

การตรวจสอบประสิทธิผลของเกลียวเฮลิคัลส์ยับยั้งการสั่นบนท่อทรงกระบอก
INVESTIGATION ON EFFECTIVENESS OF HELICAL STRAKE AS A VIBRATION
SUPPRESSION ON CYLINDRICAL TUBE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INVESTIGATION ON EFFECTIVENESS OF HELICAL STRAKE AS A VIBRATION
SUPPRESSION ON CYLINDRICAL TUBE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2020

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การตรวจสอบประสิทธิผลของเกลียวเฮลิคัลส์ยับยั้งการสั่นบนท่อทรงกระบอก

INVESTIGATION ON EFFECTIVENESS OF HELICAL STRAKE AS A VIBRATION

SUPPRESSION ON CYLINDRICAL TUBE

ผู้จัดทำ

1. นาย ธีรภัทร เรืองชาติ รหัสประจำตัว 57010631



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจสอบประสิทธิภาพของเกลียวเฮลิคัลส์ยับยั้งการสั่นบนท่อทรงกระบอก

นายธีรภัทร เรืองชาติ 57010631

รศ.ดร.จรรูวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้ helical strake นั้นถูกใช้เพื่อยับยั้ง vortex induced vibration ในทรงกระบอก ยึดหยุ่นกันอย่างกว้างขวาง ในปฏิญานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจสอบทรงกระบอกเปล่าและทรงกระบอกที่ถูกติดตั้งด้วย helical strake ซึ่งมีระยะพิทช์ที่แตกต่างกันและมีความสูงที่แตกต่างกันเพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพสำหรับการยับยั้ง vortex induced vibration ในปฏิญานิพนธ์นี้พวกเราใช้ทรงกระบอกที่ใช้มี เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ยาว 26.5 ซม. ประกอบด้วยทรงกระบอกที่ถูกติดตั้ง helical strake ที่ระยะพิทช์ 2 ซม. สูง 1 มม. , ระยะพิทช์ 6 ซม. สูง 1 มม. , ระยะพิทช์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. และทรงกระบอกเปล่า โดยการ ทดสอบในอุโมงค์ลมที่เลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086 , 29450.6989 และ 43802.7473 ทำการประเมินผลโดย แอมพลิจูดของการสั่น ผลลัพธ์ที่ได้คือ helical strake สามารถลดแอมพลิจูดการสั่นได้ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989 และ 43802.7473 และสามารถลดแรงจุดได้ทุกค่าเลขเรย์โนลด์ส์

INVESTIGATION ON EFFECTIVENESS OF HELICAL STRAKE AS A VIBRATION SUPPRESSION
ON CYLINDRICAL TUBE

Teerapat Ruangchat 57010631

Assoc. Prof. Dr. Jarruwat Charoensuk Advisor

Year 2563

ABSTRACT

Helical strake has been recently used for suppression vortex induced vibration in flexible cylinder in this thesis present investigation of vortex induced vibration on bare cylinder and cylinder installed with helical strake that has different pitch and different height. In this thesis we used cylinder diameter 20 mm. length 26.5 cm. cylinder installed with helical strake having pitch 2cm. height 2.5mm. , pitch 2cm. height 1mm. , pitch 6cm. height 1mm Bare cylinder was referred as a basic case testing in wind tunnel at Reynold number 19855.6086 29450.6989 and 43802.7473 we evaluate result by amplitude of vibration as a result helical strake can reduce amplitude at Reynold number 29450.6989 and 43802.7473 and can reduce drag force at all Reynold number

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือในด้าน คำแนะนำ การตรวจแก้ไข ตลอดจนการติดตามความก้าวหน้าในการทำปริญญาานิพนธ์ การ ดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีและสม่ำเสมอตลอดการทำปริญญาานิพนธ์นี้จาก รองศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของท่านเป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จรรูวัตร เจริญสุข ในเรื่องของการให้ยืม อุปกรณ์คอมพิวเตอร์และให้ความรู้ คำแนะนำ ถึงวิธีการใช้งานคอมพิวเตอร์

นายธีรภัทร เรืองชาติ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV-V
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII-VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3-4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
3.1 อากาศพลศาสตร์	5
3.2 คุณสมบัติของของไหล	5
3.3 ความหนืด	5-6
3.4 ค่าความหนาแน่น	6
3.5 ค่าเลขเรย์โนลส์	6-7
3.6 lock-in	7-8
3.7 vortex shedding	7-9

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.8 เลขมัท	9
3.9 แรงต้าน	10
3.10 แรยยกและแรยกด	10-11
3.11 การไหลแบบยุบตัวได้และยุบตัวไม่ได้	11
3.12 อุโมงค์ลม	11-12
บทที่ 4 การดำเนินการทดลอง	13
4.1 ข้อมูลทางเทคนิคอุโมงค์ลม	13
4.2 โหลดเซลล์	13-14
4.3 การคำนวณความเร็วลม	15
4.4 ผลการสอบเทียบอุโมงค์ลม	17
4.5 ขั้นตอนการทดลอง	18
4.6 ผลลัพธ์จากการทดลอง	19-24
4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	25-27
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	28
5.1 สรุปผลการทดลอง	28-29
5.2 ข้อเสนอแนะ	29
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก	31-34

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	2
4.1 ตารางแสดงผลการสอบเทียบอุโมงค์ลม	17
4.2 ตารางแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	26
4.3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยแรงต้าน	27



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงการไหลของของไหลภายใต้ความเค้นเฉือน	6
3.2 การไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน	7
3.3 ความถี่ของ vortex shedding กับความเร็วลมที่พัดผ่านโครงสร้าง	8
3.4 ผลของการเกิด vortex shedding เมื่อมีแรงลมพัดไหลผ่านโครงสร้าง	9
3.5 อุโมงค์ลมแบบวงจรมเปิด	12
3.6 อุโมงค์ลมแบบผ่านคนเดียว	12
4.1 อุโมงค์ลมภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล	13
4.2 โหลดเซลล์ AFT FORE และ DRAG	14
4.3 รูป Free body diagram อุโมงค์ลม	14
4.4 หน้าจอแสดงผลแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์	15
4.5 Pitot tube ภายในอุโมงค์ลม	15
4.6 ผลต่างของระดับน้ำขณะไม่มีความเร็วลม	16
4.7 ผลต่างของระดับน้ำขณะมีความเร็วลม	17
4.8 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส 19855.6086	19
4.9 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส 29450.6989	19
4.10 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส 43802.7473	20
4.11 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส 19855.6086	20
4.12 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส 29450.6989	21
4.13 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส 43802.7473	21
4.14 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส 19855.6086	22
4.15 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส 29450.6989	22

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทช์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส์ 43802.7473	23
4.17 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทช์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส์ 19855.6086	23
4.18 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทช์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส์ 29450.6989	24
4.19 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทช์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์ โนลด์ส์ 43802.7473	24
4.20 แสดงค่า Drag ณ.เวลาต่างๆและแสดงค่า Drag เฉลี่ย	25
4.21 กราฟแท่งแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	26
4.22 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยแรงต้าน	27
5.1 กราฟแท่งแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	28
5.2 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยแรงต้าน	28

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

F_L คือ แรงยก (N)

F_D คือ แรงต้าน (N)

V คือ อัตราเร็วของของไหล (m/s)

A คือ พื้นที่ที่วัตถุประทะกับของไหล (m^2)

m คือ มวล (kg)

μ คือ ความหนืดสมบูรณ์ของของไหล (Ns/m^2)

C_L คือ สัมประสิทธิ์แรงยก

C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน

M คือ Mach number

P_s คือ ความดันสถิต (N/m^2)

P_d คือ ความดันจลน์ (N/m^2)

P_t คือ ความดันรวม (N/m^2)

τ คือ ความเค้นเฉือน (N/m^2)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

L_c คือ Characteristic length

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เมื่อของไหลเช่น น้ำ อากาศ ไหลผ่านวัตถุป้านเช่นทรงกระบอกนั้นจะทำให้เกิดกระแสนวนข้างหลังซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลผ่านวัตถุประเภท streamlinebody โดยในปัจจุบันวัตถุป้านได้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางในงานทางวิศวกรรม เช่น ปล่องควัน หอคอย งาน offshore เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะต้องเผชิญหน้ากับการที่ของไหลไหลผ่านซึ่งหากของไหลไหลผ่านโครงสร้างแล้วจะเกิดกระแสนวนข้างหลังดังที่กล่าวไปข้างต้นนั้นจะทำให้โครงสร้างดังกล่าวเกิดการสั่นได้โดยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า vortex induced vibration การสั่นสะเทือนของโครงสร้างนั้นอาจจะเป็นสาเหตุให้โครงสร้างเสียหายหรือพังได้รวมถึงการสั่นจะเป็นการเร่งให้โครงสร้างเกิดความล้าเร็วขึ้นโดยสาเหตุการเกิดการสั่นนั้นมีหลายปัจจัยเช่น ความเร็วของของไหล ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ รูปร่างและพื้นผิวของโครงสร้าง เป็นต้น โดยในปัจจุบันนั้นวิธีในการควบคุมการสั่นนั้นแบ่งได้เป็น 3 วิธีคือ 1. Passive control method 2. Active control method 3. Compound control method และวิธีที่เราจะทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ helical strake ซึ่งจัดเป็น Passive control method โดยในปัจจุบันนั้นวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางมากเพราะไม่จำเป็นต้องป้อนพลังงานจากภายนอกเข้าไป และมีต้นทุนที่ถูกซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะศึกษาถึงระยะพิทช์ของ helical strake และความสูงของ helical strake นั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการยับยั้งการเกิด vortex induced vibration หรือไม่โดยในงานวิจัยจะทำการทดสอบโดยใช้อุโมงค์ลม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาว่าการทำให้ระยะพิทช์ของ helical strake และความสูงแตกต่างกันนั้นจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการช่วยยับยั้งการสั่นของ helical strake หรือไม่และนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับ helical strake ที่มีระยะพิทช์และความสูงต่างกัน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ออกแบบทรงกระบอกเปล่าและทำการออกแบบทรงกระบอกที่มีการติดตั้ง helical strake ที่มีระยะพิทช์และความสูงที่แตกต่างกัน
2. ทำการสร้างโมเดลชิ้นงานที่จะใช้ทำการทดสอบ
3. ทำการทดสอบภายในอุโมงค์ลม ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ และสรุปผล

