent cone angle) โดยมีสมการดังต่อไปนี้

$$K_{e(circle)} = \begin{cases} 0.1033 - 0.02389\theta & \text{for } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1709 - 0.1170\theta + 0.03260\theta^2 + 0.001078\theta^3 \\ - 0.0009076\theta^4 - 0.00001331\theta^5 + 0.00001345\theta^6 \\ & \text{for } 1.5^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ -0.09661 + 0.04672\theta & \text{for } 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_{e(\text{square})} = \begin{cases} 0.09623 - 0.004152\theta & \text{for } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1222 - 0.04590\theta + 0.02203\theta^2 + 0.003269\theta^3 \\ -0.0006145\theta^4 - 0.00002800\theta^5 + 0.00002337\theta^6 \\ \text{for } 1.5^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ -0.01322 + 0.05866\theta & \text{for } 5^\circ < \theta \end{cases} \quad (3.13)$$

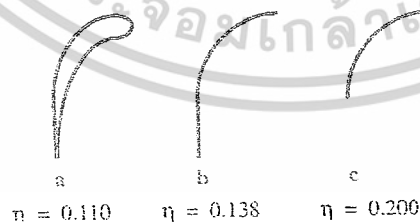
จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การสูญเสียสำหรับหน้าตัดกลม (3.12) และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส (3.13) ยิ่งคิฟิวเซอร์มีมุมเอียงสมมูลน้อยยิ่งมีการสูญเสียน้อย และพบว่าการสูญเสียของคิฟิวเซอร์มีค่าเป็น 2 ถึง 3 เท่า ของท่อกลม

จากสมการ (3.7) ถึง (3.13) ได้ค่าดังนี้

$A_{R2} = 2.54$	$\theta_{e2} = 2.74$	$K_{e2} = 0.20$	$K_{ex2} = 0.0702$
$A_{R4} = 1.37$	$\theta_{e4} = 3.07$	$K_{e4} = 0.24$	$K_{ex4} = 0.0175$
$A_{R10} = 1.21$	$\theta_{e10} = 0.74$	$K_{e10} = 0.09$	$K_{ex10} = 0.0028$
$A_{R12} = 1.71$	$\theta_{e12} = 10.2$	$K_{e12} = 0.59$	$K_{ex12} = 0.1015$

3.2.3 มุมเลี้ยว (Corner)

มุมเลี้ยวจะมีตัวช่วยปรับทิศทางของลมเรียกว่า “เวนไกด์” (Vane guide) มีหลายลักษณะดังรูปที่ 3-5 ซึ่งจะทำให้ลดแรงปะทะกับผนังอุโมงค์ลมและลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น ได้มีการทดลองหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียแล้วสรุปไว้ว่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในตัวปรับทิศทางการไหลจะเป็นหนึ่งในสาม ของทั้งหมด ส่วนที่เหลือสองในสาม น่าจะเกิดจากการไหลวนเมื่อการไหลแบบ 3 มิติเกิดขึ้นที่บริเวณมุมเลี้ยว สันนิษฐานได้ว่าบริเวณมุมเลี้ยวจะประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การสูญเสียสองส่วนคือค่าที่เกิดจากแรงเสียดทานและเกิดจากการไหลวน แต่ส่วนที่เกิดจากแรงเสียดทานนั้นให้แปรเปลี่ยนตามเลขเรย์โนลด์ส์ที่คล้ายกับวัตถุเรียบ



รูปที่ 3-5 ลักษณะของเวนไกด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียคือ

$$K_c = 0.10 + \frac{4.55}{(\log_{10} Re_c)^{2.58}} \quad (3.14)$$

มุมเลี้ยวที่ไม่มีตัวปรับการไหลจะมีการสูญเสียร้อยละ 100 ของความเร็วคือ $K_c \geq 1.00$
ถ้ามีการออกแบบตัวปรับการไหลที่ดีจะได้อัตราค่าแฟกเตอร์ประมาณ 0.1 หรือน้อยกว่านั้น
จากสมการ (3.14) ได้ค่าดังนี้

$$K_{c3} = 0.1545 \quad K_{c5} = 0.1563 \quad K_{c11} = 0.1563 \quad K_{c14} = 0.1595$$

3.2.4 ตะแกรงนิรภัย (Safety screen)

มีไว้เพื่อป้องกันวัตถุปะทะกับใบพัดของโบลเวอร์ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ มี 3 ตัวแปรหลักที่ใช้เป็นตัวแปรหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียคือ β_s แทนความโปร่งของตาข่ายและเลขเรย์โนลด์ส์ที่เกิดขึ้นที่บริเวณหน้าตัดคือ $Re_w = \rho V d_w / \mu$ ตัวที่สามเป็นค่าแฟกเตอร์ของตาข่ายคือ K_{mesh} ซึ่งจะมีค่าเป็น 1.0 ในกรณีเป็นวัตถุใหม่ 1.3 กรณีเป็นลวดกลมและ 2.1 กรณีเป็นลวดเกลียว

สมการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของตะแกรงนิรภัย

$$K_m = K_{mesh} K_{Rn} \sigma_s + \frac{\sigma_s^2}{\beta_s^2} \quad (3.15)$$

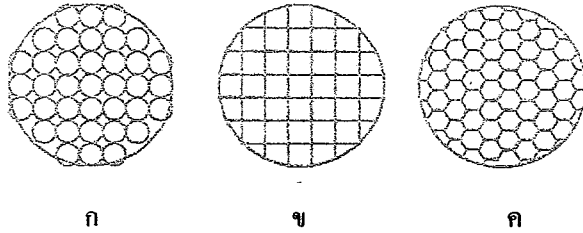
K_{mesh}	จะขึ้นอยู่กับชนิดของลวด
K_{mesh}	ใช้ 1.3 สำหรับลวดกลม
K_{mesh}	ใช้ 2.1 สำหรับลวดเกลียว
β_s	เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความพรุนของตะแกรง หาได้จาก

$$\sigma_s = (1 - \beta_s) \quad (3.16)$$

$$\beta_s = (1 - d_w \rho_w)^2 \quad (3.17)$$

$$\rho_w = \frac{1}{w_m} \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-6 ลักษณะต่าง ๆ ของตัวปรับการไหล (Honeycombs or Turbulence screen)

d_w	คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอด		
w_w	คือค่าความกว้างต่อ 1 ช่องของตะแกรง		
Re_w	ค่าเรย์โนลด์ส์ที่ ≥ 400 จะใช้ค่า $K_{Rn} = 1.0$		
จากสมการ (3.15) ถึง (3.18) ได้ค่าดังนี้			
$\sigma_s = 0.02$	$\beta_s = 0.98$	$\rho_w = 5$	
$K_{Rn} = 1.0$	$K_{mesh} = 1.3$	$K_m = 0.0260$	

3.2.5 ตัวปรับการไหล (Honeycombs or Turbulence screen)

เป็นตัวปรับการไหลให้มีความเร็วตลอดหน้าตัดคงที่ ลักษณะแบบต่าง ๆ ของตัวปรับลักษณะการไหลแสดงดังรูปที่ 3-6

เลขเรย์โนลด์ส์ขึ้นอยู่กับความหยาบของผิววัสดุและความเร็วของการไหล สำหรับตัวปรับลักษณะการไหลแต่ละชนิดที่แสดงในรูปจะมีค่าสัมประสิทธิ์ประมาณ 0.32, 0.22, 0.20 จากรูป ก ข และ ค ตามลำดับ บางครั้งเพื่อความประหยัดก็สามารถใช้หลอดแทนได้ ถึงแม้ว่าจะไม่เหมาะสมสำหรับอุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่เพราะความแข็งแรงอาจจะน้อยเกินไป ในอุโมงค์ลมปกติจะมีการสูญเสียของตัวปรับการไหลน้อยกว่าร้อยละ 5 ของการสูญเสียรวม

สมการหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียของตัวปรับการไหลหาได้จาก

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2 \quad (3.19)$$

λ_h ในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์ส์มีค่ามากกว่า 275 ต้องคำนึงถึงความเรียบของผิววัตถุที่ใช้ทำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_h = \begin{cases} 0.375 \left(\frac{\Delta}{D_h} \right)^{0.4} \text{Re}_\Delta^{-0.1} & \text{for } \text{Re}_\Delta \leq 275 \\ 0.214 \left(\frac{\Delta}{D_h} \right)^{0.4} & \text{for } \text{Re}_\Delta > 275 \end{cases} \quad (3.20)$$

D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

L_h คือความหนาของตัวปรับการไหล

จากสมการ (3.19) ถึง (3.20) ได้ค่าดังนี้

$K_h = 0.3$ (สำหรับท่อกลมที่มีความยาวเป็น 6 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลาง)

3.2.6 นอตเชิล (Nozzle)

เป็นอุปกรณ์ใช้เพิ่มความเร็วลม ถูกติดตั้งก่อนทางเข้าหน้าตัดทดสอบ ความเร็วที่มากที่สุดจะอยู่ที่ตรงกลางของนอตเชิลและจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงผนัง ความเร็วตรงทางเข้าจะมีค่าน้อยและจะเพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณทางออก การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของความเร็วการไหลในหน้าตัดทำให้เกิดการไหลแบบแยกตัว (Separation flow) เราสามารถควบคุมในกรณีนี้ได้โดยการทำให้ผนังของนอตเชิลมีลักษณะโค้ง การสูญเสียที่นอตเชิลจะได้ค่าประมาณร้อยละ 3 ของการสูญเสียรวม

สมการหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียของนอตเชิล

$$K_{nt} = 0.32 f_{av} \frac{L_n}{D_{st}} \quad (3.21)$$

f_{av} คือค่าเฉลี่ยของตัวประกอบความเสียดทานระหว่างทางเข้าและทางออกของนอตเชิล

L_n คือความยาวของนอตเชิล

D_{st} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดทดสอบ

จากสมการ (3.19) ได้ค่าดังนี้

$$f_{av6} = 0.0138 \quad L_{n6} = 0.80 \text{ เมตร} \quad D_{st6} = 0.5 \text{ เมตร} \quad K_{nt6} = 0.0070$$

$$f_{av16} = 0.0135 \quad L_{n16} = 0.65 \text{ เมตร} \quad D_{st16} = 0.3 \text{ เมตร} \quad K_{nt16} = 0.0093$$

ตารางที่ 3-2 ตารางแสดงค่าการสูญเสียรวม

ชั้นที่	ชั้นส่วน	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย	กำลังสอง ของ ความเร็ว	สองเท่า ของแรง โน้มถ่วง	การสูญเสีย (เมตร)
1	หน้าตัดทดสอบ	0.0264	900	19.62	1.211
2	ดิฟฟิวเซอร์	0.0990	900	19.62	4.542
3	มุมเลี้ยว	0.1545	149.39	19.62	1.176
4	ดิฟฟิวเซอร์	0.0327	149.39	19.62	0.249
5	มุมเลี้ยว	0.1563	79.66	19.62	0.634
6	นอตเชิล	0.0070	189.28	19.62	0.068
7	ลินปีกผีเสื้อ	0.0054	189.28	19.62	0.052
8	ตะแกรงนิรภัย	0.0260	189.28	19.62	0.250
9	โบลเวอร์	0.0140	189.28	19.62	0.135
10	ดิฟฟิวเซอร์	0.0448	79.66	19.62	0.181
11	มุมเลี้ยว	0.1563	79.66	19.62	0.634
12	ดิฟฟิวเซอร์	0.1080	27.12	19.62	0.149
13	แผงกรองการไหล	0.3035	27.12	19.62	0.419
14	มุมเลี้ยว	0.1595	27.12	19.62	0.220
15	แผงกรองการไหล	0.3063	27.12	19.62	0.423
16	นอตเชิล	0.0093	900	19.62	0.429
				รวม	10.780

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

ในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบ โครงสร้างและการติดตั้งอุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบขึ้น

4.1 แนวคิดและวัตถุประสงค์ของการออกแบบอุโมงค์ลม

1. ปรับปรุงและพัฒนาอุโมงค์ลมแบบเปิดให้มีความเร็วลมเพิ่มขึ้น
2. ต้องการความเร็วลมในย่าน 0 ถึง 20 เมตรต่อวินาที
3. เพื่อศึกษาแรงอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อวัตถุ

4.2 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม

1. หน้าตัดทดสอบ (Test section)
2. คีฟฟิวเซอร์ (Diffuser)
3. นอสเซิล (Nozzle)
4. มุมเหลี่ยม (Corner)
5. โบลเวอร์ (Blower)
6. ตัวปรับการไหล (Honeycombs or Turbulence screen)
7. ชุดบังคับทิศทางการไหล (Turning vane or Guide vane)
8. ลิ้นปีกผีเสื้อ (Butterfly throttle valve)
9. ตะแกรงนิรภัย (Safety screen)
10. แผงไฟฟ้าควบคุมโบลเวอร์

4.3 อุปกรณ์วัด

1. เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer)
2. ท่อปีโทท (Pitot tube)

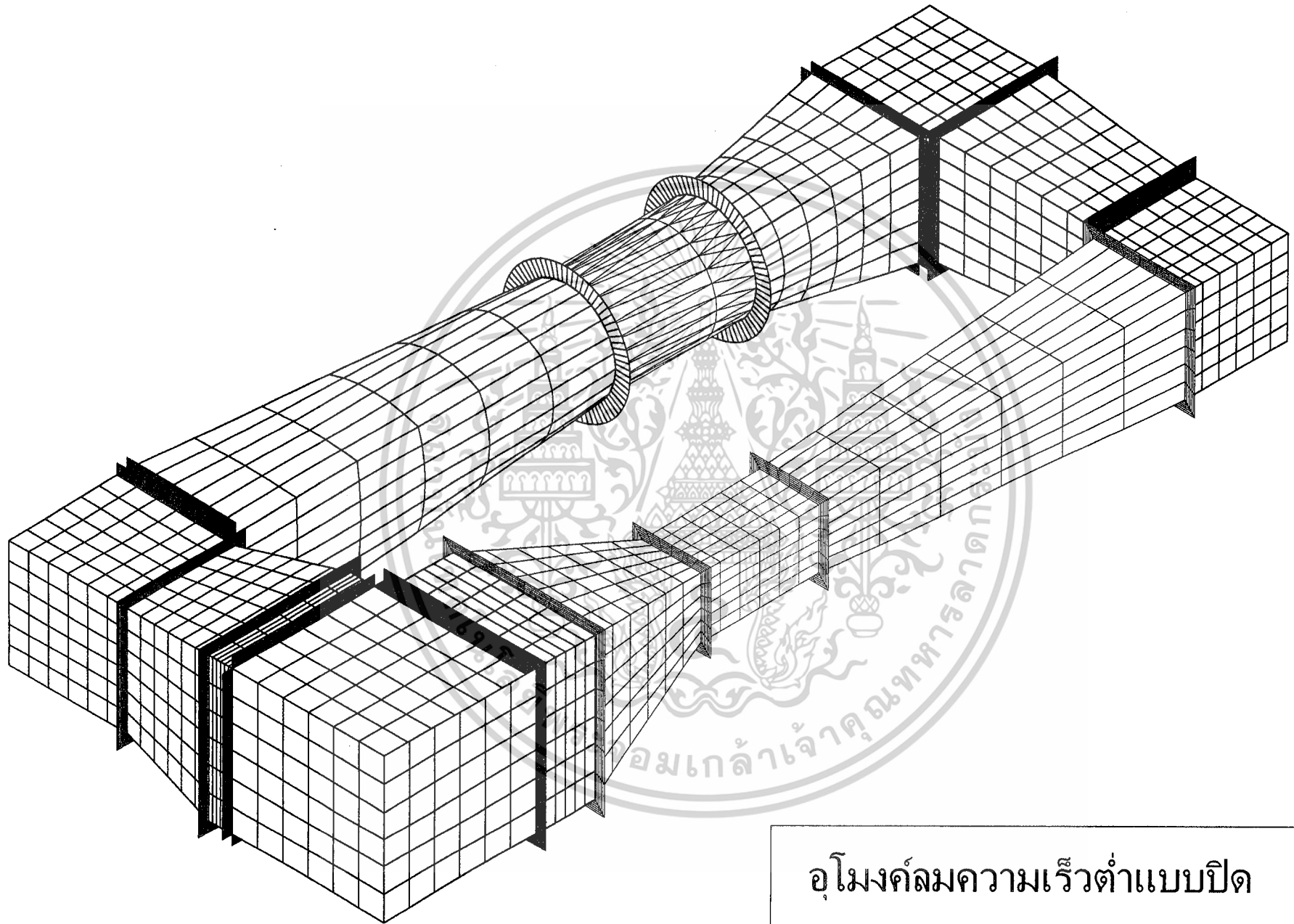
4.4 ขนาดที่ออกแบบ

ก-1 การวัดความเร็วด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer)

เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer) เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วลมแบบดิจิตอล สามารถวัดความเร็วลมได้หลายหน่วย เช่น เมตรต่อวินาที (m/s), กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/hr), ฟุตต่อวินาที (ft/min), และกิโลนอต (knots)

ตารางที่ ก-1 เปรียบเทียบหน่วยของการวัดความเร็วลม

1 เมตร ต่อ วินาที	3.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
	3.2808 ฟุตต่อวินาที
	2.2369 ไมล์ต่อชั่วโมง
1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	0.53996 นอต (ไมล์ทะเลต่อชั่วโมง)
	0.62137 ไมล์ต่อชั่วโมง
	0.91134 ฟุตต่อวินาที



