

อุโมงค์ลมชนิดผนังยืดหยุ่น

นายศรัทธา โพธิสว่าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-533-316-6

FLEXIBLE WALLED WIND TUNNEL

Mr. Satta Posawarng

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2003
ISBN 974-533-316-6**

อุโมงค์ลมชนิดผนังยืดหยุ่น
FLEXIBLE WALLED WIND TUNNEL

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย จันทสาโร)

ประธานกรรมการ



(รองศาสตราจารย์ ร.อ.ดร.กนดรร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อาจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริสุข)

กรรมการ



(อาจารย์ ดร.วีระศักดิ์ เลิศศิริ โยธิน)

กรรมการ



(รองศาสตราจารย์ น.ท. ดร.สรวิฐิ สุธิจจร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร.วรพจน์ ชำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศรัทธา โทธิสว่าง : อุโมงค์ลมชนิดผนังยืดหยุ่น (FLEXIBLE WALLED WIND TUNNEL)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 78 หน้า.
ISBN 974-533-316-6

ในการทดสอบการไหลของของไหลผ่านรูปทรงต่างๆ โดยทั่วไปแล้วเรานิยมที่จะใช้
อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ในการทดสอบ โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมาแล้วนำไปทดสอบแรงกระทำ
ต่างๆ ที่มีต่อวัตถุนั้น เนื่องจากมีราคาถูกกว่าการที่จะสร้างต้นแบบของวัตถุนั้น การใช้แบบจำลองที่มี
มีขนาดเล็กมากก็นั้นอาจมีปัญหาในการสร้าง และอาจส่งผลกระทบต่อค่าของแรงที่กระทำบนวัตถุ
เล็กๆ แต่การสร้างแบบจำลองขนาดใหญ่ก็จะทำให้ได้รับผลกระทบจากผนังของอุโมงค์ลม (Wall
effect) ที่อยู่รอบๆ แบบจำลอง ดังนั้นการสร้างอุโมงค์ลมที่ผ่านมราจึงจำเป็นต้องให้อุโมงค์ลมของ
เรามีขนาดหน้าตัดของส่วนทดสอบใหญ่พอที่จะลดผลกระทบเหล่านี้ได้ ข้อเสียของการสร้าง
อุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่ก็คือ สิ้นเปลืองสูงทั้งค่าลงทุนในการสร้าง และค่าบำรุงรักษาในการใช้
เครื่องมือเหล่านั้น

ในช่วงที่ผ่านมาจึงได้มีผู้พยายามสร้างอุโมงค์ลมแบบผนังปรับรูปร่างได้ โดยการปรับรูป
ร่างของผนังก็เพื่อจะทำให้ผนังมีลักษณะและรูปทรงคล้ายกับ Streamline ของกระแสอากาศที่ไหล
ในอุโมงค์ลมในขณะนั้น เมื่อผนังเราโค้งตาม Streamline การไหลของอากาศก็จะราบเรียบไปตาม
ผนังและไม่สร้างผลกระทบใดๆ ต่อแบบจำลองของเรา ด้วยวิธีการทำให้เราสามารถสร้างแบบ
จำลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในอุโมงค์ลมที่มีขนาดเล็กได้ และสามารถสร้างแบบจำลองที่จำลองการ
ไหลแบบ 3 มิติได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนส่วนทดสอบของอุโมงค์ลมเดิมที่มีอยู่แล้ว ให้ผนังด้าน
บนและด้านล่างสามารถปรับความโค้งได้ ความยาวส่วนทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 1.042 เมตร
ขนาดหน้าตัดการทดสอบเท่าเดิม คือ $30 \times 30 \text{ cm}^2$ ความเร็วลมสูงสุดไม่เกิน 36 m/s การปรับผนัง
ใช้สเต็ปมอเตอร์เพื่อไปขับเคลื่อนกลไก Rack & Pinion ซึ่งควบคุมด้วยวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์ บริเวณ
ผนังด้านบนและด้านล่างจะมีจุดวัดความดันสถิตจำนวน 20 จุด ขณะทำการทดสอบจะทำการปรับ
ผนังจนกว่าความดันทุกจุดจะมีค่าเท่ากัน นั่นคือผนังจะมีรูปทรงเข้ากับ Streamline ของกระแส
อากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองในอุโมงค์ลมขณะนั้น ผลการทดสอบอุโมงค์ลมที่ปรับปรุงแสดงให้เห็นว่า
สามารถจำลองการไหลโดยใช้อุโมงค์ลมขนาดเล็กกับแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2546

ลายมือนักศึกษา ศรัทธา โทธิสว่าง
ลายมืออาจารย์ที่ปรึกษา กนต์ธร ชำนิประศาสน์

**SATTA POSAWARNG: FLEXIBLE WALLED WIND TUNNEL.
THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.CAPT.KONTORN
CHAMNIPRASART, Ph.D. 78 PP. ISBN 974-533-316-6**

**WIND TUNNEL/FLEXIBLE WALL WIND TUNNEL/ADAPTIVE WALL WIND
TUNNEL**

The experiment of flow around a various body are generally use wind tunnel, by making the model and test it for acting force. Because the cost of making a test model is lower than making a prototype. A small size model is difficult to build and may have some difficulty in measuring acting force. However, making a large model will have the wall effect from wind tunnel. Thus for prevent the wind tunnel wall effect, the wind tunnel must have large test section. Disadvantage of the large size wind tunnel is high cost to construct and maintenance.

In a previous time, there are some efforts to construct the adaptive wall wind tunnel by varying the wall shape to align with the streamline of flow pattern. When the wall shape aligns with streamline, air flow will be flat along the wall and make no effect on the model. In this method the bigger model can be allow to test in the small wind tunnel and can give the accurately result of the 3D model testing.

In this research work, the wind tunnel have been changed the test section to be the flexible roof and floor. The length of the test section is increase to 1.042 m while the cross section area is maintain $30 \times 30 \text{ cm}^2$. The maximum wind velocity is not over 36 m/s. The roof and floor can be adapted by using step motors driving rack and pinion mechanism, which are controlled by electronic circuit. There are 20 static pressure tap on roof and floor. During the test, roof and floor will be adapted until all static pressure are equal. That is the wall shapes are align with streamline of the flow in the wind tunnel at that time. Testing data show that the modified wind tunnel gave a good result on large test model.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2003

Student's Signature Satta Posawarnng

Advisor's Signature Kontorn Chamniprasart

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงไปได้ตามจุดมุ่งหมายหากปราศจากกลุ่มบุคคลดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย

รองศาสตราจารย์ น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ อดีตผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ซึ่งสนับสนุนและอนุญาตให้ใช้เครื่องมือ ห้องปฏิบัติการ และอนุมัติงบประมาณ ของศูนย์เครื่องมือฯ ในการทำวิจัยครั้งนี้

นายสาทิพย์ จุไรรัตน์พร หัวหน้าฝ่ายห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และเจ้าหน้าที่ประจำอาคารเครื่องมือ 5 ทุกท่านผู้ซึ่งอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือต่างๆ ที่อยู่ในห้อง

นายคมสัน ภายเดช นายณรงค์ เขียวสูงเนิน และเจ้าหน้าที่ประจำโรงเครื่องมือกล ที่ช่วยการผลิตในส่วนของโครงสร้างหลักที่เป็นโลหะ และอะคลิลิกใส

นายวิชัย ศรีสุรักษ์ อดีตวิศวกรประจำศูนย์เครื่องมือฯ และเจ้าหน้าที่ในงานกลุ่มห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ผู้ซึ่งช่วยในการออกแบบและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ควบคุมสแต็ปมอเตอร์

นายวันชัย หาญณรงค์ นายอภิพล กิ่งมิ่งแฮ และนายคุณากร ขามจะโปะ นักศึกษาปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งช่วยในการสร้างแบบจำลองเพิ่มเติมและช่วยในการทดสอบ

นางสาว โสรฎา แข็งการ และนางสาวจรรวรณ์ ตั้งต้นสกุลวงศ์ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมเครื่องกล ช่วยในการเขียนแบบและช่วยหาข้อมูลเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้

ผู้ทำวิจัยจึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ศรัทธา โพธิสว่าง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.5 โครงสร้างและการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	6
2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ความเป็นมา	8
2.2 ประเภทของอุโมงค์ลม	9
2.3 อุโมงค์ลมชนิดผนังยึดหยุ่น	11
3 การดำเนินการ	15
3.1 คุณสมบัติของอุโมงค์ลมเดิม	15
3.2 การปรับปรุงอุโมงค์ลม	16
3.2.1 โครงสร้างหลัก	18
3.2.2 กลไกการปรับผนัง	18
3.2.3 ผนังด้านบนและด้านล่าง	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4	สตีปมอเตอร์และวงจรควบคุม	21
3.2.5	ชุดวัดความดันบริเวณ.....	22
3.2.6	อุปกรณ์วัดแรงต้านและแรงยก	23
3.3	การสร้างแบบจำลอง	24
3.4	งบประมาณที่ใช้.....	25
3.5	สรุป.....	26
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	27
4.1	การทดสอบ โดยไม่มีแบบจำลอง	27
4.2	การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงกระบอก	28
4.2.1	การทดสอบด้วยทรงกระบอกที่ความเร็วลมต่างกัน เพื่อสังเกตผลกระทบบน	28
4.2.2	การทดสอบด้วยทรงกระบอกที่มีขนาดต่างกัน เพื่อสังเกตผลกระทบบนผนัง	31
4.2.3	การทดสอบด้วยทรงกระบอกที่มีขนาดต่างกัน เพื่อสังเกตผลกระทบรอบ.....	32
4.3	การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน	34
4.3.1	การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบบนผนัง ด้วยปีกเครื่องบินที่มุมปะทะ.....	34
4.3.2	การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบบนปีกเครื่องบิน หลังการปรับความโค้งของ	38
4.4	การทดสอบหาแรงต้านและแรง	40
4.5	สรุป	41
5	สรุปผลการทดสอบ และข้อเสนอแนะ	43
5.1	สรุปผลการวิจัย	43
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย.....	43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ภาพวาดส่วนประกอบต่างๆ ของอุโมงค์ลม	47
ภาคผนวก ข หลักการใช้งานสตีปมอเตอร์	52
ภาคผนวก ค ตารางข้อมูลผลการทดสอบ	57
ภาคผนวก ง ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบ	66
ภาคผนวก จ การไหลผ่านทรงกระบอก	73
ประวัติผู้เขียน	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ก.1	ข้อมูลรูปที่ 4.1 และ 4.2 การทดสอบอุโมงค์โดยไม่มีแบบจำลองที่ความเร็วต่างๆ 58
ก.2	แสดงค่าความดันที่แตกต่างกันแต่ละจุดบนผนังขณะไม่มีแบบจำลอง 58
ก.3	ข้อมูลรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าความดันบนผนัง เมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาด 88 mm 59
ก.4	ข้อมูลรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่าความดันบนผนัง เมื่อทดสอบกับทรงกระบอก ขนาด 88 mm หลังจากนำค่าที่ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณ 59
ก.5	ข้อมูลรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงค่าความดันบนผนังเมื่อทดสอบกับ ทรงกระบอกขนาดต่างๆ ที่ความเร็วลม 17 m/s ก่อนและหลัง จากการนำค่าที่ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่ 60
ก.6	ข้อมูลรูปที่ 4.9 แสดงค่าความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ เมื่อทดสอบที่ความเร็วลม 17 m/s 61
ก.7	ข้อมูลรูปที่ 4.10 แสดงค่าความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ เมื่อทดสอบที่ความเร็วลม 17 m/s 62
ก.8	ข้อมูลรูปที่ 4.11 และ 4.13 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับปีกขนาดเล็ก ที่มีมุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s 63
ก.9	ข้อมูลรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับปีกขนาดใหญ่ ที่มีมุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s 63
ก.10	ข้อมูลรูปที่ 4.14 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดเล็ก ก่อนและหลัง การปรับผนัง ที่มีมุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s 64
ก.11	ข้อมูลรูปที่ 4.15 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดใหญ่ ก่อนและหลัง การปรับผนัง ที่มีมุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s 65
ก.12	ข้อมูลรูปที่ 4.16 แสดงค่าแรงยกและแรงต้านบนปีกขนาดใหญ่ ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มีมุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s 65

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงตำแหน่งของผนังในส่วนทดสอบ..... 2
1.2	แสดงลักษณะของ Steam line ของการไหลรอบทรงกระบอกทาง 2
1.3	แสดงการปรับความโค้งของผนัง..... 3
1.4	แสดงลักษณะของความดันสถิตที่เกิดบนผนังก่อนและหลังการปรับความโค้ง..... 4
1.5	แสดงภาพอุโมงค์ลมก่อนการปรับปรุง 5
1.6	แสดงภาพอุโมงค์ลมหลังการปรับปรุง..... 6
2.1	อุโมงค์ลมชนิดลมดูดและชนิดลมเป่า 10
2.2	อุโมงค์ลมแบบปิด..... 10
2.3	อุโมงค์ลมของสถาบันวิทยาศาสตร์การบินแห่งชาติ ประเทศแคนาดา..... 11
2.4	อุโมงค์ลมของสถาบัน VKI ประเทศเบลเยียม..... 12
3.1	ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม..... 16
3.2	ภาพถ่ายอุโมงค์ลมก่อนถูกปรับปรุง..... 16
3.3	ภาพถ่ายส่วนทดสอบเดิมที่ติดตั้งมากับอุโมงค์ลม..... 17
3.4	ส่วนประกอบต่างๆของส่วนทดสอบที่สร้างขึ้นใหม่ 17
3.5	โครงสร้างหลัก 18
3.6	กลไกปรับผนังด้านบนและด้านล่าง 19
3.7	ผนังด้านบนและด้านล่าง..... 20
3.8	สตีปมอเตอร์ 21
3.9	แผงวงจรควบคุมสตีปมอเตอร์ 20 ตัว..... 22
3.10	ชุดวัดความดันบริเวณผนังด้านบนและด้านล่าง 23
3.11	อุปกรณ์วัดแรงยกและแรงต้านของแบบจำลอง..... 23
3.12	แบบจำลองรูปทรงกระบอก 24
3.13	แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินขนาดความยาวเส้นคอร์ด 155 mm..... 24
3.14	แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินขนาดความยาวเส้นคอร์ด 235 mm..... 25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1	แสดงค่าความดันบนผนังด้านบนขณะที่ไม่มีการไหลที่ความเร็วต่างๆ 27
4.2	แสดงค่าความดันบนผนังด้านล่างขณะที่ไม่มีการไหลที่ความเร็วต่างๆ 28
4.3	แสดงค่าความดันบนผนังด้านบนที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm 29
4.4	แสดงค่าความดันบนผนังด้านล่างที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm 29
4.5	แสดงค่าความดันบนผนังด้านบนที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับ ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm หลังนำค่าที่ ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่ 30
4.6	แสดงค่าความดันบนผนังด้านล่างที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับ ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm หลังนำค่าที่ ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่ 30
4.7	แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่างเมื่อทดสอบกับ ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน 31
4.8	แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่างเมื่อทดสอบกับทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน หลังนำค่าที่ทดสอบ กับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่ 32
4.9	แสดงความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ ก่อนและหลังปรับผนัง 33
4.10	แสดงความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ ในแนวรัศมี ของวงกลมก่อนและหลังการปรับผนัง 34
4.11	แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง ทดสอบกับปีกขนาดเล็ก ที่มุมปะทะต่างๆ 35
4.12	แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับปีกขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s 36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับปีกขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ นำมาแสดงรวมกัน ที่มุมปะทะต่างๆ.....	37
4.14 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดเล็ก ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ.....	39
4.15 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดใหญ่ ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ.....	40
4.16 แสดงค่าแรงยกและแรงต้าน ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ	41
ก.1 ส่วนทางเข้า.....	48
ก.2 มอเตอร์และใบพัด	48
ก.3 ชุดปีกผีเสื้อสำหรับปรับความเร็วลม	48
ก.4 ชุดเก็บเสียงบริเวณทางออก	49
ก.5 โครงสร้างส่วนทดสอบ.....	49
ก.6 ผนังด้านข้างส่วนทดสอบ	50
ก.7 คานยึดผนังด้านบนและด้านล่าง	50
ก.8 สเต็ปมอเตอร์และกลไกขับเคลื่อน	51
ข.1 ส่วนประกอบของสเต็ปมอเตอร์	53
ข.2 สเต็ปมอเตอร์ Unipolar แบบ 8 สาย.....	54
ข.3 สเต็ปมอเตอร์ Unipolar แบบ 6 สาย และ 5 สาย.....	54
ข.4 สเต็ปมอเตอร์ Bipolar แบบอนุกรม	54
ข.5 สเต็ปมอเตอร์ Bipolar แบบขนาน	54
ข.6 จ่ายไฟให้กับสเต็ปมอเตอร์แบบ Full step เฟสเดียว.....	55
ข.7 จ่ายไฟให้กับสเต็ปมอเตอร์แบบ Full step สองเฟส	55
ข.8 จ่ายไฟให้กับสเต็ปมอเตอร์แบบ Half step	56
ง.1 การทดสอบโดยไม่มีแบบจำลอง.....	67
ง.2 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 63 mm	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง.3 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm ที่ความเร็วลม 13.5 m/s.....	68
ง.4 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm ที่ความเร็วลม 17 m/s.....	68
ง.5 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm ที่ความเร็วลม 29.6 m/s.....	69
ง.6 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 114 mm.....	69
ง.7 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดเล็ก ที่มุมปะทะ 0°	70
ง.8 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดเล็ก ที่มุมปะทะ 10°	70
ง.9 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดเล็ก ที่มุมปะทะ 20°	71
ง.10 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะ 0°	71
ง.11 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะ 10°	72
ง.12 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะ 20°	72
จ.1 Streamline ของการไหลแบบ Doublet.....	74
จ.2 Streamline รอบทรงกระบอก.....	74
จ.3 แสดงความดันรอบทรงกระบอกสำหรับการไหลทางอุดมคติ	75

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ρ	=	ความหนาแน่น
P	=	ความดันสถิต
P_0	=	ความดันพลวัต
U	=	ความเร็วระยะอนันต์
ϕ	=	Potential function
ψ	=	Stream function
Re	=	Reynolds number
μ	=	ความหนืดพลศาสตร์

บทที่ 1

บทนำ

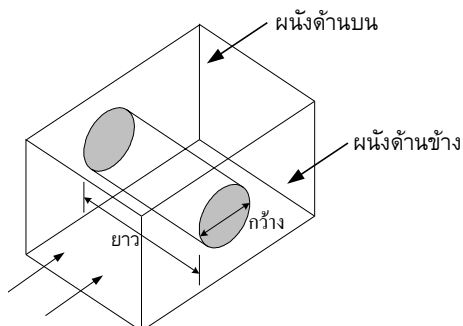
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการทดสอบการไหลของของไหลผ่านรูปทรงต่างๆ โดยทั่วไปแล้วนิยามที่จะใช้อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ในการทดสอบ เพราะการสร้างแบบจำลองขึ้นมาแล้วนำไปทดสอบพฤติกรรมของการไหลที่ไหลผ่านวัตถุ และลักษณะของความเร็วของการไหลที่เกิดขึ้น ล้วนเป็นสิ่งที่วิศวกรต้องการทราบก่อนการสร้างต้นแบบที่มีราคาแพงมากขึ้นมา

แม้ว่าในปัจจุบันมีการใช้คอมพิวเตอร์จำลองลักษณะการไหลผ่านวัตถุต่างๆ มากขึ้น และสามารถให้ความถูกต้องได้ในระดับหนึ่ง แต่การทดสอบด้วยวัตถุจริงก็ไม่ได้ลดความสำคัญลง เพราะโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีพื้นฐานจากสมการคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นภายใต้สมมติฐานต่างๆ เพื่อให้สมการทางคณิตศาสตร์นั้นง่ายขึ้น ซึ่งต่างกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ ดังนั้นในปัจจุบันแม้ว่าการออกแบบเบื้องต้นจะกระทำด้วยคอมพิวเตอร์ก็ยังคงมีความจำเป็นที่จะต้องนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลอง แล้วนำมาทดสอบคุณสมบัติการไหลต่างๆ ในอุโมงค์ลมก่อน เมื่อมีการปรับเปลี่ยนจนเป็นที่พอใจของวิศวกรแล้ว จึงจะนำไปสร้างต้นแบบขนาดจริง เพื่อทำการทดสอบต่อไป

ข้อจำกัดที่สำคัญอย่างหนึ่งในการใช้อุโมงค์ลมเพื่อทดสอบแบบจำลองก็คือคือ ความแม่นยำในการคาดเดาผลกระทบที่เกิดกับแบบจำลองที่วัดได้ว่าจะสามารถที่จะใช้ไปคาดเดาผลที่จะเกิดขึ้นจริงกับวัตถุนั้นเมื่ออยู่ในสภาพสิ่งแวดล้อมที่เป็นจริงได้มากน้อยเท่าใด เพราะแม้ว่าโดยทฤษฎีแล้วหากแบบจำลองและวัตถุจริงที่ได้รับการสร้างให้มีความคล้ายคลึงกันด้านรูปร่าง และการไหลก็จะทำให้มีความคล้ายคลึงกันทางด้านคิเนแมติกส์ แต่ก็ยังมีผลกระทบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ทำให้เกิดผลกระทบต่อแบบจำลองภายใต้สภาพของอุโมงค์ลมที่จะไม่พบในสภาพการทำงานจริง

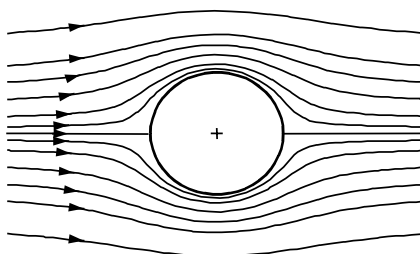
ผลกระทบที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือผลกระทบจากผนังของอุโมงค์ลม (Wall effect) ในการไหลในที่ปิดตัวอย่างเช่นการไหลในอุโมงค์ลม เมื่ออากาศไหลผ่านแบบทดสอบโดยมีผนังอุโมงค์ลมอยู่รอบแบบจำลอง ย่อมส่งผลกระทบต่อเนื่องจากการไหลมาถึงวัตถุไม่มากก็น้อย ซึ่งผลกระทบจากผนังนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ผลกระทบจากผนังด้านข้าง และผลกระทบจากผนังด้านบน ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงตำแหน่งของผนังในส่วนทดสอบ

ในกรณีแรกผนังด้านข้างของอุโมงค์ลม เมื่อมีวัตถุที่เป็นแบบจำลองวางอยู่ ผนังอุโมงค์ลม จะส่งผลกระทบต่ออัตราส่วนความกว้างต่อด้วยความยาวของแบบจำลอง ซึ่งมีวิธีการที่สามารถลดผลกระทบนี้ได้ โดยการสร้างแบบจำลองที่มีความยาวมากกว่าความกว้างมากๆ ประมาณ 1:5 เพื่อลดผลกระทบในด้านขวางของหน้าตัด ซึ่งโดยปกติสามารถทำเช่นนั้นได้ไม่ยากนัก

ส่วนในกรณีที่สองผนังด้านบนและด้านล่างจะส่งผลกระทบต่อ Streamline รอบๆ วัตถุ ถ้าพิจารณาการไหลแบบไม่มีความหนืด (Potential Flow) ผ่านทรงกระบอกเราจะเห็นว่า Streamline จะมีลักษณะดังรูปที่ 1.2

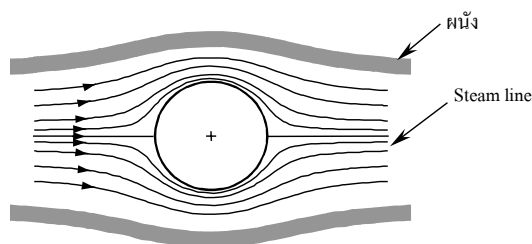


รูปที่ 1.2 แสดงลักษณะของ Streamline ของการไหลรอบทรงกระบอกทางทฤษฎี

การที่จะทำให้เกิดลักษณะของ Streamline ในการทดสอบให้มีลักษณะเหมือนที่เกิดขึ้นในทางทฤษฎีดังที่แสดงในรูปที่ 1.2 ระยะทางทั้งด้านบนและด้านล่างของทรงกระบอกจะต้องห่างจากผนังอุโมงค์ลมพอสมควร เพื่อไม่ให้อากาศที่ไหลผ่านทรงกระบอกได้รับผลกระทบจากการมีผนังรอบทรงกระบอกนั้น เพราะตามทฤษฎีแล้วการไหลในลักษณะเช่นนี้ จะต้องมีความขอบเขตของผนังห่างออกไปในระยะอนันต์ และความเร็วของการไหลจะต้องมีค่าเท่ากับความเร็ว Free stream ดังนั้น

อุโมงค์ลมควรมีหน้าตัดที่กว้างเมื่อเทียบกับขนาดของแบบจำลองที่ใช้ ทำให้แบบจำลองต้องมีขนาดเล็กเทียบกับขนาดของอุโมงค์ลม

อย่างไรก็ตามการใช้แบบจำลองที่มีขนาดเล็กมากก็นั้นอาจมีปัญหาได้เพราะจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการสร้างได้ง่าย และในหลายกรณีค่าของแรงที่กระทำบนวัตถุเล็กๆ จะมีขนาดน้อยมากจนกระทั่งอาจไม่สามารถตรวจจับแรงด้วยเครื่องมือพื้นฐานได้ ดังนั้นในการสร้างอุโมงค์ลมที่ผ่านมาจึงจำเป็นต้องให้อุโมงค์ลมมีขนาดหน้าตัดของส่วนทดสอบใหญ่พอที่จะลดผลกระทบเหล่านี้ได้ ข้อเสียของการสร้างอุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่ก็คือ ต้องใช้วัสดุจำนวนมาก พัดลมที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่ จึงทำให้เกิดความสิ้นเปลืองสูงทั้งในแง่ค่าลงทุนในการสร้าง และค่าบำรุงรักษาในการใช้เครื่องมือเหล่านั้น แต่หากใช้อุโมงค์ลมที่มีขนาดเล็กลงมา ก็จะพบข้อจำกัดของขนาดของแบบจำลองตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

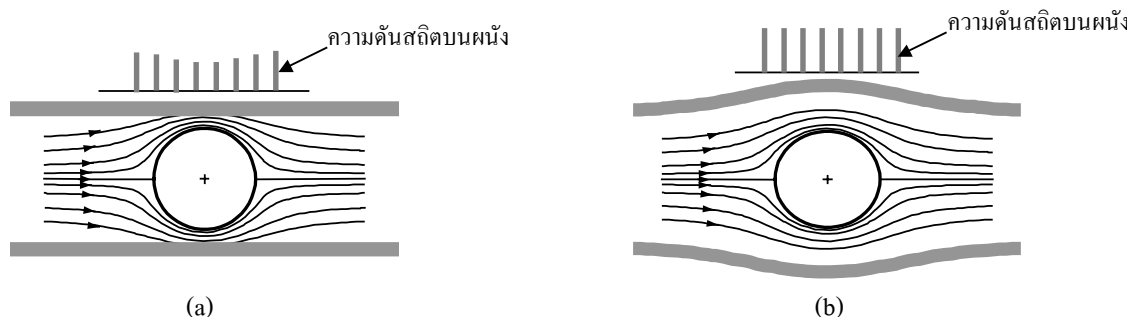


รูปที่ 1.3 แสดงการปรับความโค้งของผนัง

ในช่วงที่ผ่านมาก็ได้มีผู้พยายามสร้างอุโมงค์ลมแบบผนังปรับรูปร่างได้ โดยหลักการก็คือการพยายามปรับรูปร่างของผนังเพื่อจะทำให้ผนังมีลักษณะและรูปทรงเข้ากับ Streamline ของกระแสอากาศที่ไหลในอุโมงค์ลมในขณะนั้น ตัวอย่างเช่น การไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกที่ได้กล่าวถึงมาแล้ว หากมีการปรับลักษณะของผนังให้โค้งตาม Streamline ดังรูปที่ 1.3 ก็จะสามารถลดผลกระทบของผนังลงไปได้เพราะเมื่อผนังเกิดการโค้งตามรูปร่างของ Streamline การไหลของอากาศก็จะราบเรียบไปตามผนังและไม่สร้างผลกระทบใดๆ ต่อแบบจำลองที่อยู่ภายใน ด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถที่จะสร้างแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในอุโมงค์ลมที่มีขนาดเล็กได้ และบางครั้งสามารถสร้างแบบจำลองที่จำลองการไหลแบบ 3 มิติให้มีผลใกล้เคียงกับความเป็นจริงได้มากขึ้นอีกด้วย

การที่จะปรับผนังให้มีลักษณะโค้งตาม Streamline ได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยหลักการทางทฤษฎีมาช่วยในการปรับรูปร่างผนัง โดยหลักการดังกล่าวก็คือว่า ค่าความดันสถิตบน Streamline

เส้นหนึ่งๆ นั้นจะต้องมีค่าคงที่ ดังนั้นการออกแบบอุโมงค์ลมแบบปรับผนังได้นั้นจำเป็นจะต้องมีการวัดความดันสถิตตามทิศทางการไหลของของไหลไปตามผนัง ดังแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงลักษณะของความดันสถิตที่เกิดบนผนังก่อนและหลังการปรับความโค้ง

ในรูป 1.4 (a) เมื่อเรายังไม่มีการปรับเปลี่ยนความโค้งของผนังค่าความดันสถิตที่จุดต่างๆ บนผนังของอุโมงค์ลมจะมีค่าไม่เท่ากัน เพราะเราวัดค่าความดันบน Streamline ต่างเส้นกัน รวมถึงความดันที่วัดได้เป็นค่าที่ได้จากความปั่นป่วนบริเวณผนังอุโมงค์ลมด้วย แต่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความโค้งของผนังอุโมงค์ลมจนค่าความดันสถิตเท่ากันแล้ว รูปทรงของผนังที่ได้รับจะมีความโค้งตามเส้น Streamline ตามต้องการ ดังที่แสดงในรูป 1.4 (b)

ดังนั้นกล่าวโดยสรุปคือ การออกแบบอุโมงค์ลมที่ปรับผนังได้ก็เพื่อสามารถปรับให้ผนังอุโมงค์ลมให้มีรูปร่างที่โค้งมนเข้ากับเส้น Streamline ของกระแสอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองอยู่ในขณะนั้น ในขณะที่ควบคุมรูปทรงของผนังให้เหมือน Streamline นั้นด้วยค่าความดันสถิตบนผนังในทิศทางการไหลของอากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อปรับปรุงอุโมงค์ลมเดิมที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ให้มีความสามารถในการทดสอบกับแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ โดยนำโครงสร้างในช่วงของส่วนทดสอบเดิมออก แล้วนำส่วนทดสอบใหม่ที่สามารถปรับความโค้งของผนังด้านบนและด้านล่างได้มาติดตั้งแทนที่ แต่ขนาดหน้าตัดของส่วนทดสอบยังคงเท่าเดิมคือ 30 cm x 30 cm