1.4 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	←→				
ศึกษาการใช้งานอุโมงค์ลม			←→		
ทดสอบความถูกต้องของอุโมงค์ลม					←→
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
เตรียมแบบจำลองที่ติดตั้ง helical strake และที่ไม่ติดตั้ง	←→				
ทำการทดลองในอุโมงค์ลมและเก็บค่าที่ได้			←→		
สรุปผลการทดลอง					←→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงข้อเท็จจริงว่าการที่ระยะพิทช์และความสูงของ helical strake แตกต่างกันนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการช่วยยับยั้งการสั่นหรือไม่และหากเปลี่ยนระยะพิทช์และความสูงแล้วผลที่ได้จะเปลี่ยนไปหรือไม่
2. สามารถนำความรู้นี้ไปใช้ต่อยอดกับงานวิจัยในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Investigation on the effectiveness of helical strakes in suppressing VIV of flexible riser ทำโดย Lee Kee Quen และคณะ เป็นงานวิจัยที่ได้ทำการทดสอบว่าระยะพิทซ์ (p) และความสูงของ helical strake (h) ที่แตกต่างกันนั้นจะมีประสิทธิผลแตกต่างกันหรือไม่ โดยมีรายละเอียดการทดลองกล่าวคือแบบจำลองทรงกระบอกที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) 18 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (d) 13 มิลลิเมตร ยาว 2.92 เมตร ใช้ของไหลเป็นน้ำ โดยทำการทดลองในอ่างขนาด ยาว 100 เมตร กว้าง 7.8 เมตร ลึก 4.35 เมตร โดยติดตั้ง ทรงกระบอกในแนวนอนและจมลงมาจากระดับผิวน้ำ 0.35 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงอิทธิพลของ free surface โดยทำในช่วง subcritical Reynold number 1380-13800 ความเร็ว 0.1-1.0 เมตร ต่อวินาที โดยความจะเพิ่มขึ้นช่วงละ 0.3 เมตรต่อวินาที โมเดลทรงกระบอกที่ใช้ทำจาก PVC ติดตั้งเป็น 3 strand helical strake และทำการวิเคราะห์ความถี่โดยใช้ Fast Fourier transform (FFT) ได้ผลการทดลองว่าการเปลี่ยนระยะพิทซ์นั้นช่วยลดแอมพลิจูดของการสั่นได้น้อยและระยะพิทซ์ที่มากช่วยชะลอการเกิดการล็อก (lock-in) ได้นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่า stake ที่ความสูงมากมีประสิทธิภาพในการช่วยยับยั้ง vortex induced vibration ได้ดีกว่าและผลที่ได้คือแบบจำลอง $p=10D$ $h=0.05D$ นั้นล้มเหลวในการลดแอมพลิจูดและความถี่ แบบจำลอง $p=10D$ $h=0.1D$ ตรงกันข้ามโดยสามารถยับยั้งการเกิด high mode frequency ที่ความเร็วสูงได้ และอันที่มีประสิทธิภาพในการช่วยลดความถี่และแอมพลิจูดได้มากที่สุดคือแบบจำลอง $p=10D$ $h=0.15D$ และยังพบว่าค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกระบอกที่ติดตั้ง strake แล้วมีค่าต่ำกว่าทรงกระบอกเปล่า ซึ่งแตกต่างจากการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้

2. Analysis of flow over a circular cylinder fitted with helical strakes ทำโดย Ranjith E R และคณะ เป็นงานวิจัยที่ทดสอบว่าการติดตั้ง helical strake นั้นจะช่วยยับยั้งการเกิด vortex induced vibration ได้มีประสิทธิภาพเท่าไรโดยทำการทดสอบด้วยวิธีการจำลองเชิงตัวเลขและทำที่เลขเรย์โนลด์ส์ 100 และ 28000 โดย strake ที่ติดตั้งบนทรงกระบอกคือ 3 strand helical strake และทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 40 มิลลิเมตร มีระยะพิทซ์ 10D และสูง 0.15D ซึ่งจากผลการจำลองด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและค่า Strouhal number นั้นมีค่าลดลง ทั้งที่เลขเรย์โนลด์ส์ 100 และ 28000 หลังจากติดตั้ง strake แต่ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านนั้นเพิ่มขึ้น

3. On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes จัดทำ โดย T. Zhou และคณะ ได้ทำการทดสอบการยับยั้งการเกิด vortex induced vibration โดยใช้ ทรงกระบอกทำจากอลูมิเนียมกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง(D) 80 มิลลิเมตร ยาว 1600 มิลลิเมตร ติดตั้ง three strand helical strake โดยมี $p=10D$ $h=0.12D$ โดยทำการทดสอบด้วยอุโมงค์ลม และทำการวัดแอมพลิจูดด้วย Linear variable differential transform (LVDT) laser และวัด ความถี่โดยใช้ Fast Fourier transform (FFT) โดยผลลัพธ์ที่ได้คือทรงกระบอกเปล่า การ lock-in เกิดขึ้นและแอมพลิจูดการสั่นมาก แต่หลังจากติดตั้ง strake ไปแล้วแอมพลิจูดการสั่นลดลง และไม่เกิดการ lock-in ขึ้น

จากข้อมูลที่สำรวจได้ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตในการดำเนินโครงการโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. จากงานวิจัย[2] และ [3] ทำให้กำหนดโครงการได้ว่าจะทำการทดลองว่าการติดตั้ง helical strake นั้นช่วยยับยั้งการสั่นของทรงกระบอกได้จริงหรือไม่
2. จากงานวิจัย [1] นั้นได้ทำการทดสอบโดย helical strake แต่ละอันจะมีระยะพิทช์และความสูงที่ต่างกันโดยใช้ของไหลเป็นน้ำโดยในโครงการนี้จะทำการทดสอบว่าหากเปลี่ยนของไหล เป็นอากาศแทนจะได้ผลลัพธ์แตกต่างจากของไหลเป็นน้ำในงานวิจัย [1] หรือไม่

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 อากาศพลศาสตร์

อากาศพลศาสตร์(Aerodynamics)เป็นวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับอากาศที่เคลื่อนที่อยู่ด้านในหรือด้านรอบนอกวัตถุ ตัวอย่างเช่น ปีกของเครื่องบิน โดยทั่วไปเรียกว่าพลศาสตร์ของไหล(Fluid dynamics)เพราะเนื่องจากว่าอากาศก็จัดว่าเป็นของไหลชนิดหนึ่ง โดยในขณะที่อากาศไหลท่วมผ่านวัตถุนั้นจะเกิดแรงกระทำกับวัตถุขึ้น 2 แรงคือ แรงต้าน(Drag force)และแรงยก(Lift force) โดยทั้ง2แรงที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการวิ่งของรถ

โดยจากที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นเราสามารถลดแรงต้าน(Drag force)และเพิ่มแรงยก(Lift force)ได้โดยอาศัยหลักอากาศพลศาสตร์

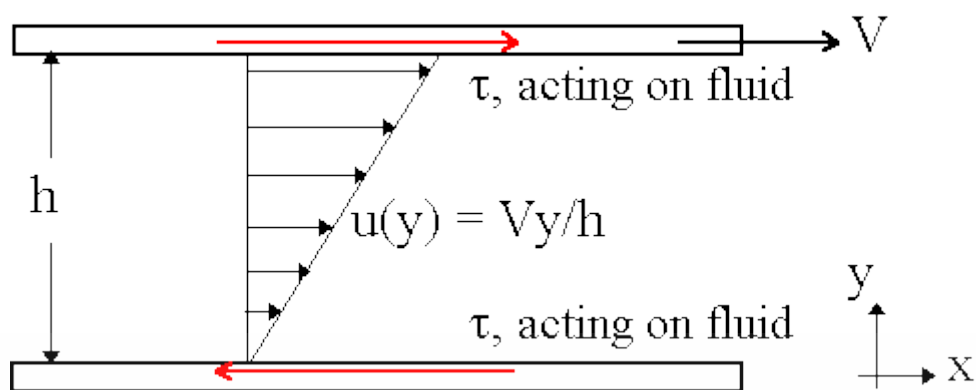
3.2 คุณสมบัติของของไหล

ของไหล คือสสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างด้วยความเค้นเฉือน หรือสสารที่ไม่สามารถต้านทานแรงเฉือนได้หากของไหลอยู่นิ่งในตอนแรก แต่เมื่อมีแรงเฉือนมากกระทำของไหลของไหลต้องมีการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับแรงเฉือน แต่ถ้าของไหลเคลื่อนที่อยู่แล้วต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ส่วนจะเป็นในทิศใดนั้นขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของแรงเฉือน

3.2.1 ความหนืด

ความหนืด คือค่าที่บอกถึงคุณสมบัติการต้านการไหลในตัวของไหล ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปจากการกระทำ โดยแรงเฉือนยิ่งหนืดมากก็ยิ่งมีแรงต้านการไหลมาก โดยแรงต้านนี้เกิดจากความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวขนานกับการไหล โดยความเค้นเฉือนหาจากสมการ

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{V}{h} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1 แสดงการไหลของของไหลภายใต้ความเค้นเฉือน

3.2.2 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นสมบัติเฉพาะของสารโดยทั่วไปจะหมายถึงปริมาณมวลของสารต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรโดยในการศึกษาเกี่ยวกับของไหลสามารถกำหนดให้ความหนาแน่นของของไหลเป็นค่าคงที่เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

3.3 ค่าเลขเรย์โนลด์ส์

ค่าเลขเรย์โนลด์ส์เป็นค่าอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย(Inertia force)กับแรงหนืด(Viscous force)ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่สามารถหาได้จากสมการ

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (3.2)$$

โดย ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

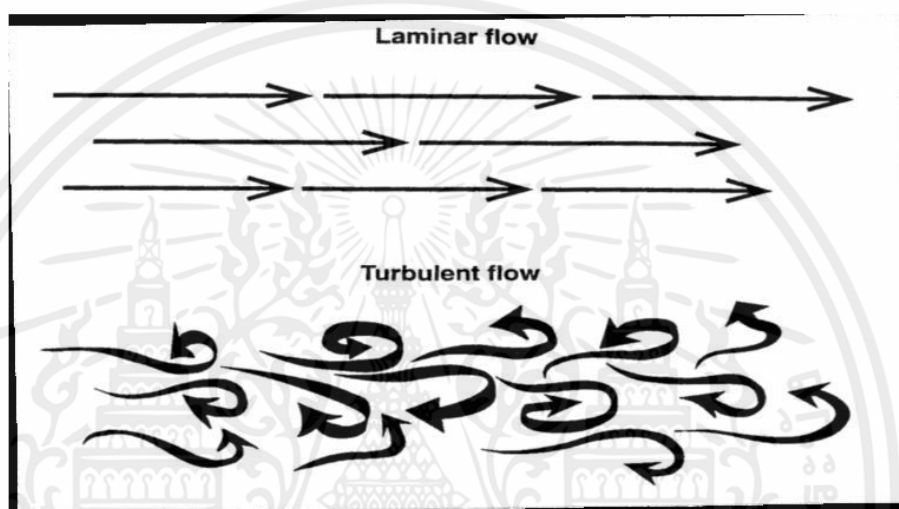
V คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

μ คือ ความหนืดของของไหล (Ns/m^2)

l คือ characteristic length (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

