

การออกแบบและสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมเพื่องานวิศวกรรม

A DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WIND  
TUNNEL FOR ENGINEERING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ศาสตราจารย์ ดร. นงนุช วัฒนศิริ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมเพื่องานวิศวกรรม

A DESIGN AND CONTRUCTION OF A WIND  
TUNNEL FOR ENGINEERING



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบและสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมเพื่องานวิศวกรรม  
นักศึกษา นายทวิโชค กุณาศล รหัสประจำตัว 54010504  
นายชนบดี รินรดา รหัสประจำตัว 54010538  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชลิตา อุตะเกา

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์	
ดร.อภิวุฒิ สุจริตพงศ์	
ดร.อาทิตย์ เพชรศิธร	
อ.ทรงกมล แซ่อึ้ง	
ดร.ชลิตา อุตะเกา	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



( ผศ.ดร.นันทวัฒน์ จรัสโรจน์ธนเดช )

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 25 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การออกแบบและสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมเพื่องานวิศวกรรม

นายทวีโชค      กุณาศล      54010504

นายธนบดี      รินรดา      54010538

ดร.ชลิตา      อุตะเถา      อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

## บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ จัดทำขึ้นเพื่อออกแบบ และสร้างอุโมงค์ลมแบบเปิดที่สามารถปรับค่าความเร็วลมได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาแรงลมที่เกี่ยวกับหลักการด้านวิศวกรรมต่างๆ เช่น แรงกระทำด้านข้าง โดยมีหลักสำคัญคือ ความยาวของท่อลดความเร็วของอากาศจะต้องมีความยาวเท่ากับหรือมากกว่าสองเท่าของความยาวส่วนทดสอบ เพื่อไม่ให้ลักษณะการไหลของอากาศในส่วนทดสอบเกิดการไหลแบบปั่นป่วน ในส่วนของระบบควบคุมความเร็วลมใช้ Inverter ควบคุมการจ่ายความถี่ไฟฟ้าขนาด 3 Phase ของเครื่องกำเนิดลม สามารถปรับค่าความถี่ไฟฟ้าให้อยู่ในช่วง 20.00 ถึง 50.00 Hertz จากการทดลองความเร็วลมในช่วงหน้าตัดทดสอบที่ได้จะอยู่ในช่วง 14.60 ถึง 38.05 เมตรต่อวินาที มีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ไฟฟ้ากับความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบเป็นสมการเชิงเส้น  $Y = (0.7945 \cdot (X - 20)) + 14.629$  ( $Y =$  ความถี่ไฟฟ้า,  $X =$  ความเร็วลม) ได้กำหนดแรงดันสูงสุดเท่ากับ 90.31 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สามารถนำไปใช้ในการทดสอบ High Frequency Force Balance ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# A Design and Contruction of a Wind tunnel for Engineering

Mr. Taweechok Kunason 54010504

Mr. Tanabodee Rinrada 54010538

Dr. Chalida U-tapao Co-Advisor

Academic Year 2014

## ABSTRACT

This special project prepared to design and build the open loop wind tunnel, which can be utilized. In the study an experiment in wind force from engineering principles such as lateral force, with primary focus is the length of the diffuser must have a length equal to or more than twice the length of the test to prevent the turbulent flow in the test area. The wind speed control system use Inverter to control 3 Phase frequency of electricity supply to air blower. From the experiment adjust the frequency in the range of 20.00 to 50.00 Hertz, results wind speed during the test area has to be in the range of 14.50 to 38.50 meters per second and graph of the relationship between frequency and wind speed during the test area as linear equation  $Y = (0.7945 \times (X-20)) + 14.629$  (Y = Frequency of electricity, X = wind speed) The maximum pressure 90.31 kilograms per square meter. That can be used to test for High Frequency Force Balance.

# กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง การออกแบบและสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลม เพื่องานวิศวกรรม สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้อง ส่งผลให้โครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์

ดร.ชลิดา อู่ตะเภา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาโครงการพิเศษนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้านตลอดเวลาที่ผ่านมา

คุณมนิตช์ บุบผาชาติ ช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้คำแนะนำ ความรู้ ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวก และการจัดสรรสถานที่ในการทำโครงการพิเศษ ตลอดเวลาที่ผ่านม

คุณธีรวัฒน์ ศรีสุพัฒน์ ตำแหน่ง Marketing Engineer Team A บริษัท Kruger Ventilation Industries (Thailand) กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้คำแนะนำ ความรู้ ความช่วยเหลือ ในด้านเกี่ยวกับ เครื่องกำเนิดลม และจัดหาให้ในราคาต้นทุนการผลิต

ทวีโชค ภูณาสล

ธนบดี รินรดา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 วิธีที่จะดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์	3
2.1 อุโมงค์ลม	3
2.2 ชนิดของอุโมงค์ลม	3
2.3 อุโมงค์ลมแบ่งชนิดตามความเร็วของการไหลของอากาศภายในอุโมงค์	6
2.4 ส่วนประกอบหลักของอุโมงค์ลม	6
2.5 แรงลม	8
2.6 ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544	10
2.7 การทดสอบในอุโมงค์ลม	11
2.8 เครื่องวัดความเร็วลม	17
2.9 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณค่าสูญเสียในอุโมงค์ลม	18
2.10 ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล	23
2.11 ทฤษฎีเกี่ยวกับพัดลม	26

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน	35
3.1 การค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล	35
3.2 การวิเคราะห์และออกแบบ	35
3.3 การจัดเตรียมและดำเนินการสร้างอุโมงค์ลม	37
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของอุโมงค์	43
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	46
4.1 การออกแบบอุโมงค์ลม	46
4.2 การสร้างอุโมงค์ลม	59
4.3 การทดสอบความเร็วลมของหน้าตัดทดสอบ	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	75
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	75
5.3 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม	77
ภาคผนวก	80

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544	10
3.1 ตัวอย่างตารางแสดงผลการทดสอบค่าความเร็วลมที่วัดได้	45
4.1 ตารางแสดงผลการทดสอบค่าความเร็วลมที่วัดได้	72



# สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 แสดงการไหลของอากาศในอุโมงค์ลมจำลองการไหลของอากาศผ่านรถยนต์	3
2.2 อุโมงค์ลมแบบดูด	4
2.3 อุโมงค์ลมแบบเป่า	5
2.4 อุโมงค์ลมแบบปิด	5
2.5 ส่วนประกอบหลักของอุโมงค์ลม	7
2.6 พฤติกรรมของแรงลมที่กระทำต่ออาคาร	9
2.7 ค่าแรงตาม พ.ร.บ.ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544	11
2.8 แบบจำลองย่อส่วนของอาคารและอาคารข้างเคียงในอุโมงค์ลม	15
2.9 แบบจำลองแข็ง ที่ติดตั้งท่อส่งแรงดัน เพื่อวัดความดันลมที่จุดต่างๆ ของผนังโดยรอบอาคาร	16
2.10 แบบจำลองหน้าตัดสะพานบางส่วนในอุโมงค์ลม	17
2.11 แบบจำลองหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งอยู่บนสปริง เพื่อจำลองคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์	17
2.12 เครื่องวัดความเร็วลม	18
2.13 ท่อลดความเร็วของอากาศ	20
2.14 ลักษณะต่างๆ ของตะแกรงปรับการไหล	23
2.15 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยง	27
2.16 พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน	27
2.17 การทดสอบอุโมงค์ลม โดยวิธี High frequency force balance model tests	28
2.18 ரச.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย กับ การทดสอบโมเดลอาคารสูงในอุโมงค์ลม	29
2.19 นาย อรรถพร เรื่องพิเศษ กับ โครงการวิจัยแบบจำลองการบิน	30
2.20 อุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียงขนาดเล็ก	32
3.1 ท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser)	36
3.2 แผ่นอะคริลิกที่สั่งตัดไว้	38
3.3 ตัวอย่างน๊อตและสกรูที่ใช้	38
3.4 เครื่องกำเนิดลม	39
3.5 เหล็กฉาก	39
3.6 น้ำยาประสานอะคริลิก	40
3.7 ตัวถือครูปตัว C	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.8 ประแจไขน็อตขนาดต่างๆ	41
3.9 เข็มฉีดยาสำหรับฉีดน้ำยาประสานอะคริลิก	41
3.10 ซิลิโคนพร้อมปืนฉีด	42
3.11 ส่วนสำหรับเจาะ	42
3.12 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเร็วลม	43
3.13 แสดงภาคตัดด้านหน้า	43
3.14 แสดงภาคตัดด้านข้าง	44
4.1 แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อทางเข้าอุโมงค์	47
4.2 แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อทางเข้าอุโมงค์	47
4.3 แสดงภาพการออกแบบและขนาดตะแกรงปรับการไหล	48
4.4 แสดงภาพการออกแบบและขนาดปากท่อรีดอากาศ	49
4.5 แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อรีดอากาศ	50
4.6 แสดงภาพการออกแบบและขนาดหน้าตัดทดสอบ ช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ ฝาปิดช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ	52
4.7 แสดงภาพการออกแบบและขนาดหน้าตัดทดสอบ ช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ ฝาปิดช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ	52
4.8 แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อลดความเร็วของอากาศ	54
4.9 แสดงภาพการออกแบบและขนาดความยาวของอุโมงค์ลม	55
4.10 แสดงรายละเอียดเครื่องกำเนิดลม	56
4.11 แสดงรายละเอียด เครื่องกำเนิดลม	57
4.12 แสดงรายละเอียดขาตั้งสปริงของเครื่องกำเนิดลม	58
4.13 ตัวอย่าง โลหะที่ใช้ทำขาตั้งเหล็ก	59
4.14 เครื่องกำเนิดลม	59
4.15 ขาตั้งสปริงของเครื่องกำเนิดลม	60
4.16 ช่วงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์กำเนิดลมและตัวอุโมงค์ลม	60
4.17 แผ่นอะคริลิกที่สังัด	61
4.18 โครงอะคริลิกที่ประกอบด้วยน้ำยาประสานและกาว	61
4.19 ส่วนท่อรีดอากาศเมื่อยิงสกรูยึดให้แข็งแรง	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.20 รอยต่อท่อรีดอากาศเมื่อติดแผ่นยางกันรั่วแล้ว	62
4.21 ขาดังช่วงท่อรีดอากาศ	63
4.22 โครงอะคริลิกของช่วงหน้าตัดทดสอบ	64
4.23 รอยต่อระหว่างท่อรีดอากาศและหน้าตัดทดสอบ	64
4.24 ขาดังของช่วงหน้าตัดทดสอบ	65
4.25 โครงอะคริลิกของช่วงท่อลดความเร็ว	65
4.26 ช่วงลดความเร็วเมื่อยิงสกรูเพิ่มความแข็งแรงและประกอบปีกรอยต่อแล้ว	66
4.27 รอยต่อของช่วงท่อลดความเร็ว	66
4.28 การต่อไฟเข้าตัวปรับความเร็ว	67
4.29 ภายในตู้ไฟฟ้าของอุโมงค์ลม	67
4.30 ภายนอกตู้ไฟฟ้าของอุโมงค์ลม	68
4.31 ภาพอุโมงค์ลมเมื่อประกอบเสร็จ	68
4.32 ภาพอุโมงค์ลมเมื่อประกอบเสร็จ	69
4.33 เครื่องวัดความเร็วลมขณะติดตั้งเพื่อทดสอบ	70
4.34 ตัว Inverter ปรับความเร็วไฟฟ้า	70
4.35 อุโมงค์ลมขณะทดสอบความเร็วลม	71
4.36 เครื่องวัดความเร็วลมขณะกำลังทดสอบความเร็วลม	71
4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับค่าความถี่ไฟฟ้า	73
ผ.1.1 ภาพอุโมงค์ลมในการออกแบบ	80
ผ.1.2 ภาพอุโมงค์ลมในการออกแบบด้านข้าง	80
ผ.1.3 ภาพอุโมงค์ลมในการออกแบบด้านบน	81
ผ.2.1 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 1	82
ผ.2.2 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 2	82
ผ.2.3 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 3	83
ผ.2.4 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 4	83
ผ.2.5 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 5	84
ผ.2.6 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 6	85
ผ.2.7 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 7	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
IX  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
ผ.2.8 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 8	87
ผ.2.9 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 9	87
ผ.2.10 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 10	88
ผ.2.11 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 11	88
ผ.2.12 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 12	89
ผ.2.13 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 13	89
ผ.2.14 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 14	90
ผ.2.15 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 15	90
ผ.2.16 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 16	91
ผ.2.17 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะครีลิคแบบที่ 17	92



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

แรงลมเป็นแรงหลักกระทำที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างโดยเฉพาะอาคารสูง (การออกแบบอาคารสูงโดยใช้ผลกระทบของลม Ekkawee Ujjin 2008) ปัจจุบันวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเพื่อรับแรงลมที่มีค่าแปรผันตามช่วงความสูงของอาคารที่ออกแบบ และสถานที่ที่จะทำการก่อสร้าง หากแต่ในสภาพการใช้งานจริงแรงลมที่กระทำกับโครงสร้างมีความผันแปรเนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น มีอาคารมาบังแรงลมทำให้การออกแบบโครงสร้างโดยใช้ข้อกำหนดที่ตายตัวดังกล่าวอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงได้ ปัจจุบันการเติบโตของสิ่งก่อสร้างมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นอาคารสูง หรือสะพานยาว ขณะเดียวกัน งานวิจัยเพื่อการศึกษาผลของแรงลมต่ออาคารสูงและสะพานยาว จึงถูกให้ความสำคัญมากขึ้น ดังนั้นการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมเพื่องานวิศวกรรมโยธาจึงมีความสำคัญเพราะสามารถนำอุโมงค์ลมดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ในการวิจัยและการออกแบบอาคารสูงได้ นอกจากนี้อุโมงค์ลมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางวิศวกรรมด้านอื่นๆ เช่น การออกแบบยานพาหนะ กังหันลม แท่นเจาะน้ำมัน หรือ งานทางด้านวิทยาศาสตร์การกีฬา

โครงการชิ้นนี้จึงมุ่งที่จะทำการออกแบบและจัดสร้างอุโมงค์ลมเพื่อใช้ในการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ และ ทดสอบความเร็วลมของอุโมงค์ลมว่าสามารถใช้งานได้ถึงระดับสูงมากน้อยเพียงใด

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้าง อุโมงค์ลมขนาดห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุโมงค์ลมที่จัดสร้างขึ้น

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาเรื่องทิศทางลม ชนิดของลม ความเร็วลม ผลกระทบของแรงลมที่มีต่ออาคาร และมาตรฐานแรงลมที่ใช้ในการออกแบบ
2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับชนิด และการทำงานของอุโมงค์ลมที่มีในปัจจุบัน
3. ออกแบบอุโมงค์ลมขนาดห้องปฏิบัติการ

4. ทดสอบการทำงานของอุโมงค์ โดยวัดความเร็วลมที่ขนาดกำลังต่างๆ ของเครื่องกำเนิดลม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. สรุปและวิเคราะห์ การทำงานของอุโมงค์ลม

### 1.4 วิธีที่จะดำเนินการวิจัย

#### 1. การค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล

ทำการหาข้อมูลและศึกษา ชนิด ส่วนประกอบต่างๆ และการทำงานของอุโมงค์ลม หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดความเร็วลมและข้อมูลของราคาอุปกรณ์วัดความเร็วลม ศึกษาการทำงาน รายละเอียดต่างๆ รวมถึงราคาของพัดลม การศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบ ทฤษฎีคำนวณค่าสูญเสียในอุโมงค์ลม ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหลและทฤษฎีการหาประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม

#### 2. การวิเคราะห์และออกแบบ

การเลือกชนิด และขนาดของพัดลม ทำการคำนวณและออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของอุโมงค์ลมที่ประกอบด้วย ท่อรีดอากาศ หน้าตัดทดสอบ ท่อลดความเร็วของอากาศ ตะแกรงปรับการไหล

#### 3. การจัดเตรียมและดำเนินการสร้าง

ทำการจัดหาวัสดุที่ต้องการและประกอบส่วนต่างๆ ของอุโมงค์ลมทั้งหมดเข้าด้วยกัน และติดตั้งพัดลมเข้ากับตัวอุโมงค์ เมื่อทำการติดตั้งพัดลมเสร็จ จึงตรวจสอบความเรียบร้อย และความสมบูรณ์ของเครื่อง

#### 4. การทดสอบประสิทธิภาพ

ทำการทดสอบอุโมงค์ลมเพื่อหาค่าความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบที่ขนาดกำลังต่างๆ ของเครื่องกำเนิดลม โดยการใช้เครื่องวัดความเร็วลม

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้

1. ทำให้การออกแบบอาคารสูง หรือสิ่งก่อสร้างอื่นๆ ที่มีผลกระทบจากแรงลมมีความใกล้เคียงกับแรงลมจริงและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น
2. เป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำให้วิศวกรรมหรือวิทยาศาสตร์ด้านอื่นๆ ที่ใช้อุโมงค์ลมในการทดสอบมีความก้าวหน้าและพัฒนา
3. เป็นอุปกรณ์เพื่อการศึกษาของนักศึกษารุ่นต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

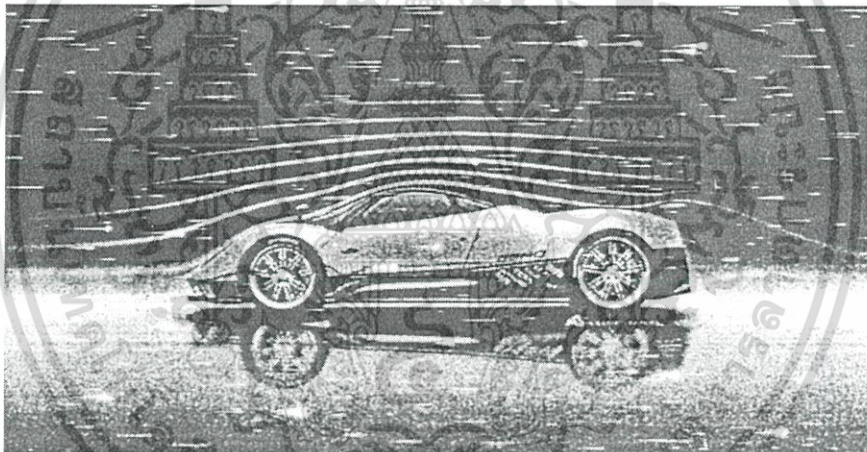
## บทที่ 2

# วรรณกรรมปริทรรศน์

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมคือ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยในเรื่องอากาศพลศาสตร์ เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอากาศผ่านวัตถุที่เป็นของแข็ง ประโยชน์ที่ได้รับ เช่น จำลองการไหลของอากาศผ่านรถยนต์หรือเครื่องบิน และยังมักใช้ในการจำลองสถานการณ์แรงหรือความดันที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของสิ่งก่อสร้าง นอกจากนี้จะมีบางหน่วยงานที่มีใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์แสดงการทำงานขนาดย่อมภายในห้องทดลองเท่านั้น (ฉฐมน สุขเสริม, ฉปภัช สุขเสริม และศุภกิจ ถิมประยูร, 2011.)



รูป 2.1 แสดงการไหลของอากาศในอุโมงค์ลมจำลองการไหลของอากาศผ่านรถยนต์

#### 2.2 ชนิดของอุโมงค์ลม

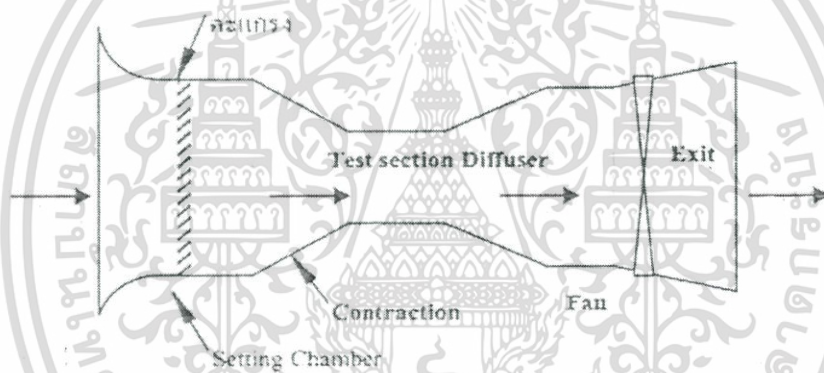
ปัจจุบันอุโมงค์ลมถูกใช้ในการทดสอบกับงานหลากหลายประเภทมากขึ้น นอกจากงานทางด้านอากาศยานแล้วยังถูกใช้ในงานออกแบบสิ่งก่อสร้าง เช่น โครงสร้างอาคารที่พักอาศัยและสำนักงานที่มีความสูงมากๆ สะพานที่มีขนาดใหญ่ การออกแบบทางยานยนต์ให้มีรูปทรงที่เหมาะสมกับสภาพใช้งานหรือการแข่งขันเป็นต้น หากแบ่งอุโมงค์ลมตามความเร็วลมจะสามารถแบ่งได้ 4 ชนิดคือ อุโมงค์ลมที่ความเร็วลมไม่เกิน 100m/s หรือ Mach 0.3 (Low speed wind tunnel), อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมใกล้เคียงกับความเร็วเสียง (Transonic wind tunnel), อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมมากกว่าความเร็วเสียง (Supersonic wind tunnel), และอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมสูงสุด 5-15 เอกซาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่าของความเร็วเสียง (Hypersonic wind tunnel) ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีวิธีการสร้างต่างกัน ไปขึ้นกับสมรรถนะที่ต้องการ, ขนาดของแบบจำลองที่ต้องการทดสอบ, พื้นที่และงบประมาณในการสร้าง โดยการสร้างแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ อุโมงค์ลมแบบเปิด (Open-circuit tunnel) และอุโมงค์ลมแบบปิด (Closed-circuit tunnel) (ณฐมน สุขเสริม, ณปภัช สุขเสริม และศุภกิจ ลิมประยู, 2011)

### 2.2.1 อุโมงค์ลมแบบเปิด (Open-circuit tunnel)

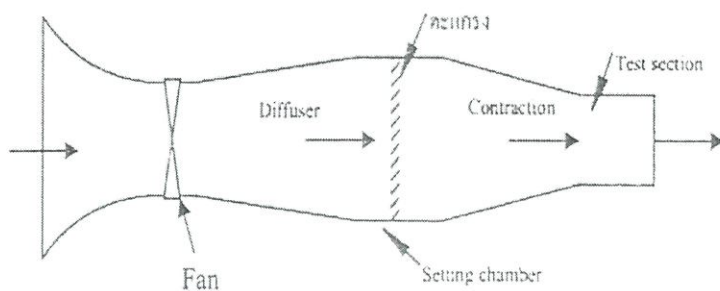
อุโมงค์ลมประเภทนี้ จะเปิดปลายด้านทั้งสองข้าง เพื่อให้อากาศเข้าและออก จึงต้องมีช่องตาข่ายที่ทำหน้าที่กรองอากาศที่ทางเข้า จากอากาศที่ไหลอย่างปั่นป่วนเมื่อผ่านตาข่ายกรองและจะมีทิศทางการไหลที่เป็นระเบียบมากขึ้น ซึ่งก็สามารถแบ่งออกเป็นอีกสองชนิด นั่นคือ

อุโมงค์ลมแบบดูด (Suck down tunnel) อุโมงค์ลมแบบนี้จะมีส่วนที่ใช้ทดสอบอยู่ตรงกลางของอุโมงค์ ส่วนของใบพัดจะอยู่ส่วนท้ายที่ใช้ทดสอบมีหน้าที่ดูดลมเข้าตัวอุโมงค์ด้านหน้าสุดจะเป็นตาข่ายที่ใช้กรองอากาศติดอยู่



รูป 2.2 อุโมงค์ลมแบบดูด

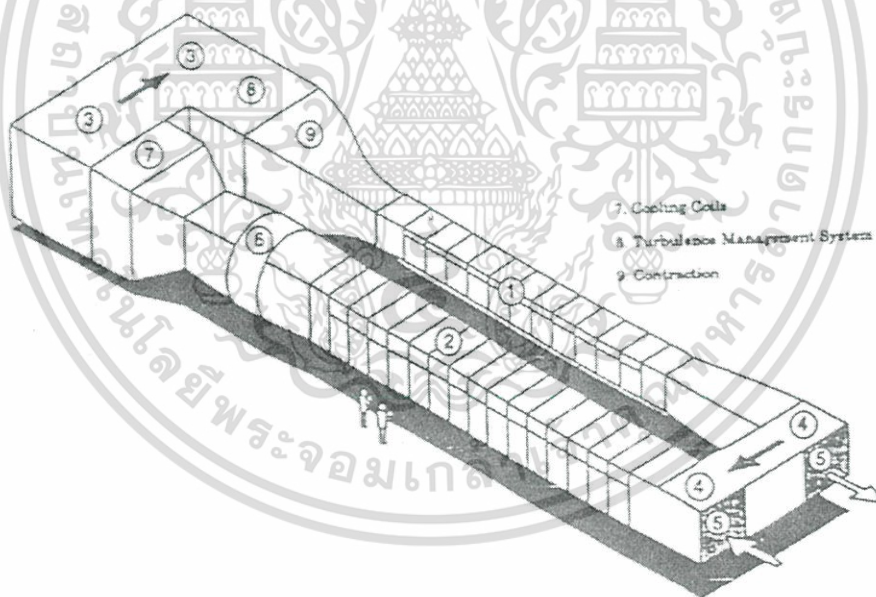
อุโมงค์ลมแบบเป่า (Blower tunnel) อุโมงค์ลมแบบนี้จะมีส่วนใบพัดติดอยู่ด้านทางเข้าของอากาศและมีตาข่ายกรองอากาศติดอยู่ถัดมาจากใบพัด และจะมีส่วนที่ใช้ทดสอบอยู่ตรงสุดปลายตรงทางออกของอากาศ



รูป 2.3 อุโมงค์ลมแบบเป่า

### 2.2.2 อุโมงค์ลมแบบปิด (Closed-circuit tunnel)

อุโมงค์ลมประเภทนี้ ทางออกจะวนมาต่อกับทางเข้าอากาศที่ไหลจะหมุนเวียนอยู่ภายในระบบอากาศ ภายในจะไม่ถูกรบกวนจากอากาศภายนอก เนื่องจากเป็นระบบปิดการไหลของอากาศไหลได้สม่ำเสมอดีกว่าอุโมงค์ลมแบบเปิดแต่รูปร่างจะมีขนาดใหญ่กว่าและต้นทุนการก่อสร้างจะแพงกว่าอุโมงค์ลมแบบเปิด



รูป 2.4 อุโมงค์ลมแบบปิด (Closed circuit wind tunnel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 อุโมงค์ลมแบ่งชนิดตามความเร็วของการไหลของอากาศภายในอุโมงค์

อุโมงค์ลมสามารถแบ่งชนิดตามความเร็วของการไหลของอากาศภายในอุโมงค์ได้ 4 ชนิด (ณฐมน สุขเสริม, ณปภัช สุขเสริม, ศุภกิจ ลิ่มประยู, 2011)

### 2.3.1 Low speed wind tunnel หรือ Subsonic win tunnel

อุโมงค์ลมที่สามารถให้ความเร็วลมภายในอุโมงค์ไม่เกิน 100-135 เมตรต่อวินาที หรือ มีความเร็วไม่เกิน 0.4 เท่าความเร็วเสียง เป็นอุโมงค์ลมที่พบเห็นได้ทั่วไปตามสถานศึกษาและมหาวิทยาลัยเนื่องจากมีรูปร่างไม่ซับซ้อนและราคาไม่แพง

### 2.3.2 Transonic wind tunnel

อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมสูงสุดใกล้เคียงกับความเร็วเสียงหรือราวๆ 340 เมตรต่อวินาที อุโมงค์ลมประเภทนี้พบเห็นได้ตามโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอากาศยานทั่วไป

### 2.3.3 Supersonic wind tunnel

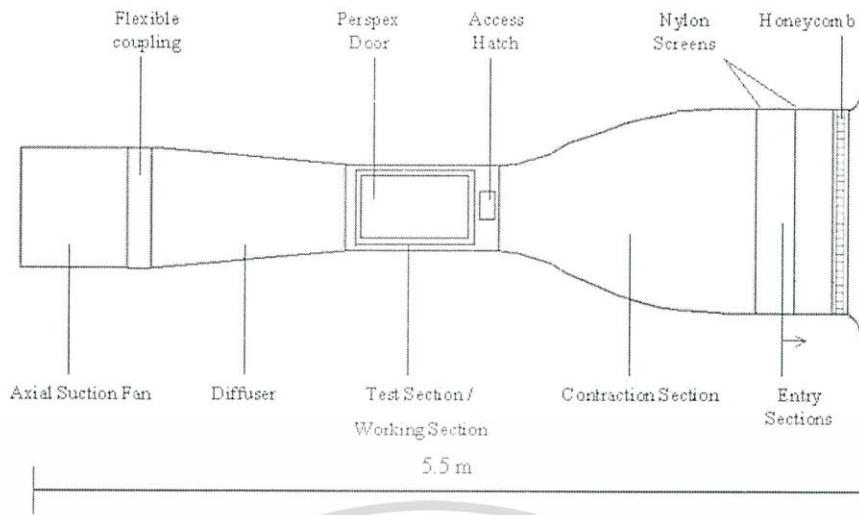
อุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมสูงสุด 5 เท่าของความเร็วเสียง โดยใช้หัวฉีดอากาศมาบรรจบเข้าด้วยกันและฉีดด้วยแรงดันสูง ซึ่งอุโมงค์ลมประเภทนี้ต้องการพลังงานในการทำงานมาก

### 2.3.4 Hypersonic wind tunnel

อุโมงค์ลมประเภทนี้สามารถให้ความเร็วลมภายในอุโมงค์สูงสุด 5-15 เท่าของความเร็วเสียง

## 2.4 ส่วนประกอบหลักของอุโมงค์ลม

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของอุโมงค์ลมประกอบด้วย 6 ส่วนหลักๆ โดยอาจมีส่วนประกอบเพิ่มเติมเพื่อสามารถช่วยลดการไหลอย่างปั่นป่วนของอากาศภายในอุโมงค์ลมได้มากขึ้น (ณฐมน สุขเสริม, ณปภัช สุขเสริม และศุภกิจ ลิ่มประยู, 2011.)



