

เครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
WIND TUNNEL MODEL FOR NATURAL WIND VELOCITY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
WIND TUNNEL MODEL FOR NATURAL WIND VELOCITY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

WIND TUNNEL MODEL FOR NATURAL WIND VELOCITY



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
WIND TUNNEL MODEL FOR NATURAL WIND VELOCITY

ผู้จัดทำ นายธีธัช เขียวพิพัฒนสกุล 56010613
นายวรท ต้นเกษม 56011051


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ศิริชัย ธรรมรักษ์วัฒน์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ

โดย

นายธีธัช เจริญพิพัฒนสกุล 56010613

นายวรท ตันเกษม 56011051

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ศิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานในประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณและพัฒนาประสิทธิภาพในการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญในการแก้ปัญหาด้านพลังงาน จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 พบว่าเป้าหมายในการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเพิ่มขึ้นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ทำให้คณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมทั้ง ต่ำ กลาง และสูงเพื่อจะเลียนแบบความเร็วลมแต่ละภูมิภาคในประเทศไทย เพื่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์รูปแบบใบกังหันลมให้เหมาะสมกับความเร็วลมต่างๆ ซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานได้มากยิ่งขึ้น การใช้งานจะมีแท่นยึดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบไว้ในอุโมงค์ลม สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลม วัดค่าแรงกดหรือยกตัวและความเร็วในการหมุนจากคอมพิวเตอร์ได้ โดยการนำทฤษฎีการควบคุมแบบ PID มาประยุกต์ใช้ทำให้สามารถควบคุมความเร็วลมได้อย่างแม่นยำ ผลการวิจัยพบว่าสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมได้ตามเป้าหมายที่ต้องการในช่วง 0-12 เมตรต่อวินาที และสามารถวัดค่าความเร็วลม แรงกดและยกตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

WIND TUNNEL MODEL FOR NATURAL WIND VELOCITY

By

Mr.Thithat Choenpipatanasakul 56010613

Mr.Warot Tankasem 56011051

Advisor

Dr.Sirichai Tammaruckwattana

Academic Year 2016

ABSTRACT

At the present time, the demand for energy in Thailand is increasing rapidly. Therefore, increasing volume and improving production efficiency is important in solving energy problems. According to the Alternative Energy and Alternative Energy Development Plan 2015-2079 (AEDP2015), the target for wind power generation has increased dramatically. For this reason, the research team had the idea to create a wind tunnel prototype with adjustable all low, medium and high wind speed to mimic local wind speed in the country. To be used in the design and analysis of wind turbine blades to suit different wind speeds. This can increase the efficiency of the production of energy even more. Applications are provided with a mounting bracket to be tested in the wind tunnel. Wind speed is adjusted and the pressure or lift and rotation speed are measured by a computer. By applying the PID control theory, it can precisely control the wind speed. The results show that the desired wind speed can be adjusted in the range 0-12 meters per second. Wind speed, pressure and lift also can be measured accurately.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันเนื่องจากความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สิริชัย ธรรมารักษ์วัฒน์ ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้ารวมถึงสนับสนุนอุปกรณ์สำหรับทำเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมตลอดระยะเวลาที่ได้ทำการศึกษาจัดทำปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ ดร.รัชณี กุลยานนท์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์

ขอขอบคุณผู้แต่งหนังสือ เอกสารอ้างอิง และเว็บไซต์ต่างๆ ที่คณะผู้จัดทำได้นำมาใช้อ้างอิงประกอบการศึกษา และจัดทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

คณะผู้จัดทำ

ธีรัช เชิญพิพัฒน์สกุล

วรท ต้นเกษม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 แนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 อุโมงค์ลม (Wind Tunnel)	3
2.2 การออกแบบโครงสร้างอุโมงค์ลม	5
2.3 ตัวควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Derivative Controller)	6
2.4 ทฤษฎีตัวควบคุมแบบ PID	6
2.5 LabVIEW	9
2.6 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)	10
2.7 PWM (Pulse Width Modulation)	11
2.8 วิธีการสร้างสัญญาณ PWM	13
2.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Motor)	13

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	14
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	14
3.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง	14
3.3 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง	18
3.4 การออกแบบและวางแผนการทำงาน	19
3.4.1 การวางแผนและออกแบบทางด้าน Hardware	19
3.4.2 การวางแผนและออกแบบทางด้าน Software	19
3.5 วิธีการดำเนินงาน	20
3.5.1 การออกแบบตัวโมเดล	20
3.5.2 การเขียนแบบโดยใช้ Fusion360	21
3.5.3 การใช้งานโปรแกรม Flow Design	27
3.5.4 การประกอบตัวโมเดล	30
3.5.5 การเขียนโปรแกรมโดยใช้ LabVIEW	32
3.5.6 วงจรขับมอเตอร์	37
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	38
4.1 Function Block Diagram (FBD)	38
4.2 ผลการออกแบบ	38
4.3 ผลการจำลองการไหลของลมด้วยโปรแกรม Flow Design	40
4.4 ผลการทดลองปรับจูนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW	45
4.5 ผลการทดลองจริง	48
บทที่ 5 ผลสรุปและข้อเสนอแนะ	51
5.1 บทวิจารณ์และสรุปผลการดำเนินงาน	51
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน	51
5.3 แนวทางแก้ไข	52

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก	55
ภาคผนวก ข	58



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อุโมงค์ลมวงเปิด (Open Return Wind Tunnel)	3
2.2 อุโมงค์ลมวงปิด (Closed Return Wind Tunnel)	4
2.3 โครงสร้างของอุโมงค์ลม	5
2.4 โปรแกรม LabVIEW	10
2.5 หัววัดแบบลวดความร้อน (Thermal Probe)	10
2.6 หัววัดแบบใบพัด (Vane Probe)	11
2.7 หัววัดแบบพิทอทิว (Pitot Tube)	11
2.8 Source Signal และ PWM Signal	12
2.9 Block Simulate Signal	13
2.10 สัญญาณ PWM ที่ได้จาก Block Simulate Signal	13
3.1 National Instruments USB-6009 14-Bit Multifunction DAQ	14
3.2 Mini Vane Anemometer รุ่น DIGICON DA-45S	15
3.3 พัดลมถักรวมขับตรง ขนาด 24 นิ้ว รุ่น T40A-6AH 3HP 4P 220V	16
3.4 Triac BTA24	16
3.5 6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output	17
3.6 เครื่องสร้างควัน Smoke Fog 400W รุ่น T400	17
3.7 ไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร	18
3.8 โปรแกรม Fusion360	18
3.9 โปรแกรม Flow Design	19
3.10 โปรแกรม LabVIEW	19
3.11 หน้าต่างเริ่มต้นโปรแกรม Fusion360	21
3.12 ส่วนต่างๆ ในโปรแกรม Fusion360	21
3.13 คำสั่ง Create Sketch ในโปรแกรม Fusion360	22
3.14 เครื่องมือในการเขียนแบบในโปรแกรม Fusion360 (1)	23
3.15 เครื่องมือในการเขียนแบบในโปรแกรม Fusion360 (2)	23
3.16 การออกแบบส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction) ในโปรแกรม Fusion360	24
3.17 การออกแบบส่วนรังผึ้ง (Honeycomb) ในโปรแกรม Fusion360	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 การออกแบบส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section) ในโปรแกรม Fusion360	25
3.19 การออกแบบแผ่นอะคริลิคด้านข้างแบบมีปีกรูปตัว H ในโปรแกรม Fusion360	25
3.20 การออกแบบแผ่นอะคริลิคด้านข้างแบบมีปีกรูปตัว H ในโปรแกรม Fusion360	26
3.21 การเขียนแบบพัลลัมในโปรแกรม Fusion360	26
3.22 การออกแบบส่วนเชื่อมต่อระหว่างส่วนทดสอบชิ้นงานกับพัลลัมในโปรแกรม Fusion360	27
3.23 การนำเข้าไฟล์เพื่อจำลองในโปรแกรม Flow Design	27
3.24 หน้าต่างโปรแกรม Flow Design	29
3.25 การประกอบส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section)	30
3.26 การประกอบอุโมงค์ลม	31
3.27 อุโมงค์ลมเมื่อทำการประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	31
3.28 หน้าต่างเริ่มต้น LabVIEW	32
3.29 สร้างไฟล์สำหรับการเขียนโปรแกรม	32
3.30 การค้นหาฟังก์ชันที่ต้องการใช้	33
3.31 สร้างการทำงานแบบวนลูป	33
3.32 การสร้างสัญญาณ PWM	34
3.33 ส่งสัญญาณออกไปควบคุมวงจรขับ	34
3.34 ฟังก์ชัน VISA Configure Serial Port	35
3.35 ฟังก์ชัน VISA Read	35
3.36 ฟังก์ชัน NI_PID_pid.lvlib:PID.vi	36
3.37 โปรแกรมการควบคุมแบบวงปิด	36
3.38 วงจรขับมอเตอร์	37
4.1 Function Block Diagram แสดงการทำงานของอุโมงค์ลม	38
4.2 อุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Fusion360 (1)	38
4.3 อุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Fusion360 (2)	39
4.4 อุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Fusion360 (3)	39
4.5 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 5 m/s (1)	40
4.6 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 5 m/s (2)	40
4.7 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 5 m/s (3)	41
4.8 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 10 m/s (1)	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 10 m/s (2)	42
4.10 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 10 m/s (3)	42
4.11 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 15 m/s (1)	43
4.12 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 15 m/s (2)	43
4.13 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 15 m/s (3)	44
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันในการออกแบบอุโมงค์ลม	44
4.15 ผลการปรับจูนค่าพีไอดี (1)	45
4.16 ผลการปรับจูนค่าพีไอดี (2)	46
4.17 ผลการปรับจูนค่าพีไอดี (3)	47
4.18 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที	48
4.19 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที	48
4.20 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที	49
4.21 หน้าต่างการใช้งาน	49
4.22 การทดลองกับอุโมงค์ลม	50

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 เปรียบเทียบผลการปรับจูนพารามิเตอร์

47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

เนื่องด้วยคณะผู้วิจัยเล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานหมุนเวียนภายในประเทศ ซึ่งจากการที่ราคาน้ำมันเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะคงราคาอยู่ในระดับสูง และมีแนวโน้มที่จะหายากมากขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้มีการมองหาพลังงานในรูปแบบอื่นมาทดแทนพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิง ซึ่งปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับการหาพลังงานทางเลือกอื่นๆ เพื่อเป็นการลดการพึ่งพาการใช้พลังงานจากต่างประเทศและสร้างความมั่นคงด้านพลังงานให้กับประเทศ

ทั้งนี้พลังงานลมเป็นแหล่งพลังงานสะอาดประเภทหนึ่ง และความเร็วลมในประเทศไทยยังอยู่ในขอบเขตที่สามารถนำพลังงานลมมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นถ้าสามารถออกแบบโครงสร้างของกังหันลมให้มีความเหมาะสมกับความเร็วลมในภูมิภาคต่างๆ ก็จะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญคือ ลักษณะของลมที่พัดผ่าน เช่น ความเร็ว ทิศทาง เป็นต้น ดังนั้นการที่จะออกแบบกังหันลมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบความสามารถและพัฒนา

ด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวข้างต้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ ที่เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ ที่สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วลมให้มีความเร็วแปรผันได้ตามต้องการ จนกระทั่งถึงความเร็วสูงสุดเท่ากับ 15 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วลมที่อยู่ในช่วงที่สามารถพบได้ในประเทศไทย โดยจากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะช่วยพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานลมให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากยิ่งขึ้น และเป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่สามารถพัฒนาต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

เพื่อสร้างเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ เพื่อใช้ในการศึกษาและทดสอบผลกระทบของลมที่มีต่อชิ้นงานต่างๆ เช่น ใบกังหันลม ปีกเครื่องบิน เป็นต้น

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1. ศึกษาการสร้างเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
2. ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ควบคุมความเร็วลมโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
3. ออกแบบ และสร้างเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
4. ศึกษาและเขียนโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
3. ออกแบบอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนความเร็วลม
4. สั่งซื้ออุปกรณ์
5. ประกอบเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
6. ทดสอบเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
7. ปรับแก้เครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
8. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ฝึกวางแผนและการแก้ปัญหาต่างๆ ในระหว่างการทำโครงการ
2. มีทักษะด้านการออกแบบ การเขียนโปรแกรมเพิ่มขึ้น
3. บูรณาการความรู้ต่างๆ ที่ได้เรียนมา ประยุกต์ใช้ให้มีความเหมาะสมกับการทำโครงการ
4. ได้เครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
5. สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดในการศึกษาและทดสอบผลกระทบของลมที่มีต่อชิ้นงานต่างๆ

1.6 รายละเอียดของปฏิญานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท กับอีก 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงปัญหาและที่มาของปฏิญานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของการทำปฏิญานิพนธ์ ขอบเขตของโครงการ ขั้นตอนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและรายละเอียดของปฏิญานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎี หลักการ อุปกรณ์ และความรู้ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

บทที่ 5 ผลสรุปและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

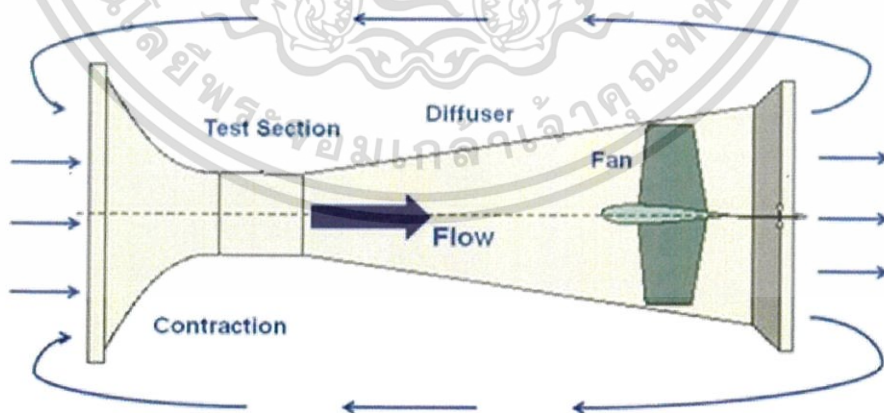
บทที่ 2

แนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุโมงค์ลม (Wind Tunnel)