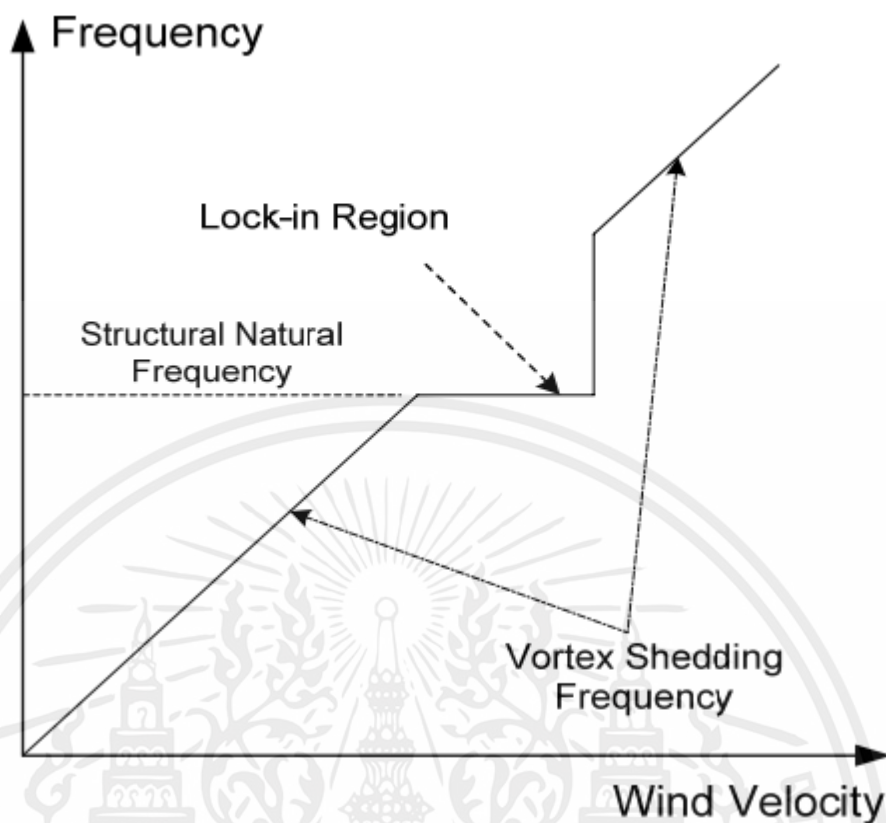
การไหลที่มีความหนืดสูงก็แสดงว่ามีความต้านทานการไหลสูงซึ่งหมายความว่าถ้าการไหลเปลี่ยนขนาดหรือทิศทาง การไหลถูกหน่วงหรือต้านทานด้วยแรงเสียดทานที่สูงทำให้การไหลกลับมาอยู่ในลู่วางเดิมหรือเปลี่ยนไปได้เพียงเล็กน้อยเรียกการไหลแบบนี้ว่า “การไหลแบบราบเรียบ(Laminar flow)” แต่ถ้าหากมีค่าความหนืดต่ำ แรงฉุดการไหลและแรงต้านทานการออกนอกลู่ทางของการไหลก็น้อยของไหลจึงสามารถออกนอกลู่ทางได้ง่ายขึ้น เรียกการไหลแบบนี้ว่า “การไหลแบบปั่นป่วน(Turbulent flow)”



รูปที่ 3.2 การไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน [Ref5]

3.4 Lock-in

ถ้าโครงสร้างนั้นเกิดการสั่นและความถี่ของ vortex shedding ตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) โครงสร้างจะเข้าสู่สถานะที่เรียกว่า lock-in หรือเรียกอีกอย่างว่าการสั่นพ้องซึ่งการเกิดขึ้นของปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้



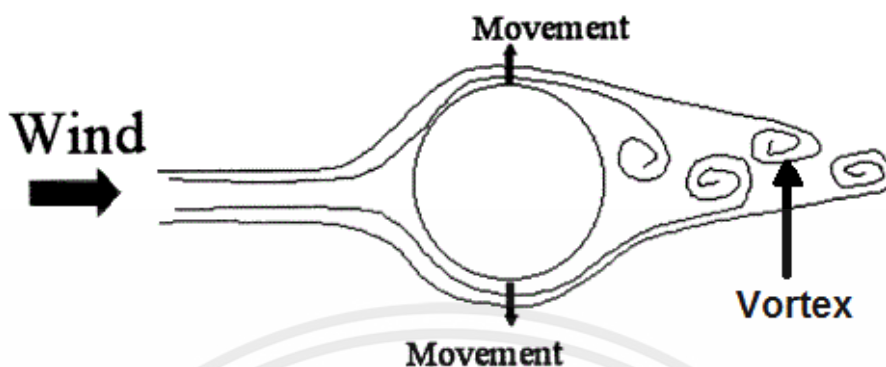
ภาพที่ 3.3 ความถี่ของ Vortex Shedding กับความเร็วลมที่พัดผ่านโครงสร้าง [Ref6]

3.5 Vortex shedding

Vortex shedding คือปรากฏการณ์ที่เมื่อลมไหลผ่านโครงสร้าง vortices จะเกิดขึ้นข้างหนึ่งและสลับไปมากับอีกข้างและในส่วนของความดันต่ำ (Low pressure zone) จะถูกสร้างขึ้นข้างล่างจนก่อให้เกิด fluctuating force กระทำกับโครงสร้างในมุมที่เหมาะสมกับทิศทางลมและทำให้โครงสร้างเกิดการสั่นขึ้นสำหรับการเกิด vortex shedding นั้นหากความถี่ของ vortex shedding นั้นไปตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างแล้วจะทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างเสียหายได้โดยการเกิด vortex shedding นั้นขึ้นกับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความเร็วลม รูปร่างของโครงสร้าง เป็นต้น ดังนั้นเราจึงพยายามหลีกเลี่ยงไม่ให้ความถี่ของ vortex shedding ไปตรงกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างรวมถึงการออกแบบโครงสร้างเพื่อรบกวนการเกิด vortex shedding โดยความถี่ของ vortex shedding เราสามารถคำนวณได้ตามสมการนี้ [Ref6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_s = \frac{SU}{D} \quad (3.3)$$



ภาพที่ 3.4 ผลของการเกิด Vortex Shedding เมื่อมีแรงลมไหลผ่านโครงสร้าง

โดย

F_s คือ ความถี่ของ vortex shedding

S คือ Strouhal number

U คือ ความเร็วของลม

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก

3.6 เลขมัค

โดยทั่วไปกำหนดให้ของไหลที่มีค่าเลขมัคตั้งแต่ 0.3 ขึ้นไปเป็นการไหลแบบอัดตัวได้ ส่วนของไหลที่มีค่าเลขมัคน้อยกว่า 0.3 ถือว่าเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้

$$M = \frac{V}{C} \quad (3.4)$$

โดย M คือ เลขมัค (ไร้หน่วย)

V คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

C คือ ความเร็วเสียง (ประมาณ 343 เมตรต่อวินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 แรงต้าน

เป็นแรงที่กระทำตรงข้ามกับแรงที่ขับเคลื่อนวัตถุไปข้างหน้า โดยเป็นแรงที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุในอากาศ มีทิศทางตรงกันข้ามกับวัตถุที่เคลื่อนที่ แรงต้านนี้ที่กระทำบนวัตถุประกอบไปด้วย แรงต้านเนื่องจากความเสียดทานที่ผิว (Skin friction drag) โดยแรงต้านชนิดนี้เกิดจากความเค้นเฉือนบนผิววัตถุซึ่งจะขึ้นกับความหนืดของของไหลและแรงต้านเนื่องจากผลต่างความดัน (Pressure drag) โดยการเกิดแรงต้านชนิดนี้เกิดจากความแตกต่างระหว่างความดันด้านหน้าและด้านหลังของวัตถุโดยสำหรับวัตถุป้านเช่น ทรงกลม นั้นค่าแรงต้านเนื่องจากผลต่างความดันจะมากแต่กับวัตถุ Streamlined body เช่น airfoil นั้น แรงต้านเนื่องจากผลต่างความดันจะน้อยโดยหากนำแรงต้านเนื่องจากผลต่างความดันและแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานผิวมารวมกันก็จะได้แรงต้านรวมสามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D V^2 A \quad (3.5)$$

โดย F_D คือ แรงต้าน (N)

V คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)

C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน (ไร้นหน่วย)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

3.8 แรงยกและแรงกด

สมการแบร์นูลลี เป็นสมการที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับความดันในของไหล ซึ่งความดันในของไหลที่เคลื่อนที่มีค่าน้อยกว่าความดันในของไหลที่อยู่นิ่ง ทั้งนี้ขึ้นกับตำแหน่งของไหลด้วย สมการของแบร์นูลลี ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ของความดัน ความเร็ว และตำแหน่งตามความสูงโดยสมมุติฐานว่าเป็นการไหลแบบไม่มีความหนืด เป็นการไหลแบบคงที่ และเป็นการไหลที่ไม่สามารถอัดตัวได้ โดยจากสมการแบร์นูลลินี้เราสามารถอธิบายการเกิดแรงยกได้ว่า อากาศที่ไหลผ่านพีกด้านบนมีความเร็วสูงกว่าอากาศที่ไหลผ่านด้านล่างพีก ทำให้แรงดันอากาศด้านล่างมากกว่าด้านบนจึงเกิดแรงยกขึ้น และหากอากาศไหลผ่านด้านพีกด้านบนมีความเร็วต่ำกว่าอากาศไหลผ่านพีกข้างล่าง ข้างบนจึงมีความดันมากกว่าข้างล่าง จึงเกิดเป็นแรงกดขึ้น โดยแรงยกหรือแรงกดหาได้จากสมการ

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L V^2 A \quad (3.6)$$

F_L คือ แรงยก (N)

V คือ ความเร็วของวัตถุที่เทียบกับของไหล (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)

C_L คือ สัมประสิทธิ์แรงยก (ไร้นหน่วย)

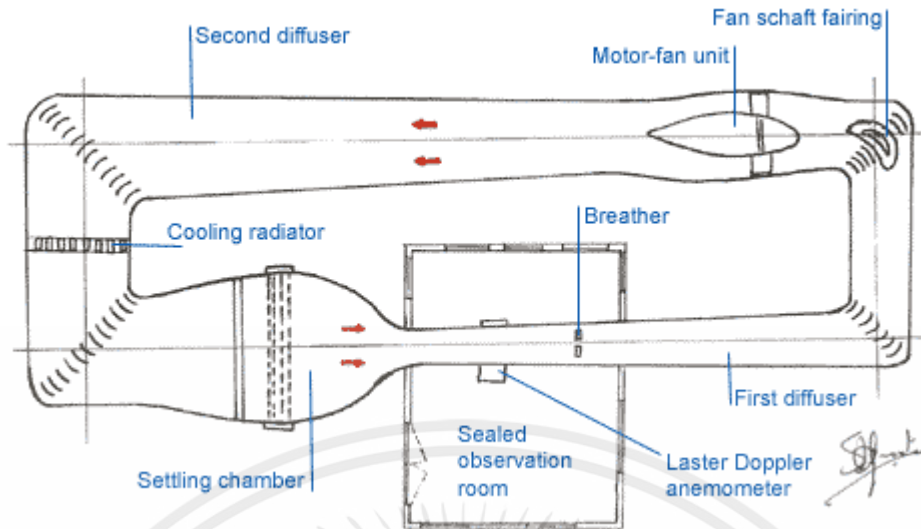
ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

3.7 การไหลแบบยุบตัวได้และการไหลแบบยุบตัวไม่ได้

การไหลที่ไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลจะเรียกว่าการไหลแบบอัดตัวไม่ได้โดยการไหลแบบนี้จะมีเลขมัคน้อยกว่า 0.3 ส่วนการไหลแบบอัดตัวได้จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลโดยการไหลแบบนี้มีค่าเลขมัคมากกว่า 0.3

3.8 อุโมงค์ลม

อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์ที่เอาไว้ใช้สำหรับทดสอบและศึกษาผลของลมที่ความเร็วต่างๆที่มีต่อสิ่งประดิษฐ์ เช่น เครื่องบิน รถยนต์ สิ่งก่อสร้าง และอื่นๆโดยการใช้งานอุโมงค์คือการทำให้แบบจำลองของสิ่งที่เราต้องการจะศึกษาแล้วนำไปวางไว้ในอุโมงค์ลมเพื่อทำการทดสอบหาค่าต่างๆเช่น แรงยก แรงต้าน มุมปะทะ โคนอุโมงค์ลมจำเป็นจะต้องมีพัดลมที่สามารถปรับความเร็วลมได้และส่วนทดสอบจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอโดยอุโมงค์มี2แบบคือ 1. แบบวงจรมัดโดยลมจะวิ่งเป็นวงกลมโดยนำลมที่ออกมาแล้วไปใช้อีกครั้ง 2. แบบผ่านหน้าเดียว(ในโครงการนี้ใช้แบบที่2)นอกนั้นจะเป็นอุปกรณ์เสริมสำหรับใช้กับอุโมงค์ลมเช่นเครื่องกำเนิดควันเพื่อสำหรับใช้ดูการไหลของลมผ่านโมเดล