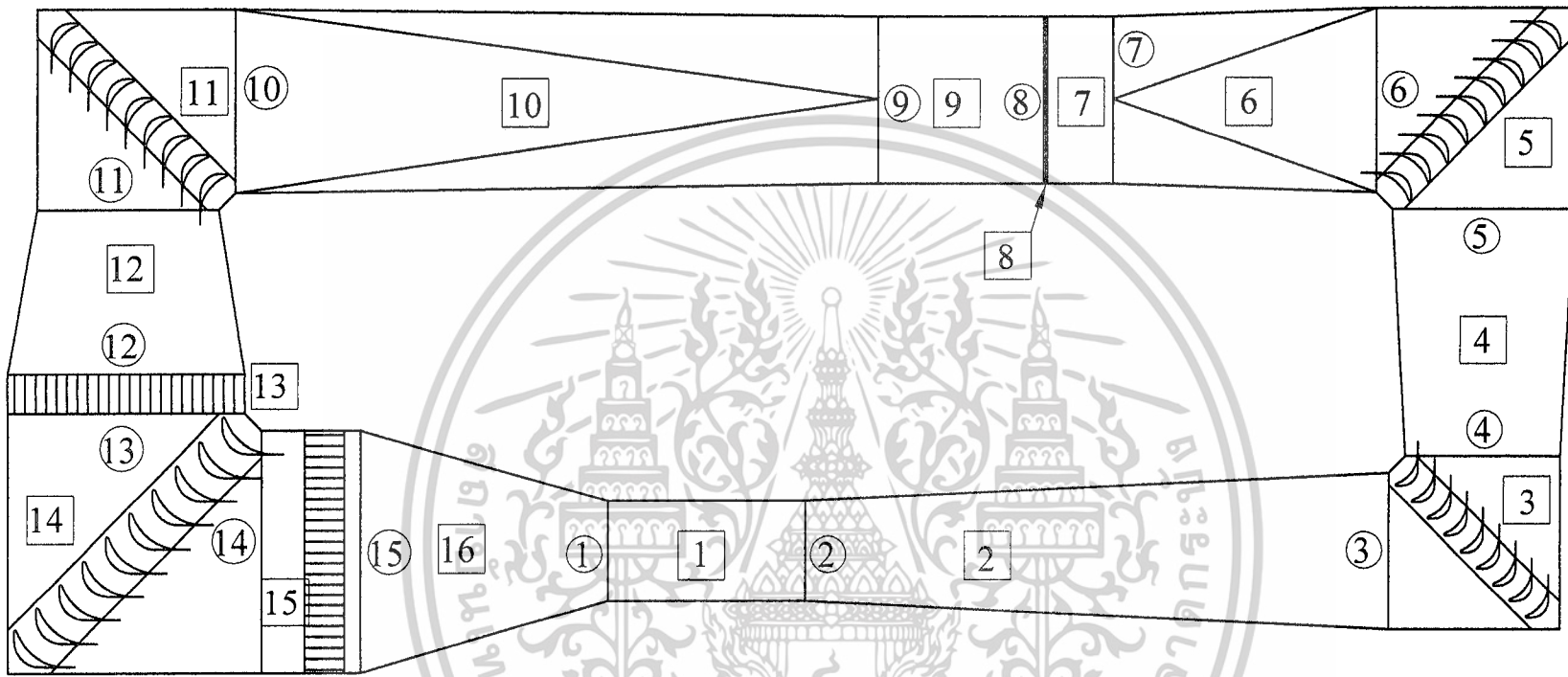
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี

15/01/2552

แผ่นที่

1 / 13

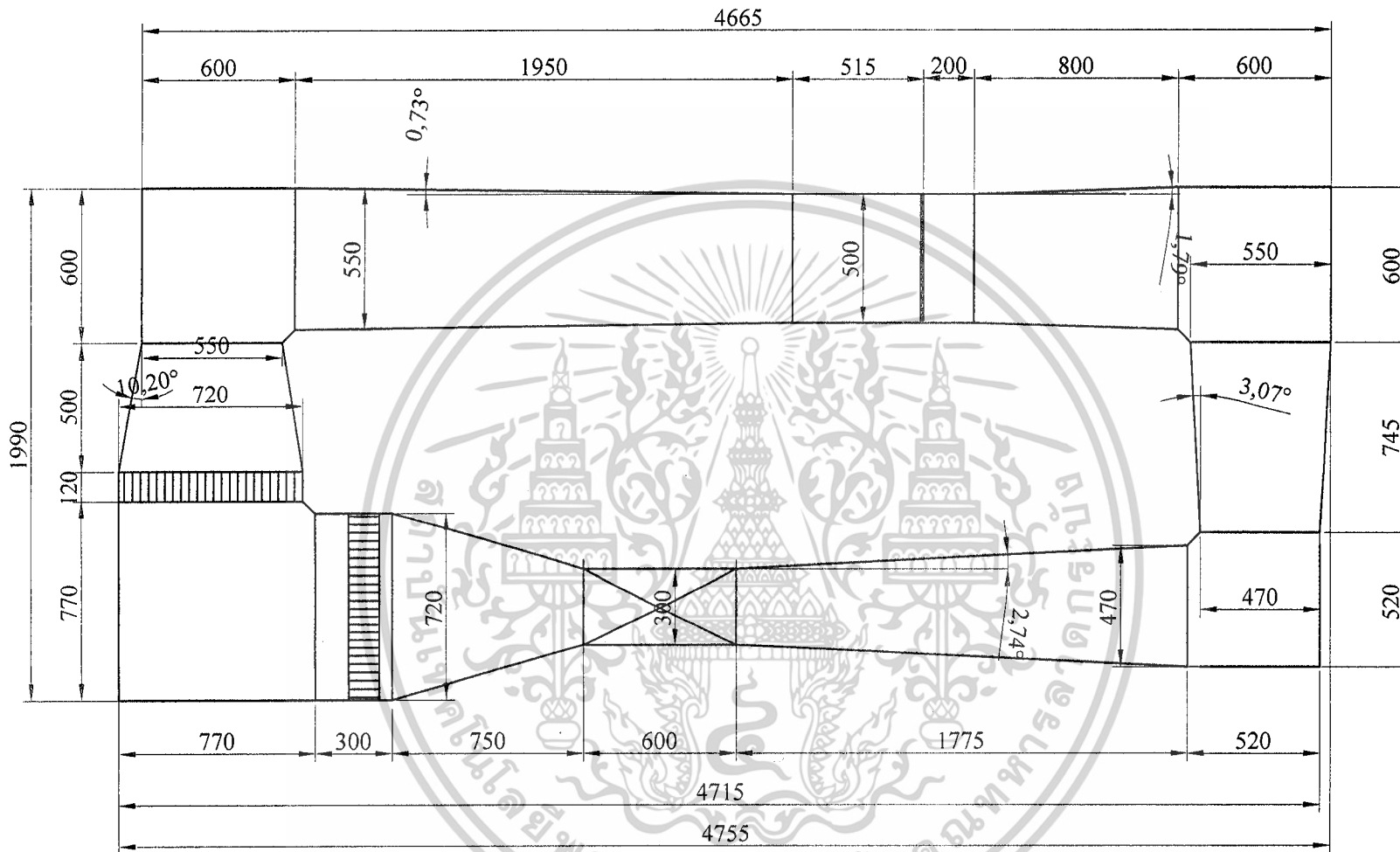


1	หน้าตัดทดสอบ	9	เครื่องกำเนิดลม
2	ดิฟฟีวเซอร์	10	ดิฟฟีวเซอร์
3	มมเลียว	11	มมเลียว
4	ดิฟฟีวเซอร์	12	ดิฟฟีวเซอร์
5	มมเลียว	13	ตัวปรับการไหล
6	นอสเชิล	14	มมเลียว
7	ลีนปีกผีเสื้อ	15	ตัวปรับการไหล
8	ตะแกรงนิรภัย	16	นอสเชิล

○ รอยต่อแต่ละชิ้นส่วน
 □ หมายเลขชิ้นส่วน
 หมายเหตุ

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี	15/01/2552	แผ่นที่	2 / 13
--------------	------------	---------	--------



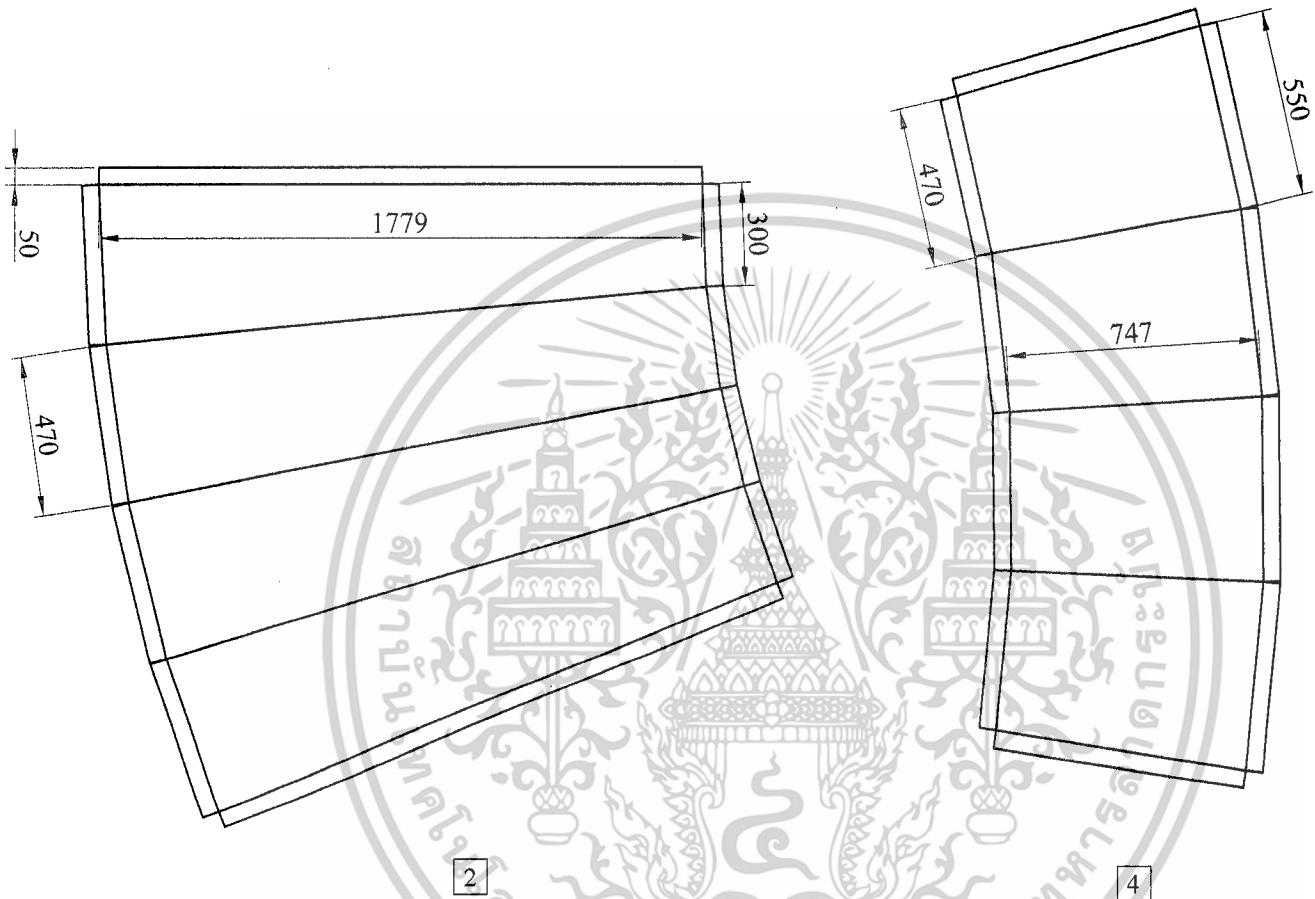
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี

15/01/2552

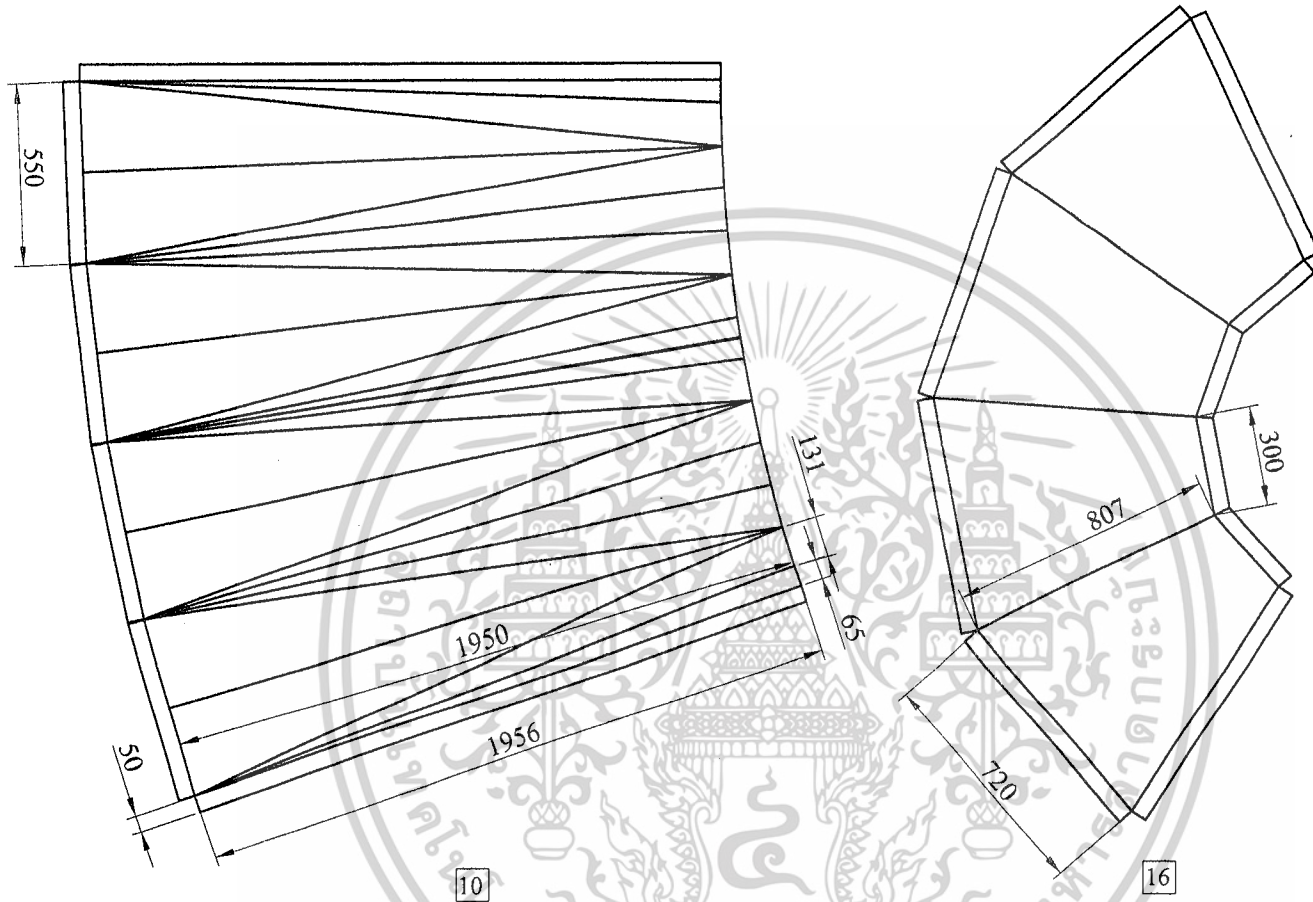
แผ่นที่

3 / 13



4	ตีฟิวเซอร์	1 แผ่น
2	ตีฟิวเซอร์	1 แผ่น
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

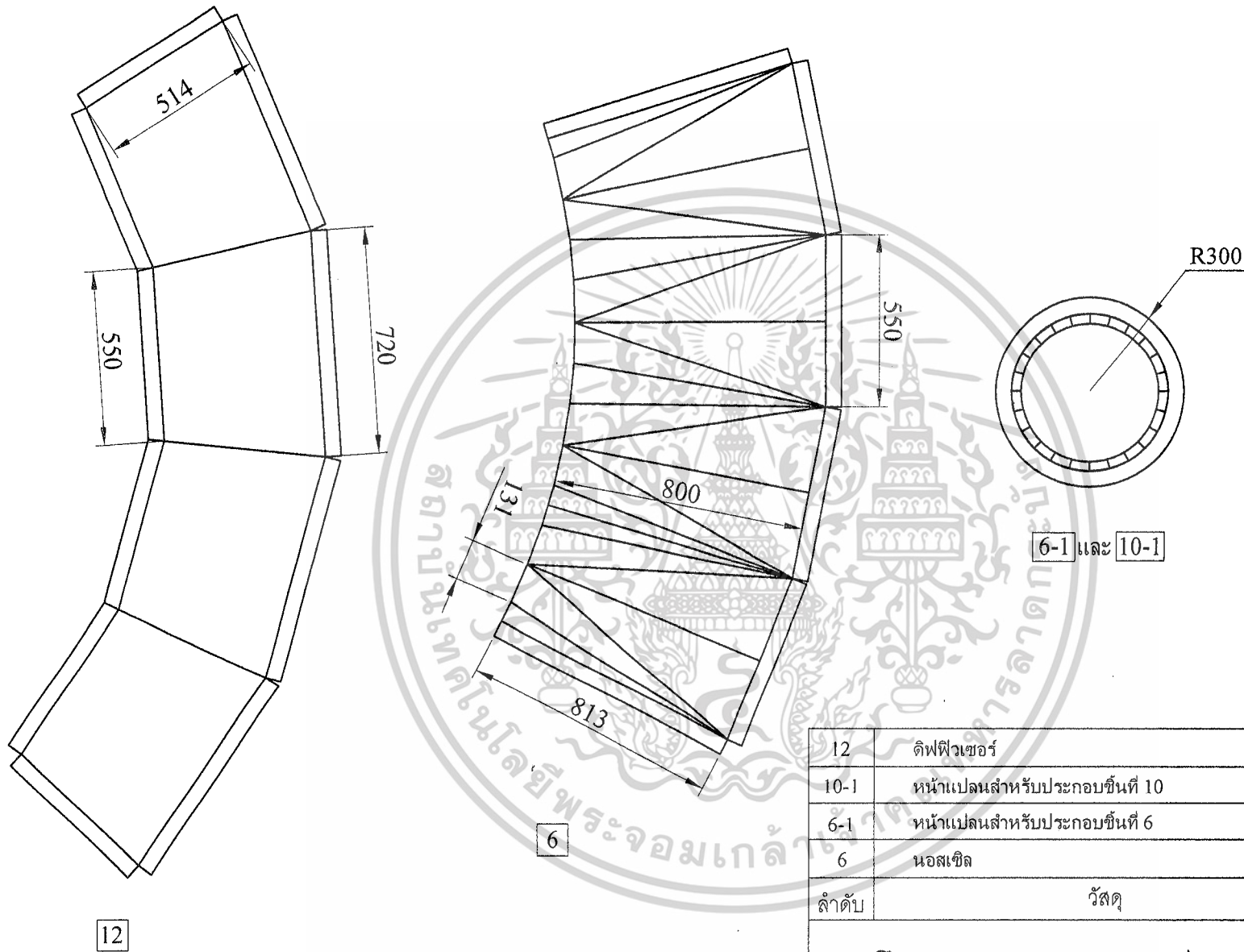
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด



16	นอตชนิด	1 แผ่น
10	ดีฟฟิวเซอร์	1 แผ่น
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

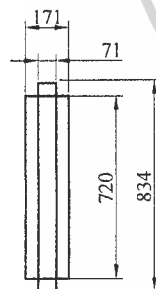
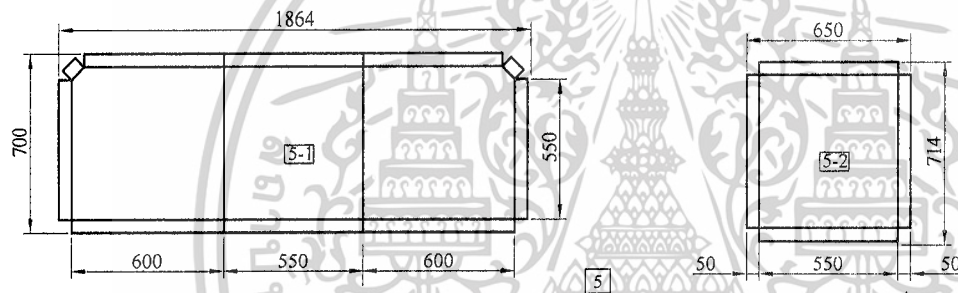
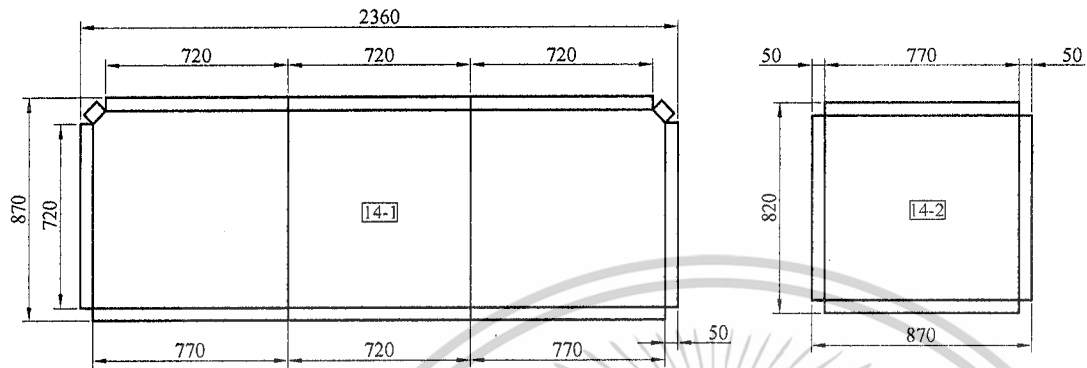
วัน เดือน ปี	15/01/2552	แผ่นที่	5 / 13
--------------	------------	---------	--------



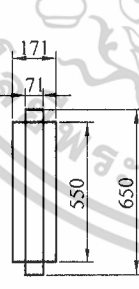
12	ดิวไฟเซอร์	1 แผ่น
10-1	หน้าแปลนสำหรับประกอบชั้นที่ 10	1 แผ่น
6-1	หน้าแปลนสำหรับประกอบชั้นที่ 6	1 แผ่น
6	นอสเซิล	1 แผ่น
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี	15/01/2552	แผ่นที่	6 / 13
--------------	------------	---------	--------



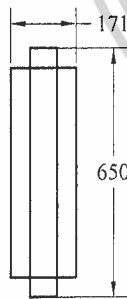
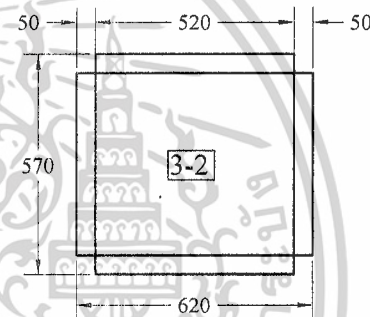
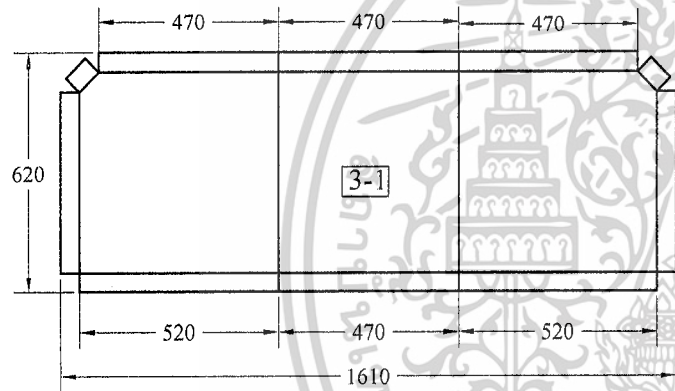
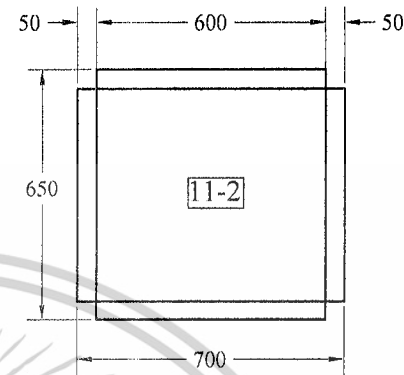
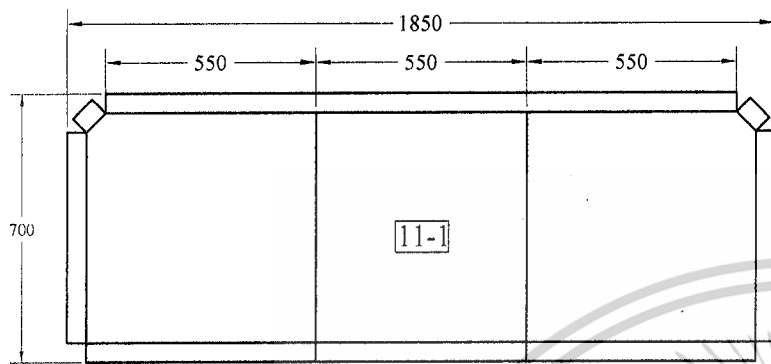
14-3



5-3

14-3	แผ่นสังกะสีขนาด 834 มม.x 171 มม.	1 แผ่น
14-2	แผ่นสังกะสีขนาด 870 มม.x 820 มม.	1 แผ่น
14-1	แผ่นสังกะสีขนาด 2360 มม.x 870 มม.	1 แผ่น
5-3	แผ่นสังกะสีขนาด 650 มม.x 171 มม.	1 แผ่น
5-2	แผ่นสังกะสีขนาด 714 มม.x 650 มม.	1 แผ่น
5-1	แผ่นสังกะสีขนาด 1864 มม.x 700 มม.	1 แผ่น
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด



11-3



3-3

11

3

11-3	แผ่นสังกะสีขนาด 650 มม.x 171 มม.	1 แผ่น
11-2	แผ่นสังกะสีขนาด 700 มม.x 650 มม.	1 แผ่น
11-1	แผ่นสังกะสีขนาด 1850 มม.x 700 มม.	1 แผ่น
3-3	แผ่นสังกะสีขนาด 570 มม.x 171 มม.	1 แผ่น
3-2	แผ่นสังกะสีขนาด 714 มม.x 650 มม.	1 แผ่น
3-1	แผ่นสังกะสีขนาด 1610 มม.x 720 มม.	1 แผ่น
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

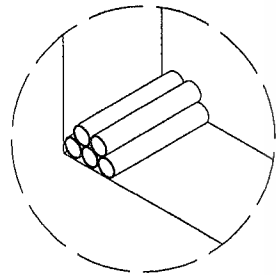
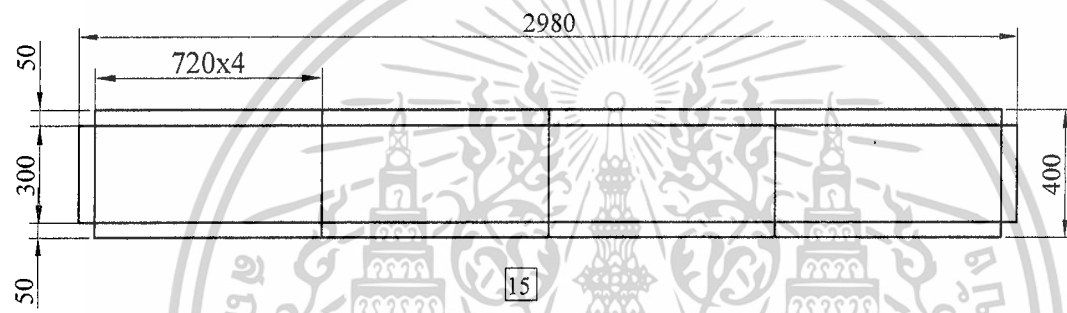
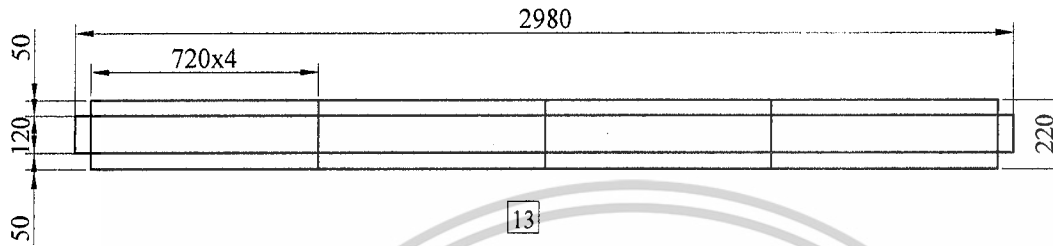
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี

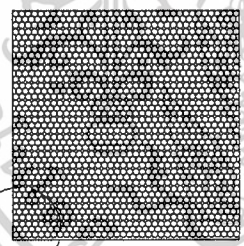
15/01/2552

แผ่นที่

8 / 13



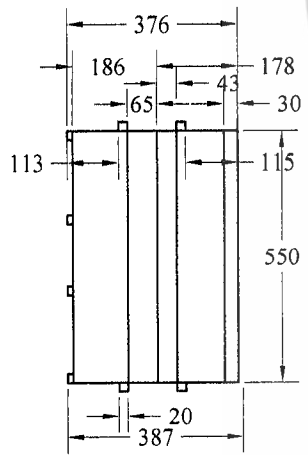
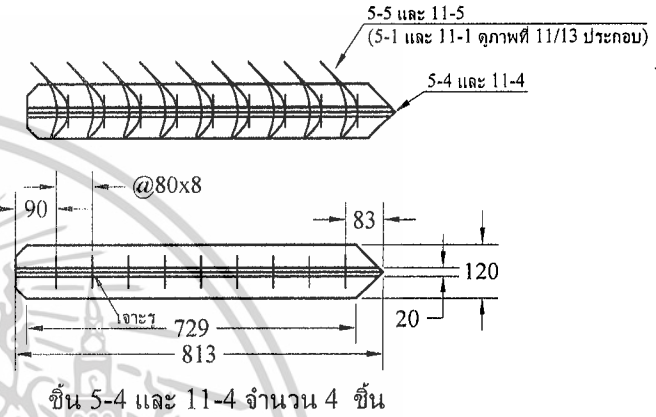
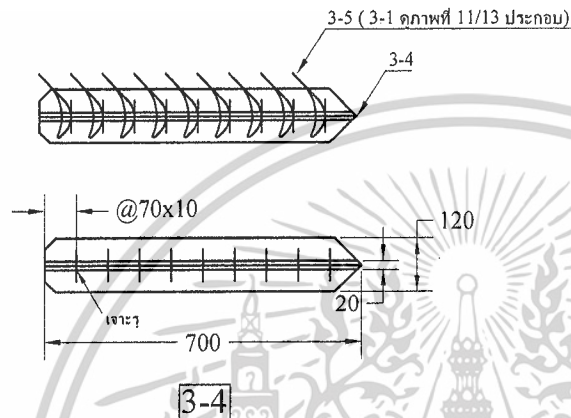
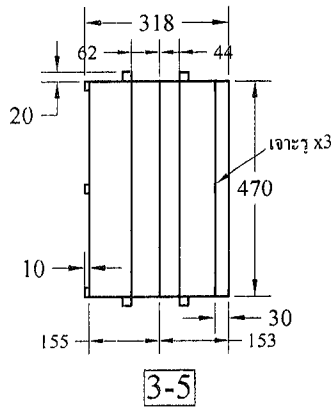
ภาพขยาย 12-12



หน้าตัด 12-12

15	แผ่นสังกะสีขนาด 220 มม.x2980 มม.	1 แผ่น
13	แผ่นสังกะสีขนาด 400 มม.x2980 มม.	1 แผ่น
12-12	ท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ยาว 120 มม.	2310 ฟอน
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

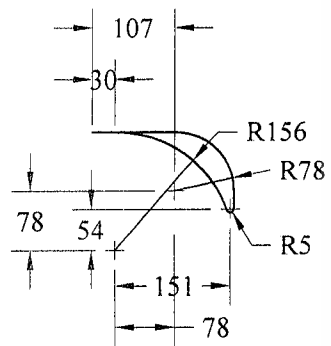
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด



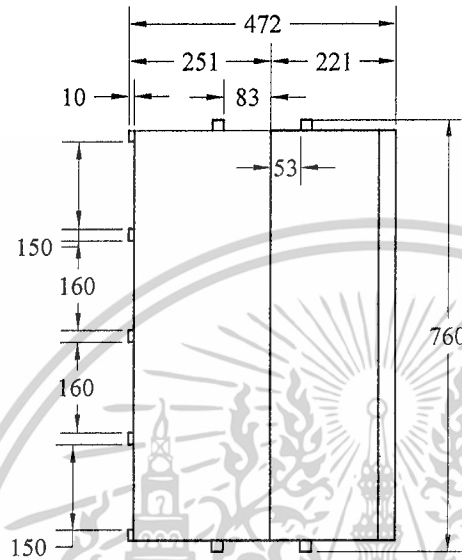
ชิ้น 5-5 และ 11-5 จำนวน 18 ชิ้น
แผ่นคัลลิเวินโกต์มมเดี่ยวที่ 5 และ 11

11-5	แผ่นสังกะสีขนาด 590 มม.x 387 มม.	9 แผ่น
11-4	แผ่นสังกะสีขนาด 813 มม.x 120 มม.	2 แผ่น
5-5	แผ่นสังกะสีขนาด 590 มม.x 387 มม.	9 แผ่น
5-4	แผ่นสังกะสีขนาด 813 มม.x 120 มม.	2 แผ่น
3-5	แผ่นสังกะสีขนาด 510 มม.x 318 มม.	9 แผ่น
3-4	แผ่นสังกะสีขนาด 700 มม.x 120 มม.	2 แผ่น
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

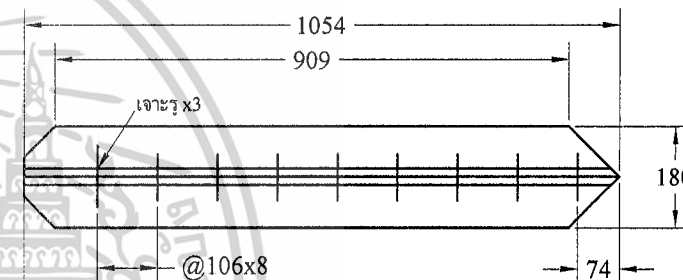
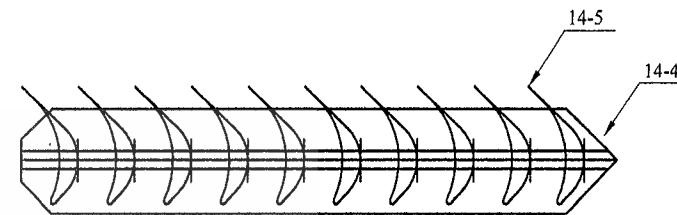
คู่มือคัลลิเวินความเร็วต่ำแบบปิด