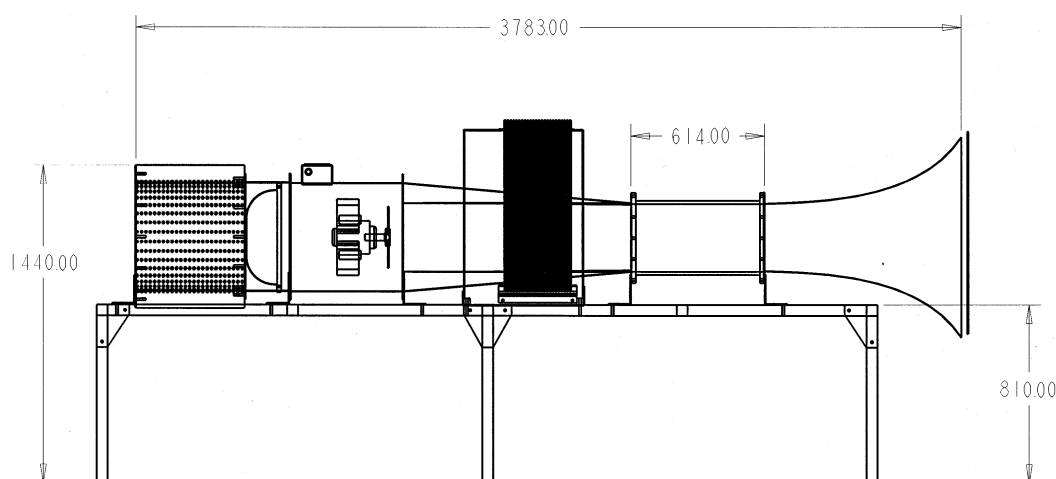
1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของผนังอุโมงค์ลมที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีใช้ภายในห้องปฏิบัติการ โดยการวัดค่าความดันและแรงต้านบนแบบจำลองก่อนและหลังการปรับผนังเพื่อที่จะลดผลกระทบที่เกิดขึ้น ตลอดจนความดันบริเวณผนังด้านบนและด้านล่างขณะทำการทดสอบ

1.2.3 เพื่อศึกษาหลักการทํางาน ข้อดีข้อเสียของสเต็ปมอเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ปัจจุบันนิยมใช้งานกันมากในภาคอุตสาหกรรม โดยนำมาสร้างเป็นกลไกในการปรับความโค้งของผนังอุโมงค์ลม

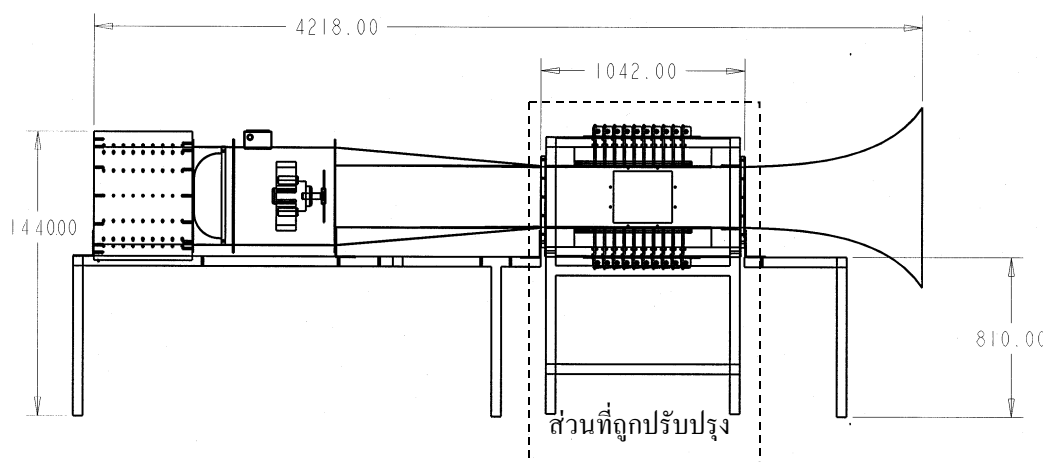
1.2.4 เพื่อให้เกิดความชำนาญ ในการใช้เครื่องจักรกลการผลิต การเลือกวัสดุในการผลิตชิ้นงาน รวมไปถึงการใช้เครื่องมือวัดชนิดต่างๆ จนสามารถออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์อื่นๆ ในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยฯ เพื่อใช้สำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยต่อไปได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ปรับปรุงอุโมงค์ลมที่มีอยู่เดิมให้ส่วนทดสอบสามารถปรับความโค้งของผนังด้านบนและผนังด้านล่างได้ โดยสร้างส่วนทดสอบขึ้นมาใหม่แล้วนำไปแทนที่ ส่วนทดสอบที่มีอยู่เดิม จะได้อุโมงค์ลมที่มีขนาดหน้าตัดส่วนทดสอบทดสอบ 30 cm x 30 cm ความยาวส่วนทดสอบ 1 เมตร ความเร็วลมสูงสุดไม่เกิน 36 m/s ดังรูปที่ 1.6 สามารถควบคุมการหมุนของ Step motor จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปขับเคลื่อนกลไก Rack & Pinion เพื่อปรับความโค้งของผนังด้านบนและด้านล่าง จุดที่ใช้ปรับความโค้งผนังมีจำนวน 10 จุด แต่ละจุดห่างกัน 55 mm การวัดความดันบริเวณผนังและบนแบบจำลองใช้ Manometer แบบน้ำ



รูปที่ 1.5 แสดงภาพอุโมงค์ลมก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 1.6 แสดงภาพอุโมงค์ลมหลังการปรับปรุง

เมื่อทำการปรับปรุงอุโมงค์ลมดังกล่าวแล้ว จะต้องนำมาทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผนัง ก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนัง กับแบบจำลองรูปร่างและขนาดต่างๆ กัน รวมไปถึงผลกระทบของผนังที่มีต่อแบบจำลองต่างๆ ด้วย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อสร้างอุโมงค์ลมที่สามารถทดสอบกับแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิมไว้ใช้ในห้องปฏิบัติการได้ในราคาไม่แพง

1.4.2 สามารถสร้างอุโมงค์ลมขนาดเล็กที่ทดสอบกับแบบจำลองในการไหลแบบ 3 มิติ ได้

1.4.3 สามารถนำเอาสเต็มมอเตอร์ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม มาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทดลองภายในห้องปฏิบัติการได้

1.4.4 ใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาและผลิตอุโมงค์ลมที่มีผนังปรับความโค้งได้สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีได้ต่อไป

1.5 โครงสร้างและการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 5 บท ซึ่งในแต่ละบทมีรายละเอียดดังนี้

1.5.1 บทที่ 1 นำเสนอที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตการทำวิจัย และผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

1.5.2 บทที่ 2 นำเสนอประวัติศาสตร์การสร้าง และวิธีการออกแบบเพื่อสร้างอุโมงค์ลมผนังธรรมดาและอุโมงค์ลมที่สามารถปรับความโค้งของผนังได้ ตลอดจนการวิจัยอื่นๆ ที่ได้เคยมีมา

1.5.3 บทที่ 3 นำเสนอคุณสมบัติของอุโมงค์ลมที่มีอยู่เดิม วิธีการสร้างส่วนประกอบต่างของอุโมงค์ลมที่ปรับผนังได้ หลักในการเลือกวัสดุอุปกรณ์ที่นำมาสร้าง การสร้างแบบจำลอง

1.5.4 บทที่ 4 ได้นำเสนอผลการทดสอบอุโมงค์ลมที่ปรับความโค้งของผนังได้ กับแบบจำลองในลักษณะต่างๆ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นบริเวณผนัง และผลกระทบบนแบบจำลอง

1.5.5 บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัยเพื่อให้เห็นถึงผลดีผลเสียที่เกิดขึ้นในขณะทำการวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนางานวิจัยถัดไปให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ภายในวิทยานิพนธ์ยังประกอบไปด้วยภาคผนวกอีก 5 บท ดังนี้

1.5.6 ภาคผนวก ก แสดงภาพวาดส่วนประกอบต่างๆ ของอุโมงค์ลม โดยละเอียด

1.5.7 ภาคผนวก ข เป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสเต็มมอเตอร์เพื่อให้ทราบถึงหลักการทำงาน และวิธีการควบคุม

1.5.8 ภาคผนวก ค แสดงตารางข้อมูลที่นำมาแสดงเป็นกราฟผลการทดสอบในบทที่ 4

1.5.9 ภาคผนวก ง แสดงภาพถ่ายการทดสอบการใช้งานอุโมงค์ลมกับแบบจำลองในลักษณะต่างๆ

1.5.10 ภาคผนวก จ เป็นการอธิบายทฤษฎีการไหลของอากาศผ่านทรงกระบอก

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมา

การทดสอบทางด้านอากาศพลศาสตร์เริ่มมีพัฒนาการมาตั้งแต่กลางคริสต์ศตวรรษที่ 18 โดยนักคณิตศาสตร์ชาวอังกฤษ เบนจามิน โรบินส์ (Benjamin Robins) ได้นำวัตถุรูปทรงต่างๆ มาติดตั้งไว้ที่ปลายด้านหนึ่งของคาน (Whirling arm) แล้วหมุนเหวี่ยงไปรอบเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงต้านที่เกิดขึ้นกับรูปทรงต่างๆ หลังจากนั้นมาก็ได้มีการพัฒนารูปแบบการทดสอบโดยเพิ่มความยาวของคานและกลไกวัดแรงขึ้น เพื่อให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยก แรงต้าน และความเร็วลม ที่เกิดขึ้นกับรูปทรงที่เกี่ยวข้องกับปีกเครื่องบินมากขึ้น จนกระทั่งปลายคริสต์ศตวรรษที่ 19 เกิดข้อจำกัดในเรื่องความเร็วลมที่ต้องการทดสอบ การติดตั้งเครื่องมือวัดทำได้ยากขึ้น และผลกระทบเนื่องจากความปั่นป่วนของอากาศ จึงได้มีการคิดค้นเทคนิคใหม่โดยการเป่าลมผ่านแบบจำลองที่อยู่กับที่เพื่อกำจัดปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น การออกแบบและสร้างอุโมงค์ลมจึงเกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1871 โดย แฟรงค์ แวนแฮม (Frank H. Wenham) วิศวกรชาวอังกฤษ

อุโมงค์ลมที่สร้างขึ้นในยุคแรกมักมีปัญหาเรื่องความไม่ราบเรียบของอากาศทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการวัดค่าต่างๆ ดังนั้นในเวลาต่อมาจึงได้มีการพัฒนาในส่วนช่องทางเข้าให้มีลักษณะโค้งและลดพื้นที่หน้าตัดของการไหลให้ค่อยๆ เล็กลงก่อนจะถึงบริเวณส่วนทดสอบ ผลที่ได้คือกระแสอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองจะมีความราบเรียบขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้สามารถเพิ่มความเร็วมในการทดสอบได้มากขึ้นอีกด้วย เป็นผลให้มีการใช้อุโมงค์ลมในการทดสอบทางด้านการบินมากขึ้น เช่นสองพี่น้อง ไรท์ (Wright brother) ก็ใช้อุโมงค์ลมในห้องปฏิบัติการของเขาจนนำไปสู่การสร้างเครื่องบินได้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1903 หลังจากนั้นในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 1 ได้มีการพัฒนาทั้งในด้านรูปทรงและขนาดให้ใหญ่มากขึ้นเพื่อนำไปทดสอบกับแบบจำลองที่ใกล้เคียงกับรูปทรงจริง

ในปี ค.ศ. 1908 ได้มีการสร้างอุโมงค์ลมแบบปิด (Closed-circuit tunnel) เป็นครั้งแรกโดย Ludwig Prandtl ซึ่งช่วยการไหลของอากาศยิ่งราบเรียบมากขึ้น ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการทดสอบขึ้นไปอีก หลังจากนั้นมาก็ได้มีความพยายามในการสร้างอุโมงค์ลมที่มีความเร็วมมากขึ้น เพื่อให้การทดสอบให้ใกล้เคียงกับการบินจริง จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1945 ก็สามารถสร้างอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมเทียบเท่าความเร็วเสียง โดย NACA (National Advisory Committee for Aeronautics)

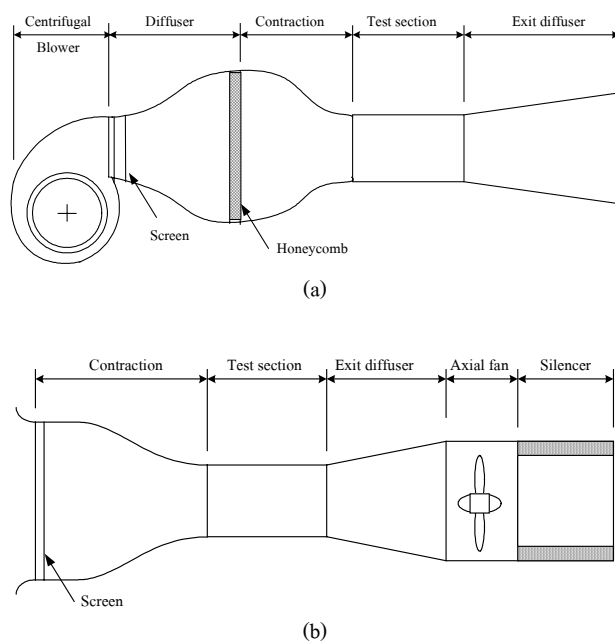
ประเทศสหรัฐอเมริกา พัฒนาการเกี่ยวกับอุโมงค์ลมได้มีมาเรื่อยๆ เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดสอบ เช่น การลดการปั่นป่วนของอากาศภายในส่วนทดสอบที่ความเร็วลมสูง หรือการยึดแบบจำลองอย่างไรเพื่อให้การวัดค่าต่างๆ แม่นยำมากขึ้นและค่าไม่ได้รับผลกระทบจากการติดตั้ง โดยช่วงแรกได้มีการทดลองนำลวดมายึดด้านหน้าแบบจำลองแล้วให้ลมไหลผ่าน แต่ก็ประสบปัญหาการในกรณีที่มีแรงดันจากด้านหลังทำให้แบบจำลองเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ปัจจุบันจึงมักติดยึดแกนแข็งบริเวณด้านหลังของแบบจำลองแทน ซึ่งยังคงได้รับผลกระทบบ้างเล็กน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการติดตั้ง เป็นต้น

2.2 ประเภทของอุโมงค์ลม

ปัจจุบันอุโมงค์ลมถูกใช้ทดสอบกับงานหลากหลายประเภทมากขึ้น นอกจากงานทางด้านอากาศยานแล้ว ยังถูกใช้ในงานออกแบบสิ่งก่อสร้าง เช่น โครงสร้างอาคารที่พักอาศัยและสำนักงานที่มีความสูงมากๆ สะพานที่มีขนาดใหญ่ การออกแบบทางยานยนต์ให้มีรูปทรงที่เหมาะสมกับการใช้งานหรือการแข่งขัน เป็นต้น หากแบ่งอุโมงค์ลมตามความเร็วลมจะสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดคือ อุโมงค์ลมที่ความเร็วลมไม่เกิน 100 m/s หรือ Mach 0.3 (Low speed wind tunnel), อุโมงค์ลมที่ความเร็วลมใกล้เคียงกับความเร็วเสียง (Transonic wind tunnel) และอุโมงค์ลมที่มีความเร็วลมมากกว่าความเร็วเสียง (Supersonic wind tunnel) ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีวิธีการสร้างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมรรถนะที่ต้องการ ขนาดของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ พื้นที่และงบประมาณที่ใช้ในการสร้าง โดยการสร้างแบ่งเป็น 2 ลักษณะคือ อุโมงค์ลมแบบเปิด (Open-circuit tunnel) และอุโมงค์ลมแบบปิด (Closed-circuit tunnel)

2.2.1 อุโมงค์ลมแบบเปิด

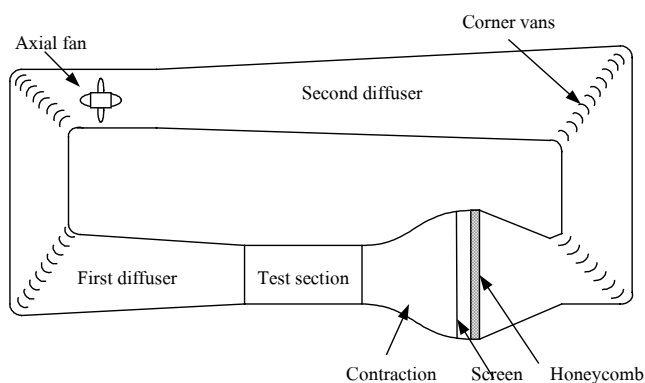
อุโมงค์ลมแบบเปิด คืออุโมงค์ลมที่มีบริเวณส่วนทางเข้าและทางออกของลมเปิดสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งอาจอยู่ภายในหรือภายนอกตัวอาคารที่ใช้ก่อสร้าง มีข้อดีคือ ประหยัดงบประมาณและพื้นที่ในการก่อสร้าง แต่ต้องมีพื้นที่yawมากและบริเวณรอบๆ จะต้องไม่มีลมที่ส่งผลกระทบต่อมายังทางเข้าและทางออกขณะทดสอบได้ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณรอบๆ ก็จะส่งผลถึงการทดสอบทันทีเนื่องจากเป็นระบบเปิด การสร้างอุโมงค์ลมแบบนี้สามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ อุโมงค์ลมชนิดลมเป่า (Blower tunnel) พัดลมจะอยู่บริเวณต้นทางก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ดังรูปที่ 2.1a และอุโมงค์ลมชนิดลมดูด (Suction tunnel) พัดลมจะอยู่บริเวณด้านหลังส่วนทดสอบ ซึ่งมีข้อดีคือ กระแสลมที่เข้ามาหาส่วนทดสอบจะปั่นป่วนน้อยกว่าการนำพัดลมไว้ด้านหน้า ดังรูปที่ 2.1b



รูปที่ 2.1 อุโมงค์ลมชนิดลมดูดและชนิดลมเป่า

2.2.2 อุโมงค์ลมแบบปิด

อุโมงค์ลมแบบปิด เป็นอุโมงค์ลมที่นำเอาลมที่พัดผ่านแบบจำลองในส่วนทดสอบไป แล้ววนกลับมาบริเวณทางเข้าโดยใช้พัดลมตัวเดียว ทำให้ไม่ต้องรับอากาศจากภายนอกเข้ามา กระแสอากาศที่ได้จึงมีความราบเรียบ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการวัดค่าต่างๆ สูงกว่าอุโมงค์ลมแบบเปิดเนื่องจากสามารถควบคุมการไหลของลมที่ไหลกลับมาใหม่ได้ และไม่ได้รับผลกระทบจากอากาศบริเวณรอบๆ อุโมงค์ลมชนิดนี้ยังสามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดสอบได้ แต่การก่อสร้างใช้งบประมาณสูง และต้องมีพื้นที่กว้างในการรองรับโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.2

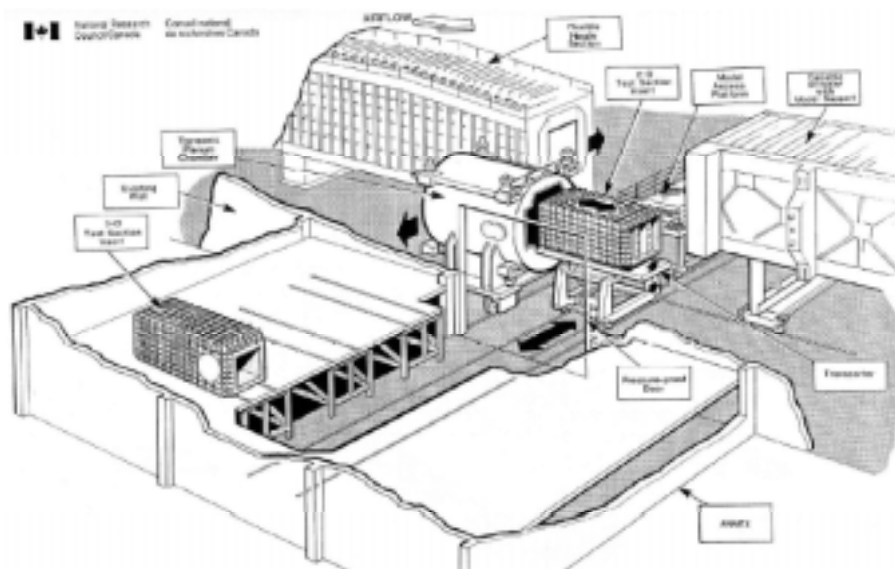


รูปที่ 2.2 อุโมงค์ลมแบบปิด

2.3 อุโมงค์ลมชนิดผนังยืดหยุ่น

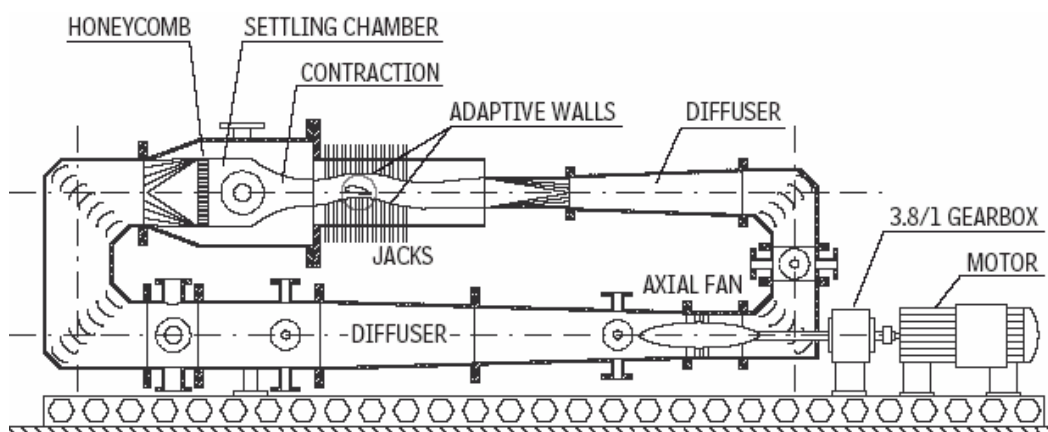
การใช้อุโมงค์ลมทดสอบแบบจำลองรูปทรงต่างๆ ค่าที่ต้องการวัดมักเกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อขนาดของแบบจำลองแตกต่างจากความเป็นจริงมากๆ การเพิ่มขนาดของแบบจำลองให้ใหญ่ขึ้นก็จะต้องเพิ่มขนาดของส่วนทดสอบ และความเร็วลมให้มากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องใช้งบประมาณค่าก่อสร้าง พื้นที่ เครื่องมือวัด และค่าดำเนินการทดสอบมากขึ้น เพื่อให้ขนาดของแบบจำลองเป็นที่ยอมรับกัน ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาการทดสอบยอมให้แบบจำลองขวางการไหลได้ 5%-10% ของพื้นที่การไหลทั้งหมดในส่วนทดสอบ เพื่อให้ผลการทดสอบมีความแม่นยำและไม่ถูกรบกวนจากผนังโดยรอบ

ในช่วงปี ค.ศ. 1950-1970 ได้มีนักวิจัยสนใจที่จะนำเอาเทคนิคการปรับความโค้งของผนังส่วนทดสอบมาใช้แทนการสร้างส่วนทดสอบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อใช้ในการทดสอบกับแบบจำลองเครื่องบินที่ความเร็วลมสูง โดยการสร้างผนังส่วนที่ปรับความโค้งได้นั้นได้มีการออกแบบในหลายลักษณะ เช่น การสร้างผนังที่ปรับได้เฉพาะส่วนทางเข้าเพิ่มเติมก่อนถึงส่วนทดสอบ เพื่อลดความปั่นป่วนของอากาศก่อนประทะกับแบบจำลอง โดยส่วนทดสอบยังคงมีสภาพเหมือนเดิม ดังรูปที่ 2.3 เป็นอุโมงค์ลมของสถาบันวิทยาศาสตร์การบินแห่งชาติ ประเทศแคนาดา (National Aeronautical Establishment, NAE) ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1989 มีความยาวส่วนทดสอบ 1.5 m และมีความเร็วลมสูงสุด 80 m/s



รูปที่ 2.3 อุโมงค์ลมของสถาบันวิทยาศาสตร์การบินแห่งชาติ ประเทศแคนาดา

การสร้างส่วนทดสอบอีกลักษณะหนึ่งคือการสร้างให้ส่วนทดสอบสามารถปรับความโค้งของผนังได้เพื่อให้รูปทรงสอดคล้องกับกระแสอากาศที่ไหลผ่านแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น อุโมงค์ลมที่สถาบัน VKI (Von Karman Institute for Fluid dynamics) ประเทศเบลเยียม เป็นอุโมงค์ลมแบบปิดที่สามารถปรับผนังด้านบนและด้านล่างของส่วนทดสอบได้ ดังรูปที่ 2.4 ผนังเป็นแผ่นเหล็กสามารถโค้งงอได้ ความยาวส่วนทดสอบ 600 mm กว้าง 100 mm สูง 117 mm ความเร็วลมสูงสุด 0.8 Mach มีฉนวนกันความร้อนหนา 5 mm เคลือบอยู่ภายใน สามารถทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 120 K โดยมีการพ่นไนโตรเจนเหลวเข้าสู่ภายในขณะทำการทดสอบ ผลการทดสอบกับแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน NACA 0012 ที่มุมประทะต่างๆ พบว่าการปรับความโค้งของผนังช่วยให้ค่าแรงยกมีความถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 2.4 อุโมงค์ลมของสถาบัน VKI ประเทศเบลเยียม

ในปี ค.ศ. 1990 Edward Brundrett และ Paul Kankainen แห่งมหาวิทยาลัยวอเตอร์ลู ประเทศแคนาดา ได้ปรับปรุงอุโมงค์ลมที่มีอยู่เดิม ซึ่งมีส่วนทดสอบยาว 1,800 mm กว้าง 610 mm และสูง 910 mm มีความเร็วลมสูงสุด 45 m/s โดยเห็นว่าส่วนทดสอบมีขนาดเล็ก จึงทำการสร้างส่วนทดสอบขึ้นมาใหม่ ให้ส่วนทดสอบสามารถปรับความโค้งของผนังด้านบนและผนังด้านล่างได้ ส่วนทดสอบยาวเพิ่มขึ้นเป็น 6,553 mm ผนังด้านบนและด้านล่างสามารถปรับขยายได้ข้างละเท่าๆ กันจนกระทั่งความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 1,620 mm โดยใช้กลไก rack & pinion 48 ชุด บริเวณผนังมีจุดวัดความดันสถิตจำนวน 96 จุด เมื่อทำการทดสอบกับแบบจำลองรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 272 mm โดยอาศัยการปรับความโค้งของผนังทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Drag coefficient, C_D) เป็นที่ยอมรับที่ Reynolds number ต่างๆ ทำให้สามารถนำแบบจำลองอื่นมา

ทดสอบกับอุโมงค์ลมที่ปรับผนังได้นี้ โดยยอมให้แบบจำลองขวางการไหลได้ถึง 30 % (Paul Kankainen, 1994)

หลังจากนั้นมาได้มีวิจัยเพื่อนำอุโมงค์ลมชนิดปรับความโค้งของผนังได้มาใช้ในการทดสอบกับแบบจำลอง 3 มิติ โดย David Sumner ใช้แบบจำลองรูปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 127 mm ติดตั้งบนเครื่องวัดแรงแบบ 6 แกน แล้วนำมาทดสอบกับอุโมงค์ลมที่ปรับผนังได้ของมหาวิทยาลัยวอเทอร์ลู ในการทดสอบจะทำการเคลื่อนแบบจำลองเข้าไปใกล้ๆ ผนังด้านหนึ่งเพื่อศึกษาระยะห่างที่ผนังจะผลกระทบจากผนังมายังแบบจำลอง ผลปรากฏว่า ในช่วง Reynolds number 1.69×10^5 บริเวณที่ผนังไม่ส่งผลกระทบมายังแบบจำลอง ซึ่งยอมให้สามารถใช้ในการทดสอบได้คือ 28 % ของพื้นที่หน้าตัดในส่วนทดสอบ (Sumner, 1996)

อีกงานวิจัยหนึ่งซึ่งทดสอบกับอุโมงค์ลมที่ปรับผนังได้ของมหาวิทยาลัยวอเทอร์ลู ก็คือการทดสอบกับแบบจำลองรูปทรงรถบรรทุก มาตรฐานส่วน 1/16 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ในการทดสอบใช้แบบจำลองที่มีพื้นที่ด้านหน้า (Frontal area) ขนาดต่างๆ และทำมุมเอียงกับทิศทางลมต่างๆ กัน ผลปรากฏว่า แบบจำลองที่มีพื้นที่ด้านหน้า 0.0394 m^2 ทำมุมเอียง 0 องศา กับทิศทาง การไหล ความเร็วลม 40 m/s (Reynolds number 4.38×10^5) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านเท่ากับ 0.873 ก่อนปรับผนัง และหลังจากปรับผนังแล้วมีค่า 0.746 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการไหลทางอุดมคติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.784 แล้วจะเห็นได้ว่าการปรับผนังจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ใกล้เคียงกว่า (Kaiser 1993)

ในด้านอากาศยาน เครื่องบิน X-29 ซึ่งมีปีกคู่ไปด้านหน้า พัฒนาโดยกองทัพอากาศสหรัฐ อเมริกา และองค์การ NASA มหาวิทยาลัยวอเทอร์ลูได้ทำการทดสอบ โดยสร้างแบบจำลองขนาด มาตรฐานส่วน 1/24 ทำการทดสอบที่ Reynolds number 1.85×10^5 เพื่อสังเกตลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ที่เกิดกับเครื่องบินชนิดนี้ว่าจะทำให้เกิดแรงกระทำในทิศทางใด และศึกษาว่าเครื่องบินชนิดนี้มีเสถียรภาพมากน้อยเพียงใดในสภาพการบินที่มุมปะทะต่างๆ โดยการทดสอบก็ได้ นำเทคนิคการปรับความโค้งของผนังมาช่วย ทำให้สามารถกับมุมปะทะถึง 40 องศา (Abramian 1994)

งานในด้านการก่อสร้างที่พักอาศัย มหาวิทยาลัยวอเทอร์ลูได้ใช้อุโมงค์ลมที่ปรับผนังได้นี้วิจัยถึงผลกระทบของกระแสลมในชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีผลต่อตัวอาคารบ้านเรือนและสิ่งปลูกสร้างบริเวณรอบๆ การสร้างแบบจำลองมีหลายขนาด มาตรฐานส่วนตั้ง 1/20 ถึง 1/40 ภายในแบบจำลองถูกเจาะรูเพื่อวัดความดันตามจุดต่างๆ การทดสอบจะให้มีการแสดงผลปะทะตัวอาคารในทิศทางต่างๆ โดยหมุนตัวอาคารไปรอบๆ นอกจากนี้ยังมีการสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อมรอบอาคารที่ต้องการทดสอบ เพื่อให้สภาพอากาศโดยรอบใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง (Handa and Brundrett, 1991)

ในงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวผ่านมานี้ หากอุโมงค์ลมมีขนาดพื้นที่หน้าตัดส่วนทดสอบเล็ก เมื่อมีการนำเอาเทคนิคการปรับผนังมาใช้ จะช่วยทำให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำมากขึ้น โดยไม่ต้องอาศัยอุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิม ซึ่งการใช้เทคนิคการปรับรูปทรงผนังอุโมงค์ลมนี้สามารถสรุปลักษณะเด่นได้ดังนี้ คือ

1. สามารถลดผลกระทบจากผนัง ซึ่งทำให้เกิดการรบกวนกันของกระแสอากาศบริเวณทางเข้า เนื่องจากการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดลงอย่างรวดเร็ว หรือเมื่อเราต้องการเพิ่มความเร็วลมให้มีค่าสูงขึ้นมากๆ
2. ทำให้ไม่ต้องมีอุปกรณ์ลดการกระเพื่อมของอากาศติดตั้งไว้บริเวณทางเข้า
3. ทำให้การไหลของอากาศภายในส่วนทดสอบมีความราบเรียบมากขึ้น เกิดความปั่นป่วนน้อยลง
4. สามารถควบคุมกระแสอากาศที่ไหลภายในส่วนทดสอบได้ตามต้องการ เมื่อแบบจำลองมีรูปทรงและขนาดแตกต่างกันออกไป
5. ลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงาน เนื่องจากไม่ต้องใช้อุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