รูปที่ 3.5 อุโมงค์ลมแบบวงจรปิด



รูปที่ 3.6 อุโมงค์ลมแบบผ่านหนเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การดำเนินการทดลอง

โดยก่อนอื่นเราจะต้องทราบเกี่ยวกับข้อมูลทางเทคนิคและวิธีการใช้งานของอุโมงค์ลมของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลก่อน

ข้อมูลทางเทคนิคของอุโมงค์ลม

- พัดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.50 เมตร
- มอเตอร์ขนาด 6.2 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ 3 เฟส ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
- ความเร็วส่วนทดสอบสูงสุด 47 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.1 อุโมงค์ลมภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

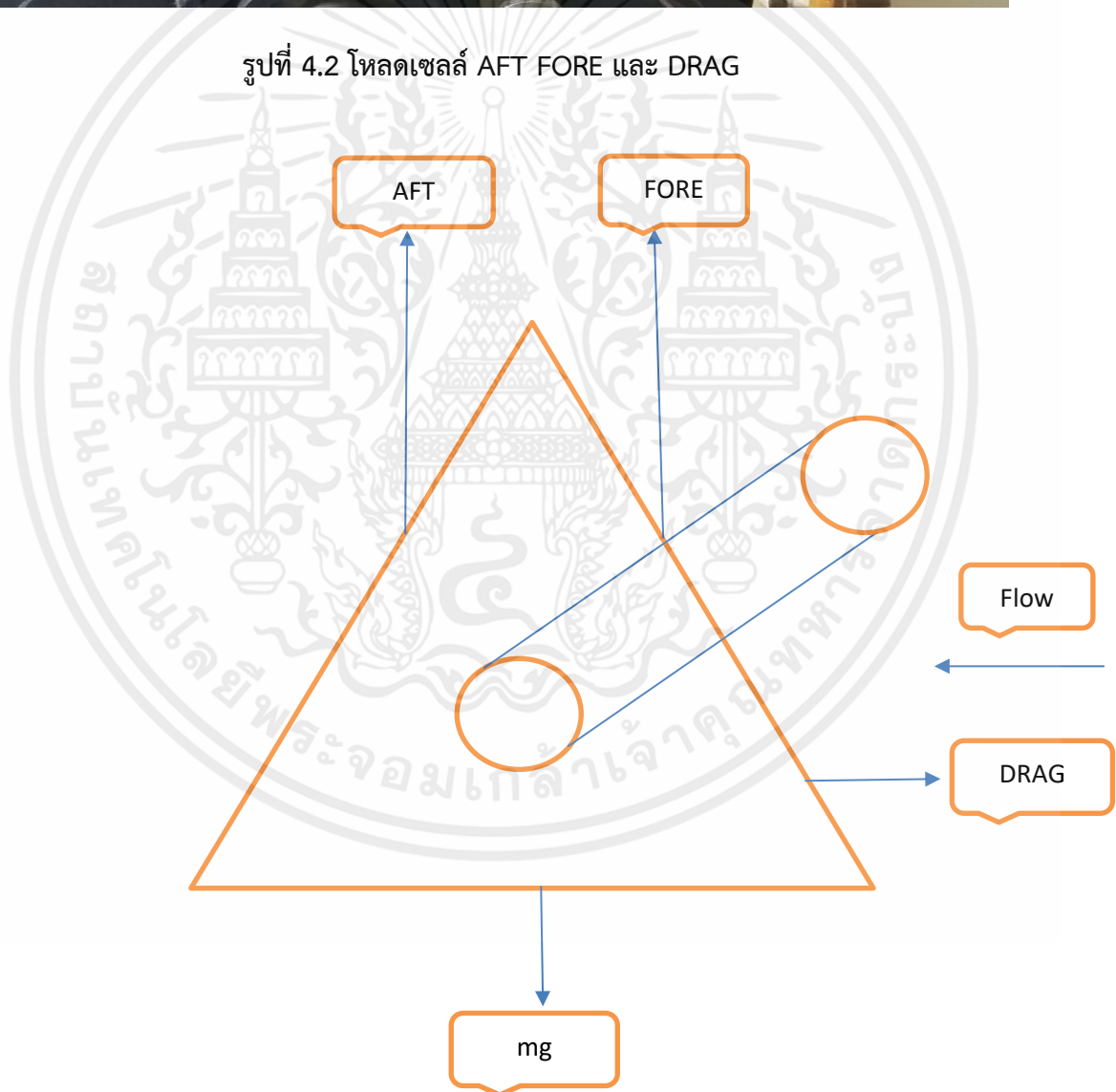
โพลดเซลล์

แรงที่อุโมงค์ลมอ่านได้นั้นจะมาจากการที่โพลดเซลล์รับแรงแล้วทำให้ค่าความต้านทานของโพลดเซลล์เปลี่ยนโดยโพลดเซลล์จะมีทั้งหมด 3 ตัวคือ โพลดเซลล์ AFT โพลดเซลล์ FORE โพลดเซลล์ DRAG ซึ่งโพลดเซลล์ AFT และโพลดเซลล์ FORE นั้นจะอ่านค่าแรงกด ส่วนโพลดเซลล์ DRAG นั้นจะอ่านค่าแรงต้านและค่าแรงที่อ่านได้ทั้งหมดจะแสดงบนจอแสดงผลของอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

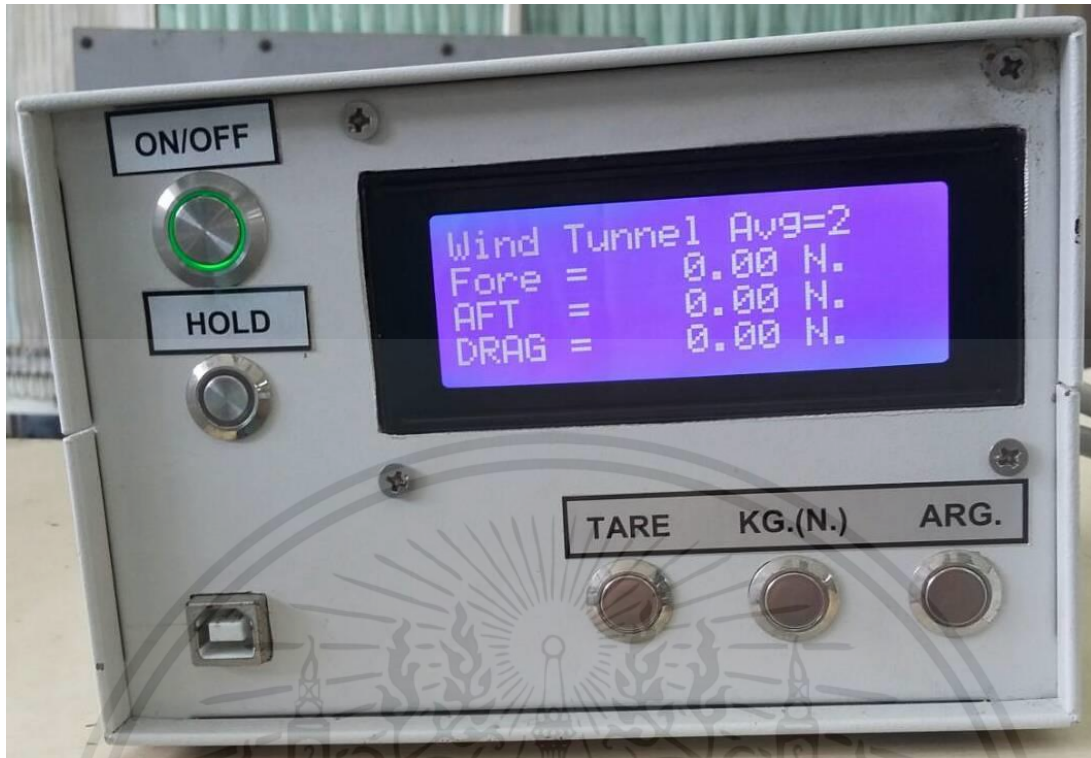


รูปที่ 4.2 โหลดเซลล์ AFT FORE และ DRAG



รูปที่ 4.3 Free body diagram ของอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงผลแรงที่อ่านได้จากโหลดเซลล์



รูปที่ 4.5 Pitot tube ภายในอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมจะใช้ pitot tube ซึ่งอยู่ในส่วนทดสอบอุโมงค์ลมต่อกับแมนอมิเตอร์ซึ่งภายในแมนอมิเตอร์จะมีน้ำอยู่โดยจะใช้ผลต่างความสูงของระดับน้ำในแมนอมิเตอร์สำหรับคำนวณความเร็วลมโดยความเร็วลมคำนวณได้จากสมการ

$$v = \sqrt{2 \left(\frac{p_m}{P} - 1 \right) g \Delta h} \quad (4.1)$$

โดย

v คือ ความเร็วลมในอุโมงค์ลม (m/s)

P_m คือ ความหนาแน่นของน้ำในแมนอมิเตอร์ (kg/m^3)

P คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

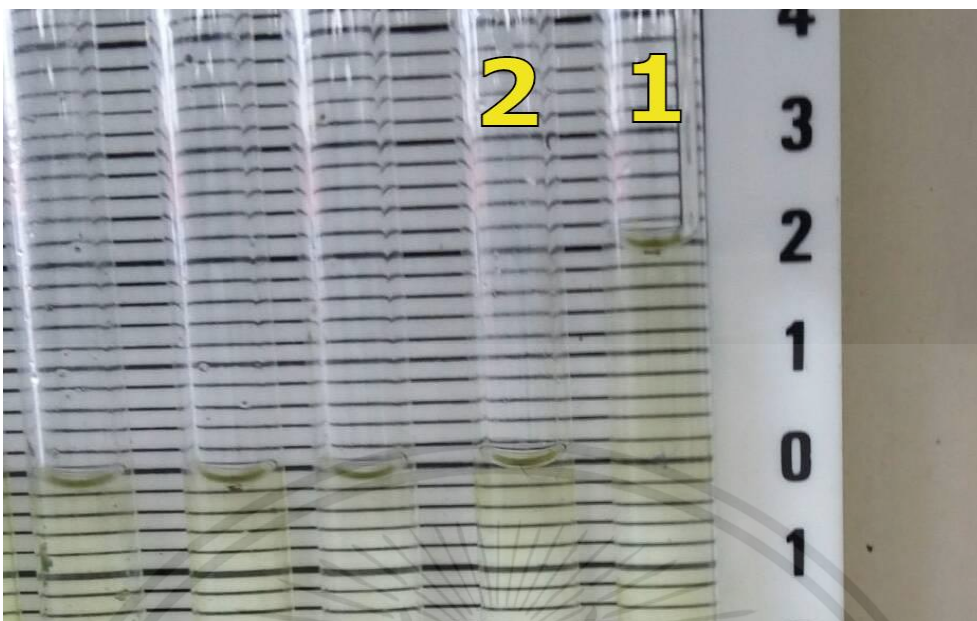
g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

Δh คือ ผลต่างของระดับน้ำในแมนอมิเตอร์ (m)



รูปที่ 4.6 ผลต่างของระดับน้ำขณะไม่มีความเร็วลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลต่างของระดับน้ำขณะมีความเร็วลม

โดยก่อนจะเริ่มทำการทดลองจริงนั้นเราต้องทำการสอบเทียบความแม่นยำของอุโมงค์ลม ก่อนโดยวิธีที่ใช้ในการสอบเทียบคือการใช้รูปทรงเรขาคณิตที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอยู่แล้ว มาทดสอบโดยทางผู้จัดทำได้ทำการเลือกวัตถุทรงกระบอกมาใช้ในการสอบเทียบโดยได้ผลดัง ตารางข้างล่าง