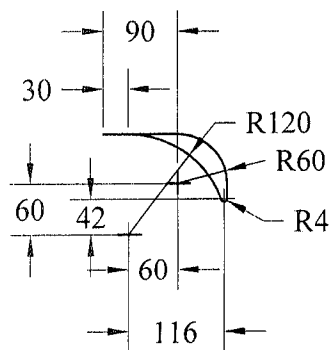
ภาพด้านบนเวนโกด์ที่ 14



14-5

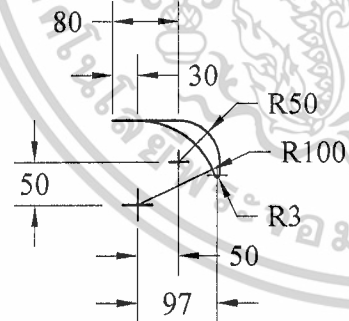


14-4



เวนโกด์ที่ 5,11

ภาพด้านบน

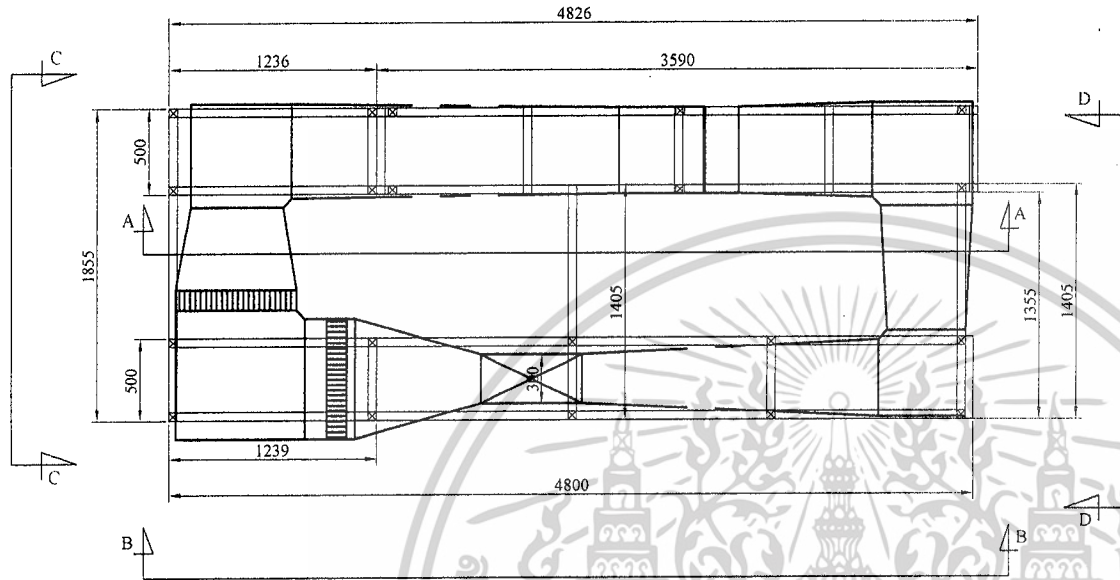


เวนโกด์ที่ 3

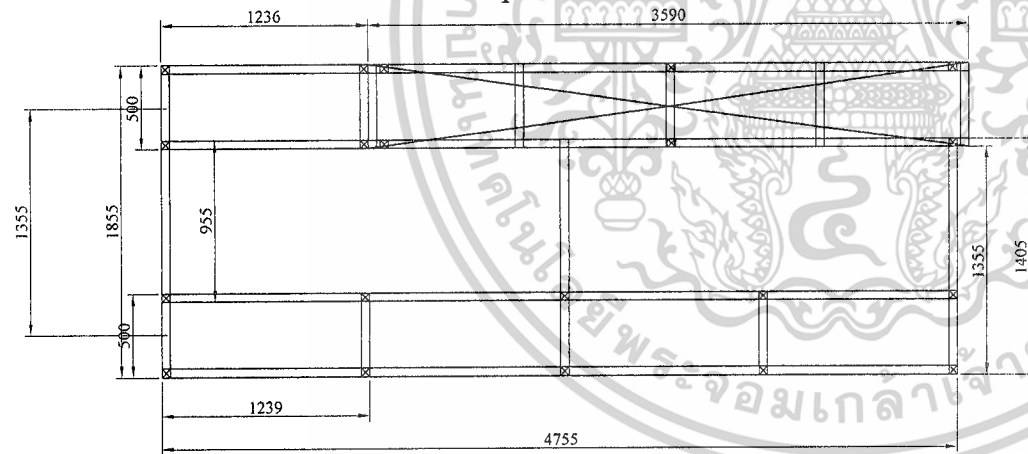
14-5	แผ่นสังกะสีขนาด 590 มม. x 387 มม.	9 แผ่น
14-4	แผ่นสังกะสีขนาด 760 มม. x 472 มม.	2 แผ่น
ลำดับ	วัสดุ	จำนวน

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี	15/01/2552	แผ่นที่	11 / 13
--------------	------------	---------	---------



Top view



ขาตั้งอุโมงค์ลม
วัสดุเหล็กฉาก 40 มมx40 มมx3.5 มม

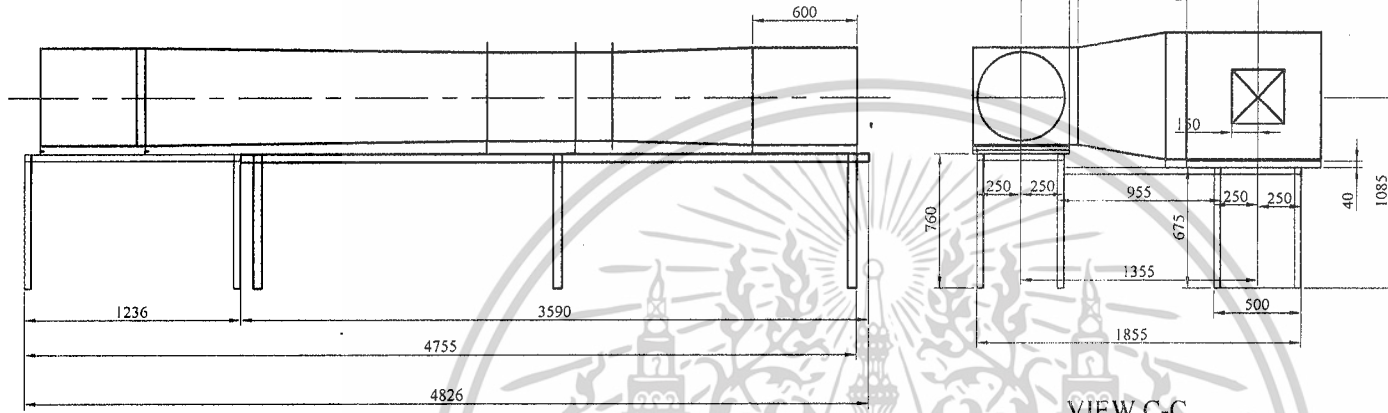
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี

15/01/2552

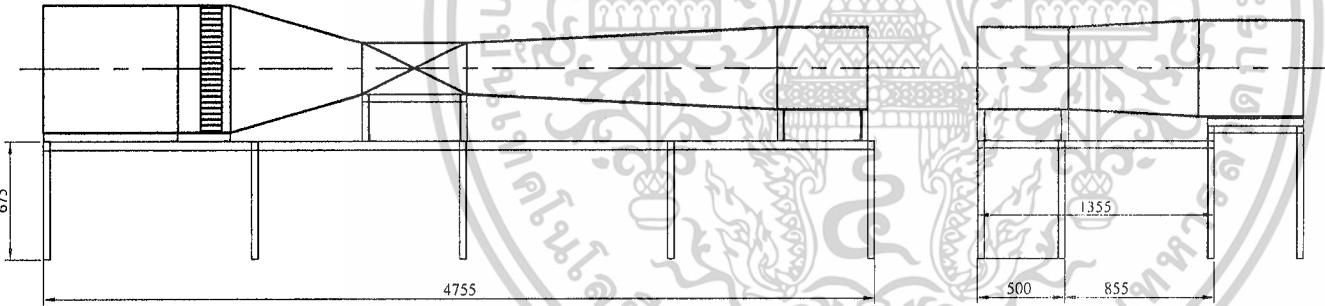
แผ่นที่

12 / 13



VIEW A-A

VIEW C-C



VIEW B-B

VIEW D-D

ขาตั้งอุโมงค์ลม
วัสดุเหล็กฉาก 40 มม x 40 มม x 3.5 มม

อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี	15/01/2552	แผ่นที่	13 / 13
--------------	------------	---------	---------

4.5 รายการวัสดุที่ใช้สร้างอุโมงค์ลม

รายการวัสดุ	จำนวน	ราคารวม(บาท)
สังกะสีแผ่นเรียบ (1.2×2.4) เมตร	20 แผ่น	6650
เหล็กฉาก (4×4×0.35) เซนติเมตร ยาว 6 เมตร	7 เส้น	2450
สกรูและน็อตเบอร์ 10	7 กิโลกรัม	575
สีน้ำมัน(น้ำเงิน) 3.785 ลิตร	1 กระป๋อง	500
สีน้ำมัน(เหลือง) 1.5 ลิตร	1 กระป๋อง	150
สีน้ำมัน(ดำ) 1.5 ลิตร	1 กระป๋อง	150
ทินเนอร์	5 ขวด	175
	รวม	11,000

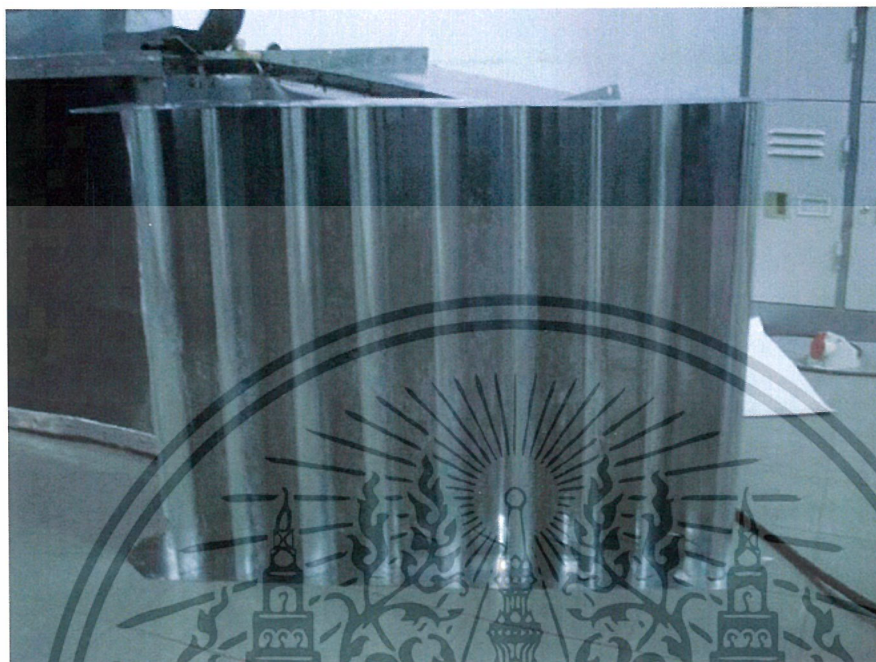
หมายเหตุ ไม่รวมราคาชุดหน้าตัดทดสอบและขาตั้งเครื่องกำเนิดลมเพราะใช้ของเดิม

4.6 ขั้นตอนการประกอบอุโมงค์ลม

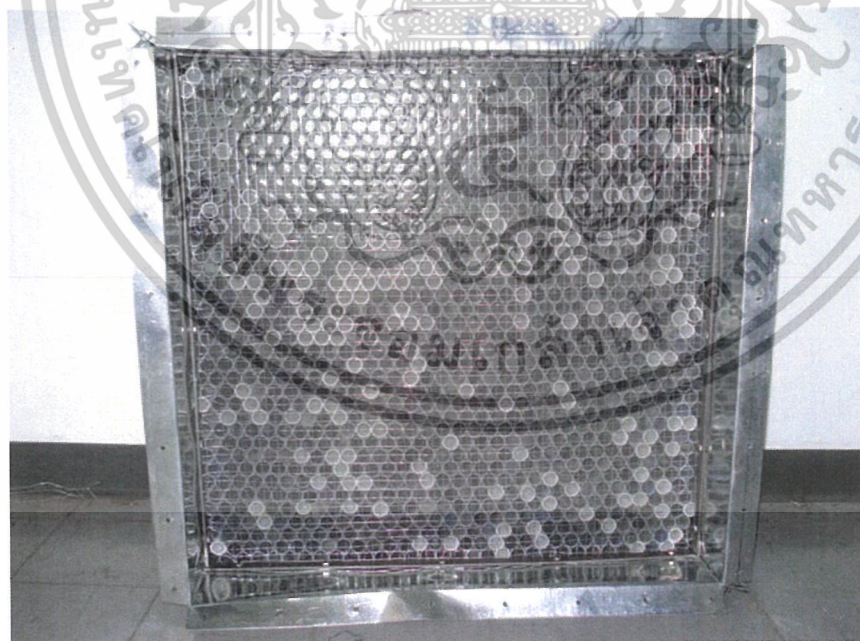
1. นำแผ่นสังกะสีมาวัดแบบแล้วทำการพับเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ
2. ประกอบชุดบังคับทิศทางการไหลเข้ากับมุมเลี้ยวทั้ง 4 มุม
3. ประกอบท่อทรงกรวย ไหลเข้ากับชุดทรงกรวย ไหลทั้ง 2 ชุด
4. ติดตั้งชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอุโมงค์ลมเข้าด้วยกัน
5. สร้างฐานของอุโมงค์ลมแล้วประกอบเข้ากับอุโมงค์ลม
6. ติดตั้งชุดวัดความดันหรือมานอมิเตอร์
7. ติดตั้งชุดวัดความเร็วหรือปีโทท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ภาพแสดงส่วนต่างๆ ของอุโมงค์ลม

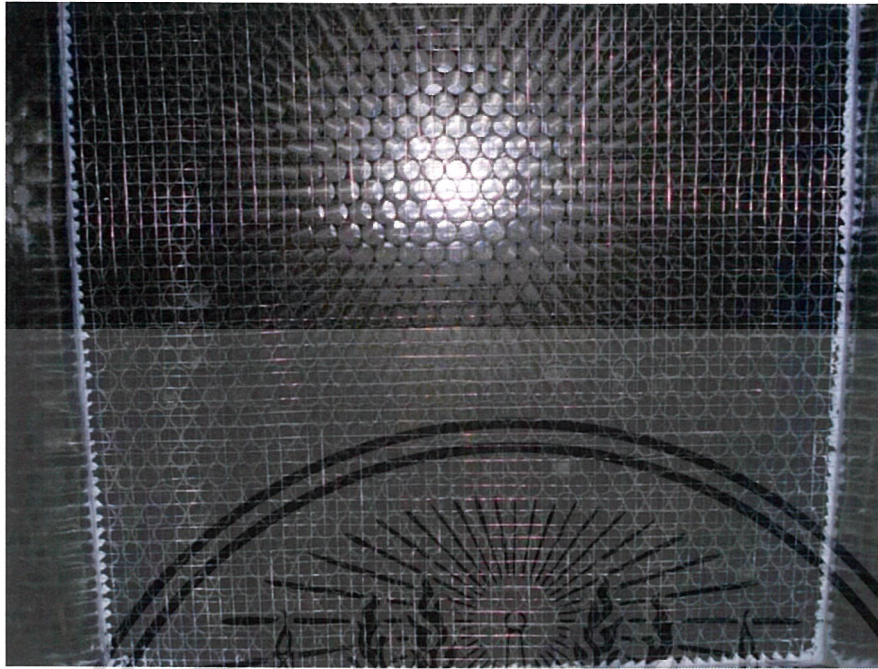


รูปที่ 4-1 ชุดบังคับทิศทางการไหลก่อนติดตั้ง



รูปที่ 4-2 แผงกรองการไหลแนวตรงชุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

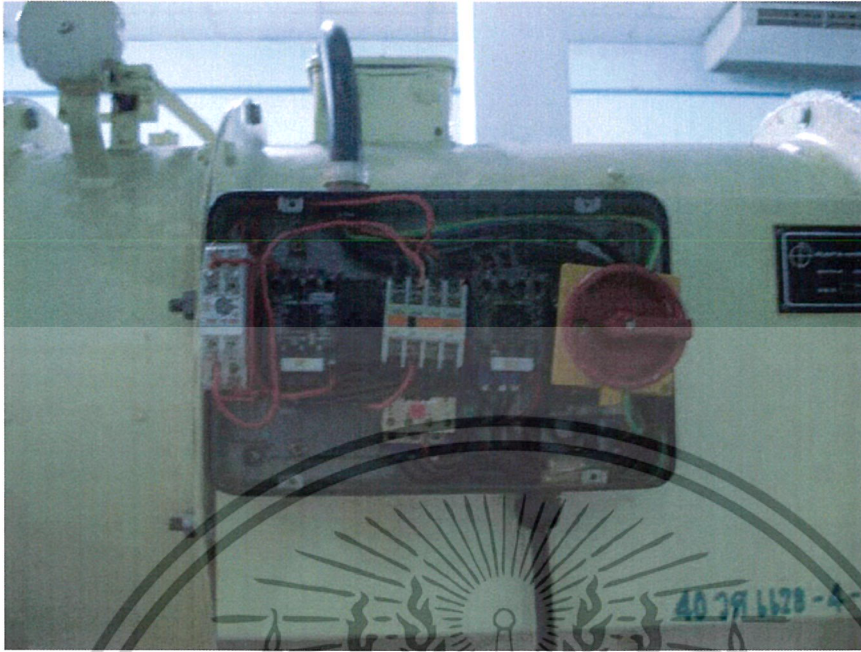


รูปที่ 4-3 แผงกรองการไหลแนวตรงชุดที่ 2



รูปที่ 4-4 หน้าตัดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

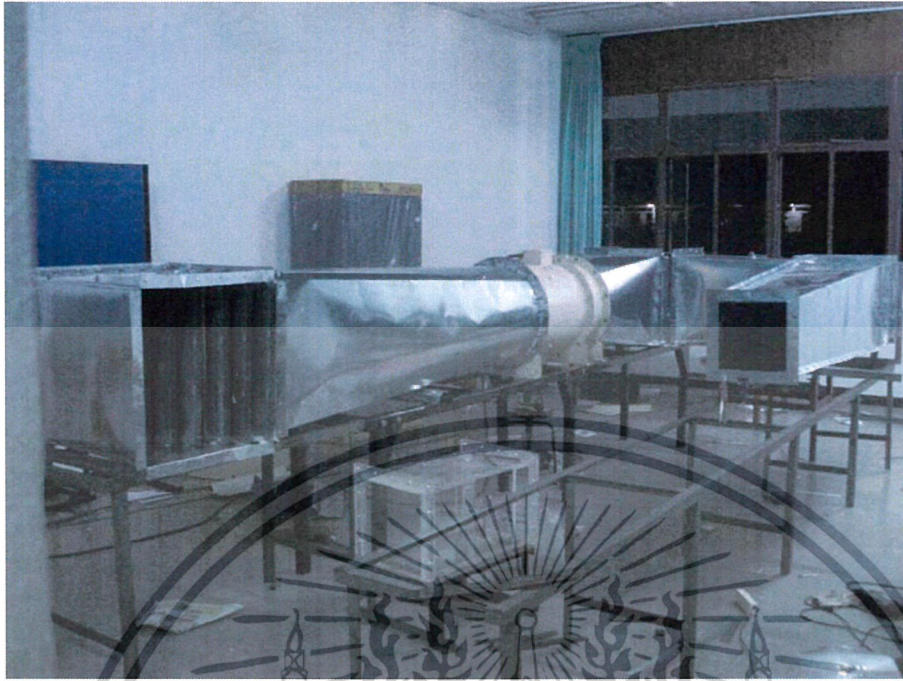


รูปที่ 4-5 แผงไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 4-6 ด้านข้างของอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-7 การประกอบอุโมงค์ลม