รูป 2.5 ส่วนประกอบหลักของอุโมงค์ลม

#### 2.4.1 Filter

เป็นส่วนประกอบที่ถูกติดตั้งที่ทางเข้าใบพัดก่อนส่วน Setting Chamber มีหน้าที่กรองฝุ่นละอองและอนุภาคเล็กๆ เพื่อให้อากาศสะอาดช่วยลดการไหลปั่นป่วนได้

#### 2.4.2 Setting Chamber

อากาศที่ถูกกรองจะไหลเข้าสู่ Setting Chamber เพื่อให้อากาศมีการไหลอย่างเป็นเส้นตรงด้วยการลดการไหลอย่างปั่นป่วนให้เหลือน้อยที่สุดก่อนจะเข้าสู่ส่วนการทดสอบการออกแบบเพราะฉะนั้น Setting Chamber จึงควรออกแบบให้มีความยาวอย่างเหมาะสมเพื่อที่จะรองรับส่วนประกอบย่อยอีกสองส่วนคือ Honeycomb และ Mesh screens

##### 2.4.2.1 Honeycomb

คือช่องเล็กๆ ที่ตาข่าย โดยที่ความกว้างและรูปร่างของช่องนั้นมีผลต่อการลดการไหลอย่างปั่นป่วนของอากาศมีหลายแบบ เช่น สี่เหลี่ยม วงกลม หกเหลี่ยม ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุโมงค์ลม

##### 2.4.2.2 Mesh screens

คือแผงตาข่ายที่ถูกติดตั้งเพื่อลดการไหลวนและการไหลแบบตัดกันของอากาศทำให้อากาศมีการไหลอย่างสม่ำเสมอ

#### 2.4.3 Contraction chamber

ท่อรีดอากาศเป็นส่วนสำคัญของอุโมงค์ลม โดยพื้นที่หน้าตัดของส่วนนี้จะลดลงตามความยาวที่ยาวขึ้น สัดส่วนของการลดพื้นที่หน้าตัดถือเป็นปัจจัยสำคัญต่อการไหลอย่างสม่ำเสมอ

ของอากาศควรเลี่ยงการออกแบบที่ทำให้เกิดการแยกไหลของอากาศโดยออกแบบให้ส่วนนี้มีความยาวที่เหมาะสม

#### 2.4.4 Test section

ส่วนหน้าตัด ทดสอบใช้สำหรับการทดลองหรือจำลองสถานการณ์ภายใต้เงื่อนไขบางอย่างในส่วนนี้การไหลของอากาศจะเป็นแบบแนวยาวไหลออกด้านข้างเล็กน้อยอุโมงค์ลมแต่ละแบบจะถูกออกแบบให้มีความเร็วสูงสุดของการไหลที่ต้องการ โดยจะใช้ส่วนทดสอบนี้เป็นส่วนอ้างอิงความเร็วของการไหล

#### 2.4.5 Diffuser section

ท่ลดความเร็วของอากาศเป็นส่วนที่ออกแบบมาเพื่อรักษาความดันภายในอุโมงค์ลมจากการที่อากาศไหลเข้าและออกอุโมงค์ทำให้เกิดความดันไม่คงที่ขึ้น โดยพื้นที่ของส่วนนี้จะเพิ่มตามความยาวของท่อ ซึ่งความส่วนนี้ยังทำให้เกิดการสูญเสียความดันเนื่องจากผลของความหนืดการรักษาความดันจากพลังงานจลน์นั้นจะลดกำลังขับของอุโมงค์ลม

#### 2.4.6 Fan

ส่วนใบพัดจะถูกใช้เป็นกำลังให้กับอุโมงค์ลม ส่วนใหญ่จะต้องสร้างความดันคงที่โดยที่ไม่ต้องเปลี่ยนความเร็วรอบเพลลา

### 2.5 แรงลม

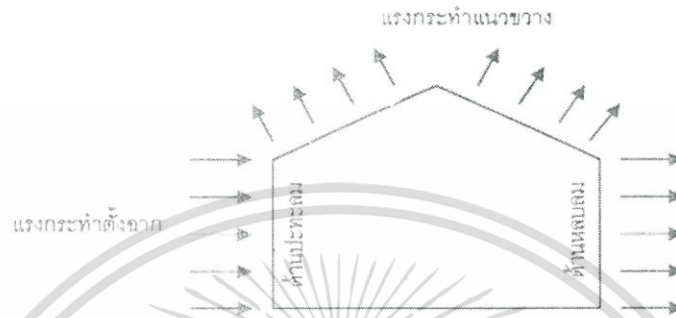
แรงลมมีความสำคัญต่อการออกแบบอาคารสูง ซึ่งทำให้การออกแบบอาคารลักษณะนี้แตกต่างไปจากการออกแบบอาคารทั่วไป ปัจจุบันนี้ วิศวกรรมการทางด้านกำลังของวัสดุสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้การออกแบบได้ขนาดองค์อาคารเล็กลงและมีน้ำหนักที่เบาลงเป็นผลให้โครงสร้างอาคารมีโอกาสเกิดการโก่งตัวทางด้านข้างเนื่องจากแรงลมมากขึ้น แรงลมในระดับรุนแรงจึงจัดเป็นภัยธรรมชาติต่ออาคารสูงชนิดหนึ่ง พฤติกรรมของแรงลมมีความซับซ้อนเนื่องจากมีความไม่แน่นอนมาก ซึ่งต่างจากน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ และมีลักษณะเป็นแบบน้ำหนักบรรทุกทุกจุด (dynamic loading) ซึ่งมีขนาดและทิศทางของแรงกระทำที่ไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของ

1. ภูมิประเทศ (topography) เช่น ท่วม โลง ป่าไม้ ภูเขา สวนผัก เป็นต้น
2. แบบของอาคาร (building type) เช่น รูปร่าง ขนาดของอาคาร ความสูง พื้นผิวอาคาร ช่องเปิดของอาคาร เป็นต้น
3. ธรรมชาติของการไหลเวียนของอากาศ (nature of airflow) เช่น ความหนาแน่นของอากาศ ทิศทางของลม ความเร็วของลม ความคงที่ของลมที่พัดมา เป็นต้น

เมื่อลมพัดมาปะทะ โครงสร้างอาคาร ลักษณะของอาคารซึ่งประกอบด้วย รูปร่าง ความหยาบของพื้นผิวและช่องเปิด จะมีผลต่อขนาดของแรงดันที่กระจายบนตัวอาคาร โครงสร้างอาคารจะถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำด้วยแรงกระทำตั้งฉากและแรงกระทำแนวขวาง แรงกระทำตั้งฉากกระทำในทิศทางการพัดของลม โดยก่อให้เกิดแรงอัดที่ด้านปะทะลม (windward face) และจะมีแรงดูดที่ด้านหลังลม (leeward face) สำหรับแรงกระทำแนวขวางนั้นเกิดในลักษณะคล้ายคลึงกับการยกตัวของปีกเครื่องบินกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแนวหลังคา (สุวัฒน์ ธิรเศรษฐ์. 2555.)



รูป 2.6 พฤติกรรมของแรงลมที่กระทำต่ออาคาร

ทฤษฎีที่ใช้ในการหาขนาดของแรงปะทะเนื่องจากการไหลของอากาศในสภาวะคงที่ไม่คำนึงถึงผลทางพลศาสตร์ เนื่องจากแรงกระชาก หรือผลการตอบสนองทางพลศาสตร์ของอาคาร หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่าแรงลมทางสถิตบน โครงสร้างได้จากพจน์แรกของสมการทั่วไปของแรงดันพลศาสตร์ (สุวัฒน์ ธิรเศรษฐ์. 2555.) และเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{\gamma v^2}{2g} \quad (2.1)$$

โดยที่	$q$	= หน่วยแรงดันลมสถิต	ปอนด์/ตร.ฟุต
	$\rho$	= ความหนาแน่น	สลัก/ลบ.ฟุต
	$v$	= ความเร็วลมเฉลี่ย	ฟุต/วินาที
	$\gamma$	= น้ำหนักจำเพาะของมวลอากาศมาตรฐานวัดที่ระดับน้ำทะเล ที่อุณหภูมิ $15^\circ$ มีค่า เท่ากับ 0.07651	ปอนด์/ลบ.ฟุต
	$g$	= ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดโลก	ฟุต/วินาที <sup>2</sup>

จัดสมการใหม่มีหน่วยเป็นเมตริก จะได้ว่า

$$q = 0.004826v^2 \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	$q$	= หน่วยแรงค้ำลมสถิต	กก./ตรม.
	$v$	= ความเร็วลมเฉลี่ย	กม./ชม.

ในกรณีอาคารมีความสูงไม่เกิน 120 เมตร ค่าแรงลมกระทำต่ออาคารสามารถคำนวณได้จากมาตรฐาน UBC (Uniform Building Code) โดยสมการ

$$p = C_e C_q q_s I \quad (2.3)$$

$p$	= หน่วยแรงลมที่กระทำต่ออาคาร	กก./ตรม.
$C_e$	= สัมประสิทธิ์ที่คำนึงถึงผลของความสูง ลักษณะภูมิประเทศที่อาคารตั้งอยู่ และแรงกระโชก มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7-2.2	
$C_q$	= สัมประสิทธิ์แรงค้ำ (Pressure Coefficient)	
$q_s$	= หน่วยแรงค้ำลม = $0.004826v^2$	
$v_s$	= ความเร็วลมในรอบ 50 ปี วัดที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน	กม./ชม
$I$	= ตัวคูณความสำคัญ (Importance Factor)	
	1.0 สำหรับอาคารทั่วไป	
	1.15 สำหรับอาคารที่มีความจำเป็นต่อสาธารณชน เช่น โรงพยาบาล สถานดับเพลิง เป็นต้น	

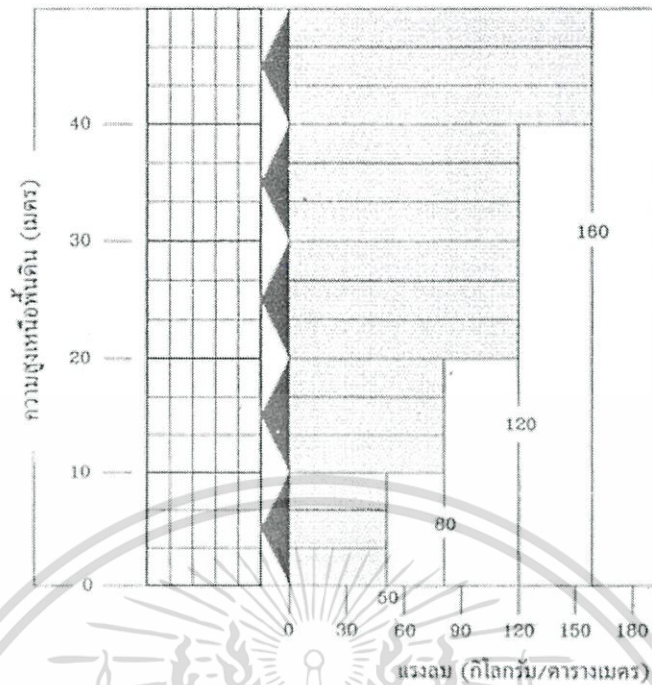
## 2.6 ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544

ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคาร ให้คำนึงถึงแรงลมด้วย หากจำเป็นต้องคำนวณและไม่มีเอกสารที่รับรองโดยสถาบันที่เชื่อถือได้ ให้ใช้หน่วยแรงลมตามตาราง ดังต่อไปนี้

ตาราง 2.1 ข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร เรื่อง ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544

ความสูงของอาคารหรือส่วนของอาคาร	หน่วยแรงลมอย่างน้อยกิโลปาสกา (กิโลกรัมแรงต่อตารางเมตร)
(1) ส่วนของอาคารสูงไม่เกิน 10 เมตร	0.5(50)
(2) ส่วนของอาคารสูง 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	0.8(80)
(3) ส่วนของอาคารสูง 20 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.2(120)
(4) ส่วนของอาคารสูง 40 เมตร แต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.6(160)
(5) ส่วนของอาคารสูง 80 เมตร	2.0(200)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.7 ค่าแรงแลมตาม พ.ร.บ.ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544

## 2.7 การทดสอบในอุโมงค์ลม

การทดสอบในอุโมงค์ลม (หรือการทดสอบโดยใช้ของไหลประเภทอื่น เช่น น้ำ) ที่ใช้เพื่อการคำนวณแรงลมสำหรับออกแบบอาคารและโครงสร้างทุกประเภท ต้องกระทำให้สอดคล้องกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในที่นี้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทดสอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวน (สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการ และผังเมือง, 2550.)

1. ของแรงแลมและความดันลม ต้องกระทำให้สอดคล้องตามข้อกำหนดทุกข้อดังต่อไปนี้ การจำลองลมธรรมชาติสำหรับการทดสอบในอุโมงค์ลม ต้องทำการจำลองทั้งคุณสมบัติทางด้านการเปลี่ยนแปลงของความเร็วลมเฉลี่ยตามความสูง และการเปลี่ยนแปลงของลมปั่นป่วนตามความสูง โดยปกติแล้วค่าความเร็วลมเฉลี่ยและความหนาแน่นของลมปั่นป่วนสำหรับลมที่จำลองในอุโมงค์ลม ต้องใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงตามธรรมชาติ

2. ขนาดของลมปั่นป่วนจะต้องได้รับการจำลองอย่างถูกต้อง โดยใช้มาตราส่วนเดียวกันกับที่ใช้ในการจำลองมิติความยาวของอาคาร โดยทั่วไปแล้วขนาดโดยรวมของลมปั่นป่วน (integral length scale of the longitudinal turbulence) ต้องใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริงตามธรรมชาติ

3. แบบจำลองอาคารหรือโครงสร้างที่ต้องการทดสอบ ตลอดจนสิ่งปลูกสร้างและสภาพภูมิประเทศโดยรอบ ต้องจำลองให้มีรูปร่างเหมือนจริง และมีความถูกต้องมากที่สุด โดยใช้มาตราส่วนที่เหมาะสม นอกจากนี้รายละเอียดทางด้านสถาปัตยกรรมที่สำคัญ เช่น ระเบียงและแผงกันแดด

เป็นต้น ที่มีขนาดตั้งแต่ 1 เมตรขึ้นไป ควรได้รับการจำลองในแบบจำลองอาคารด้วย สำหรับแบบจำลองของสิ่งปลูกสร้างและสภาพภูมิประเทศโดยรอบ ควรจำลองให้มีความถูกต้องสมจริง

4. พื้นที่หน้าตัดบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางลม (projected area) ของอาคารและสิ่งปลูกสร้างโดยรอบทั้งหมดรวมกัน ต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 8 ของพื้นที่หน้าตัดของอุโมงค์ลม ณ ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ มิเช่นนั้นต้องทำการปรับแก้ผลการทดสอบโดยคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นจากการปิดกั้นของลม นอกจากนี้แบบจำลองอาคารที่ทำการทดสอบควรมีความสูงไม่เกินครึ่งหนึ่งของความสูงอุโมงค์ลม และติดตั้งอยู่ตรงกลางหรือในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับจุดศูนย์กลางของระบบพื้นหมุนภายในอุโมงค์ลม

5. ต้องคำนึงถึงผลที่เกิดจากความแตกต่างของความดันตลอดความยาวของอุโมงค์ลม อันเป็นผลมาจากผนังและเพดานของอุโมงค์ลม

6. ผลกระทบของ Reynolds number ที่มีต่อแรงคัมและความดันลมที่วัดได้จากการทดสอบ ต้องมีน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วการทดสอบควรกระทำที่ค่า Reynolds number ไม่ต่ำกว่า  $5 \times 10^4$  โดยคำนวณจากด้านที่แคบที่สุดของแบบจำลองและความเร็วลมเฉลี่ยที่ยอดขอแบบจำลอง

7. คุณสมบัติของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ร่วมที่ใช้ในการเก็บข้อมูลการทดสอบ ต้องมีประสิทธิภาพที่ดี สามารถวัดค่าแรงหรือความดันพลศาสตร์ที่อยู่ในช่วงความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ความถี่ต่ำไปจนถึงความถี่ที่สูงที่สุดที่จำเป็นต่อการออกแบบในแต่ละกรณี โดยไม่มีความผิดเพี้ยนทั้งในเรื่องของขนาดและการเหลื่อมกันของเวลา (phase distortions) ซึ่งอิทธิพลของการเหลื่อมกันของเวลานี้ จะมีผลกระทบอย่างมากต่อค่าแรงลมลัพธ์ที่เกิดจากการเฉลี่ยค่าความดันลมที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ บนอาคารหรือองค์อาคารที่ออกแบบ นอกจากนี้ระบบการวัดจะต้องให้ผลการทดสอบที่ปราศจากการรบกวนจากคลื่นเสียง คลื่นไฟฟ้า การสั่นไหวของอุโมงค์ลมและอุปกรณ์ ตลอดจนการแปรปรวนของความดันลมที่เกิดจากการหมุนของใบพัดลม การเปิด-ปิดของประตู และการแปรเปลี่ยนของความดันบรรยากาศ ในบางกรณีอาจจำเป็นต้องมีการปรับแก้ผลที่เกิดเนื่องจากอุณหภูมิด้วย

### 2.7.1 การตอบสนองพลศาสตร์

การทดสอบเพื่อหาค่าการตอบสนองพลศาสตร์ของอาคารหรือโครงสร้าง จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ นอกจากนี้ แบบจำลองโครงสร้างและการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของมวล สติเฟเนส และความหน่วงของอาคารหรือโครงสร้าง (สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการ และผังเมือง, 2550.)

### 2.7.2 ชนิดของการทดสอบในอุโมงค์ลม

#### 1) High-Frequency Force Balance

วัดแรงที่กระทำ ที่ฐานของแบบจำลองเพื่อนำไปประมาณค่าแรง และการตอบสนองที่เกิดขึ้นของโครงสร้างจริง โดยแบบจำลองที่ใช้ต้องสร้างให้มีความถี่ธรรมชาติสูงเพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ให้มีผลของการตอบสนองแบบกำทอน (resonance) ต่อการแปรปรวนของลมในช่วงความถี่ที่สนใจ (สุกิตย์ เทพมังกร, 2543.)

### ข้อมูลที่ได้

ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลม เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ค่าผลตอบสนองสูงสุดของโครงสร้างค่า spectra ของแรงลมที่กระทำเมื่อสามารถทราบค่าการตอบสนองแบบกำทอน (resonance)

วิธี High-Frequency Force Balance มักนิยมใช้ในการหาค่าแรงที่กระทำสำหรับกาโค้งตัวด้านข้างและการบิดสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้น ฐานของอาคารสูงสามารถนำ แรงที่ได้จากการทดสอบนำไปวิเคราะห์หาผลตอบสนองของอาคารเช่น การ โค้งตัวด้านข้างและอัตราเร่ง

### หลักการพื้นฐานของวิธี HFFB

ค่า Generalised forces,  $P(t)$ , คือค่าแรงภายนอกที่กระทำกับระบบสำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode ตามสมการที่ 1

$$P(t) = \int_0^h w(z,t) \cdot \phi(z) \cdot dz \quad (2.4)$$

โดยที่  $w(z,t)$  คือแรงลมที่กระทำกับ โครงสร้างที่ความสูง  $z$  เหนือพื้นดิน และ  $\phi(z)$  คือ รูปแบบการสั่นไหวหรือการแอ่นตัว (Mode shape) ของ โครงสร้าง และ  $h$  คือ ความสูงของอาคาร ค่าโมเมนต์ที่ฐานของอาคาร (Base overturning moments),  $M(t)$ , ซึ่งเป็นผลมาจากแรงลมที่กระทำตลอดความสูงของอาคาร สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2

$$M(t) = \int_0^h w(z,t) \cdot z \cdot dz \quad (2.5)$$

ในกรณีของอาคารที่มี Mode shape เป็นรูปเส้นตรง ( $\phi(z) = (z/h)$ ) ค่าโมเมนต์  $M(t)$  ที่ฐานของอาคารจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่า Generalised forces,  $P(t)$ , ตามสมการที่ 3

$$P(t) = \frac{M(t)}{h} \quad (2.6)$$

หลังจากที่ประมาณค่า Generalised forces สำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode แล้วจึงทำการคำนวณหาค่าการแอ่นตัวของ โครงสร้าง ตามหลักการทางด้านพลศาสตร์ของ โครงสร้าง (Structural dynamics) และทฤษฎีการสั่นไหวของ โครงสร้าง (Theory of vibration) ซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณค่าการแอ่นตัวตามหลักการ Frequency domain analysis

ค่าเฉลี่ยของการแอ่นตัว (Mean generalised deflection responses),  $\bar{R}$ , ของอาคาร สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉลี่ย,  $\bar{P}$ , และสติฟเนส,  $k$ , ของโครงสร้างตามสมการที่ 4

$$\bar{R} = \frac{\bar{P}}{h} \quad (2.7)$$

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัว (Standard deviation of the deflection response),  $\sigma_R$ , ซึ่งเป็นดัชนีที่ใช้วัดค่าการแอ่นตัวพลศาสตร์ (Dynamic deflection responses) ของโครงสร้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_R^2} = \sqrt{\frac{1}{k} \int_0^\infty |H(n)|^2 \cdot S_p(n) \cdot dn} \quad (2.8)$$

โดยที่  $|H(n)|^2$  เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของโครงสร้างในการรับแรงพลศาสตร์ในช่วงความถี่ต่างๆ เรียกว่า Mechanical admittance function ซึ่งขึ้นอยู่กับ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency of vibration),  $n$ , และความหน่วง (Damping),  $\zeta$ , ของโครงสร้างตามสมการที่ 6

$$|H(n)|^2 = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\zeta n}{n_0}\right)^2} \quad (2.9)$$

ส่วน  $S_p(n)$  เป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงปริมาณของแรง Generalised forces,  $P(t)$ , ที่กระจายอยู่ในช่วงความถี่ต่างๆ เรียกว่า Spectrum of the generalised force ซึ่งสามารถประมาณได้โดยตรงจากค่า Spectrum ของโมเมนต์  $S_M(n)$  ตามสมการที่ 7

$$S_p(n) = \frac{S_M(n)}{h^2} \quad (2.10)$$

ค่าสูงสุดของการแอ่นตัว  $\hat{R}$  สามารถประมาณได้จากค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการแอ่นตัว ตามสมการที่ 8

$$\hat{R} = \bar{R} + g \cdot \sigma_R \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $g$  คือค่าทางสถิติที่บ่งบอกถึงสัดส่วนของค่าสูงสุดต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เรียกว่า Statistical peak factor ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0-4.5

### การคำนวณค่าการแอ่นตัวตามหลักการ Time domain analysis

ค่าการแอ่นตัวของอาคารในแต่ละ Mode การเคลื่อนที่ (Generalised deflection responses),  $R(t)$ , สามารถคำนวณได้โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นผลมาจากสมมูลของแรงที่กระทำกับระบบตามสมการที่ 9

$$m\ddot{R}(t)+c\dot{R}(t)+kR(t)=P(t) \quad (2.12)$$

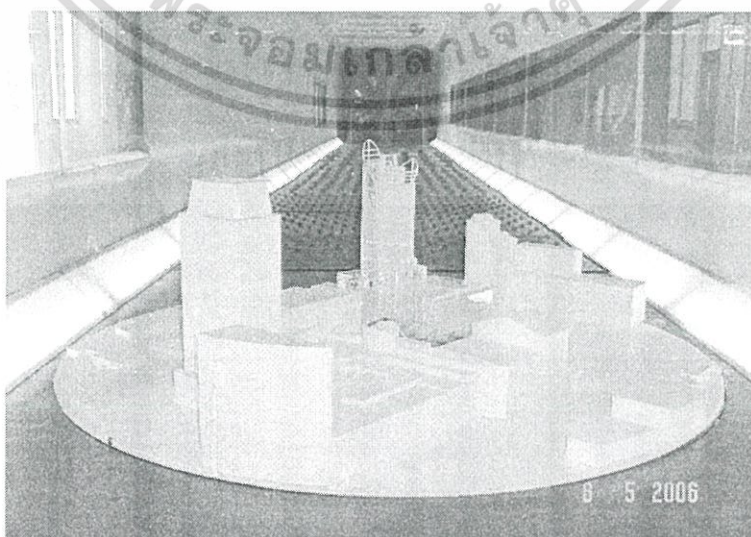
โดยที่  $m$   $c$  และ  $k$  คือ มวล ความหน่วง และสติเฟนส ของอาคารตามลำดับ สำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละ Mode ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 10 ถึงสมการที่ 12

$$m = \int_0^h m(z) \cdot \phi^2(z) \cdot dz \quad (2.13)$$

$$c = 2 \cdot \zeta \sqrt{k \cdot m} \quad (2.14)$$

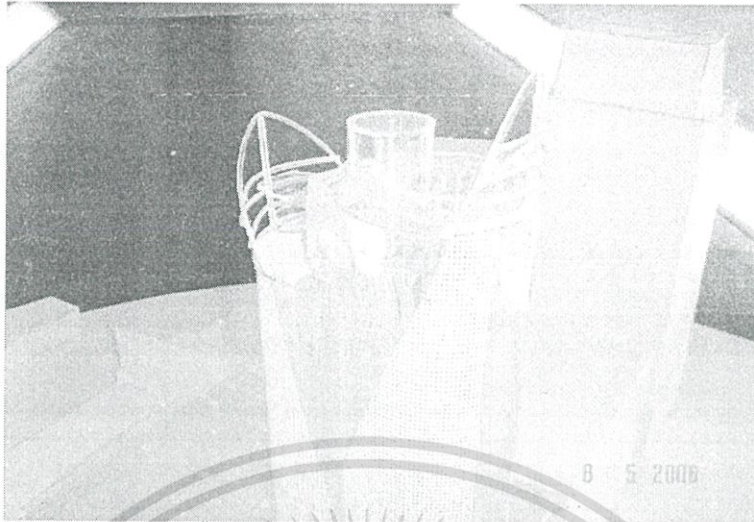
$$k = (2\pi n)^2 \cdot m \quad (2.15)$$

เมื่อทราบค่า  $R(t)$  ทุกค่าในช่วงเวลาที่สนใจแล้ว (ปกติคือ 1 ชั่วโมง) จึงทำการหาค่าเฉลี่ย  $R$  และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\bar{R}$  หลังจากนั้นจึงประมาณค่าสูงสุดของการแอ่นตัว  $\hat{R}$  ตามสมการที่ 8



รูป 2.8 แบบจำลองย่อส่วนของอาคารและอาคารข้างเคียงในอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.9 แบบจำลองแข็ง ที่ติดตั้งท่อส่งแรงดัน เพื่อวัดความดันลมที่จุดต่างๆ  
ของผนังโดยรอบอาคาร

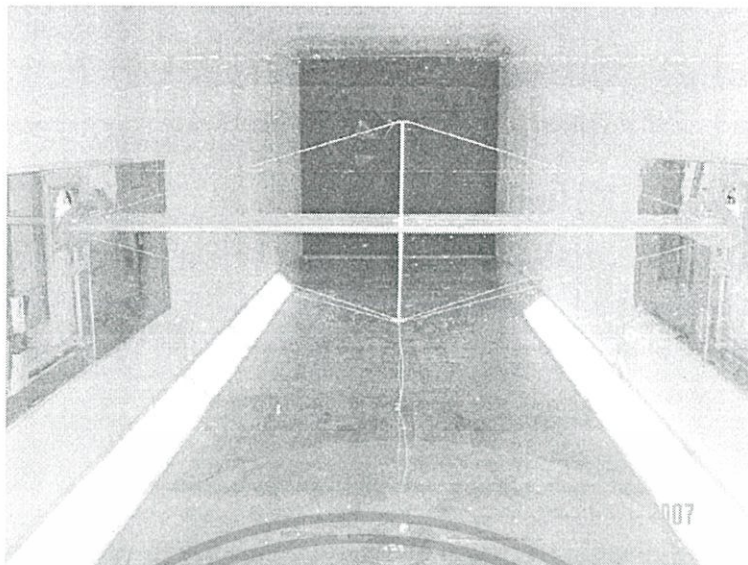
## 2) Sectional Model Test

ทดสอบแบบจำลองหน้าตัดบางส่วน of โครงสร้างที่ติดตั้งอยู่บนสปริงซึ่งเป็นการจำลองคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์มักใช้กับหน้าตัด โครงสร้างของสะพานช่วงยาว เช่น สะพานจิ้ง และ สะพานแขวน (สุกิจย์ เทพมังกร, 2543.)