ตารางที่ 4.1 ผลการสอบเทียบอุโมงค์ลม

Reynold number	ผลต่างความสูงระดับน้ำ	ความเร็วลม
19855.6086	1.5 cm	15.8504 m/s
29450.6989	3.3cm	23.5100 m/s
43802.7473	7.4 cm	34.9670 m/s

$C_{D\text{การทดลอง}}$	$C_{D\text{ทฤษฎี}}$	% Relative error
1.0114	1.1	8.0545
0.9995	1.1	9.1363
0.9548	1.1	13.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. อ่านค่าผลต่างของความสูงระดับน้ำแล้วนำมาคำนวณความเร็วลมด้วยสมการที่ 4.1
2. นำค่าความเร็วลมที่ได้ไปคำนวณค่าเลขเรย์โนลด์ส์โดยในที่นี้ใช้ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ที่มากกว่า 200,000 เป็นการไหลแบบปั่นป่วนตามสมการ 3.2
3. เนื่องจากทรงกระบอกจะเกิดการสั่นจึงต้องใช้ค่าแรงเฉลี่ยโดยคำนวณจากสมการ

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N} \quad (4.2)$$

N คือ จำนวนตัวอย่าง

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

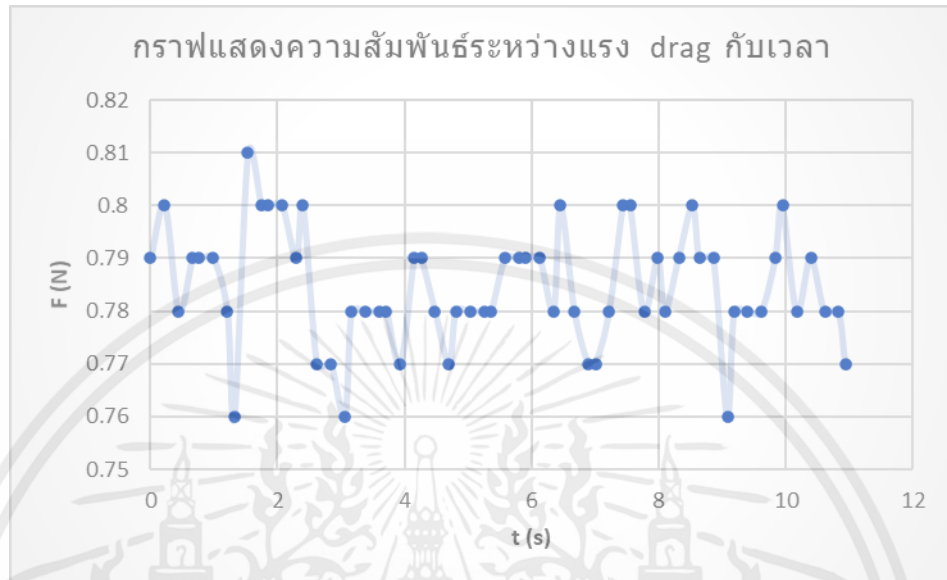
$\sum x$ คือ ผลบวกของข้อมูลทุกตัว

4. นำค่าแรงเฉลี่ยที่ได้มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านจากสมการที่ 3.5
5. นำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านที่ได้ไปเทียบค่าที่ใช้อ้างอิงจากราย
6. คำนวณค่า % Relative error

จากรายข้างบนนั้นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในช่วงที่ 0-13%

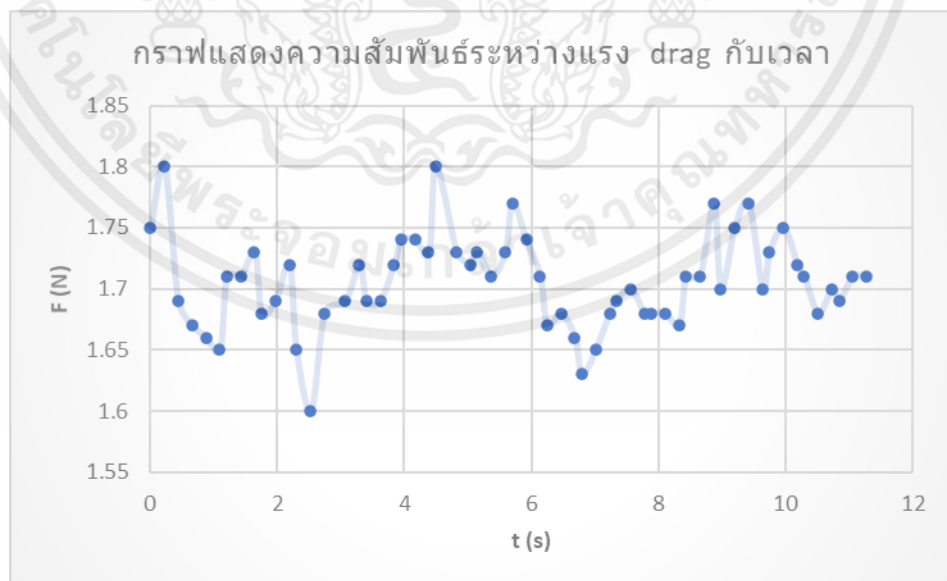
ผลลัพธ์จากการทดลอง

ทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส 19855.6086



รูปที่ 4.8 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส 19855.6086

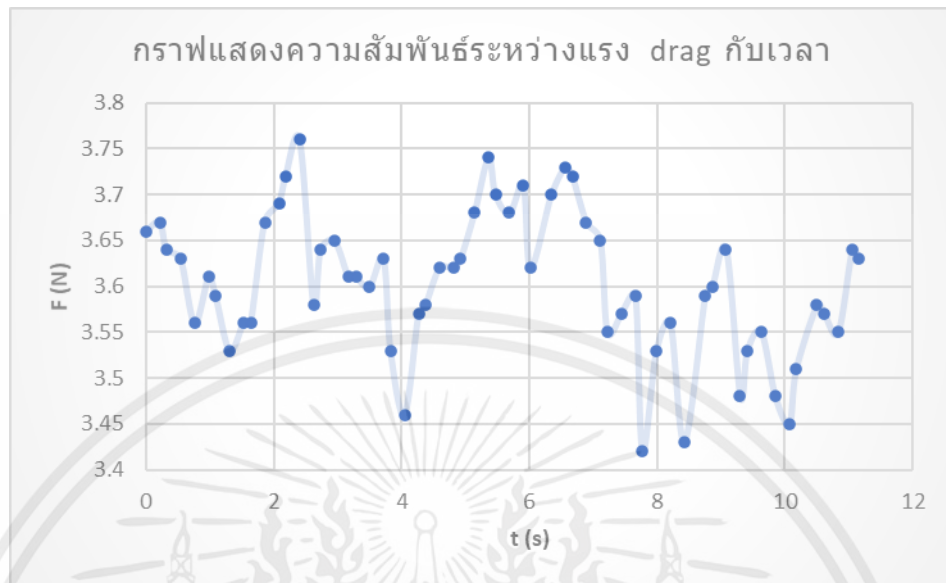
ทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส 29450.6989



รูปที่ 4.9 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส 29450.6989

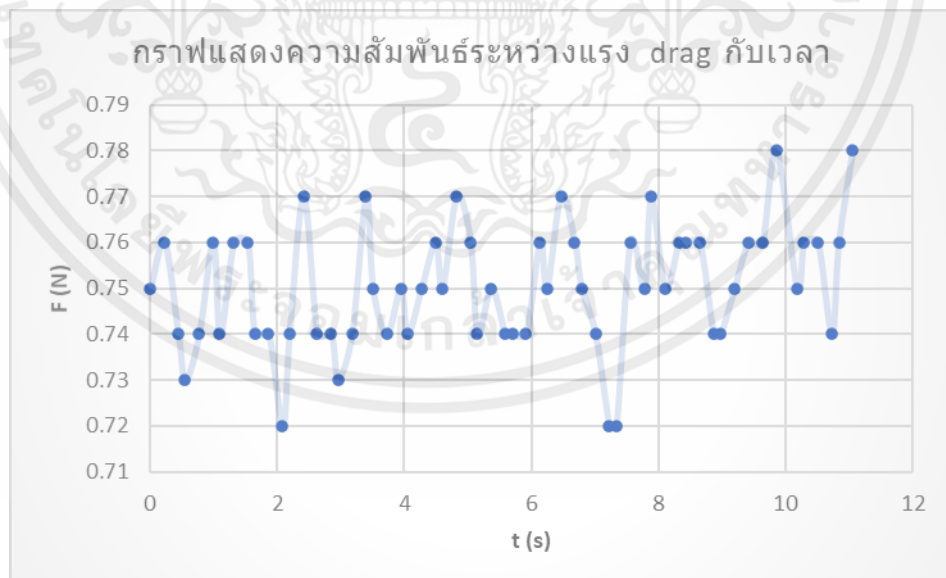
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473



รูปที่ 4.10 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกเปล่าที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473

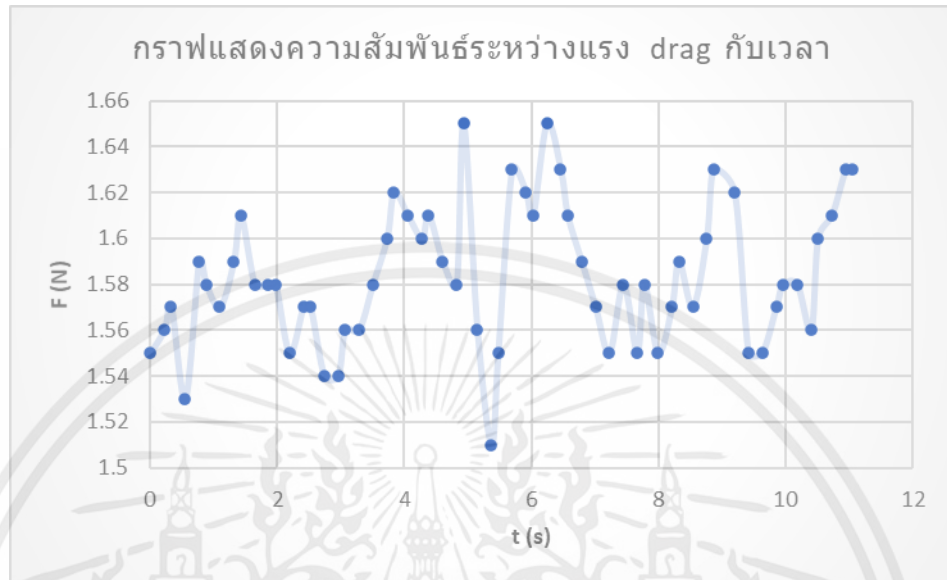
ทรงกระบอกกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086



รูปที่ 4.11 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์
โนลด์ส์ 19855.6086