ในการพิจารณาจัดสร้าง เนื่องจากผู้วิจัยเป็นพนักงานประจำภายในศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จึงได้ปรึกษากับหัวหน้าฝ่ายผู้ดูแลห้องปฏิบัติการเพื่อของบประมาณในการสร้างจากศูนย์เครื่องมือฯ ซึ่งผู้อำนวยการศูนย์เครื่องมือฯ เห็นควรอนุมัติให้ใช้งบประมาณในส่วนของการผลิตและพัฒนาอุปกรณ์ต้นแบบ ประจำปีงบประมาณ 2544 โดยให้นำเอาอุโมงค์ลมที่มีใช้อยู่ภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มาทำการปรับปรุงเฉพาะส่วนทดสอบ จากผนังเดิมที่เป็นผิวเรียบให้สามารถปรับความโค้งของผนังด้านบนและด้านล่างได้

ในการออกแบบได้ใช้คอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งโปรแกรม Pro/Engineer version 2001 ของห้องปฏิบัติการ Computer Aided Design ภายในศูนย์เครื่องมือฯ ช่วยในการออกแบบ

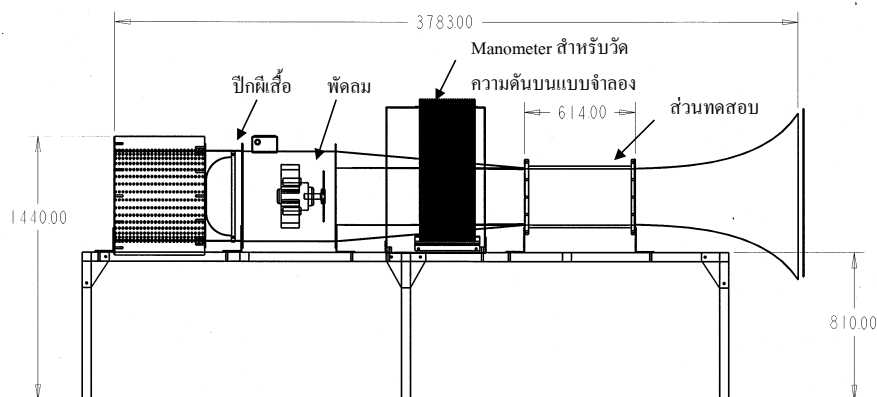
การสร้างในส่วนของโครงสร้างหลักซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุที่เป็นโลหะและแผ่นอะคริลิกใส ได้ขอความอนุเคราะห์ให้งานสร้างและประกอบ ของศูนย์เครื่องมือฯ ให้ช่วยในการกัดขึ้นรูปและเชื่อมต่อชิ้นส่วนต่างๆ

3.1 คุณสมบัติของอุโมงค์ลมเดิม

อุโมงค์ลมเดิมนำมาปรับปรุง ติดตั้งอยู่ภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีคุณสมบัติดังนี้

ผู้ผลิต	บริษัท Plint & Partners Ltd., England
รุ่น	TE54/8418
รูปแบบ	อุโมงค์ลมแบบเปิด ความเร็วลมต่ำกว่าความเร็วเสียง ชนิดลมดูด (พัดลมอยู่หลังส่วนทดสอบ)
ขนาดของส่วนทดสอบ	ขนาดหน้าตัด 300 mm x 300 mm ยาว 600 mm
การควบคุมความเร็ว	ใช้ลิ้นปีกผีเสื้อที่ปลายด้านทางออกซึ่งติดตั้งหลังพัดลม
ความเร็วลมสูงสุด	36 m/s
ขนาดมอเตอร์	380 volt 3 Phase 50 Hz, กำลัง 6.2 kW, ความเร็วรอบ 2,910 rpm

ขนาดทั้งหมด กว้าง 1,100 mm ยาว 3,783 mm สูง 1,440 mm
 อุปกรณ์วัดความเร็ว Pitot Static Tube



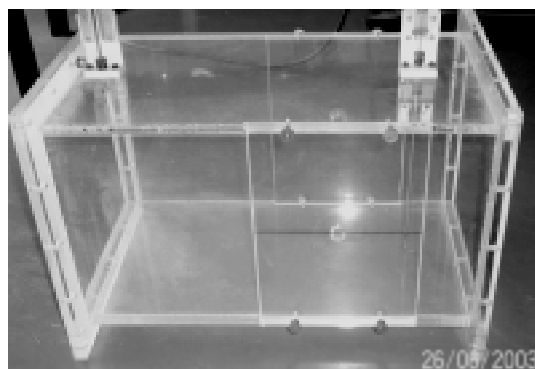
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายอุโมงค์ลมก่อนถูกปรับปรุง

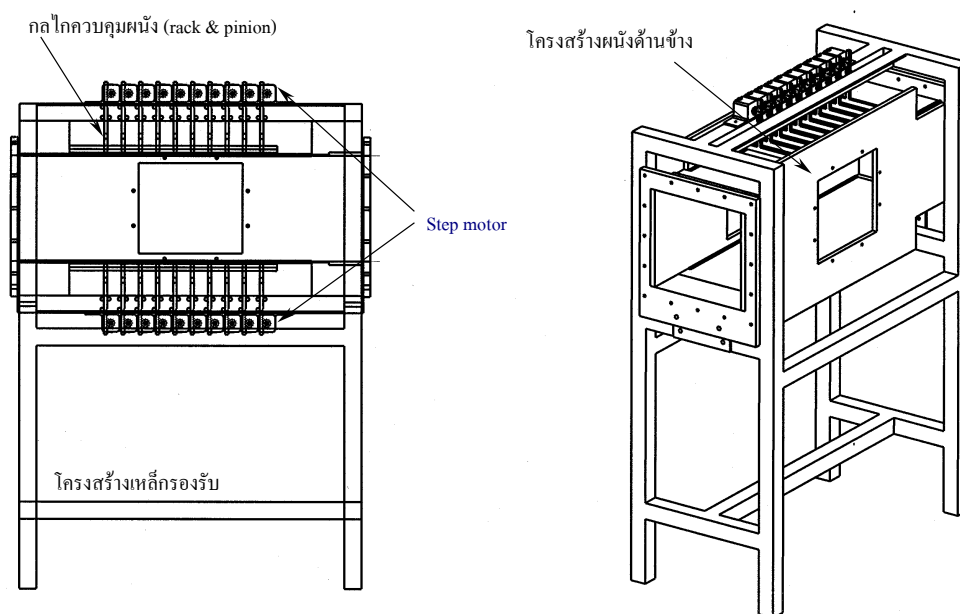
3.2 การปรับปรุงอุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมที่มีอยู่สามารถถอดแยกส่วนประกอบที่เป็นส่วนทดสอบออกมาได้ ดังนั้นจึงถูกนำเอาส่วนทดสอบเดิมแยกออกมาเก็บไว้ (แสดงในรูป 3.3) แล้วทำการสร้างส่วนทดสอบที่สามารถปรับความโค้งของผนังได้ขึ้นมาใหม่ให้สามารถนำไปประกอบเข้ากับโครงสร้างหลักของอุโมงค์ลมที่มีอยู่เดิมได้ และเมื่อต้องการใช้ส่วนทดสอบแบบเดิมก็สามารถนำกลับไปประกอบเข้าใหม่ให้ใช้งานได้เหมือนเดิม เพื่อให้อุโมงค์ลมยังคงสามารถใช้ในการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการได้ตามปกติ และเมื่อต้องการทำงานวิจัยด้านอื่นก็สามารถนำส่วนที่ได้รับการปรับปรุงติดตั้งเข้าไปได้



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายส่วนทดสอบเดิมที่ติดตั้งมากับอุโมงค์ลม

ส่วนทดสอบที่สร้างขึ้นใหม่มีขนาดหน้าตัดเท่าเดิมแต่เนื่องจากจะสามารถปรับรูปทรงผนังได้จึงจำเป็นต้องมีการเพิ่มความยาวขึ้นเพื่อรองรับการโค้งมนที่จะเกิดขึ้น จึงทำให้ความยาวนี้เพิ่มขึ้นกว่าเดิมอีก 426 mm ผนังด้านบนและด้านล่างสามารถปรับความโค้งได้ (แสดงในรูป 3.4) ในการปรับผนังใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปควบคุมการหมุนสเต็ปมอเตอร์ไปขับเคลื่อนเพื่องเพื่อปรับระดับของผนัง โดยดูจากค่าความดันที่ผนังแต่ละจุด จนกระทั่งความดันที่ผนังบนและล่างทุกจุดมีค่าเท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากำลังวัดความดันบน Streamline เส้นเดียวกัน สำหรับส่วนประกอบต่างๆ ของอุโมงค์ลมในส่วนที่มีการปรับปรุงแก้ไข ดังนี้

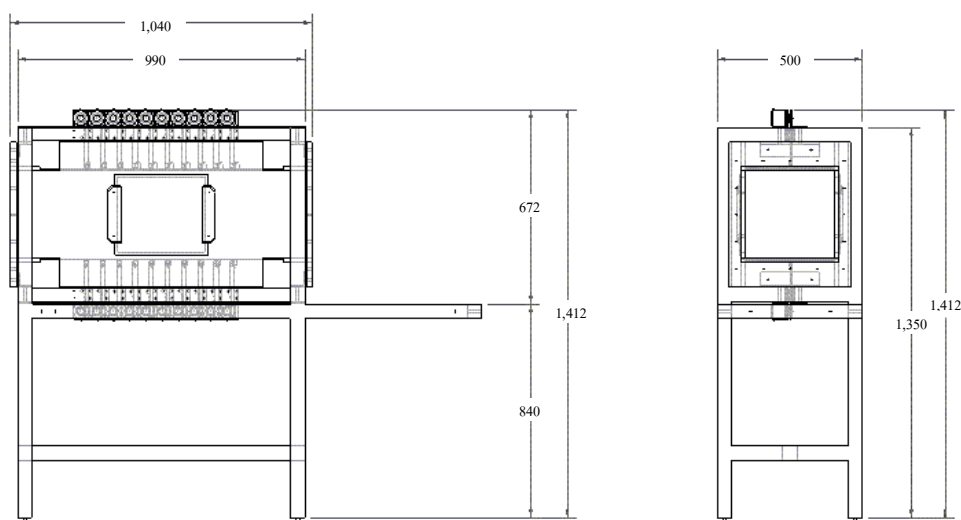


รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบต่างๆของส่วนทดสอบที่สร้างขึ้นใหม่

3.2.1 โครงสร้างหลัก

การสร้างความทดสอบขึ้นมาใหม่นั้นจะต้องสามารถนำไปประกอบกับโครงสร้างอุโมงค์ลมเดิมที่มีอยู่ได้ ความยาวในส่วนนี้จะต้องมากกว่าเดิม เพื่อให้มีระยะพอที่จะทำให้สามารถปรับความโค้งของผนังได้หลายตำแหน่ง แต่ต้องไม่ยาวมากเกินไปเนื่องจากมีข้อจำกัดด้านสถานที่ในการติดตั้ง ผนังด้านข้างจะต้องเป็นผนังใสสามารถมองเห็นผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่นำมาทดสอบได้ และต้องคำนึงถึงความแข็งแรงเนื่องจากโครงสร้างต้องรองรับอุปกรณ์หลายอย่าง เช่น ผนังโดยรอบ สเต็ปมอเตอร์ ชุดวัดแรงยกและแรงต้าน ชุดวัดความดัน รวมไปถึงแบบจำลองด้วย

โครงสร้างส่วนทดสอบใหม่มีความยาว 1,042 mm เพิ่มขึ้นจากเดิม 426 mm ผนังด้านข้างส่วนทดสอบสร้างจากแผ่นพลาสติกแข็งใส (อะคริลิกใส) หนา 15 mm เชื่อมต่อกันแล้วจะเป็นช่องทั้งสองด้านสำหรับนำแบบจำลองเข้าไปติดตั้ง โครงสร้างรองรับทำด้วยเหล็กกล่อง ขนาด 50 mm x 50 mm หนา 1.5 mm เชื่อมต่อกัน ขาตั้งทั้งหมดมีเกลียวสามารถปรับระดับความสูงได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 โครงสร้างหลัก

3.2.2 กลไกปรับผนัง

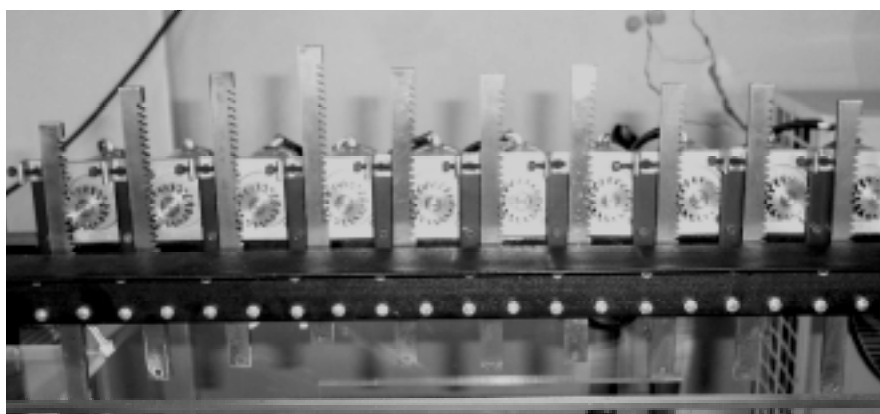
ในการสร้างกลไกปรับผนังระยะห่างระหว่างจุดที่จะใช้ปรับที่คตินั้นจะต้องมีระยะห่างให้น้อยที่สุด เพื่อที่จะสามารถปรับความโค้งของผนังได้รูปร่างที่ใกล้เคียงกับ Streamline ของอากาศในขณะที่ไหลผ่านแบบจำลองในอุโมงค์ลมขณะนั้นได้ ซึ่งระยะในการปรับผนังที่ห่างกันไม่

มากนักทำให้ ลักษณะกลไกจะต้องมีขนาดกะทัดรัดไม่ซับซ้อนมากและสามารถติดตั้งได้ในพื้นที่จำกัด ให้แรงและระยะทางในการขับเคลื่อนเพียงพอที่จะสามารถปรับผนังให้โค้งงอได้

เนื่องจากระยะห่างระหว่างจุดปรับความโค้งต้องไม่มากเกินไป แต่ก็จะต้องมีระยะห่างเพียงพอที่จะใส่ส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุมได้ ดังนั้นจึงต้องให้ระยะห่างเท่ากับความกว้างของสเต็ปมอเตอร์ที่จะใช้ในงานนี้ โดยเมื่อนำสเต็ปมอเตอร์มาเรียงชิดกันแล้ววัดระยะห่าง จะได้ระยะห่างระหว่างจุดที่จะทำการปรับความโค้งของอุโมงค์ลมได้เท่ากับ 55 mm และจากการประมาณการว่าจุดปรับระยะที่เหมาะสมควรมีจำนวน 10 จุด ทั้งผนังด้านบนและด้านล่าง และเมื่อรวมกับระยะช่วงทางเข้าและทางออก ทำให้ระยะรวมในส่วนที่ปรับผนังได้ทั้งหมด 495 mm และจะมีระยะบริเวณก่อนและหลังจุดปรับไว้เท่ากัน

ชุดกลไกที่ใช้ปรับความโค้งของผนังอุโมงค์ลมจะใช้เฟืองตรงขนาดเล็กไปขับเฟืองสะพาน (Rack & Pinion) ดังรูปที่ 3.6 ในการออกแบบได้กำหนดให้เฟืองสะพานแต่ละตัวสามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้ระยะทางจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุดเป็นระยะ 100 mm แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่างระยะทางในแนวตั้งของจุดปรับ 2 จุดที่อยู่ติดกันจะถูกจำกัดด้วยผิวของผนัง ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะปรับผนังให้มีความโค้งแตกต่างกันมากได้ แต่จะเป็นการค่อยๆปรับเพิ่มรัศมีความโค้งในแต่ละจุดเพื่อให้ได้ Streamline ตามต้องการ

ดังนั้นการปรับผนังจึงต้องค่อยๆ ปรับ ทีละจุด แล้วจากนั้นจึงปรับจุดต่อไป และเมื่อสังเกตจากมานอมิเตอร์ เพื่อวัดความดันก็มีความจำเป็นที่จะต้องกลับมาปรับจุดแรกอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้ค่าความดันสถิตที่เท่ากันตลอดทั้งแนวผนัง สำหรับรายละเอียดการปรับผนังจะกล่าวถึงต่อไป



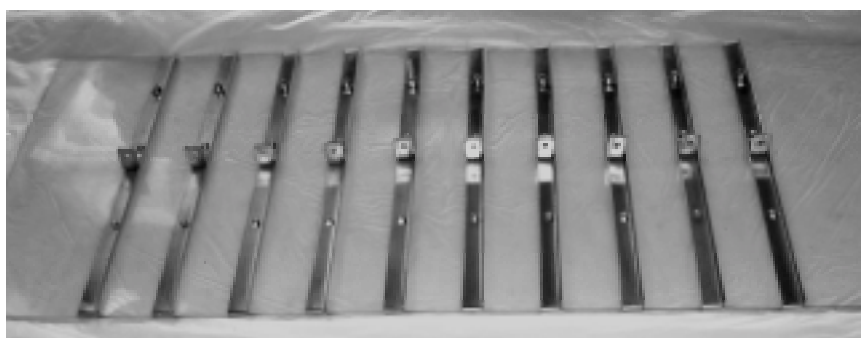
รูปที่ 3.6 กลไกปรับผนังด้านบนและด้านล่าง

3.2.3 ผนังด้านบนและด้านล่าง

ในการเลือกใช้วัสดุที่จะนำมาใช้ทำผนังที่สามารถโค้งงอได้นั้น วัสดุที่ใช้จะต้องไม่อ่อนหรือแข็งจนเกินไป เพราะหากถ้าวัสดุอ่อนตัวเกินไปเมื่อทำการทดสอบผนังจะเกิดการกระพือเนื่องจากไม่สามารถที่จะทนต่อแรงที่เกิดจากความแตกต่างความดันภายในอุโมงค์ลมและนอกอุโมงค์ลมได้ โดยเฉพาะในกรณีที่มีความเร็วในอุโมงค์ลมมีค่าสูง อันเป็นสาเหตุให้ผนังอุโมงค์ลมเป็นรูปคลื่นและเสียรูปทรงไปเป็นเหตุให้ไม่สามารถทำการวัดค่าต่างๆ ได้อย่างถูกต้องหรือผนังอาจเสียหายได้

อีกกรณีหนึ่งคือ ถ้าหากวัสดุแข็งจนเกินไป ก็จะทำให้ใช้แรงในการปรับความโค้งมาก กลไกการขับเคลื่อนก็จะต้องมีกำลังมาก อีกทั้งระยะห่างระหว่างจุดที่จะปรับผนังก็จะต้องมากขึ้นด้วย ทำให้ไม่สามารถปรับความโค้งให้ตรงกับรูปทรงที่ต้องการได้

ในงานวิจัยนี้ได้ตัดสินใจเลือกวัสดุที่ใช้ทำผนังด้านบนและด้านล่างจากแผ่นพลาสติกใสชนิดที่อ่อนตัวได้ หนา 3 mm และเพื่อเสริมความแข็งแรงได้ติดตั้งคานที่ทำจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ระยะห่างกัน 55 mm จำนวน 10 อัน เพื่อเสริมความแข็งแรงและเป็นจุดเชื่อมต่อกับชุดกลไกขับเคลื่อนไปยังสแตปมอเตอร์ ดังแสดงในรูป 3.7 หลังจากนั้นแต่ละจุดจะเจาะรูแล้วต่อท่อเข้าไปยังமானอมิเตอร์ เพื่อใช้ในการวัดความดันสถิตที่บริเวณผิวด้านในของอุโมงค์ลม สำหรับส่วนที่เป็นขอบติดกับผนังด้านข้างที่ปรับไม่ได้จะใช้ซิลิโคนแผ่น หนา 1 mm ติดเป็นแนวตามความยาวเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วซึมของอากาศในขณะที่ทำการทดสอบ นอกเหนือจากนั้นเมื่อมีการปรับความโค้งของผนังจะมีการออกแบบให้บริเวณปลายทั้งสองข้างสามารถเคลื่อนตัวได้



รูปที่ 3.7 ผนังด้านบนและด้านล่าง

3.2.4 สเต็ปมอเตอร์และวงจรควบคุม

การเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับขับเคลื่อนกลไกปรับผนังนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์ที่ให้แรงมากพอที่จะดึงผนังทั้งด้านบนและด้านล่างให้สามารถเปลี่ยนระดับความโค้งได้ การควบคุมการเคลื่อนที่ที่จะต้องทำได้ละเอียดและแม่นยำ นอกจากนั้นอุปกรณ์ยังต้องสามารถทำงานได้เป็นอิสระต่อกัน และเมื่อทำการทดสอบจะต้องคงรักษาสภาพหยุดนิ่งเอาไว้ได้ จากอุปกรณ์ขับเคลื่อนจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้งทางกลและทางไฟฟ้าที่มีอยู่ทั่วไปเมื่อทำการพิจารณาจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วพบว่า การเลือกใช้งานสเต็ปมอเตอร์มีความเหมาะสมกับความต้องการดังกล่าวมากกว่าอุปกรณ์พื้นฐานอื่นๆ

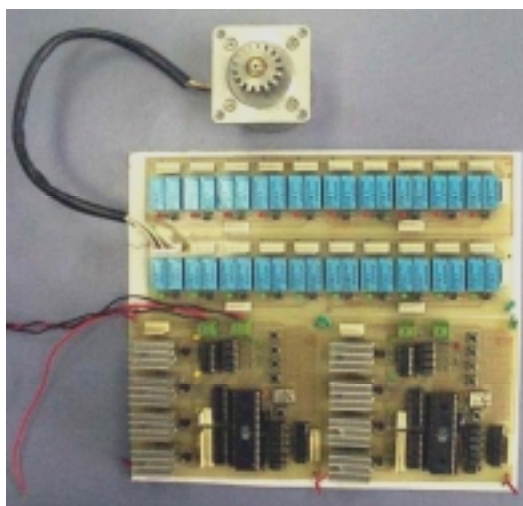
สเต็ปมอเตอร์ที่เลือกใช้เป็นชนิด Unipolar แบบสายไฟ 6 เส้น ใช้ไฟกระแสตรง 3.9 V กระแสไฟสูงสุด 1.3 A ความละเอียดในการหมุน 1.8 องศาต่อหนึ่งสเต็ป มีขนาดเล็กกะทัดรัด ราคาไม่แพงมาก หาซื้อได้ภายในประเทศ (แสดงในรูป 3.8) และวงจรที่ใช้ในการขับเคลื่อนสามารถสร้างขึ้นเองได้



รูปที่ 3.8 สเต็ปมอเตอร์

ลักษณะของวงจรที่ใช้ขับเคลื่อนใช้การควบคุมแบบ Full step เนื่องจากไม่ต้องการความละเอียดในการหมุนมาก อีกทั้งใช้กระแสไฟในการขับเคลื่อนน้อยและมีวงจรควบคุมที่สร้างขึ้นได้ง่าย วงจรที่สร้างขึ้นหนึ่งชุดสามารถใช้กับสเต็ปมอเตอร์ได้จำนวน 10 ตัว แต่จะสามารถสั่งให้มอเตอร์ทำงานได้ครั้งละหนึ่งตัว โดยมีปุ่มสำหรับเลือกว่าจะควบคุมมอเตอร์ตัวใด วงจรที่สร้างขึ้นแสดงในรูป 3.9 ในขณะที่สั่งงานให้มอเตอร์ตัวหนึ่งทำงานมอเตอร์ที่เหลือทั้งหมดจะถูกจ่ายไฟเลี้ยงไว้เพื่อไม่ให้เกิดการหมุนอย่างอิสระป้องกันการคืนตัวของผนัง การหมุนของมอเตอร์จะมีปุ่มควบ

คุม 2 ปุ่มใช้ในการเลือกสำหรับสั่งให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาซึ่งจะเป็นการปรับให้ผนังเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงนั่นเอง แหล่งจ่ายไฟแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ไฟ 5 VDC สำหรับจ่ายให้กับวงจรควบคุมการหมุนและวงจร และไฟ 3.9 VDC ซึ่งต้องใช้กระแสไฟมากจ่ายผ่านรีเลย์ไปให้สเต็ปมอเตอร์ทำงาน



รูปที่ 3.9 แผงวงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์ 20 ตัว

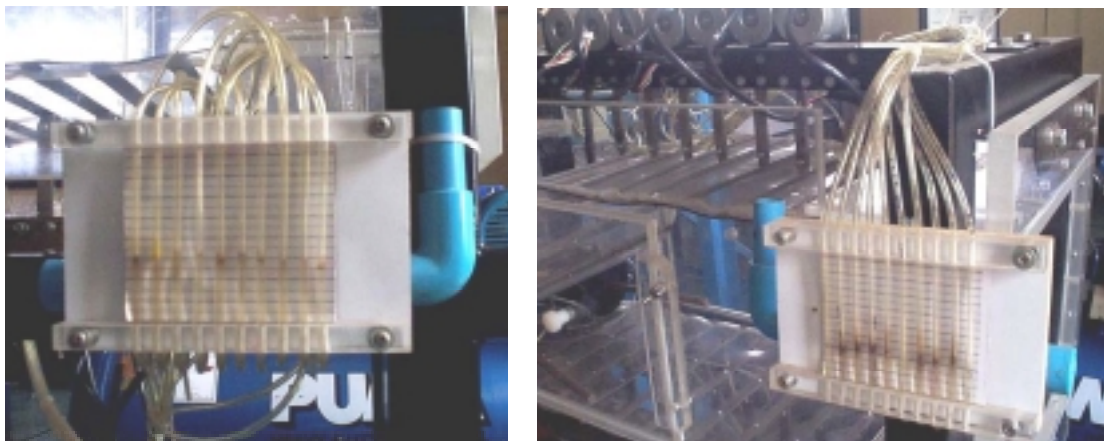
3.2.5 ชุดวัดความดันบริเวณผนัง

ความดันที่ต้องการวัดบนผนังเป็นความดันสถิต (Static Pressure) เมื่อมีอากาศไหลผ่านผนังด้านในอุโมงค์ลมก็จะทำให้ผนังด้านในเกิดมีความดันที่ต่ำกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้วัดความดันจะต้องสามารถวัดค่าความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศได้ เนื่องจากจุดที่ต้องการวัดความดันทั้งผนังด้านบนและด้านล่างมีจำนวนถึง 20 จุด การเลือกใช้ Manometer ชนิดน้ำจึงเป็นสิ่งที่เหมาะสมเพราะประหยัด ไม่ต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์มาควบคุม สามารถแสดงค่าความดันที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ชัดเจนในเวลาเดียวกัน

การสร้างมานอมิเตอร์ แบ่งออกเป็น 2 ชุด โดยใช้ท่อขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอก 4 mm เชื่อมต่อจากผนังด้านบนที่เจาะรูไว้ไปยัง Manometer รวมกันจำนวน 10 จุด และผนังด้านล่างอีก 10 จุด แล้วติดตั้งบริเวณด้านข้างของส่วนทดสอบ เพื่อให้สามารถมองเห็นได้ง่ายขณะที่ทำการปรับความโค้งของผนัง ดังรูปที่ 3.10

ในการออกแบบและสร้างมานอมิเตอร์จะต้องคำนึงถึงการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้น ซึ่งแต่ละจุดจะต้องทำให้เกิดความสูญเสียความดันที่เท่ากันหรือเกิดความแตกต่างกันให้น้อยที่สุด เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดน้อยที่สุด ดังนั้นการออกแบบจึงไม่ใช่ท่อที่เล็กกว่านี้ และ

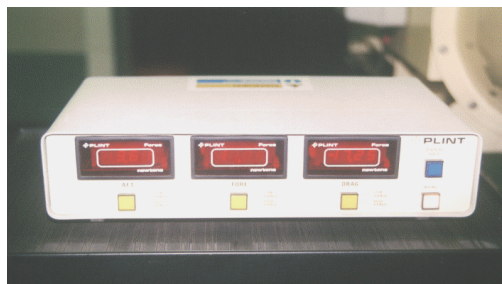
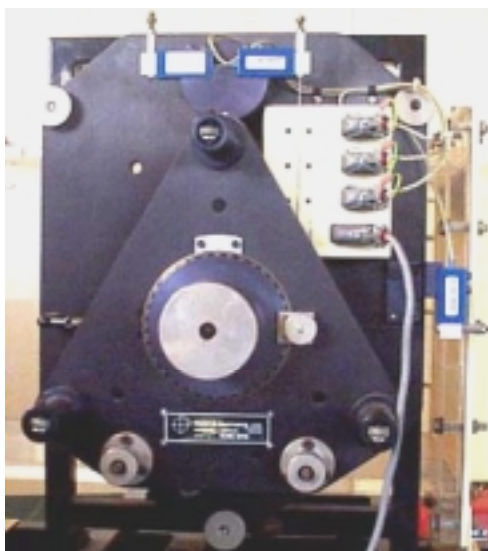
เพื่อลดผลกระทบของความถี่ธรรมชาติของอุปกรณ์การวัด ซึ่งอาจมีผลในการวัดขณะที่กระแสอากาศมีความถี่อยู่ค่าหนึ่ง จึงไม่ควรเลือกमानอมิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่มากนัก



รูปที่ 3.10 ชุดวัดความดันบริเวณผนังด้านบนและด้านล่าง

3.2.6 อุปกรณ์วัดแรงต้านและแรงยก

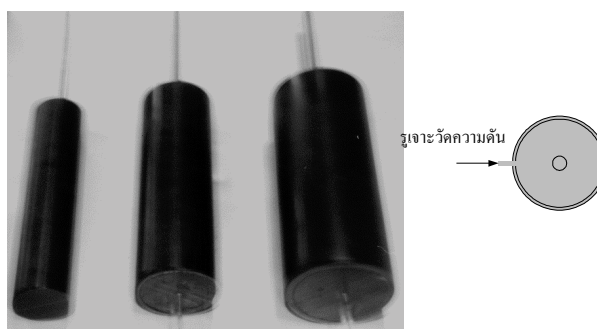
อุปกรณ์ชุดนี้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กับอุโมงค์ลมเดิม เมื่อนำแบบจำลองมาติดตั้งสามารถปรับมุมปะทะของแบบจำลองได้ 360 องศา เพื่อวัดแรงยก (Lift Force) และแรงต้าน (Drag Force)



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์วัดแรงยกและแรงต้านของแบบจำลอง