รูปที่ 4-8 การประกอบอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

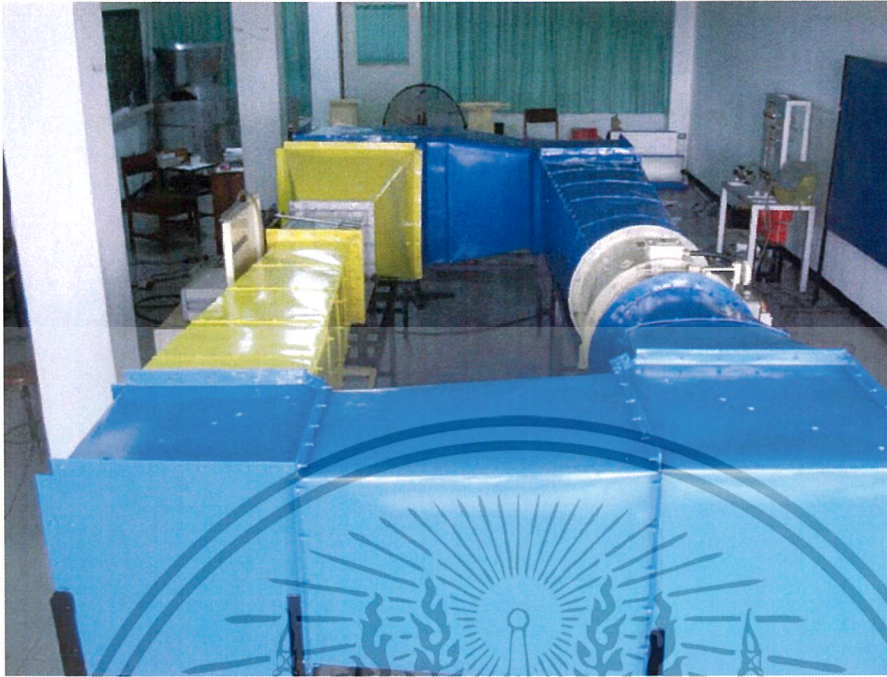


รูปที่ 4-9 การประกอบอุโมงค์ลม



รูปที่ 4-10 การประกอบอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-11 อุโมงค์ลมที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 4-12 ก่อนติดตั้งเครื่องมือวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

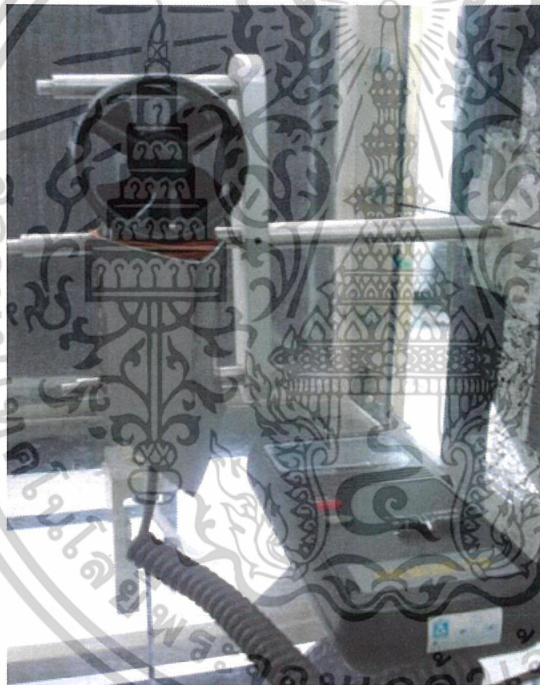
5.1 การทดสอบหาความเร็วด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometers)

อุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลองเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometers)

ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometers) เข้ากับหน้าตัดทดสอบ มีลักษณะดังรูปที่ 5-1



รูปที่ 5-1 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometers)

2. เปิดสวิตช์เครื่องเป่าลม (Blower) แล้วปรับความเร็วของลื่นปีกผีเสื้อเริ่มจากตำแหน่งที่ 1 ทำการบันทึกค่าที่แสดงที่หน้าจอของเครื่อง Anemometer ทดลองจนครบ 7 ตำแหน่ง หลังจากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งเครื่องวัดเริ่มจากบริเวณกลางหน้าตัดทดสอบไปยังบริเวณผนังหน้าตัดทดสอบ ทำการบันทึกผล

หมายเหตุ ตำแหน่งที่เครื่องเป่าลม (Blower) เปิดได้เต็มก็คือตำแหน่งที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตาราง 5-1 ค่าความเร็วจากเครื่องทดสอบ

ตำแหน่งปีกผีเสื้อ	ความเร็ว (เมตร/วินาที)				
	ตำแหน่งในหน้าตัดทดสอบ				
	1	2	3	4	5
1	2.1	2	2.8	2.1	2.9
2	2.8	2.6	3.7	3.0	3.3
3	6.2	6.2	6.2	5.6	6.0
4	10.3	9.7	11.2	9.4	10.1
5	15.2	14.3	15.5	14.1	14.9
6	18.5	17.5	19	17.7	18.7
7	21.4	20.6	19.8	20.1	19.6

ครั้งที่ 1

ตำแหน่งปีกผีเสื้อ	ความเร็ว (เมตร/วินาที)				
	ตำแหน่งในหน้าตัดทดสอบ				
	1	2	3	4	5
1	2.3	2.4	2.2	2.1	2.0
2	2.8	2.6	2.7	2.5	2.3
3	6.6	6.73	6.8	6.6	6.0
4	10.3	10.7	10.8	9.4	10.1
5	15.5	15.3	15.5	15.1	14.9
6	18.3	17.5	18.9	17.6	18.5
7	20.8	20.6	20.9	19.2	19.0

ครั้งที่ 4

ตำแหน่งปีกผีเสื้อ	ความเร็ว (เมตร/วินาที)				
	ตำแหน่งในหน้าตัดทดสอบ				
	1	2	3	4	5
1	2.3	2.2	2.1	2.1	2.0
2	2.7	2.6	2.7	2.6	2.1
3	6.2	6.2	6.0	5.6	5.6
4	10.3	10.7	11.0	9.4	10.1
5	15.2	14.2	14.5	14.1	14.9
6	18.0	17.5	18.9	17.5	18.0
7	20.9	20.0	20.6	20.1	21.0

ครั้งที่ 2

ตำแหน่งปีกผีเสื้อ	ความเร็ว (เมตร/วินาที)				
	ตำแหน่งในหน้าตัดทดสอบ				
	1	2	3	4	5
1	2.7	2.3	2.4	2.1	2.0
2	2.9	2.7	2.6	2.7	2.4
3	7.0	6.1	6.5	6.2	6.1
4	10.4	11.1	10.0	9.4	10.1
5	15.1	14.5	14.9	14.5	14.1
6	18.3	18.1	18.0	17.5	17.9
7	20.7	20.6	20.5	19.1	19.0

ครั้งที่ 5

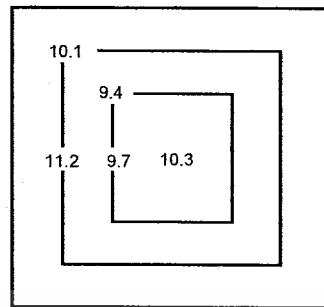
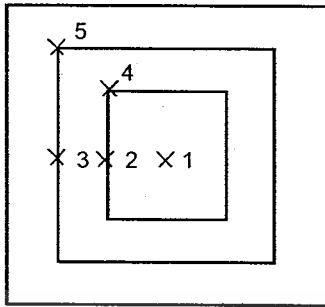
ตำแหน่งปีกผีเสื้อ	ความเร็ว (เมตร/วินาที)				
	ตำแหน่งในหน้าตัดทดสอบ				
	1	2	3	4	5
1	2.5	2.2	2.6	2.2	2.0
2	2.6	2.5	2.7	2.3	2.1
3	6.6	6.2	6.7	5.6	5.6
4	10.5	10.1	11.0	9.4	10.1
5	15.2	14.1	14.5	14.1	14.7
6	18.5	17.5	18.9	17.5	18.0
7	20.9	21	20.6	20.0	21.0

ครั้งที่ 3

ตำแหน่งปีกผีเสื้อ	ความเร็ว (เมตร/วินาที)				
	ตำแหน่งในหน้าตัดทดสอบ				
	1	2	3	4	5
1	2.4	2.3	2.6	2.0	2.2
2	2.8	2.3	2.5	2.2	2.4
3	6.9	6.1	6.5	5.8	5.4
4	10.5	10.1	11.0	9.4	10.1
5	15.2	14.1	14.5	14.1	14.7
6	18.5	17.5	18.9	17.5	18.0
7	20.2	20.61	20.5	19.5	19.8

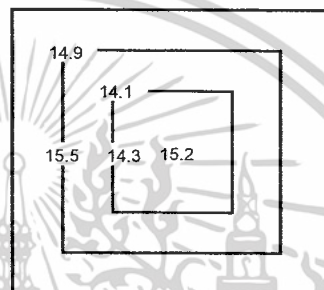
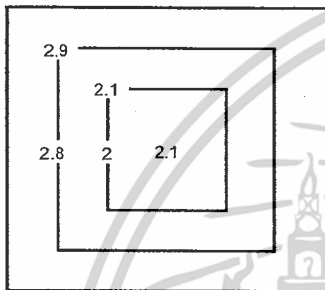
ครั้งที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



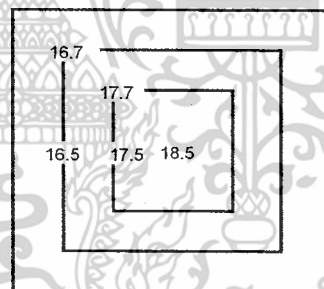
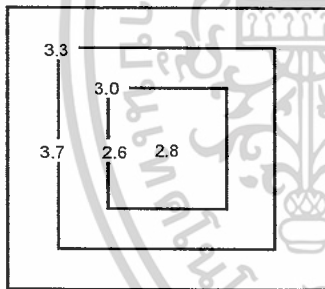
ตำแหน่งของความเร็วที่หน้าตัดทดสอบ

ตำแหน่งที่ 4



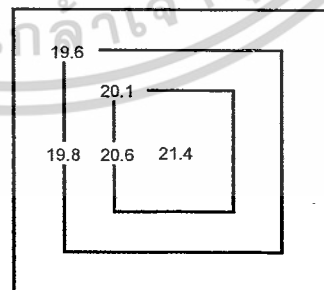
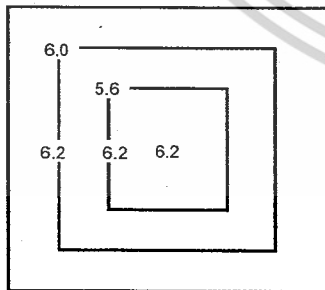
ตำแหน่งที่ 1

ตำแหน่งที่ 5



ตำแหน่งที่ 2

ตำแหน่งที่ 6



ตำแหน่งที่ 3

ตำแหน่งที่ 7

รูปที่ 5-2 โปรไฟล์แสดงการกระจายความเร็วการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวัดความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมโดยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometers) โดยการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ จากตำแหน่งปิดสุดถึงตำแหน่งเปิดสุด พบว่าความเร็วลมที่ได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหน้าตัดทดสอบในการปรับลิ้นปีกผีเสื้อตำแหน่งเดียวกัน ความเร็วลมที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันและตำแหน่งที่ลิ้นปีกผีเสื้อเปิดสุดจะได้ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดที่ 21 เมตรต่อวินาที โดยที่บริเวณศูนย์กลางของหน้าตัดทดสอบ จะมีความเร็วลมสูงกว่าบริเวณผนังของหน้าตัดทดสอบเล็กน้อย



บทที่ 6

การทดสอบอุโมงค์ลมเทียบกับค่ามาตรฐาน

6.1 การทดสอบอุโมงค์ลมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับค่ามาตรฐาน

อุปกรณ์การทดลอง

มวลวัตถุทรงกลม ดังรูปที่ 6-1 มีน้ำหนัก 0.0525 กิโลกรัม มีพื้นที่หน้าตัด 1.234×10^{-4}

ตารางเมตร

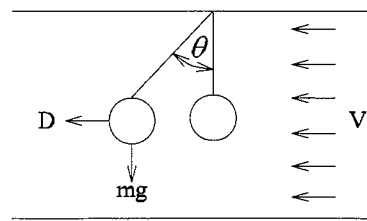
ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบวัตถุทรงกลมเข้ากับหน้าตัดทดสอบ โดยให้มวลอยู่ที่กึ่งกลางของหน้าตัดทดสอบ ดังรูปที่ 6-1

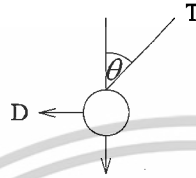


รูปที่ 6-1 ภาพการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Free body diagram



รูปที่ 6-2 Free body diagram

จากรูปที่ 6-2 ได้สมการดังนี้

$$T = \frac{mg}{\cos \theta} \quad (6.1)$$

$$D = mg \tan \theta \quad (6.2)$$

$$c_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (6.3)$$

D คือค่าแรงต้าน

c_d คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ρ คือค่าความหนาแน่นของอากาศ ใช้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสได้ค่าความ

หนาแน่นเท่ากับ 1.165 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

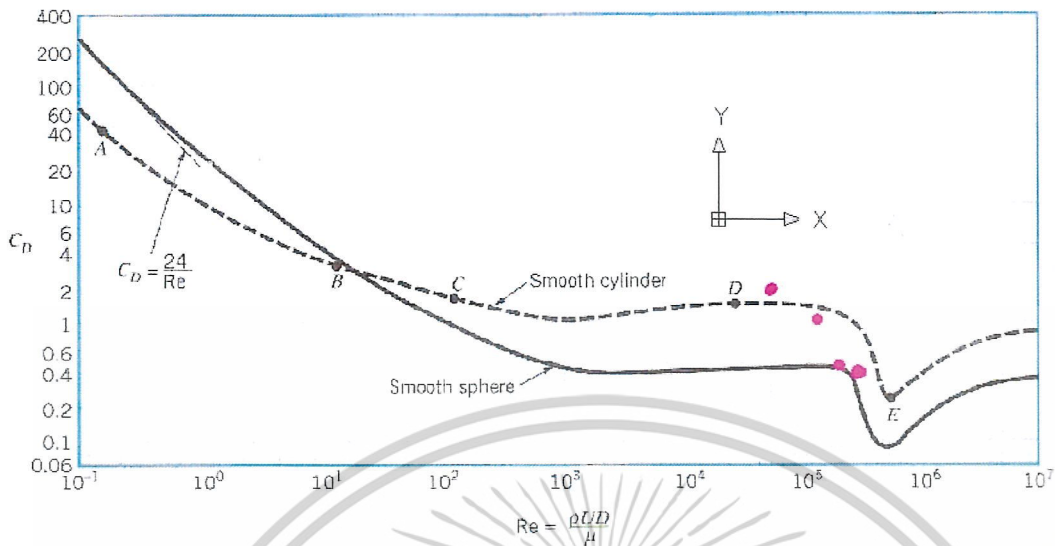
2. เปิดเครื่องเป่าลม (Blower) โดยปรับความเร็วของปีกผีเสื้อจากตำแหน่งที่ 1 ที่ความเร็วลมต่ำสุด แล้วอ่านค่ามุมที่เกิดขึ้น บันทึกผลการทดลอง
3. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยการปรับความเร็วของปีกผีเสื้อไปที่ตำแหน่ง 2 ถึง 7 แล้วบันทึกค่า
4. นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านตามสมการที่ (6.1) ถึง (6.3) เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของวัตถุทรงกลมคือ 0.47
5. นำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเฉลี่ยที่ความเร็วแต่ละค่ามาพล็อตลงบนกราฟรูปที่ 6-3 แล้วสังเกตเทียบกับค่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6-1 ผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