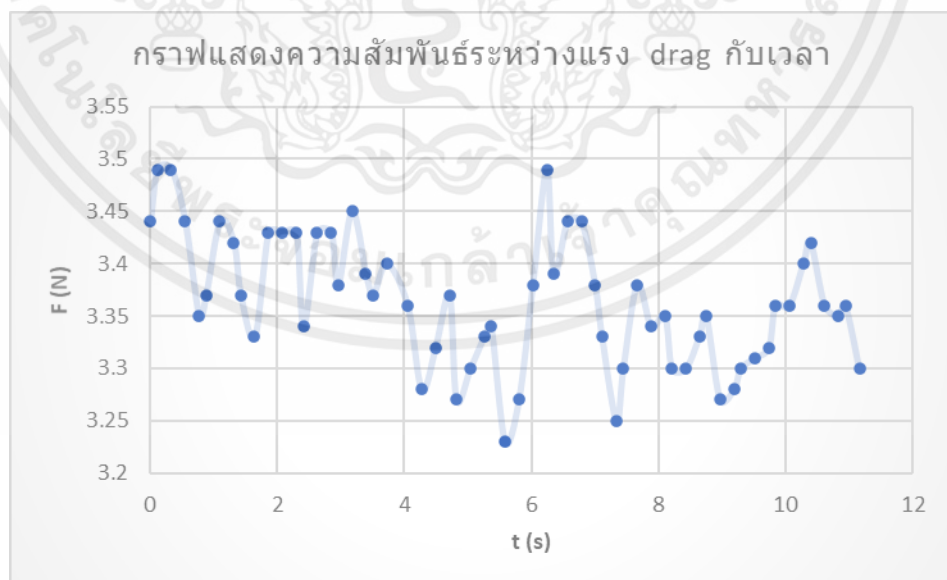
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989



รูปที่ 4.12 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989

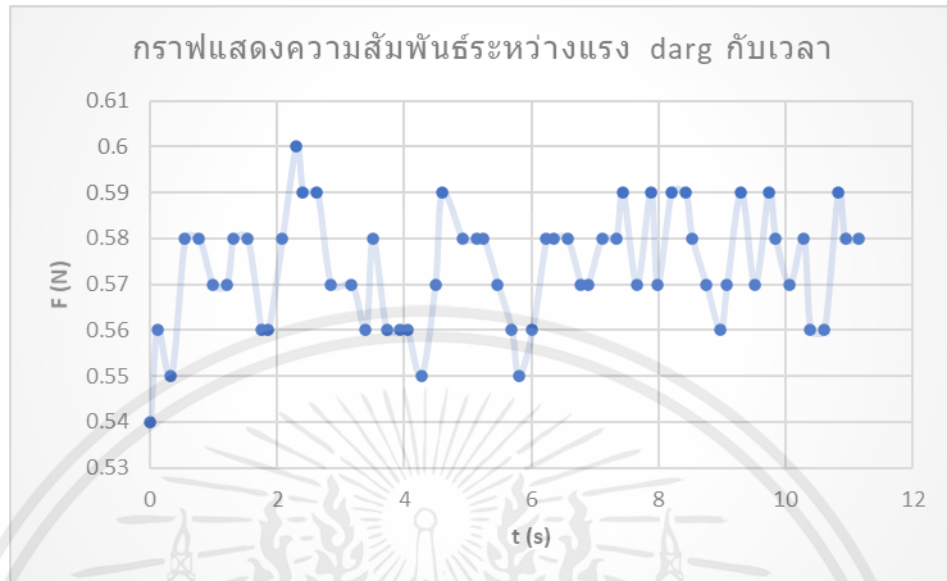
ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473



รูปที่ 4.13 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 2.5 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473

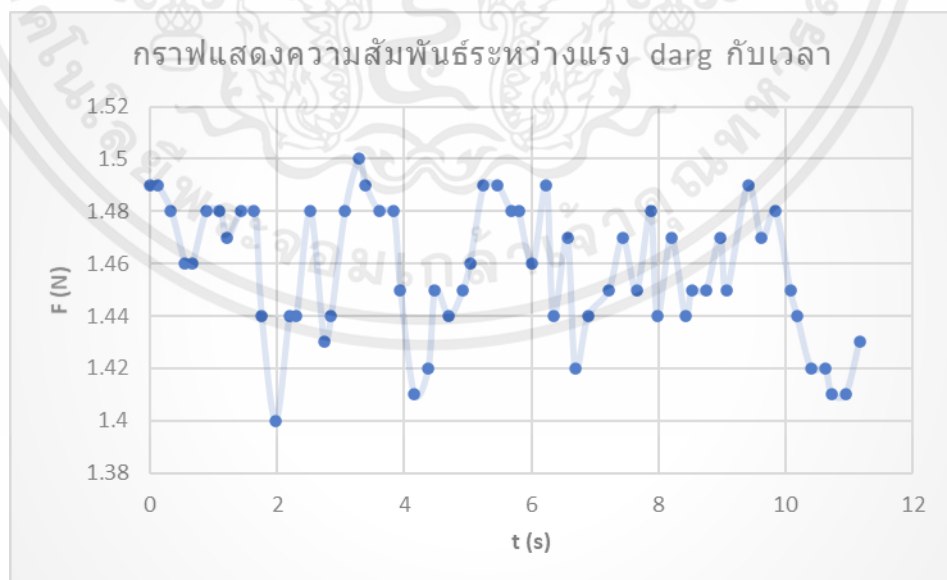
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086



รูปที่ 4.14 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086

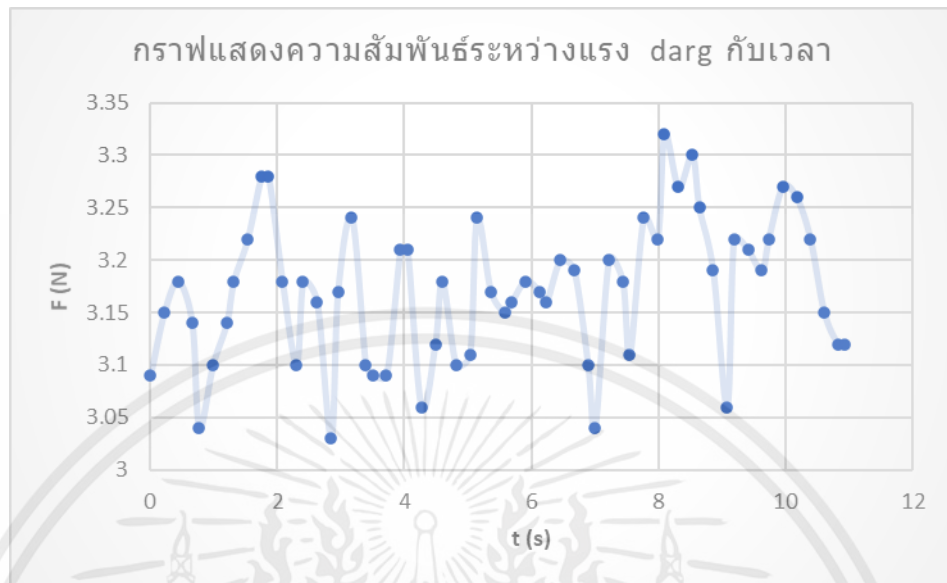
ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989



รูปที่ 4.15 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989

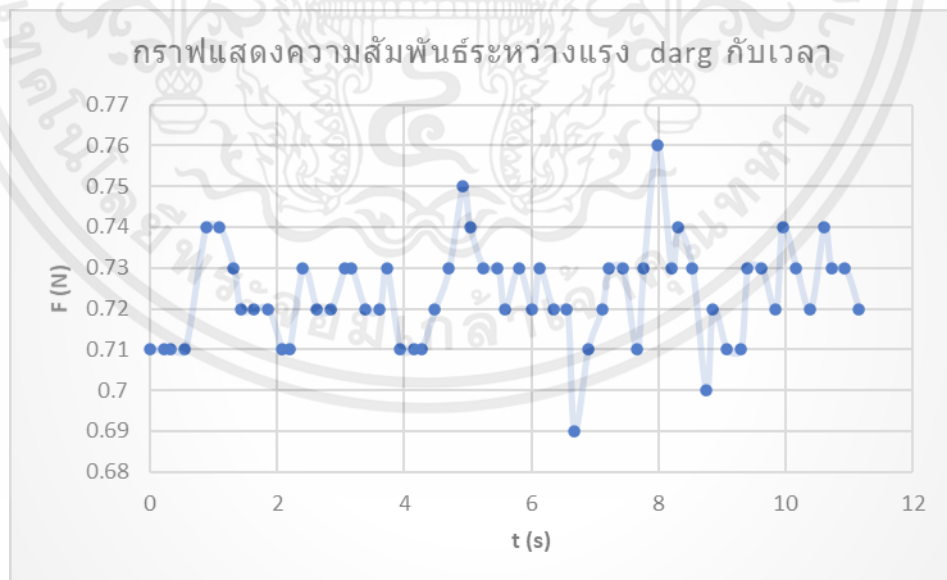
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473



รูปที่ 4.16 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 6 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473

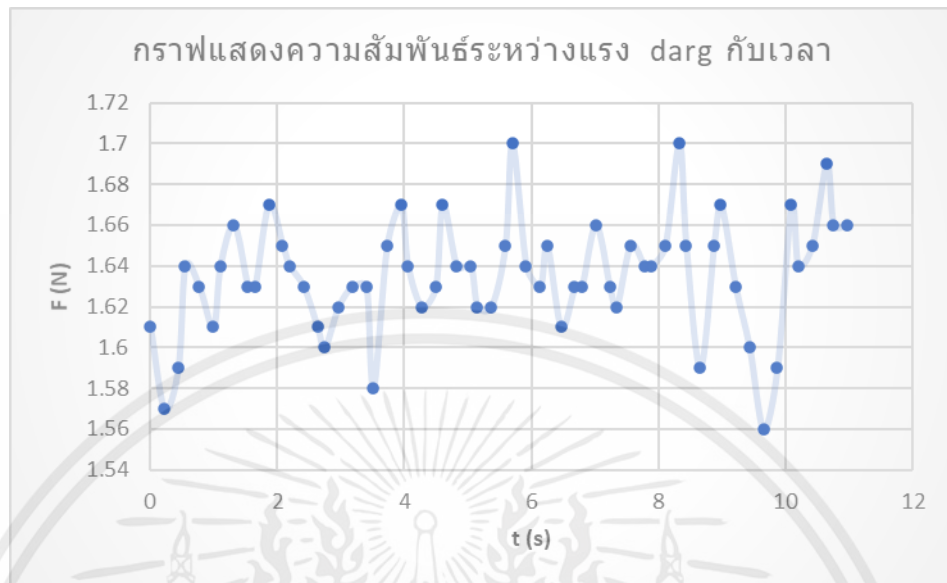
ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086



รูปที่ 4.17 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086

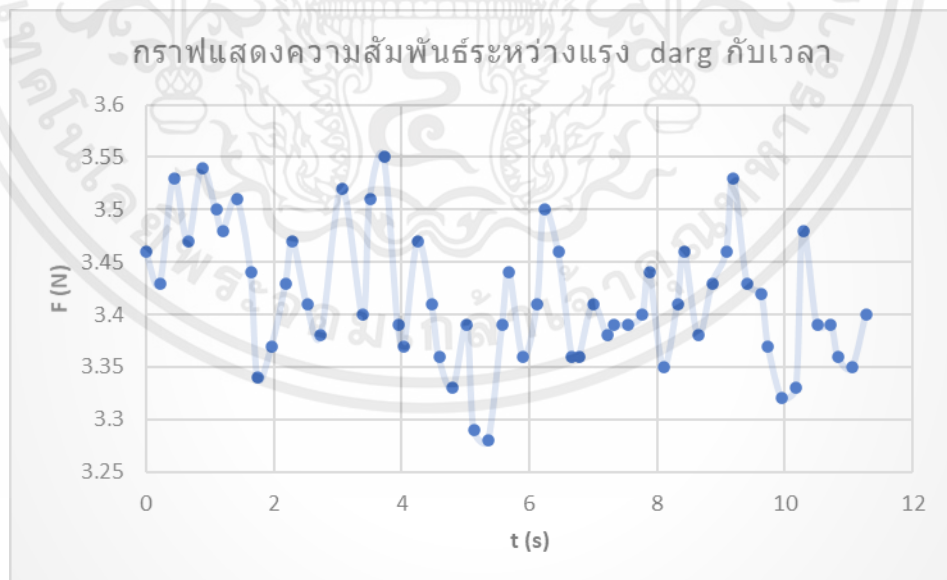
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989