อุโมงค์ลม [1] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาการไหลของอากาศผ่านวัตถุแข็ง โดยอากาศจะถูกเป่าหรือสูบผ่านเข้าไปยังท่อนำลมที่มีช่องสำหรับสังเกตการณ์วัตถุที่ทำการทดสอบ โดยอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดเพื่อวัดแรงต่างๆ หรือผลกระทบที่เกิดจากกระแสลม หรืออาจมีการฉีดควันหรือสารอื่นๆ เพื่อให้การสังเกตเส้นการไหลของลมที่ไหลผ่านวัตถุได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยอุโมงค์ลมสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท อันได้แก่

1. อุโมงค์ลมวงเปิด (Open Return Wind Tunnel) คือ อุโมงค์ลมที่มีบริเวณส่วนทางเข้าและทางออกของลมเปิดสู่สภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งอาจอยู่ภายในหรือภายนอกตัวอาคารที่ใช้ก่อสร้าง มีข้อดีคือ ประหยัดงบประมาณและพื้นที่ในการก่อสร้าง แต่จะมีพื้นที่ติดตั้งยาวมาก และบริเวณรอบๆ จะต้องไม่มีลมกระทบมายังทางเข้าและทางออกขณะทดสอบได้ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในบริเวณรอบๆ ก็ส่งผลถึงการทดสอบทันที อันเนื่องมาเป็นระบบเปิด การสร้างอุโมงค์ลมแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ อุโมงค์ลมชนิดเป่าและอุโมงค์ลมชนิดดูด โดยอุโมงค์ลมชนิดเป่าพัดลมจะอยู่บริเวณต้นทางก่อนเข้าสู่ส่วนทดสอบ ในทางกลับกันอุโมงค์ลมชนิดดูดพัดลมจะอยู่บริเวณด้านหลังส่วนทดสอบซึ่งมีข้อดีคือ กระแสลมที่เข้ามาหาส่วนทดสอบจะมีความปั่นป่วนน้อยกว่าการนำพัดลมไว้ด้านหน้า ดังรูปที่ 2.1

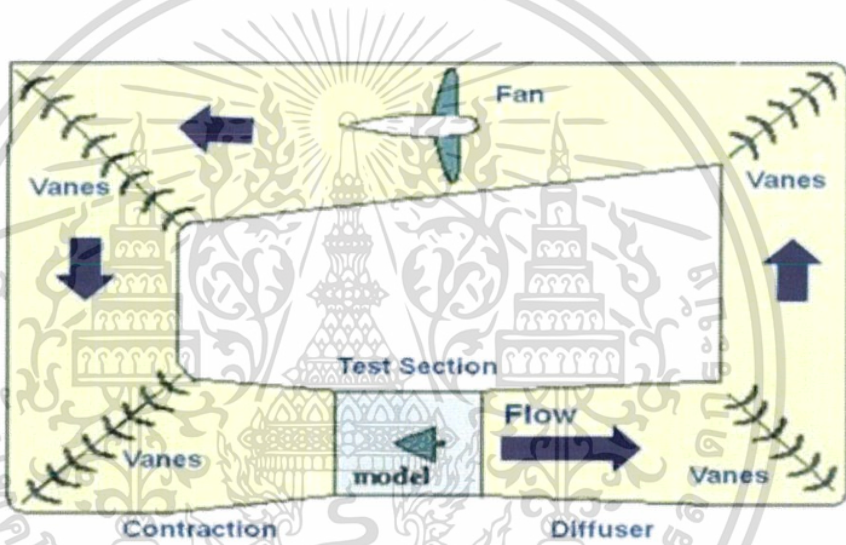


รูปที่ 2.1 อุโมงค์ลมวงเปิด (Open Return Wind Tunnel)

<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Images/tunoret.jpg>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. อุโมงค์ลมวงปิด (Closed Return Wind Tunnel) เป็นอุโมงค์ลมที่นำเอาลมที่พัดผ่านแบบจำลองในส่วนทดสอบไปแล้ววนกลับมาในระบบอีก ทำให้ไม่ต้องรับอากาศจากภายนอกเข้ามา ส่งผลให้กระแสอากาศที่ได้มีความราบเรียบ ทำให้ประสิทธิภาพและความสามารถในการวัดค่าต่างๆ สูงกว่าอุโมงค์ลมแบบเปิด เนื่องจากไม่ได้รับผลกระทบจากอากาศบริเวณรอบๆ และสามารถควบคุมการไหลของลมที่ไหลกลับมาใหม่ได้ โดยข้อดีอุโมงค์ลมชนิดนี้คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดสอบได้ สามารถทำความเร็วลมได้สูง การไหลของลมในส่วนทดสอบขึ้นงานมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากเป็นระบบวงปิดดังนั้นผลกระทบทางด้านเสียงที่เกิดจากพัดลมจึงมีน้อย แต่ก็มีข้อเสียคือ ต้องใช้งบประมาณในการสร้างสูง ต้องการพื้นที่กว้างในการรับรองโครงสร้าง และจำเป็นต้องออกแบบในส่วนการกำจัดควันเพิ่มเติมถ้าหากมีการติดตั้งเครื่องปล่อยควัน ดังรูปที่ 2.2



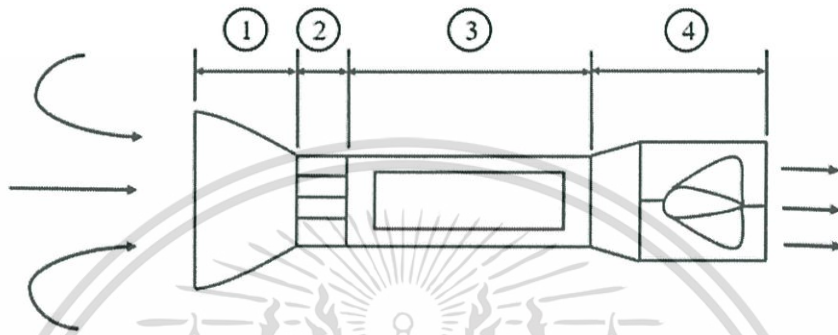
รูปที่ 2.2 อุโมงค์ลมวงปิด (Closed Return Wind Tunnel)

<<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Images/tuncret.jpg>>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การออกแบบโครงสร้างอุโมงค์ลม

การออกแบบโครงสร้างอุโมงค์ลม [2] โดยปกติแล้วลักษณะและขนาดของอุโมงค์ลมนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ไม่ได้มีการกำหนดขนาดและลักษณะที่แน่นอนโดยอาจจะเป็นทรงกระบอกกลม หรือรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมยาวก็ได้ สามารถแบ่งโครงสร้างหลักของอุโมงค์ลมได้ทั้งหมด 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอุโมงค์ลม

1. ส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบแน่นลมที่เข้ามาตามหลักการกลศาสตร์ของไหล จากโครงสร้างเป็นการต่อท่อแบบอนุกรม โดยพื้นที่หน้าตัดของส่วนที่ 1 จะมีขนาดใหญ่กว่าในส่วนที่ 3 ทำให้ความเร็วของลมในส่วนที่ 3 มีค่ามากกว่าในส่วนที่ 1 ดังสมการที่ (2.1)

$$A_1 V_1 = A_3 V_3 \quad (2.1)$$

- เมื่อ A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนที่ 1 มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
 A_3 คือ พื้นที่หน้าตัดของส่วนที่ 3 มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)
 V_1 คือ ความเร็วลมของส่วนที่ 1 มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)
 V_3 คือ ความเร็วลมของส่วนที่ 3 มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (m/s)

2. ส่วนรังผึ้ง (Honeycomb) เป็นส่วนที่มีหน้าที่ปรับทิศทางการไหลของอากาศก่อนที่จะไหลเข้าไปส่วนที่จะทำการทดสอบชิ้นงาน (Test Section) โดยรังผึ้งที่ออกแบบจะไม่มีกรงอากาศเนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อความเร็วลมในส่วนที่ทำการทดสอบชิ้นงาน

3. ส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section) เป็นส่วนที่จะทำการทดสอบชิ้นงาน ซึ่งจะทำการออกแบบให้มีช่องสำหรับเปิดเพื่อทำการแก้ไขหรือเปลี่ยนชิ้นงานอยู่ด้านข้างและด้านบนของอุโมงค์ โดยส่วนที่ทำการเปิดใส่ชิ้นงานจะเป็นการสวมอัดเข้าไปกับโครงสร้างหลักของอุโมงค์ลม และมีการ

ออกแบบให้มีขนาดกว้างกว่าช่องของโครงสร้างหลักของอุโมงค์ลม ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อทิศทางและไม่มีการรั่วไหลของอากาศจากช่องนี้เนื่องจากการดูดลมเข้าไปในตัวอุโมงค์

4. ส่วนกำลัง (Power Section) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่สร้างแรงลม เพื่อให้เกิดลมภายในตัวอุโมงค์ลม

2.3 ตัวควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Derivative Controller)

คอนโทรลเลอร์แบบ PID (PID Controller) [3] คือ อุปกรณ์ในการควบคุมระบบตามที่ต้องการ โดยจะมีการตั้ง SP (Set Point หรือค่าที่ต้องการไว้) และนำมาเปรียบเทียบกับค่า PV (Process Variable หรือตัวแปรกระบวนการหรือค่าจริงที่เกิดจากผลการทำงานจากระบบ) เพื่อให้ได้ค่า Error แล้วคอนโทรลเลอร์จะนำค่า Error นั้นมาทำการปรับแต่งค่าเอาต์พุตหรือ MV (Manipulated Variable หรือตัวแปรที่ถูกควบคุม) เพื่อลดค่า Error ให้ได้ต่ำที่สุด

ส่วน PID ย่อมาจาก Proportional-Integral-Derivative โดยที่ Proportional เป็นส่วนปฏิกิริยาต่อ Error ณ ขณะนั้น (Current Error), Integral เป็นส่วนปฏิกิริยาที่เกิดจากผลรวมของค่า Error ที่ผ่านมามากที่สุด (Sum of Recent Errors), Derivative เป็นส่วนปฏิกิริยาที่เกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error (Rate at Which the Error has been Changing) โดยผลรวมตามน้ำหนักของทั้งสาม ซึ่งปรับแต่งโดยค่าคงที่ K_p , K_i และ K_d เพื่อให้ได้การตอบสนองที่ต้องการ จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ เช่น روبเครื่อง/เพลลา ตำแหน่งวาล์ว หรืออุปกรณ์ทำความร้อน โดยทั่วไปค่า Gain บางค่า อาจเป็นศูนย์ก็ได้ซึ่งคอนโทรลเลอร์แบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่า เอมไหนหายไป

2.4 ทฤษฎีตัวควบคุมแบบ PID

การควบคุมแบบ PID นั้นประกอบด้วยเทอมสำหรับการปรับแต่ง 3 เอมรวมกันเป็น MV ดังสมการที่ (2.2) โดยที่ P, I และ D เป็นเอาต์พุตจากแต่ละเทอมตามลำดับดังนี้

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2.2)$$

2.4.1 เอม Proportional

เทอม Proportional เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของค่า Error ปัจจุบัน ซึ่งค่า P สามารถคำนวณได้โดยการนำค่า Error มาคูณกับค่าคงที่ K_p ดังสมการที่ (2.3)

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P_{out} คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Proportional

K_p คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Proportional

ค่า K_p ที่สูง จะเป็นผลให้ค่าเอาต์พุตมากขึ้นตาม หากค่า K_p มากเกินไป ระบบอาจจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงข้ามหากค่า K_p น้อยเกินไปอาจทำให้ระบบตอบสนองช้าเกินไป ซึ่งในกรณีนี้เป็นไปได้ว่าการตอบสนองดังกล่าว อาจจะถูกสิ่งรบกวน (Disturbance) ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้ทันการ เช่น ในการเร่งรอบเครื่องยนต์ เมื่อมีโหลดกระทำกับเครื่อง หากคอนโทรลเลอร์เร่งรอบเครื่องรอบเครื่องช้าไม่ทันกับโหลดที่เพิ่มขึ้นมาทันที รอบเครื่องจะค่อยๆ ตกลงและเครื่องก็จะดับในที่สุด ซึ่งในกรณีระบบที่ไม่มี Disturbance การใช้เทอม Proportional อย่างเดียวจะทำให้ระบบเกิดการ Oscillate รอบๆ SP จะไม่อยู่ที่ SP พอดี

2.4.2 เทอม Integral

เทอม Integral เป็นอัตราส่วนของค่า Error สะสมในหนึ่งช่วงเวลา (ปัจจุบันย้อนไปในอดีต) ค่า I เกิดจากผลคูณของค่าคงที่ K_i กับผลรวมของ $e(t)$ ซึ่งเป็นค่าสะสมของ Error ที่ควรจะต้องถูกแก้ไขมาก่อนหน้านี้ ดังสมการที่ (2.4)

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.4)$$

I_{out} คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Integral

K_i คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Integral

$\int_0^t e(t) dt$ คือ พื้นที่ทั้งหมดของค่าความผิดพลาด

เทอม Integral (เมื่อใช้ร่วมกับเทอม Proportional) จะช่วยเร่งให้ระบบวิ่งเข้าหา SP เร็วขึ้น และช่วยลด Error ที่เกิดจากการใช้เทอม Proportional อย่างเดียว อย่างไรก็ตามเนื่องจากว่าเทอม Integral นั้นเกิดจากการคำนวณโดยรวม Error ที่เกิดขึ้นในอดีตด้วยอาจทำให้เกิด Overshoot เกิน SP ในค่าปัจจุบันด้วย

2.4.3 เทอม Derivative

เทอม Derivative อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error ในโปรเซสนั้นคำนวณได้โดยสโลป (Slope) ของกราฟ Error และ Time ซึ่งก็คือ อนุพันธ์แรกเทียบกับเวลา และคูณค่าสโลปนี้กับค่าคงที่ K_d ก็จะได้เทอม Derivative ดังสมการที่ (2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