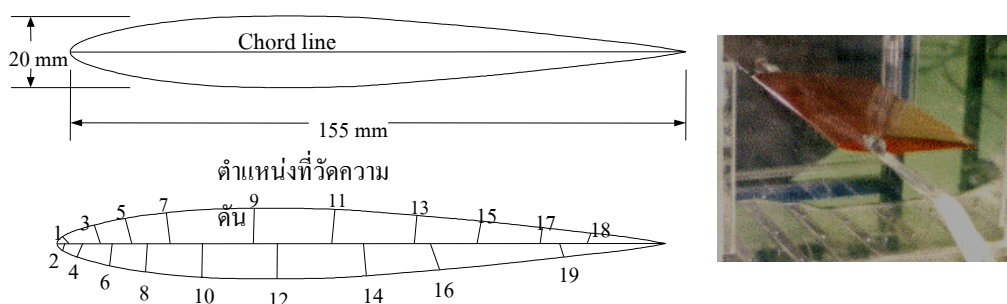
3.3 การสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองที่จะนำมาทดสอบต้องสามารถคาดเดาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นได้ และสามารถนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกันทั้งก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนังได้ แบบจำลองที่มีรูปร่างง่ายต่อการคาดเดาใน 2 มิติแบบหนึ่งคือ รูปวงกลม ดังนั้นจึงได้ทำการเลือกทรงกระบอกขึ้นมา 3 ขนาด โดยใช้ทรงกระบอกที่มีอยู่เดิมที่ใช้กับอุโมงค์ลมชุดเดิม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 mm ถือเป็นรูปทรงขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ได้ทำการออกแบบและสร้างใหม่ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm และ 114 mm ตามลำดับ ทรงกระบอกทั้งสาม และได้รับการเจาะรูขนาด 1.5 mm เพื่อวัดความดันสถิตที่เกิดขึ้นบนผิวทรงกระบอก โดยการต่อท่อไปยังมัลติมิเตอร์สำหรับวัดความดันสถิตที่บริเวณผิวขณะทำการทดสอบ รูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นทรงกระบอกทั้ง 3 ขนาด



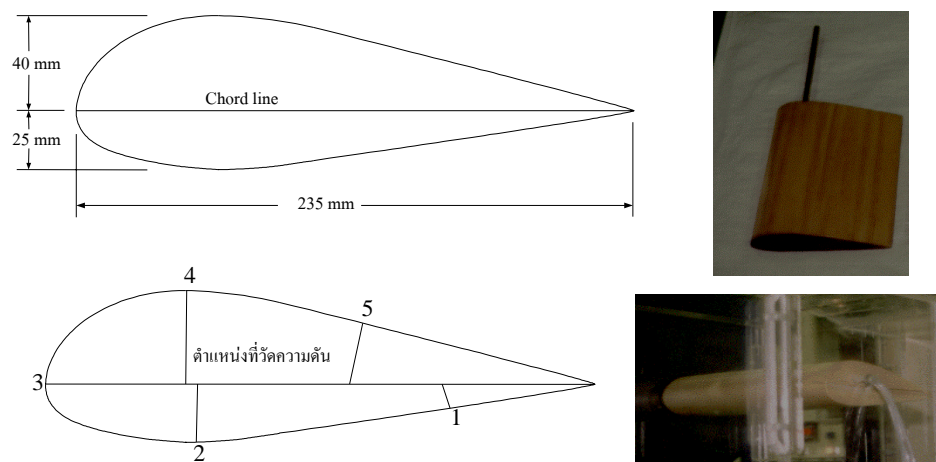
รูปที่ 3.12 แบบจำลองรูปทรงกระบอก

แบบจำลองที่นิยมนำมาทดสอบอีกแบบหนึ่งคือ รูปทรงปีกเครื่องบิน (Airfoil) ขนาดต่างๆ โดยใช้ปีกเดิมที่มีอยู่ รูปทรงสมมาตร (Symmetrical) ขนาดความยาวเส้นคอร์ด 155 mm สามารถวัดความดันบริเวณผิวได้ 19 จุด ดังรูปที่ 3.13 และในงานวิจัยนี้ได้มีการสร้างขึ้นใหม่อีกหนึ่งให้มีขนาดความยาวเส้นคอร์ด 235 mm สามารถวัดความดันบริเวณผิวได้ 5 จุด ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินขนาดความยาวเส้นคอร์ด 155 mm

จุดประสงค์ของการใช้แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินมาทดสอบเพื่อใช้ดูผลกระทบที่เกิดขึ้นบนผนังและผลกระทบบริเวณผิว เมื่อแบบจำลองมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็นหลัก และการสร้างไม่ได้คำนึงถึงค่าของแรงต้านและแรงยกที่เกิดกับรูปทรงเพราะไม่ใช่จุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.14 แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินขนาดความยาวเส้นคอร์ด 235 mm

3.4 งบประมาณที่ใช้

การปรับปรุงอุโมงค์ลมนี้เป็นส่วนหนึ่งในงานพัฒนาและผลิตอุปกรณ์ต้นแบบสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล ดังนั้นงบประมาณส่วนใหญ่ที่ใช้ในการสร้างได้รับการจัดสรรจากศูนย์เครื่องมือฯ วัสดุบางอย่างที่ใช้จำนวนไม่มากก็ใช้ของที่มีเหลืออยู่ภายในศูนย์เครื่องมือฯ เช่น แผ่น เหล็ก, น็อตยี่ห้อต่างๆ เป็นต้น ส่วนวัสดุที่จัดซื้อมา เช่น แผ่นอะคริลิกใส และเหล็กที่ใช้ไม่หมดก็สามารถใช้สำหรับงานอื่นภายในศูนย์เครื่องมือฯ ต่อไปได้อีก งบประมาณที่ใช้สามารถแสดงราคาเฉพาะรายการหลักได้ดังนี้

เหล็กโครงสร้าง	2,500 บาท
แผ่นอะคริลิกใสหนา 15, 20 mm	18,000 บาท
แผ่นพลาสติกใสชนิดที่อ่อนตัวได้	1,500 บาท
สตั๊ปมอเตอร์ 20 ตัว	15,000 บาท
วงจรอิเล็กทรอนิกส์	4,000 บาท
เฟืองตรงและเฟืองสะพาน 20 ชุด	4,400 บาท
สายยางและสายไฟ	1,200 บาท
รวม	<u>46,600 บาท</u>

ราคาวัสดุและอุปกรณ์เหล่านี้เป็นราคาประมาณ โดยคร่าวๆ และเป็นราคาประมาณการเมื่อปี พ.ศ. 2543 ปัจจุบันราคาจะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงในบางรายการ เช่น สเต็ปมอเตอร์ ราคาจะลดลงกว่าเดิมมาก และปัจจุบันหาซื้อง่ายขึ้น เพราะเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น เป็นต้น หากจะคิดเป็นต้นทุนการผลิตต่อเครื่องที่แท้จริงนั้นจะต้องนำค่าแรงงานที่ใช้ ค่าการสึกหรอของเครื่องจักรต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแต่ละชิ้น และอื่นๆ มาคำนวณรวมให้ละเอียดขึ้น

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวิธีดำเนินการ แนวความคิดในการออกแบบและปรับปรุงอุโมงค์ลมในส่วนต่างๆ และแหล่งที่มาของงบประมาณในการสร้าง โดยรายละเอียดจะแสดงเฉพาะส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ส่วนรายละเอียดชิ้นส่วนต่างๆ จะนำเสนอไว้ในภาคผนวก

เนื้อหาในแต่ละส่วนจะชี้ให้เห็นถึงหลักการเพื่อใช้พิจารณาการเลือกวัสดุและอุปกรณ์มาสร้างเป็นส่วนประกอบต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับความยากง่ายในการค้นหาวัสดุที่เหมาะสม ความยากง่ายในการสร้าง ความยากง่ายในการควบคุมขณะทำการทดสอบ และเงินงบประมาณในการสร้าง ซึ่งเป็นเพียงแนวทางหนึ่งเท่านั้นในการตัดสินใจ และหากต่อไปในอนาคตสามารถเลือกหาวัสดุได้ง่ายขึ้น ราคาถูกลง การสร้างส่วนต่างๆ ก็สามารถพัฒนาให้ทำงานดีขึ้นกว่าในปัจจุบัน

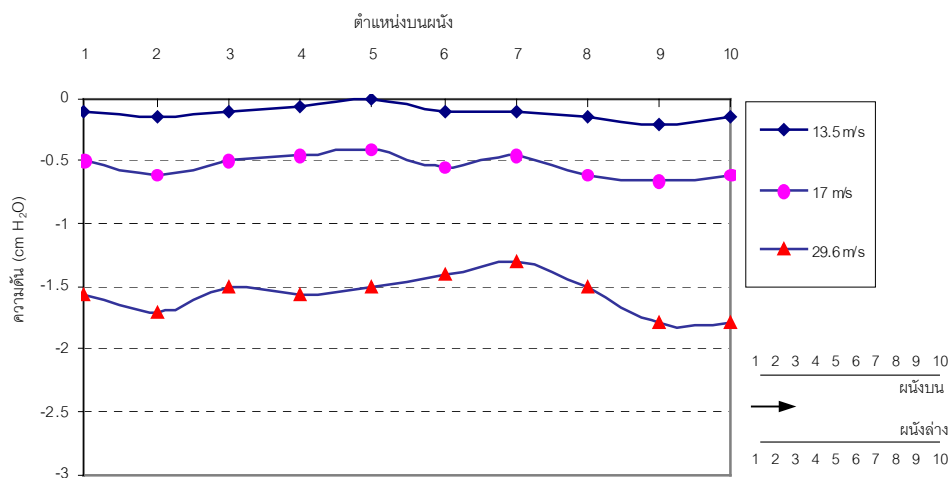
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

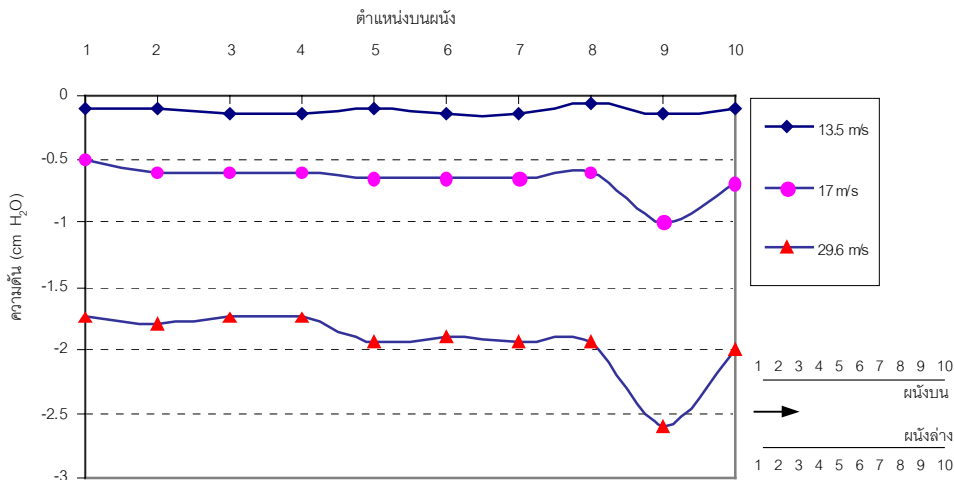
บทนี้จะแสดงผลการทดสอบการใช้งานอุโมงค์ลมที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ กับแบบจำลองเดิมที่มีในห้องปฏิบัติการ และแบบจำลองที่สร้างขึ้นใหม่เพิ่มเติม เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อแบบจำลองมีขนาดต่างๆ กัน รวมไปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแบบจำลองทั้งก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนัง

4.1 การทดสอบโดยไม่มีแบบจำลอง

เป็นทดสอบเพื่อดูผลกระทบบนผนังด้านบนและด้านล่างที่ความเร็วลมต่างๆ กันขณะที่ไม่มีแบบจำลอง โดยปรับผนังให้เรียบเสมอกันแล้วทดสอบกับความเร็วลมแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 13.5 m/s ,17 m/s และ 29.6 m/s แล้วบันทึกค่าความดันที่เกิดขึ้นบนผนัง ที่ตำแหน่งต่างๆ จะได้ผลดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากรูปจะสังเกตได้ว่าความดันตามตำแหน่งต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะการสร้างรูเจาะสำหรับวัดความดันแต่ละจุดที่มีความแตกต่างกันในเรื่องของรูปทรงบริเวณทางเข้า หรือผลกระทบของการยึดตัวหรือหลุดตัวของผนังในบางจุดบ้างเล็กน้อย จึงทำให้การสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ค่าความดันที่แตกต่างกันแต่ละจุดนี้จะนำไปใช้คำนวณร่วมกับผลการทดสอบอื่นต่อไป เพื่อให้เกิดความแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4.1 แสดงค่าความดันบนผนังด้านบนขณะที่ไม่มีแบบจำลองที่ความเร็วต่างๆ



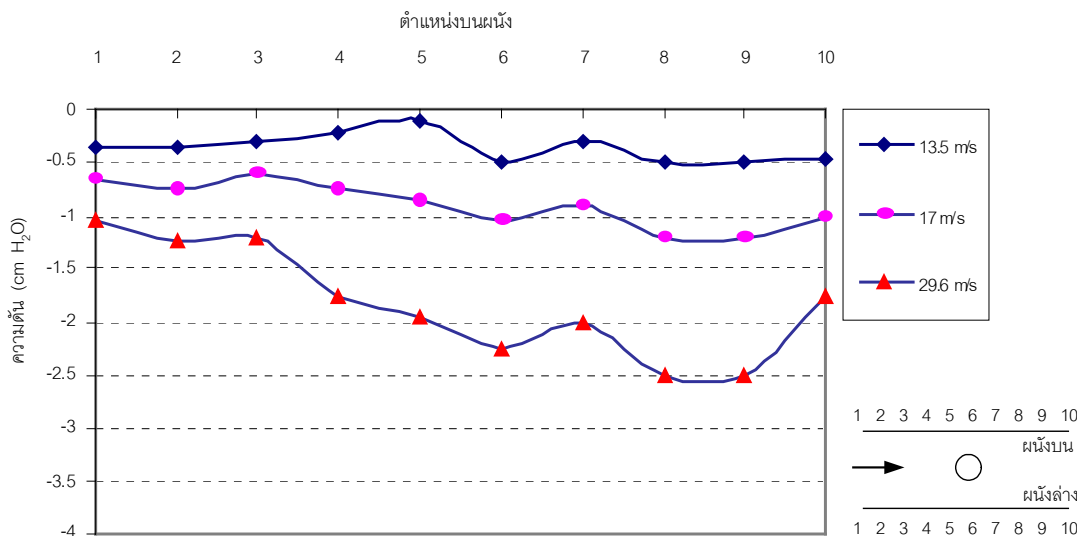
รูปที่ 4.2 แสดงค่าความดันบนผนังด้านล่างขณะที่ไม่มีแบบจำลองที่ความเร็วต่างๆ

4.2 การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงกระบอก

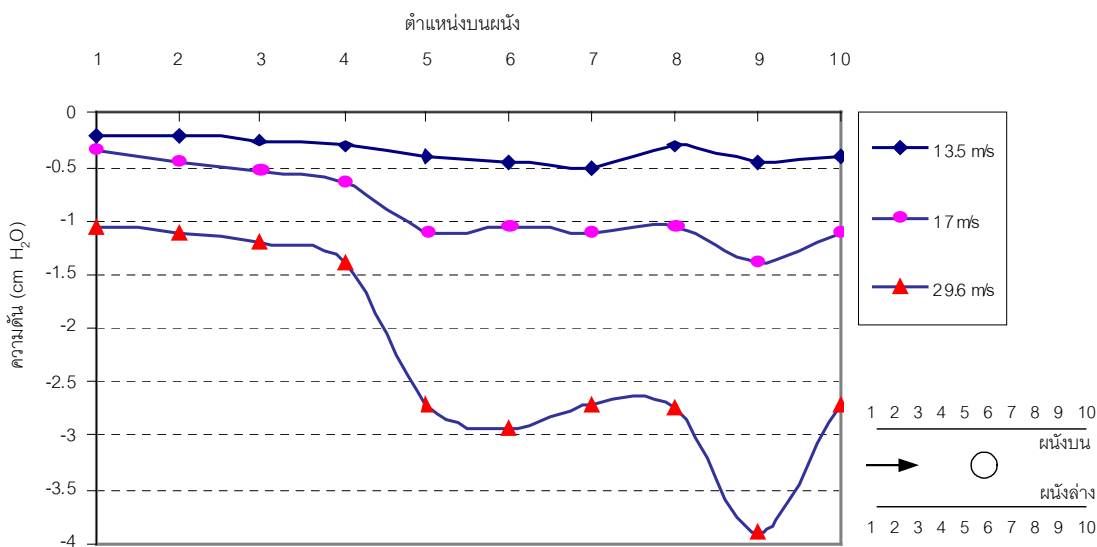
การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงกระบอกนี้ เป็นการเลือกเอาแบบจำลองซึ่งง่ายต่อการคาดเดาผลกระทบที่จะเกิดขึ้นมาทดสอบ และเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อขนาดและความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง รวมไปถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นรอบๆ ทรงกระบอกก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนัง

4.2.1 การทดสอบด้วยทรงกระบอกที่ความเร็วลมต่างกันเพื่อสังเกตผลกระทบบนผนัง

การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงกระบอกนี้ ทดสอบโดยไม่ได้มีการปรับความโค้งของผนัง เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผนังด้านบนและด้านล่างเมื่อความเร็วลมมีการเปลี่ยนแปลง โดยเลือกเอาแบบจำลองรูปทรงกระบอกขนาดกลาง คือเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm มาทดสอบที่ความเร็วลมแตกต่างกัน 3 ค่า คือ ที่ความเร็วลม 13.5 m/s, 17 m/s และ 29.6 m/s จะได้ผลการทดสอบปรากฏดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งความดันที่ผนังจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น และแต่ละความเร็วที่ทดสอบความดันจะมีค่าลดลงมากในช่วงหลังจากตำแหน่งที่ 5 บนผนังทั้งด้านบนและด้านล่าง ซึ่งเป็นช่วงที่ลมเริ่มปะทะกับแบบจำลอง จึงทำให้กระแสอากาศถูกบีบอัดให้ความเร็วลมที่ผ่านผนังบริเวณจุดต่างๆ นี้มีค่าเพิ่มขึ้น



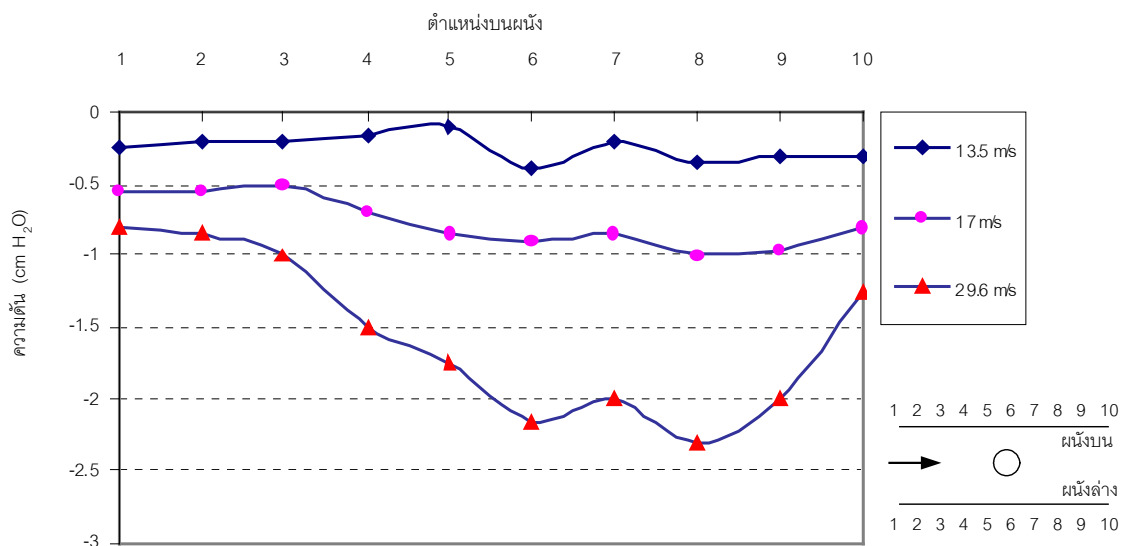
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความดันบนผนังด้านบนที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับ
ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm



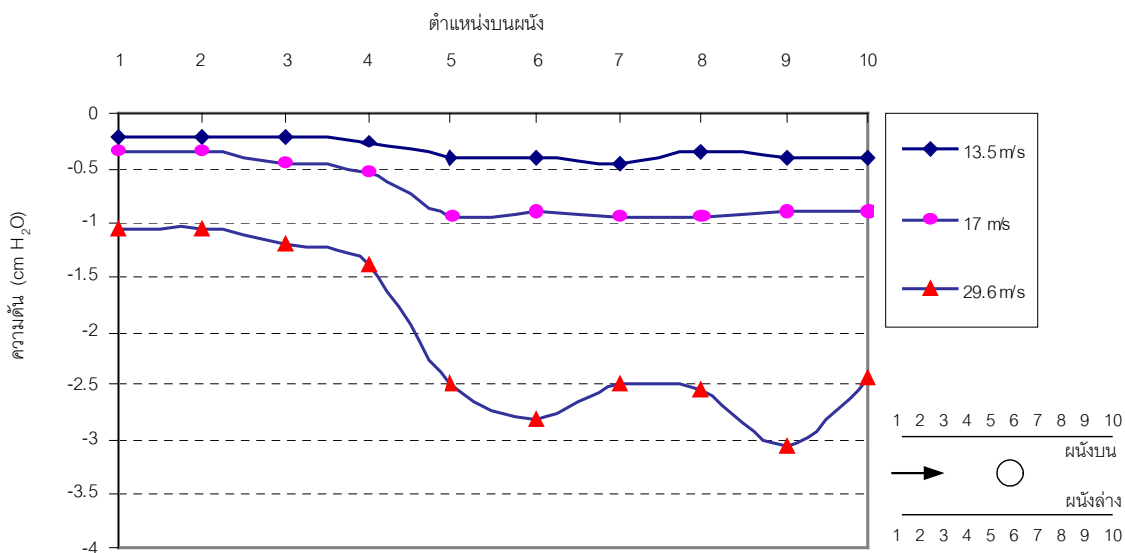
รูปที่ 4.4 แสดงค่าความดันบนผนังด้านล่างที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับ
ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าความดันตลอดแนวผนังมีค่าไม่ค่อยราบเรียบเท่าที่ควร เนื่องจากค่าความดันที่นำมาแสดงในรูปเป็นค่าที่นำมาจากวัดโดยตรง ไม่ได้มีการนำค่าที่เกิดความแตกต่างของความดันบนผนังขณะทดสอบโดยไม่มีแบบจำลองก่อนหน้านี้มาปรับเปลี่ยน ดังนั้นจึงได้มีการนำค่าดังกล่าวมาคำนวณใหม่ โดยนำมาหักลบออกจากค่าความดันที่วัดได้ในแต่ละ

ตำแหน่งขณะมีแบบจำลอง แล้วนำมาแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 จะได้ค่าความดันที่ราบเรียบเพิ่มขึ้น



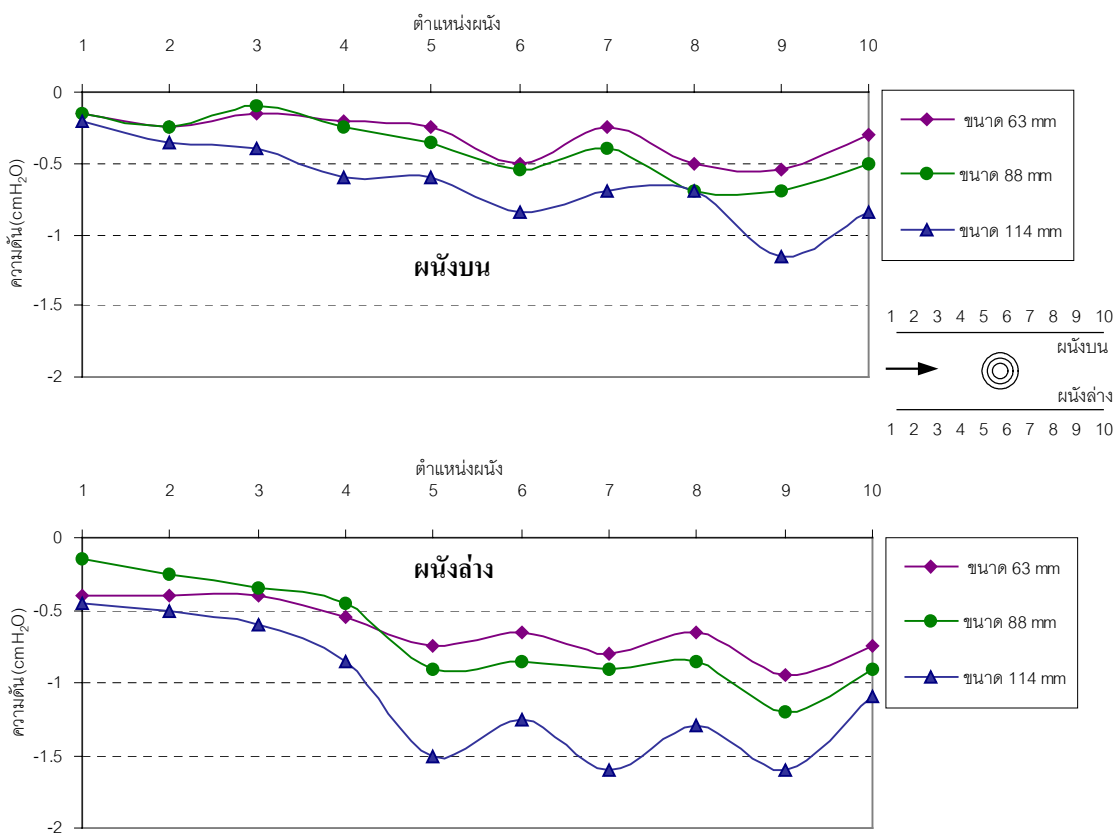
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความดันบนผนังด้านบนที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm หลังนำค่าที่ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่



รูปที่ 4.6 แสดงค่าความดันบนผนังด้านล่างที่ความเร็วลมต่างๆ เมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88 mm หลังนำค่าที่ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่

4.2.2 การทดสอบด้วยทรงกระบอกที่มีขนาดต่างกันเพื่อสังเกตผลกระทบบนผนัง

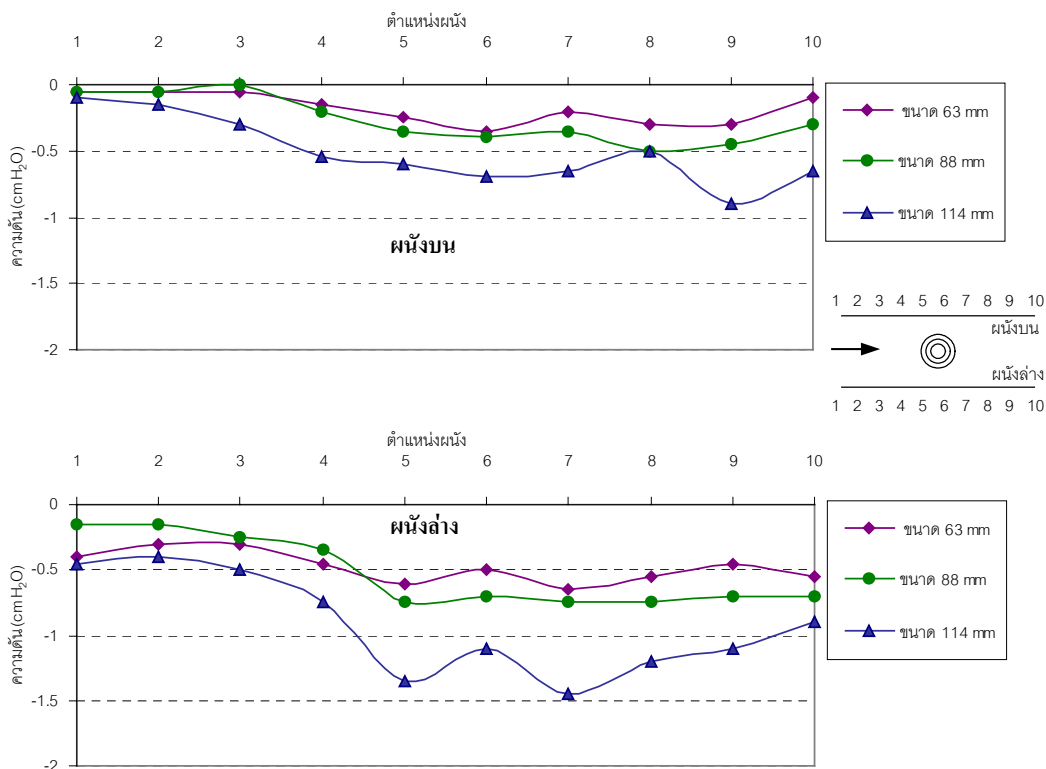
การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงกระบอกนี้ ทดสอบโดยไม่ได้มีการปรับความโค้งของผนัง เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผนังด้านบนและด้านล่างเมื่อนำแบบจำลองขนาดต่างๆ มาติดตั้ง โดยเลือกเอาแบบจำลองรูปทรงกระบอกมา 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 mm, 88 mm และ 114 mm มาทดสอบที่ความเร็วลมค่าหนึ่ง คือ 17 m/s จะสังเกตได้ว่า เมื่อทรงกระบอกมีขนาดใหญ่ขึ้น กระแสอากาศก็จะถูกบีบอัดให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในตำแหน่งที่เริ่มมีแบบจำลอง แต่ความดันตลอดแนวผนังก็ยังคงไม่ราบเรียบเท่าที่ควร ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่างเมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน

เมื่อนำค่าความดันที่แตกต่างกันแต่ละจุดบนผนังขณะไม่มีแบบจำลองมาคำนวณเข้าด้วยกัน จะได้ค่าความดันตามแนวผนังด้านบนและด้านล่างที่มีความราบเรียบมากขึ้น ดังรูปที่ 4.8 เช่นเดียวกับการทดสอบในกรณีที่มีความเร็วลมแตกต่างกัน

ดังนั้นการแสดงค่าความดันบนผนังในการทดสอบหลังจากนี้ไปจะเป็นค่าที่ได้มีการนำเอาค่าความดันที่แตกต่างกันแต่ละจุดบนผนังขณะทดสอบโดยไม่มีแบบจำลองมาปรับเปลี่ยนคำนวณใหม่ก่อน เพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ลดลง



รูปที่ 4.8 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่างเมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ กัน หลังนำค่าที่ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่

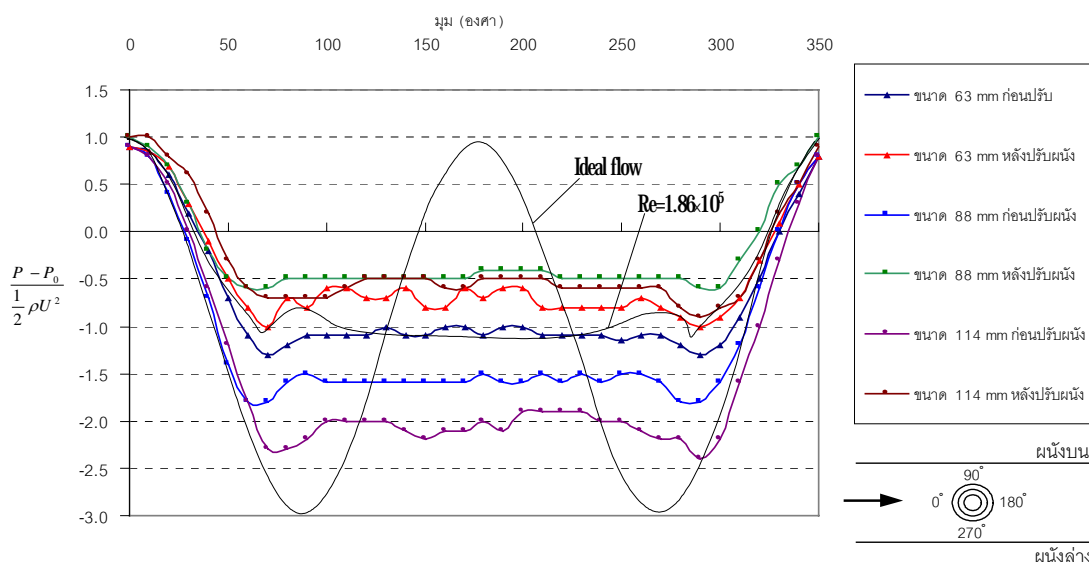
4.2.3 การทดสอบด้วยทรงกระบอกที่มีขนาดต่างกันเพื่อสังเกตผลกระทบรอบพื้นผิว

การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงกระบอกนี้ ทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวรอบๆ แบบจำลอง ทั้งก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนัง โดยเลือกเอาแบบจำลองรูปทรงกระบอกมา 3 ขนาด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 mm, 88 mm และ 114 mm มาทดสอบที่ความเร็วลม 17 m/s เพียงค่าเดียว

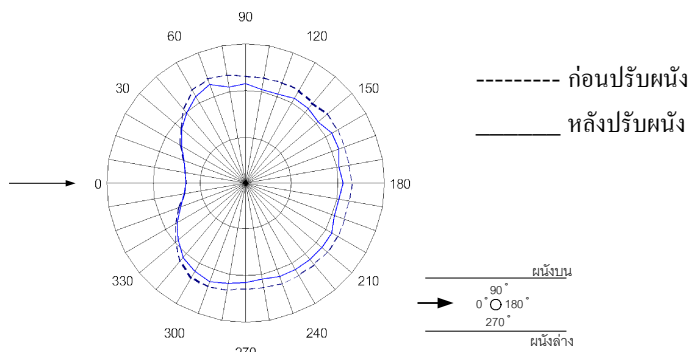
ก่อนการทดสอบผนังทั้งด้านบนและด้านล่างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวราบเสมอกัน ขณะทดสอบจะอ่านค่าความดันที่ผิวทรงกระบอกทุก 10 องศา จนครบรอบ หลังจากนั้นจึงปรับความโค้งของผนังทั้งสองจนความดันมีค่าเท่ากันทุกจุด แล้วจึงอ่านความดันโดยรอบทรงกระบอกอีกครั้ง ทดสอบเช่นเดียวกันกับทรงกระบอกทั้ง 3 ขนาด จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.9 ค่า Re

ของการไหลบนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 mm, 88 mm และ 114 mm คือ 6.0×10^4 , 8.38×10^4 และ 1.09×10^5 ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากอุโมงค์ลมอื่นที่เคยทำได้ ที่ $Re = 1.86 \times 10^5$ (John D. Anderson, 2001) จะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่จะไม่ใกล้เคียงการไหลในทางอุดมคติ (Ideal flow) ซึ่งคำนวณโดยไม่คิดความหนืดของของไหล

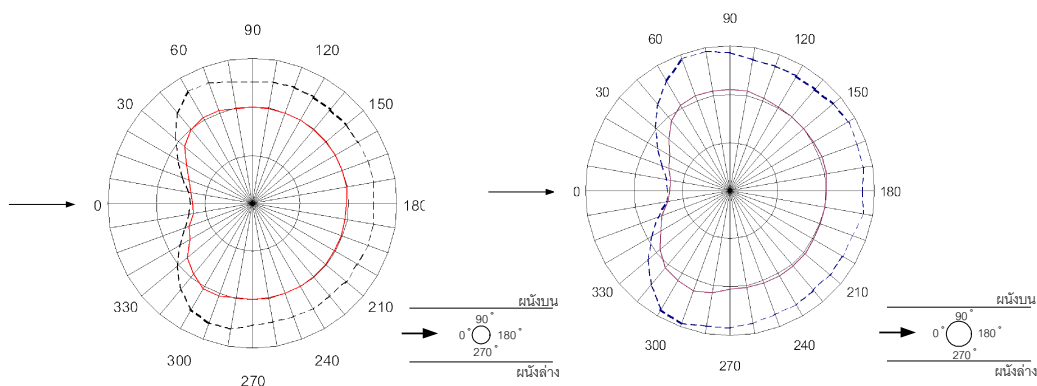
เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจในรูปที่ 4.10 จะแสดงค่าความดันในแนวรัศมีของวงกลม ผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดของทรงกระบอกใหญ่ขึ้นความดันรอบๆ พื้นผิวจะมีค่าลดลง เนื่องจากกระแสอากาศถูกบีบอัดให้มีความเร็วมากขึ้น แต่เมื่อมีการปรับความโค้งของผนังกระแสอากาศจะถูกบีบอัดน้อยลง ความเร็วลดลง ทำให้ความดันรอบพื้นผิวทรงกระบอกมีเพิ่มมากขึ้น จะสังเกตได้ว่าความดันของทรงกระบอกทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่าการปรับความโค้งของผนังทำให้ผลกระทบจากผนังที่มีต่อความดันรอบๆ แบบจำลองลดลงได้



รูปที่ 4.9 แสดงความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ ก่อนและหลังปรับผนัง



ทรงกระบอกขนาด ϕ 63 มม.