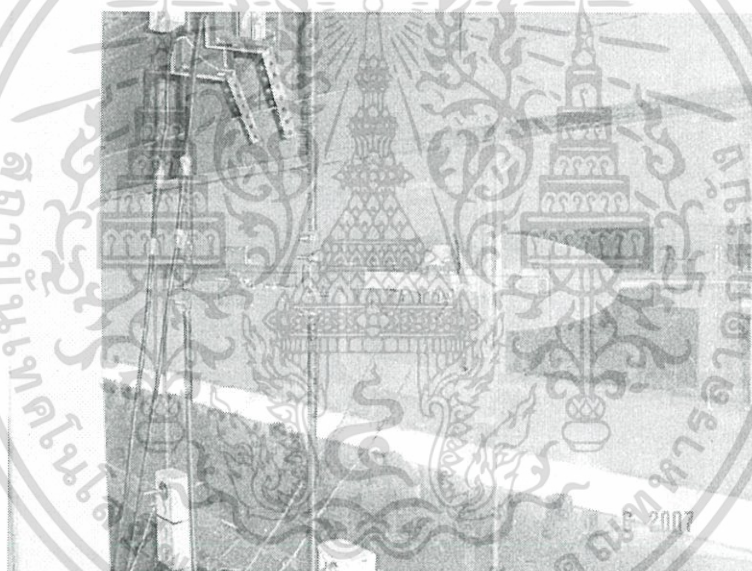
### ข้อมูลที่ได้

ค่าแรงลมและการตอบสนองทั้งแบบเฉื่อยและแบบพลศาสตร์  
ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงที่เกิดจากการกระตุ้นของโครงสร้างเองภายใต้แรงลม (aerodynamic derivatives) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางด้าน aero-elastic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.10 แบบจำลองหน้าตัดสะพานบางส่วนในอุโมงค์ลม



รูป 2.11 แบบจำลองหน้าตัดสะพานที่ติดตั้งอยู่บนสปริง เพื่อจำลองคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์

## 2.8 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

อุปกรณ์วัดความเร็วลม (Anemometer) มีรูปร่างเหมือนใบพัดเครื่องบินหรือกรวยตักลมมีหลักการทำงานเหมือนเช่นเดียวกับเครื่องวัดความเร็วในรถยนต์เมื่อกระแสลมปะทะใบพัด จะทำให้แกนหมุนและส่งสัญญาณมาเป็นจำนวนรอบเพื่อให้เครื่องคำนวณความเร็วลมอีกครั้งหนึ่ง โดยมีหน่วยวัดเป็นเมตรต่อวินาที (ณฐมน สุขเสริม, ฌปภัช สุขเสริม และศุภกิจ ลิ้มประยูร, 2011.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 2.12 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

## 2.9 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบและคำนวณค่าสูญเสียในอุโมงค์ลม

เป็นการใช้ทฤษฎีเข้าช่วยเพื่อตรวจสอบค่าอุโมงค์ลมที่ทำการออกแบบมีประสิทธิภาพหรือความคลาดเคลื่อนในการออกแบบที่สามารถยอมรับได้หรือไม่ (Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope, 1999.)

### 2.9.1 ท่อรีดอากาศ (Contraction)

เป็นส่วนสำคัญของอุโมงค์ลม โดยพื้นที่หน้าตัดของท่อรีดอากาศจะลดลงตามความยาวที่ยาวขึ้น สัดส่วนของการลดพื้นที่หน้าตัดที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการไหลสม่ำเสมอของอากาศ ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบท่อรีดอากาศที่ทำให้เกิดการแยกไหลของอากาศ โดยออกแบบให้ส่วนนี้มีความยาวที่เหมาะสมโดยสัมพันธ์การสูญเสียของท่อรีดอากาศ

$$K_c = 0.32 f_{av} \frac{L_c}{D_{ts}} \quad (2.16)$$

โดยที่	$f_{av}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของตัวประกอบความเสียดทานระหว่างทางเข้าและทางออกของท่อรีดอากาศ
	$L_c$	คือ	ความยาวของท่อรีดอากาศ
	$D_{ts}$	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดทดสอบ

การออกแบบท่อรีดอากาศมีดังนี้

- ความยาวของท่อรีดอากาศควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1-1.5 เท่าของเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของทางเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_h \leq L_C \leq 1.5 D_h \quad (2.17)$$

- อัตราส่วนของท่อรีดอากาศ (Contraction Ratio, C) คือค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าต่อพื้นที่หน้าตัดของทางออก ซึ่งค่า C ที่นิยมใช้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 6-9

$$6 \leq C \leq 9 \quad (2.18)$$

### 2.9.2 หน้าตัดทดสอบ (Test section)

การออกแบบจะต้องออกแบบให้ความยาวหน้าตัดทดสอบมีความยาวมากกว่า หรือ เท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก โดยวัสดุส่วนใหญ่เป็นแผ่นอคริลิก สมบัติการสูญเสียจะขึ้นกับความยาวและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K_f = f \frac{L}{D_h} \quad (2.19)$$

โดยที่  $f$  คือ ตัวประกอบความเสียดทาน  
 $L$  คือ ความยาวหน้าตัดทดสอบ  
 $D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก  
 สมการตัวประกอบความเสียดทาน

$$f = [2 \log_{10}(\text{Re}\sqrt{f}) - 0.8]^{-2} \quad (2.20)$$

การออกแบบหน้าตัดทดสอบมีดังนี้

- ขนาดอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของพื้นที่หน้าตัดทดสอบควรมีขนาดอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

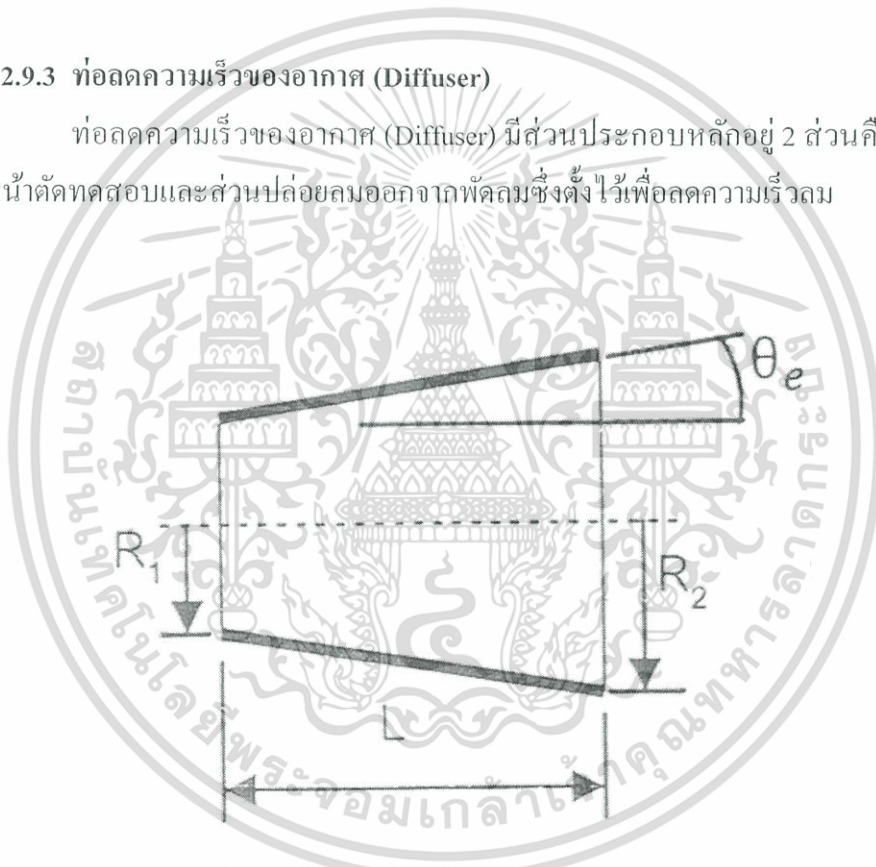
$$0.7 \leq \frac{H}{W} \leq 1 \quad (2.21)$$

- ความยาวหน้าตัดทดสอบมีความยาวมากกว่าหรือเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

$$L_T \geq 2 D_h \quad (2.22)$$

### 2.9.3 ท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser)

ท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser) มีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนที่รับลมจากหน้าตัดทดสอบและส่วนปล่อยลมออกจากพัดลมซึ่งตั้งไว้เพื่อลดความเร็วลม



รูป 2.13 ท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser)

การออกแบบท่อลดความเร็วของอากาศมีดังนี้

- อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด ( $A_R$ ) จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 เท่า หรืออาจจะน้อยกว่านั้นก็ได้

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยทั่วไปจะออกแบบให้มุมเอียงสมมูล ( $\theta_e$ ) อยู่ในช่วง 2 ถึง 3.5 องศาหรืออาจน้อยกว่านั้นก็ได้

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{-1} A_R}{2 L/D_1}\right) \quad (2.24)$$

สมการค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของท่อลดความเร็วของอากาศ

$$K_d = K_f + K_{ex} \quad (2.25)$$

$K_f$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากความเสียดทาน (Friction loss coefficient)

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R}\right) \frac{f}{8 \sin \theta} \quad (2.26)$$

$K_{ex}$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียจากการขยายหน้าตัด (Expansion loss coefficient)

$$K_{ex} = K_e(\theta) \left(\frac{A_R}{A_1}\right)^2 \quad (2.27)$$

โดยที่  $K_e(\theta)$  จะต้องคำนึงถึงรูปร่างของหน้าตัดท่อลดความเร็วของอากาศ และมุมเอียงสมมูล โดยสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_c(\text{circle}) = \begin{cases} 0.1033 - 0.02389\theta & \text{สำหรับ } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1709 - 0.117\theta + 0.0326\theta^2 + 0.001078\theta^3 - 0.0009076\theta^4 \\ -0.00001331\theta^5 + 0.00001345\theta^6 & \text{สำหรับ } 1.5^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ -0.09661 + 0.04672\theta & \text{สำหรับ } \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (2.28)$$

$$K_c(\text{square}) = \begin{cases} 0.09623 - 0.004152\theta & \text{สำหรับ } 0 < \theta < 1.5^\circ \\ 0.1222 - 0.0459\theta + 0.02203\theta^2 + 0.003269\theta^3 - 0.0006145\theta^4 \\ -0.000028\theta^5 + 0.00002337\theta^6 & \text{สำหรับ } 1.5^\circ < \theta \leq 5^\circ \\ -0.01322 + 0.05866\theta & \text{สำหรับ } \theta > 5^\circ \end{cases} \quad (2.29)$$

#### 2.9.4 ตะแกรงปรับการไหล

ความกว้างและรูปร่างของช่องตะแกรงมีผลต่อการลดการไหลอย่างปั่นป่วนของอากาศ รูปร่างช่องมีหลายแบบ เช่น สี่เหลี่ยม วงกลม หกเหลี่ยม ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุโมงค์ลม ตัวแปรหลักที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียคือ ความโปร่งของตะแกรง เลขเรย์โนลด์์ที่เกิดบริเวณหน้าตัด และแฟกเตอร์ของตะแกรง ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียหาได้จากสมการ

$$K_m = K_{\text{mesh}} K_{Rn} \sigma_s + \frac{\sigma_s^2}{\beta_s^2} \quad (2.30)$$

$$\sigma_s = (1 - \beta_s) \quad (2.31)$$

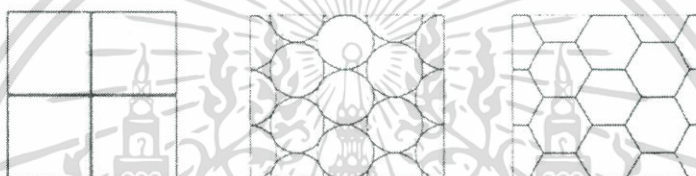
$$\beta_s = (1 - d_w \rho_w)^2 \quad (2.32)$$

$$Re_w = \frac{\rho v d_w}{\mu} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho_w = \frac{l}{W_w} \quad (2.34)$$

โดยที่	$K_{\text{mesh}}$	จะขึ้นอยู่กับชนิดลวด ; ลวดกลม = 1.3 / ลวดเกลียว = 2.1
	$\beta_s$	คือ สัมประสิทธิ์ความพรุนของตะแกรง
	$d_w$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวด
	$W_w$	คือ ความกว้างต่อ 1 ช่องของตะแกรง
	$Re_w$	คือ เลขเรย์โนลด์ ถ้ามากกว่า 400 จะใช้ค่า $K_{Rn} = 1$ , ถ้าน้อยกว่า 400 เท่ากับ 0.32, 0.22, 0.20 ตามลำดับดังรูป



รูป 2.14 ลักษณะต่างๆ ของตะแกรงปรับการไหล

## 2.10 ทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล

เป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของของไหลหรืออากาศ ขณะที่ของไหลหรืออากาศมีการเคลื่อนที่นั้นจะมีปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อการไหล (มนตรี พิรุณเกษตร, 2545.)

### 2.10.1 เสถียรภาพในระบบท่อ

สำหรับการไหลผ่านระบบท่อซึ่งประกอบด้วยท่อตรง ข้อต่อ ข้องอ และวาล์ว การสูญเสียความดันหรือ เสถียรภาพของของไหลเนื่องจากความเสียดทานในท่อที่กระทำต่อของไหลขณะไหลเต็มท่อเรียกว่า การสูญเสียหลัก (Major loss) ส่วนการสูญเสียจากการไหลผ่าน ข้อต่อ ข้องอ ข้อลด หรือวาล์วนั้นเรียกว่า การสูญเสียรอง (Minor loss) และเสถียรภาพทั้งหมด (Total head loss,  $h_{\text{loss,t}}$ ) มาจาก ผลรวมของ เสถียรภาพหลัก (Major head loss,  $h_{\text{loss,f}}$ ) และเสถียรภาพรอง (Minor head loss,  $h_{\text{loss,m}}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_{\text{loss,t}} = h_{\text{loss,f}} + h_{\text{loss,m}} \quad (2.35)$$

### 2.10.2 เสดสูญเสี่ยหลัก

สำหรับการไหลเต็มท่อภายในท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  และ  $L$  ด้วยความเร็วเฉลี่ย  $\bar{V}$  สำหรับของไหลที่มีความหนืดจะทำให้เกิดความเสียหายต่อการไหลในขณะที่ไหลผ่านท่อตรง เสดสูญเสี่ยหลักจะใช้สมการ คาร์ซี-ไวส์บาคดังนี้

$$h_{\text{loss,f}} = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.36)$$

### 2.10.3 เสดสูญเสี่ยรอง

สำหรับเสดสูญเสี่ยรองเป็นผลมาจากการไหลผ่านข้อต่อ ข้องอ ข้อลด ข้อเพิ่ม หรือ วาล์ว ใช้สมการ

$$h_{\text{loss,m}} = K \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (2.37)$$

โดยที่  $K$  คือสัมประสิทธิ์การสูญเสี่ย

### 2.10.4 สมการความต่อเนื่อง

มวลของไหลที่ผ่านแต่ละส่วนของหลอดการไหลในเวลา 1 วินาทีซึ่งมีค่าเท่ากันเนื่องจากของไหลไม่สามารถไหลผ่านผนังของการไหลตลอดการไหลออก และของไหลไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือ ทำลายให้หมดไป

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2.38)$$

พิจารณาจากการไหลในสภาวะคงตัวขณะไหลผ่านอุปกรณ์นั้นๆ สำหรับของไหลยวบตัวไม่ได้  $\rho_1 = \rho_2$  เป็นค่าคงที่ดังนั้นพบว่าอัตราการไหลโดยปริมาตรทางเข้าย่อมเท่ากับอัตราการไหลโดยปริมาตรทางออกดังสมการข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.5 กำลัง

กำลังที่จะนำมาพิจารณาที่บริเวณหน้าตัดทดสอบ สามารถแสดงในเทอมความหนาแน่นพื้นที่หน้าตัด และความเร็วการไหลที่ผ่านหน้าตัดทดสอบดังแสดงในสมการ

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (2.39)$$

### 2.10.6 Reynolds number

Reynolds number เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงปรากฏการณ์ของการไหล สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu} \quad (2.40)$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของการไหล ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\bar{V}$  = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล ( $\text{m/s}$ )  
 $\mu$  = ค่าความหนืดจลน์ ( $\text{N-s/m}^2$ )  
 $D_h$  = คือเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter)  
 สำหรับหน้าตัดสามเหลี่ยม

$$D_h = \frac{2ab}{(a+b)} \quad (2.41)$$

โดยที่  $a$  = ความกว้างของหน้าตัดทดสอบ  
 $b$  = ความยาวของหน้าตัดทดสอบ

- การไหลแบบลามินาร์ (Laminar flow) :  $Re < 2300$
- การไหลแบบทรานซิชัน (Transitional flow) :  $2300 \leq Re \leq 4000$
- การไหลแบบปั่นป่วน (Tubulent flow) :  $Re > 4000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.7 สัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient)

สัมประสิทธิ์กำลัง คือ อัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ขับใบพัดต่อพลังงานจลน์ของมวลอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์ลม เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{P_s}{\frac{1}{2}\rho(V_T)^3 A_T} \quad (2.42)$$

### 2.10.8 สมการแบร์นูลี

เมื่อของไหลไหลในท่อที่มีพื้นที่ภาคตัดขวางเปลี่ยนไป อัตราเร็วของการไหลจะเปลี่ยนไปด้วย ทำให้พลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยมวลของไหลเปลี่ยนไปและถ้าท่อไม่อยู่ในแนวระดับพลังงานศักย์ต่อหนึ่งมวลของไหลก็จะเปลี่ยนตามไป ดังนั้นความดันของไหลในท่อที่ตำแหน่งต่างๆ ก็เปลี่ยนตามไปด้วย นั่นจึงหมายความว่าความดันของไหลขณะที่กำลังไหลในท่อจะขึ้นกับอัตราเร็วของสายกระแสและขึ้นอยู่กับตำแหน่งความสูง ณ ภาคตัดขวางนั้นๆ ด้วย

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2.43)$$

## 2.11 ทฤษฎีเกี่ยวกับพัดลม

พัดลมคือเครื่องสูบลมที่ใช้อากาศเป็นของไหลทำงาน (Working fluid) โดยจะทำการขับเคลื่อนอากาศหรือแก๊สต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิศวกรรมส่วนใหญ่จะใช้เกี่ยวกับการอบแห้งวัสดุทางเกษตรกรรม การระบายอากาศ การทำความเย็น การลำเลียง และการให้ความร้อน เป็นต้น (ชนวัฒน์ สุขภานิช, นนท์ธวัช อ่วมเจริญ และสุกัญญา ขุนจีน, 2551.)

### 2.11.1 ประเภทของพัดลม

พัดลมสามารถจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ตามการเคลื่อนที่ของอากาศได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

#### 1. พัดลมแบบหมุนเหวี่ยง (Centrifugal flow หรือ Radial fans)

พัดลมแบบหมุนเหวี่ยงหรือพัดลมซึ่งมีการไหลของอากาศในแนวรัศมี จะประกอบไปด้วยชุดใบพัดซึ่งหมุนอยู่ภายในตัวเรือนของพัดลม (Fan housing) ชุดใบพัดจะประกอบไปด้วยแผ่นใบพัดขนาดเล็กหลายใบประกอบเข้าด้วยกันเป็นลักษณะวงล้อ ค่าความกดดันของอากาศจะถูกทำให้มีค่าสูงขึ้นภายในตัวเรือนของพัดลม เราสามารถเพิ่มค่าความกดดันให้มีค่าสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

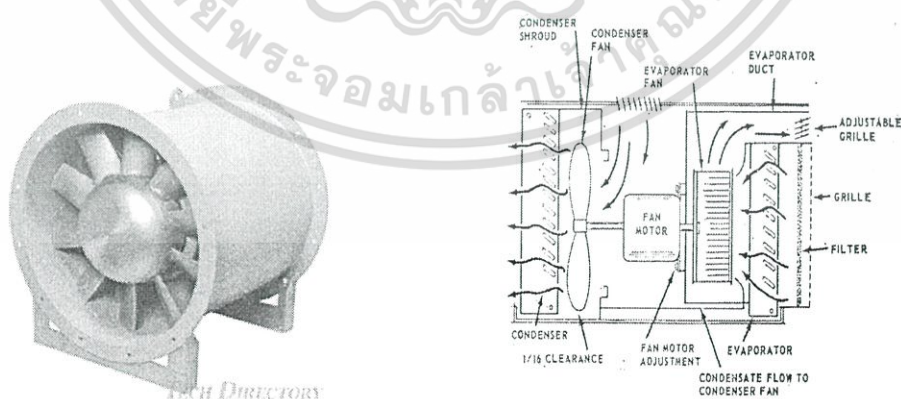
ได้ด้วยการเพิ่มขนาดความยาวใบพัด ซึ่งจะทำให้แรงเหวี่ยงภายในระบบมากยิ่งขึ้น อากาศจะไหลผ่านเข้าไปในท่อทางเข้าโดยมีทิศทางขนานกับแกนของใบพัด และการไหลออกในทิศทางตั้งฉากกับแกนของใบพัดในทางออก



รูป 2.15 พัดลมแบบหมุนเหวี่ยง

## 2. พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial flow fans)

พัดลมแบบนี้จะไหลขนานกับแนวแกนของใบพัดและตั้งฉากกับระนาบการหมุนของใบพัด ชุดใบพัดจะถูกติดตั้งอยู่บนแกนเพลากับมอเตอร์ต้นกำลัง ซึ่งอยู่ในตัวเรือนพัดลมทำให้มอเตอร์สามารถระบายความร้อนออกไปพร้อมๆ กับอากาศที่ถูกขับเคลื่อน พัดลมชนิดนี้ไม่มีลักษณะที่มอเตอร์ต้นกำลังจะทำงานเกินกำลัง แต่การทำงานของพัดลมจะเสียงดังเมื่อเทียบกับแบบหมุนเหวี่ยง และมีช่วงการทำงานของพัดลมที่ไม่มีเสถียรภาพ



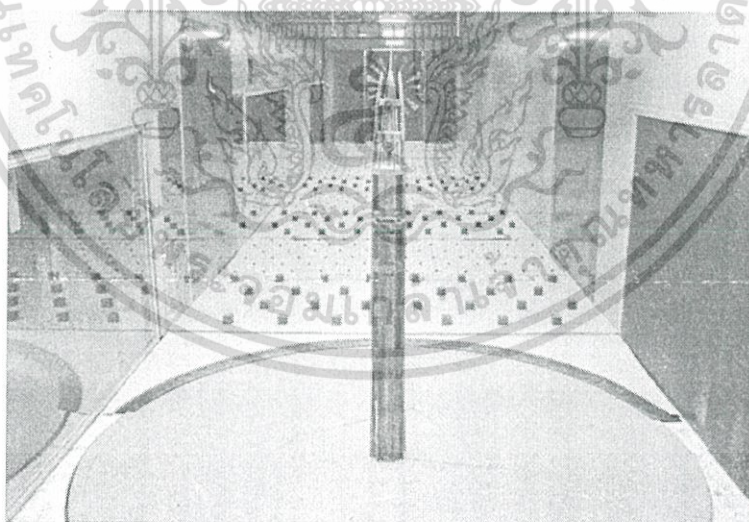
รูป 2.16 พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความที่เกี่ยวข้อง

จากการทำโครงการเกี่ยวกับอุโมงค์ลม กลุ่มวิจัยได้ทำการศึกษาและหาข้อมูลจากงานวิจัยและบทความต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาต่อยอดความรู้และประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างเพื่อให้ได้อุโมงค์ที่มีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ ได้มีงานวิจัยและบทความต่างๆ ที่ได้ศึกษาถึงเรื่องนี้ ดังเช่น

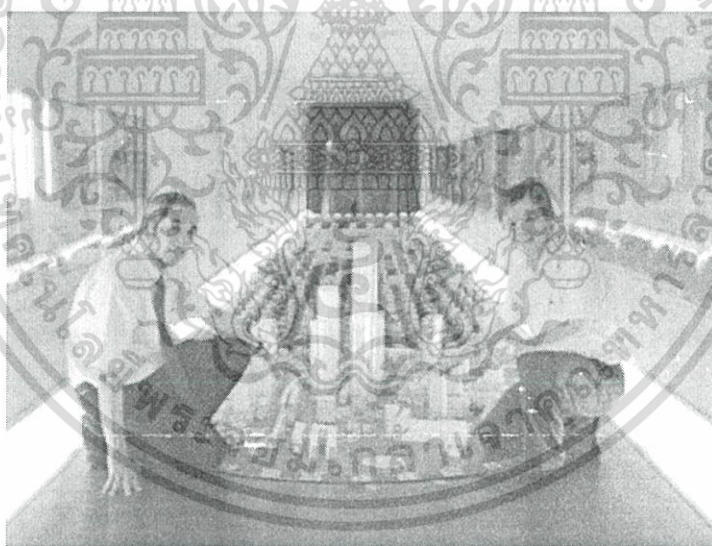
ดร.สุกิตย์ เทพมังกร (2543) ได้ศึกษาการทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ลม โดยใช้วิธี High frequency force balance (HFFB) model tests ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยทางด้านผลกระทบของแรงลมที่มีต่อโครงสร้างอาคารและเพื่อให้บริการทางด้านทดสอบแบบจำลองในอุโมงค์ลมแก๊ววิศวกรไทย งานวิจัยครอบคลุมตั้งแต่การศึกษารายละเอียดของวิธี HFFB การพัฒนาโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบและคำนวณหาค่าการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารตามหลักการของ Frequency domain analysis และ Time domain analysis การจัดทำแบบจำลองย่อส่วนของอาคารมาตรฐาน CAARC และการทดสอบแบบจำลองในสภาพลมสำหรับภูมิประเทศแบบเปิดโล่ง จากการศึกษาพบว่า ค่าการแอ่นตัวที่ระดับยอดของอาคารในแนวทิศทางลม ทิศทางตั้งฉากกับลม และในแนวบิดที่ได้มีค่าสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่าการแอ่นตัวที่ประมาณ โดยการทดสอบแบบ HFFB และ Aero elastic model tests (สุกิตย์ เทพมังกร, 2543. การทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ลม โดยวิธี HFFB เพื่อการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.)



รูป 2.17 การทดสอบอุโมงค์ลม โดยวิธี High frequency force balance model tests

รศ.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย (2552) หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโครงสร้าง สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีสถาบันเอไอที ได้วิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของแรงลมที่มีต่ออาคารสูงและสิ่งก่อสร้าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆ เรียกว่า การทดสอบโมเดลอาคารสูงในอุโมงค์ลม ซึ่งรศ.เป็นหนึ่งในบอกว่า อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในวงการวิศวกรรมโครงสร้าง โดยเป็นห้องปฏิบัติการที่สามารถจำลองสภาพลมตามธรรมชาติได้เหมือนจริงแต่อยู่ในสเกลย่อส่วน เพื่อศึกษาผลกระทบของลมที่มีต่อวัตถุที่เราสนใจจะทดสอบซึ่งอาจจะเป็นเครื่องบิน รถยนต์ อาคารสูงหรือสะพานแขวน หรือแม้กระทั่งนักกีฬาที่กำลังปั่นจักรยานฝ่าอากาศ โดยสถาบันเอไอทีได้ร่วมลงทุนกับคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ได้พัฒนา อุโมงค์ลมที่ทันสมัยและมีขนาดใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ปัจจุบันทีมวิจัยจากทั้งสองสถาบันได้ร่วมกันศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของลมต่ออาคารสูงและสะพานช่วงยาวๆ เสร็จสิ้นไปแล้วหลายโครงการรวมถึงอาคารสูงมหานครที่กำลังจะเป็นอาคารสูงที่สุดในประเทศไทยเร็วๆ นี้และอาคาร กราเมอซี เรสซิเดนซ์ ที่กำลังจะเป็นอาคารสูงที่สุดในประเทศฟิลิปปินส์ รศ.เป็นหนึ่งในบอกว่า เนื่องจากลมเมื่อพัดผ่านวัตถุต่างๆ จะมีความสลับซับซ้อน หากไม่มีการศึกษาตึกสูงหรือป้ายโฆษณาขนาดใหญ่ ถ้าวางแบบไม่ดีก็มีสิทธิ์พังถล่มลงมาได้ (เป็นหนึ่งใน วานิชชัย, 2552. ผลกระทบของแรงลมที่มีต่ออาคารสูงและสิ่งก่อสร้างต่างๆ. สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเอไอที.)