D_{out} คือ ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ Derivative

K_d คือ อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative

$\frac{de}{dt} e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่เวลา t

เทอม Derivative จะช่วยดึงเอาท์พุตจากคอนโทรลเลอร์ให้ช้าลง ซึ่งจะเห็นผลได้ชัดเมื่อโปรเซสเข้าใกล้ Set Point ฉะนั้นเทอม Derivative จึงช่วยลดการ Overshoot ซึ่งเกิดจากเทอม Integral และช่วยปรับปรุงเสถียรภาพของระบบโดยรวม อย่างไรก็ตามค่า Derivative นั้นค่อนข้างไวต่อ Noise ซึ่งอาจทำให้ระบบไม่เสถียรได้หาก Noise และค่า K_p สูงเกินไป

เมื่อรวมเทอม Proportional, Integral และ Derivative เข้าด้วยกันก็จะได้อเอาต์พุตจากคอนโทรลเลอร์ PID ดังสมการที่ (2.6)

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} e(t) \quad (2.6)$$

โดยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ

ค่า Proportional Gain, K_p : ค่าที่มากขึ้นหมายถึงการตอบสนองที่เร็วขึ้นเพราะค่า Error ยิ่งมาก ค่าชดเชยจากเทอมนี้ก็จะมากขึ้นตามค่า Gain ที่มากขึ้นจะนำไปสู่โปรเซสที่ไม่เสถียรการแกว่ง (Oscillation)

ค่า Integral Gain, K_i : ค่าที่มากขึ้นหมายถึงค่า Error แบบ Steady-state จะถูกกำจัดได้เร็วขึ้น ข้อเสียก็คือ Overshoot ค่า Error ที่เป็นลบจะต้องถูกแก้ด้วย Error ที่เป็นบวก ก่อนที่ระบบจะเข้าสู่ Steady-state

ค่า Derivative Gain, K_d : ค่าที่มากขึ้นหมายถึงขนาด Overshoot ที่ลดลง แต่อาจทำให้การตอบสนองช้าลงบ้างและอาจนำไปสู่ความไม่เสถียรของระบบเนื่องจาก Noise ได้

2.5 LabVIEW

LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้ติดต่อสื่อสารกับเครื่องมือต่างๆ ที่อยู่ภายนอกผ่านบอร์ด Data Acquisition ใช้งานเป็น Monitoring หรือในการควบคุมการวัดค่าต่างๆ เช่น Strain อุณหภูมิ หรือสัญญาณอื่นๆ โดยมีตัวเซนเซอร์รับสัญญาณเข้ามา โดยเอาต์พุตที่ได้จากเซนเซอร์เหล่านี้จะมีค่าเป็นแรงดันหรือกระแสซึ่ง LabVIEW สามารถอ่านค่าที่ผ่านเข้ามาทาง DAQ Card แล้วบันทึกค่าเป็นไฟล์ข้อมูลได้ ดังนั้นการนำ LabVIEW ไปใช้จะต้องพิจารณาถึงวัตถุประสงค์ และ Application ที่จะใช้ก่อนว่ามี Input เป็นอะไร และต้องการ Output อะไร จากนั้นจึงทำการเลือก Hardware ให้ตรงตามต้องการ

การใช้งาน LabVIEW ผู้ใช้ควรมีพื้นฐานด้านการเขียนโปรแกรมพอสมควร เนื่องจากการติดต่อสื่อสารระหว่างโปรแกรมกับเครื่องมือต่างๆ ที่อยู่ภายนอกนั้น ผู้ใช้ต้องเขียนโปรแกรมคำสั่งการทำงานเพื่อเรียกข้อมูลการวัดแล้วนำมา Process ให้เป็น Monitoring หรือการเขียนคำสั่งเพื่อการควบคุมระบบ เช่น ให้โปรแกรมสามารถตรวจสอบค่า Strain ที่อ่านได้ว่าถ้ามีค่าไม่เกินกว่าที่กำหนดแล้วจึงค่อยส่งคำสั่งไปควบคุมให้อุปกรณ์อื่นๆ ทำงานต่อได้ โดยโปรแกรม LabVIEW มีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน คือ

1. Front Panel เป็นส่วนตั้งค่าการวัดและอ่านค่าตัวเลขหรือกราฟที่ออกมาจาก Block Diagram จึงทำหน้าที่เสมือนเครื่องมือวัดจริงโดย Input ที่ป้อนเข้าไปจะเป็นตัวควบคุม ส่วน Output ที่ออกมาจะเป็นตัวแสดงผล

2. Block Diagram ทำหน้าที่เสมือนเป็น Source Code โดยการใช้โปรแกรมภาษากากราฟฟิกองค์ประกอบของ Block Diagram นี้จะแทนโปรแกรม Node เช่น For Loop Case Structure และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เป็นต้น

3. Icon/Connector ภายใน Front Panel จะประกอบด้วย Icon ต่างๆ และมีสายเชื่อมต่อกันในแต่ละ Icon ซึ่งเมื่อเชื่อมต่อกันแล้ว จะสามารถเปลี่ยน Virtual Instrument (VI) นี้ให้เป็น Sub VI หรือ Object ที่นำกลับมาใช้ใน Block Diagram ได้อีก

ความสามารถของโปรแกรม LabVIEW เนื่องจากบริษัท National Instrument (NI) ซึ่งเป็นผู้พัฒนาโปรแกรม LabVIEW มี Product ในการพัฒนาอยู่มากมายทั้ง Hardware และ Software จึงทำให้โปรแกรม LabVIEW มีความสามารถในการติดต่อ Hardware อย่างหลากหลาย เช่น การใช้โปรแกรม LabVIEW เพื่อเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์ภายนอกทำได้โดยผ่านทางการ์ด DAQ (Data Acquisition) การเชื่อมต่อสามารถเชื่อมต่อกับพอร์ต (Port) ได้หลายชนิด เช่น พอร์ตขนาน (Parallel Port), พอร์ตอนุกรม (Serial Port), GPIB, และ HPIB เป็นต้น จึงมีแนวความคิดในการออกแบบวงจรขึ้นมาโดยกำหนดคุณสมบัติให้เป็นบอร์ดแบบภายนอกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม (RS-232) ซึ่งมีจำนวนอินพุต-เอาต์พุต 16 ช่อง (Channel) โดยอินพุตทำงานได้ทั้งโหมดดิจิทัลอินพุตและอนาล็อกอินพุต สำหรับเอาต์พุตกำหนดให้เป็นแบบดิจิทัลเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนทางด้าน Software นั้น Protocol ต่างๆ ในทางอุตสาหกรรม LabVIEW ก็สามารถติดต่อสื่อสารได้รวมทั้ง PLC ยี่ห้อต่างๆ และงาน SCADA เอง LabVIEW ก็สามารทำได้เหมือนโปรแกรม SCADA ทั่วไป ความสามารถในการทำ Image Processing ก็ทำได้ไม่แพ้ Image Processing ในท้องตลาด อีกทั้งยังสามารถติดต่อกับ Database มาตรฐานรวมทั้งการควบคุมการทำงานกับโปรแกรม MS-OFFICE และโปรแกรมอื่นๆ ใน Windows ได้อีกด้วย



รูปที่ 2.4 โปรแกรม LabVIEW

2.6 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) [4] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดความเร็วลมและเป็นเครื่องมือที่สถานีตรวจวัดอากาศทั่วไปใช้งานอยู่ คำว่า Anemometer มีที่มาจากภาษากรีกคำว่า Anemos หมายถึงลมและถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายการวัดความเร็วลมที่ใช้ในอุตุนิยมวิทยาหรืออากาศพลศาสตร์ เครื่องวัดความเร็วลมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด แบบแรกวัดความเร็วลมมีหน่วยเป็นระยะทางต่อเวลา ส่วนแบบที่สองเป็นการวัดความดันลม (Pressure)

1. หัววัดแบบลวดความร้อน (Thermal Probe) จะใช้หลักการคือ วัสดุที่ร้อนจะถูกถ่ายเทความร้อนเมื่อมีลมที่เย็นกว่ามากระทบ ซึ่งจากหลักการนี้เองหัววัดชนิดนี้จึงทำจากลวดความร้อน โดยตัวเครื่องจะจ่ายกระแสให้ลวดความร้อนและควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมกระแสนี้จะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วลม แต่หัววัดชนิดนี้ค่อนข้างบอบบาง ต้องวัดในลมที่สะอาดและอุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หัววัดแบบลวดความร้อน (Thermal Probe)

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:AND9GcRTcD2hGdvtPLVkkcq93LznKHHMGsqjVNqfrz6cK4B9huLnHRu>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หัววัดแบบใบพัด (Vane Probe) จะใช้การนับความเร็วรอบของใบพัดที่หมุนด้วย Proximity Switch โดยใบพัดขนาดใหญ่ (60 mm, 100 mm) จะเหมาะกับลมที่มีลักษณะปั่นป่วน (Turbulent Flows) เช่น ขาออกของท่อลม ฯลฯ และใบพัดขนาดเล็กจะเหมาะสมกับการวัดลมในท่อ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หัววัดแบบใบพัด (Vane Probe)

<<https://image.slidesharecdn.com/anemometer-161231151138/95/temperature-sensor-anemometer-5-8.jpg>>

3. หัววัดแบบพิทอททิว (Pitot Tube) เป็น Sensor วัดความดันที่ใช้ในการวัดความเร็วของไหล Pitot Tube ถูกคิดค้นขึ้นมาโดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ Henri Pitot ในต้นศตวรรษที่ 18 และได้รับการปรับเปลี่ยนเพื่อให้รูปแบบทันสมัยขึ้นในกลางศตวรรษที่ 19 โดยวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ Henry Darcy มันถูกใช้อย่างแพร่หลายในการวัดความเร็วลมในการบิน และเป็นเครื่องมือวัดความเร็วของอากาศและก๊าซ ในงานอุตสาหกรรม ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หัววัดแบบพิทอททิว (Pitot Tube)

<<http://www.apexinst.com/product/standard-pitot-tube-for-method-2c#>>

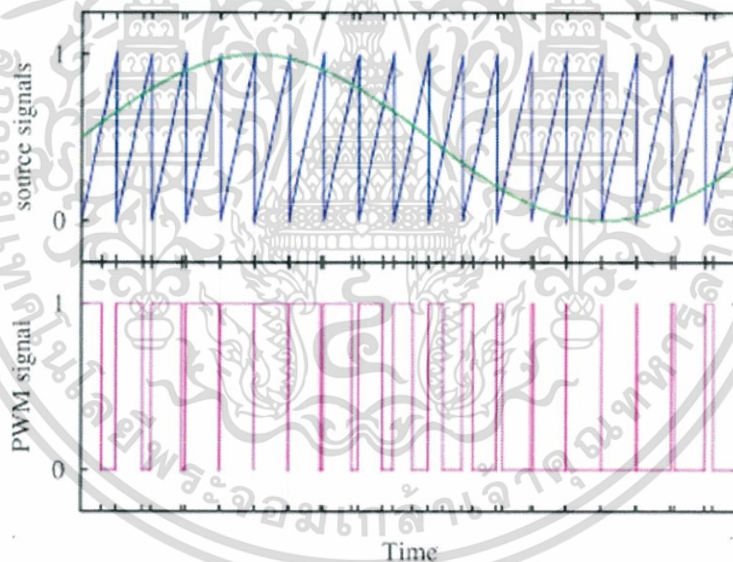
2.7 PWM (Pulse Width Modulation)

PWM (Pulse Width Modulation) [5],[6] เป็นสัญญาณที่เกิดจากการผสมกันระหว่างสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangle Wave) กับระดับแรงเคลื่อนสัญญาณไฟดีซี หรือสัญญาณอื่นๆ ที่มีระดับไฟดีซีเป็นตัวรองรับ ผลที่ได้จากการผสมสัญญาณดังกล่าวจะได้รูปคลื่นสัญญาณพัลส์ที่มี 2 สถานะ คือ ON

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับ OFF เมื่อนำสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปขับอุปกรณ์กำลัง เช่น หลอดไฟ มอเตอร์ดีซี จะได้ผลการควบคุมคือ เมื่อสัญญาณพัลส์มีสถานะ ON หลอดไฟจะติดสว่างเต็มที่ ถ้า OFF ไฟจะดับ หากสัญญาณมีความต่อเนื่องเช่นนี้ตลอดก็จะได้การติด-ดับของหลอดไฟต่อเนื่อง และหากการติด-ดับมีความถี่สูงๆ จนสายตาไม่สามารถสังเกตเห็นถึง การติด-ดับได้ ก็จะสังเกตเห็นได้เพียงแสงที่หรี่ลง หากทำให้ช่วงเวลา ON น้อยลง และในทางตรงกันข้าม หากทำให้ช่วงเวลา ON มากขึ้นเรื่อยๆ ก็จะทำให้หลอดไฟสว่างขึ้นเรื่อยๆ จนถึงสว่างเต็มที่เมื่อ ON ตลอด

PWM นับเป็นการควบคุมแบบ Digital ที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยส่วนมากเพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน และสามารถควบคุม Output ได้ โดยมีการกระตุ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานน้อยมาก กล่าวคือ วงจรพวกนี้จะมีการสูญเสียพลังงานน้อยกว่าวงจรแบบอื่น การปรับความกว้างของพัลส์ ทำได้โดยการนำเอาสองสัญญาณมาเปรียบเทียบกับกันคือ สัญญาณสามเหลี่ยมกับสัญญาณที่ต้องการปรับความกว้างพัลส์ โดยการเปรียบเทียบสัญญาณนิยมใช้ ออปแอมป์ ดังรูปที่ 2.8

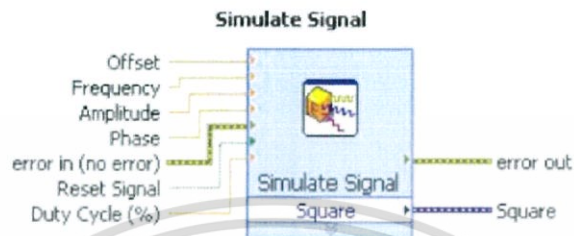


รูปที่ 2.8 Source Signal และ PWM Signal

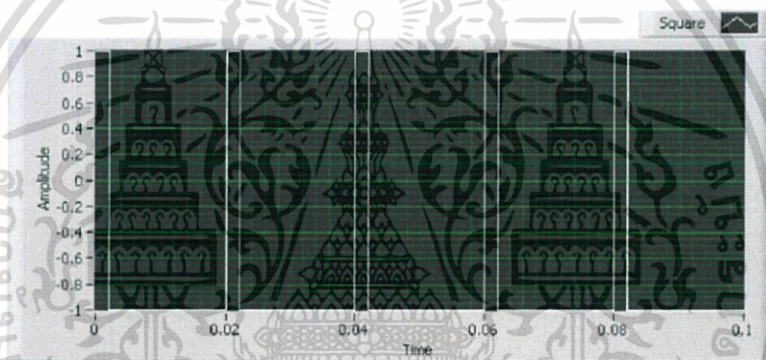
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วิธีการสร้างสัญญาณ PWM

สำหรับการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยโปรแกรม LabVIEW สามารถทำได้ด้วย Block Simulate Signal โดยการกำหนดค่า Parameter ต่างๆ เช่น ค่า Frequency ค่า %Duty Cycle และอื่นๆ ดังรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 Block Simulate Signal



รูปที่ 2.10 สัญญาณ PWM ที่ได้จาก Block Simulate Signal

2.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ [7] หรือเรียกว่า เอ.ซี มอเตอร์ (A.C. MOTOR) หมายถึงมอเตอร์ที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าคือ ขดลวดในสเตเตอร์และส่วนที่ทำหน้าที่ให้พลังงานกลคือ ตัวหมุนหรือโรเตอร์ ซึ่งเมื่อขดลวดในสเตเตอร์ได้รับพลังงานไฟฟ้าก็จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาในตัวที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นนี้จะมีการเคลื่อนที่หรือหมุนไปรอบๆ สเตเตอร์ เนื่องจากการต่างเฟสของกระแสไฟฟ้าในขดลวด และการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในขณะที่สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ไปสนามแม่เหล็กจากขั้วเหนือก็จะพุ่งเข้าหาขั้วใต้ ซึ่งจะไปติดกับตัวนำที่เป็นวงจรรปิดหรือขดลวดกรงกระรอกของตัวหมุนหรือโรเตอร์ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดของโรเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กของโรเตอร์นี้จะเคลื่อนที่ตามทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ ก็จะทำให้โรเตอร์ของมอเตอร์เกิดจะพลังงานกลสามารถนำไปใช้ประโยชน์ที่ต้องการหมุนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนของการดำเนินงานได้วางแผนไว้ดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
3. ออกแบบอุปกรณ์ควบคุมที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนความเร็วลม
4. สั่งซื้ออุปกรณ์
5. สร้างเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
6. ทดสอบเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
7. ปรับแก้เครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ
8. สรุปผลและจัดทำเอกสารรายงานการวิจัย

3.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

1. ตัวควบคุม National Instruments USB-6009 14-Bit Multifunction DAQ



รูปที่ 3.1 National Instruments USB-6009 14-Bit Multifunction DAQ

มีคุณสมบัติดังนี้

- 14-Bit, 48 kS/s Low-Cost Multifunction DAQ
- 8 Analog Inputs (14-bit, 48 kS/s)
- 2 Static Analog Outputs (12-bit); 12 Digital I/O, 32 Bit Counter
- Bus-powered for High Mobility, Built-in Signal Connectivity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- OEM Version Available
- Compatible with LabVIEW

2. เครื่องวัดความเร็วลม-วัดอุณหภูมิแบบใบพัดขนาดเล็ก DIGICON DA-45S



รูปที่ 3.2 Mini Vane Anemometer รุ่น DIGICON DA-45S

มีคุณสมบัติดังนี้

- มีจอแสดงผล LCD ขนาด 51x32 มม.
- ย่านการวัด 0.8~12.0 m/s, 2.8~43.2 km/h, 160~2538 ft/min, 1.8~26.8 mile/h, 0.8~23.3 knots, 0.0~80 องศา C, 32~176 องศา F
- ขนาดตัวเครื่องวัด : 68x200x30 มม.
- ขนาดโพรบวัด : ส่วนใบพัดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม., ยาว 240 มม. (ขณะหอดอยู่) ยึดได้ยาวสุด 600 มม.
- ใช้ไฟ : แบตเตอรี่ 9V DC
- วัดความเร็วลมที่มีอุณหภูมิสูงถึง 80 องศา C โดยใช้ใบพัดขนาดจิ๋ว
- โพรบวัดมีรูปร่างเรียวยาวแบบเสาอากาศซีกของวิทยุ ออกแบบให้แยกออกจากตัวเครื่อง เหมาะสำหรับใช้วัดในที่แคบๆ และในที่สูง
- ออกแบบให้ตลับลูกปืนมีความเสียดทานต่ำ เพื่อให้ใบพัดหมุนได้อย่างอิสระ จึงทำให้ผลการวัดมีความเที่ยงตรงสูงทั้งความเร็วลมต่ำและสูง
- จอแสดงผลแบบ LCD ขนาดใหญ่แสดงค่าความเร็วลมและอุณหภูมิได้ในเวลาเดียวกัน
- มีการคงค่าข้อมูล (DATA HOLD), บันทึกค่าสูงสุด-ค่าต่ำสุด และเรียกกลับมาดูใหม่ได้
- สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้โดยพอร์ต RS-232
- มีย่านการวัดอุณหภูมิ : องศา C, องศา F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น ตรวจสอบสภาพอากาศในสายการผลิต, สภาวะการไหล, ตรวจสอบความเร็วลมของท่อลม, พัดลม/มอเตอร์/เครื่องเป่าลม, ความเร็วลมของระบบปรับอากาศ, ระบบให้ความร้อนในเตาเผาและห้องพ่นสี

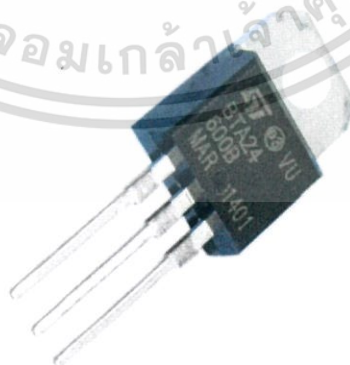
3. พัดลมถึงกลมขับตรงขนาด 24 นิ้ว รุ่น T40A-6AH 3HP 4P 220V

ปริมาณลมที่ได้จากพัดลมถึงกลมขับตรงขนาด 24 นิ้ว รุ่น T40A-6AH 3HP 4P 220V คือ 15,000 cmh มีแรงดัน 260 pa มีกำลัง 2.2 kW มีค่า RPM เท่ากับ 1,450 rpm



รูปที่ 3.3 พัดลมถึงกลมขับตรง ขนาด 24 นิ้ว รุ่น T40A-6AH 3HP 4P 220V

4. ไตรแอก BTA24 (Triac BTA24) ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด/ปิดวงจร มอเตอร์



รูปที่ 3.4 Triac BTA24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. 6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output

ทำหน้าที่ควบคุมการเปิด/ปิดวงจรโดยใช้สัญญาณกระแสตรงเป็นตัวควบคุม



รูปที่ 3.5 6-Pin DIP Zero-Cross Optoisolators Triac Driver Output

6. เครื่องสร้างควัน Smoke Fog 400W รุ่น T400

ใช้สำหรับปล่อยควันเข้าไปในตัวโมเดลจำลองเพื่อให้การสังเกตเส้นการไหลของลมที่ไหลผ่านวัตถุได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยตัวเครื่องใช้แรงดันไฟฟ้า AC 220V 60 Hz กำลังไฟฟ้า 400W ใช้เวลาอุ่นเครื่อง 5 นาที มีระยะพ่นควัน 2-4 เมตร และสามารถควบคุมระยะไกลด้วยรีโมท

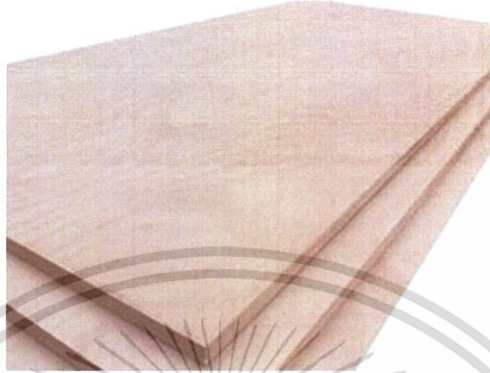


รูปที่ 3.6 เครื่องสร้างควัน Smoke Fog 400W รุ่น T400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร

เนื่องจากต้องการให้ต้นทุนในการสร้างต่ำ จึงเลือกใช้ไม้อัดหนา 8 มิลลิเมตรขนาด 122 cm. x 244 cm. จำนวน 2 แผ่นเป็นวัสดุหลักในการทำตัวอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.7 ไม้อัดความหนา 8 มิลลิเมตร

3.3 ซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง

1. Fusion360

เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ 3 มิติ ใช้ในการสร้างโมเดลของเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลม จำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ เพื่อที่จะได้ทราบขนาด ตำแหน่ง และลักษณะการวางของอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โปรแกรม Fusion360

2. Flow Design

เป็นโปรแกรมสำหรับจำลองการไหลของลม โดยการป้อนข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติ จากนั้นจึงกำหนดข้อมูลการไหลของลม เช่น ทิศทางลมไปจนถึงความเร็วลมเพื่อจำลอง และดูผลการออกแบบอุโมงค์ลม ดังรูปที่ 3.9

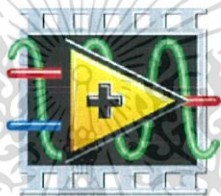
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 โปรแกรม Flow Design

3. LabVIEW

เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการควบคุม ตรวจสอบ วิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลเป็น User Interface ใช้ในการตรวจสอบสถานะความเร็วลมภายในอุโมงค์ ตลอดจนถึงควบคุมการทำงานของมอเตอร์พัดลมที่ใช้ในการสร้างลม ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โปรแกรม LabVIEW

3.4 การออกแบบและวางแผนการทำงาน

3.4.1 การวางแผนและออกแบบทางด้าน Hardware

1. ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุโมงค์ลม
2. หาข้อมูลชิ้นส่วนวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่จำเป็นในการสร้าง
3. นำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการออกแบบตัวอุโมงค์ด้วยโปรแกรม Fusion360
4. ออกแบบวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์
5. ติดต่อผู้จำหน่ายและทำการจัดซื้อชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ
6. ทำการประกอบชิ้นงาน รวมถึงอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกันตามที่ได้ออกแบบไว้

3.4.2 การวางแผนและออกแบบทางด้าน Software

1. ศึกษาโปรแกรมและทฤษฎีที่ต้องใช้
2. เขียนผังงาน (Flowchart) ของระบบเพื่อช่วยในการกำหนดทิศทางในการเขียนโปรแกรม
3. ออกแบบหน้าต่างของ User Interface
4. เขียนโปรแกรมใช้งาน User Interface โดยใช้ LabVIEW
5. ทดสอบโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วิธีการดำเนินงาน

3.5.1 การออกแบบตัวอุโมงค์ลม

การออกแบบตัวอุโมงค์ลมเริ่มต้นด้วยการคำนึงถึงอุปกรณ์ชิ้นส่วนหลักที่จะใช้ และวัตถุประสงค์ของโครงการที่ต้องการใช้เพื่อทดสอบใบกังหันลมภายในช่วงความเร็วลมที่ 0–15m/s ซึ่งจากคุณสมบัติของพัดลมถักกลมขับตรง ขนาด 24 นิ้ว รุ่น T40A-6AH 3HP 4P 220V ที่สามารถผลิตปริมาณลมได้ 15,000 cmh (m^3 / hr) สามารถคำนวณหาขนาดความกว้างภายในอุโมงค์ลมได้ดังนี้

$$\frac{15,000m^3}{1Hr} = \frac{15,000m^3}{3,600sec}$$

$$= \frac{4.1667m^3}{1sec \times Area}$$

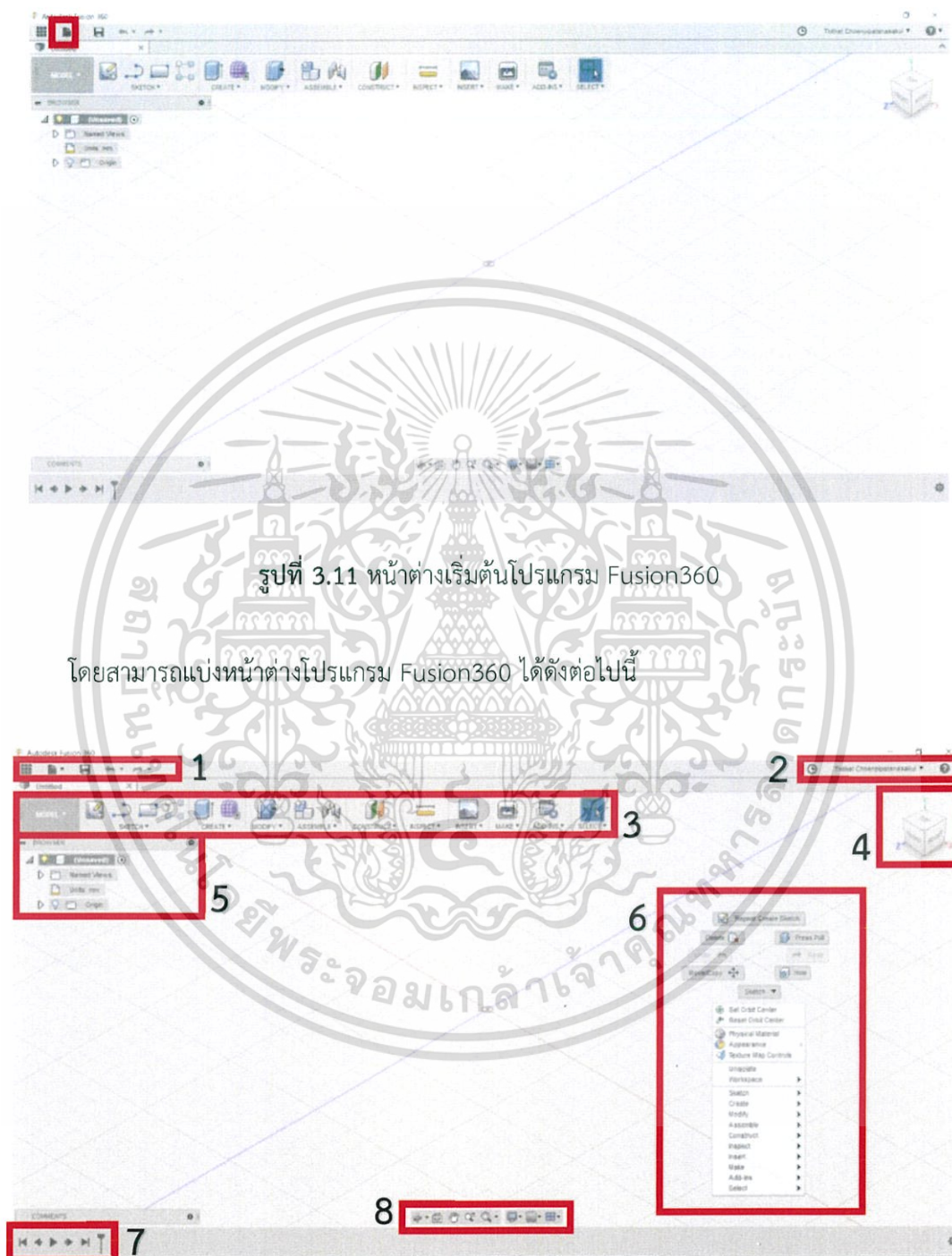
$$= \frac{4.1667m^3}{0.25m^2 \cdot sec}$$

$$= 16.6667m / sec$$

จากการคำนวณทำให้ทราบว่าขนาดความกว้างภายในอุโมงค์ลมต้องมีขนาด 50x50cm โดยจะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการออกแบบอุโมงค์ลมต่อไป ซึ่งการออกแบบเลือกออกแบบเป็นอุโมงค์ลมวงเปิด (Open Return Wind Tunnel) เนื่องจากมีคุณสมบัติตรงตามวัตถุประสงค์ของโครงการมากกว่าอุโมงค์ลมวงปิด (Closed Return Wind Tunnel) ซึ่งการออกแบบจะใช้โปรแกรม Fusion360