ความเร็ว	มุม (องศา)	เลข เรย์โนลด์ส์	แรงดึงเชือก (นิวตัน)	แรงต้าน (นิวตัน)	สัมประสิทธิ์ แรงต้าน	ค่าคลาดเคลื่อน เมื่อเทียบกับค่า มาตรฐาน
2.8	2	53000	0.515	0.018	3.191	2.691
	1	53000	0.515	0.009	1.595	1.125
	1.5	53000	0.515	0.013	2.393	1.923
3.7	3	69000	0.516	0.027	2.743	2.273
	3	69000	0.516	0.027	2.743	2.273
	3	69000	0.516	0.027	2.743	2.273
6.2	4	120000	0.516	0.036	1.303	0.833
	3	120000	0.516	0.027	0.977	0.507
	4	120000	0.516	0.036	1.303	0.833
11.2	5	210000	0.517	0.045	0.500	0.030
	5.5	210000	0.517	0.050	0.550	0.080
	5	210000	0.517	0.045	0.500	0.030
15.5	9	290000	0.521	0.082	0.472	0.002
	10	290000	0.523	0.091	0.526	0.056
	9	290000	0.521	0.082	0.472	0.002
18.7	14	350000	0.531	0.128	0.511	0.041
	14	350000	0.531	0.128	0.511	0.041
	15	350000	0.533	0.138	0.549	0.079
21.4	17	400000	0.539	0.157	0.478	0.008
	17	400000	0.539	0.157	0.478	0.008
	17	400000	0.539	0.157	0.478	0.008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ค่าเรย์โนลด์ส์ต่าง ๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองนำมวลทรงกลมมาทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเทียบกับค่ามาตรฐาน สังเกตเห็นว่าเมื่อปรับลิ้นปีกผีเสื้อในตำแหน่งที่ 1 ถึงตำแหน่งที่ 3 ซึ่งอยู่ในช่วงความเร็วต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้มีค่ามากและมีความคลาดเคลื่อนสูง แต่เมื่อปรับความเร็วที่ตำแหน่งที่ 4 ถึงตำแหน่งที่ 7 ซึ่งอยู่ในช่วงความเร็วสูง ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ 1 ถึง 3 เกิดจากผลกระทบของค่าเรย์โนลด์ส์ที่มีค่าต่ำและความเร็วลมในช่วงความเร็วต่ำยังส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงขึ้นด้วย

เมื่อสังเกตค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่นำมาพล็อตลงบนกราฟดังรูปที่ 6-3 ที่มีลักษณะเป็นจุดสีชมพู ค่าที่ได้จะมีความใกล้เคียงเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐาน เส้นทึบที่อยู่บนกราฟค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะมีค่าสูงเมื่อค่าเรย์โนลด์ส์มีค่าน้อย และในย่านความเร็วสูงจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านได้ตามมาตรฐาน

6.2 การทดสอบหาค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

อุปกรณ์การทดลอง

มานอมิเตอร์

ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการติดตั้งท่อมานอมิเตอร์เข้ากับแต่ละหน้าตัดของอุโมงค์ลม
2. เปิดเครื่องกำเนิดลม (Blower) โดยปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อเปิดสุดเพื่อให้ได้ความเร็วสูงสุด
3. บันทึกค่าที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์แล้วนำไปคำนวณหาความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจากสมการที่ (6.4) ถึง (6.5)

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (6.4)$$

$$\Delta p = K\rho \frac{V^2}{2} \quad (6.5)$$

ผลการทดลอง

ตารางที่ 6-2 ผลการทดลองการหาความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

ส่วนประกอบ อุโมงค์ลม	ตำแหน่ง	ความสูงของ ระดับน้ำ (เมตรน้ำ)	ความดัน ณ จุดต่าง ๆ	ความดัน แตกต่าง	ความเร็ว	สัมประสิทธิ์ การสูญเสีย
หน้าตัดทดสอบ	In	0.01	0.11	0.11	21.00	0.000444
	Out	0.01	0.11	0.11	21.00	0.000444
มุมเลี้ยวที่ 1	In	0.025	0.29	0.17	8.56	0.004020
	Out	0.026	0.30	0.01	8.56	0.000268
มุมเลี้ยวที่ 2	In	0.025	0.29	-0.01	6.25	0.000502
	Out	0.024	0.27	-0.01	6.25	0.000502
เครื่องกำเนิดลม	In	0.027	0.31	0.03	9.63	0.000634
	Out	0.024	0.27	-0.03	9.63	0.000634
มุมเลี้ยวที่ 3	In	0.004	0.05	-0.23	6.25	-0.010052
	out	0.007	0.08	0.03	6.25	0.001507
ตัวปรับการไหล ที่ 1	in	0.011	0.13	0.05	3.65	0.005904
	out	0.01	0.11	-0.01	3.65	0.001476
ตัวปรับการไหล ที่ 2	in	0.011	0.13	0.01	3.65	0.001476
	out	0.009	0.10	-0.02	3.65	0.002952
นอตเชิล	in	0.009	0.10	-0.02	3.65	0.002952
	out	0.01	0.11	0.11	21.00	0.000444

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองหาความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย โดยการติดตั้งท่อมาตร
เข้ากับบริเวณทางเข้าและทางออกของชิ้นส่วนต่าง ๆ พบว่าค่าความดันที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันเพียง
เล็กน้อย โดยค่าความดันแตกต่างนี้เกิดขึ้นจากการสูญเสียความดันเนื่องจากความเสียดทาน การ
เปลี่ยนพื้นที่หน้าตัด มุมเลี้ยว อุปกรณ์กรองการไหล และลิ้นปีกผีเสื้อ

ค่าที่ได้จากการทดลองหาความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียอาจได้ค่าที่ไม่ละเอียดนัก
เพราะลักษณะของลมที่วิ่งผ่านจะมีความไม่สม่ำเสมอของทิศทางการไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการทดลอง

เนื่องจากโครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดลมในการทดสอบแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับปีกเครื่องบิน แพนอากาศ และวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ย่านความเร็วลมที่ต้องการในหน้าตัดทดสอบอยู่ในช่วง 0 ถึง 20 เมตรต่อวินาที

ในโครงการนี้จะเน้นในเรื่องของการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมเป็นหลัก ส่วนการทดสอบปีกเครื่องบิน แพนอากาศและวัตถุรูปทรงต่าง ๆ จะไม่ลงรายละเอียดมากนัก สมการต่าง ๆ สำหรับการออกแบบส่วนประกอบของอุโมงค์ลมได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 จากการออกแบบพบว่า ส่วนประกอบทุกชิ้นของอุโมงค์ลมมีความสำคัญกับคุณสมบัติของลมทั้งสิ้น เช่น การเลือกขนาดหน้าตัดทดสอบจะส่งผลกับขนาดของแบบจำลองที่นำมาทำการทดสอบเพราะถ้าเลือกขนาดหน้าตัดทดสอบที่ใหญ่ก็จะสามารถใช้แบบจำลองที่ใหญ่ได้ แต่จะควบคุมความสม่ำเสมอของความเร็วลมได้ยากและได้ความเร็วลมที่ต่ำ แต่ถ้าเลือกขนาดหน้าตัดทดสอบที่เล็กจะสามารถใช้งานได้กับแบบจำลองขนาดเล็ก แต่ควบคุมความสม่ำเสมอได้ง่ายและได้ความเร็วสูง ดังนั้นในการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมของโครงการนี้จะพิจารณาความเหมาะสมในการใช้งานและต้นทุนการสร้างเป็นหลัก

อุโมงค์ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่และมีต้นทุนสูง โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีใช้ในประเทศที่พัฒนาแล้วและเป็นประเทศที่เป็นผู้ออกแบบและสร้างยานพาหนะที่เกี่ยวข้องกับ รถยนต์ เครื่องบิน เรือเดินสมุทร และกระสวยอวกาศ แต่โครงการนี้มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ต่ำจึงออกแบบและสร้างเพียงอุโมงค์ลมขนาดเล็ก

จากการดำเนินงานการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลม สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. อุโมงค์ลมที่ออกแบบและสร้างมีขนาดที่เหมาะสมกับการทดลองและใช้ต้นทุนต่ำ เหมาะสำหรับใช้ทดสอบชิ้นส่วนของเครื่องบินที่มีขนาดเล็กและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สูงนัก
2. ความเร็วที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 20 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลของความเร็วที่ได้มีความสม่ำเสมอที่ดี ผลจากอุณหภูมิของอากาศที่สูงและไม่มีการระบายความร้อนให้กับใบพัดจึงทำให้ความเร็วลมตกลง ตัวปรับความเร็วลมที่ใช้ในอุโมงค์ลมเป็นแบบลิ้นปีกผีเสื้อ จึงปรับความเร็วลมได้ไม่แม่นยำมากนักและลิ้นปีกผีเสื้อมีค่าการสูญเสียที่สูงจึงทำให้ความเร็วลมลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความสม่ำเสมอของลมในหน้าตัดทดสอบอยู่ในระดับที่ใช้งานได้ดี แต่ก็มีความปั่นป่วนบ้างเล็กน้อย เพราะอุโมงค์ลมมีขนาดเล็กจึงมีระยะทางในการปรับความสม่ำเสมอของลมค่อนข้างสั้น อาจแก้ไขโดยการเพิ่มความยาวของหน้าตัดทดสอบ
4. การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนประกอบของอุโมงค์ลมเช่น ที่บริเวณมุมเลี้ยวทั้ง 4 มีการติดตั้งชุดบังคับทิศทางการไหลไว้เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการปะทะของลมกับผนังอุโมงค์ลม การสูญเสียที่ชุดทรงการไหลมีค่าค่อนข้างสูงเพราะอุปกรณ์ชุดนี้จะต้านความเร็วลมของอากาศที่ไหลหมุนเวียนในระบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ก-1 การวัดความเร็วด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer)

เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด (Anemometer) เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วลมแบบดิจิทัล สามารถวัดความเร็วลมได้หลายหน่วย เช่น เมตรต่อวินาที (m/s), กิโลเมตรต่อชั่วโมง (km/hr), ฟุตต่อวินาที (ft/min), และกิโลนอต (knots)

ตารางที่ ก-1 เปรียบเทียบหน่วยของการวัดความเร็วลม

1 เมตร ต่อ วินาที	3.6	กิโลเมตรต่อชั่วโมง
	3.2808	ฟุตต่อวินาที
	2.2369	ไมล์ต่อชั่วโมง
1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	0.53996	นอต (ไมล์ทะเลต่อชั่วโมง)
	0.62137	ไมล์ต่อชั่วโมง
	0.91134	ฟุตต่อวินาที

ก-2 เปรียบเทียบอุโมงค์แบบเดิม (แบบเปิด) กับแบบใหม่ (แบบปิด)

อุโมงค์ลมแบบปิด (แบบใหม่)	อุโมงค์ลมแบบเปิด (แบบเดิม)
	
1. ได้ความเร็วลมเพิ่มขึ้น	1. ได้ความเร็วลมน้อย
2. ลดพลังงานขับเคลื่อนลมในรอบการทำงานต่อไป เนื่องจากนำลมทิ้งที่ยังมีพลังงานภายในมาหมุนเวียน	2. ใช้พลังงานมากกว่า เพราะลมไม่ได้มีการหมุนเวียนในระบบ
3. ลดเสียงจากเครื่องกำเนิดลมเพราะเสียงส่วนหนึ่งถูกกักเก็บไว้ภายใน	3. มีเสียงดังเพราะเสียงถูกปล่อยสู่ภายนอก

ก-3 อุปสรรคและประสบการณ์ที่ได้จากการทำการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด อุปสรรคจากการทำงาน

1. ก่อนการสั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์ต้องทำการคำนวณหาปริมาณที่ต้องการใช้จริง และเนื่องจากงบประมาณมีจำกัด จึงต้องมีความประณีตในการตัด เพื่อป้องกันเกิดของเสีย
2. ในการวาดแบบลงบนแผ่นสังกะสี ไม่ได้ทำโดยการพิมพ์จากกระดาษ A0 แต่ใช้การพิมพ์ลงกระดาษ A4 แล้วติดกาวยเรียงกันเป็นรูปเท่าขนาดจริงบนแผ่นสังกะสี
3. ก่อนการตัดและพับขึ้นงานจริง ควรตรวจสอบความถูกต้องก่อน โดยการทำแบบจำลองในมาตราส่วน 1 ต่อ 15 ของขนาดจริงในกระดาษ
4. การติดตั้งเกิดการบิดและไม่ตรงทำให้บางชิ้นส่วนยากต่อการประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้ขนาดในการประกอบเขอะเสียดเวลาในการทำงานแต่เนื่องจากหากเกิดข้อผิดพลาดก็สามารถถอดและแก้ไขได้
6. การเกิดรอยร้าวตรงบริเวณรอยต่อ แก้โดยใช้ซิลิโคนอุดรอยร้าว
7. เกิดการสั่นเมื่อใช้ความเร็วต่ำ ๆ สามารถแก้ปัญหาได้โดยทำโครงยึด สามารถลดการสั่นลงได้
8. เนื่องจากอุโมงค์ลมแบบปิด ไม่มีการแลกเปลี่ยนอากาศภายในและภายนอก เมื่อทำการทดสอบต่อเนื่องกันเป็นเวลานาน จะเกิดความร้อนสูง
9. ในการสร้างเวนไกด์ (Vane guide) เนื่องจากทำการออกแบบเอง ในการพับแต่ละชิ้นส่วนรูปร่างอาจจะไม่เท่ากันจึงควรใช้ความละเอียดในการพับอย่างมาก

ประสบการณ์ที่ได้จากการทำงาน

1. ทำให้รู้จักแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน เช่น การทดสอบอุโมงค์ลมเมื่อเปิดเครื่องกำเนิดลมจะทำให้เกิดการสั่น ซึ่งสามารถหาวิธีการแก้ไขโดยการทำโครงยึดป้องกันการสั่น และศึกษาถึงสาเหตุเพิ่มเติมที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีการไหลของอากาศมากขึ้น
2. ทราบถึงสิ่งที่เกิดจากการคำนวณทางทฤษฎีและทางปฏิบัติที่มีความสอดคล้องกัน
3. ฝึกให้ทำงานอย่างมีขั้นตอนและการวางแผนที่ดี ทำให้ช่วยประหยัดเวลาการทำงาน

ก-4 แนวคิดที่จะพัฒนาปรับปรุงอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

เนื่องจากความเร็วลมที่ได้มีความเร็วในย่าน 0 ถึง 20 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับแบบเปิดเนื่องจากทิศทางของลมไม่ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งตั้งสมมุติฐานดังนี้

1. ช่วงความยาวก่อนเข้าหน้าตัดทดสอบซึ่งรับความเร็วลมมาจากนอสเซิล เป็นช่วงที่สั่นเกินไปและลักษณะของนอสเซิลมีลักษณะเป็นการลดหน้าตัดอย่างทันทีทันใด ในทางทฤษฎีควรทำให้นอสเซิลมีรูปร่างโค้งเล็กน้อย
2. เวนไกด์สามารถที่จะออกแบบให้สามารถปรับมุมได้ ซึ่งการปรับตำแหน่งที่เหมาะสมจะช่วยทำให้ลดการสูญเสียได้
3. ควรใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์แทนการใช้ถ่านปิกฟีลdeo เพื่อลดการสูญเสียจากถ่านปิกฟีลdeo และลดภาระงานของมอเตอร์ในรอบต่ำ ๆ

รูปแบบแนวคิดที่ปรับปรุง

ปรับปรุง โดยการเปลี่ยนนอสเซลให้มีลักษณะรูปร่าง โค้ง และเพิ่มความยาวก่อนทางเข้าหน้าตัด ทดสอบเพื่อให้ลมมีทิศทางการไหลเป็นแนวตรง และเท่ากันตลอดหน้าตัด