รูปที่ 4.18 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989

ทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473



รูปที่ 4.19 กราฟแรงกับเวลาของทรงกระบอกระยะพิทซ์ 2 ซม. สูง 1 มม. ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

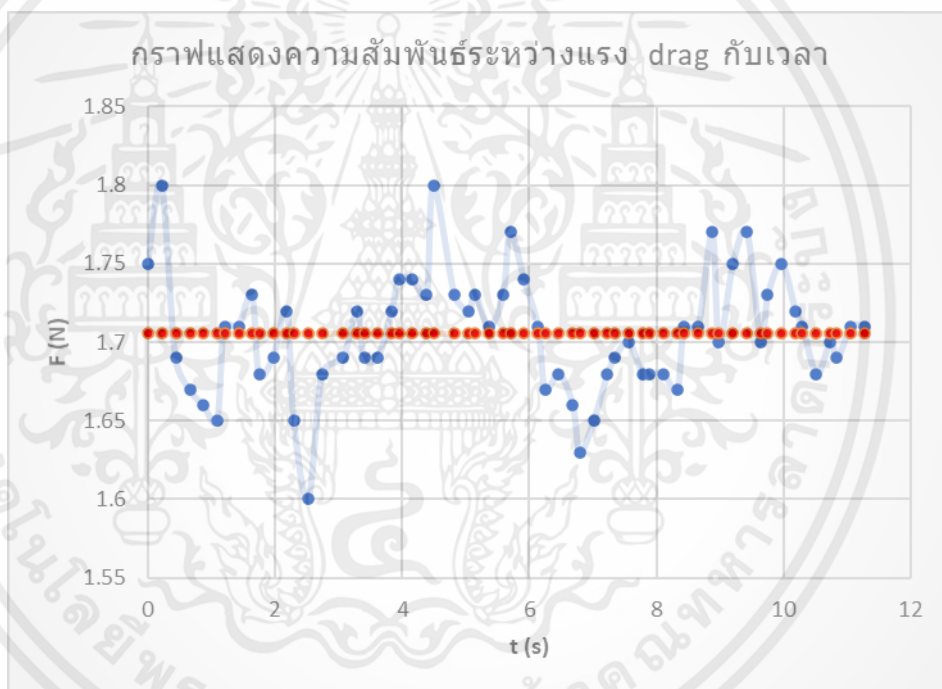
จากข้างบนเราได้ทำการวิเคราะห์ขนาดของแอมพลิจูดการสั่นด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N-1}}$$

x คือข้อมูลแต่ละตัว

\bar{x} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลทุกตัว

N คือจำนวนข้อมูล



รูปที่ 4.20 แสดงค่า Drag ณ.เวลาต่างๆและแสดงค่า Drag เฉลี่ย

โดยในกรณีนี้เราสามารถหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวิเคราะห์แอมพลิจูดได้ เพราะหากทรงกระบอกไม่เกิดการสั่นขึ้นค่าแรง Drag ที่กระทำในทุกช่วงเวลาย่อมคงที่แต่ในกรณีนี้ทรงกระบอกเกิดการสั่นขึ้นซึ่งหากมองจากกราฟจะเห็นได้ว่ายิ่งค่าแรง ณ.ช่วงเวลาต่างๆ ต่างจากแรงที่เป็นค่าเฉลี่ยมากแสดงว่าแอมพลิจูดการสั่นมากและหากต่างจากแรงที่เป็นค่าเฉลี่ยน้อยแอมพลิจูดก็น้อยตามไปด้วย

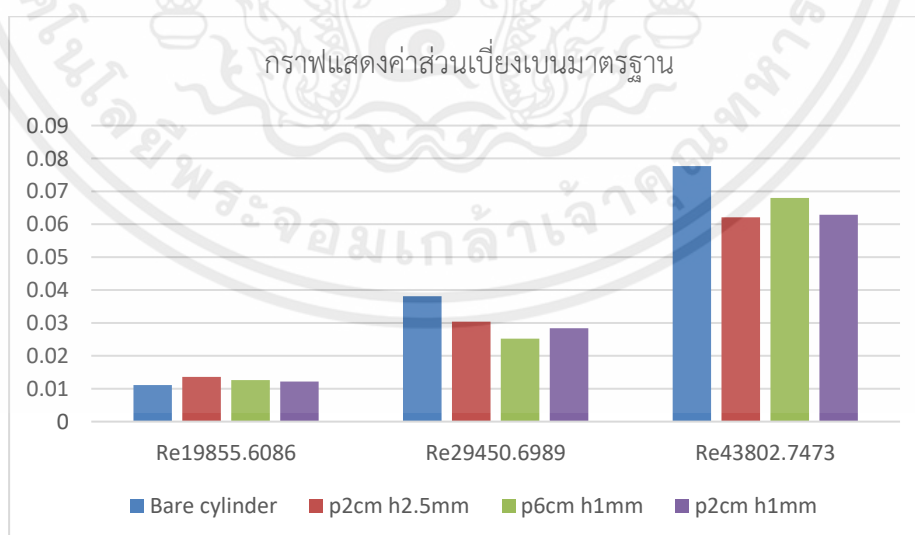
ซึ่งการคำนวณนั้นได้คำนวณจากสูตรโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟเอกเซลและทำการสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซลเช่นเดียวกัน จะได้กราฟและได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามข้างบน

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

	ทรงกระบอก เปล่า	พิทช์ 2 ซม. สูง 2.5 มม.	พิทช์ 6 ซม. สูง 1 มม.	พิทช์ 2 ซม. สูง 1 มม.
Re19855.6086	0.0111	0.0136	0.0126	0.0122
Re29450.6989	0.0381	0.0304	0.0252	0.0284
Re43802.7473	0.0777	0.0621	0.0680	0.0629

ค่าในตารางที่ 4.2 นั้นคือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งบอกถึงแอมพลิจูดการสั่นโดยค่านี้จะต่ำสุดสำหรับทรงกระบอกเปล่าที่ค่าเลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086 แต่ที่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989 และ 43802.7473 ทรงกระบอกเปล่าจะมีค่าสูงสุด

สามารถนำค่าจากตารางมาเขียนเป็นกราฟแท่งได้ดังนี้



รูปที่ 4.21 กราฟแท่งแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

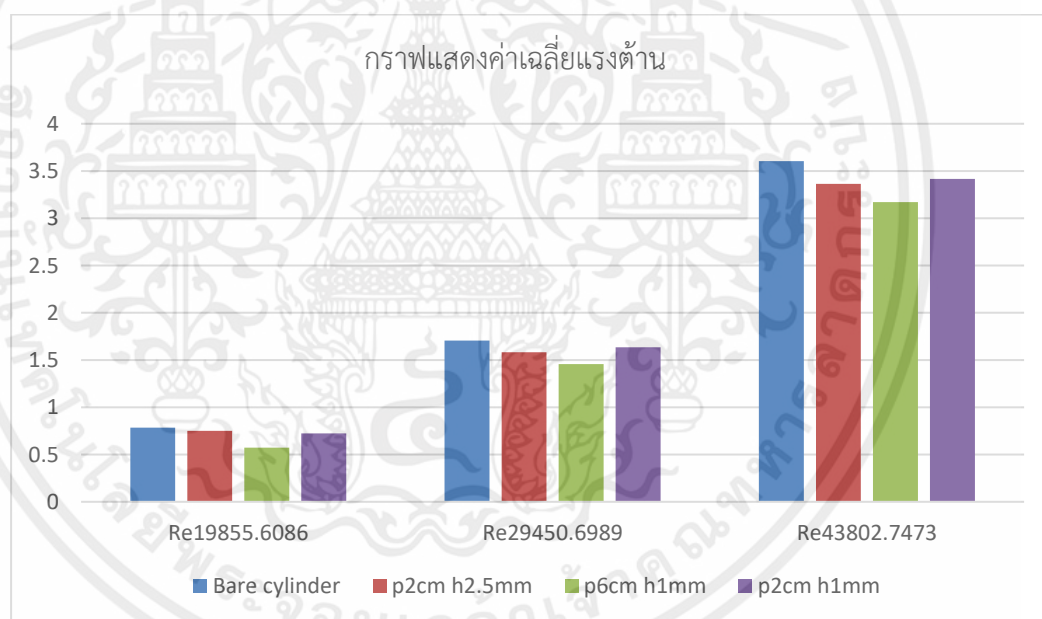
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยของแรงต้าน

	ทรงกระบอก เปล่า	พิทช์ 2 ซม. สูง 2.5 มม.	พิทช์ 6 ซม. สูง 1 มม.	พิทช์ 2 ซม. สูง 1 มม.
Re19855.6086	0.7845	0.7502	0.5735	0.7235
Re29450.6989	1.7055	1.583	1.4575	1.6352
Re43802.7473	3.604	3.364	3.1702	3.416

ค่าในตารางที่ 4.3 นั้นคือค่าเฉลี่ยแรงต้านโดยหาค่าเลขเรย์โนลด์ส์ 19855.6086 , 29450.6989 และ 43802.7473 ทรงกระบอกเปล่ามีค่ามากที่สุด

สามารถนำค่าจากตารางมาเขียนเป็นกราฟแท่งได้ดังนี้



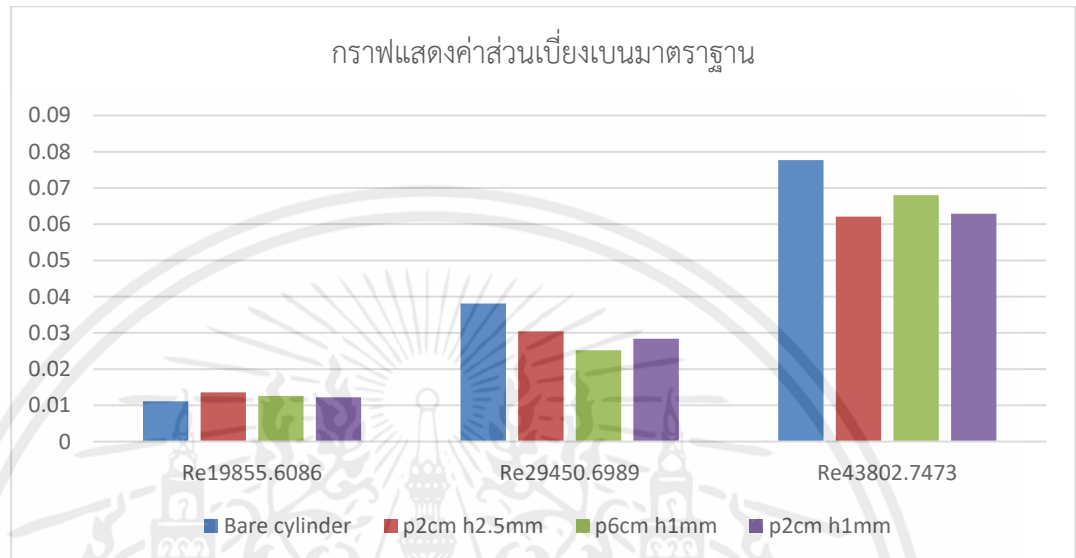
รูปที่ 4.22 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยแรงต้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