3.5.2 การเขียนแบบโดยใช้ Fusion360

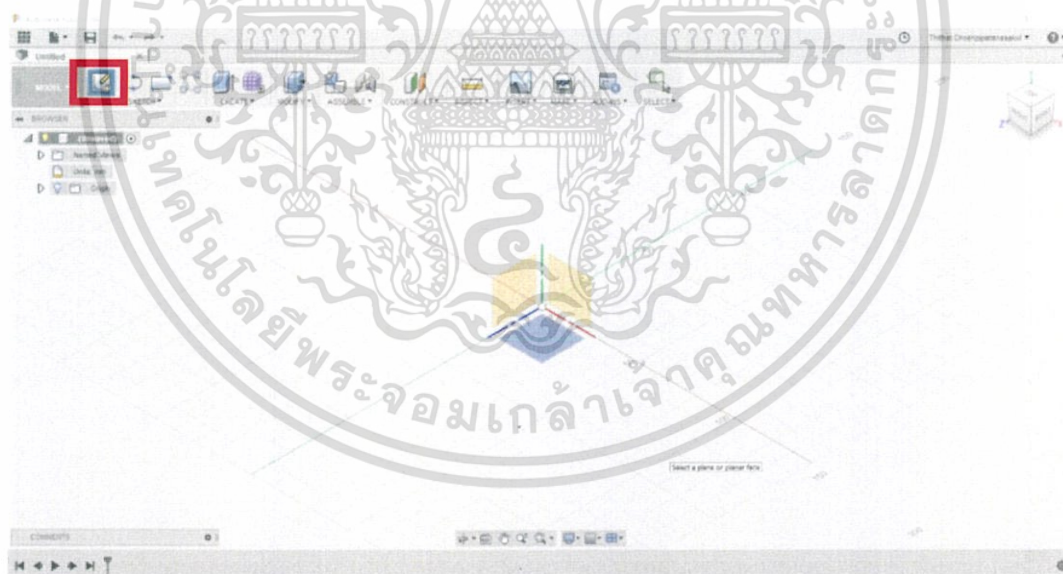
เริ่มต้นด้วยการเปิดโปรแกรม Fusion360 เลือก File >> New Design ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.12 ส่วนต่างๆ ในโปรแกรม Fusion360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Application Bar เป็นส่วนจัดการไฟล์ สำหรับบันทึกไฟล์ นำเข้าไฟล์ ส่งออกไฟล์ เดินหน้าการทำงาน และย้อนกลับการทำงาน
 2. Profile and Help เป็นส่วนจัดการบัญชีผู้ใช้งาน และเข้าถึงการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการใช้งานโปรแกรมได้อีกด้วย
 3. Toolbar เป็นส่วนเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการเขียนแบบ
 4. ViewCube เป็นส่วนตำแหน่งมุมมองของแบบที่ได้เขียนไว้ เพื่อช่วยให้สะดวกในการเขียนแบบยิ่งขึ้น
 5. Browser เป็นส่วนประกอบของแบบที่เขียน โดยแยกระหว่าง แบบร่าง ใช้งาน แกนระนาบต่างๆ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน
 6. Canvas and Marking Menu เป็นส่วนคำสั่งการใช้งานลัด เปิด/ปิดได้ด้วยการคลิกขวา
 7. Timeline เป็นส่วนที่แสดงขั้นตอนการทำงานที่ได้ทำแล้ว โดยจะแสดงตามลำดับ
 8. Navigation Bar and Display Settings เป็นส่วนควบคุมมุมมองของโปรแกรม ทำหน้าที่ต่างๆ เช่น การขยายหน้าจอ การหมุนแกน เป็นต้น
- การเขียนแบบเริ่มต้นด้วยคำสั่ง Create Sketch เพื่อทำการร่างแบบที่จะทำการสร้างซึ่งจะปรากฏตัวเลือกแกนที่หน้าจอโปรแกรม ดังรูปที่ 3.13

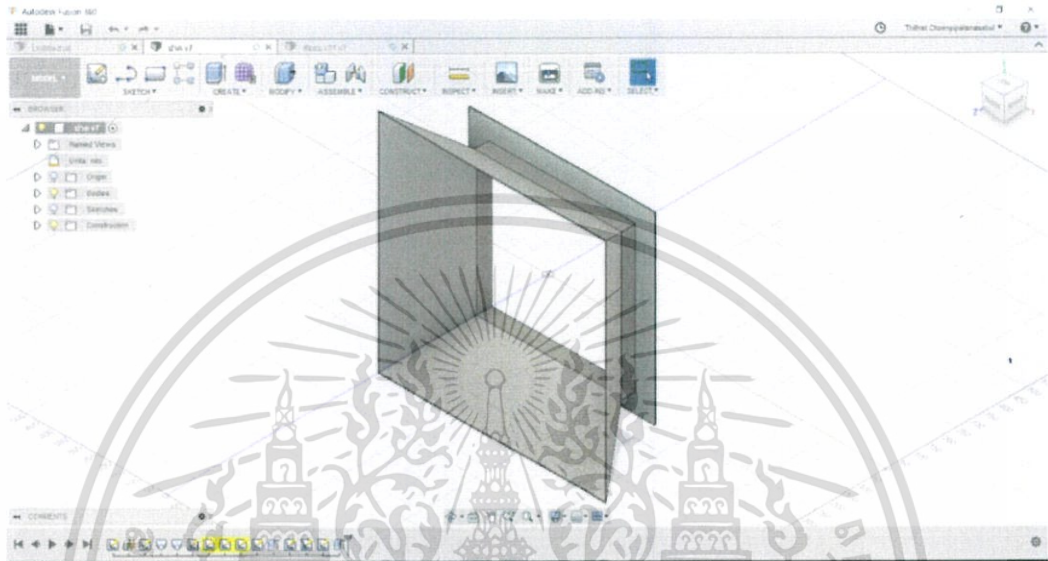


รูปที่ 3.13 คำสั่ง Create Sketch ในโปรแกรม Fusion360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

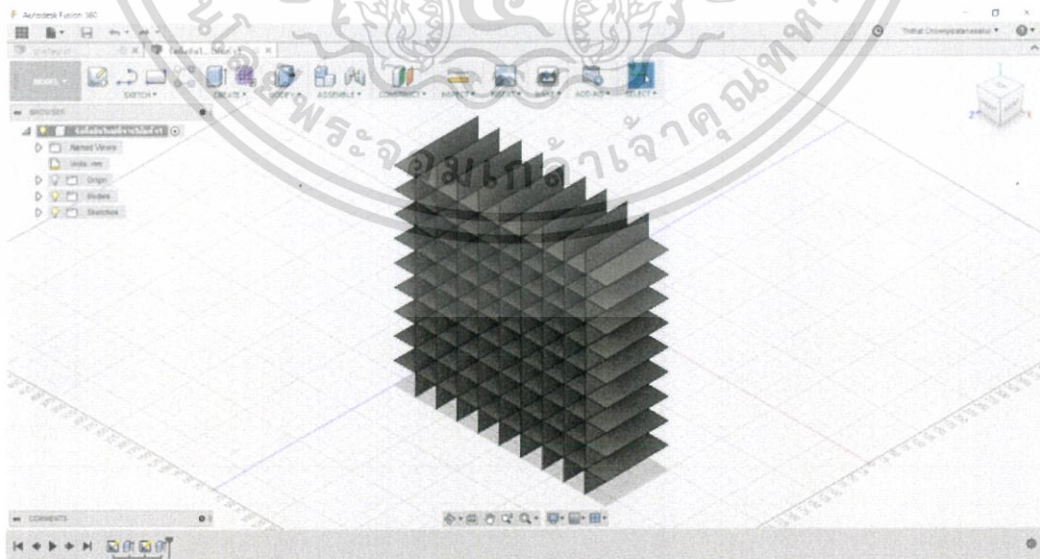
สำหรับการออกแบบอุโมงค์ลมนี้ ได้ทำการออกแบบเป็นส่วนต่างๆก่อน แล้วจึงนำมาประกอบรวมกันเป็นอุโมงค์ลม ซึ่งหลังจากดำเนินการตามขั้นตอนข้างต้นที่ได้กล่าวไปทำให้ได้ผลลัพธ์ในการออกแบบที่สามารถแบ่งเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

1. ส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction)



รูปที่ 3.16 การออกแบบส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction) ในโปรแกรม Fusion360

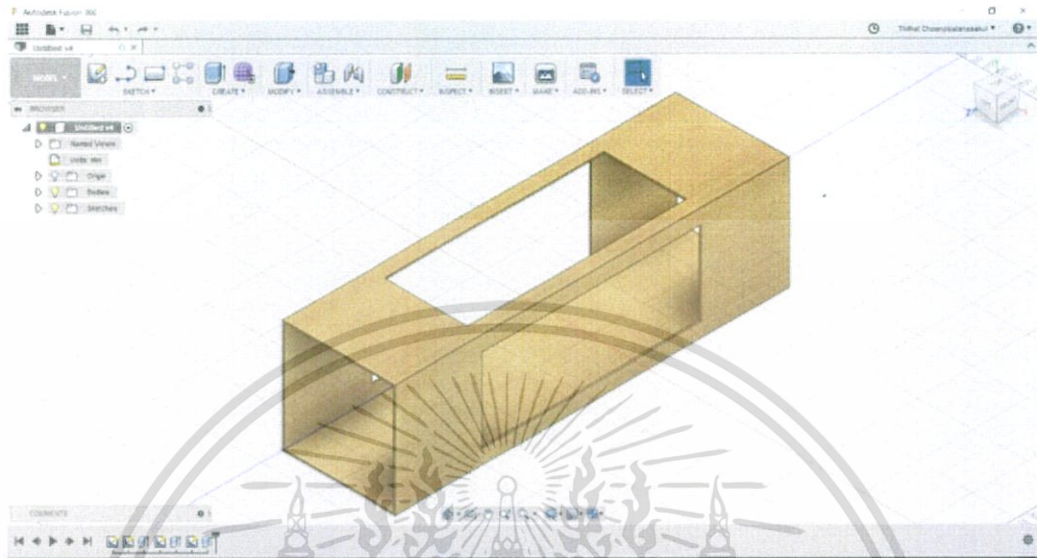
2. ส่วนรังผึ้ง (Honeycomb)



รูปที่ 3.17 การออกแบบส่วนรังผึ้ง (Honeycomb) ในโปรแกรม Fusion360

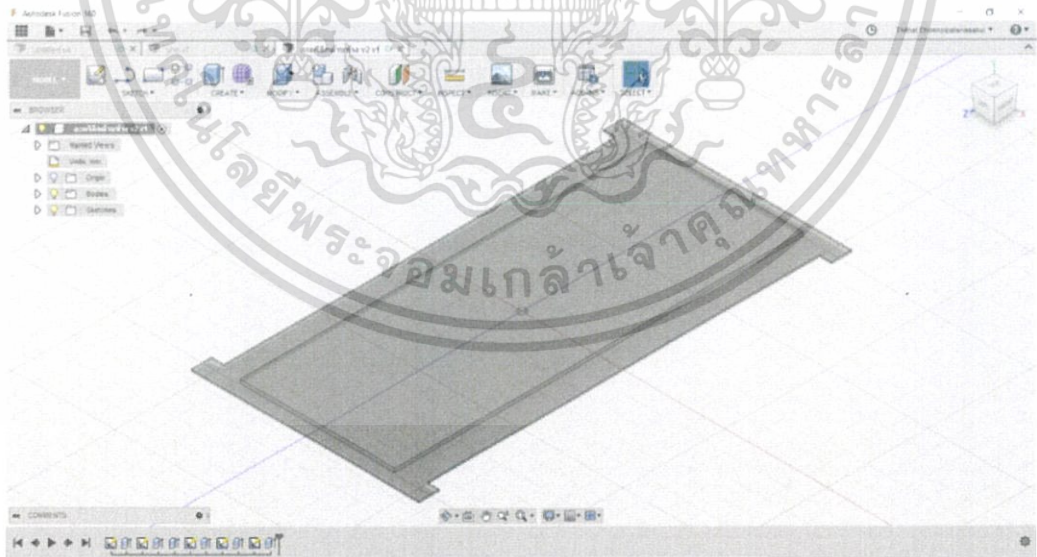
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section) มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 50x50cm. ซึ่งได้จากการคำนวณ



รูปที่ 3.18 การออกแบบส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section) ในโปรแกรม Fusion360