รูป 2.18 รศ.เป็นหนึ่งใน วานิชชัย กับ การทดสอบโมเดลอาคารสูงในอุโมงค์ลม

นายศรัทธา โพธิสว่าง (2546) ได้ทำการปรับเปลี่ยนส่วนทดสอบของอุโมงค์ลมเดิมที่มีอยู่แล้ว ให้ผนังด้านบนและด้านล่างสามารถปรับความโค้งได้ ความยาวส่วนทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 1.042 เมตร ขนาดหน้าหน้าตัดการทดสอบเท่าเดิมคือ 30 x 30 ตารางเซนติเมตร ความเร็วลมสูงสุดไม่เกิน 36 เมตรต่อวินาที การปรับผนังใช้เสต็ปมอเตอร์เพื่อไปจับเคลื่อนกลไก Rack & Pinion ซึ่งควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ บริเวณผนังด้านบนและด้านล่างจะมีจุดวัดความดันสถิตจำนวน 20 จุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะทำการทดสอบจะทำการปรับผนังจนกว่าความดันทุกจุดจะมีค่าเท่ากัน นั่นคือผนังจะมีรูปทรงเข้ากับ streamline ของกระแสอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองอุโมงค์ลมในขณะนั้น ผลการทดสอบอุโมงค์ลมที่ปรับปรุงแสดงให้เห็นว่า สามารถจำลองการไหลโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดเล็กกับแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ได้ (ศรีทธา โพธิสว่าง, 2546. “อุโมงค์ลมชนิดผนังยืดหยุ่น.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี)

นายอรรถพร เรืองวิเศษ (2548) การทดลองแบบจลศาสตร์ในอุโมงค์ลมเป็นการจำลองการบินซึ่งอากาศยานยังสามารถเคลื่อนที่ภายในอุโมงค์ลมได้ในองศาอิสระที่ต้องการทดสอบ งานวิจัยนำการทดลองแบบจลศาสตร์ในอุโมงค์ลมมาใช้ในการทดสอบการควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ โดยแสดงตัวอย่าง การควบคุมมุมพิทช์ด้วยตัวควบคุมแบบแปรผันตามการทดสอบทำ 2 กรณีคือ ค่าคำสั่งมุมพิทช์เป็นมุมเชิงขึ้น และคำสั่งมุมพิทช์เป็นมุมกตกลง แต่ละกรณีมีการเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงมุมพิทช์เมื่อใช้อัตราขยายตัวควบคุมต่างกัน การทดสอบวิธีนี้สามารถจำลองการเปลี่ยนแปลงมุมพิทช์ขณะบินได้ดี ตัวควบคุมที่นำมาใช้สามารถปรับอัตราขยายให้ควบคุมพิทช์ได้ตามต้องการ (อรรถพร เรืองวิเศษ, 2548. การทดลองแบบจลศาสตร์ในอุโมงค์ลมเพื่อหาแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ทางอากาศเครื่องบิน. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย)



รูป 2.19 นาย อรรถพร เรืองวิเศษ กับโครงการวิจัยแบบจำลองการบิน

ชาตรี นิลน้ำเพชร และอรรถพร เรืองวิเศษ (2548) การวิจัยด้านอากาศยานโดยทั่วไปจะต้องมีการหาแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ เพื่อใช้พิจารณาประสิทธิภาพการบินและใช้ออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งจะได้ทั้งจากการคำนวณ การทดลองในอุโมงค์และการบินทดสอบสำหรับอากาศยานไร้คนขับ และผลการทดสอบการทำงานของระบบโดยจำลองการบินในอุโมงค์ลม (ชาตรี นิลน้ำเพชร และอรรถพร เรืองวิเศษ, 2548. “ระบบวัดสถานะการบินของอากาศยานสำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

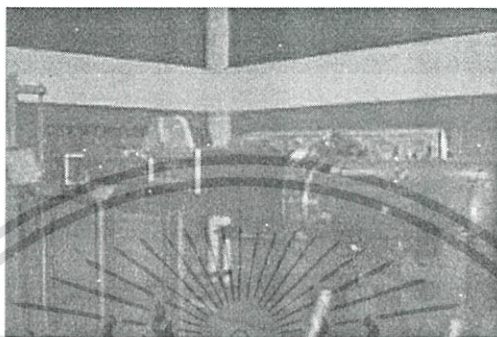
การหาแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.)

ปองวิทย์ ศิริโพธิ์, ณัฐชัย กุลสุวรรณ และภัทร กางกรณ์ (2545) งานวิจัยนี้เกิดขึ้นเพื่อหาความถูกต้องและแม่นยำของอุโมงค์ลมรวมทั้งทำการหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในอุโมงค์ เพื่อให้ผลการทดลองของชิ้นงานมีความถูกต้องสมบูรณ์และน่าเชื่อถือ โดยทั่วไปอุโมงค์ลมแต่ละตัวจะให้ผลการทดลองที่ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ เนื่องจากความแตกต่างของประสิทธิภาพของอุโมงค์ลมนั้นเอง อุโมงค์ลมที่มีประสิทธิภาพมีลักษณะดังนี้ 1) สามารถควบคุมความเร็วลมได้อย่างแม่นยำ 2) ความเร็วในส่วนทดสอบมีความเร็วเท่ากัน 3) เกิดผลกระทบจากชั้นขีดผิวของอุโมงค์ลมน้อยที่สุด 4) กระแสอากาศมีทิศทางเดียวกัน 5) อุณหภูมิในอุโมงค์ลมเท่ากัน ในวิธีการทดสอบจะใช้อุปกรณ์ Pilot-static tube, Pilot tube, Thermometer, Robot arm โดยทำการติดตั้งเครื่องมือที่วัดบนตัว Robot arm ที่จะทำหน้าที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ในพื้นส่วนทดลอง และทำการบันทึกค่าที่วัดได้ในแต่ละจุด จากนั้นนำค่าที่บันทึกไว้มาทำการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ รวมทั้งหาค่า ความผิดพลาดของอุโมงค์ลมผิดพลาดของอุโมงค์ลม เพื่อนำไปเป็นค่าคงที่เฉพาะของอุโมงค์ลมนั้นๆ (ปองวิทย์ ศิริโพธิ์, ณัฐชัย กุลสุวรรณ และภัทร กางกรณ์. 2545. “วิธีการตรวจสอบหาประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม.” หน้า 423-427. ใน การประชุมทางวิชาการ กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ 4-7 กุมภาพันธ์ 2545 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.)

นายสมโภชน์ อัมเอบ (2530) อุโมงค์ลมเป็นเครื่องมือที่สำคัญยิ่งสำหรับศึกษาและทดลองทางอากาศพลศาสตร์ ส่วนประกอบที่สำคัญของอุโมงค์ลมคือ ส่วนปฏิบัติงาน (Working section) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความเร็วกระแสอากาศที่ไหลผ่านเป็นแบบเอกรูปและสม่ำเสมอ ชิ้นส่วนแบบจำลองที่ต้องการทดสอบจะถูกนำมาวางในส่วนปฏิบัติงานนี้ เพื่อสังเกตการณ์และวัดค่าต่างๆ เช่น แผนภาพความเร็วกระแสอากาศ, แผนภาพความดัน, ทางเดินกระแสอากาศ และแรงยก เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะเป็นการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมที่สามารถปรับอัตราเร็วลมได้ระหว่าง 6 – 12 เมตรต่อวินาที หรือประมาณ 20 – 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (สม โภชน์ อัมเอบ. 2530. “อุโมงค์ลมอัตราเร็วต่ำ.” 42 : 10 ใน การประชุมประจำปี ครั้งที่ 25 กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ 3-6 กุมภาพันธ์ 2530 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.)

นายทศพร สุนทรเกสซ์ (2552) โครงการวิจัยชิ้นนี้จะทำการศึกษาและออกแบบรูปทรงของอุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียงขนาดเล็ก โดยกำหนดให้ลักษณะการไหลภายในส่วนทดสอบเป็นการไหลที่มีความเร็วไม่ต่ำกว่าสองเท่าของความเร็วเสียง ความเร็วของการไหลมีสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด และไม่เกิดคลื่นกระแทกภายในบริเวณส่วนทดสอบการวิจัยจะใช้ระเบียบวิธีคุณลักษณะในการออกแบบรูปทรงของผนังอุโมงค์ลมให้สามารถสร้างการไหลได้ตามที่กำหนด และใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล FLUENT ในการวิเคราะห์การไหลภายในอุโมงค์ลมที่ออกแบบ จากผลการคำนวณพบว่า รูปทรงของอุโมงค์ลมที่ออกแบบสามารถสร้างการไหลที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วสูงกว่าเสียงมากกว่าสองเท่าภายในบริเวณส่วนทดสอบมีความเร็วของการไหลสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดและไม่มีคลื่นกระแทกเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ ผลของงานวิจัยชิ้นนี้จะนำไปเป็นข้อมูลในการจัดสร้างต้นแบบอุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียงขนาดเล็กต่อไป (นายทศพร สุนทรเกสัช. 2552. “การศึกษาและออกแบบต้นแบบอุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียง.” การประชุมวิชาการเครือข่าย กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.)



รูปที่ 2.20 อุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียงขนาดเล็ก

อธิกร นิลโกศล, เอกฉัตรชัย รุจิพรวสิน (2547) โครงการนี้มีวัตถุประสงค์คือการออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมที่มีความเร็วต่ำแบบวงจรปิด โดยใช้พัดลมแบบไหลตามแนวแกน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 630 มิลลิเมตร ขับด้วยมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 1.5 กิโลวัตต์ ความเร็วรอบ 1400 รอบต่อนาที จากผลการออกแบบอุโมงค์ลมได้นำไปสร้างอุโมงค์ลมที่ประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ เซ็คท์เทิลลิง เซมเบอร์, ริงฝั่ง, ปากแตร, คอนเทรคชั่น, ห้องทดสอบ และดีฟิวส์เซอร์ จากการทดสอบลักษณะการไหลของอากาศภายในอุโมงค์ลม พบว่าการกระจายความเร็วเป็นแบบสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่หน้าตัดและมีความเร็วใช้งานได้อยู่ในช่วง 4 – 14 เมตรต่อวินาที โดยช่วงพื้นที่หน้าตัดที่สามารถนำมาใช้งานได้โดยไม่ได้รับอิทธิพลจากผิวท่อ คือมีขนาด 330 x 330 ตารางมิลลิเมตร (อธิกร นิลโกศล และเอกฉัตรชัย รุจิพรวสิน. 2547. “การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมเพื่อการทดลอง.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.)

นายอรรถพร เรื่องวิเศษ (2552) แบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองของสัมประสิทธิ์แรงและโมเมนต์ทางอากาศพลศาสตร์จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของอากาศยานเท่านั้น จากลักษณะเฉพาะนี้ในงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัยจึงได้เสนอวิธีการตรวจสอบและแยกแยะความเสียหายด้วยแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ วิธีการนี้ใช้ค่าแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงและโมเมนต์ทางอากาศพลศาสตร์แทนที่จะใช้ตัวแปรสถานะการบินดั้งงานวิจัยอื่นในการตรวจสอบและแยกแยะความเสียหายที่เกิดกับรูปร่าง ผลจากการจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำวิธีนี้ไปใช้งาน วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้คือใช้การทดลองในการทดสอบระบบตรวจสอบและแยกแยะ และใช้วิธีการทดลองแบบจลศาสตร์ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้เผยแพร่บนฐานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุโมงค์ลมแทนการบินทดสอบเพื่อหลีกเลี่ยงการตกในระหว่างการจำลองความเสียหายระหว่างบินแบบจำลองที่พิจารณาในครั้งนี้อาจใช้สมมติฐานแรงทางอากาศพลศาสตร์ในแกน z ของเครื่องบินและการนำการวิเคราะห์ principal component analysis และการตัดตัวแปรทำให้แบบจำลองที่ได้สามารถประมาณค่าได้ถูกต้องยิ่งขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงทางอากาศพลศาสตร์จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากการเกิดความเสียหายทำให้สามารถใช้ตรวจสอบได้ว่ามีความเสียหายเกิดขึ้น (อรณพ เรื่องวิเศษ. 2552. การทดลองแบบจลศาสตร์ในอุโมงค์ลมเพื่อหาแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ของเครื่องบิน. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

C.F. Wilson, A.L. Camilletti, S.B. Calcutt และ P.M. Ligrani (2008) อุโมงค์ลมที่ดีที่สุดสำหรับการทดสอบของเซ็นเซอร์ในแรงกดดันและความเร็วลมที่ได้รับการออกแบบ ดำเนินการอุโมงค์ลมให้การไหลแบบราบเรียบของอากาศหรือก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ที่มีความดันจาก 5-10 mbar ที่อุณหภูมิ 200-300 เคลวินและที่ความเร็ว 0.5-30 เมตรต่อวินาที (ขึ้นกับความดันและอุณหภูมิที่เลือก) ที่หน้าตัดทดสอบ 180 มิลลิเมตร ที่นอสซิลสั้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตรนอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้กับความสูง (ไม่เกิน 60 เมตรต่อวินาที) ในการวิเคราะห์แบบจำลองได้ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงลักษณะการไหล โดยวัดอัตราการไหลที่ทางเข้าของอวกาศ ส่วนหน้าตัดทดสอบใช้เลข Reynolds ในการตรวจสอบเพื่อเพิ่มความแม่นยำ การวัดความเร็วลมโดยใช้ท่อปีโทปที่ความเร็วประมาณ 5 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ดีที่สุด ความเร็วสมบูรณ์ในการไหล  $\pm 3\%$  และความแน่นอนในการไหล  $\pm 0.3\%$  (C.F. Wilson, A.L. Camilletti, S.B. Calcutt and P.M. Ligrani. 2008. A wind tunnel for the calibration of Mars wind sensors. Planetary and Space Science.)

Adrian R. Wittwer, Sergio V. Moller (2000) การประเมินผลจากอุโมงค์ลมความเร็วต่ำของ UNNE เพื่อตรวจสอบ โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์การใช้งานของอุโมงค์ลม การวัดความเข้มของความเร็วและความปั่นป่วนของอุโมงค์พบว่าความเร็วสม่ำเสมอและมีความปั่นป่วนต่ำ ผลการค้นคว้าจาก Counihan และ Standen เป็นการจำลองลมธรรมชาติสำหรับ ABNT-NBR 6123 พื้นดินระดับ IV (มาตรฐานบราซิล), คล้ายกับ CIRSOC 102 class III (มาตรฐานอาเจนติน่า) พบว่าการกำหนดความเร็วดีและความเข้มของความปั่นป่วนน้อย (Adrian R. Wittwer and Sergio V. Moller. 2000. "Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE." 84 : 307-320. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.)

Ching-Huei Huang, Chun-Liang Lin, Maw-Jy Chao (2010) วิธีการ FERA ได้การดำเนินการประมาณค่าพารามิเตอร์อากาศพลศาสตร์ตั้งแต่การออกแบบเบื้องต้นและผลของการออกแบบรายละเอียดของ Mini - UAV ตาม LSWT วิธีการใหม่นี้ได้รวมเอาทฤษฎี Fuzzy logic และวิธีการ ERA ในลักษณะเฉพาะตัวของพารามิเตอร์อากาศพลศาสตร์สำหรับ UAVS ผลลัพธ์ที่ถูกต้องอยู่ในการรวมกันครบถ้วนสมบูรณ์ของการทดสอบ เห็นได้ชัดว่าการกำหนดพารามิเตอร์ใน FERA เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถพิจารณาตัวแปรหลายอินพุตที่ดีกว่า ในระหว่างการทดสอบอุโมงค์ที่เกิดขึ้นจริง (Ching-Huei Huang, Chun-Liang Lin and Maw-Jy Chao. 2010. “FERA in parameter identification with application in low-speed wind tunnel test.” 15 : 495-509 Aerospace Science and Technology.)

M. T. Boyle (2002) การออกแบบอุโมงค์ลมเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่มีความแน่นอน และข้อมูลของการวัดที่ออกมาเป็นแบบ ไร้มิติ องค์ประกอบหลักของอุโมงค์ลม และแต่ละจุดประสงค์ของการออกแบบที่ต้องพิจารณาสิ่งที่สำคัญคือการทำให้อากาศที่ไหลเข้าสู่หน้าตัดทดสอบเป็นไปในลักษณะราบเรียบกับการพิจารณาปัจจัยที่ทำให้อากาศไหลไม่ราบเรียบ โดยสังเกตว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อ ความเร็วลม วิธีที่ง่ายที่สุดที่จะทำการสร้างอุโมงค์ลมให้หน้าตัดทดสอบมีประสิทธิภาพสูงใช้วิธี RMS (Root-mean square) เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนให้ครอบคลุมการวัดหลายๆ ปัจจัยผลของการวัดที่มีนัยสำคัญที่แสดงออกมาในรูปของระบบรวบรวมข้อมูลที่เป็นแบบ ไร้มิติโดยใช้ การทดลองของอุโมงค์ส่งน้ำและขยายไปสู่สมมุติฐานของการพาความร้อนตามธรรมชาติและ โครงสร้างการประสานแบบ ไร้มิติให้ใช้การทดลองนี้เป็นแบบอย่าง (M. T. Boyle. 2002. “Low speed wind tunnel testing.” 31-39 Appears in Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium. SEMI-THERM IV Fourth Annual IEEE.)

นางสาวณัฐมน สุขเสริม, นางสาวณปภัช สุขเสริม, นายศุภกิจ ลีมประยูร (2011) ทำงานวิจัยวิธีการทำงานของอุโมงค์ลมแบบเปิดความเร็วต่ำ ว่าเกี่ยวกับการออกแบบ จัดสร้าง และทดสอบอุโมงค์ลมแบบเปิด โดยใช้วัสดุที่หาได้ง่ายทำขึ้นได้เอง ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นแนวคิดต่อยอดได้มากมาย (ณัฐมน สุขเสริม, ณปภัช สุขเสริม และศุภกิจ ลีมประยูร. 2011. “อุโมงค์ลมแบบเปิดความเร็วต่ำ.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.)

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินงาน

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงวิธีดำเนินงานการออกแบบและการสร้างอุโมงค์ลม โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล
2. การวิเคราะห์และออกแบบ
3. การจัดเตรียมและดำเนินการสร้างอุโมงค์ลม
4. การทดสอบประสิทธิภาพของอุโมงค์

### 3.1 การค้นคว้าและรวบรวมข้อมูล

หาข้อมูล ส่วนประกอบต่างๆ และการทำงานของอุโมงค์ลม หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดความเร็วลม ข้อมูลของราคาอุปกรณ์วัดความเร็วลม ศึกษาการทำงาน รายละเอียดต่างๆ รวมถึงราคาของพัดลม การศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบ รวมไปถึงการทดสอบอุโมงค์ลม

### 3.2 การวิเคราะห์และออกแบบ

การออกแบบอุโมงค์ลมมีข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบโดยการค้นคว้าของ Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope (1999. Low speed wind tunnel)

#### 3.2.1 การออกแบบอุโมงค์ลม

ทำการออกแบบอุโมงค์ลม โดยใช้ข้อกำหนดต่างๆ ในทฤษฎีการออกแบบอุโมงค์ลม การออกแบบท่อรีดอากาศ (Contraction) ความยาวของท่อรีดอากาศควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้า

$$D_h \leq L_C \leq 1.5 D_h \quad (3.1)$$

$D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

$L_C$  คือ ความยาวของท่อรีดอากาศ

อัตราส่วนของท่อรีดอากาศ (Contraction Ratio, C) คือค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าต่อพื้นที่หน้าตัดของทางออก ซึ่งค่า C ที่นิยมใช้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 6-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$6 \leq C \leq 9 \quad (3.2)$$

หน้าตัดทดสอบ (Test section)

การออกแบบหน้าตัดทดสอบ

ขนาดอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของพื้นที่หน้าตัดทดสอบควรมีขนาดอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1

$$0.7 \leq \frac{H}{W} \leq 1 \quad (2.21)$$

H คือ ความสูงของพื้นที่หน้าตัดทดสอบ

W คือ ความกว้างของพื้นที่หน้าตัดทดสอบ

ความยาวหน้าตัดทดสอบมีความยาวมากกว่าหรือเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

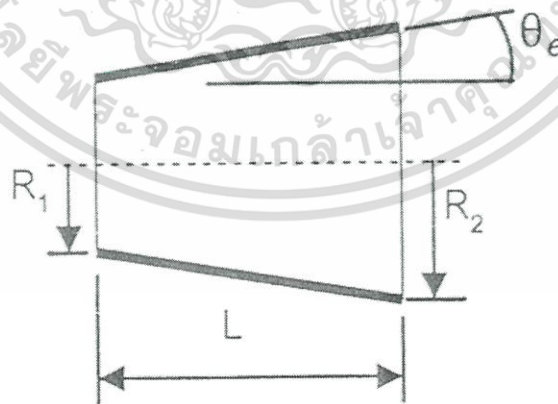
$$L_T \geq 2 D_h$$

(3.4)

$L_T$  คือ ความยาวหน้าตัดทดสอบ

$D_h$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก

ท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser)



รูป 3.1 ท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด ( $A_R$ ) จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 เท่า หรืออาจจะน้อยกว่านั้นก็ได้อีก

$$A_R = \frac{A_2}{A_1} \quad (3.5)$$

$$2 \leq A_R \leq 3$$

$A_2$  คือ พื้นที่หน้าตัดทางออกของลม

$A_1$  คือ พื้นที่หน้าตัดเข้าออกของลม

โดยทั่วไปจะออกแบบให้มุมเอียงสมมูล ( $\theta_e$ ) อยู่ในช่วง 2 ถึง 3.5 องศาหรืออาจน้อยกว่านั้นก็ได้อีก

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{A_R}}{2L/D_1}\right) \quad (2.24)$$

$$2^\circ \leq \theta_e \leq 3.5^\circ$$

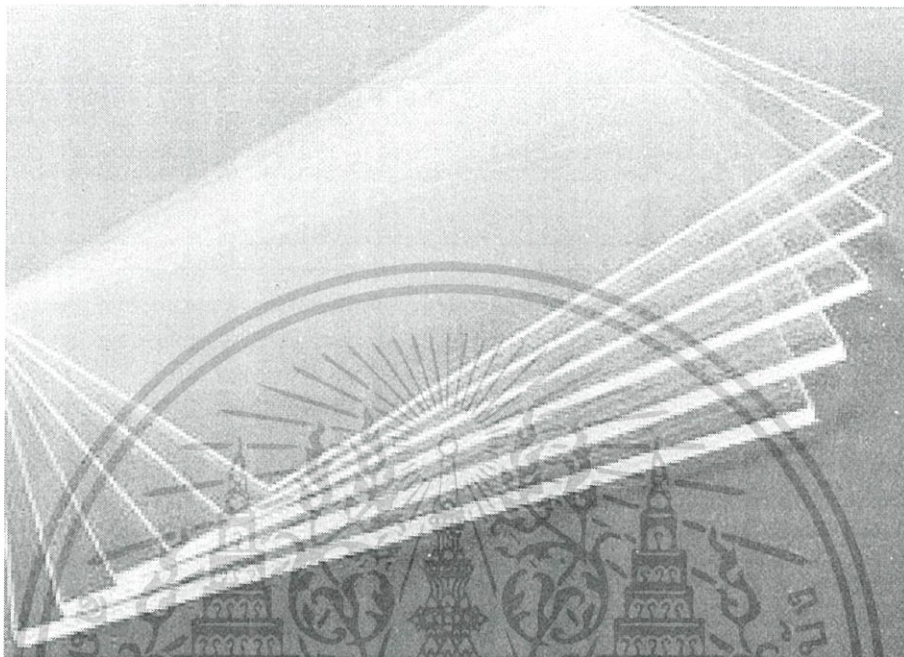
การออกแบบตะแกรงปรับการไหล

ความกว้างและรูปร่างของช่องตะแกรงมีผลต่อการลดการไหลอย่างปั่นป่วนของอากาศ จึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับอุโมงค์ลม

### 3.3 การจัดเตรียมและดำเนินการสร้างอุโมงค์ลม

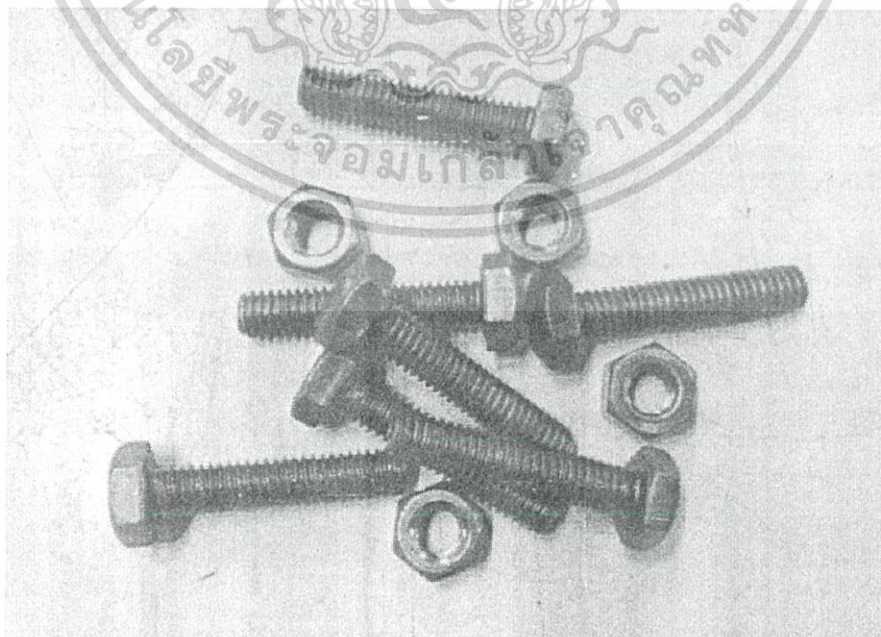
เมื่อทำการออกแบบ นำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบมาสร้างอุโมงค์ลม โดยประกอบด้วยวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. แผ่นอะคริลิกหนา 1 cm



รูป 3.2 แผ่นอะคริลิกที่ตัดไว้

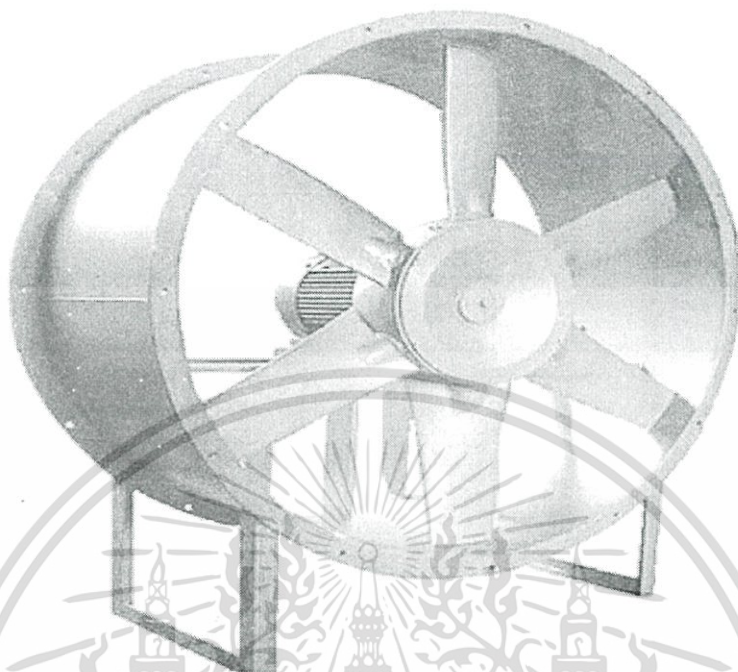
2. น็อต & สกรู



รูป 3.3 ตัวอย่างน็อตและสกรูที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. เครื่องกำเนิดลม