ทรงกระบอกขนาด ϕ 88 มม.

ทรงกระบอกขนาด ϕ 114 มม.

รูปที่ 4.10 แสดงความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ ในแนวรัศมี
ของวงกลมก่อนและหลังการปรับผนัง

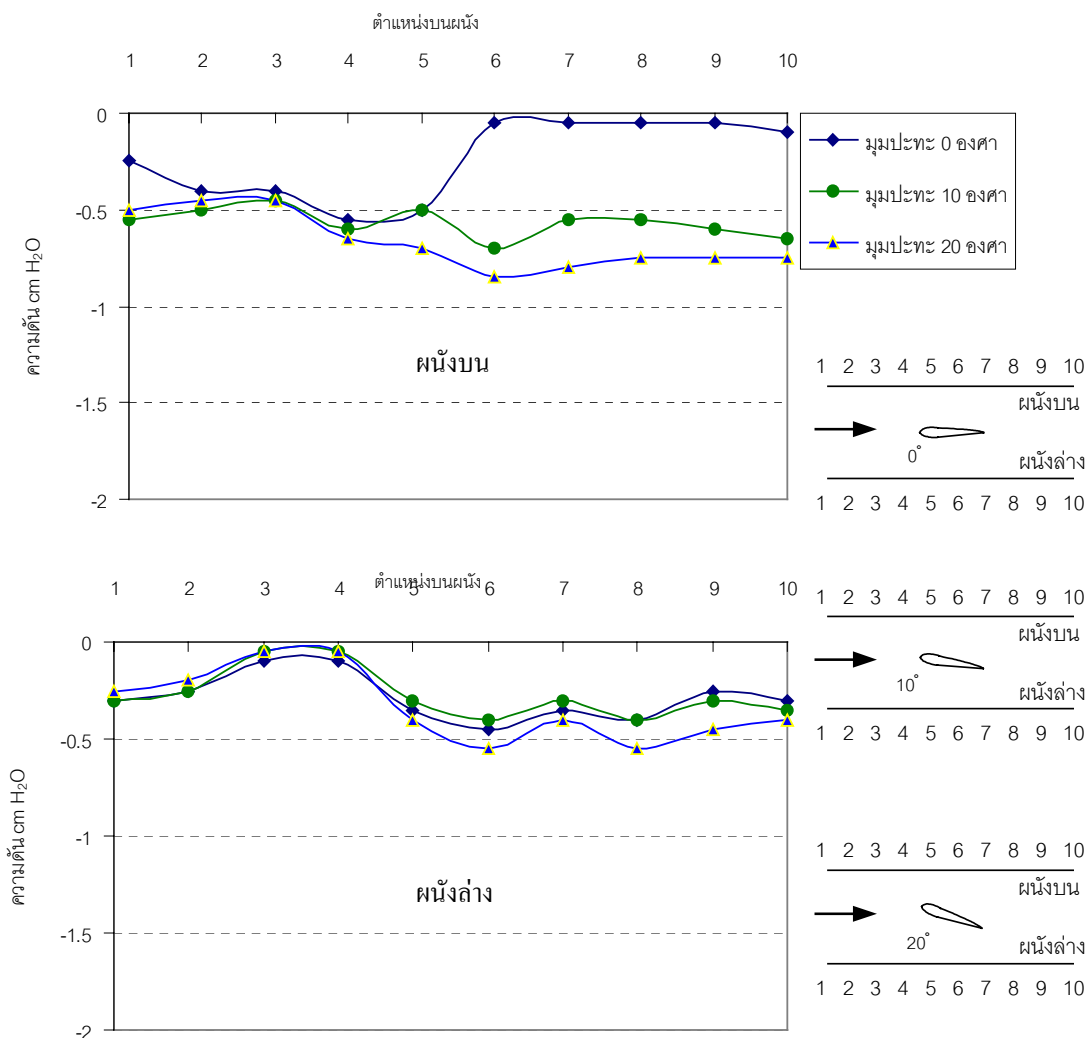
4.3 การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน

แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน นำมาทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผนังและพื้นผิวรอบๆ แบบจำลอง เมื่อรูปทรงของแบบจำลองมีความหลากหลายและแตกต่างกันไปจากรูปทรงทางเลขาคณิตธรรมดา โดยแบบจำลองที่นำมาทดสอบมี 2 ขนาด คือ ปีกขนาดเล็กมีความยาวเส้นคอร์ด 155 mm หนา 20 mm และปีกขนาดใหญ่ความยาวเส้นคอร์ด 235 mm หนา 65 mm ซึ่งทั้งสองปีกสามารถวัดความดันที่บริเวณผิวของปีกได้

4.3.1 การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบบนผนังด้วยปีกเครื่องบินที่มุมปะทะต่างๆ

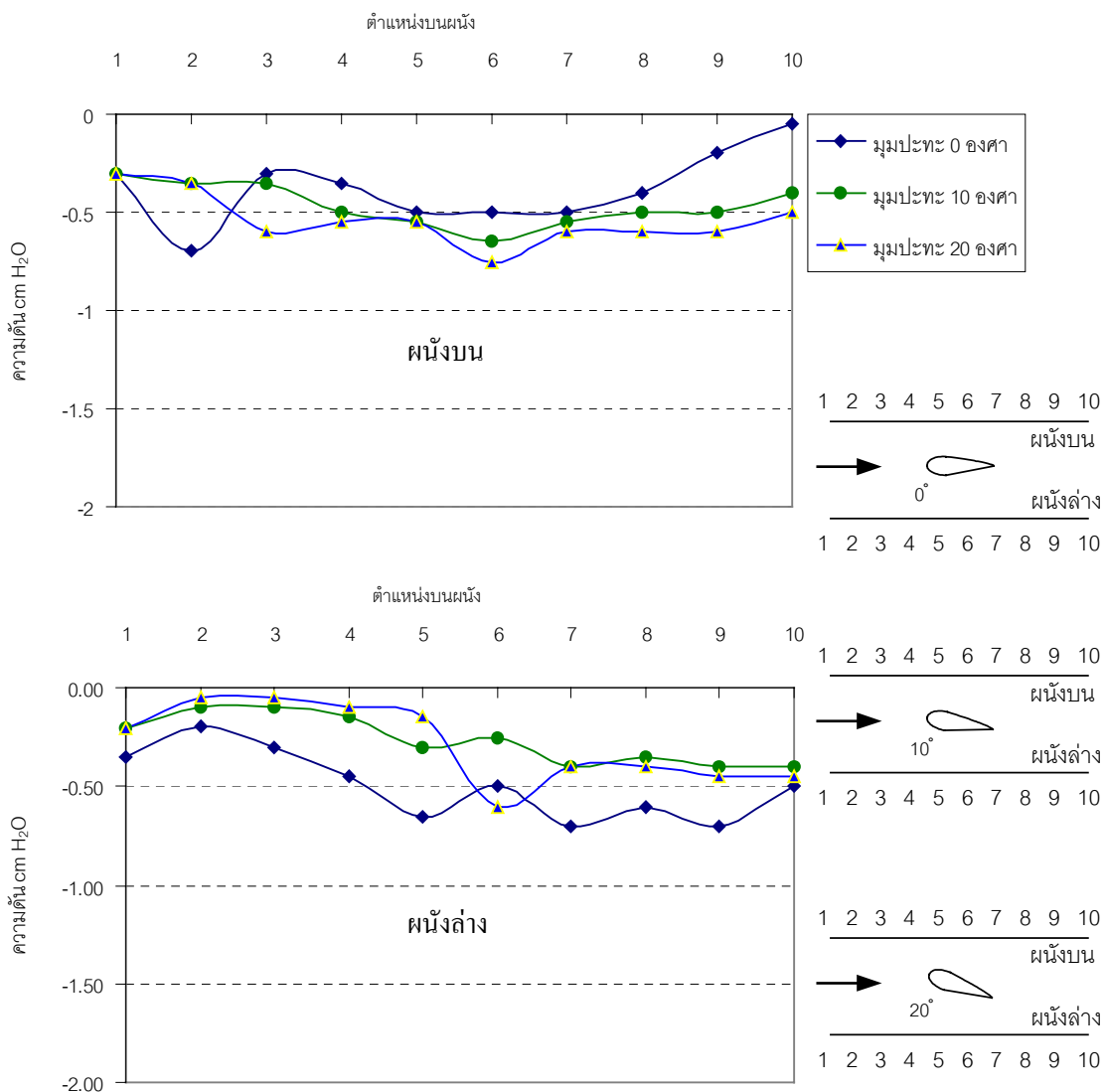
การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผนังด้านบนและด้านล่างก่อนการปรับผนังที่มุมปะทะ (Angle of attack) ต่างๆ กันของปีกขนาดเล็ก

และขนาดใหญ่ที่ความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง โดยมุมปะทะที่ทำการทดสอบ 3 ค่า คือ ที่ 0 องศา, 10 องศา และ 20 องศา ความเร็วลมที่ใช้คือ 17 m/s ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงในรูป 4.11 และ 4.12



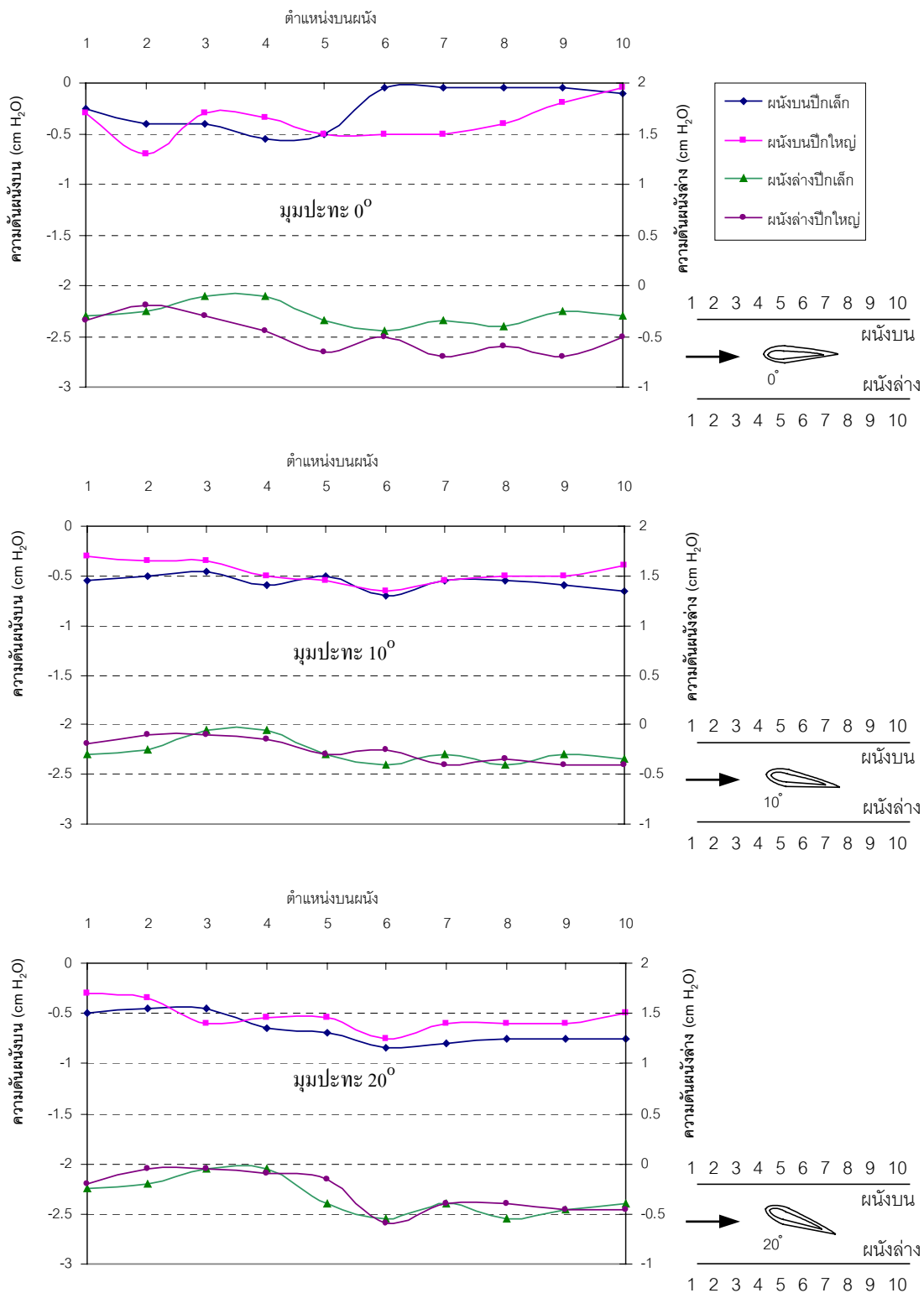
รูปที่ 4.11 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง ทดสอบกับปีกขนาดเล็ก ที่มีมุมปะทะต่างๆ

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จะสังเกตได้ว่าเมื่อมุมปะทะเพิ่มขึ้น ความดันบริเวณผนังจะลดต่ำลงบางส่วนในบริเวณที่ระยะห่างระหว่างแบบจำลองไปถึงผนังมีค่าน้อย ซึ่งเกิดจากการบีบตัวของกระแสอากาศ ทำให้ความเร็วของกระแสอากาศมีค่ามากขึ้นบริเวณนั้น



รูปที่ 4.12 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับปีกขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s

เมื่อนำเอาผลการทดสอบของผนังด้านบนและด้านล่างมาแสดงในรูปเดียวกัน และปีกขนาดเล็กมาแสดงเปรียบเทียบกับปีกขนาดใหญ่ ในรูปที่ 4.13 จะสังเกตได้ว่าความดันที่ผนังเมื่อทดสอบกับปีกขนาดใหญ่ไม่ได้มีค่าน้อยกว่าปีกขนาดเล็กทุกจุดเสมอไป และที่มุมปะทะมากขึ้น ความดันบนผนังก็ไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของแบบจำลองเช่นเดียวกัน



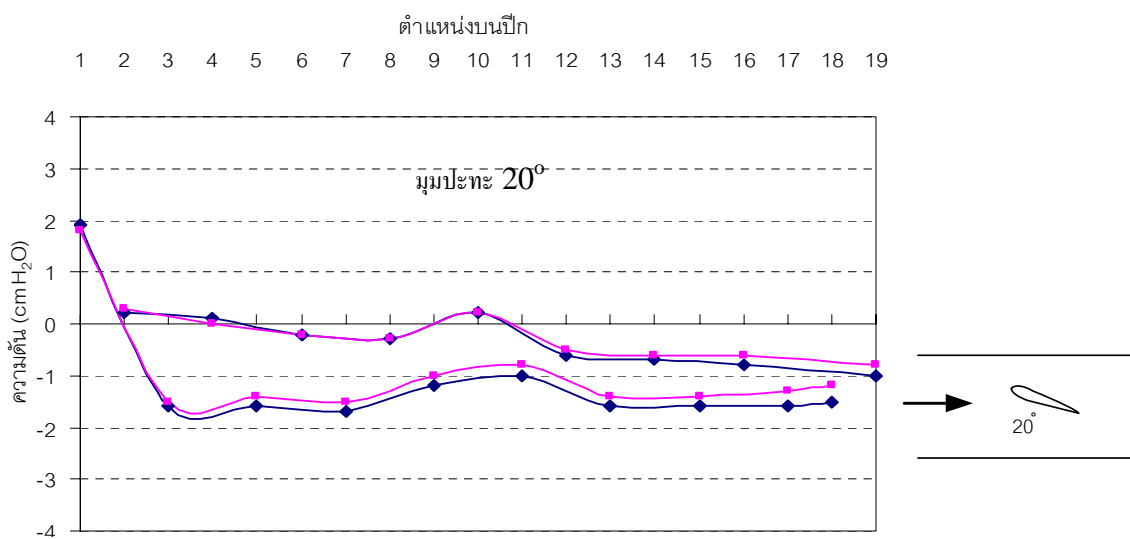
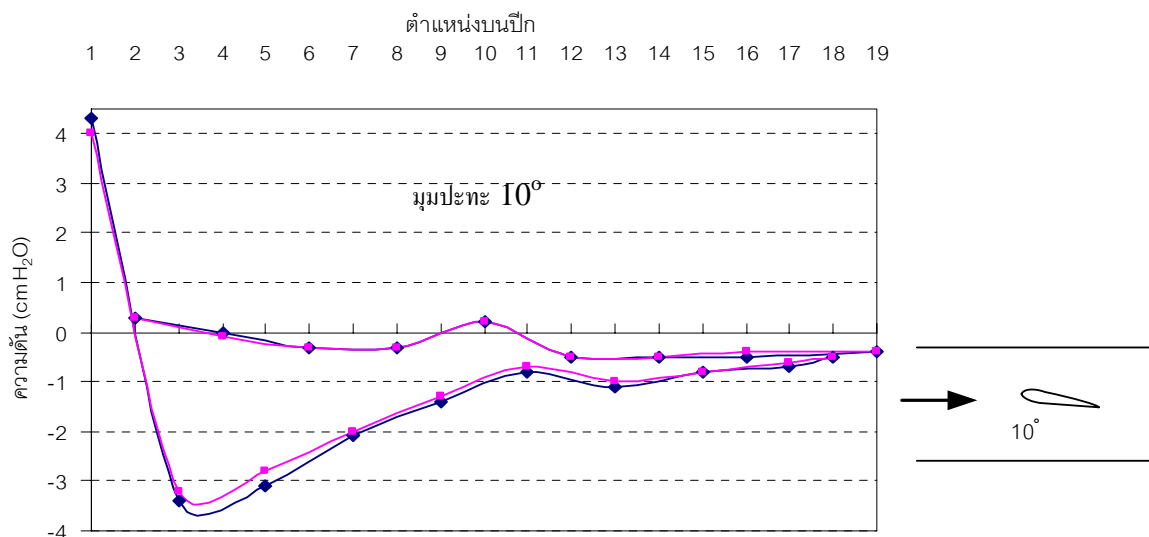
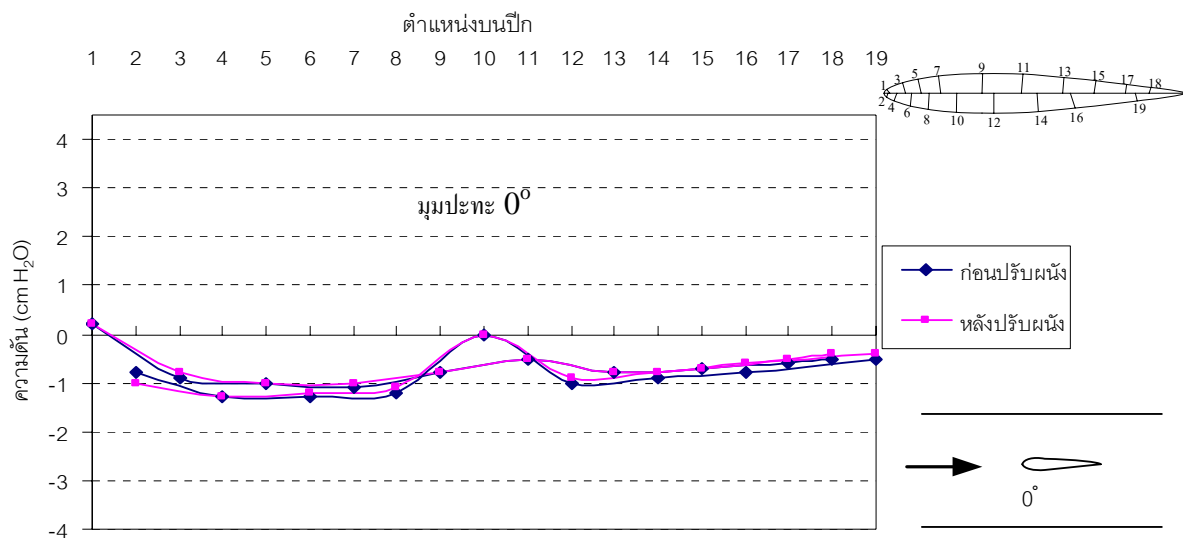
รูปที่ 4.13 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับปีกขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ นำมาแสดงรวมกัน ที่มุมปะทะต่างๆ

4.3.2 การทดสอบเพื่อศึกษาผลกระทบบนปีกเครื่องบินหลังการปรับความโค้งของผนัง

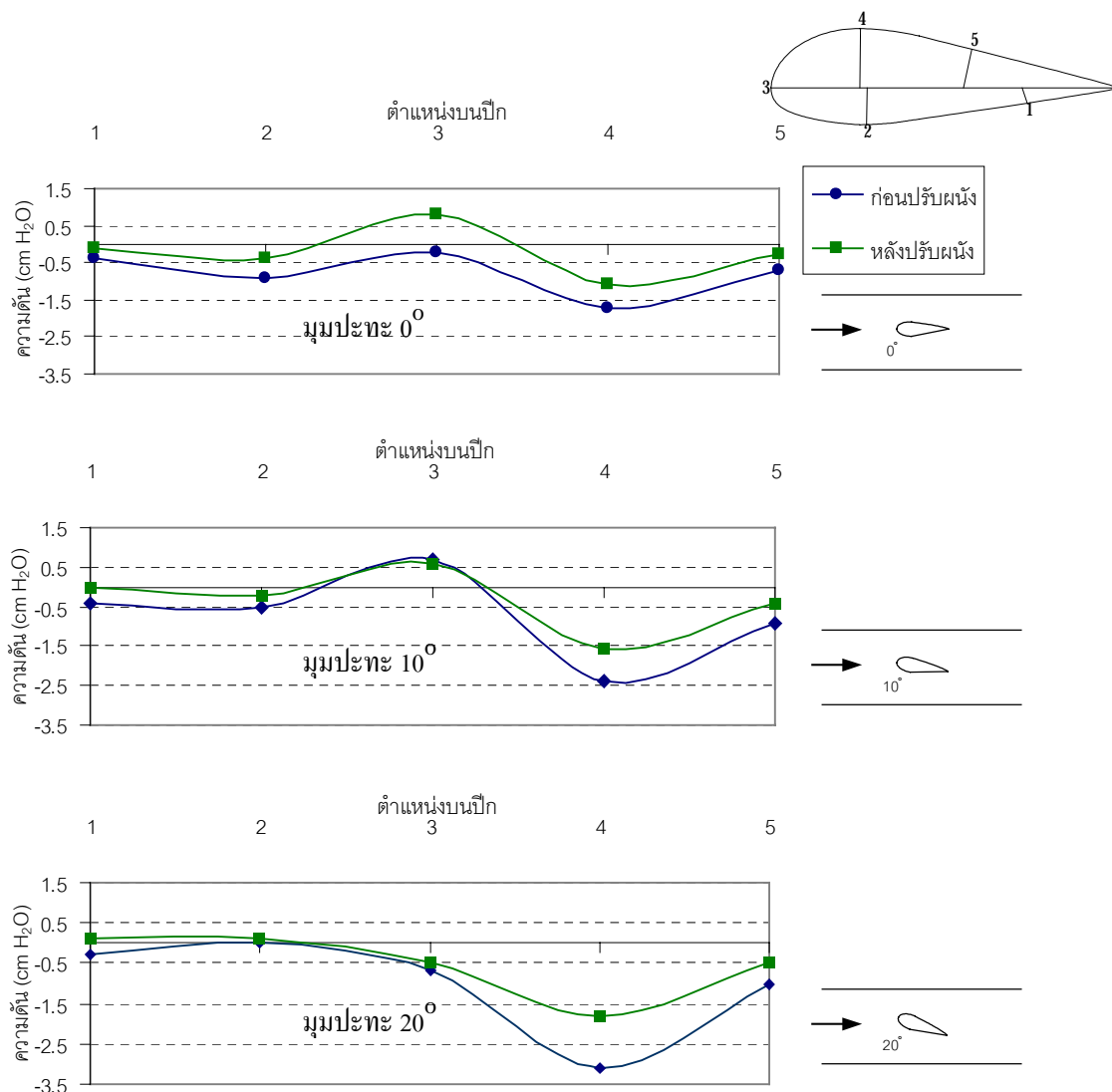
การทดสอบด้วยแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแบบจำลองที่มุมปะทะต่างๆ ก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนัง โดยทดสอบปีกขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ความเร็วลม 17 m/s มุมปะทะที่ทำการทดสอบ 3 ค่า คือ ที่ 0 องศา, 10 องศา และ 20 องศา

ก่อนการทดสอบผนังทั้งด้านบนและด้านล่างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวราบเสมอกัน ขณะทดสอบจะอ่านค่าความดันที่ผิวของปีกเครื่องบิน ซึ่งปีกขนาดเล็กสามารถวัดความดันได้ 20 จุด ปีกขนาดใหญ่วัดความดันได้ 5 จุด หลังจากนั้นจึงปรับความโค้งของผนังทั้งสองจนกระทั่งความดันมีค่าเท่ากันทุกจุด แล้วจึงอ่านความดันรอบๆ ปีกอีกครั้ง ผลการทดสอบของปีกขนาดเล็กที่แสดงในรูปที่ 4.14 นั้น เนื่องจากจุดที่ใช้วัดความดันมีจำนวนมาก ในแต่ละการทดสอบจึงแบ่งเส้นกราฟออกเป็น 2 ส่วน คือ ความดันของพื้นผิวด้านบนปีกและความดันบนพื้นผิวด้านล่างของปีก แล้วนำมาแสดงรวมกันทั้งก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนัง

จากรูปที่ 4.14 จะสังเกตเห็นได้ว่าความดันที่พื้นผิวของปีกหลังจากการปรับความโค้งของผนังแล้วจะมีค่าสูงกว่าก่อนปรับผนังเล็กน้อย แสดงว่าผนังส่งผลกระทบไปยังแบบจำลองเพียงเล็กน้อย เพราะแบบจำลองมีขนาดเล็ก และให้ผลสอดคล้องกับรูปที่ 4.15 ที่แบบจำลองมีขนาดใหญ่กว่า ความดันที่พื้นผิวของปีกหลังจากการปรับความโค้งของผนังแล้วจะมีค่าสูงกว่าก่อนปรับผนังมาก แสดงว่าผนังส่งผลกระทบไปยังแบบจำลองมาก



รูปที่ 4.14 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดเล็ก ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ

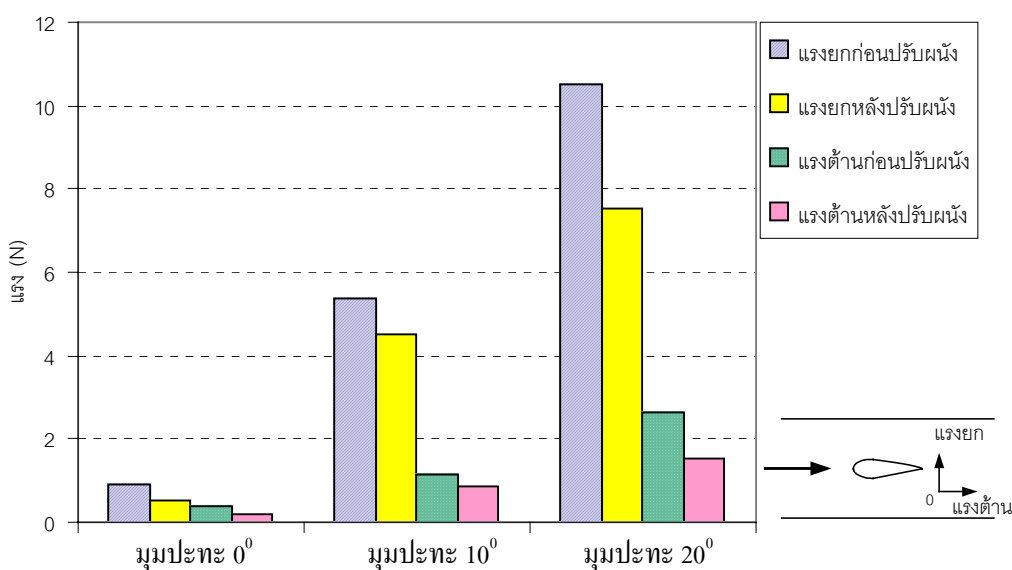


รูปที่ 4.15 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดใหญ่ ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ

4.4 การทดสอบหาแรงต้านและแรงยก

การทดสอบหาแรงต้านและแรงยกนี้ ใช้แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน เพื่อศึกษาผลกระทบของผนังที่มีต่อแรงที่กระทำบนแบบจำลอง โดยการใช้แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินขนาดใหญ่ มาทดสอบที่มุมปะทะต่างๆ กัน แล้ววัดค่าแรงที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการปรับความโค้งของผนัง

ก่อนการทดสอบผนังทั้งด้านบนและด้านล่างจะถูกปรับให้อยู่ในแนวราบเสมอกัน ขณะทดสอบใช้ความเร็วลม 17 m/s แล้วอ่านค่าแรงยกและแรงต้านของปีกเครื่องบินจากเครื่องมือวัด หลังจากนั้นจึงปรับความโค้งของผนังทั้งสองจนความดันบนผนังมีค่าเท่ากัน แล้วจึงอ่านค่าแรงอีกครั้ง ทำการทดสอบที่มุมปะทะ 0 องศา, 10 องศา และ 20 องศา จะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.16 โดยสังเกตได้ว่าหลังจากมีการปรับความโค้งของผนัง ค่าแรงยกและแรงต้านจะลดลง และถ้ามุมปะทะมากขึ้นค่าความแตกต่างของแรงทั้งสองก่อนและหลังการปรับผนังก็จะมีค่ามากขึ้นด้วย แสดงว่าผนังมีผลกระทบต่อแรงยกและแรงต้านที่เกิดขึ้นกับแบบจำลอง



รูปที่ 4.16 แสดงค่าแรงยกและแรงต้าน ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ

4.5 สรุป

4.5.1 การทดสอบผนังโดยไม่มีแบบจำลองที่ความเร็วลมต่างๆ ความดันบริเวณผนังจะมีค่าไม่ราบเรียบเท่าที่ควรเนื่องจากผนังมีความอ่อนตัว และลักษณะการสร้างจุดที่วัดความดันมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละจุด เป็นผลให้เกิดการสูญเสียความดันไม่เท่ากัน

4.5.2 การทดสอบกับทรงกระบอกที่ความเร็วลมต่างๆ กัน ผลปรากฏว่าค่าความดันบนผนังจะมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นถ้าหากความเร็วลมสูงขึ้นบริเวณจุดที่มีแบบจำลอง

4.5.3 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาดต่างๆ กัน พบว่าทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่ก็จะส่งผลกระทบต่อผนังมากกว่าทรงกระบอกที่มีขนาดเล็ก ที่ความเร็วลมเท่ากัน

4.5.4 ผลกระทบที่เกิดจากผนังจะส่งผลมายังแบบจำลองรูปทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่มากกว่า แบบจำลองที่มีขนาดเล็ก แต่หลังจากการปรับความโค้งของผนังแล้ว ค่าความดันบริเวณผิวทรงกระบอกจะมีค่าใกล้เคียงกัน

4.5.5 การทดสอบกับแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินจะได้ผลคล้ายกับรูปทรงกระบอก คือ ในบริเวณส่วนของแบบจำลองที่อยู่ใกล้ผนังก็จะส่งผลให้ความดันบนผนังมีค่าต่ำ แต่จะมีความดันบนผนังบางส่วนมีลักษณะไม่ราบเรียบเมื่อมีการปรับเปลี่ยนมุมปะทะ เนื่องจากกระแสอากาศที่ผ่านแบบจำลองมีความปั่นป่วน

4.5.6 การทดสอบวัดแรงต้านและแรงยกที่เกิดกับแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบินพบว่า ค่าแรงทั้งสองที่เกิดจะมีค่าลดลงหลังจากได้มีการปรับความโค้งของผนัง และในขณะที่มุมปะทะเพิ่มมากขึ้นค่าความแตกต่างของแรงก่อนและหลังการปรับผนังก็จะยิ่งมากขึ้นด้วย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การสร้างส่วนทดสอบที่สามารถปรับความโค้งได้นั้น สามารถลดผลกระทบจากผนังได้ทั้งในแบบจำลองที่มีอยู่เดิมและแบบจำลองที่สร้างใหม่ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสังเกตจากค่าความดันบริเวณพื้นผิวของแบบจำลอง และค่าแรงยกและแรงต้านที่เกิดขึ้น

5.1.2 เมื่อแบบจำลองมีขนาดใหญ่ขึ้น ผนังจะส่งผลกระทบมายังแบบจำลองในบริเวณที่ระยะห่างระหว่างแบบจำลองกับผนังมีค่าน้อย และต่อเนื่องไปยังบริเวณด้านหลังแบบจำลองอีกเล็กน้อย โดยสังเกตจากค่าความดันที่เกิดขึ้นบนผนัง และลักษณะรูปร่างของผนังหลังจากมีการปรับความโค้ง

5.1.3 การใช้สเต็ปมอเตอร์ทำให้สามารถปรับระยะห่างของผนังแต่ละส่วนได้ละเอียดตามความต้องการ แต่จะมีปัญหาในเรื่องปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้ามก เพราะต้องจ่ายกระแสไฟเลี้ยงให้กับมอเตอร์ที่ไม่ได้เคลื่อนที่เพื่อรักษาตำแหน่งไม่ให้หมุนตามมอเตอร์ตัวอื่น

5.1.4 อุโมงค์ลมที่มีอยู่เดิมสามารถถูกปรับปรุงให้ทดสอบกับแบบจำลองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องสร้างอุโมงค์ลมที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่าย สิ้นเปลืองพื้นที่ และค่าดำเนินการมาก

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย

5.2.1 การเพิ่มประสิทธิภาพในการลดผลกระทบจากผนัง ควรเพิ่มความยาวของส่วนทดสอบที่สามารถปรับความโค้งของผนังได้ให้มากกว่าเดิม เพื่อให้กระแสอากาศในช่วงก่อนและหลังแบบจำลองมีความราบเรียบ และสามารถทดสอบกับแบบจำลองได้หลากหลายมากขึ้น

5.2.2 การปรับความโค้งของผนังสามารถปรับเปลี่ยนไปใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ได้ แต่ต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความดันแบบอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมแต่ละจุด เพื่อส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลและสั่งให้สเต็ปมอเตอร์ทำการปรับผนัง ซึ่งการควบคุมจะมีความยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น และการปรับความโค้งของผนังอาจใช้เวลาานานจนกว่าจะได้ตำแหน่งที่เหมาะสม

5.2.3 ปัจจุบันในระหว่างการทดสอบด้วยอุโมงค์ลมมีในห้องปฏิบัติการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับผลกระทบจากลมภายนอกตัวอาคาร เนื่องจากทำการทดสอบในพื้นที่เปิด เพื่อให้ผลการทดสอบมีความถูกต้องมากขึ้น จึงควรมีห้องปิดขนาดใหญ่พอสำหรับการทดสอบในรูปแบบต่างๆ หรือปรับปรุงอุโมงค์ลมเดิมที่มีอยู่ให้เป็นอุโมงค์ลมแบบปิดเพื่อไม่ให้ได้รับผลกระทบดังกล่าว

5.2.4 ในอนาคตสามารถใช้อุโมงค์ลมขนาดเล็กทดสอบการไหลกับแบบจำลองขนาดใหญ่ได้ โดยการวัดค่าความดันบนผนังที่จุดต่างๆ แล้วนำมาคำนวณหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแบบจำลอง เพื่อให้การวัดค่าต่างๆ ได้ถูกต้องมากขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องปรับความโค้งของผนังก็ได้

เอกสารอ้างอิง

- B. Bottin, M. Cabonaro, and W. Schroder. (1997). First Runs of the Adaptive Wind Tunnel T³ at VKI: Calibration and Application of a Flexible Wall Adaptation Technique on a NACA0012 Airfoil. 4th Belgian Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Belgium
- D. Sumner and E. Brundrett. (1995) Testing Three-Dimensional Bluff-Body Model in a Low Speed Two-Dimensional Adaptive Wall Test Section. *Journal of Fluid Engineering* 117: 546-551.
- D. Sumner and E. Brundrett. (1995) Permissible Three-Dimensional in a Two-Dimensional Adaptive Wall Wind Tunnel, Department of Mechanical Engineering University of Waterloo.
- Dwayne A. Day. The Evolution of the Wind Tunnel. [On-line]. Available: http://www.centennialofflight.gov/essay/Evolution_of_Technology/evolution_of_windTunnel.
- Edward Brundrett and Paul Kankainen. (1991) The Construction and Commissioning of a Flexible Walled Wind Tunnel. *CASI Journal* 37.
- G.M. Elfstrom and J.T. Templin. (2001) A Canadian Partnership in Development of Aerospace and Automotive Test Technology. *Canadian Aeronautics and Space Journal* 47,3
- J.F. Douglas, J.M. Gasiorek and J.A. Swaffield. (1995). *Fluid Mechanics*. 3rd, Singapore, Longman
- John D. Anderson, Jr. (2001). *Fundamentals of Aerodynamics*. 3rd, Singapore, McGraw-Hill.
- John W. Lucas Adaptive Wall Wind Tunnel. [On-line]. Available: <http://www.galcit.caltech.edu/awt>
- Judd A. Kaiser. (1991) Preliminary Testing of a Simulated Atmospheric Boundary Layer In the U of W 610 mm by 910 mm Wind Tunnel, Department of Mechanical Engineering University of Waterloo, Report FWWT91-2.
- Judy Rumerman. The First Wind Tunnel. [On-line]. Available: http://www.centennialofflight.gov/essay/Evolution_of_Technology/first_wind_tunnel
- M. Abramian, P. Kankainen, E. Brundrett, and J.H.G. Howard. (1991) Wind-Tunnel Investigation of Aerodynamic and Stability Characteristics of a Forward Swept Wing X-29 Model. Department of Mechanical Engineering University of Waterloo :194-203.

Paul Kankainen and Edward Brundrett (1991) Two Dimensional Airfoil testing in a Flexible Walled Wind Tunnel Facility. Department of Mechanical Engineering University of Waterloo, Report FWWT91-1.

Peter Brandshaw and Rabi Mehta. Wind Tunnel Design. [On-line]. Available :<http://www.vonkarman.Stanford.edu/tsd/pbstuff/tunnel>

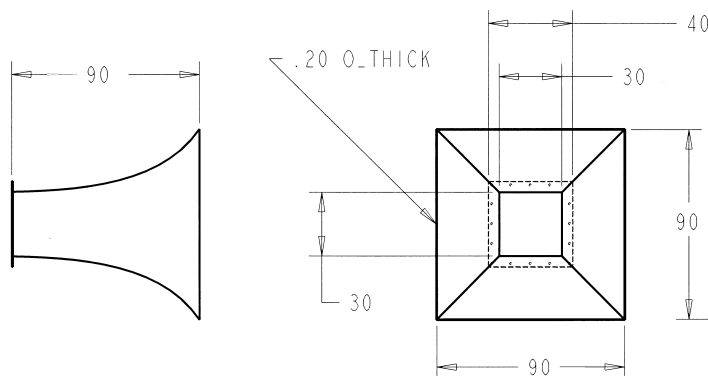
R. D. Mehta and P. Bradshaw. (1979). Design rules for small low speed wind tunnel. The Aeronautical Journal :443-449.

Theodore Theodorsen The Theory of Wind-Tunnel Wall Interference. Report National Advisory Committee for Aeronautics :219-227.

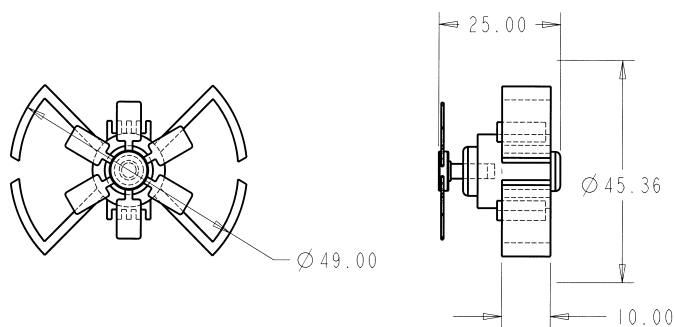
ภาคผนวก ก

ภาพวาดส่วนประกอบต่างๆ ของอุโมงค์ลม

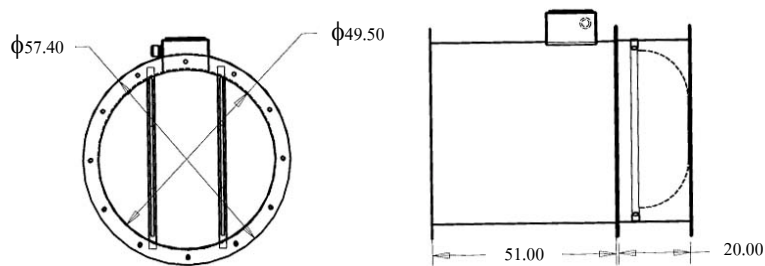
ภาพวาดส่วนประกอบเหล่านี้วาดจากโปรแกรม Pro/Engineer version 2001 ทั้งในส่วนที่ ออกแบบขึ้นมาใหม่และส่วนประกอบที่มีอยู่เดิม โดยให้รายละเอียดขนาดเฉพาะบางจุดที่สำคัญและ สามารถทำการวัดได้เพื่อให้ทราบถึงขนาดโดยประมาณเท่านั้น เพราะในการสร้างจริงจะสร้างไม่ได้ ขนาดพอดีตามแบบที่วาดไว้ หน่วยการวัดทั้งหมดแสดงในหน่วยมิลลิเมตร



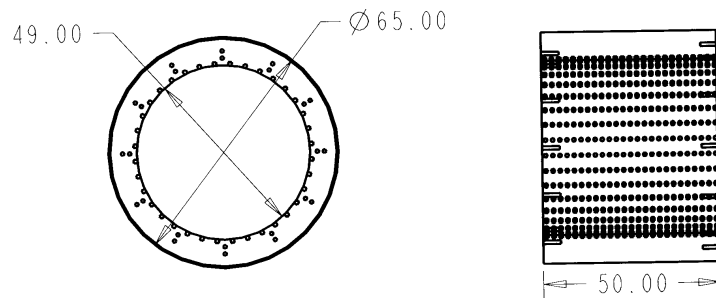
รูปที่ ก.1 ส่วนทางเข้า



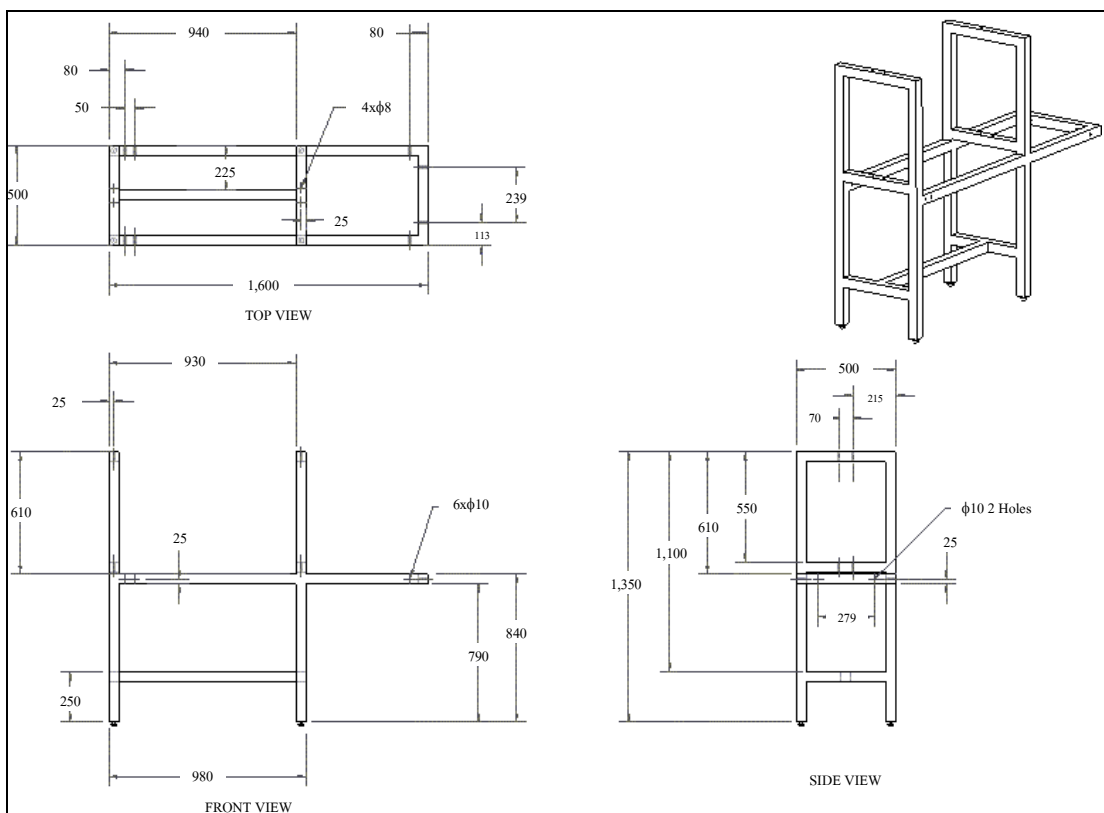
รูปที่ ก.2 มอเตอร์และใบพัด



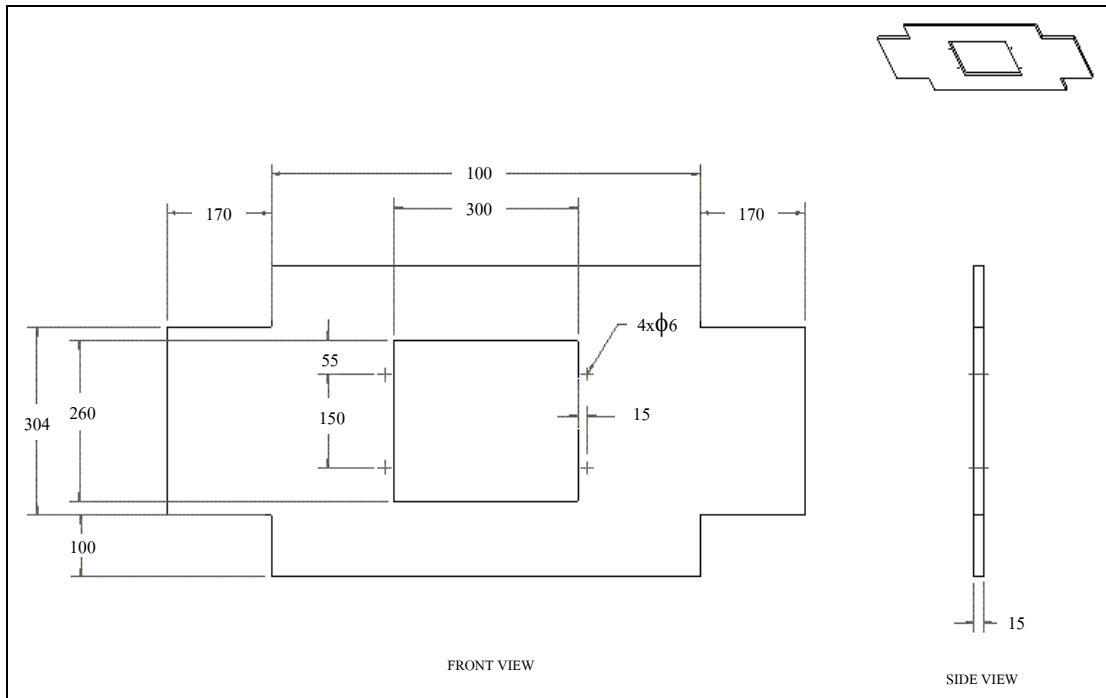
รูปที่ ก.3 ชุดปิกผีเสื้อสำหรับปรับความเร็วลม



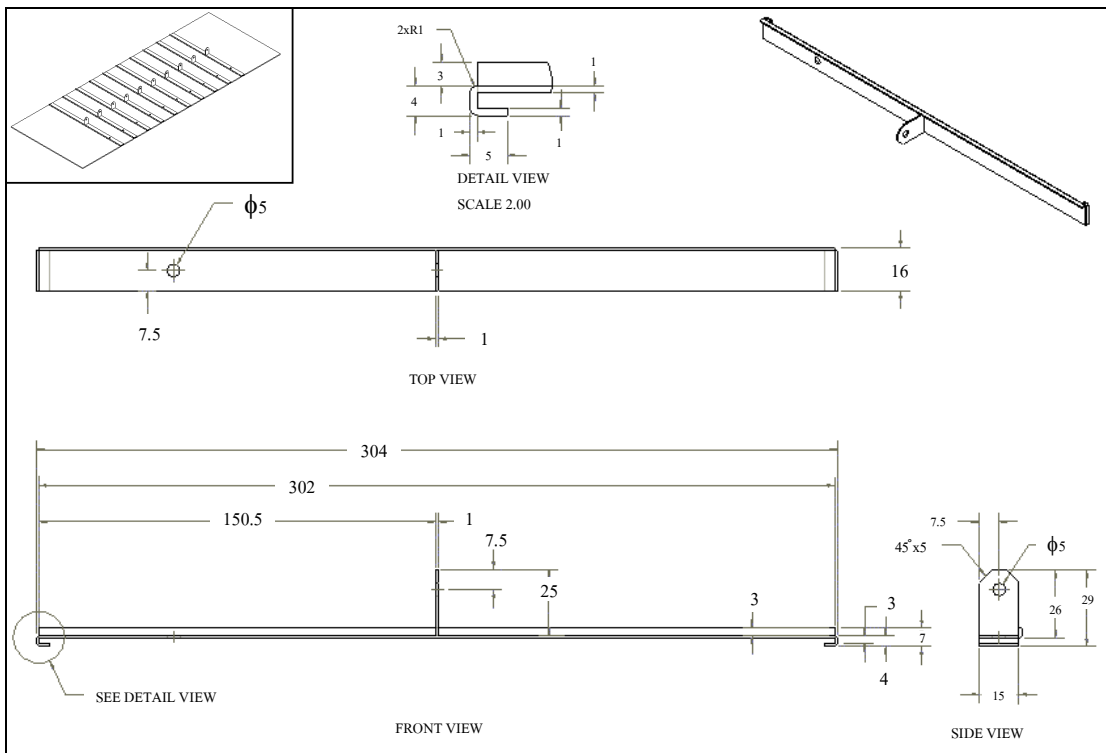
รูปที่ ก.4 ชุดเก็บเสียงบริเวณทางออก



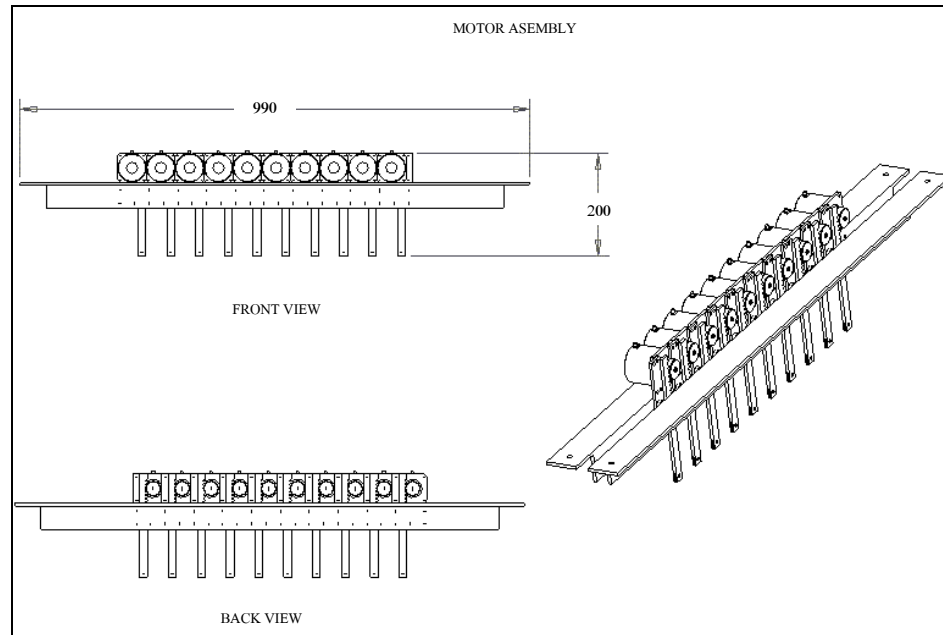
รูปที่ ก.5 โครงสร้างส่วนทดสอบ



รูปที่ ก.6 ผนังด้านข้างส่วนทดสอบ



รูปที่ ก.7 คานยึดผนังด้านบนบนและด้านล่าง



รูปที่ ก.8 สเต็ปมอเตอร์และกลไกขับเคลื่อน

ภาคผนวก ข

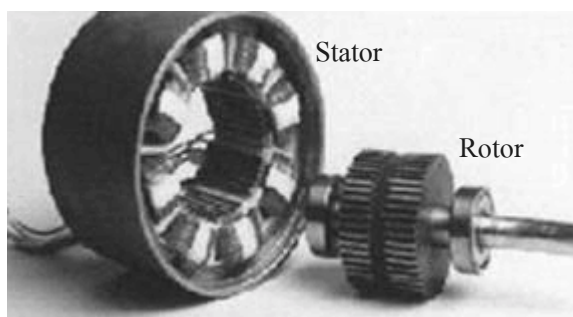
หลักการใช้งานสตีปมอเตอร์

สเต็ปมอเตอร์ ในบางกรณีอาจเรียกว่า Stepper motor หรือ Stepping motor ปัจจุบันมีการใช้งานเป็นที่แพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วและตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ เมื่อเทียบกับมอเตอร์ DC และ AC แบบธรรมดาซึ่งมีราคาถูกกว่า

โครงสร้างหลักของสเต็ปมอเตอร์ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ Rotor และ Stator

1. **Rotor** เป็นส่วนที่หมุนไปกับแกนมอเตอร์ มี 2 ชนิด คือ ทำจากแม่เหล็กถาวร (Permanent magnetic) และทำจากเหล็กหรือสารแม่เหล็กกำลังอ่อน (Variable Reluctance) ซึ่งจะมีแรงต้านการน้อยกว่าจึงทำงานได้รอบสูงกว่า

2. **Stator** เป็นส่วนที่อยู่กับที่มีลักษณะเป็นขดลวดพันไว้กับแกนเหล็กหลายๆ ขด



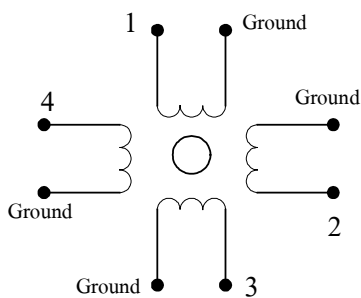
รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบของสเต็ปมอเตอร์

สเต็ปมอเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบ Unipolar และ Bipolar โดยจะมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป ในแต่ละชนิดก็สามารถแยกออกตามลักษณะการต่อได้อีก ซึ่งมีทั้งหมด 5 แบบ คือ

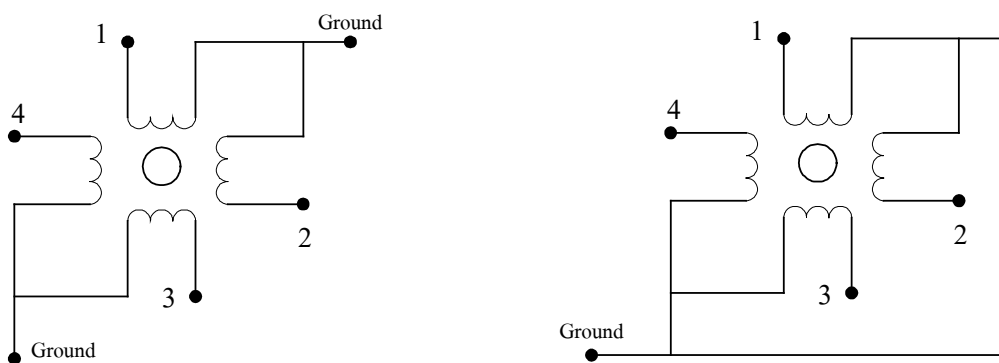
- แบบ Unipolar แบบ 8 สาย จะมีสาย Ground แยกตามขดลวดแต่ละขด สามารถนำสายมาต่อให้เป็นสเต็ปมอเตอร์แบบ Bipolar ได้ ดังรูป (รูปที่แสดงนี้ นำเอาขดลวดมาเพียง 4 ขดลวดต่อการหมุน 1 รอบเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ ซึ่งในความเป็นจริงจะมีขดลวดอยู่หลายขด ขึ้นอยู่กับความละเอียดของมอเตอร์)

- แบบ Unipolar แบบ 6 สาย จะมีสาย Ground 2 ชุดแยกกันชุดละ 2 ขดลวด

- แบบ Unipolar แบบ 5 สาย จะนำสาย Ground ทั้งหมดมาเชื่อมต่อกันจนเหลือเส้นเดียว

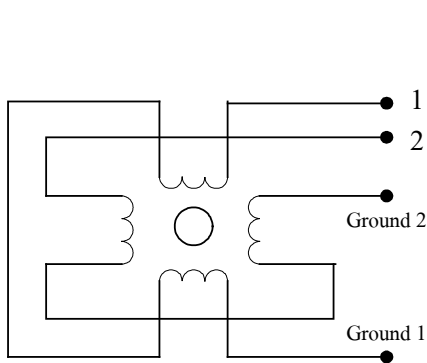


รูปที่ ข.2 สเต็ปมอเตอร์ Unipolar แบบ 8 สาย

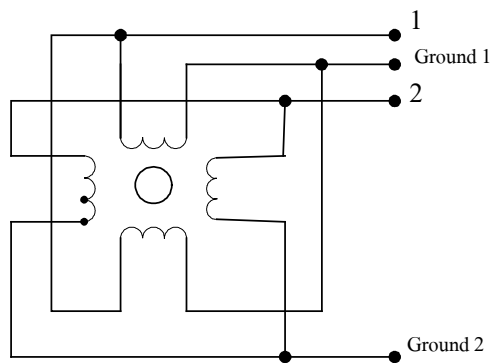


รูปที่ ข.3 สเต็ปมอเตอร์ Unipolar แบบ 6 สาย และ 5 สาย

- แบบ Bipolar จะได้แรงบิดมากกว่าแบบ Unipolar แต่ใช้กระแสไฟมากกว่า โดยจะมีการเชื่อมต่อขดลวด 2 แบบ คือ แบบอนุกรม (Series) ซึ่งจะให้แรงบิดสูงในช่วงความเร็วรอบต่ำแล้วค่อยลดลงเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้น และแบบขนาน (Parallel) ซึ่งจะให้แรงบิดไม่มากเท่ากับแบบอนุกรมแต่จะมีค่าคงที่ตลอดทุกความเร็วรอบ