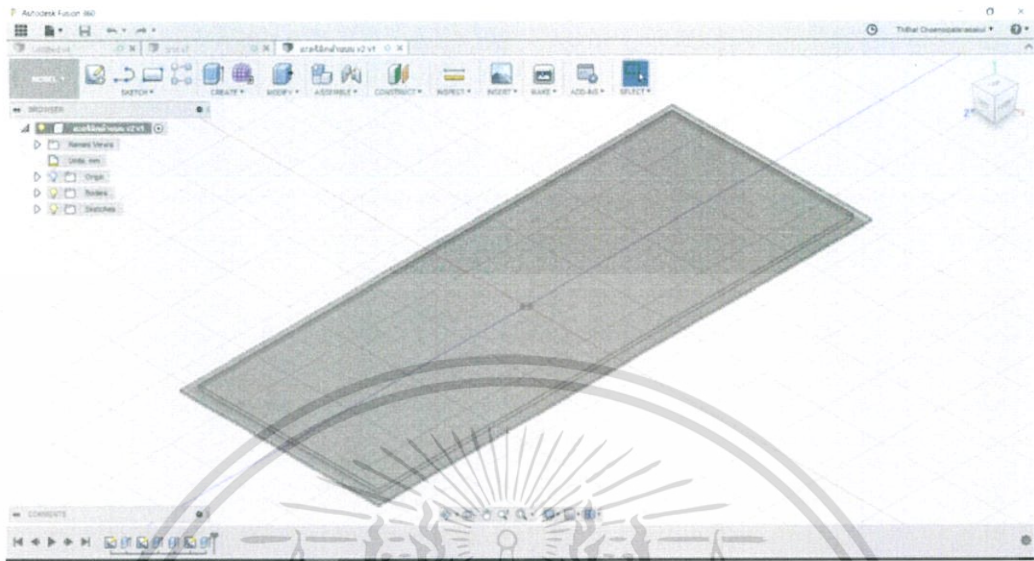
4. แผ่นอะคริลิคด้านข้าง ใช้ประกบเข้ากับตัวอุโมงค์ลม โดยยึดกับอุโมงค์ด้วยปีกรูปตัว H



รูปที่ 3.19 การออกแบบแผ่นอะคริลิคด้านข้างแบบมีปีกรูปตัว H ในโปรแกรม Fusion360

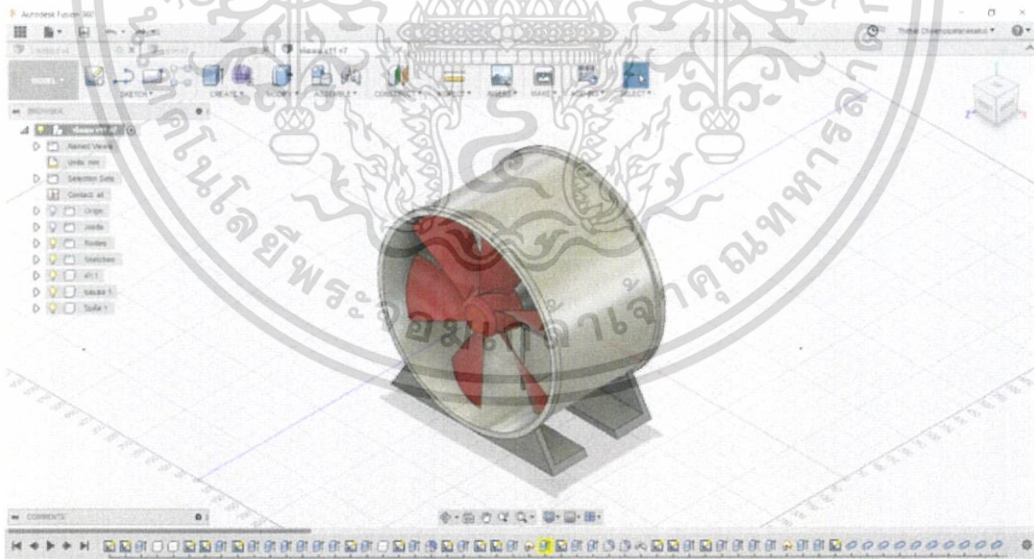
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แผ่นอะคริลิคด้านบน ใช้ประกบเข้าที่บริเวณด้านบนของส่วนทดสอบชิ้นงาน



รูปที่ 3.20 การออกแบบแผ่นอะคริลิคด้านข้างแบบมีปีกรูปตัว H ในโปรแกรม Fusion360

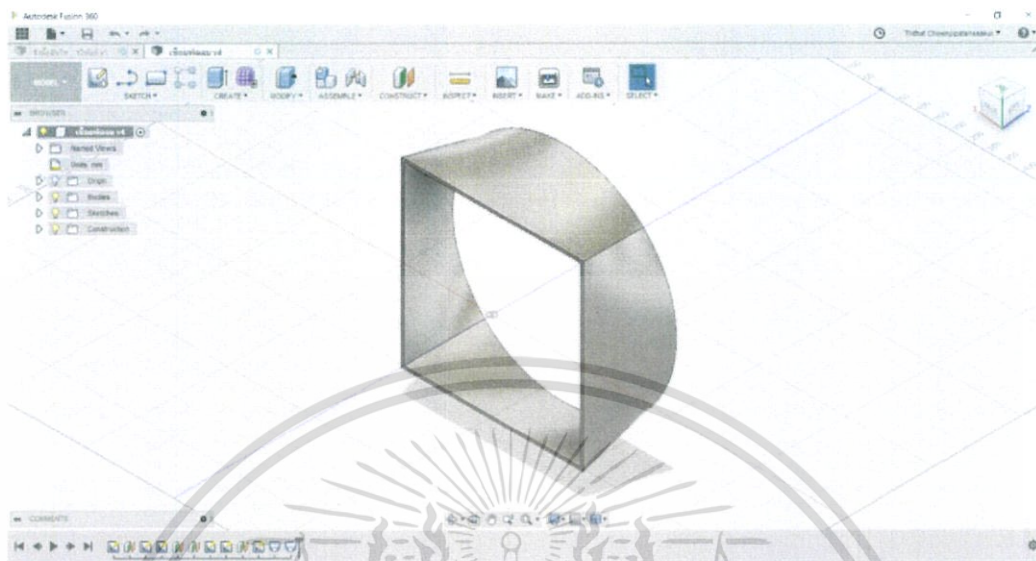
6. พัฒลม โดยที่เขียนแบบจากขนาดจริงเพื่อให้สัมพันธ์กับการออกแบบส่วนอื่นๆ



รูปที่ 3.21 การเขียนแบบพัฒลมในโปรแกรม Fusion360

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

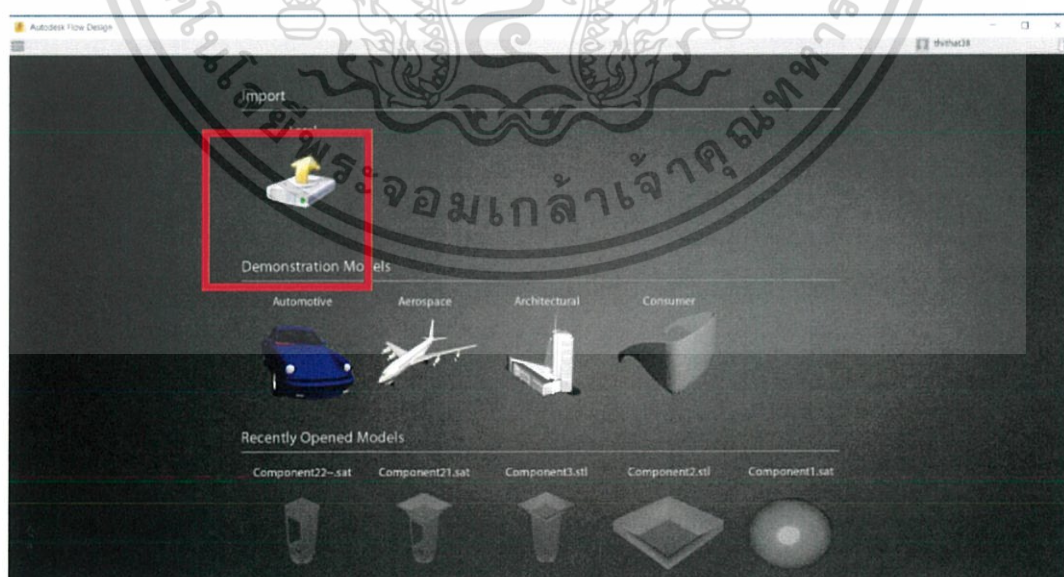
7. ส่วนเชื่อมต่อระหว่างส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section) กับพัดลม



รูปที่ 3.22 การออกแบบส่วนเชื่อมต่อระหว่างส่วนทดสอบชิ้นงานกับพัดลมในโปรแกรม Fusion360

3.5.3 การใช้งานโปรแกรม Flow Design

เริ่มต้นด้วยการเปิดโปรแกรม Flow Design จะแสดงหน้าต่างโปรแกรมดังรูปที่ 3.23 เลือก Import >> Local เพื่อทำการนำเข้าไฟล์ที่ต้องการจำลอง



รูปที่ 3.23 การนำเข้าไฟล์เพื่อจำลองในโปรแกรม Flow Design

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

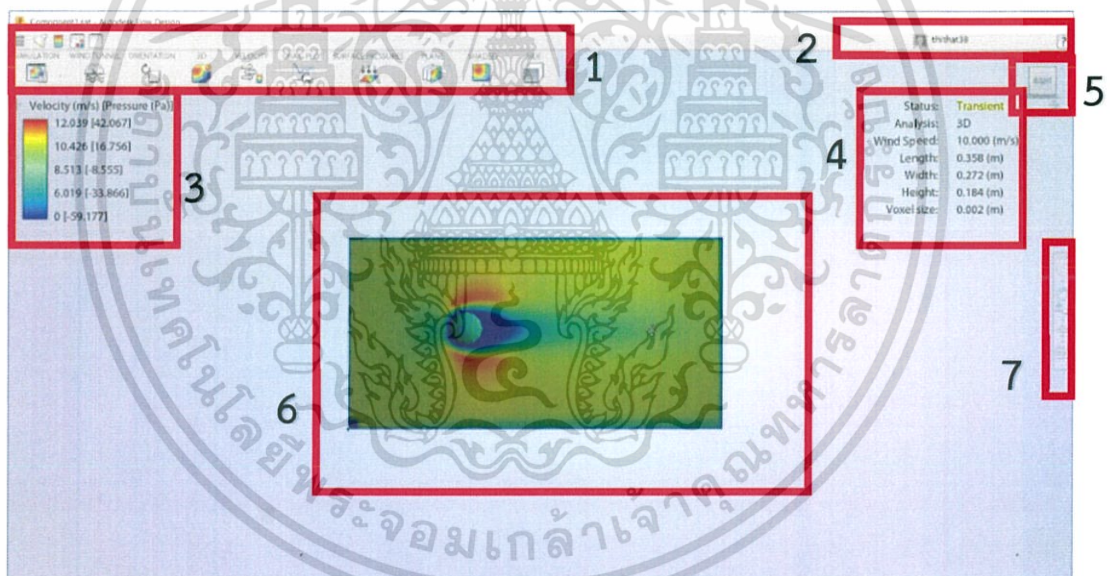
โดยรูปแบบนามสกุลไฟล์ที่ โปรแกรม Flow Design รองรับมีดังต่อไปนี้

- .STL (*.stl): Stereolithography Format (ASCII or Binary)
- .OBJ (*.obj): WaveFront Object Format
- .3DS (*.3ds): Autodesk 3ds Max Legacy DOS File Format
- .LWO (*.lwo): LightWave Object format (Ascii LWO2)
- .OFF (*.off): Open file Format
- .PLY (*.ply): Polygon File Format or the Stanford Triangle Format
- .TPF (*.tfp): Autodesk Transitional Packet Format
- .ZIP (*.zip): Compressed archive containing any of the supported file formats
- .DWG (*.dwg): AutoCAD drawing file
- .DWF (*.dwf): Autodesk web design format
- .FBX (*.fbx): Filmbox file format
- .IPT (*.ipt): Inventor part file
- .CATPART (*.catpart): CATIA v5 part file
- .CATPRODUCT (*.catproduct): CATIA v5 product file
- .PRT (*.prt): ProE/Creo part file
- .PRT.* (*.prt.*) Versioned ProE/Creo part file
- .IGS (*.igs): Initial Graphics Exchange Specification geometry file
- .IGES (*.iges): Initial Graphics Exchange Specification geometry file
- .X_T (*.x_t): Parasolid geometry file
- .X_B (*.x_b): Binary Parasolid geometry file
- .SAT (*.sat): ACIS geometry file
- .SLDPRT (*.sldprt): SolidWorks part file
- .STEP (*.step): Standard for the Exchange of Product geometry format file
- .STP (*.stp): Standard for the Exchange of Product geometry format file
- .IAM (*.iam): Autodesk Inventor assembly file
- .ASM (*.asm): ProE/Creo assembly file
- .SLDASM (*.sldasm): SolidWorks assembly file

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- .WIRE (*.wire): Alias Wire file used with Alias Studio Tools
- .SMT (*.smt): Memo file
- .SMB (*.smb): Symbol image file format
- .3DM (*.3dm): Rhinoceros 3D file format
- .PNG (*.png): Portable Network Graphics, 2D analysis only
- .JPG (*.jpg): 2D analyses only
- .GIF (*.gif): Graphics Interchange Format, 2D analyses only
- .FDZ (*.fdz): FlashDevelop Zip File

โปรแกรมมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถใช้ไฟล์ที่เป็นการประกอบชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นเข้าด้วยกันในการจำลองได้ และมีหน้าต่างการทำงานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.24 หน้าต่างโปรแกรม Flow Design