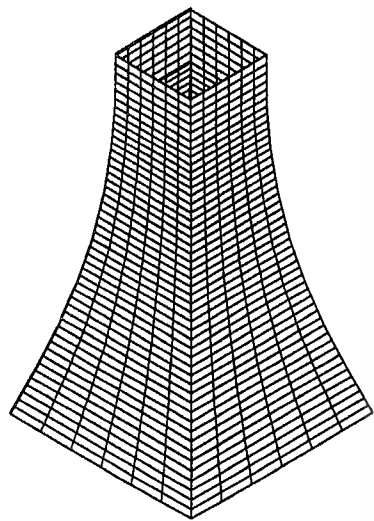


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

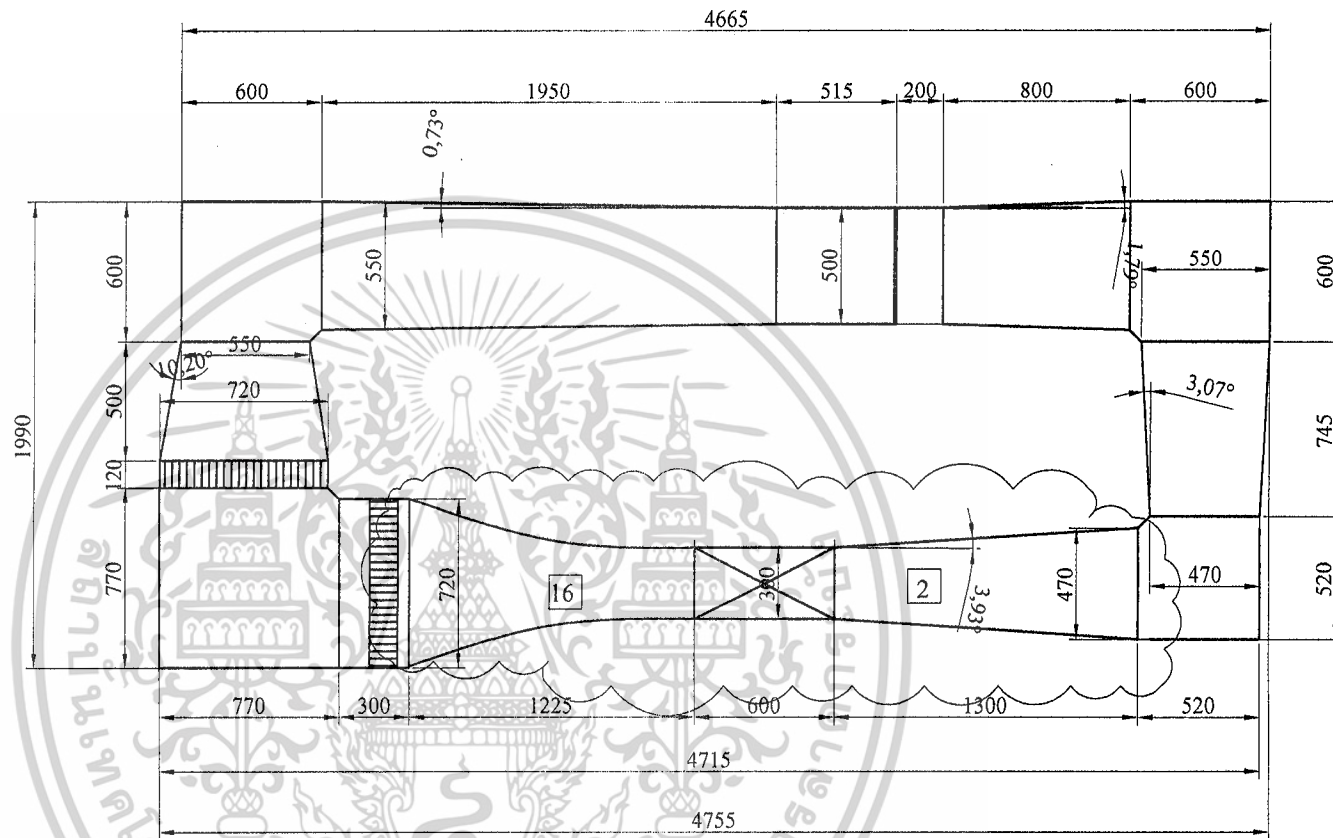


ภาคผนวก ก

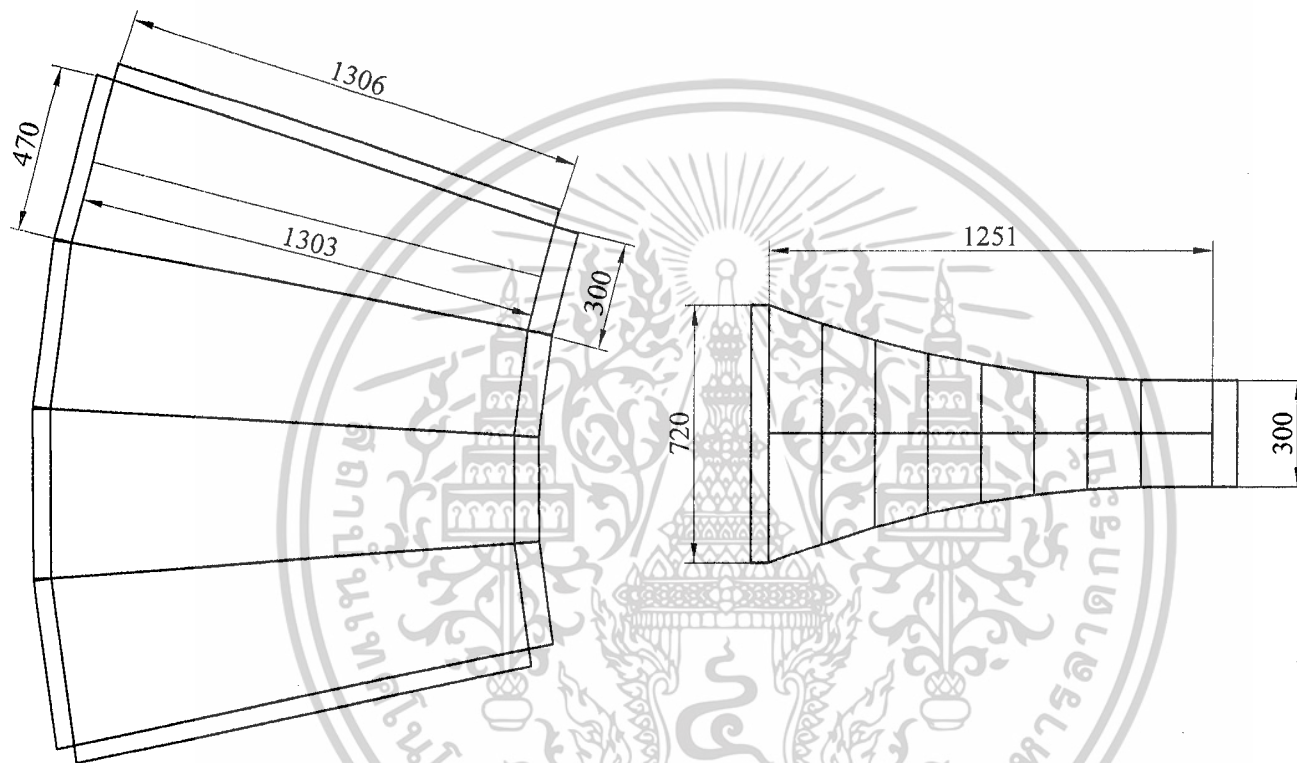
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นอกลีด



รูปแบบที่ปรับปรุง
คู่มือคำนวณความเร็วต่ำแบบปิด



2 ดิฟฟิวเซอร์

16 นอสนีล

แผ่นคลี่ส่วนประกอบที่ 2 และ 16

รูปแบบที่ปรับปรุง
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

วัน เดือน ปี

15 / 02 / 2552

แผ่นที่

2/2



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด

(Design and construction of low-speed closed-loop wind tunnel)

ธนวัฒน์ สุขพานิช¹, นนทวิช อ่วมเจริญ¹, สุกัญญา ขุนจัน¹

.....
สยาม สงวนรัมย์²

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดลมในการทดสอบชิ้นงานที่ต้องการทราบแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ เช่น แรงต้าน แรงยก แรงจาก และแรงตามแนวแกน อุโมงค์ลมที่ทำการออกแบบมีหน้าตัดทดสอบเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 0.3 เมตร สูง 0.3 เมตร ขนาดความยาว 0.6 เมตร กำลังมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวกำเนิดลมมีขนาด 6.2 กิโลวัตต์ ย่านความเร็วที่ต้องการในหน้าตัดทดสอบ 0-30 เมตรต่อวินาที หลักการและข้อสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบอุโมงค์ประกอบด้วย 1.การไหลเป็นแบบอัดตัวไม่ได้และ 2.การไหลเป็นแบบสม่ำเสมอ ปัญหาสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบคือ การสูญเสียจากความเสียดทานในแต่ละชั้นส่วนของอุโมงค์ลม อันส่งผลต่อการลดลงของความเร็วลม, การลดลงของความสม่ำเสมอของการไหลและเสียงดังที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีของลมกับผนังอุโมงค์ลม จุดเด่นของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิดคือ ภายในระบบมีการหมุนวนของอากาศซึ่งมีความเร็วเหลืออยู่หลังจากออกจากหน้าตัดทดสอบ ทำให้เกิดการเสริมกันของความเร็วลมในรอบการทำงานต่อไปและอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิดมีเสียงดังน้อยกว่าแบบเปิดเพราะไม่มีเสียงดังออกสู่ภายนอก ประโยชน์ของอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิดคือ 1.เป็นอุปกรณ์ประกอบการเรียนการสอนในวิชากลศาสตร์ของไหลและวิชาอากาศพลศาสตร์ 2.เป็นอุปกรณ์ใช้ทดสอบแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ของกังหันลม, แบบจำลองถยนต์, ชิ้นส่วนอากาศยาน, และวัตถุชนิดต่าง ๆ

Abstract

The purpose of this thesis is to study of a design and construction of low-speed closed-loop wind tunnel when using device to generate a wind for experimental object that effect to aerodynamics force, such Drag force, Lift force, Normal force, and Axial force. Then a wind tunnel that has a square by 0.3 m wide by 0.3 m high and 0.6 m length. The motor supply using to generate a wind has 6.2 kW that can adjust for velocity as 0-30 m/s. For a principle and hypothesis that use for support is incompressible flow and steady flow. The main problem that effective with design and construction is loss. The loss, which occurs from friction so that effective to reduce velocity, to reduce of steady flow, and the noise which occurs from friction between wind and wall. Characteristic of its which have a circulation of wind caused if velocity increased. For advantage of low-speed closed-loop wind tunnel are 1. Equipment for study fluid mechanics and aerodynamics 2. Use to experiment about aerodynamics force for wind-turbine, model of car, component of aircraft include another which effect to aerodynamics force.

Keywords:

บทนำ

ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยและออกแบบอุโมงค์ลม เพื่อใช้ในการทดสอบชิ้นส่วนในทางอุตสาหกรรมการบิน ด้านการออกแบบรถยนต์ เครื่องบิน และระสวยอวกาศ โดยอุโมงค์ลมแต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ที่เหมาะสมกับขนาดของชิ้นงานและความเร็วลมที่ต้องการทดสอบ จึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่งที่ผู้ศึกษาวิจัยและออกแบบต้องมีความรู้ความเข้าใจอันดีเกี่ยวกับตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการณ์การไหลของอากาศ การออกแบบอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิดนี้จะศึกษาถึงผลกระทบ อันเนื่องมาจากความเสียดทานของผนังของอุโมงค์ลม ความสม่ำเสมอของการไหล รวมไปถึงทิศทางการไหล ซึ่งล้วนแต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมทั้งสิ้น ทั้งนี้ผู้ศึกษาวิจัยควรแก้ไขปรับปรุงผลกระทบเหล่านี้ให้ลดลงเพื่อให้อุโมงค์ลมสร้างกระแสอากาศที่ไหลอย่างสม่ำเสมอในทุกย่านความเร็วลม

นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. ห้อง 3Q/1, 3Q/2 รหัส 49015494, 49015496 และ 49015547 ตามลำดับ

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สจล. อีเมล kssavam@kmitl.ac.th ขอหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์

A	แรงตามแนวแกน (N)	P_a	กำลังที่ของไหลได้รับ (kW)
a	ความเร็วเสียง (m/s)	q_1	ความดันจลน์ (N/m^2)
D	แรงต้าน (N)	Q	อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)
D_h	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)	R	ค่าคงที่สากลของแก๊ส ($J/kg.K$)
f	ตัวประกอบความเสียดทาน	Re	เลขเรย์โนลด์
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)	T	อุณหภูมิของอากาศ (K)
h_L	การสูญเสียที่ตำแหน่งต่างๆ (m)	t	เวลา (sec)
hp	การสูญเสียจากแหล่งจ่ายกำลัง (m)	V	ความเร็วลม (m/s)
k	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ	V_1	ความเร็วลมที่ได้จากมานอมิเตอร์ (m/s)
K_{ex}	สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากการขยายหน้าตัด	w_w	ความกว้างหนึ่งช่องของตะแกรง (m)
K_f	สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากความเสียดทาน	z	ระดับความสูง (m)
K_L	สัมประสิทธิ์การสูญเสียที่ตำแหน่งต่างๆ	α	มุมปะทะของแพนอากาศ
K_{mesh}	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของตะแกรง	β_s	สัมประสิทธิ์ความพรุนของตะแกรง
L	แรงยก (N)	γ	ความถ่วงจำเพาะของอากาศ (N/m^3)
l	ความยาวของพื้นผิวทดสอบ (m)	μ	ความหนืดสัมบูรณ์ ($N.s/m^2$)
Ma	เลขมัค	ν	ความหนืดจลน์ (m^2/s)
\dot{m}	อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)	θ_e	มุมกางของกรวย
N	แรงยก (N)	ρ_a	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
p_0	ความดันรวม (N/m^2)	ρ_w	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
p_1	ความดันสถิตย์ (N/m^2)		

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิดให้ได้ความเร็วในย่าน 0-30 เมตรต่อวินาที
2. เพื่อใช้เป็นชุดทดสอบลักษณะการไหลของอากาศผ่านชิ้นงาน
3. เพื่อศึกษาแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อวัตถุ

ทฤษฎี

ขั้นตอนแรกในการออกแบบอุโมงค์ลมคือ การหาขนาด รูปร่างของหน้าตัดทดสอบ โดยทั่วไปอุโมงค์ลมจะใช้ทดสอบยานพาหนะ และชิ้นส่วนของยานพาหนะ อุโมงค์ลมส่วนใหญ่ใช้ในการทดสอบแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ ผลจากการทดสอบจะใช้เป็นข้อมูลในการแก้ไขการทำงาน รวมทั้งการควบคุมการทรงตัวของยานพาหนะเช่น เครื่องบิน รถเรือ เป็นต้น

การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมให้ได้ความเร็วลมในย่านที่ต้องการนั้น ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากส่วนประกอบต่างๆ ที่มีผลให้ความเร็วลมลดลง ซึ่งผลกระทบต่างๆ มีดังนี้ ความยาวและเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของส่วนประกอบ,ตัวประกอบความเสียดทาน(Friction factor) เลขเรย์โนลด์ ความหนาแน่นของอากาศ สัมประสิทธิ์ความพรุนของแผงกรองการไหล เส้นผ่านศูนย์กลางลดแผงกรองการไหล มุมเลี้ยวของอุโมงค์ลมและความขรุขระสัมบูรณ์ของวัสดุที่ใช้ทำอุโมงค์ลม เช่นผลจากความขรุขระสัมบูรณ์ของผนังอุโมงค์ลม มีผลให้การไหลเป็นแบบไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดเนื่องจากเกิดความเสียดทานจากผนังจึงทำให้ ความเร็วลมลดลง

การออกแบบและคำนวณหาขนาดของอุโมงค์

I. หน้าตัดทดสอบ (Test-section)

การออกแบบหน้าตัดทดสอบจะต้องออกแบบให้หน้าตัดทดสอบมีความยาว ≥ 2 เท่าของ D_h (Hydraulic diameter) วัสดุที่ใช้ทำให้อุโมงค์ลมส่วนใหญ่ใช้แผ่นอะคริลิก การสูญเสีย (loss) จะขึ้นอยู่กับความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 วิศวกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต
 แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\Delta p}{\rho} = f \frac{LV^2}{D_h 2}$$

หาสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

$$K_f = f \frac{L}{D_h}$$

รับท่อเรียบที่มีค่า เรย์โนลด์นัมเบอร์สูงมากสูตรที่ใช้หาค่าตัว
 อยบความเสียดทานคือ

$$f = [2 \log_{10}(R_e \sqrt{f}) - 0.8]^2$$

พีพิวเซอร์ (Diffuser)

จะมีลักษณะดังรูป 1 ส่วนประกอบหลักจะมี 2 ส่วนคือส่วน
 ที่รับลมจากหน้าตัดทดสอบ และส่วนที่รับลมจากโบลเวอร์
 เรียกว่า รีเทิร์นดัก (Return duct) ดิฟฟิวเซอร์มีไว้เพื่อลด
 ความเร็ว และทำให้การสูญเสียน้อยลง

- โดยทั่วไปจะออกแบบให้มุมอยู่ในช่วง 2-3.5 องศา หรืออาจจะมีค่าน้อยกว่าก็ได้ สำหรับความยาวของดิฟฟิวเซอร์อย่างน้อย 3-4 เท่าของความยาวหน้าตัดทดสอบ
- อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด จะอยู่ในช่วง 2-3 เท่า หรืออาจจะมีน้อยกว่าก็ได้

$$A_R = \frac{A_2}{A_1}$$

- ความยาว L ต้องยาวอย่างน้อย 3-4 เท่าของหน้าตัดทดสอบ
- คำนวณหา Equivalent cone angle จากสมการ

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{R_2 - R_1}{L} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2} \frac{\sqrt{A_R} - 1}{L/D_1} \right)$$

การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

$$K_d = K_f + K_{ex}$$

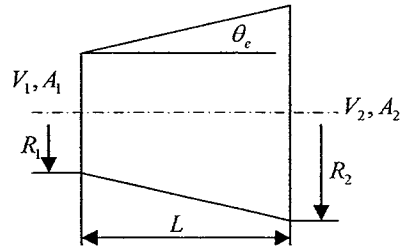
K_f คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความเสียดทาน (friction loss coefficient)

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R} \right) \frac{f}{8 \sin \theta}$$

สำหรับตัวประกอบแรงเสียดทานคำนวณในกรณีที่เป็นหน้า

ตัดที่ใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตรงทางเข้าของดิฟฟิวเซอร์

K_{ex} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียการขยายหน้าตัด (expansion loss coefficient)



รูปที่ 1. ดิฟฟิวเซอร์

$$K_{ex} = K_e(\theta) \left(\frac{A_R - 1}{A_R} \right)^2$$

$K_e(\theta)$ ต้องคำนึงถึงรูปร่างของหน้าตัดดิฟฟิวเซอร์ และมุมกรวย (Equivalent cone angle) ซึ่งสำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยม และมุม $1.5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$ จะใช้

$$K_{e(square)} = 0.1222 - 0.04590\theta + 0.02203\theta^2 + 0.003269\theta^3 - 0.0006145\theta^4 - 0.00002800\theta^5 + 0.00002337\theta^6$$

3. มุมเหลี่ยม (Corner)