รูป 3.4 เครื่องกำเนิดลม

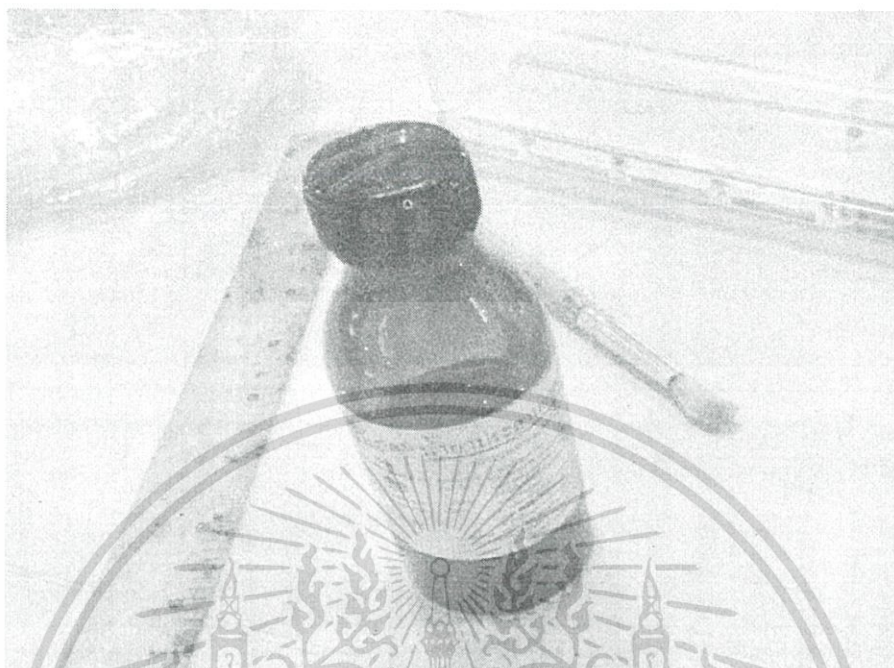
### 4. เหล็กฉาก



รูป 3.5 เหล็กฉาก

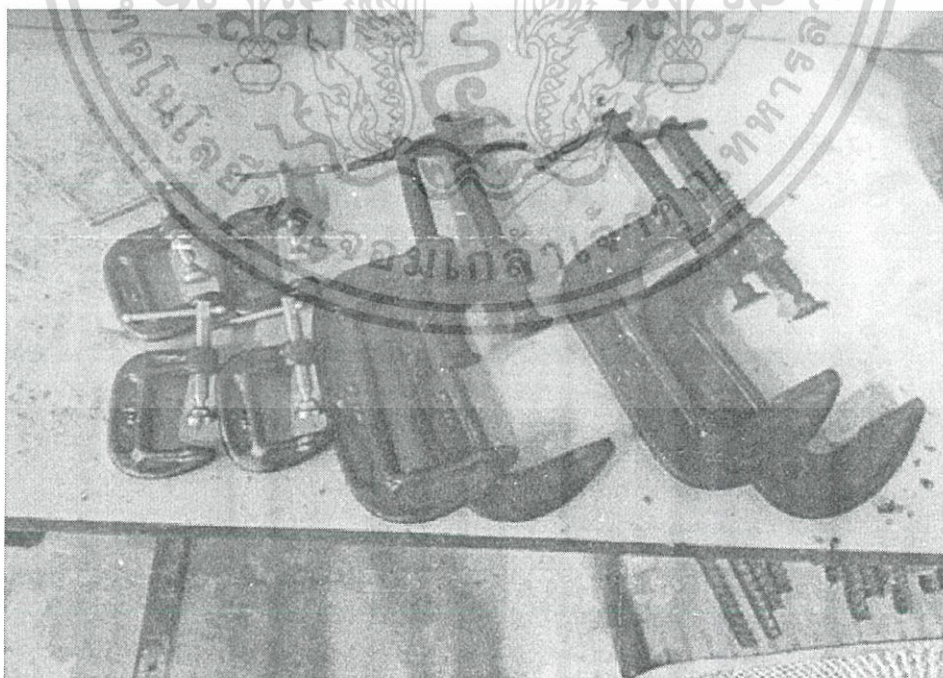
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. น้ำยาประสานอะคริลิก



รูป 3.6 น้ำยาประสานอะคริลิก

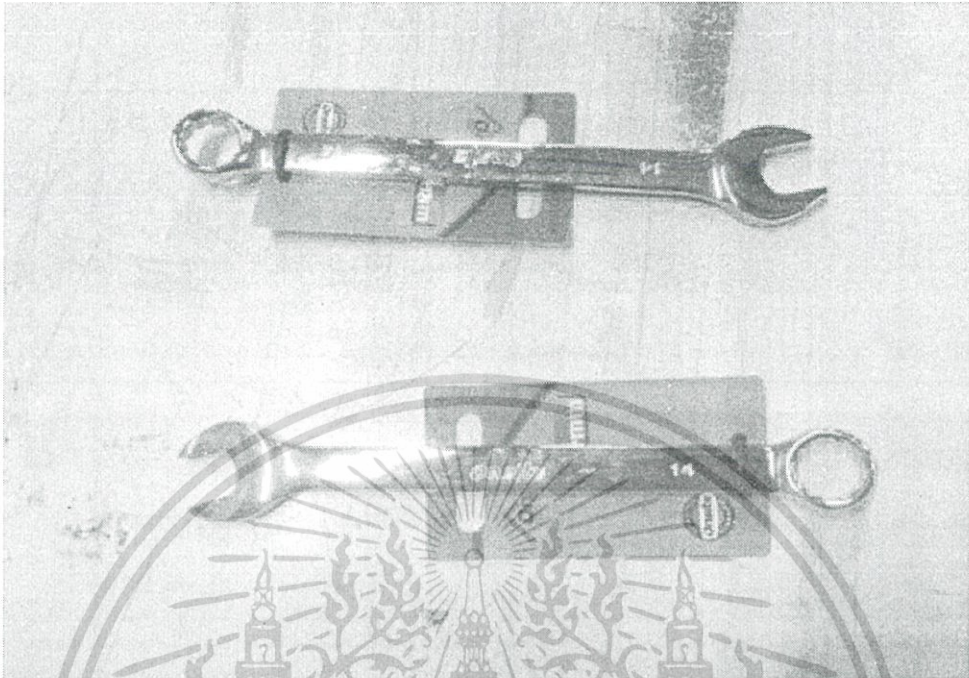
## 6. ตัวลือครูปตัว C



รูป 3.7 ตัวลือครูปตัว C

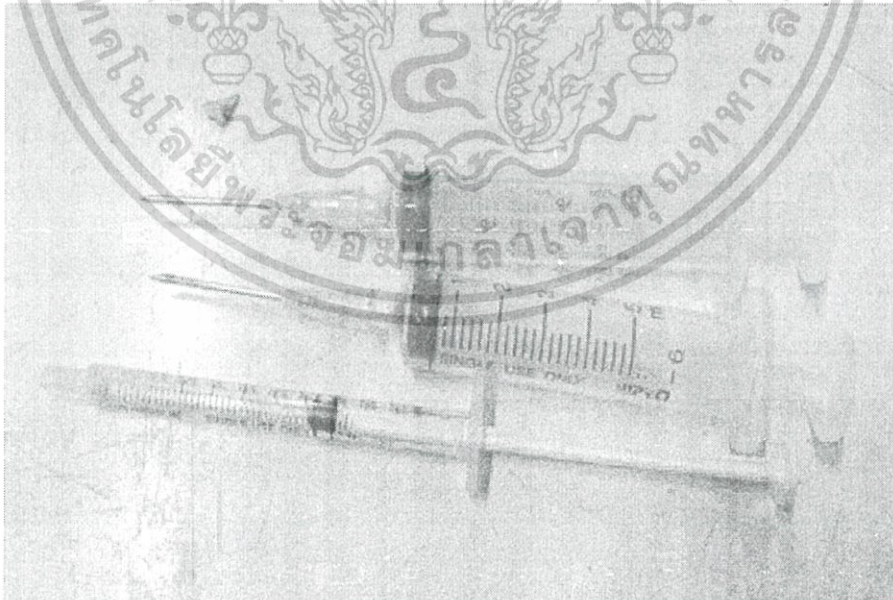
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. ประแจไขน็อตขนาดต่างๆ



รูป 3.8 ประแจไขน็อตขนาดต่างๆ

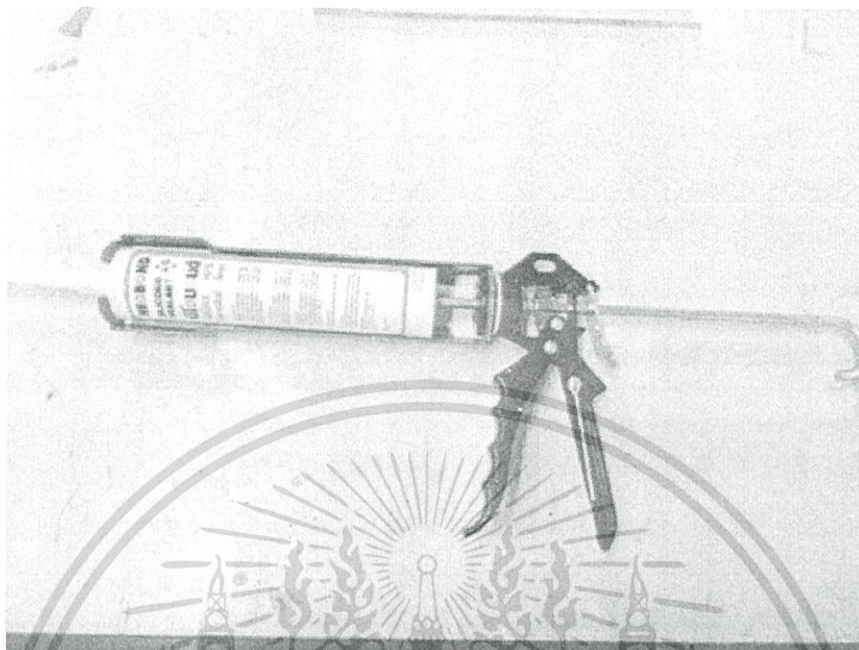
## 8. เข็มฉีดยาไว้สำหรับฉีดยาน้ำยาประสานอะคริลิก



รูป 3.9 เข็มฉีดยาไว้สำหรับฉีดยาน้ำยาประสานอะคริลิก

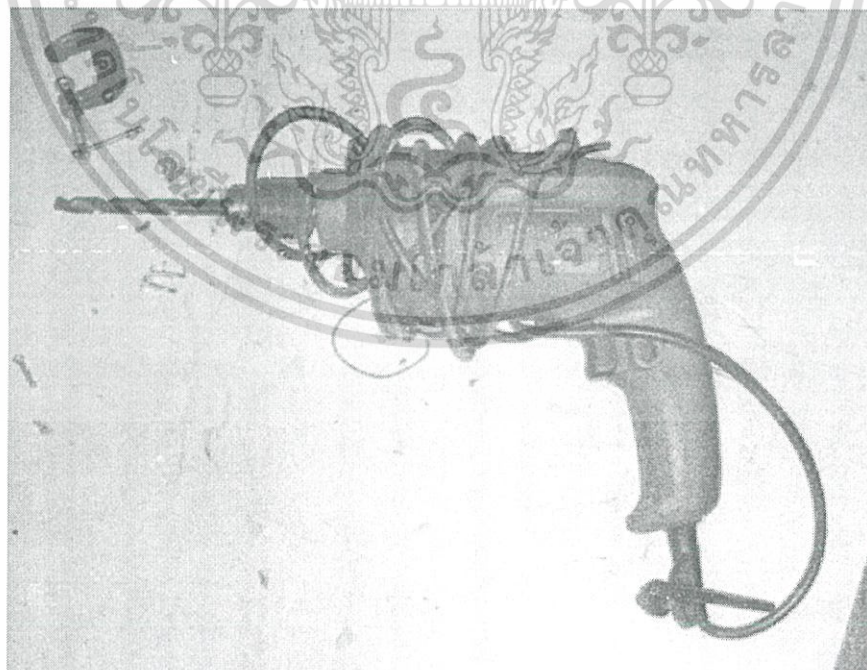
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9. ซิลิโคนพร้อมปืนฉีด



รูป 3.10 ซิลิโคนพร้อมปืนฉีด

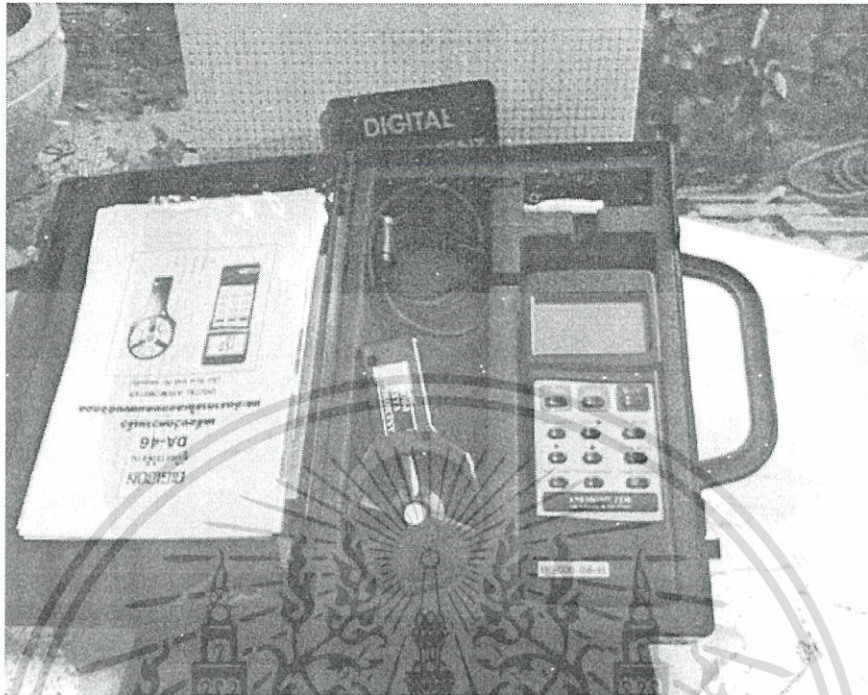
## 10. ส่วนสำหรับเจาะ



รูป 3.11 ส่วนสำหรับเจาะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 11. อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเร็วลม

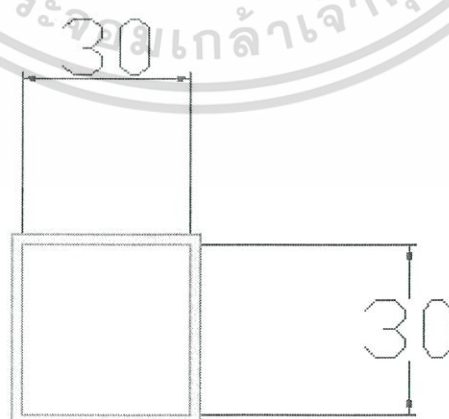


รูป 3.12 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเร็วลม

### 3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

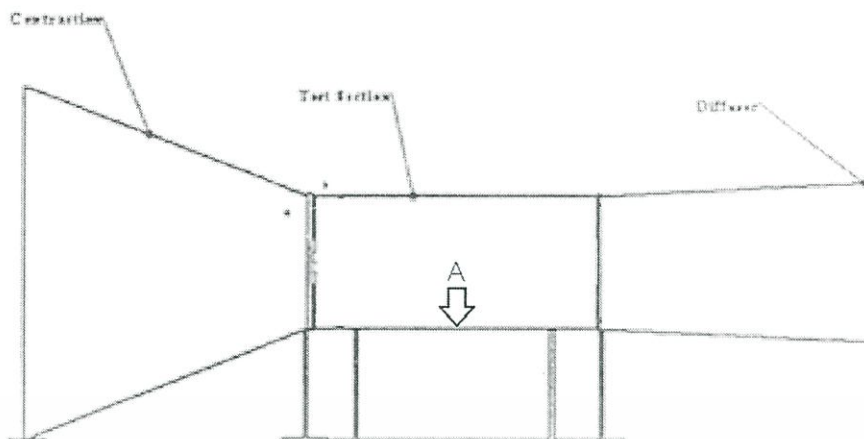
ทดสอบความเร็วในหน้าตัดทดสอบเพื่อดูว่าความเร็วในส่วนหน้าตัดทดสอบมีความเร็วเท่าใดในการปรับความเร็วลมโดยการใช้ Inverter จ่ายกระแสไฟ

การทดสอบความเร็วในช่วงหน้าตัดทดสอบ



รูป 3.13 แสดงภาคตัดด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.14 แสดงภาคตัดด้านข้าง

1. วางเครื่องวัดความเร็วที่กึ่งกลางหน้าตัดทดสอบ
  2. วัดความเร็วลมที่ค่าความถี่ไฟฟ้าต่างๆ ด้วยเครื่องวัดความเร็วลม โดยจะปรับค่าความถี่ขึ้นเรื่อยๆ จากนั้นบันทึกความเร็วเมื่อการจ่ายกระแสไฟเพิ่มขึ้นทุกๆ 2 เฮิร์ตซ์ (ไม่ควรจ่ายกระแสไฟต่ำกว่า 20 เฮิร์ตซ์เนื่องจากอาจทำให้มอเตอร์เครื่องใหม่และชำรุด)
  3. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง
  4. ทำการเปรียบเทียบความเร็วลมของทั้งสองครั้งการทดลอง
- ตัวอย่างตารางแสดงค่าความเร็วลมที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร็วลมที่ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.1 ตัวอย่างตารางแสดงผลการทดลองค่าความเร็วลมที่วัดได้

กระแสไฟฟ้าที่จ่าย (Hertz)	ความเร็วลม (m/s)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
20			
22			
24			
26			
28			
30			
32			
34			
36			
38			
40			
42			
44			
46			
48			
50			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบอุโมงค์ลม แสดงขนาดของส่วนประกอบต่างๆ ของอุโมงค์ การสร้างอุโมงค์ และการวัดความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบของอุโมงค์

#### 4.1 การออกแบบอุโมงค์ลม

การออกแบบอุโมงค์ลมมีข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ โดยการค้นคว้า (Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope, 1999.)

##### 4.1.1 ส่วนรอยต่อเครื่องกำเนิดลมกับท่อรีดอากาศ และตะแกรงปรับการไหล (Connection)

เป็นสังกะสีลักษณะด้านหนึ่งเป็นหน้าตัดกลม ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นหน้าตัดเหลี่ยม

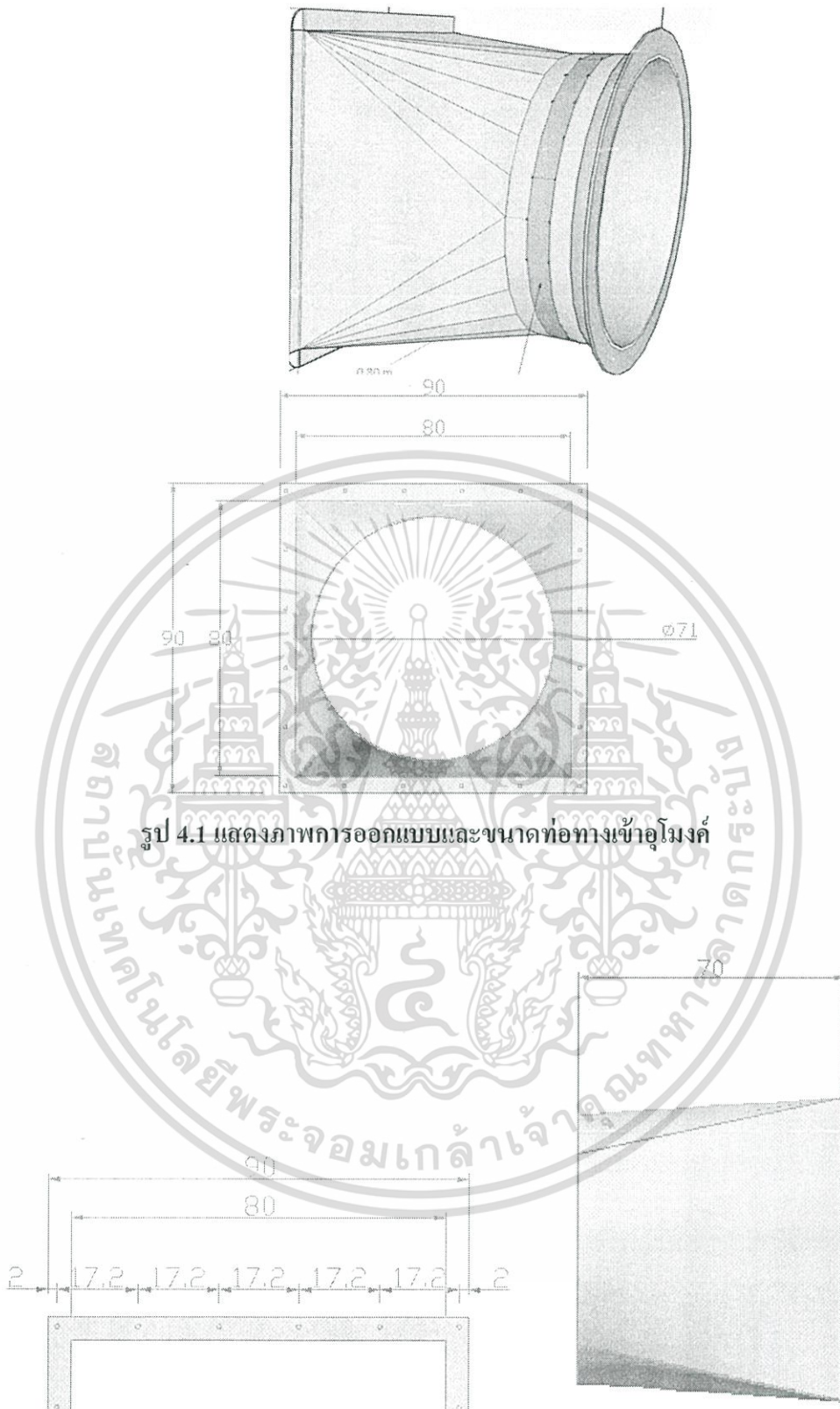
ด้านกลมเส้นผ่าศูนย์กลางยาว = 71 เซนติเมตร

ด้านหน้าตัดสี่เหลี่ยมกว้างและความสูง = 80 เซนติเมตร

ขนาดความยาวของช่วงท่อทางเข้าอุโมงค์ = 70 เซนติเมตร

จากข้อมูลในการออกแบบดังกล่าว แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อทางเข้า

อุโมงค์ ตามรูป 4.1 และ 4.2



รูป 4.1 แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อทางเข้าอูมิ่งค์

รูป 4.2 แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อทางเข้าอูมิ่งค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ตะแกรงปรับการไหล

ความกว้างและรูปร่างของช่องตะแกรงมีผลต่อการลดการไหลอย่างปั่นป่วนของอากาศ (Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope, 1999.)

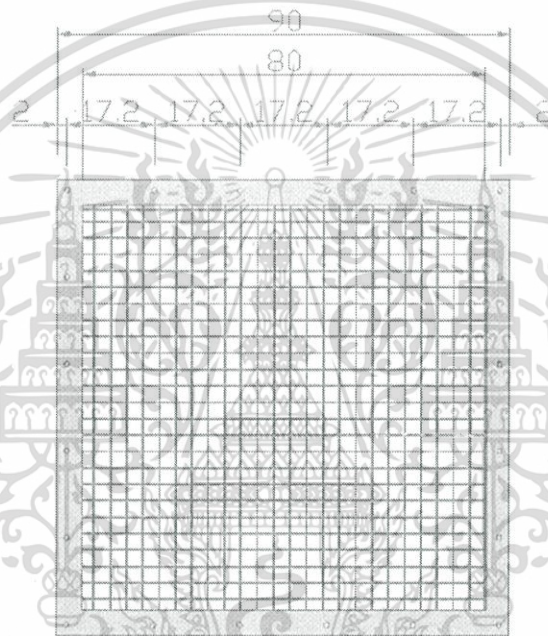
ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดตะแกรงปรับการไหล = 80 เซนติเมตร

ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดช่องตะแกรงปรับ

การไหล = 3.25 เซนติเมตร

จากข้อมูลในการออกแบบดังกล่าว แสดงภาพการออกแบบและขนาดตะแกรงปรับ

การไหลตามรูปที่ 4.3



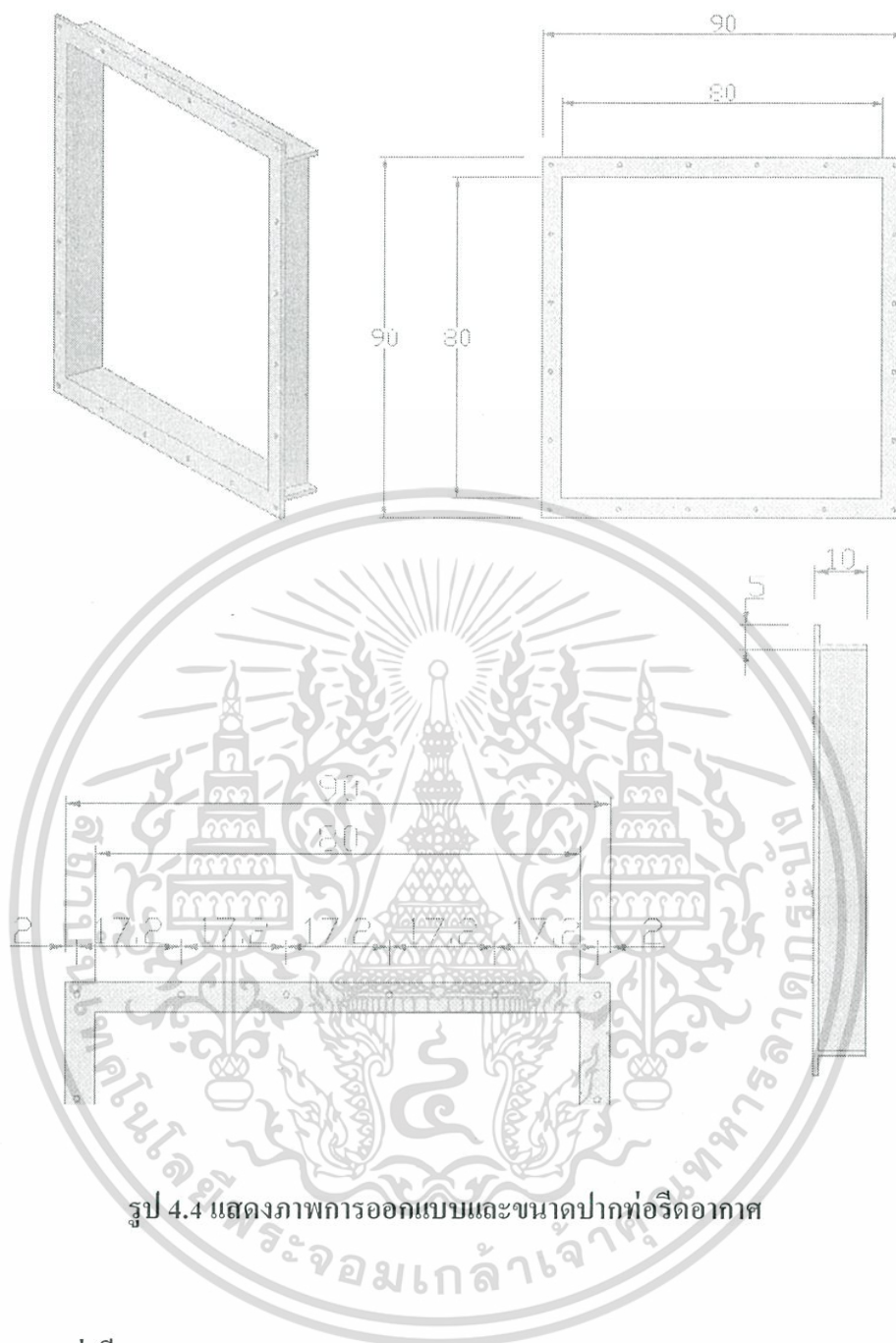
รูป 4.3 แสดงภาพการออกแบบและขนาดตะแกรงปรับการไหล

#### 4.1.3 ช่วงปากท่อรีดอากาศ

ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดปากท่อรีดอากาศ = 80 เซนติเมตร

จากข้อมูลในการออกแบบดังกล่าว แสดงภาพการออกแบบและขนาดปากท่อรีด

อากาศ ตามรูปที่ 4.4



รูป 4.4 แสดงภาพการออกแบบและขนาดปากท้อรีดอากาศ

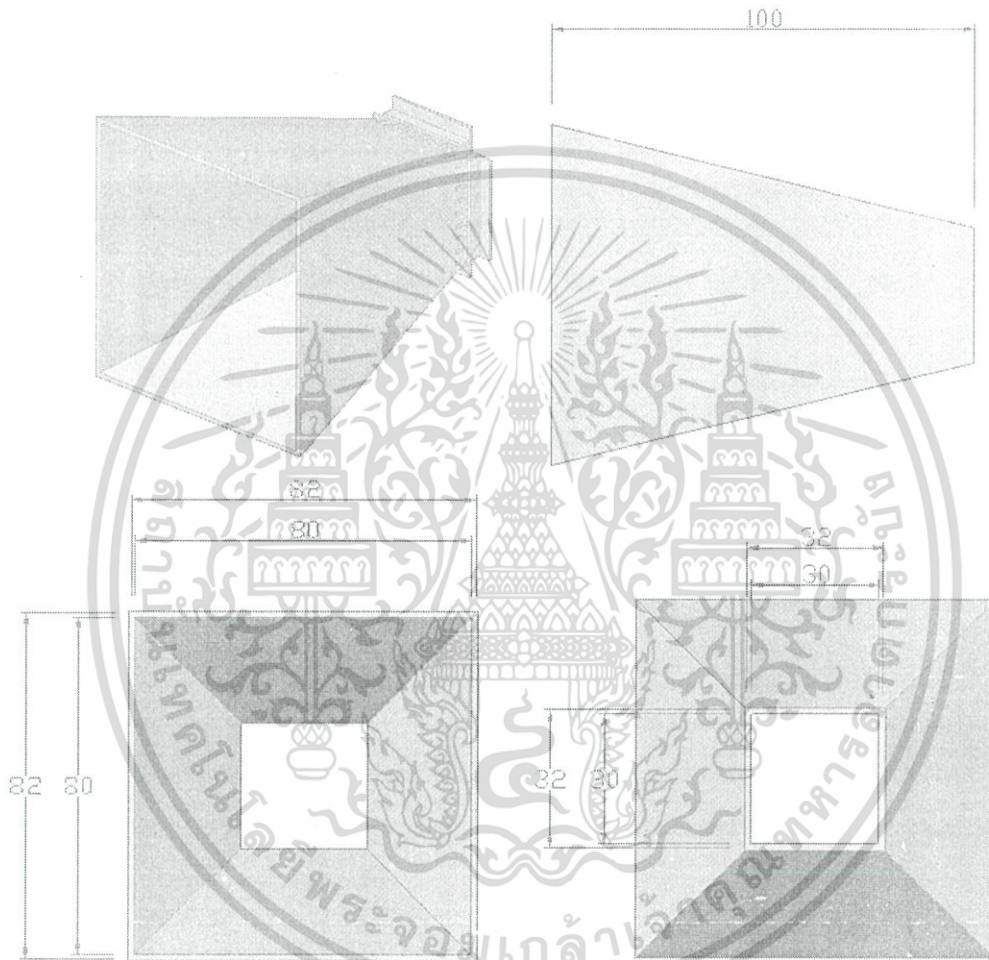
#### 4.1.4 ท้อรีดอากาศ (Contraction)

สัดส่วนของการลดพื้นที่หน้าตัดที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการไหลสม่ำเสมอของอากาศ ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบท้อรีดอากาศที่ทำให้เกิดการแยกไหลของอากาศ ความยาวของท้อรีดอากาศควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้า อัตราส่วนของท้อรีดอากาศ (Contraction Ratio, C) คือค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าต่อพื้นที่หน้าตัดของทางออก ซึ่งค่า C ที่นิยมใช้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 6-9 (Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope, 1999.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดทางเข้าช่วงท่อรีดอากาศ = 80 เซนติเมตร  
 ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดทางออกช่วงท่อรีดอากาศ = 30 เซนติเมตร  
 ขนาดความยาวของช่วงท่อรีดอากาศ = 100 เซนติเมตร  
 จากข้อมูลในการออกแบบดังกล่าว แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อรีดอากาศตาม

รูปที่ 4.5



รูป 4.5 แสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อรีดอากาศ

#### การคำนวณการออกแบบ

- ความยาวของท่อรีดอากาศเท่ากับ 1 เมตร ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 1-1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของทางเข้า
- ค่าอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของทางเข้าต่อพื้นที่หน้าตัดของทางออก เท่ากับ 7.11 ค่าที่นิยมใช้ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 6-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 หน้าตัดทดสอบ (Test section)

การออกแบบจะต้องออกแบบให้ความยาวหน้าตัดทดสอบมีความยาวมากกว่า หรือเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก ขนาดอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างของพื้นที่หน้าตัดทดสอบควรมีขนาดอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1 (Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope, 1999.)

ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดทางเข้าและทางออก

ช่วงหน้าตัดทดสอบ = 30 เซนติเมตร

ขนาดความยาวของช่วงหน้าตัดทดสอบ = 60 เซนติเมตร

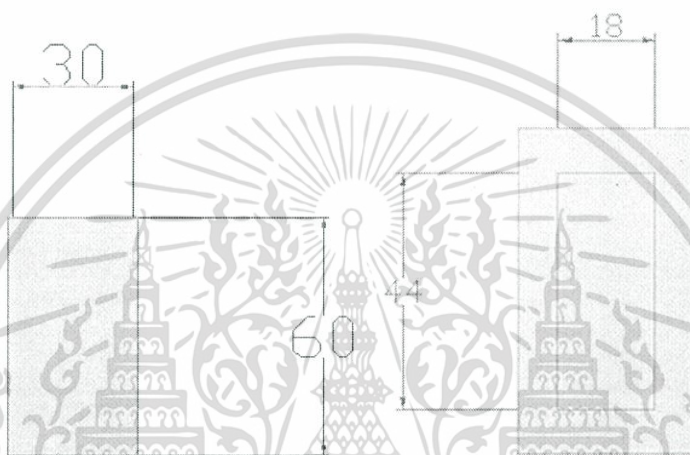
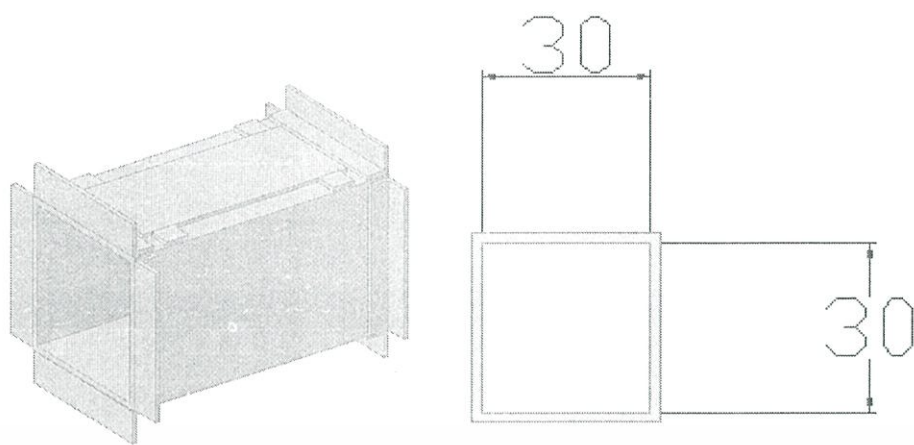
ขนาดความยาวของช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ = 44 เซนติเมตร

ขนาดความสูงของช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ = 18 เซนติเมตร

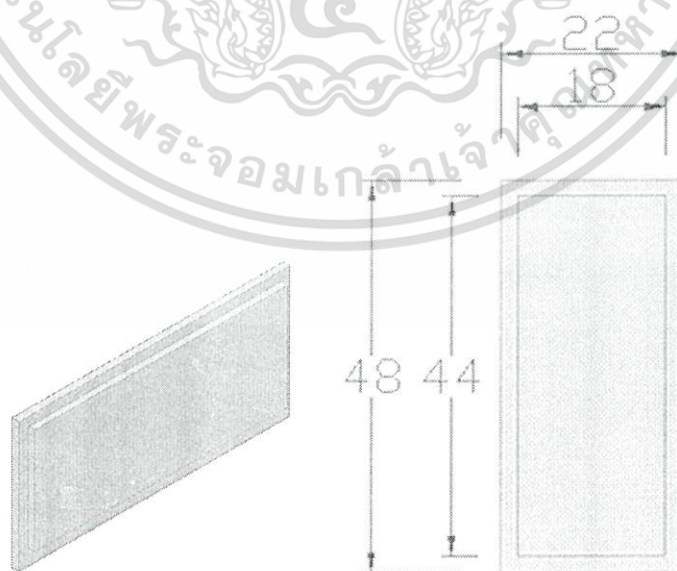
ขนาดความยาวของฝาปิดช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ = 48 เซนติเมตร

ขนาดความกว้างของฝาปิดช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ = 22 เซนติเมตร

จากข้อมูลในการออกแบบดังกล่าว แสดงภาพการออกแบบและขนาดหน้าตัดทดสอบ, ช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ และฝาปิดช่องใส่ชิ้นงานทดสอบตามรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูป 4.6 แสดงภาพการออกแบบและขนาดหน้าตัดทดสอบ ช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ  
ฝาปิดช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ



รูป 4.7 แสดงภาพการออกแบบและขนาดหน้าตัดทดสอบ ช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ  
ฝาปิดช่องใส่ชิ้นงานทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณการออกแบบ

- ความยาวของหน้าตัดทดสอบเท่ากับ 0.6 เมตร ควรมีความยาวมากกว่าหรือเท่ากับ 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
- อัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างหน้าตัดทดสอบเท่ากับ 1 ควรจะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 1

#### 4.1.6 ท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser)

มีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วนคือ ส่วนที่รับลมจากหน้าตัดทดสอบและส่วนปล่อยลมออกจากพัดลมซึ่งตั้งไว้เพื่อลดความเร็วลม อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด จะอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 เท่า หรืออาจจะน้อยกว่านั้นก็ได้ มุมเอียงสมมุติ อยู่ในช่วง 2 ถึง 3.5 องศาหรืออาจน้อยกว่านั้นก็ได้ (Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope, 1999.)

ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดทางเข้าช่วงท่อลดความเร็วของอากาศ

= 30 เซนติเมตร

ขนาดความยาวและความสูงของหน้าตัดทางออกช่วงท่อลดความเร็วของอากาศ

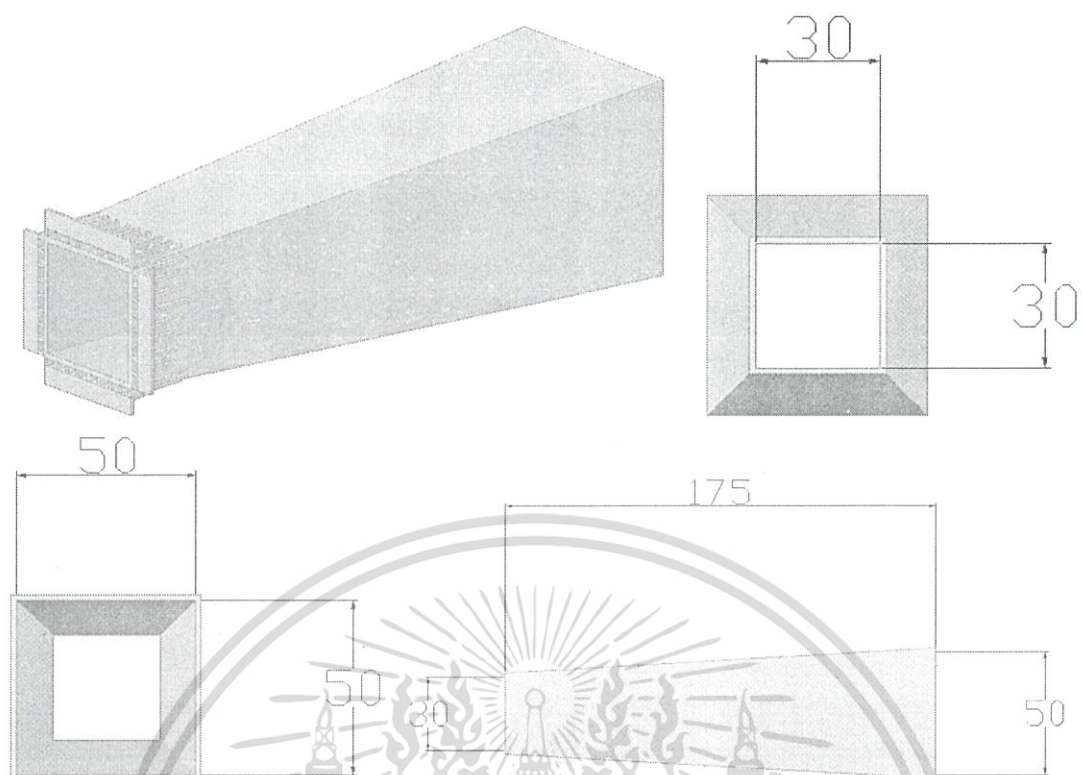
= 50 เซนติเมตร

ขนาดความยาวของช่วงท่อลดความเร็วของอากาศ

= 175 เซนติเมตร

จากข้อมูลในการออกแบบดังกล่าวแสดงภาพการออกแบบและขนาดท่อลดความเร็ว

ของอากาศ ตามรูปที่ 4.8

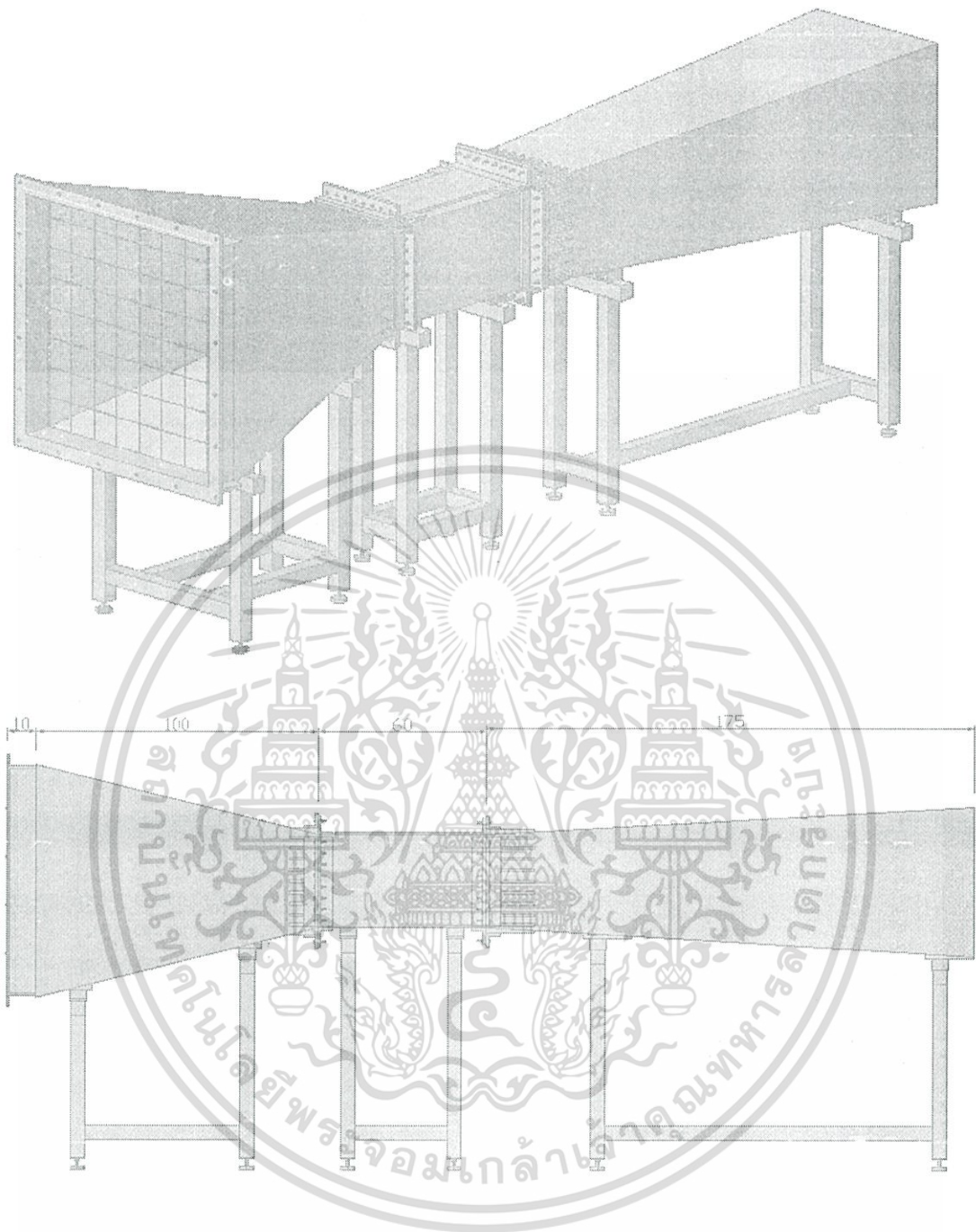


รูป 4.8 แสดงภาพการออกแบบและขนาดที่ลดความเร็วของอากาศ

การคำนวณการออกแบบ

- อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัด จากสมการ 2.8 จะได้  $A_R = 2.25$  ควรอยู่ในช่วง 2 ถึง 3 เท่า
- มุมเอียงสมมูลจากสมการ 2.9 จะได้  $\theta_e = 3.179$  องศา ซึ่งอยู่ในช่วง 2 ถึง 3.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

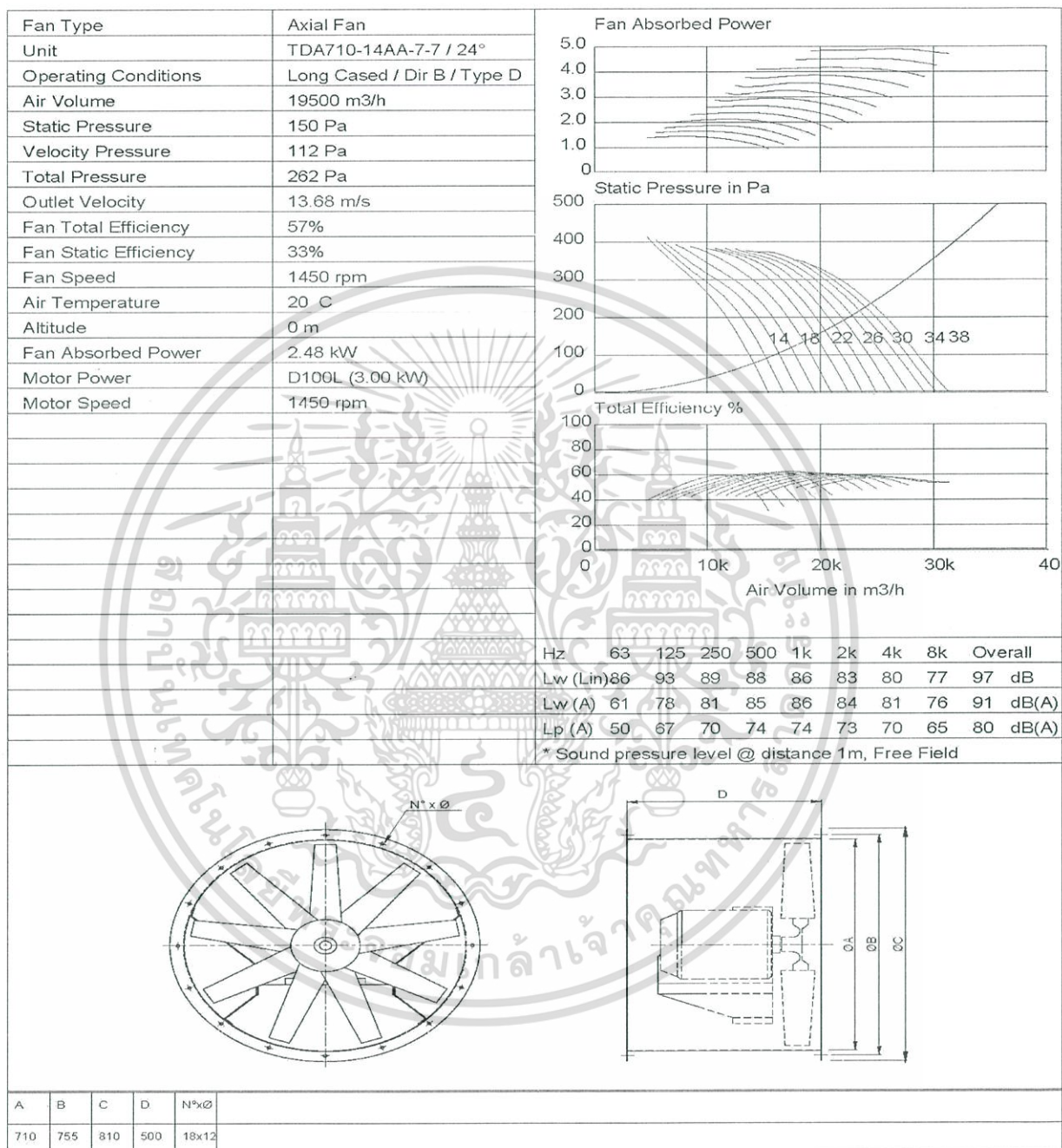


รูป 4.9 แสดงภาพการออกแบบและขนาดความยาวของอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

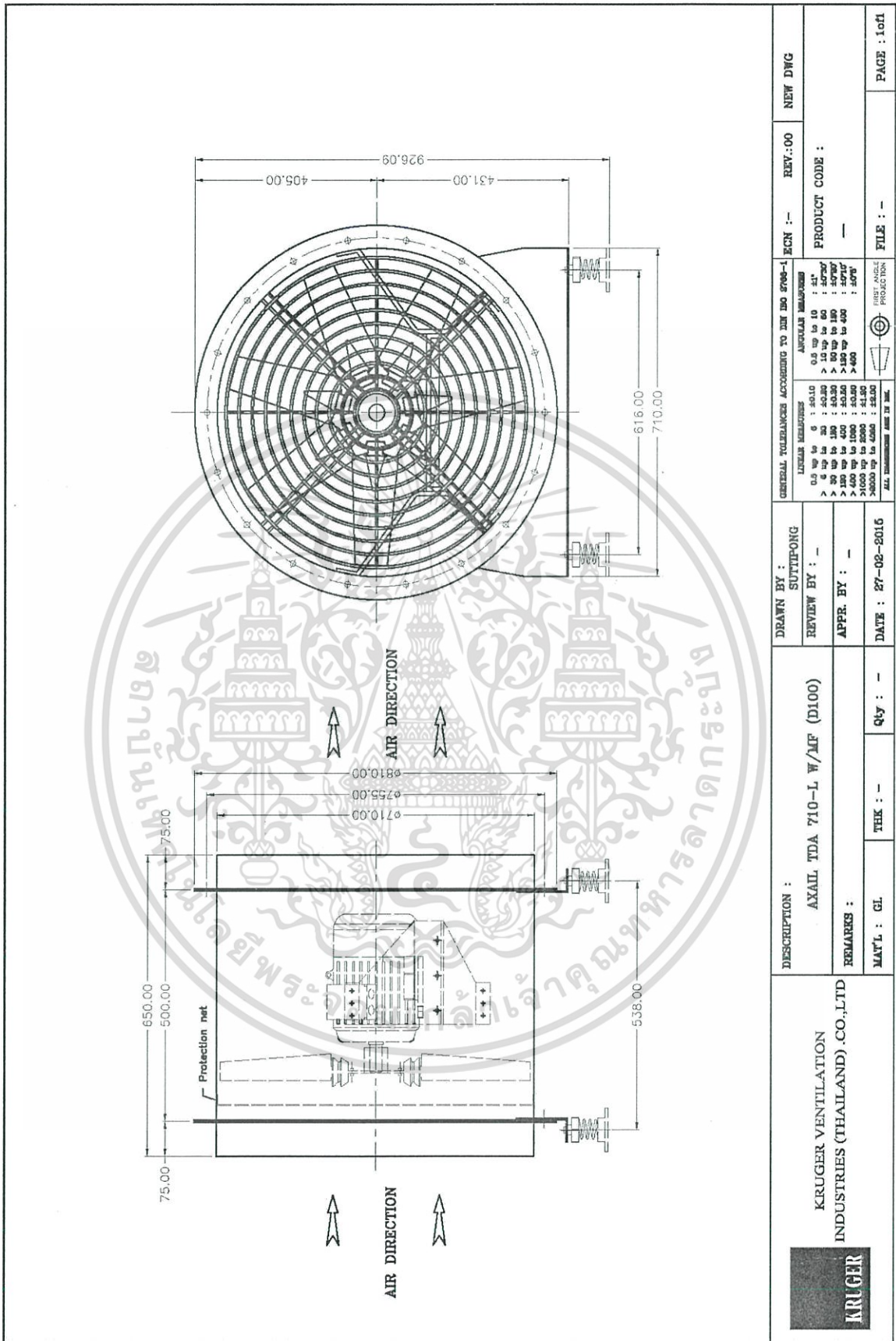
#### 4.1.7 รายการประกอบแบบเครื่องกำเนิดลม (Specification)

รุ่น TDA 710-14AA-7-7/24° ของบริษัท Kruger (หรือรุ่นอื่นที่เทียบเท่า) ตามรายละเอียดต่อไปนี้



รูป 4.10 แสดงรายละเอียดเครื่องกำเนิดลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.11 แสดงรายละเอียด เครื่องกำเนิดลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ ขนาด 2.48 KW ใช้ไฟฟ้า 3 Phase

ตัวรับกำลังมอเตอร์ VSD INVERTER ของบริษัท HITACHI

รุ่น Model : WJ200-030HFC

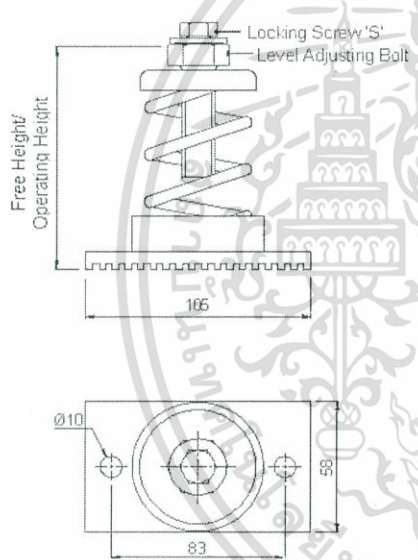
สำหรับ motor : 3 kW( 4 Hp.)

Output Voltage : 3 Phase, 380-460v.50/60Hz. (หรือรุ่นอื่นที่เทียบเท่า)

#### 4.1.8 ส่วนอุปกรณ์สปริงสำหรับรับแรงกระแทก

สปริงสำหรับรับแรงกระแทกที่ฐานวางพัดลม **เบอร์ SBA-A 63** ของบริษัท Kruger (หรือรุ่นอื่นที่เทียบเท่า) ที่ 4 มุมของฐานวางพัดลม ตามรายละเอียดต่อไปนี้

**25mm Deflection Type**



Model	Rated Load		Spring Rated (kg/mm)	Dimension (mm)		
	(kg)	(lbs)		Free Height/ Opt. Height	Spring O.D.	S
SBA-A03	3	6.6	0.12	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A04	4	8.8	0.16	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A05	5	11.0	0.20	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A06	6	13.2	0.24	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A08	8	17.6	0.32	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A10	10	22.0	0.40	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A13	13	28.6	0.52	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A16	16	35.2	0.64	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A20	20	44.0	0.80	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A25	25	55.0	1.00	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A32	32	70.4	1.28	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A40	40	88	1.60	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A50	50	110	2.00	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A63	63	138.6	2.52	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A80	80	176	3.20	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A100	100	220	4.00	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A125	125	275	5.00	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A160	160	352	6.40	95	Ø 51	M10 x 25
SBA-A200	200	440	8.00	95	Ø 51	M10 x 25

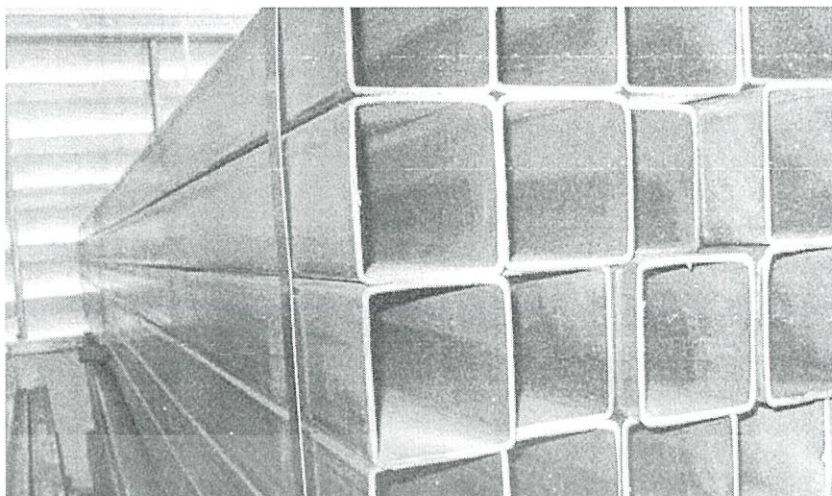
รูป 4.12 แสดงรายละเอียดขาตั้งสปริงของเครื่องกำเนิดลม

#### 4.1.9 ส่วนฐานอุโมงค์ลม

เหล็กกล่อง (มอก.) ขนาด 2x2 นิ้ว หนา 2.3 มิลลิเมตร (หรือวัสดุอื่นที่มีความแข็งแรงเทียบเท่า)

จากบริษัท Dsteel (ดีสตีล) ตัวอย่างตามรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



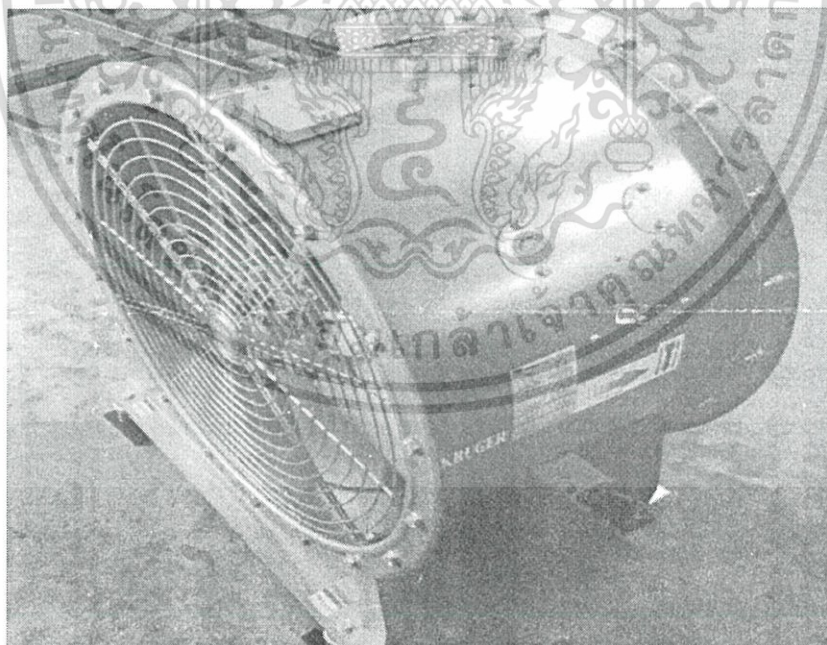
รูป 4.13 ตัวอย่างโลหะที่ใช้ทำขาตั้งเหล็ก