1. Toolbar และ Application Bar เป็นส่วนของการตั้งค่าเครื่องมือ รูปแบบที่ใช้ในจำลองการไหล รวมถึงการจัดการไฟล์ สำหรับบันทึกไฟล์ นำเข้าไฟล์ ส่งออกไฟล์
2. Profile and Help เป็นส่วนจัดการบัญชีผู้ใช้งาน และเข้าถึงการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการใช้งานโปรแกรมได้อีกด้วย
3. แสดงระดับความเร็ว และความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ส่วนแสดงค่าสถานะ
5. ViewCube เป็นส่วนตำแหน่งมุมมอง สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อช่วยให้สะดวกในการสังเกตยิ่งขึ้น
6. Work Space พื้นที่สำหรับการจำลองการไหล
7. Navigation Bar and Display Settings เป็นส่วนควบคุมมุมมองของโปรแกรม ทำหน้าที่ต่างๆ เช่น การขยายหน้าจอ การหมุนแกน เป็นต้น

3.5.4 การประกอบตัวโมเดล



รูปที่ 3.25 การประกอบส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.26 การประกอบอุโมงค์ลม



รูปที่ 3.27 อุโมงค์ลมเมื่อทำการประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

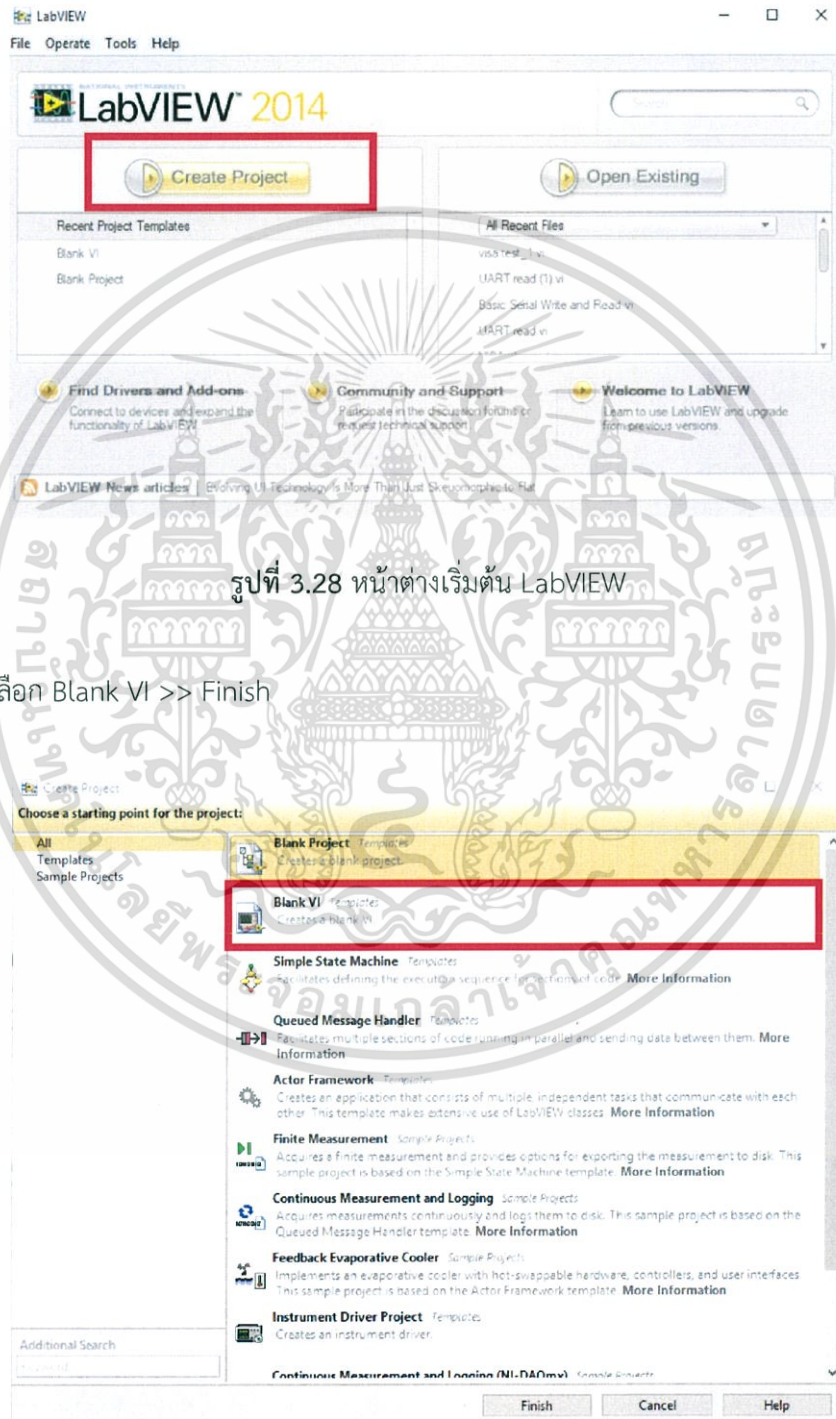
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 การเขียนโปรแกรมโดยใช้ LabVIEW

การออกแบบโปรแกรมเพื่อการควบคุมมอเตอร์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

3.5.5.1 การสร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation)

1. เปิดโปรแกรม LabVIEW จะแสดงหน้าต่างดังรูปที่ 3.28 เลือก Create Project



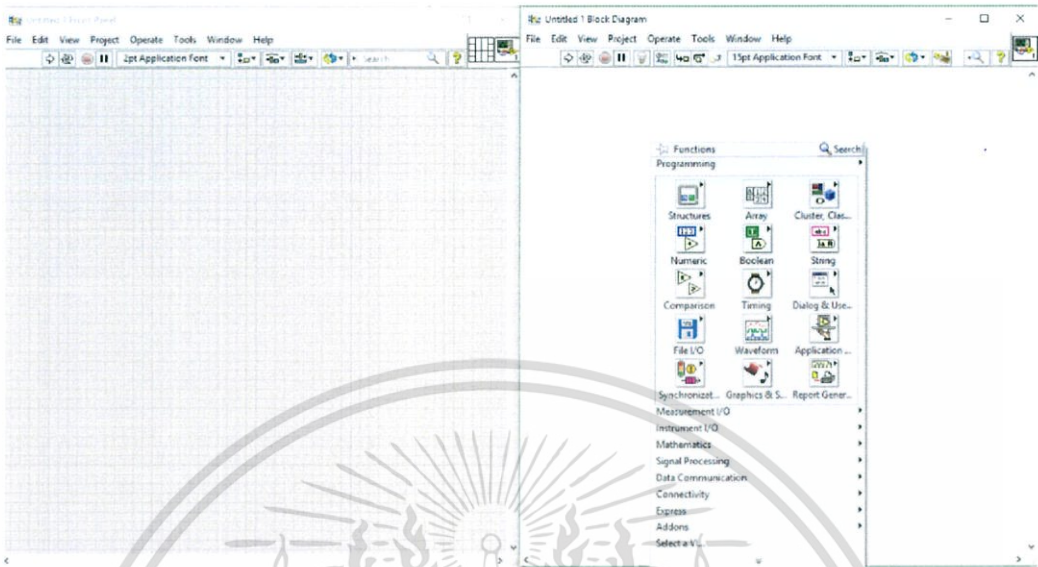
รูปที่ 3.28 หน้าต่างเริ่มต้น LabVIEW

2. เลือก Blank VI >> Finish

รูปที่ 3.29 สร้างไฟล์สำหรับเริ่มการเขียนโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คลิกขวาเพื่อเลือกฟังก์ชันต่างๆ ที่ต้องการใช้



รูปที่ 3.30 การค้นหาฟังก์ชันที่ต้องการใช้

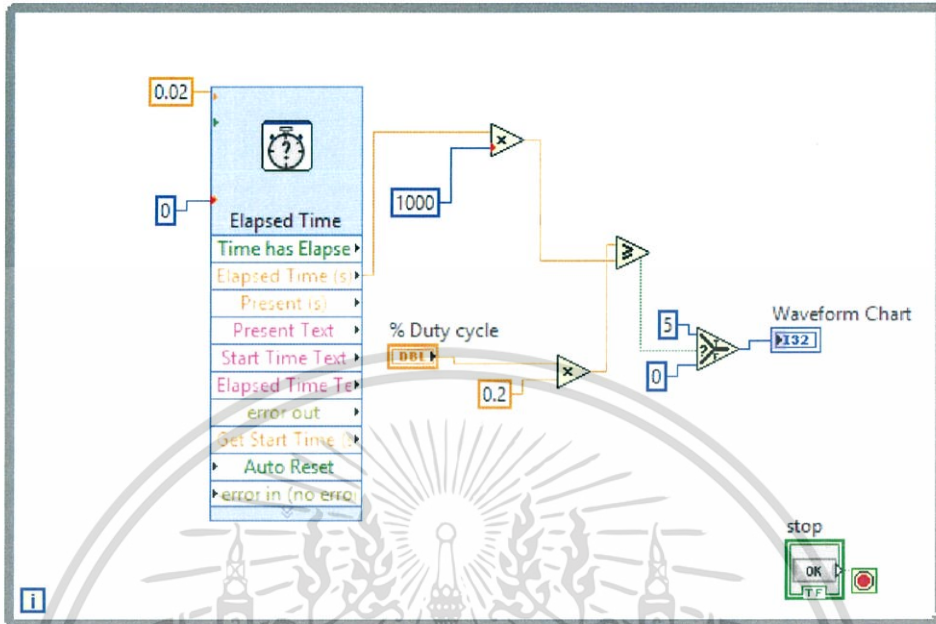
4. สร้างการทำงานแบบวนลูปโดยใช้ฟังก์ชัน While Loop With Button



รูปที่ 3.31 สร้างการทำงานแบบวนลูป

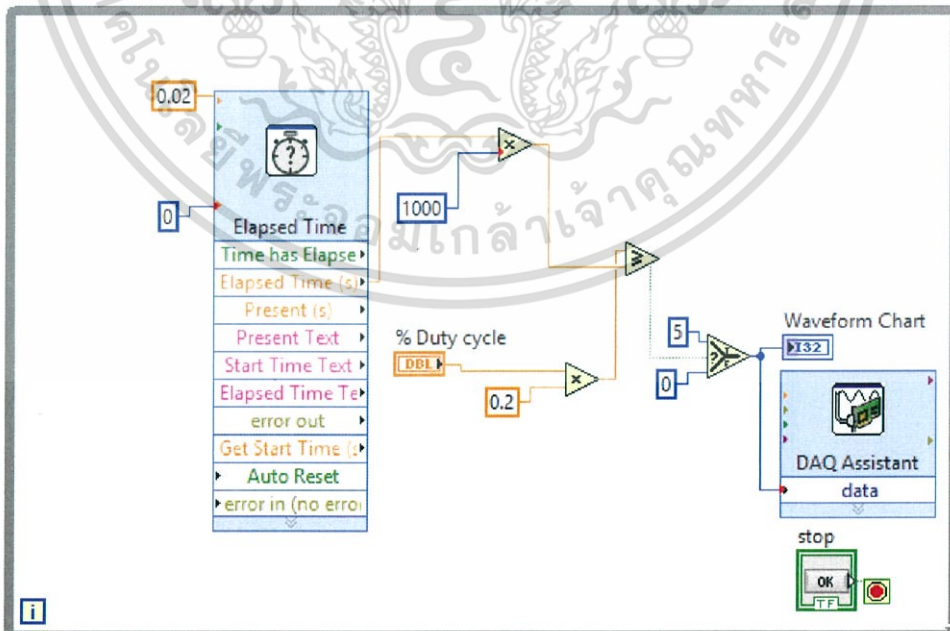
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สร้างสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) โดยใช้ฟังก์ชัน Elapsed Time



รูปที่ 3.32 การสร้างสัญญาณ PWM

6. ส่งสัญญาณออกไปควบคุมวงจรมอเตอร์ โดยใช้ฟังก์ชัน DAQ Assistant

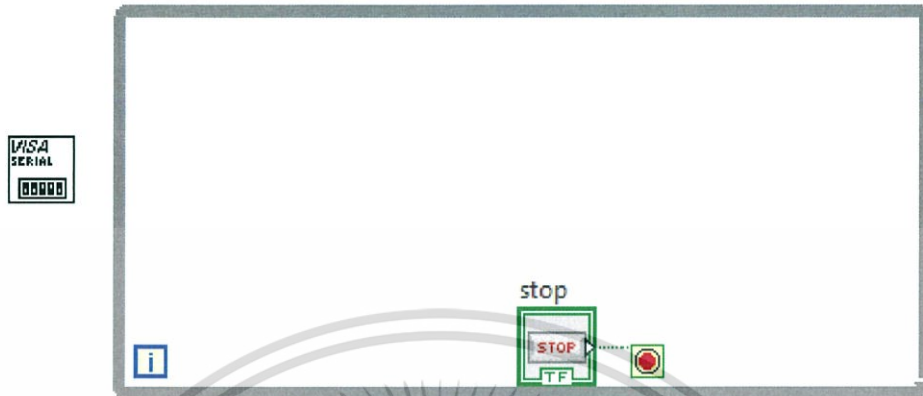


รูปที่ 3.33 ส่งสัญญาณออกไปควบคุมวงจรมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

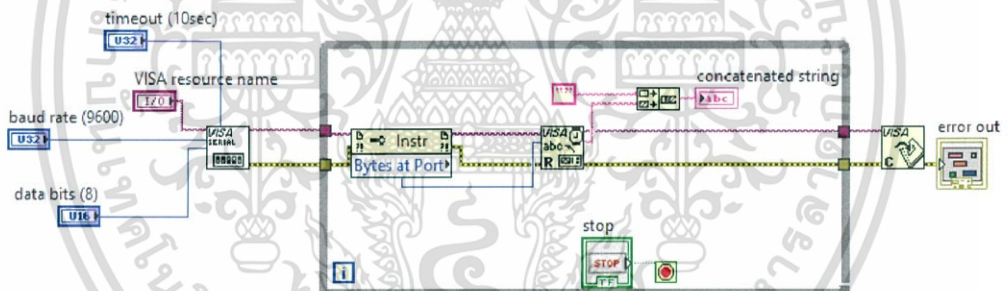
3.5.5.2 การเชื่อมต่อการสื่อสารข้อมูลจาก Anemometer โดยใช้สาย RS 232