รูปที่ ข.4 สเต็ปมอเตอร์ Bipolar แบบอนุกรม

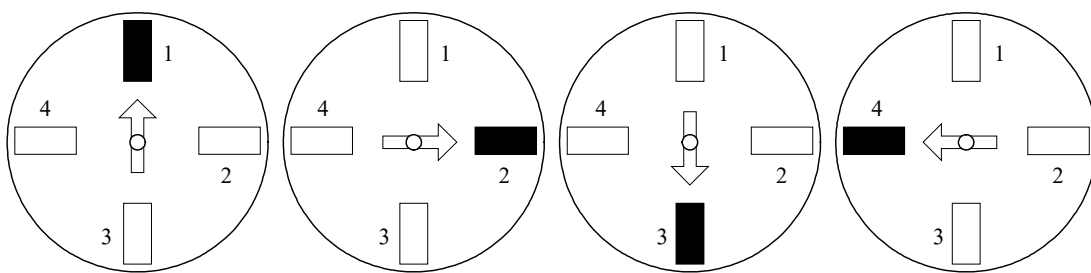


รูปที่ ข.5 สเต็ปมอเตอร์ Bipolar แบบขนาน

การควบคุมสแต็ปมอเตอร์

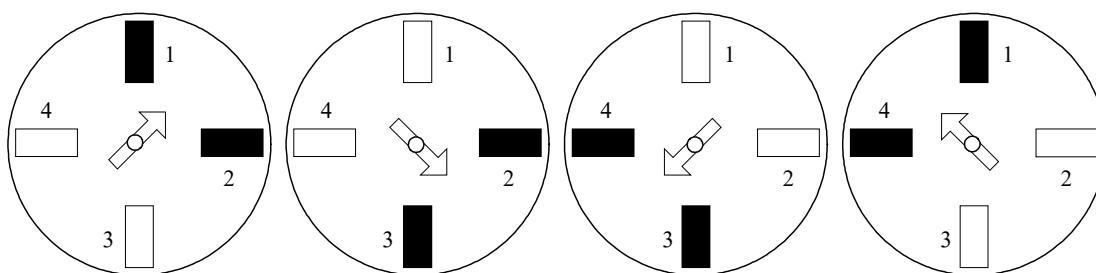
การจ่ายไฟให้สแต็ปมอเตอร์ทำงานมี 4 วิธี คือ

1. **จ่ายไฟแบบ Full step เฟสเดียว** คือ จ่ายไฟให้กับขดลวดที่ละขดเรียงตามลำดับทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาก็ได้ ดังรูปที่ ข.6 มีความละเอียด 90 องศาต่อสแต็ป แรงบิดน้อยเพราะจ่ายไฟให้ขดลวดที่ละหนึ่งขด



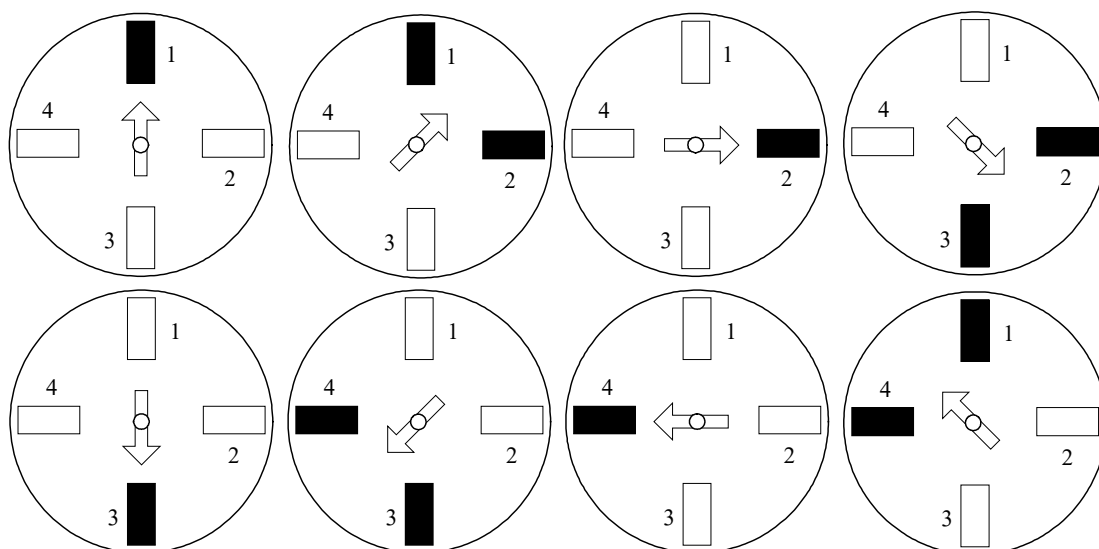
รูปที่ ข.6 จ่ายไฟให้กับสแต็ปมอเตอร์แบบ Full step เฟสเดียว

2. **จ่ายไฟแบบ Full step สองเฟส** คือ จ่ายไฟให้กับขดลวดที่ละสองขดที่ติดกันเรียงตามลำดับทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาก็ได้ ดังรูปที่ ข.7 มีความละเอียด 90 องศาต่อสแต็ป แรงบิดมากกว่าแบบเฟสเดียว 141% เพราะจ่ายไฟให้ขดลวดที่ละสองขด ซึ่งก็ทำให้ใช้กระแสไฟมากกว่าด้วย



รูปที่ ข.7 จ่ายไฟให้กับสแต็ปมอเตอร์แบบ Full step สองเฟส

3. **จ่ายไฟแบบ Half step** คือ การนำเอาการจ่ายไฟแบบที่ 1 และ 2 มารวมกัน ทำให้เพิ่มความละเอียดเป็น 45 องศาต่อสแต็ป แรงบิดจะได้อีกมากกว่าแบบสองเฟส และใช้กระแสไฟมากกว่าต่อการหมุนหนึ่งรอบ ดังรูป



รูปที่ ข.8 จ่ายไฟให้กับสเต็ปมอเตอร์แบบ Half step

4. จ่ายไฟแบบ **Microstepping** เป็นการประยุกต์การจ่ายไฟแบบ Half step เพื่อให้มอเตอร์มีความละเอียดในการหมุนมากขึ้น คือ การจ่ายไฟให้กับขดลวดสองขดที่อยู่ติดกัน โดยมุมบิดของแกนแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การจ่ายไฟให้กับขดลวดแต่ละขด กล่าวคือ ถ้าจ่ายไฟให้ขดที่ 1 มากกว่าแกนแม่เหล็กก็จะชี้เข้าใกล้ขดที่ 1 มากกว่า เช่น จ่ายไฟให้ขดที่ 1 จำนวน 98.1 % ขดที่ 2 จำนวน 19.5% แกนแม่เหล็กจะหมุนไป 1/8 ของสเต็ป เป็นต้น วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถกำหนดความละเอียดในการหมุนได้ว่าจะใช้กี่สเต็ปต่อการหมุน 1 รอบ หรือการหมุนสเต็ปละกี่องศา แต่วงจรการควบคุมจะยุ่งยากซับซ้อนมากขึ้น

ภาคผนวก ค

ตารางข้อมูลผลการทดสอบ

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลรูปที่ 4.1 และ 4.2 การทดสอบอุโมงค์โดยไม่มีแบบจำลองที่ความเร็วต่างๆ

ตำแหน่ง บนผนัง	ความดัน (cm H ₂ O)					
	ความเร็วลม 13.5 m/s		ความเร็วลม 17.0 m/s		ความเร็วลม 29.6 m/s	
	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง
1	-0.1	-0.1	-0.5	-0.5	-1.55	-1.75
2	-0.15	-0.1	-0.6	-0.6	-1.7	-1.8
3	-0.1	-0.15	-0.5	-0.6	-1.5	-1.75
4	-0.05	-0.15	-0.45	-0.6	-1.55	-1.75
5	0	-0.1	-0.4	-0.65	-1.5	-1.95
6	-0.1	-0.15	-0.55	-0.65	-1.4	-1.9
7	-0.1	-0.15	-0.45	-0.65	-1.3	-1.95
8	-0.15	-0.05	-0.6	-0.6	-1.5	-1.95
9	-0.2	-0.15	-0.65	-1	-1.8	-2.6
10	-0.15	-0.1	-0.6	-0.7	-1.8	-2

ตารางที่ ค.2 แสดงค่าความดันที่แตกต่างกันแต่ละจุดบนผนังขณะไม่มีแบบจำลอง

ตำแหน่ง บนผนัง	ความดัน (cm H ₂ O)					
	ความเร็วลม 13.5 m/s		ความเร็วลม 17.0 m/s		ความเร็วลม 29.6 m/s	
	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง
1	-0.1	0	-0.1	0	-0.25	0
2	-0.15	0	-0.2	-0.1	-0.4	-0.05
3	-0.1	-0.05	-0.1	-0.1	-0.2	0
4	-0.05	-0.05	-0.05	-0.1	-0.25	0
5	0	0	0	-0.15	-0.2	-0.2
6	-0.1	-0.05	-0.15	-0.15	-0.1	-0.15
7	-0.1	-0.05	-0.05	-0.15	0	-0.2
8	-0.15	0.05	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2
9	-0.2	-0.05	-0.25	-0.5	-0.5	-0.85
10	-0.15	0	-0.2	-0.2	-0.5	-0.25

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงค่าความดันบนผนังเมื่อทดสอบกับทรงกระบอก

ขนาด 88 mm

ตำแหน่ง บนผนัง	ความดัน (cm H ₂ O)					
	ความเร็วลม 13.5 m/s		ความเร็วลม 17.0 m/s		ความเร็วลม 29.6 m/s	
	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง
1	-0.35	-0.2	-0.65	-0.35	-1.05	-1.05
2	-0.35	-0.2	-0.75	-0.45	-1.25	-1.1
3	-0.3	-0.25	-0.6	-0.55	-1.2	-1.2
4	-0.2	-0.3	-0.75	-0.65	-1.75	-1.4
5	-0.1	-0.4	-0.85	-1.1	-1.95	-2.7
6	-0.5	-0.45	-1.05	-1.05	-2.25	-2.95
7	-0.3	-0.5	-0.9	-1.1	-2	-2.7
8	-0.5	-0.3	-1.2	-1.05	-2.5	-2.75
9	-0.5	-0.45	-1.2	-1.4	-2.5	-3.9
10	-0.45	-0.4	-1	-1.1	-1.75	-2.7

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงค่าความดันบนผนังเมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาด

88 mm หลังจากนำค่าที่ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณ

ตำแหน่ง บนผนัง	ความดัน (cm H ₂ O)					
	ความเร็วลม 13.5 m/s		ความเร็วลม 17.0 m/s		ความเร็วลม 29.6 m/s	
	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง
1	-0.25	-0.2	-0.55	-0.35	-0.8	-1.05
2	-0.2	-0.2	-0.55	-0.35	-0.85	-1.05
3	-0.2	-0.2	-0.5	-0.45	-1	-1.2
4	-0.15	-0.25	-0.7	-0.55	-1.5	-1.4
5	-0.1	-0.4	-0.85	-0.95	-1.75	-2.5
6	-0.4	-0.4	-0.9	-0.9	-2.15	-2.8
7	-0.2	-0.45	-0.85	-0.95	-2	-2.5
8	-0.35	-0.35	-1	-0.95	-2.3	-2.55
9	-0.3	-0.4	-0.95	-0.9	-2	-3.05
10	-0.3	-0.4	-0.8	-0.9	-1.25	-2.45

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงค่าความดันบนผนังเมื่อทดสอบกับทรงกระบอกขนาด
ต่างๆ ที่ความเร็วลม 17 m/s ก่อนและหลังนำค่าที่ทดสอบกับผนังเปล่ามาคำนวณใหม่

ตำแหน่ง บนผนัง	ความดัน (cm H ₂ O)											
	ทรงกระบอกขนาด ϕ 63 mm				ทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm				ทรงกระบอกขนาด ϕ 114 mm			
	ก่อนปรับค่า		หลังปรับค่า		ก่อนปรับค่า		หลังปรับค่า		ก่อนปรับค่า		หลังปรับค่า	
	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง
1	-0.15	-0.4	-0.05	-0.4	-0.15	-0.15	-0.05	-0.15	-0.2	-0.45	-0.1	-0.45
2	-0.25	-0.4	-0.05	-0.3	-0.25	-0.25	-0.05	-0.15	-0.35	-0.5	-0.15	-0.4
3	-0.15	-0.40	-0.05	-0.30	-0.1	-0.36	4E-16	-0.25	-0.4	-0.6	-0.3	-0.5
4	-0.2	-0.55	-0.15	-0.45	-0.25	-0.46	-0.2	-0.35	-0.6	-0.85	-0.55	-0.75
5	-0.25	-0.75	-0.25	-0.6	-0.35	-0.9	-0.35	-0.75	-0.6	-1.5	-0.8	-1.35
6	-0.5	-0.65	-0.35	-0.5	-0.55	-0.85	-0.4	-0.7	-0.85	-1.25	-0.7	-1.1
7	-0.25	-0.8	-0.2	-0.65	-0.4	-0.9	-0.35	-0.75	-0.7	-1.6	-0.65	-1.45
8	-0.5	-0.65	-0.3	-0.55	-0.7	-0.85	-0.5	-0.75	-0.7	-1.3	-0.5	-1.2
9	-0.55	-0.95	-0.3	-0.45	-0.7	-1.2	-0.45	-0.7	-1.15	-1.6	-0.9	-1.1
10	-0.3	-0.75	-0.1	-0.55	-0.5	-0.9	-0.3	-0.7	-0.85	-1.1	-0.65	-0.9

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลรูปที่ 4.9 แสดงค่าความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ เมื่อทดสอบที่
ความเร็วลม 17 m/s

ตำแหน่ง (องศา)	ความดัน (cm H ₂ O)					
	ทรงกระบอกขนาด $\phi 63$ mm		ทรงกระบอกขนาด $\phi 88$ mm		ทรงกระบอกขนาด $\phi 114$ mm	
	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง
0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0
10	0.0	0.0	-0.2	-0.1	-0.2	0.0
20	-0.3	-0.2	-0.6	-0.3	-0.5	-0.2
30	-0.7	-0.6	-1.1	-0.7	-1.0	-0.4
40	-1.1	-1.0	-1.7	-1.2	-1.6	-0.8
50	-1.6	-1.4	-2.4	-1.5	-2.2	-1.3
60	-2.0	-1.7	-2.8	-1.6	-2.8	-1.6
70	-2.2	-1.9	-2.8	-1.6	-3.3	-1.7
80	-2.1	-1.6	-2.6	-1.5	-3.3	-1.7
90	-2.0	-1.7	-2.5	-1.5	-3.2	-1.7
100	-2.0	-1.5	-2.6	-1.5	-3.0	-1.7
110	-2.0	-1.5	-2.6	-1.5	-3.0	-1.6
120	-2.0	-1.6	-2.6	-1.5	-3.0	-1.5
130	-1.9	-1.6	-2.6	-1.5	-3.0	-1.5
140	-2.0	-1.5	-2.6	-1.5	-3.1	-1.5
150	-2.0	-1.7	-2.6	-1.5	-3.2	-1.5
160	-1.9	-1.7	-2.6	-1.5	-3.1	-1.6
170	-1.9	-1.5	-2.6	-1.5	-3.1	-1.6
180	-2.0	-1.6	-2.5	-1.4	-3.0	-1.5
190	-1.9	-1.5	-2.6	-1.4	-3.1	-1.5
200	-1.9	-1.5	-2.6	-1.4	-2.9	-1.5
210	-2.0	-1.7	-2.5	-1.4	-2.9	-1.5
220	-2.0	-1.7	-2.6	-1.5	-2.9	-1.6
230	-2.0	-1.7	-2.5	-1.5	-2.9	-1.6
240	-2.0	-1.7	-2.6	-1.5	-3.0	-1.6
250	-2.1	-1.7	-2.5	-1.5	-3.0	-1.6
260	-2.0	-1.6	-2.5	-1.5	-3.1	-1.6
270	-2.0	-1.7	-2.6	-1.5	-3.2	-1.6
280	-2.1	-1.8	-2.8	-1.5	-3.2	-1.8
290	-2.2	-1.9	-2.8	-1.6	-3.4	-1.9
300	-2.1	-1.8	-2.6	-1.6	-3.2	-1.8
310	-1.8	-1.6	-2.2	-1.3	-2.6	-1.7
320	-1.4	-1.2	-1.6	-1.0	-2.0	-1.3
330	-0.9	-0.8	-1.0	-0.5	-1.3	-0.8
340	-0.5	-0.4	-0.5	-0.3	-0.7	-0.5
350	-0.1	-0.1	-0.2	0.0	-0.2	-0.1

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลรูปที่ 4.10 แสดงค่าความดันรอบผิวทรงกระบอกขนาดต่างๆ เมื่อทดสอบที่
ความเร็วลม 17 m/s

ตำแหน่ง (องศา)	ความดัน (cm H ₂ O)					
	ทรงกระบอกขนาด ϕ 63 mm		ทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm		ทรงกระบอกขนาด ϕ 114 mm	
	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง
0	2.6	2.6	2.6	2.5	2.6	2.5
	2.65	2.65	2.7	2.6	2.7	2.5
	2.9	2.8	3.1	2.8	3	2.7
30	3.3	3.2	3.6	3.2	3.5	2.9
	3.7	3.6	4.2	3.7	4.1	3.3
	4.2	4	4.9	4	4.7	3.8
60	4.6	4.3	5.3	4.1	5.3	4.1
	4.8	4.5	5.3	4.1	5.8	4.2
	4.7	4.2	5.1	4	5.8	4.2
90	4.6	4.3	5	4	5.7	4.2
	4.6	4.1	5.1	4	5.5	4.2
	4.6	4.1	5.1	4	5.5	4.1
120	4.6	4.2	5.1	4	5.5	4
	4.5	4.2	5.1	4	5.5	4
	4.6	4.1	5.1	4	5.6	4
150	4.6	4.3	5.1	4	5.7	4
	4.5	4.3	5.1	4	5.6	4.1
	4.5	4.1	5.1	4	5.6	4.1
180	4.6	4.2	5	3.9	5.5	4
	4.5	4.1	5.1	3.9	5.6	4
	4.5	4.1	5.1	3.9	5.4	4
210	4.6	4.3	5	3.9	5.4	4
	4.6	4.3	5.1	4	5.4	4.1
	4.6	4.3	5	4	5.4	4.1
240	4.6	4.3	5.1	4	5.5	4.1
	4.65	4.3	5	4	5.5	4.1
	4.6	4.2	5	4	5.6	4.1
270	4.6	4.3	5.1	4	5.7	4.1
	4.7	4.4	5.3	4	5.7	4.3
	4.8	4.5	5.3	4.1	5.9	4.4
300	4.7	4.4	5.1	4.1	5.7	4.3
	4.4	4.2	4.7	3.8	5.1	4.2
	4	3.8	4.1	3.5	4.5	3.8
330	3.5	3.4	3.5	3	3.8	3.3
	3.1	3	3	2.8	3.2	3
	2.7	2.7	2.7	2.5	2.7	2.6

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลรูปที่ 4.11 และ 4.13 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับ
ปีกขนาดเล็ก ที่มุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s

ตำแหน่ง บนผนัง	ความดันบนผนัง (cm H ₂ O)					
	มุมปะทะปีก 0 องศา		มุมปะทะปีก 10 องศา		มุมปะทะปีก 20 องศา	
	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง
1	-0.25	-0.3	-0.55	-0.3	-0.5	-0.25
2	-0.4	-0.25	-0.5	-0.25	-0.45	-0.2
3	-0.4	-0.1	-0.45	-0.05	-0.45	-0.05
4	-0.55	-0.1	-0.6	-0.05	-0.65	-0.05
5	-0.5	-0.35	-0.5	-0.3	-0.7	-0.4
6	-0.05	-0.45	-0.7	-0.4	-0.85	-0.55
7	-0.05	-0.35	-0.55	-0.3	-0.8	-0.4
8	-0.05	-0.4	-0.55	-0.4	-0.75	-0.55
9	-0.05	-0.25	-0.6	-0.3	-0.75	-0.45
10	-0.1	-0.3	-0.65	-0.35	-0.75	-0.4

ตารางที่ ค.9 ข้อมูลรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงความดันบนผนังด้านบนและด้านล่าง เมื่อทดสอบกับ
ปีกขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s

ตำแหน่ง บนผนัง	ความดันบนผนัง (cm H ₂ O)					
	มุมปะทะปีก 0 องศา		มุมปะทะปีก 10 องศา		มุมปะทะปีก 20 องศา	
	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง	ผนังบน	ผนังล่าง
1	-0.3	-0.35	-0.3	-0.20	-0.3	-0.20
2	-0.7	-0.20	-0.35	-0.10	-0.35	-0.05
3	-0.3	-0.30	-0.35	-0.10	-0.6	-0.05
4	-0.35	-0.45	-0.5	-0.15	-0.55	-0.10
5	-0.5	-0.65	-0.55	-0.30	-0.55	-0.15
6	-0.5	-0.50	-0.65	-0.25	-0.75	-0.60
7	-0.5	-0.70	-0.55	-0.40	-0.6	-0.40
8	-0.4	-0.60	-0.5	-0.35	-0.6	-0.40
9	-0.2	-0.70	-0.5	-0.40	-0.6	-0.45
10	-0.05	-0.50	-0.4	-0.40	-0.5	-0.45

ตารางที่ ค.10 ข้อมูลรูปที่ 4.14 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดเล็ก ก่อนและหลังการปรับผนัง
ที่มุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s

ตำแหน่ง บนปีก	ความดันบนปีก (cm H ₂ O)					
	มุมปะทะปีก 0 องศา		มุมปะทะปีก 10 องศา		มุมปะทะปีก 20 องศา	
	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง
1	-0.2	-0.2	-4.3	-4	-1.9	-1.8
2	-0.8	-1	0.3	0.3	0.2	0.3
3	-0.9	-0.8	-3.4	-3.2	-1.6	-1.5
4	-1.3	-1.3	0	-0.1	0.1	0
5	-1	-1	-3.1	-2.8	-1.6	-1.4
6	-1.3	-1.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2
7	-1.1	-1	-2.1	-2	-1.7	-1.5
8	-1.2	-1.1	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
9	-0.8	-0.8	-1.4	-1.3	-1.2	-1
10	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2
11	-0.5	-0.5	-0.8	-0.7	-1	-0.8
12	-1	-0.9	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5
13	-0.8	-0.8	-1.1	-1	-1.6	-1.4
14	-0.9	-0.8	-0.5	-0.5	-0.7	-0.6
15	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-1.6	-1.4
16	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.8	-0.6
17	-0.6	-0.5	-0.7	-0.6	-1.6	-1.3
18	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-1.5	-1.2
19	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-1	-0.8

ตารางที่ ค.11 ข้อมูลรูปที่ 4.15 แสดงความดันบริเวณผิวปีกขนาดใหญ่ ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s

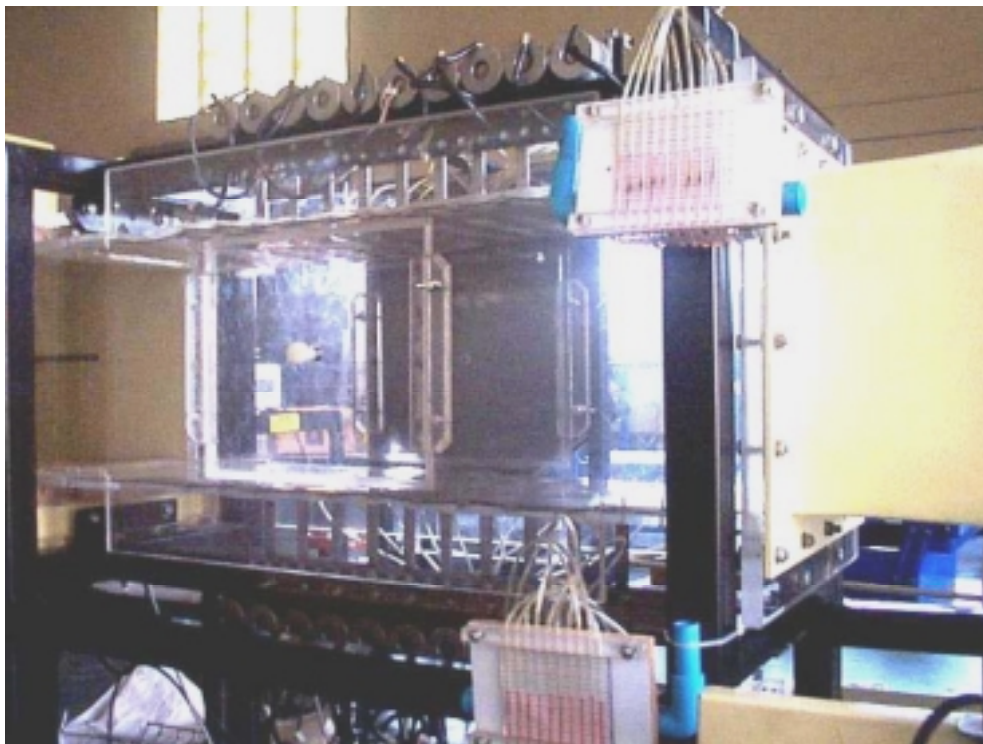
ตำแหน่ง บนปีก	ความดันบนปีก (cm H ₂ O)					
	มุมปะทะปีก 0 องศา		มุมปะทะปีก 10 องศา		มุมปะทะปีก 20 องศา	
	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง
1	-0.4	-0.1	-0.4	0	-0.3	0.1
2	-0.9	-0.4	-0.5	-0.2	0	0.1
3	-0.2	0.8	0.7	0.6	-0.7	-0.5
4	-1.7	-1.1	-2.4	-1.6	-3.1	-1.8
5	-0.7	-0.3	-0.9	-0.4	-1	-0.5

ตารางที่ ค.12 ข้อมูลรูปที่ 4.16 แสดงค่าแรงยกและแรงต้านบนปีกขนาดใหญ่ ก่อนและหลังการปรับผนัง ที่มุมปะทะต่างๆ ความเร็วลม 17 m/s

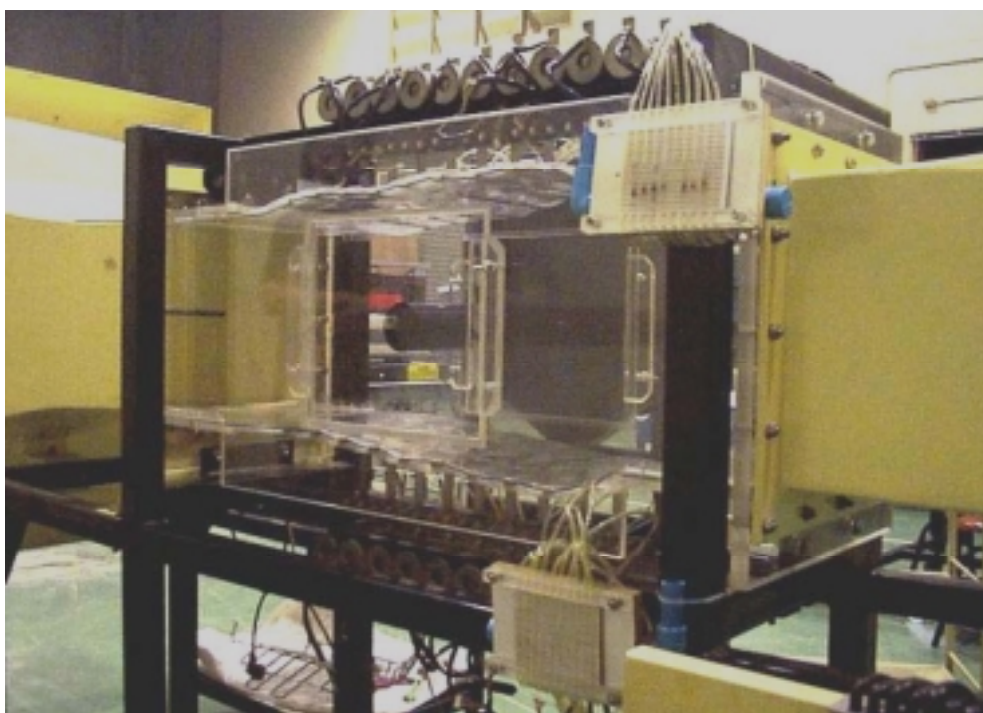
มุมปะทะปีก (องศา)	แรงยก (N)		แรงต้าน (N)	
	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง	ก่อนปรับผนัง	หลังปรับผนัง
0	0.91	0.55	0.37	0.17
10	5.38	4.53	1.13	0.85
20	10.49	7.55	2.63	1.55

ภาคผนวก ง

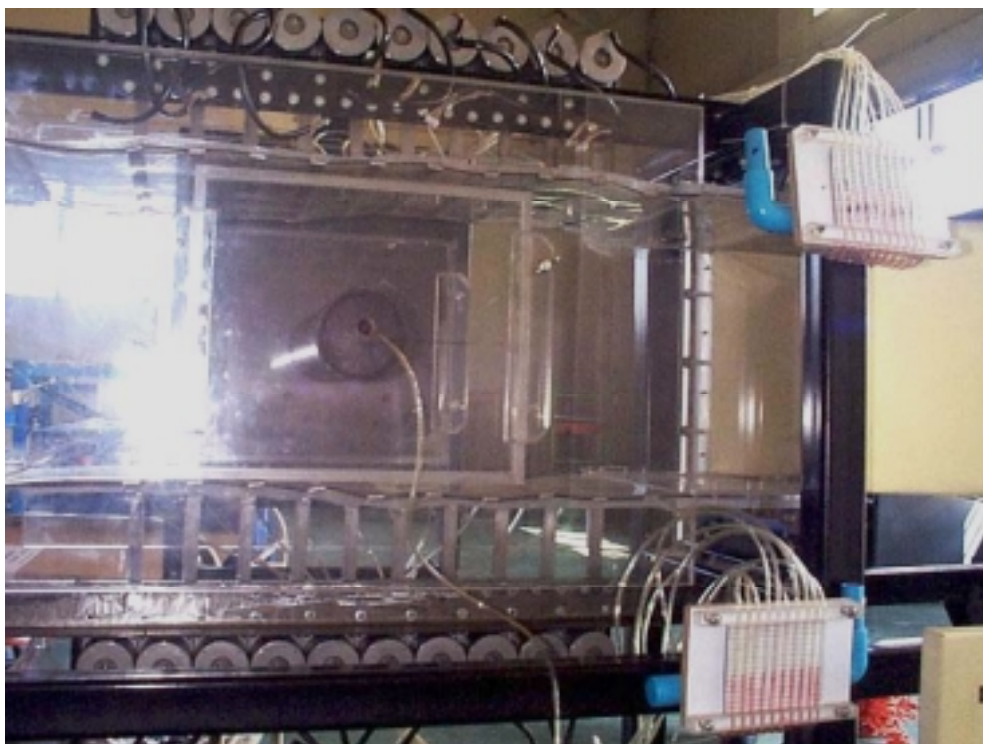
ภาพถ่ายขณะทำการทดสอบ



รูปที่ ง.1 การทดสอบโดยไม่มีแบบจำลอง



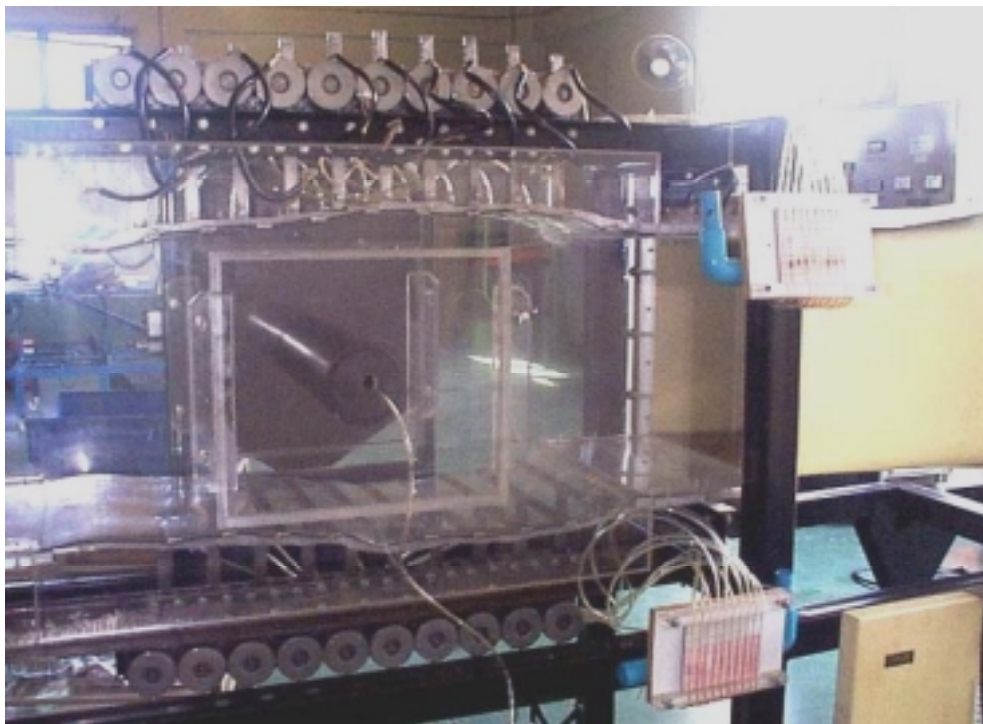
รูปที่ ง.2 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 63 mm