มุมเหลี่ยมมีตัวช่วยปรับทิศทางของลมเรียกว่า Vane guide ซึ่งช่วยลดแรงปะทะกับผนังและลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียคือ

$$K_c = 0.10 + \frac{4.55}{(\log_{10} R_{ec})^{2.58}}$$

ค่าเรย์โนลด์ส์คิดจากค่าที่เกิดขึ้นตรงมุมเหลี่ยม

4. ตะแกรงนิรภัย (Safety screen)

มีไว้เพื่อป้องกันวัตถุปะทะกับใบพัดของโบลเวอร์ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้

สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตะแกรงนิรภัย (Safety screen)

$$K_m = K_{mesh} K_{Rn} \sigma_s + \frac{\sigma_s^2}{\beta_s^2}$$

K_{mesh} จะขึ้นอยู่กับชนิดของลวด ซึ่งในที่นี้ใช้ค่า 1.3 สำหรับลวดกลม

β_s เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความพรุนของตะแกรง หาได้จาก

$$\beta_s = (1 - d_w \rho_w)^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายประชาสัมพันธ์ โทร. 0-2554-1000
 หรือเยี่ยมชมเว็บไซต์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_w = \frac{1}{w_m}$$

d_w คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด

w_w คือ ค่าความกว้างต่อหนึ่งช่องของตะแกรง

R_{ew} ค่าเรย์โนลด์ที่ ≥ 400 จะใช้ค่า $R_{Rn} = 1.0$

i. ตัวปรับการไหล (Honeycombs or Turbulence screen)

เป็นตัวปรับการไหลให้มีความเร็วตลอดหน้าตัดคงที่

และการหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียหาคจากสมการ

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta_h} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1 \right)^2$$

λ_h ในกรณีที่ค่าเรย์โนลด์มีค่ามากกว่า 275 ต้องคำนึงถึงความเรียบของผิววัตถุทำด้วย

$$\lambda_h = 0.214 \left(\frac{\varepsilon}{D_h} \right)^{0.4}$$

D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุ

L_h คือความหนาของตัวปรับการไหล (Screen)

ii. นอสเซิล (Nozzle)

เป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มความเร็ว ถูกติดตั้งก่อนทางเข้าหน้าตัด

ทดสอบ หาสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

$$K_{nt} = 0.32 f_{av} \frac{L_n}{D_{st}}$$

f_{av} คือค่าเฉลี่ยของตัวประกอบความเสียดทานระหว่างทางเข้าและทางออกของนอสเซิล

L_n คือความยาวของนอสเซิล

D_{st} คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดทดสอบ

การวัดความดัน ความเร็ว และแรงเชิงอากาศพลศาสตร์

การวัดความเร็วด้วย pitot tube

pitot tube ใช้สำหรับวัดความเร็วลม ถูกติดตั้งไว้ที่หน้าตัด

ทดสอบ ท่อ pitot tube ประกอบด้วย 2 ข้อต่อคือ Static connection

และ Total connection โดยข้อทั้งสองจะเชื่อมต่อกับமானอมิเตอร์ที่ใช้

สำหรับวัดความดัน ความดันที่วัดได้จากமானอมิเตอร์จะอยู่ในรูปของ

ความสูงของน้ำ ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณดังนี้

$$\text{total pressure} = \text{static pressure} + \text{dynamic pressure}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p_0 = p_1 + q_1$$

หรือ

$$q_1 = p_0 - p_1$$

ดังนั้นเราสามารถหาความเร็วได้จากสมการ

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_1)}{\rho}}$$

2. การวัดความเร็วด้วย anemometer

Anemometer เป็นอุปกรณ์วัดความเร็วลมแบบดิจิตอล สามารถวัด

ความเร็วลมได้หลายหน่วย เช่น เมตรต่อวินาที (m/s) กิโลเมตรต่อชั่วโมง

(km/hr) ฟุตต่อนาที (ft/min) และกิโลนอต (knots)

3. การวัดแรงเชิงอากาศพลศาสตร์

การเกิดแรงเชิงอากาศพลศาสตร์บนปีกของเครื่องบิน รถยนต์

และแพนอากาศ มีความซับซ้อนค่อนข้างมากเพราะมันเป็นการวิเคราะห์

สนามการไหลใน 3 มิติ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องสร้างอุปกรณ์

กำเนิดลมหรืออุโมงค์ลมขึ้นมาทดสอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ได้ทำการออกแบบ

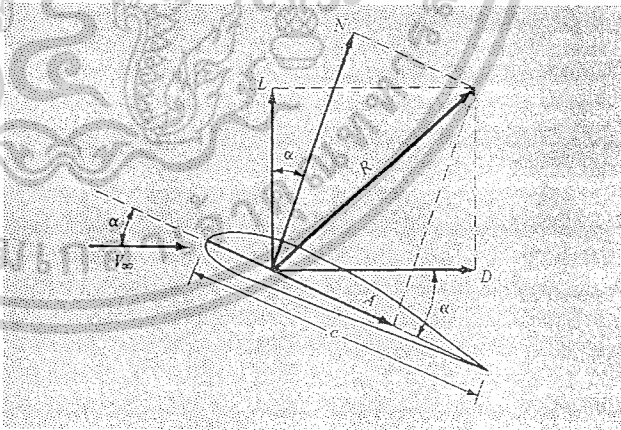
ขึ้น เพื่อศึกษาแรงเชิงอากาศพลศาสตร์ที่มีผลต่อชิ้นส่วนต่าง ๆ แรง

เหล่านั้นได้แก่ แรงยก แรงต้าน แรงฉาก และแรงตามแนวแกน ซึ่ง

ความสัมพันธ์ของแรงทั้งสี่มีดังนี้

$$L = N \cos \alpha - A \sin \alpha$$

$$D = N \sin \alpha + A \cos \alpha$$



รูปที่ 2. แรงที่กระทำกับแพนอากาศ

ส่วนประกอบ โครงสร้างและการติดตั้ง

ในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบ โครงสร้างและการ

ติดตั้งอุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบขึ้น

ประกอบของอุโมงค์ลม

1. หน้าตัดทดสอบ (Test section)
2. ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)
3. นอซเซิล (Nozzle)
4. มุมเหลี่ยม (Corner)
5. โบลเวอร์ (Blower)
6. ตัวปรับการไหล (Honeycombs or Turbulence screen)
7. ชุดบังคับทิศทางการไหล (Turning vane or Guide vane)
8. ลิ้นปีกผีเสื้อ (Butterfly throttle valve)
9. ตะแกรงนิรภัย (Safety screen)
10. แผงไฟฟ้าควบคุมโบลเวอร์

กรณีวัด

1. มานอมิเตอร์ (manometer)
2. Anemometer
3. ชุดวัดแรงเชิงอากาศพลศาสตร์
4. ท่อปีโทท (Pitot tube)

ตอนการประกอบอุโมงค์ลม

1. นำแผ่นสังกะสีมาวางแบบแล้วทำการพับเป็นชิ้นส่วนต่างๆ
2. ประกอบชุดบังคับทิศทางการไหลเข้ากับมุมเหลี่ยมทั้ง 4 มุม
3. ประกอบท่อการไหลเข้ากับชุดการไหลทั้ง 2 ชุด
4. ติดตั้งชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอุโมงค์ลมเข้าด้วยกัน
5. สร้างฐานของอุโมงค์ลมแล้วประกอบเข้ากับอุโมงค์ลม
6. ติดตั้งชุดวัดความดันหรือมานอมิเตอร์
7. ติดตั้งชุดวัดความเร็วหรือปีโทท
8. ติดตั้งชุดวัดแรงอากาศพลศาสตร์

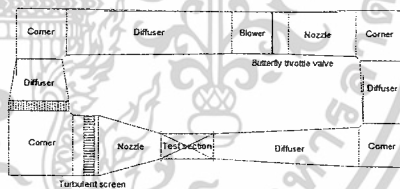
อุโมงค์ลมแบบเปิด

ข้อดี

1. กระแสลมจะไหลเวียนในอุโมงค์ลม โดยผ่านมุมเหลี่ยมและแผงกรองการไหลซึ่งสามารถควบคุมคุณภาพการไหลได้ และไม่มีผลกระทบต่อสภาพอากาศภายนอก
2. ขณะอุโมงค์ลมถูกใช้งาน เสียงที่เกิดขึ้นจากการทดสอบจะเงียบกว่าระบบเปิด
3. ในการสร้างความเร็วลมจะใช้พลังงานที่น้อยกว่าระบบเปิด เพราะพลังงานที่ทำให้ลมเคลื่อนที่ในรอบแรกยังคงเหลืออยู่พอที่จะทำให้ลมเกิดความเร็วใช้งานในรอบต่อไป

ข้อเสีย

1. ต้นทุนในการสร้างสูงกว่าระบบเปิดเพราะต้องสร้างชุดที่ทำลมกลับมาใช้งานอีกครั้ง
2. มีความยุ่งยากในการทำความสะอาดมากกว่าระบบเปิด
3. ถ้าต้องการใช้อุโมงค์ลมให้เกิดประโยชน์สูงสุด จำเป็นต้องรักษาระดับอุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการทดสอบให้ได้ตามค่าที่กำหนด



รูปที่ 3. อุโมงค์ลมแบบเปิดและแบบปิด

การทดลองและผลการทดลอง

1. การทดลองหาความเร็วด้วย Anemometer

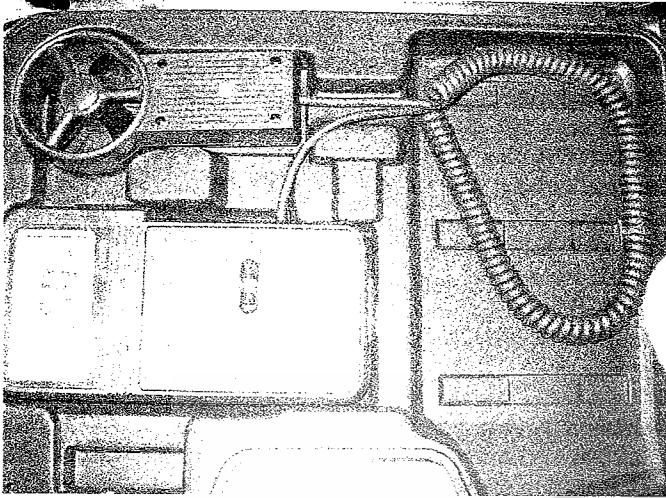
อุปกรณ์การทดลอง

ชุดทดลอง Anemometers

ขั้นตอนการทดลอง

1. ประกอบ Anemometers เข้ากับหน้าตัดทดสอบ
2. เปิดสวิตช์เครื่องเป่าลม (Blower) แล้วปรับความเร็วของปีกผีเสื้อเริ่มจากตำแหน่งที่ 1 ทำการบันทึกค่าที่แสดงที่หน้าจอของเครื่อง Anemometer ทดลองจนครบ 7 ตำแหน่ง หลังจากนั้นเปลี่ยนตำแหน่งที่ตั้งเครื่องวัดเริ่มจากบริเวณกลางหน้าตัดทดสอบและที่บริเวณผนังหน้าตัดทดสอบ ทำการบันทึกค่าอีกครั้ง

ไม่ว่าการณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาผลการทดลอง แสดงในตารางที่ 1 การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 anemometers

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวัดความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมโดย anemometers โดยการปรับตำแหน่งลิ้นปีกผีเสื้อ จากตำแหน่งปิดสุด ถึงตำแหน่งเปิดสุด พบว่าความเร็วลมที่ได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหน้าตัดทดสอบในการปรับลิ้นปีกผีเสื้อตำแหน่งเดียวกัน ความเร็วลมที่ได้ มีค่าใกล้เคียงกัน และตำแหน่งที่ลิ้นปีกผีเสื้อเปิดสุด ได้ความเร็วลมเฉลี่ยสูงสุดที่ 21 เมตรต่อวินาที โดยที่บริเวณศูนย์กลางของหน้าตัดทดสอบ จะได้ความเร็วลมสูงกว่าบริเวณผนังของหน้าตัดทดสอบ เล็กน้อย

สรุปและวิจารณ์

เนื่องจากโครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้าง อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด สำหรับใช้เป็นอุปกรณ์กำเนิดลมในการ ทดสอบแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับปีกเครื่องบินและแพนอากาศ ยาน ความเร็วลมที่ต้องการในหน้าตัดทดสอบสำหรับทดสอบแพนอากาศอยู่ใน ช่วง 0-30 เมตรต่อวินาที

ในโครงการนี้จะเน้นในเรื่องของการออกแบบและสร้างอุโมงค์ เป็นหลัก ส่วนการทดสอบปีกเครื่องบินและแพนอากาศจะไม่ลง รายละเอียดมากนัก สมการต่าง ๆ สำหรับการออกแบบส่วนประกอบ ของอุโมงค์ลมจะอ้างอิงจากหนังสือ Low-Speed Wind Tunnel Testing ของ Jewel B. Barlow จากการออกแบบพบว่าส่วนประกอบ ทุกชิ้นของอุโมงค์ลมมีความสำคัญกับคุณสมบัติของลมทั้งสิ้น เช่น การ เลือกขนาดหน้าตัดทดสอบจะส่งผลกับขนาดของแบบจำลองที่นำมาทำ การทดสอบเพราะถ้าเลือกขนาดหน้าตัดทดสอบที่ใหญ่ก็จะสามารถใช้ แบบจำลองที่ใหญ่ได้ แต่จะควบคุมความสม่ำเสมอของความเร็วลมได้ ยากและได้ความเร็วลมที่ต่ำ แต่ถ้าเลือกขนาดหน้าตัดทดสอบที่เล็กก็จะ สามารถใช้งานได้กับแบบจำลองขนาดเล็ก แต่ควบคุมความสม่ำเสมอได้

ง่ายและได้ความเร็วสูง ดังนั้นในการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมของ โครงการนี้จะพิจารณาความเหมาะสมในการใช้งานและต้นทุนการ สร้าง เป็นหลัก

อุโมงค์ที่ใช้งานกันโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่และมีต้นทุนสูง โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีใช้ในประเทศที่พัฒนาแล้วและเป็นประเทศที่เป็น ผู้ออกแบบและสร้างยานพาหนะที่เกี่ยวข้องกับ รถยนต์ เครื่องบิน เรือ เติ่นสมุทร และกระสวยอวกาศ แต่โครงการนี้มีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่ต่ำจึง ออกแบบและสร้างเพียงอุโมงค์ลมขนาดเล็กเท่านั้น และนักศึกษาเป็น ผู้สร้างขึ้นเอง จึงมีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในบางจุด ดังนั้นจึงควรมีการ พัฒนาโครงการนี้ในระดับขั้นต่อไป

จากการดำเนินงานการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลม สามารถ สรุปผลได้ดังนี้

1. อุโมงค์ลมที่ออกแบบและสร้างมีขนาดที่เหมาะสมกับการ ทดลองและใช้ต้นทุนต่ำ เหมาะสำหรับให้ทดสอบชิ้นส่วนของเครื่องบินที่ มีขนาดเล็กและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สูงนัก
2. ความเร็วที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 0-25 เมตรต่อวินาที ซึ่ง ผลของความเร็วที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่คาดหวังไว้ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิ ของอากาศที่สูงและไม่มีการระบายความร้อน ให้กับโบลเวอร์จึงทำให้ความเร็วลมตกลง ตัวรับความเร็วลมที่ใช้ใน อุโมงค์ลมเป็นแบบลิ้นปีกผีเสื้อจึงปรับความเร็วลมได้ไม่แม่นยำมากนัก และลิ้นปีกผีเสื้อมีการสูญเสียที่สูง จึงทำให้ความเร็วลมลดลงด้วย
3. ความสม่ำเสมอของลมในหน้าตัดทดสอบมีระดับปานกลาง เพราะอุโมงค์ลมมีขนาดเล็ก จึงมีระยะทางในการปรับความสม่ำเสมอ ของลมค่อนข้างสั้น อาจแก้ไขโดยการเพิ่มความยาวของหน้าตัดทดสอบ
4. การสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนประกอบของอุโมงค์ลม เช่น ที่บริเวณมุมเหลี่ยมทั้ง 4 มุม มีการติดตั้งชุดบังคับทิศทางไหลไว้ เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการปะทะของลมกับผนังอุโมงค์ลม การ สูญเสียที่ชุดกรองการไหลอากาศมีค่าค่อนข้างสูง เพราะอุปกรณ์ชุดนี้จะ ต้านความเร็วลมของอากาศที่ไหลหมุนเวียนในระบบ
5. สถานที่ติดตั้งอุโมงค์ลมเป็นห้องขนาดเล็กมีอากาศถ่ายเท น้อยและไม่มีการปรับอากาศ จึงทำให้อุณหภูมิในห้องสูง จึงควรมีการ ติดตั้งระบบปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้สม่ำเสมอ เพราะจะส่งผลให้การทดสอบชิ้นส่วนในอุโมงค์ลมมีค่าแม่นยำมากขึ้น
6. ประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนา จึงยังขาดอุปกรณ์ และเครื่องมือที่เหมาะสมมาใช้ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ให้เกิดขึ้น ดังนั้นควรมีการส่งเสริมการวิจัยและ พัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อที่จะได้ตามทันเทคโนโลยีของประเทศที่ พัฒนาแล้วหรือเป็นผู้สร้างมากกว่าผู้รับเทคโนโลยี

งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Munson, B. R. , Young, D. F. , Okiishi, T. H. ,
“Fundamentals of Fluid Mechanics,”
John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2006
- [2] John, D. , Anderson, Tr. ,
“Fundamentals of Aerodynamics,”
McGraw-Hill, 2007
- [3] Barlow, J. B. , Rae, W. H. , Pope, A. ,
“Low-Speed Wind Tunnel Testing, ”
John Wiley & Sons, 1999



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้