## 4.2 การสร้างอุโมงค์ลม

แบ่งการสร้างส่วนต่างๆของอุโมงค์ลมออกเป็นดังนี้

### 4.2.1 การติดตั้งเครื่องกำเนิดลม (Blower)

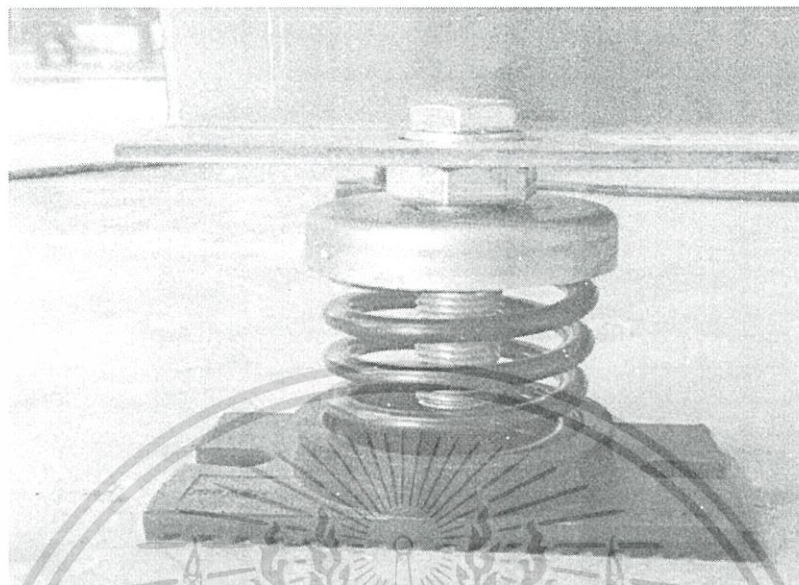
ใช้เครื่องกำเนิดลมชนิดหมุนตามแนวแกน (Axial fan) ตามรูปที่ 4.14



รูป 4.14 เครื่องกำเนิดลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

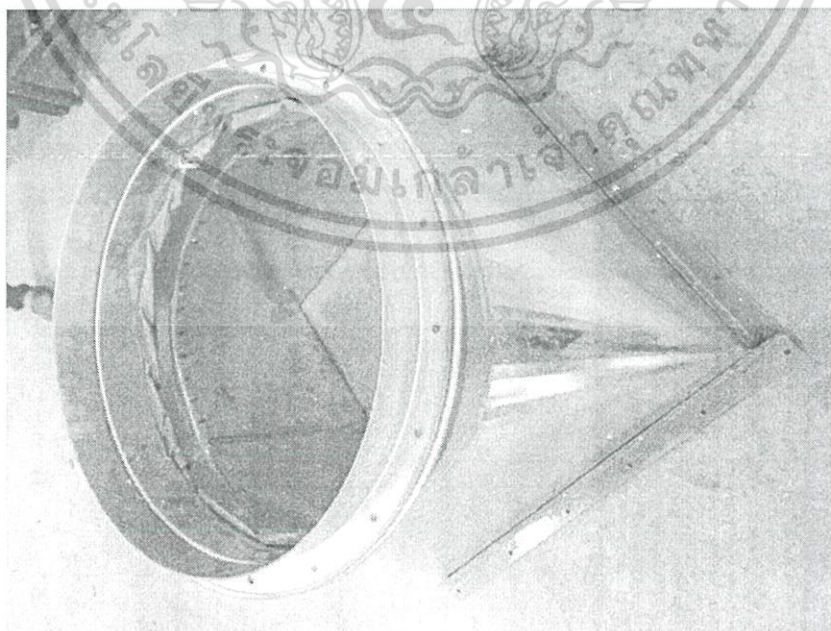
พร้อมสปริงสำหรับรับแรงกระแทกที่ฐานวางพัฒลมตามรูปที่ 4.15



รูป 4.15 ขาตั้งสปริงของเครื่องกำเนิดลม

#### 4.2.2 ส่วนรอยต่อเครื่องกำเนิดลมกับท่อรีดอากาศ และตะแกรงปรับการไหล (Connection)

ใช้สังกะสีชนิดหนาส่งทำเพื่อเป็นรอยต่อเครื่องกำเนิดลมกลม กับท่อรีดอากาศสี่เหลี่ยม ตามรูปที่ 4.16

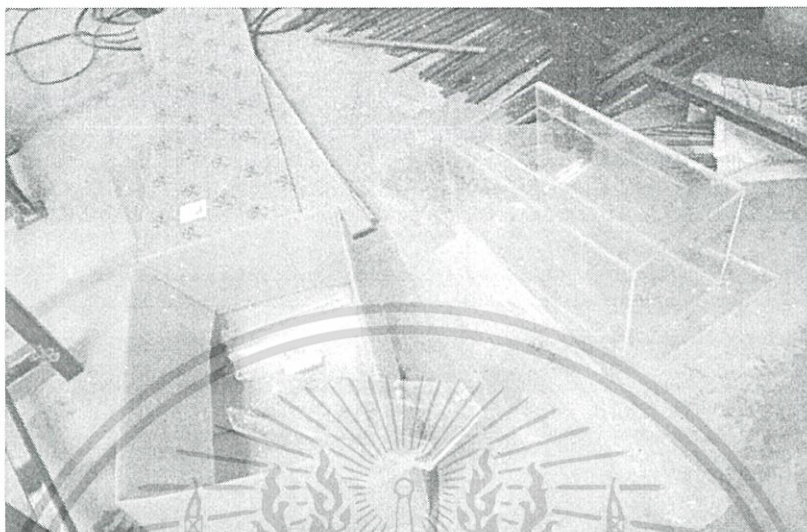


รูป 4.16 ช่วงเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์กำเนิดลมและตัวอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 การสร้างที่อริตอากาศ (Contraction)

สังคัตแผ่นอะคริลิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 4.17



รูป 4.17 แผ่นอะคริลิกที่สังคัต

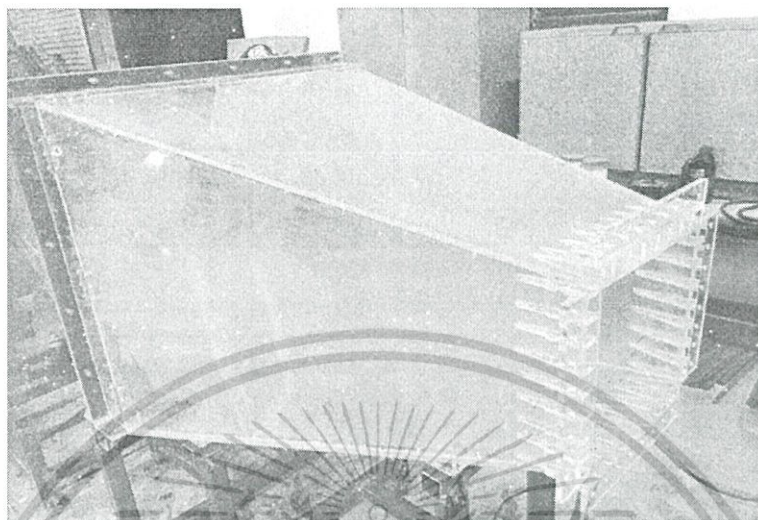
ประกอบแผ่นอะคริลิกทั้ง 4 แผ่นเข้าด้วยกัน ด้วยน้ำยาประสานและกาวซิลิโคนจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง ตามรูปที่ 4.18



รูป 4.18 โครงอะคริลิกที่ประกอบด้วยน้ำยาประสานและกาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยิงสกรูยึดซีดีให้โครงสร้างแข็งแรงแล้วประกอบปีกหน้าตัดสำหรับร็อยน็อด  
สำหรับประกอบแต่ละส่วน ตามรูปที่ 4.19



รูป 4.19 ส่วนท่อร์ิดอากาศเมื่อยิงสกรูยึดให้แข็งแรง

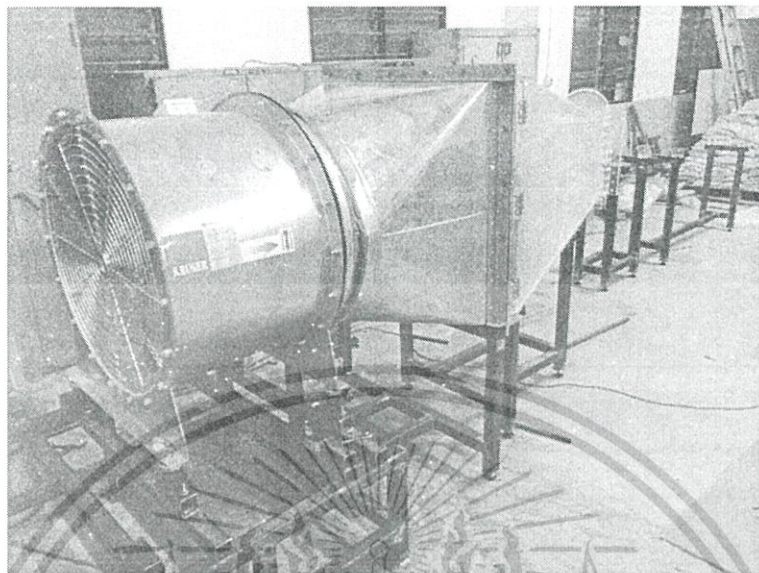
นำแผ่นยางกันรั่วหุ้มติดตามขอบรอยต่ออีกครั้งพร้อมทั้งติดตั้งตะแกรงปรับการไหล  
ตามรูปที่ 4.20



รูป 4.20 รอยต่อท่อร์ิดอากาศเมื่อดัดแผ่นยางกันรั่วแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งเข้ากับขาตั้งบริเวณที่ปากท่อเครื่องกำเนิดลม ตามรูปที่ 4.21

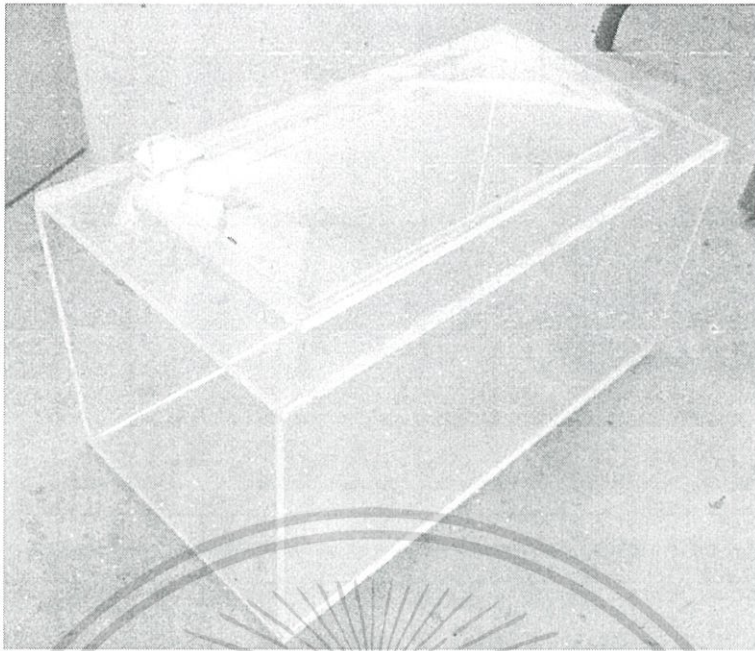


รูป 4.21 ขาตั้งช่วงท่อรีดอากาศ

#### 4.2.4 การสร้างหน้าตัดทดสอบ (Test section)

การสร้างในส่วนนี้ จำเป็นจะต้องมีความสามารถที่จะสังเกตผลการทดลองได้ ดังนั้น จึงใช้แผ่นอะคริลิกใสเพื่อให้ง่ายต่อการมองเห็นภายในตัวอุโมงค์ขณะทำการทดสอบ จำนวน 4 แผ่นให้เป็นท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด การประกอบใช้น้ำยาประสานและกาวซิลิโคนยาตลอดแนว จากนั้นทึงไว้ให้แห้ง ตามรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.22 โครงอะคริลิกของช่วงหน้าต่างทดสอบ

ยิงสกรูเนื้อตึ๊ด โครงสร้างให้แข็งแรงแล้วประกอบปีกรอยต่อและติดแผ่นยางตรง  
รอยต่อกันรั่วอีกชั้น ตามรูปที่ 4.23



รูป 4.23 รอยต่อระหว่างท่อรีดอากาศและหน้าต่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งกับส่วนข้างตั้งให้ได้ระดับเดียวกับท่อรีดอากาศ ตามรูปที่ 4.24



รูป 4.24 ขาดังของช่วงหน้าตัดทดสอบ

#### 4.2.5 การสร้างท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser)

ติดตั้งแผ่นอะคริลิกเป็นรูปสี่เหลี่ยมคาง จำนวน 4 แผ่น ประกอบแผ่นอะคริลิกทั้ง 4 แผ่นเข้าด้วยกัน ด้วยกาวซิลิโคนจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง ตามรูปที่ 4.25



รูป 4.25 โครงอะคริลิกของช่วงท่อลดความเร็ว

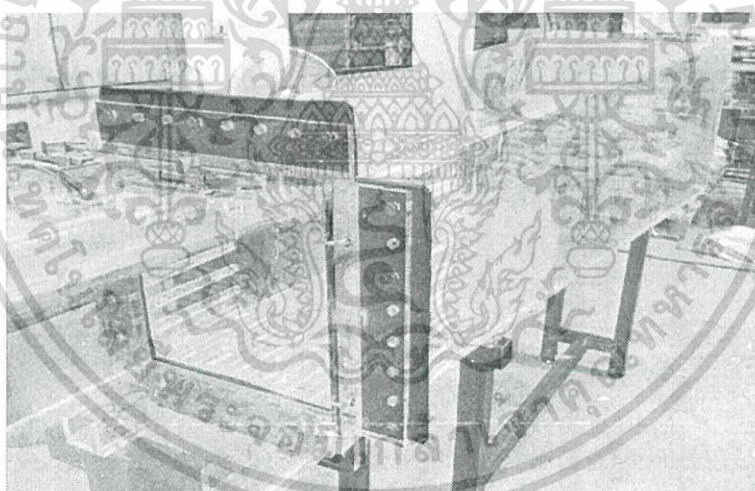
ยิงสกรูน็อตยึด โครงสร้างให้แข็งแรงจากนั้นประกอบปีกรอยต่อสำหรับร้อยน็อต และสร้างข้างตั้งสำหรับวางท่อลดความเร็ว ตามรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.26 ช่วงลดความเร็วเมื่อยิงสกรูเพิ่มความแข็งแรงและประกอบปีกรอยต่อแล้ว

ประกอบปีกรอยต่อและติดแผ่นยางตรงรอยต่อกันอากาศรั่วอีกชั้นติดตั้งกับส่วนขาตั้งให้ได้ระดับเดียวกับท่อน้ำตัดทดสอบ ตามรูปที่ 4.27

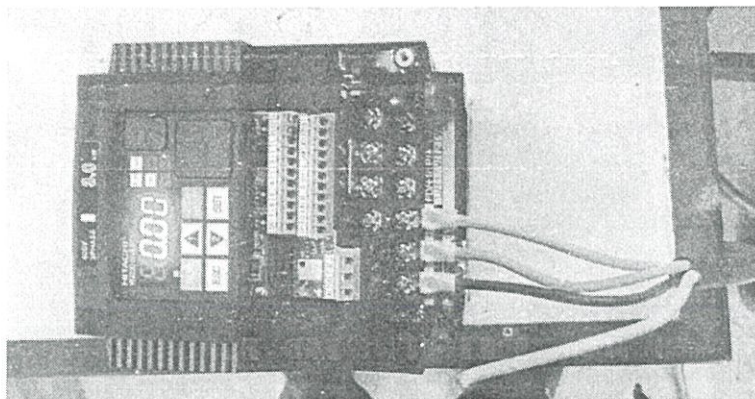


รูป 4.27 รอยต่อของช่วงที่ลดความเร็ว

#### 4.2.6 การต่อเครื่องปรับความเร็ว และเดินสายไฟ

ต่อตัวปรับความเร็ว INVERTER ของบริษัท HITACHI เข้ากับมอเตอร์ที่พัฒนามตามรูปที่ 4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



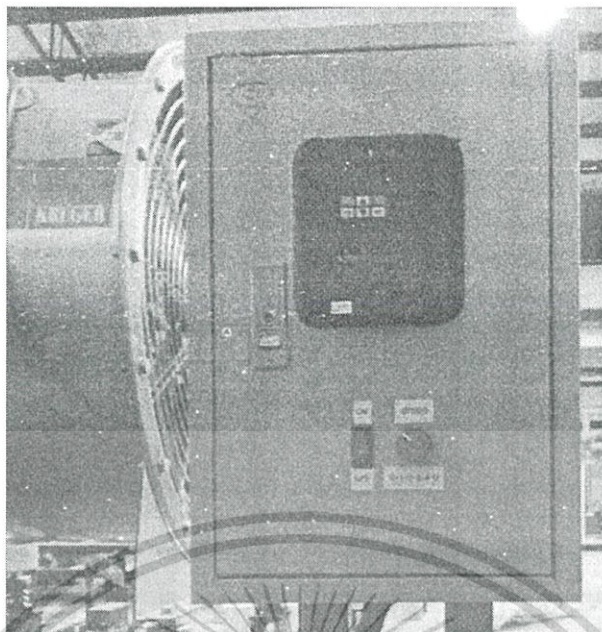
รูป 4.28 การต่อไฟเข้าตัวปรับความเร็ว

ประกอบ Inverter เข้ากับตู้ไฟฟ้าเดินสายไฟฟ้า 3 Phase เข้ากับตู้และตัว Selector switch ให้ Blower สามารถทำงานได้ ตามรูปที่ 4.29 และ 4.30



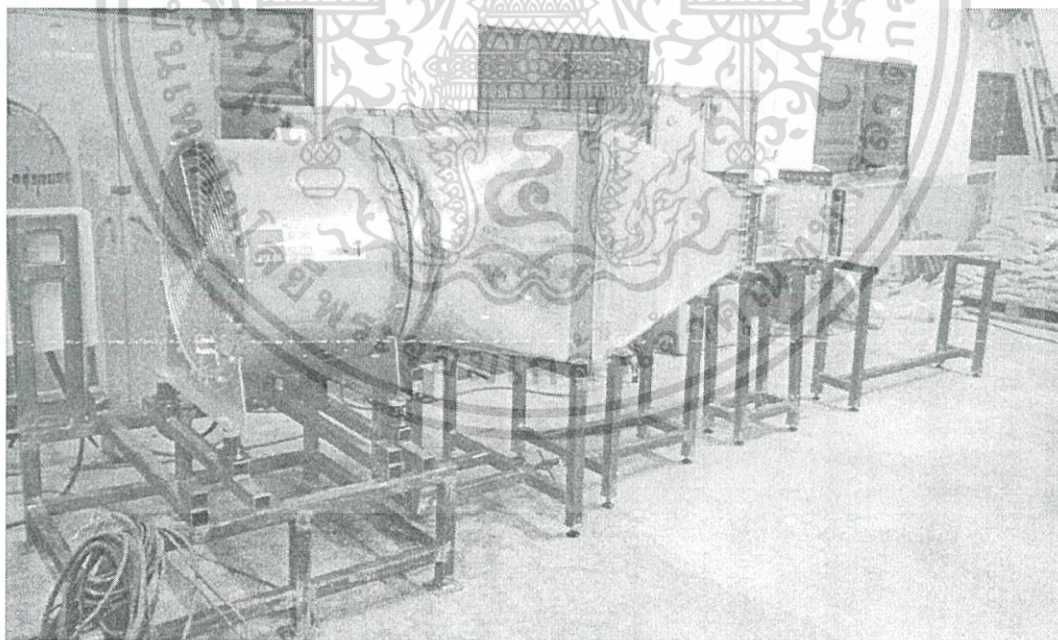
รูป 4.29 ภายในตู้ไฟฟ้าของอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



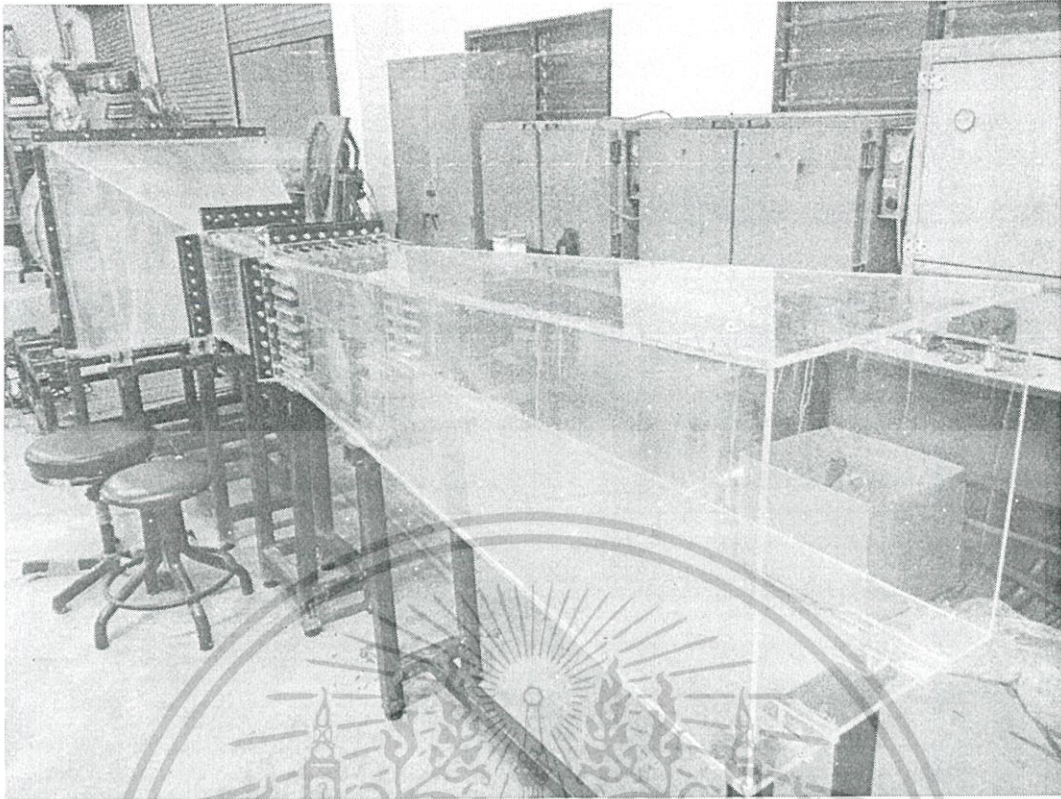
รูป 4.30 ภายนอกตู้ไฟฟ้าของอุโมงค์ลม

ทำการตั้งโปรแกรมการใช้งานเครื่อง Inverter จากนั้นประกอบส่วนต่างๆ ของอุโมงค์ลมเข้าด้วยกันก็จะพร้อมใช้งาน ดังที่เห็นในภาพ 4.31 และ 4.32



รูป 4.31 ภาพอุโมงค์ลมเมื่อประกอบเสร็จ

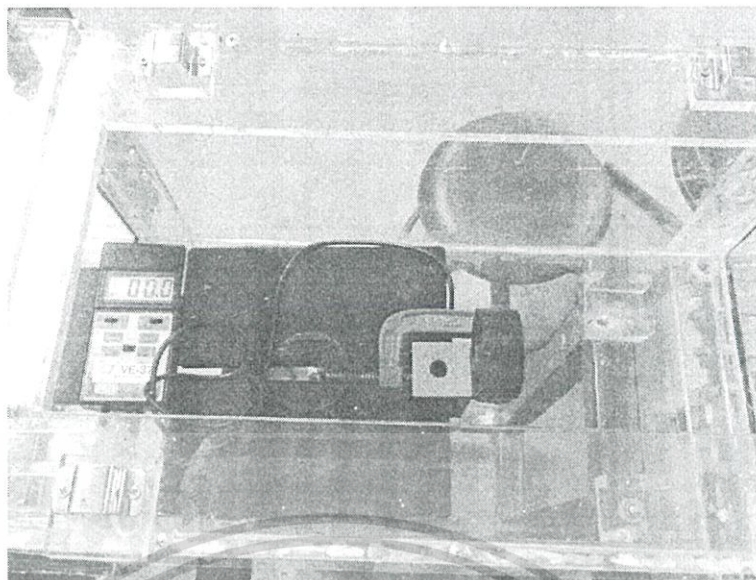
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.32 ภาพอุโมงค์ลมเมื่อประกอบเสร็จ

#### 4.3 การทดสอบความเร็วลมของหน้าตัดทดสอบ

เครื่องกำเนิดลมเป็นแบบใช้ไฟ 3 Phase สามารถปรับค่าความถี่ไฟฟ้ากับตัว Inverter ได้อยู่ในช่วง 20 ถึง 50 Hertz ใช้เครื่องวัดความเร็วลมวัดค่าช่วงหน้าตัดทดสอบ โดยการปรับค่าความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทีละ 2 Hertz ตั้งแต่ 20 Hertz ทำการวัดค่าความเร็วลมและบันทึกผล ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง นำค่าความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบที่ความถี่ไฟฟ้าเดียวกันมาเฉลี่ย ตามรูปที่ 4.33 ถึง 4.36

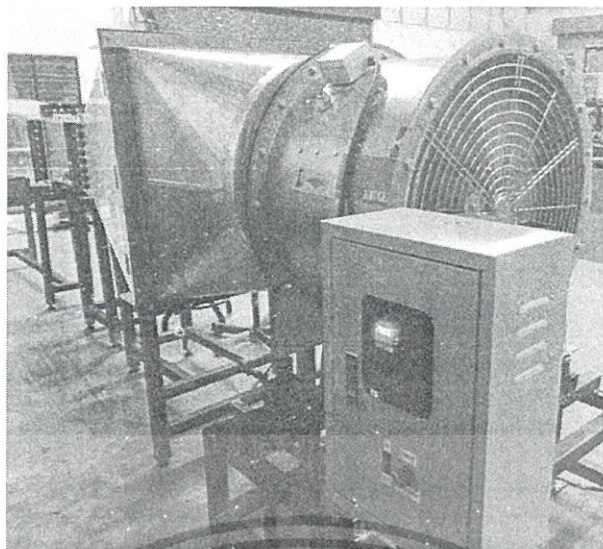


รูป 4.33 เครื่องวัดความเร็วขณะติดตั้งเพื่อทดสอบ



รูป 4.34 ตัว Inverter ปรับความถี่ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.35 อุโมงค์ลมขณะทดสอบความเร็วลม



รูป 4.36 เครื่องวัดความเร็วขณะกำลังทดสอบความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 ผลการทดสอบการทำงานของอุโมงค์ลม

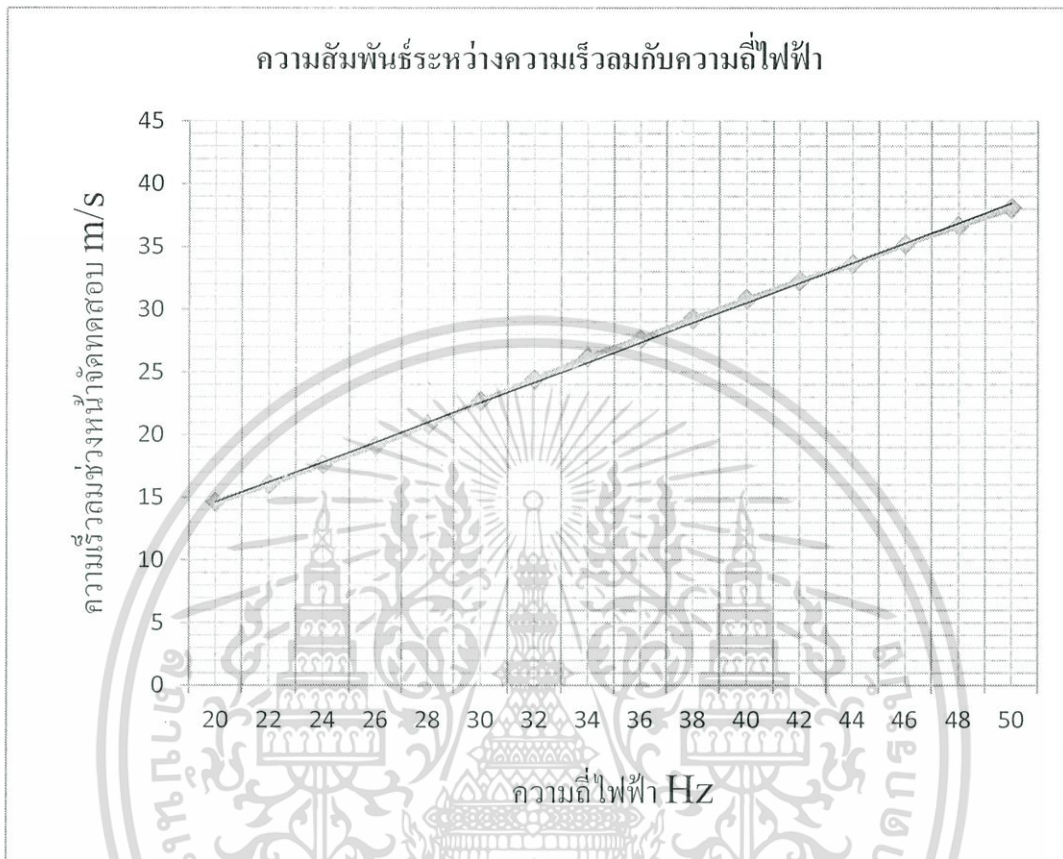
ผลการทดสอบการทำงานของอุโมงค์ลมนี้เป็นการทดสอบการหาความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบโดยการปรับค่าความถี่ไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ ในการใช้ตัวปรับไฟฟ้าของพัดลม Inverter เพื่อทดสอบดูว่าในแต่ละความถี่ไฟฟ้าตั้งแต่ 20-50 เฮิร์ตซ์ ช่วงหน้าตัดทดสอบมีความเร็วลมมากน้อยเพียงใดซึ่งในการทดสอบนี้จะทำการทดสอบที่กึ่งกลางหน้าตัดทดสอบพอดี

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลองค่าความเร็วลมที่วัดได้

กระแสไฟฟ้าที่จ่าย (Hertz)	ความเร็วลม (m/s)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
20	14.50	14.7	14.60
22	16.1	15.9	16.00
24	17.5	17.8	17.65
26	19.2	19	19.10
28	20.7	20.9	20.80
30	22.7	22.6	22.65
32	24.3	24.5	24.40
34	26.1	26.3	26.20
36	27.5	27.8	27.65
38	29.4	29.1	29.25
40	30.9	30.7	30.80
42	32.3	32.2	32.25
44	33.4	33.8	33.60
46	35.3	35.1	35.20
48	36.4	36.7	36.55
50	38.2	37.9	38.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำข้อมูลที่ได้อ่านเขียนกราฟความสัมพันธ์ ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ไฟฟ้ากับความเร็วลม



รูป 4.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับค่าความถี่ไฟฟ้า

จะได้เป็นกราฟเป็นลักษณะของกราฟเชิงเส้น หากความสัมพันธ์ของสมการกราฟเชิงเส้น ได้คือ

$$Y=(0.7945 \times (X-20))+14.629 \quad (4.1)$$

โดย Y คือค่าความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบ และ X คือค่าความถี่ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.2 การคำนวณหาหน่วยแรงดันลม

จากสมการ

$$q = 0.004826v^2 \quad (4.2)$$

$q$  = หน่วยแรงดันลมสถิต กก./ตรม.