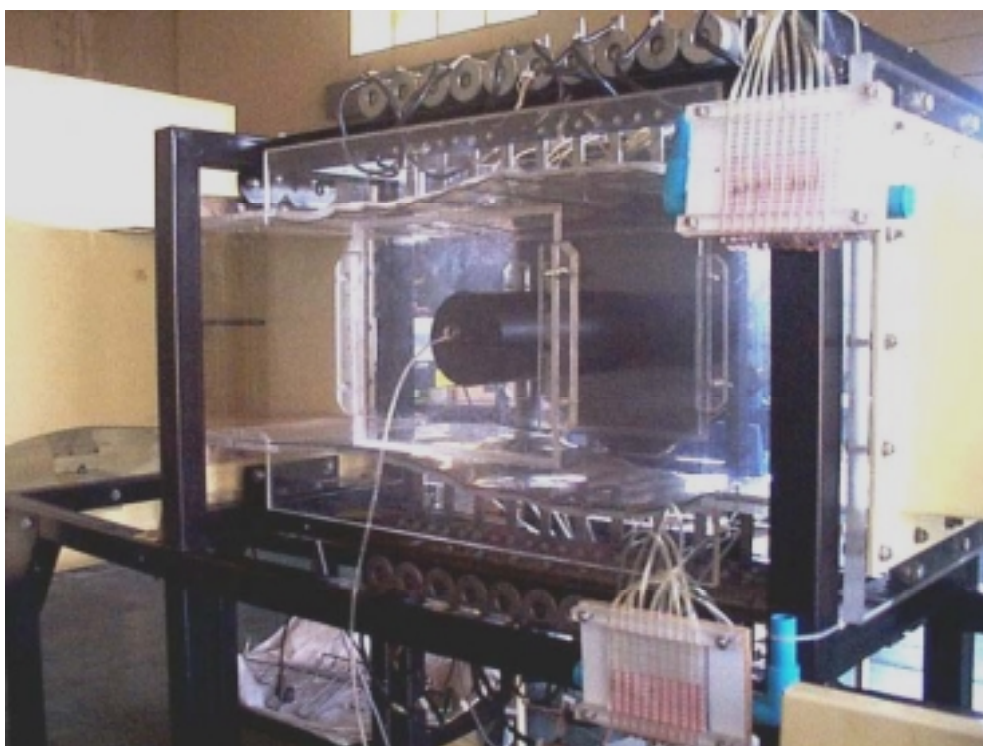
รูปที่ ง.3 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm ที่ความเร็วลม 13.5 m/s



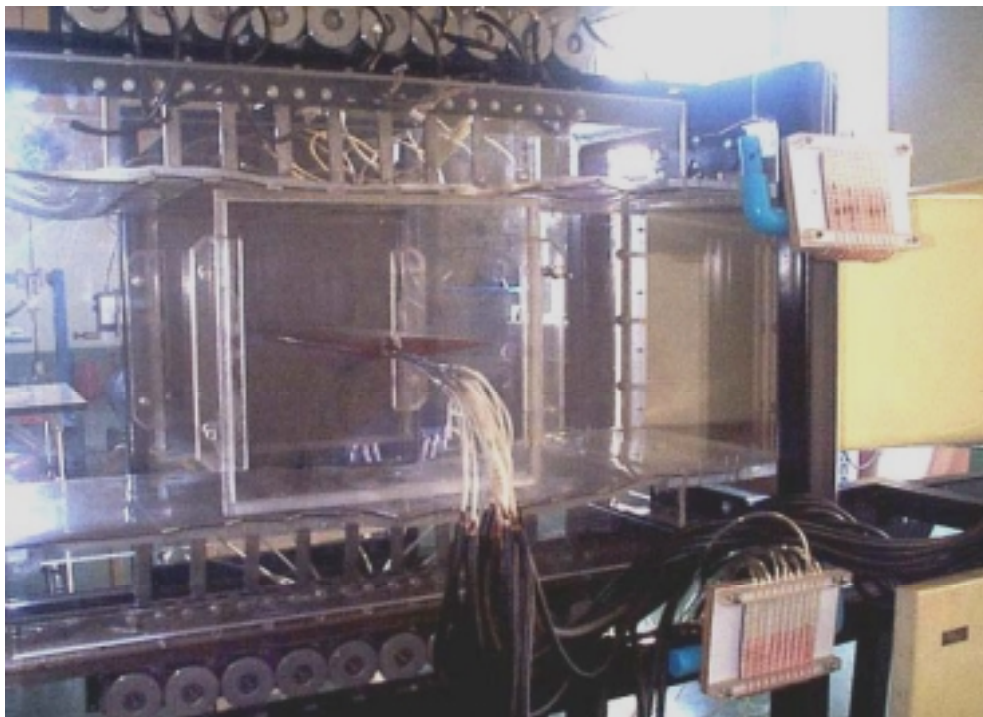
รูปที่ ง.4 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm ที่ความเร็วลม 17 m/s



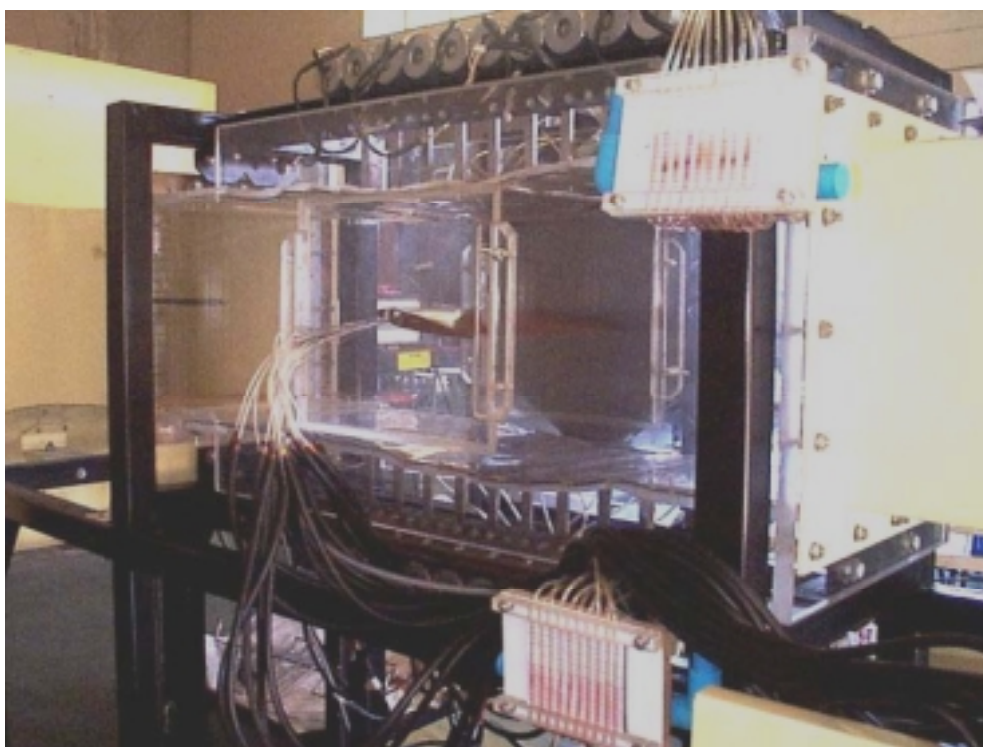
รูปที่ ง.5 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 88 mm ที่ความเร็วลม 29.6 m/s



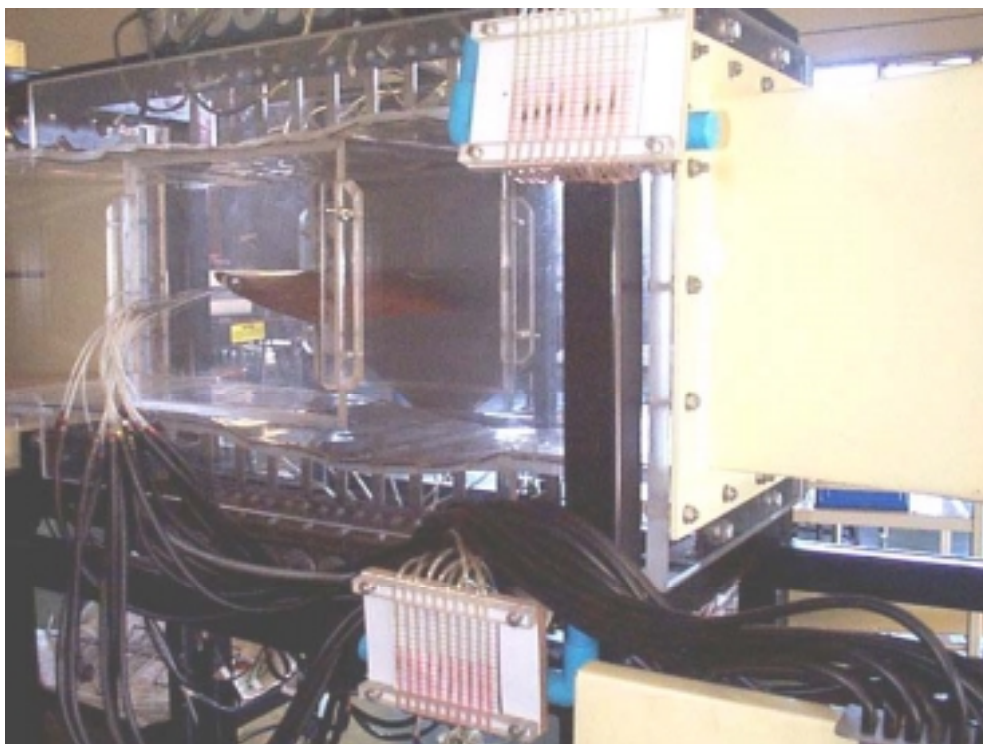
รูปที่ ง.6 การทดสอบกับทรงกระบอกขนาด ϕ 114 mm



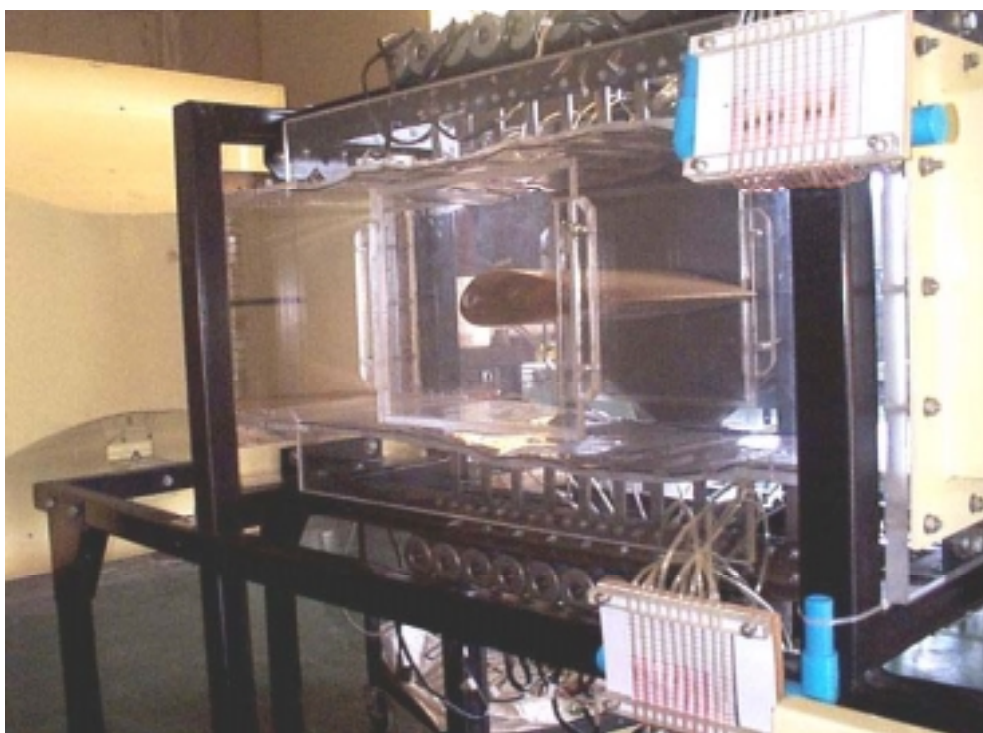
รูปที่ ง.7 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดเล็ก ที่มุมปะทะ 0°



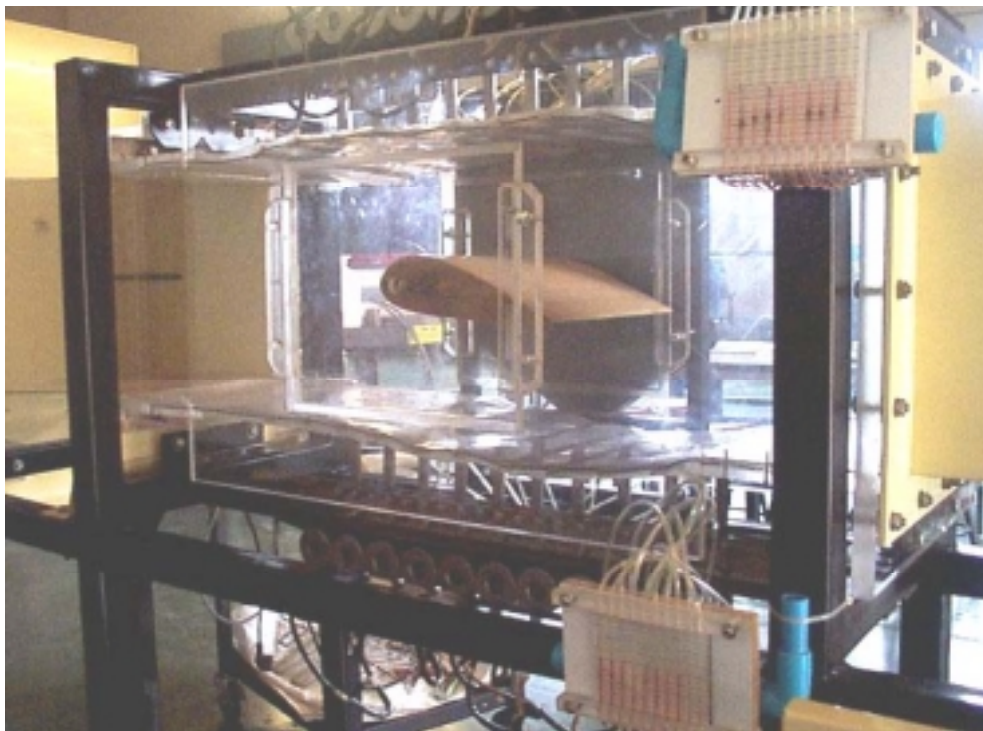
รูปที่ ง.8 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดเล็ก ที่มุมปะทะ 10°



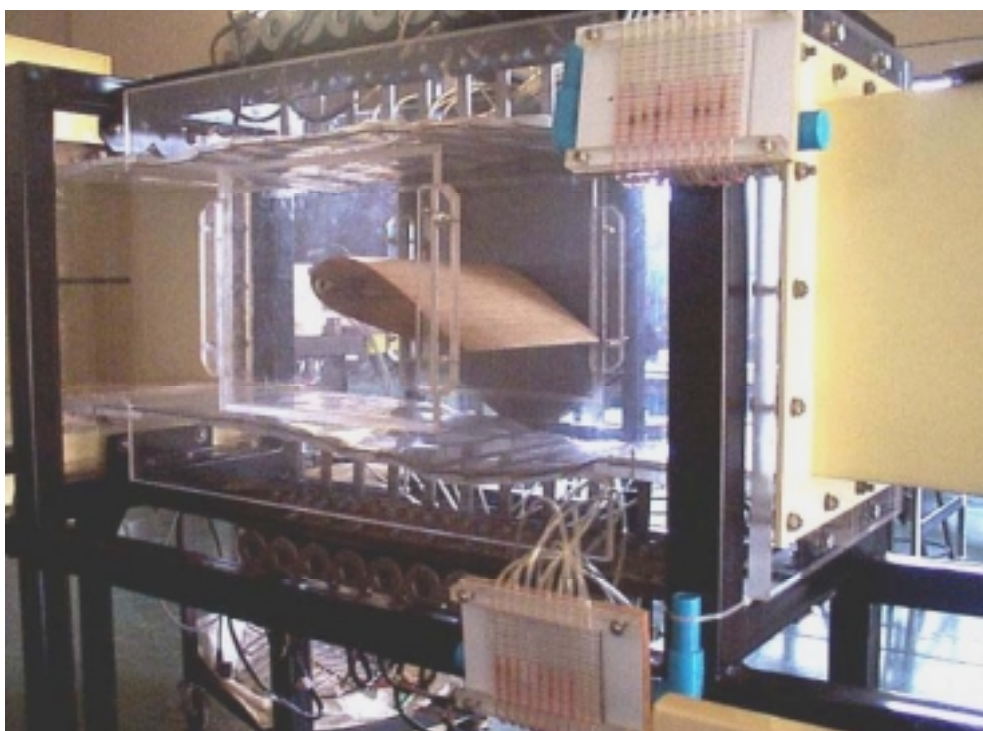
รูปที่ ง.9 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดเล็ก ที่มุมปะทะ 20°



รูปที่ ง.10 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะ 0°



รูปที่ ง.11 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะ 10°

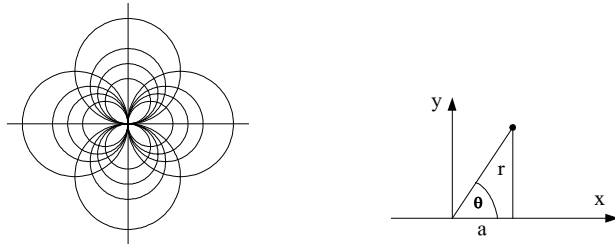


รูปที่ ง.12 การทดสอบกับปีกเครื่องบินขนาดใหญ่ ที่มุมปะทะ 20°

ภาคผนวก จ

การไหลผ่านทรงกระบอก

เมื่อพิจารณาการไหลของอากาศผ่านสมมติฐานที่ใช้คือ ของไหลไม่มีความหนืด และความหนาแน่นของของไหลมีค่าคงที่ โดยใช้การไหลแบบ Doublet uniform flow สำหรับการไหลรอบทรงกระบอก 2 มิติ



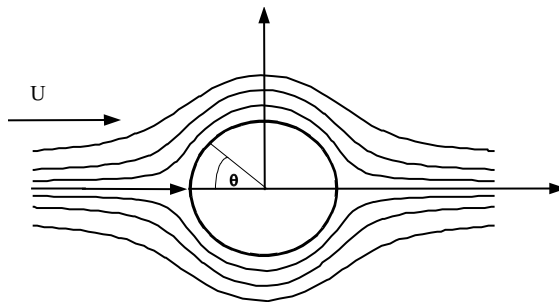
รูปที่ จ.1 Streamline ของการไหลแบบ Doublet

Potential function

$$\phi = Ur \cos \theta + \frac{\mu \cos \theta}{r} \quad (\text{จ.1})$$

Stream function

$$\psi = Ur \sin \theta - \frac{\mu \sin \theta}{r} \quad (\text{จ.2})$$



รูปที่ จ.2 Streamline รอบทรงกระบอก

Streamline ในการไหลแบบคงตัว $\psi = 0$

$$0 = Ur \sin \theta - \frac{\mu \sin \theta}{r} \quad (\text{จ.3})$$

ที่ผิวทรงกระบอก $r = a$ จะได้

$$\mu = Ua^2 \quad (\text{จ.4})$$

แทนค่าในสมการ (จ.1) และ (จ.2)

$$\phi = U \left(r + \frac{a^2}{r} \right) \cos \theta \quad (\text{จ.5})$$

$$\psi = U \left(r - \frac{a^2}{r} \right) \sin \theta \quad (\text{จ.6})$$

ความเร็วของของไหลในแนวสัมผัสกับผิวทรงกระบอก $V = \frac{\partial \psi}{\partial r}$ จะได้

$$V|_{r=a} = U \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \sin \theta|_{r=a} = 2U \sin \theta \quad (\text{จ.7})$$

สำหรับการไหลแบบไม่อัด สมการ Bernoulli

$$\frac{P}{\rho} + gz + \frac{V^2}{2} = \text{Const.} \quad (\text{จ.8})$$

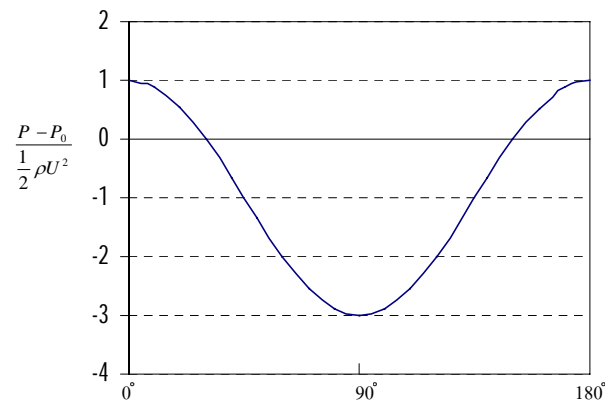
$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} \quad (\text{จ.9})$$

$$P = P_0 + \frac{\rho V_0^2}{2} \left[1 - \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (\text{จ.10})$$

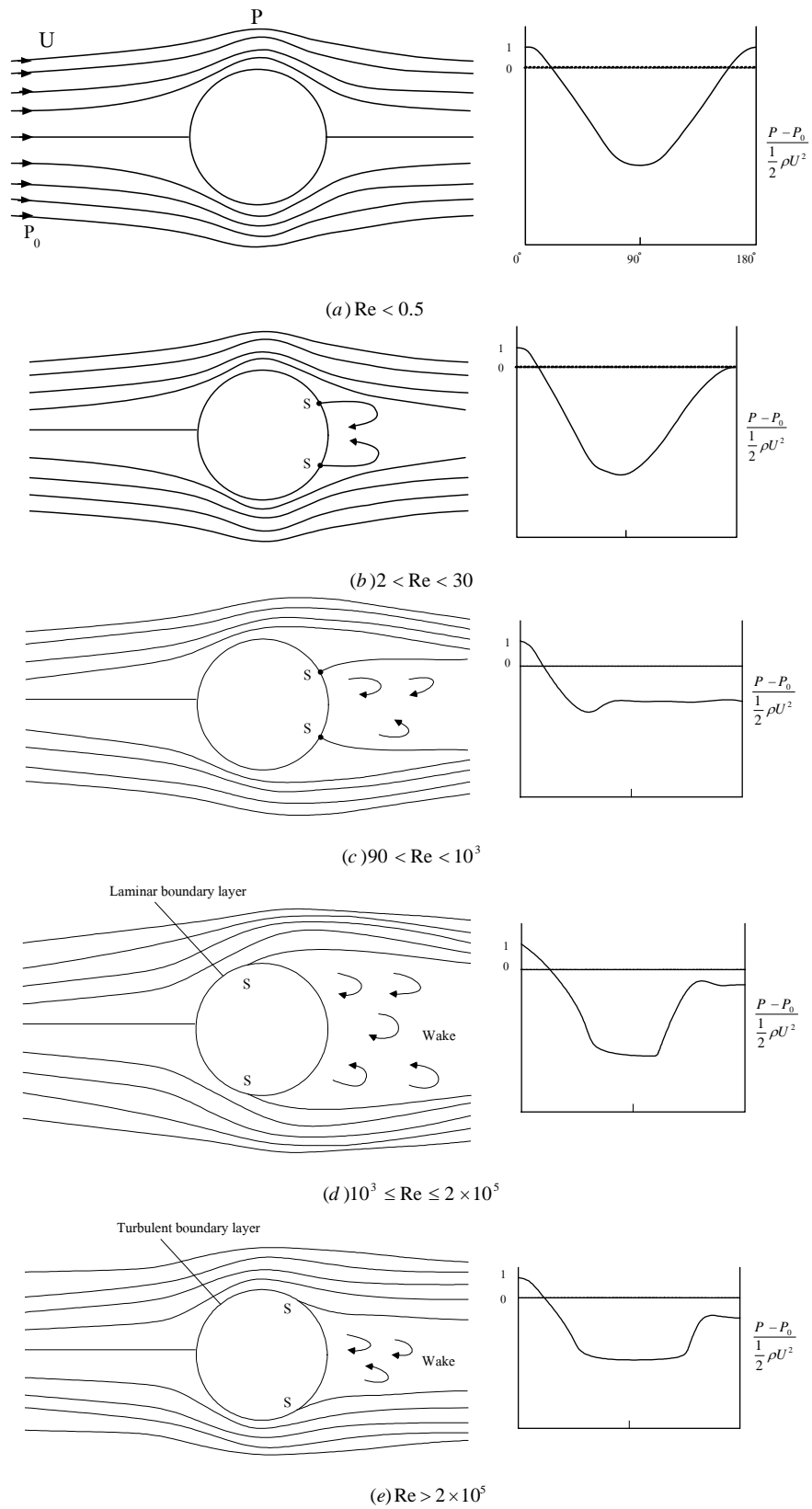
$$P_0 = 0 \text{ และ } V_0 = U$$

แทนค่า (จ.7) ใน (จ.10) จะได้ความดันบริเวณผิวทรงกระบอก

$$P = \rho \frac{U^2}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta) \quad (\text{จ.11})$$



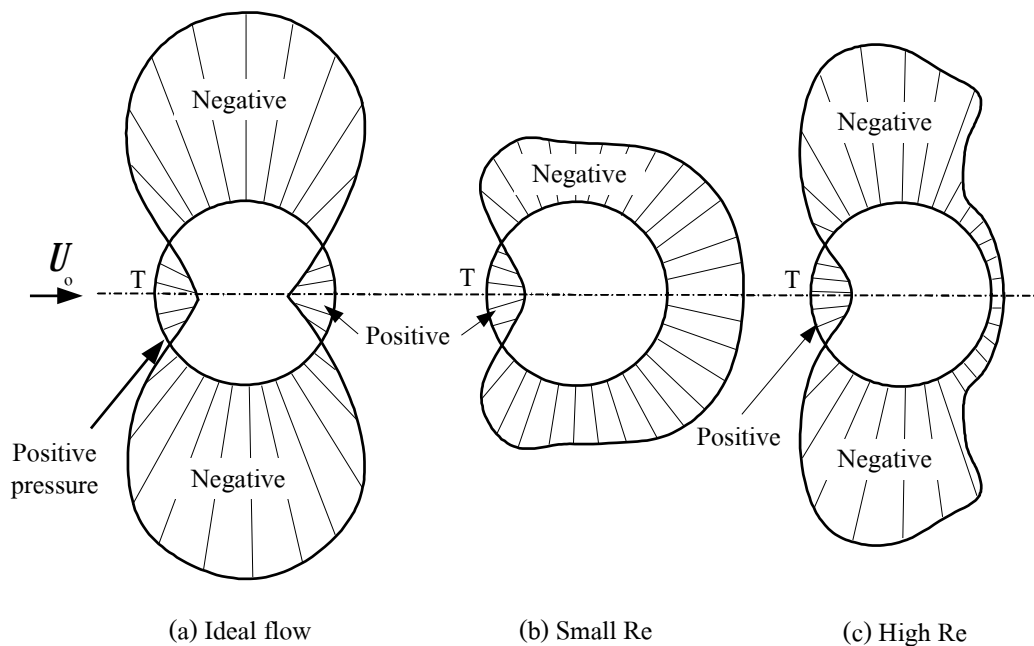
รูปที่ จ.3 แสดงความดันรอบทรงกระบอกสำหรับการไหลทางอุดมคติ



รูปที่ จ.4 แสดงการไหลผ่านทรงกระบอก

การไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกที่ค่า Reynolds number ต่ำมากๆ คือต่ำกว่า 0.5 รูปแบบการไหลจะใกล้เคียงกับการไหลทางอุดมคติ ดังรูปที่ จ.4(a) ค่าความดัน ค่าแรงต้านจะมีค่าน้อยมากจนไม่ต้องนำมาพิจารณา

เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้นระหว่าง 2 ถึง 30 จะเกิด Separation ที่จุด S ดังรูปที่ จ.4(b) การไหลของอากาศจะมีการหมุนวนในลักษณะสมมาตร ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงต้านขึ้นแปรผันตรงกับความเร็วอากาศ และเมื่อ Re มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 90 จะเกิดการแยกตัวของกระแสอากาศอีกด้านหนึ่งของทรงกระบอกดังรูป จ.4(c) ทำให้เกิดการหมุนวนของอากาศสลับไปมาอย่างต่อเนื่อง ถ้า Re มีค่าเพิ่มขึ้นไปจนถึงประมาณ 2×10^5 ขอบเขตชั้นการไหลบริเวณทรงกระบอกจะเกิดความราบเรียบบริเวณด้านที่ปะทะกับอากาศ ดังรูปที่ จ.4(d) หาก Re เพิ่มมากขึ้นไปอีกจะทำให้เกิดการปั่นป่วนบริเวณด้านหน้าทรงกระบอก จุดที่เกิด Separation จะเคลื่อนไปอยู่ด้านหลังมากขึ้น ดังรูปที่ จ.4(e) ลักษณะเช่นนี้จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านลดลง แต่ถ้า $Re > 10^7$ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับ Re



รูปที่ จ.5 แสดงความดันรอบทรงกระบอก

ประวัติผู้เขียน

นายศรัทธา โพธิสว่าง เกิดเมื่อวันที่ 14 มกราคม พุทธศักราช 2518 มีภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่ อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต(วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2540 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีหน้าที่ดูแลรับผิดชอบห้องปฏิบัติการในงานกลุ่มห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล และวิศวกรรมอุตสาหกรรม ในระหว่างการทำงานได้รับฝึกอบรมจนกระทั่งมีความรู้และประสบการณ์ในงานด้านระบบควบคุมนิวแมติกส์, Programmable Logic Control (PLC) และงานด้าน CAD/CAM