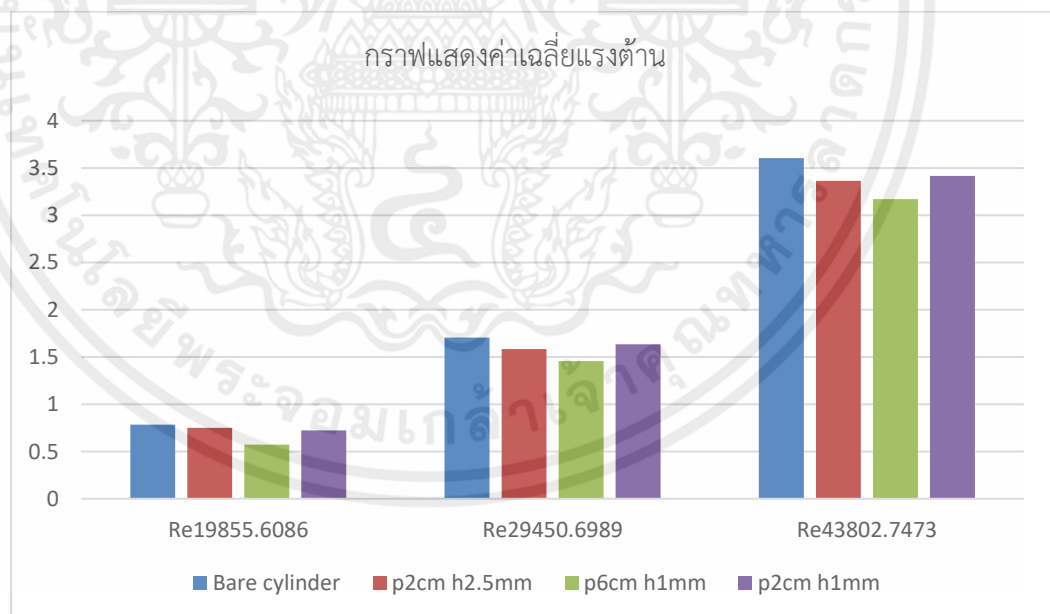
บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง



รูปที่ 5.1 กราฟแท่งแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 5.2 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยแรงต้าน

จากกราฟที่ได้จากผลการทดลองข้างบนได้พบว่าทรงกระบอกที่ได้ทำการติดตั้ง helical strake ทุกอันนั้นได้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่าทรงกระบอกเปลือยที่เลขเรย์โนลด์ส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19855.6086 แต่ที่เลขเรย์โนลด์ส์ค่าอื่นที่ได้ทำการทดลองนั้นทรงกระบอกที่ได้ทำการติดตั้ง helical strake นั้นมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่าทรงกระบอกเปล่าและทรงกระบอกที่ได้ติดตั้ง helical strake ทุกอันนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านต่ำกว่าทรงกระบอกเปล่าซึ่งจะไม่สอดคล้องกับงานวิจัย [2] แต่สอดคล้องกับงานวิจัย [1] และการเปลี่ยนความสูงนั้นมีผลลดแอมพลิจูดได้มากแค่ตรงในส่วนของเลขเรย์โนลด์ส์ 43802.7473 เท่านั้นแต่เลขเรย์โนลด์ส์ 29450.6989 นั้นการเปลี่ยนระยะพิทช์นั้นกลับลดแอมพลิจูดได้มากกว่าซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัย [1] ซึ่งการเปลี่ยนความสูงจะมีผลช่วยลดแอมพลิจูดได้มากกว่าการเปลี่ยนระยะพิทช์ โดยการติดตั้ง helical strake นั้นที่ลดค่าแรงจุดลดลงนั้นเนื่องมาจากการที่มี helical strake มากขึ้นทำให้การไหลของอากาศผ่านทรงกระบอกเกิดการแยกตัวและทำให้ผลต่างของความดันลดลงจึงทำให้ค่าแรงจุดลดลงไปด้วยดังเช่นการติดตั้งหลุมบนลูกกอล์ฟ

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากว่าในการทำการปริศยานิพนธ์นี้ผู้จัดทำได้มีเวลาในการทำที่จำกัดจึงยังไม่สามารถทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองบางส่วนได้เช่น การวิเคราะห์ความถี่โดยใช้ Fast Fourier transform (FFT) รวมถึงมีข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์เช่น ไม่มีอุปกรณ์ Linear variable differential transform (LVDT) laser รวมถึงยังมีข้อจำกัดในส่วนททดสอบภายในอุโมงค์ลมที่มีขนาดเล็กจึงไม่สามารถใช้ชิ้นงานทดสอบที่เป็นทรงกระบอกที่มีขนาดยาวมากได้จึงอาจทำให้ผลการทดลองออกมาได้ผลไม่ดีพอ

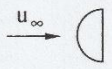
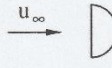
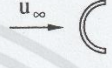

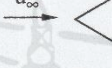
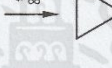

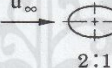
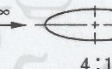

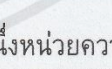
อ้างอิง

- [1] Lee Kee Quen , Aminudin Abu , Naomi Kato , Pauziah Muhamad , Asnizah Saekhaini Hanida Abdullah Investigation on the effectiveness of helical strake in suppressing VIV of flexible cylinder Applied ocean research 2013
- [2] Ranjith E R , Sunil A S , Lippin Pauly Analysis of flow over a circular cylinder fitted with helical strakes Sciencedirect 2016
- [3] T. Zhou , S.F. Mohd. Razali , Z. Hao , L. Cheng On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes Journal of fluid and structures 2009
- [4] รศ.มนตรี พิรุณเกษตร กลศาสตร์ของไหล , วิทยพัฒน์ , กรุงเทพ
- [5] จักรินทร์ ไตรแก้วเจริญ , ณัฐพล มั่งคั่ง , ปณต พิละกันทา หลักอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2560
- [6] ณัชชา เมธาคุณากร พฤติกรรมการสั่นไหวเนื่องจากแรงลมของอาคารรูปทรงกระบอกจากผลการตรวจวัดแบบต่อเนื่อง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2559
- [7] Yunus A. Cengel , Jphn M. Cimbala Fundamental fluid mechanic Mc graw hill Second edition



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน

วัตถุ	รูปแสดงการไหล	$C_{D,T}$
3. ครึ่งทรงกระบอกตันวางขวางตั้งฉาก		1.2
		1.7
4. ครึ่งท่อวางขวางตั้งฉาก		1.2
		2.3
5. แท่งวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยมด้านเท่า		1.6
		2.0
6. ทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม		ราบเรียบ 1.1 ปั่นป่วน 0.3
		ราบเรียบ 0.6 ปั่นป่วน 0.2
7. รูปทรงวงรี		ราบเรียบ 0.35 ปั่นป่วน 0.15
		ราบเรียบ 0.25 ปั่นป่วน 0.10
		ราบเรียบ 0.25 ปั่นป่วน 0.10
ในที่นี้	$C_{D,T} = \frac{\text{แรงจุดต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง}}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 t}$	
	โดยที่ t คือระยะฉายตั้งฉากกับทิศของ u_∞ และ $Re = u_\infty t / \nu$	

ที่มา: Frank W. Schmidt, Robert E. Henderson and Carl H. Wolgemuth, **Introduction to Thermal Sciences**, John Wiley & Sons, New York, 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางคุณสมบัติของน้ำ

อุณหภูมิ °C	น้ำหนัก จำเพาะ $\gamma, \text{N/m}^3$	ความ หนาแน่น $\rho, \text{kg/m}^3$	ความหนืด $\mu, \text{Pa}\cdot\text{s}$	ความหนืด จลน์ $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	ความตึงผิว $\sigma, \text{N/m}$	ความดันไอ p_v, kPa	มอดุลัส เชิงปริมาตร K, GPa	อัตราเร็ว เสียง $c, \text{m/s}$
0	9805	999.9	1.792×10^{-3}	1.792×10^{-6}	7.62×10^{-2}	0.6	2.04	1403
5	9806	1000.0	1.519	1.519	7.54	0.9	2.06	1427
10	9803	999.7	1.308	1.308	7.48	1.2	2.11	1447
15	9798	999.1	1.140	1.141	7.41	1.7	2.14	1464
20	9789	998.2	1.005	1.007	7.36	2.5	2.20	1482
25	9779	997.1	0.894	0.897	7.26	3.2	2.22	1493
30	9767	995.7	0.801	0.804	7.18	4.3	2.23	1507
35	9752	994.1	0.723	0.727	7.10	5.7	2.24	1516
40	9737	992.2	0.656	0.661	7.01	7.5	2.27	1526
45	9720	990.2	0.599	0.605	6.92	9.6	2.29	1533
50	9697	988.1	0.549	0.556	6.82	12.4	2.30	1541
55	9679	985.7	0.506	0.513	6.74	15.8	2.31	1546
60	9658	983.2	0.469	0.477	6.68	19.9	2.28	1552
65	9635	980.6	0.436	0.444	6.58	25.1	2.26	1553
70	9600	977.8	0.406	0.415	6.50	31.4	2.25	1555
75	9589	974.9	0.380	0.390	6.40	38.8	2.23	1555
80	9557	971.8	0.357	0.367	6.30	47.7	2.21	1555
85	9529	968.6	0.336	0.347	6.20	58.1	2.17	1553
90	9499	965.3	0.317	0.328	6.12	70.4	2.16	1550
95	9469	961.9	0.299	0.311	6.02	84.5	2.11	1547
100	9438	958.4	0.284	0.296	5.94	101.3	2.07	1543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางคุณสมบัติอากาศ

ตาราง B สมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล

ตาราง B1 สมบัติทางฟิสิกส์ของอากาศที่ความดันบรรยากาศ (หน่วยเอสไอ)^a

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น, ^b ρ (kg/m ³)	น้ำหนัก จำเพาะ, ^b γ (N/m ³)	ความหนืด พลวัต, μ (N·s/m ²)	ความหนืด จลน์, ν (m ² /s)	อัตราส่วน ความร้อน จำเพาะ, k (-)	อัตราเร็ว เสียง, c (m/s)
-40	1.514	14.85	1.57×10^{-5}	1.04×10^{-5}	1.401	306.2
-20	1.395	13.68	1.63	1.17	1.401	319.1
0	1.292	12.67	1.71	1.32	1.401	331.4
5	1.269	12.45	1.73	1.36	1.401	334.4
10	1.247	12.23	1.76	1.41	1.401	337.4
15	1.225	12.01	1.80	1.47	1.401	340.4
20	1.204	11.81	1.82	1.51	1.401	343.3
25	1.184	11.61	1.85	1.56	1.401	346.3
30	1.165	11.43	1.86	1.60	1.400	349.1
40	1.127	11.05	1.87	1.66	1.400	354.7
50	1.109	10.88	1.95	1.76	1.400	360.3
60	1.060	10.40	1.97	1.86	1.399	365.7
70	1.029	10.09	2.03	1.97	1.399	371.2
80	0.9996	9.803	2.07	2.07	1.399	376.6
90	0.9721	9.533	2.14	2.20	1.398	381.7
100	0.9461	9.278	2.17	2.29	1.397	386.9
200	0.7461	7.317	2.53	3.39	1.390	434.5
300	0.6159	6.040	2.98	4.84	1.379	476.3
400	0.5243	5.142	3.32	6.34	1.368	514.1
500	0.4565	4.477	3.64	7.97	1.357	548.8
1000	0.2772	2.719	5.04	18.2	1.321	694.8

^a บนพื้นฐานข้อมูลจาก R.D. Ebevins, Applied Fluid Dynamics Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

^b ความหนาแน่นและน้ำหนักจำเพาะมีความสัมพันธ์ในรูปของ $\gamma = \rho g$ ในตารางนี้กำหนดให้ $g = 9.807 \text{ m/s}^2$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้