$v$  = ความเร็วลมเฉลี่ย กก./ชม.

เมื่อแทนค่า  $V$  เป็นค่าความเร็วลมสูงสุดเท่ากับ 38 เมตรต่อวินาที หรือ 136.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้ค่าหน่วยแรงดันสูงสุดเท่ากับ 90.31 กิโลกรัมต่อตารางเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาหลักการทำงาน ออกแบบและสร้างแบบจำลองอุโมงค์ เพื่องานวิศวกรรม อุโมงค์ลมที่ทำการออกแบบ และสร้างจากอะคริลิกในส่วนของท่อรีดอากาศ (Contraction) หน้าตัดทดสอบ (Test section) และท่อลดความเร็วของอากาศ (Diffuser) จุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนได้ทำการยิงซิลิโคน เพื่อแก้ไขปัญหาการรั่วของลมตามจุดเชื่อมต่อต่างๆ ส่วนหน้าตัดทดสอบ (Test section) ได้มีการทำช่องเปิดปิดเพื่อไว้สำหรับการใส่วัสดุทดสอบต่างๆ

จากการทดสอบการทำงานของอุโมงค์ลมแบบเปิด ซึ่งเครื่องกำเนิดลมเป็นแบบใช้ไฟ 3 Phase สามารถปรับค่าความถี่ไฟฟ้ากับตัว Inverter ได้อยู่ในช่วง 20 ถึง 50 Hertz ใช้เครื่องวัดความเร็วลมวัดค่าช่วงหน้าตัดทดสอบ โดยการปรับค่าความถี่ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นทีละ 2 Hertz ตั้งแต่ 20 Hertz ทำการวัดค่าความเร็วลมและบันทึกผล ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง นำค่าความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบที่ความถี่ไฟฟ้าเดียวกันมาเฉลี่ย ผลที่ได้คือ ที่ค่าความถี่ไฟฟ้าแต่ละค่า จะมีค่าความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบค่าหนึ่ง ซึ่งค่าความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบอยู่ในช่วง 14.60 ถึง 38.05 เมตรต่อวินาที นำข้อมูลดังกล่าวมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ไฟฟ้าและความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบ โดยให้ค่าความถี่ไฟฟ้าเป็นแกนนอน (แกน X) ความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบเป็นแกนตั้ง (แกน Y) จะได้เป็นกราฟเป็นลักษณะของกราฟเชิงเส้น หากความสัมพันธ์ของสมการกราฟเชิงเส้นได้คือ  $Y = (0.7945 \times (X-20)) + 14.629$

โดย Y คือค่าความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบ และ X คือค่าความถี่ไฟฟ้า นำข้อมูลความเร็วลมช่วงหน้าตัดทดสอบมาคำนวณหาหน่วยแรงดันลม  $q = 0.004826v^2$  ได้ค่าหน่วยแรงดันสูงสุดเท่ากับ 90.31 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สามารถนำค่าหน่วยความดันลม ไปใช้ในการทดสอบ High Frequency Force Balance ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อการประมาณค่าแรงลมและการสั่นไหวของอาคาร

### 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองอุโมงค์ลมแบบเปิด การวัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลม ค่าความเร็วลมที่ได้มีความไม่คงที่ มีการเปลี่ยนแปลงค่าขึ้นลงอยู่ตลอดเวลา การบันทึกผลจึงได้จากการประมาณค่ากลางของเครื่องวัด จึงอาจทำให้ผลความเร็วลมที่ได้มีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากการวัดความเร็วลมค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ การอ่านค่าของผู้ทำการทดลอง

ก็มีผลเช่นกัน เครื่องกำเนิดลมมีขนาดใหญ่และมีความเร็วลมสูง กระแสลมจึงอาจมีความไม่สม่ำเสมอ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การวัดความเร็วลมด้วยเครื่องวัด หากใช้เครื่องวัดที่มีขนาดใหญ่และมีประสิทธิภาพในการวัดมากขึ้นกว่านี้ จะได้ค่าที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

2. การสร้างอุโมงค์ลมมีความซับซ้อนและยุ่งยาก การถอดบำรุงรักษา เคลื่อนย้าย หรือพัฒนาอุโมงค์ลมต่อ ควรทำการศึกษาสำรวจอุโมงค์ลมนี้ก่อน หากไม่พร้อมหรือทำผิดวิธี อาจทำให้เกิดปัญหาซับซ้อนขึ้นได้

3. อุโมงค์ลมนี้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบกับชิ้นงานจริงได้ เช่น แวนและหมวกสำหรับนักปั่นจักรยาน ลูกเทนนิส ลูกขนไก่ ลูกบอล ใบพัดต่างๆ เป็นต้น และยังสามารถทดสอบกับชิ้นงานที่เป็นแบบจำลองย่อขนาดมาจากชิ้นงานจริงได้ เช่น โมเดลอาคาร โมเดลบ้านเรือน โมเดลรถยนต์ โมเดลมอเตอร์ไซค์ โมเดลจักรยาน โมเดลป้ายโฆษณา และอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr. and Alan Pope, 1999. **Low speed wind tunnel Testing.**  
Newyork : John Wiley.

มนตรี พิรุณเกษตร. 2545. **กลศาสตร์ของไหล.** กรุงเทพฯ : วิทยพัฒน์.

สัมพันธ์ ไชยเทพ. 2527. **การทดลองสร้าง ปรับปรุงและประเมินประสิทธิภาพ.** กรุงเทพฯ :  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ชนวัฒน์ สุขภานิช, นนทร์วัช อ่วมเจริญ และสุกัญญา ขุนจีน. 2551. “การออกแบบและสร้าง  
อุโมงค์ลมความเร็วต่ำแบบปิด.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง.

สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์. 2555. **ทฤษฎีโครงสร้าง.** สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอม  
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. 2550. **มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร.**  
สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง.

ณฐมน สุขเสริม, ณปภัช สุขเสริม และสุกกิจลิมประยูร. 2011. “อุโมงค์ลมแบบเปิดความเร็วต่ำ.”  
ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย,  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุกิตย์ เทพมังกร. 2543. **การทดสอบแบบจำลองอุโมงค์ลมโดยวิธี HFFB เพื่อการประมาณค่า  
แรงลมและการสั่นไหวของอาคาร.** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

เป็นหนึ่งใน วาณิชชัย. 2552. **ผลกระทบของแรงลมที่มีต่ออาคารสูงและสิ่งก่อสร้างต่างๆ.** สำนักวิชา  
วิศวกรรมและเทคโนโลยี สถาบันเอไอที.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศรัทธา โพธิสว่าง. 2546. “อุโมงค์ลมชนิดผนังยืดหยุ่น.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อรรณพ เรืองวิเศษ. 2548. การทดลองแบบจำลองศาสตร์ในอุโมงค์ลมเพื่อหาแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ทางอากาศเครื่องบิน. กรุงเทพฯ : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.

ชาติรี นิลน้ำเพชร และอรรณพ เรืองวิเศษ. 2548. “ระบบวัดสภาวะการบินของอากาศยานสำหรับการหาแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์.” วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปองวิทย์ ศิริโพธิ์, ณัฐชัย กุศลสุวรรณ และภัทร กางกรรณ. 2545. “วิธีการตรวจสอบหาประสิทธิภาพของอุโมงค์ลม.” หน้า 423-427. ใน การประชุมทางวิชาการ กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ 4-7 กุมภาพันธ์ 2545 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมโภชน์ อิ่มเอิบ. 2530. “อุโมงค์ลมอัตราเร็วต่ำ.” 42 : 10 ใน การประชุมประจำปี ครั้งที่ 25 กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ 3-6 กุมภาพันธ์ 2530 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นายทศพร สุนทรภักซ์. 2552. “การศึกษาและออกแบบต้นแบบอุโมงค์ลมความเร็วเหนือเสียง.” การประชุมวิชาการเครือข่าย กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อชิกร นิลโกศล และเอกสิทธิ์ รุจิพรวาทิน. 2547. “การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมเพื่อการทดลอง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

อรรณพ เรืองวิเศษ. 2552. การทดลองแบบจำลองศาสตร์ในอุโมงค์ลมเพื่อหาแบบจำลองทางอากาศพลศาสตร์ของเครื่องบิน. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

C.F. Wilson, A.L. Camilletti, S.B. Calcutt and P.M. Ligrani. 2008. **A wind tunnel for the calibration of Mars wind sensors.** Planetary and Space Science.

Adrian R. Wittwer and Sergio V. Moller. 2000. “**Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE.**” 84 : 307-320. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ching-Huei Huang, Chun-Liang Lin and Maw-Jy Chao. 2010. **“FERA in parameter identification with application in low-speed wind tunnel test.”** 15 : 495-509 Aerospace Science and Technology.

M. T. Boyle. 2002. **“Low speed wind tunnel testing.”** 31-39 Appears in Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium. SEMI-THERM IV Fourth Annual IEEE.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

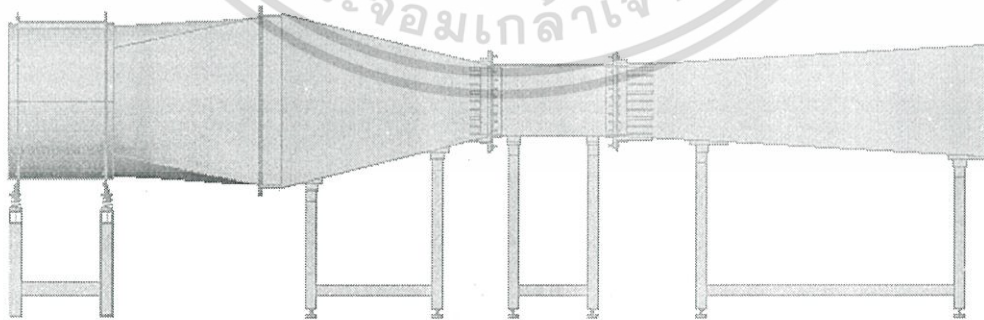
## ภาคผนวก

# ภาพประกอบแบบส่วนประกอบอุโมงค์ลม

### 1. แบบของอุโมงค์ลม



รูป ผ.1.1 ภาพอุโมงค์ลมในการออกแบบ



รูป ผ.1.2 ภาพอุโมงค์ลมในการออกแบบด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ผ.1.3 ภาพอุโมงค์ลมในการออกแบบด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

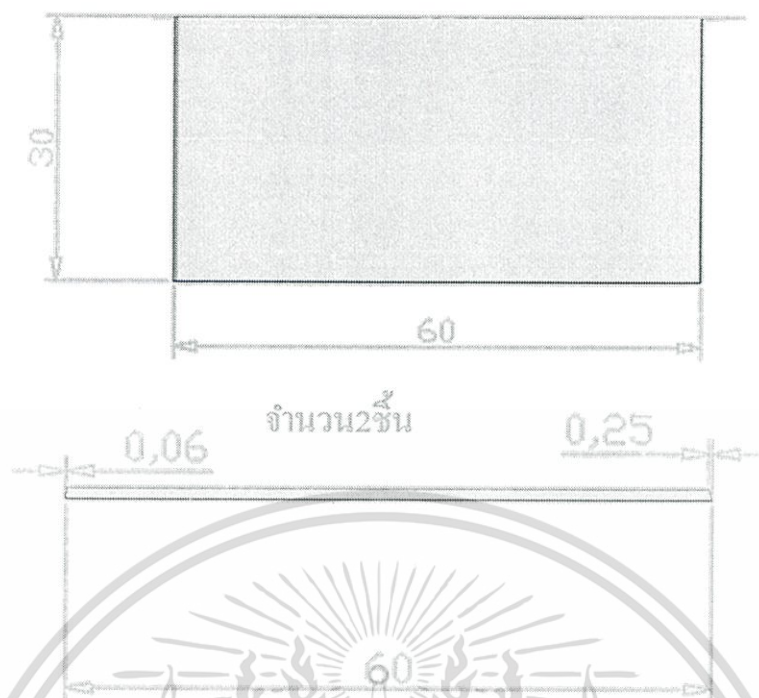
2. แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิก  
ขนาดที่เขียนอยู่ในแบบมีหน่วยเป็นเซนติเมตร



รูป ผ.2.1 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 1

รูป ผ.2.2 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

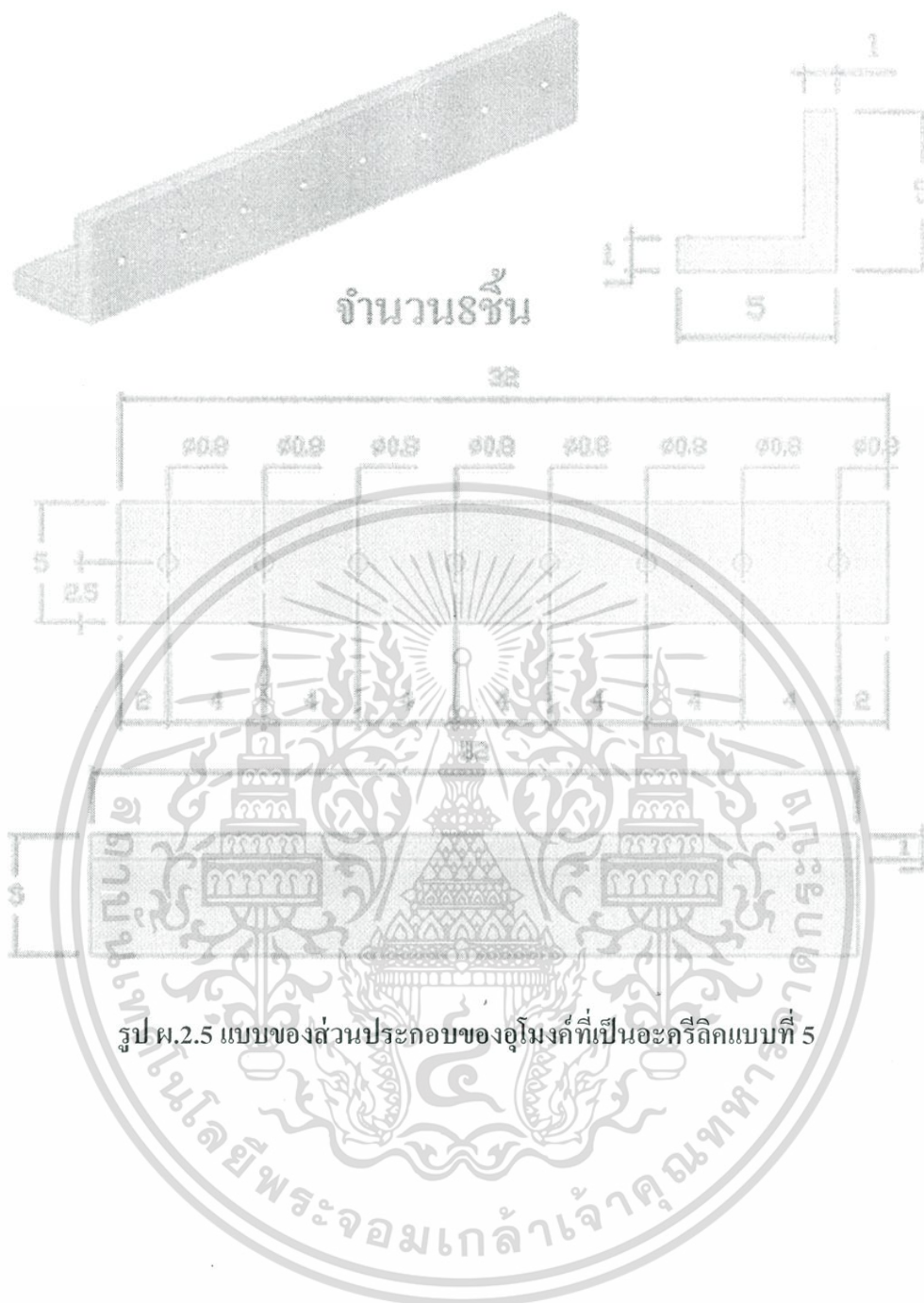


รูป ผ.2.3 แบบของส่วนประกอบของโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 3



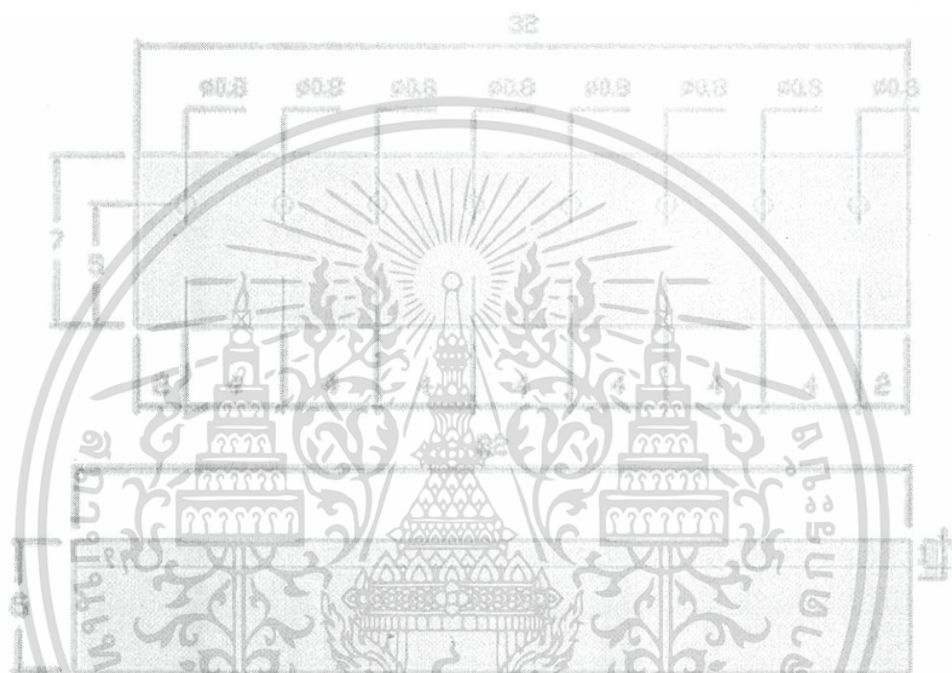
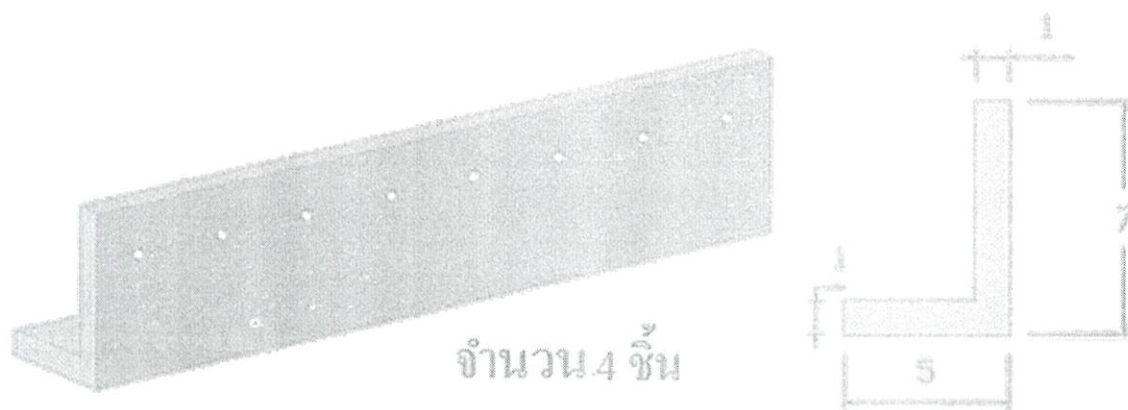
รูป ผ.2.4 แบบของส่วนประกอบของโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





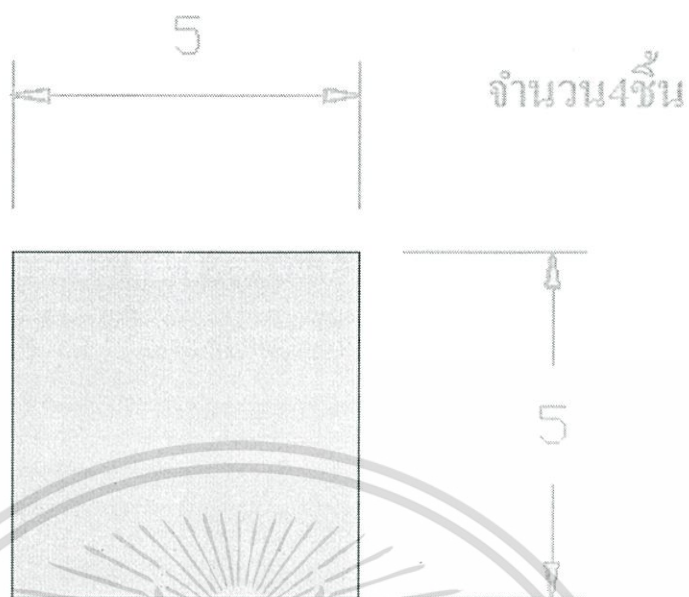
รูป ผ.2.7 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ผ.2.9 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

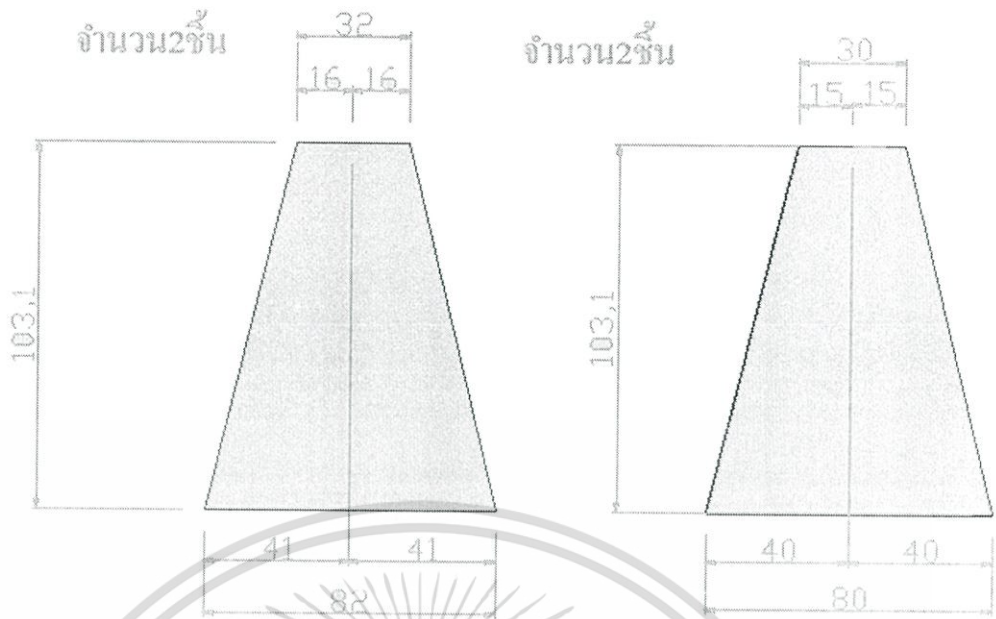


รูป ผ.2.10 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 10



รูป ผ.2.11 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

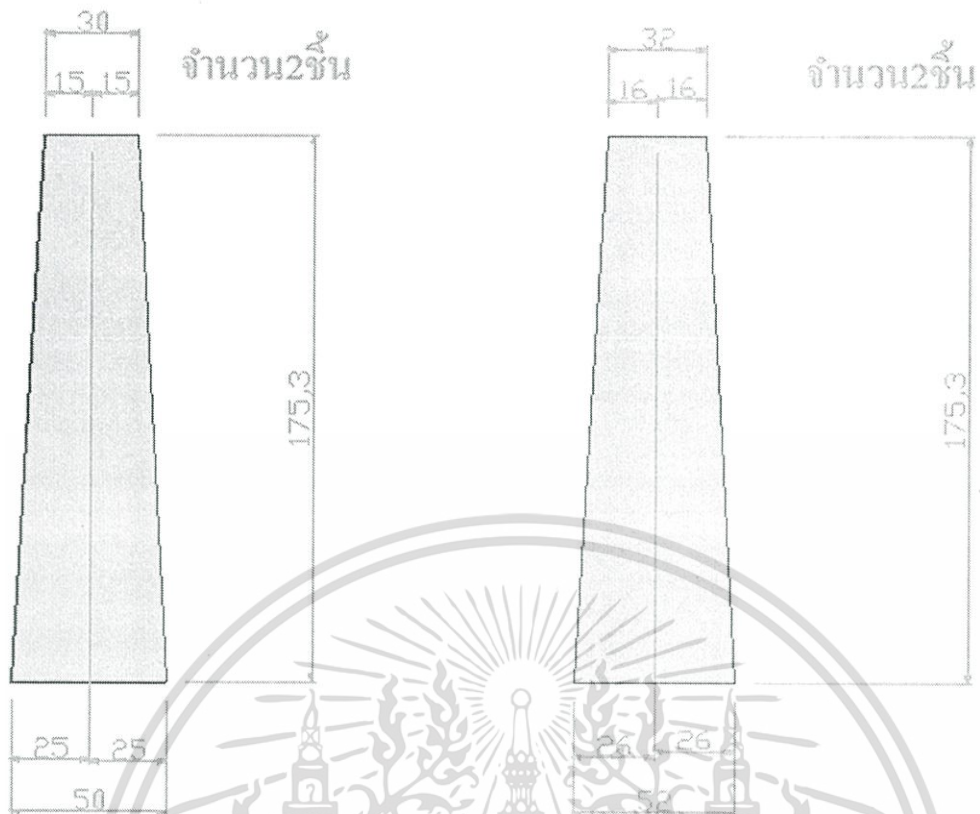


รูป ผ.2.12 แบบของส่วนประกอบของโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 12

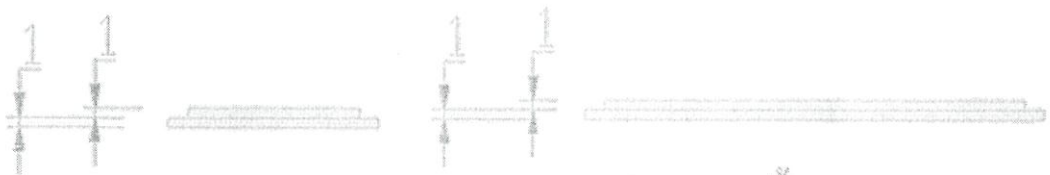


รูป ผ.2.13 แบบของส่วนประกอบของโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ผ.2.14 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 14



จำนวน 1 ชิ้น

รูป ผ.2.15 แบบของส่วนประกอบของอุโมงค์ที่เป็นอะคริลิกแบบที่ 15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