1. สร้างการเชื่อมต่อจากสาย RS 232 โดยใช้ฟังก์ชัน VISA Configure Serial Port



รูปที่ 3.34 ฟังก์ชัน VISA Configure Serial Port

2. อ่านค่าจากเซนเซอร์ โดยใช้ฟังก์ชัน VISA Read

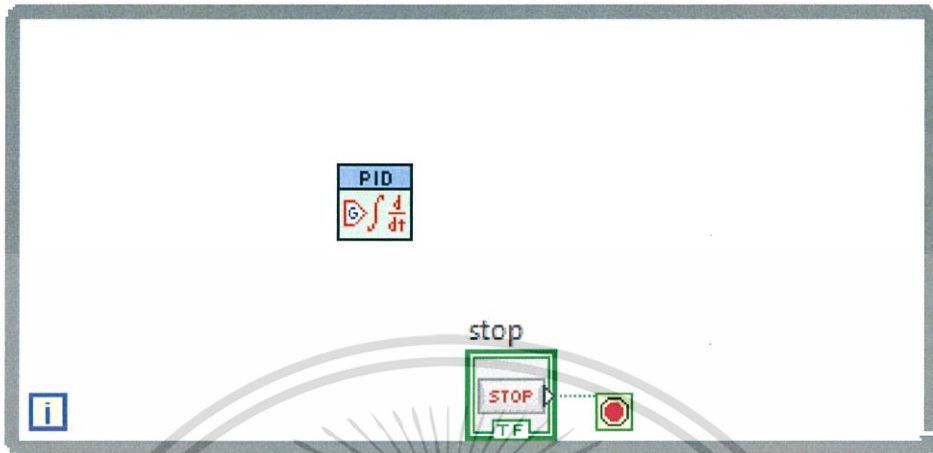


รูปที่ 3.35 ฟังก์ชัน VISA Read

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

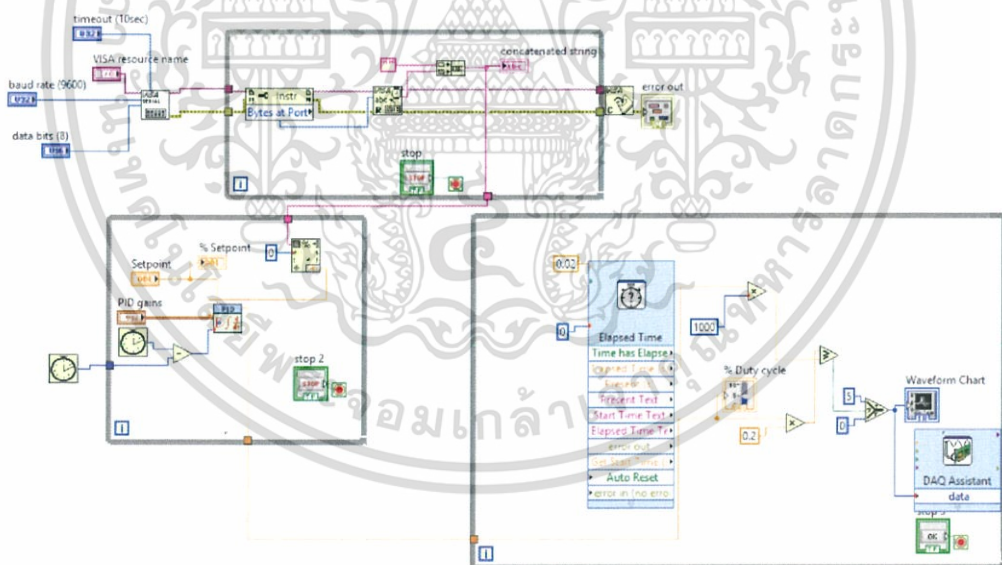
3.5.5.3 การควบคุมแบบวงปิด โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID

1. สร้างการควบคุมแบบวงปิด โดยใช้ฟังก์ชัน NI_PID_pid.lvlib:PID.vi



รูปที่ 3.36 ฟังก์ชัน NI_PID_pid.lvlib:PID.vi

2. สร้างการควบคุมแบบวงปิด

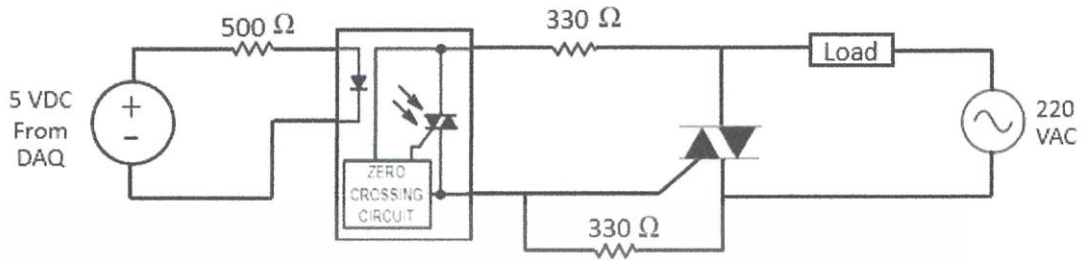


รูปที่ 3.37 โปรแกรมการควบคุมแบบวงปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 วงจรขับมอเตอร์

การออกแบบวงจรขับมอเตอร์เพื่อการควบคุมมอเตอร์



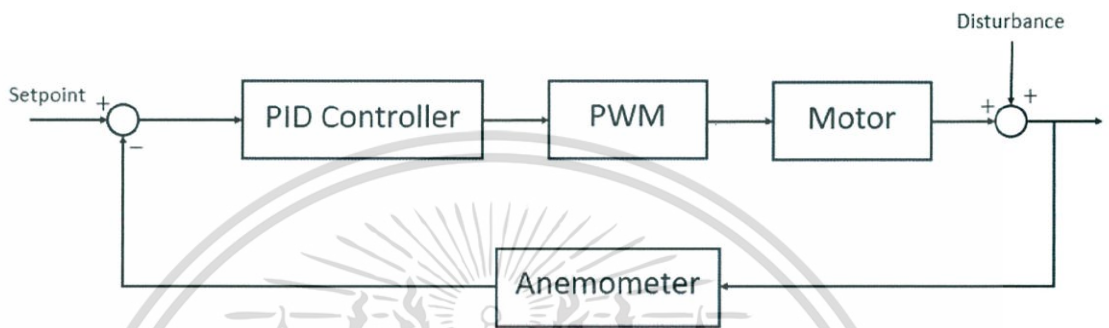
รูปที่ 3.38 วงจรขับมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

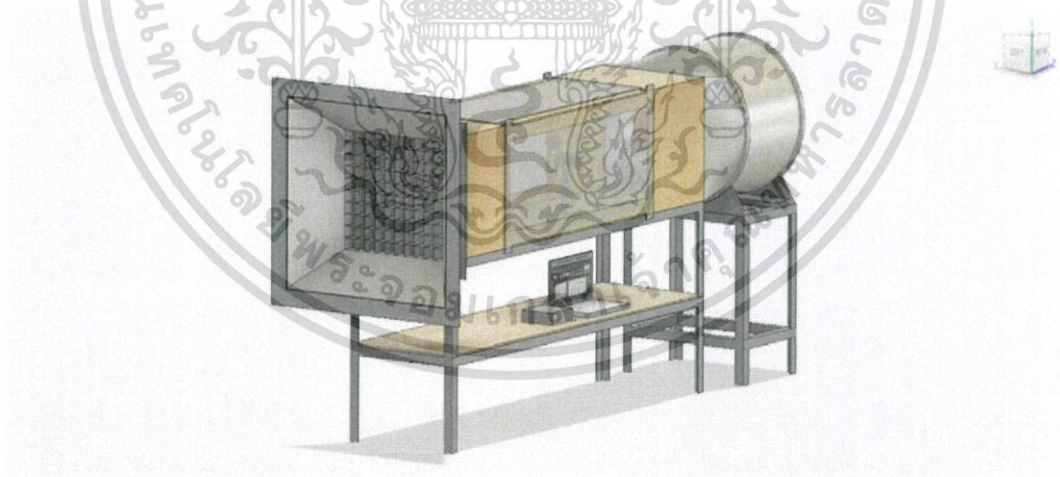
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 Function Block Diagram (FBD)



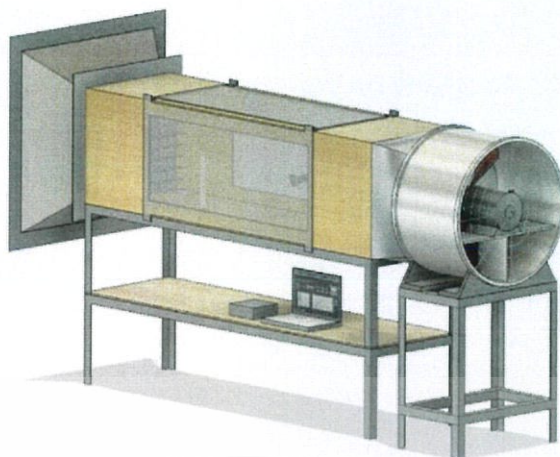
รูปที่ 4.1 Function Block Diagram แสดงการทำงานของอุโมงค์ลม

4.2 ผลการออกแบบ

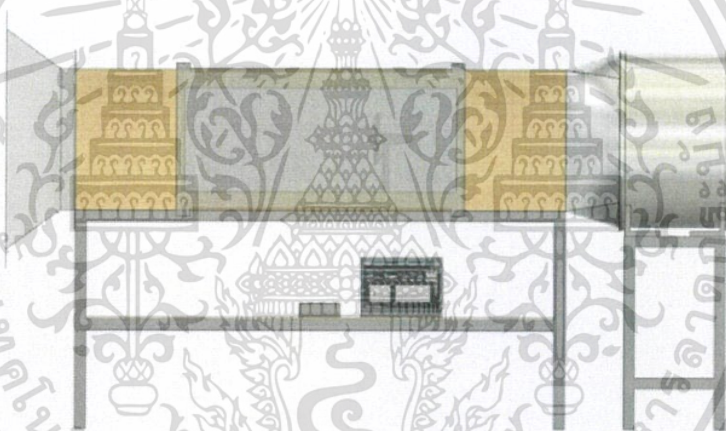


รูปที่ 4.2 อุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Fusion360 (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 อุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Fusion360 (2)



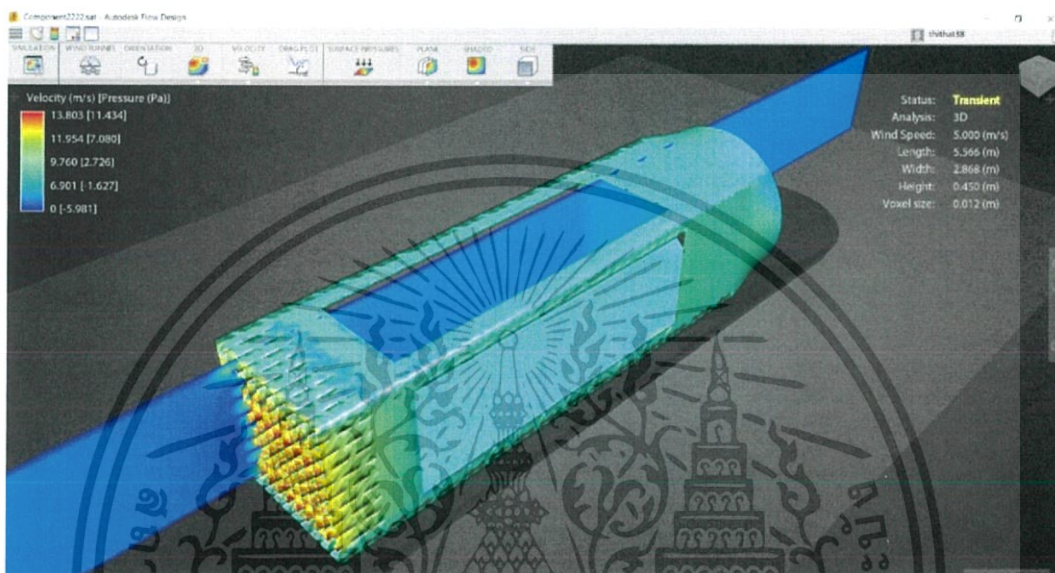
รูปที่ 4.4 อุโมงค์ลมที่ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม Fusion360 (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

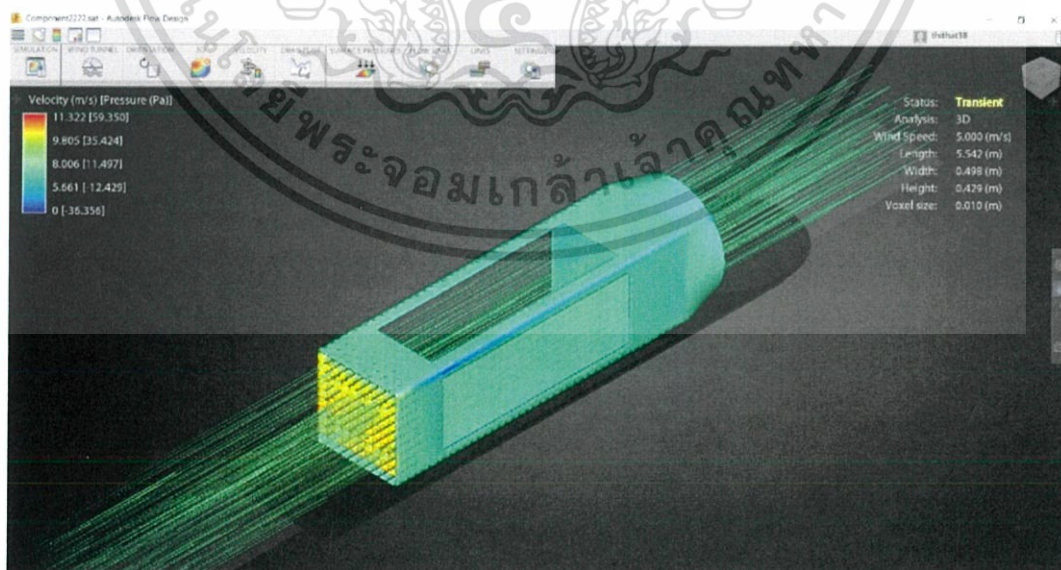
4.3 ผลการจำลองการไหลของลมด้วยโปรแกรม Flow Design

การจำลองการไหลของลมด้วยโปรแกรม Flow Design จะช่วยให้เห็นถึงเส้นทางการไหลของลม และความดันที่เกิดขึ้นได้ โดยได้ทำการจำลองทั้งหมด 3 ระดับ อันได้แก่

1. การจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 5 m/s

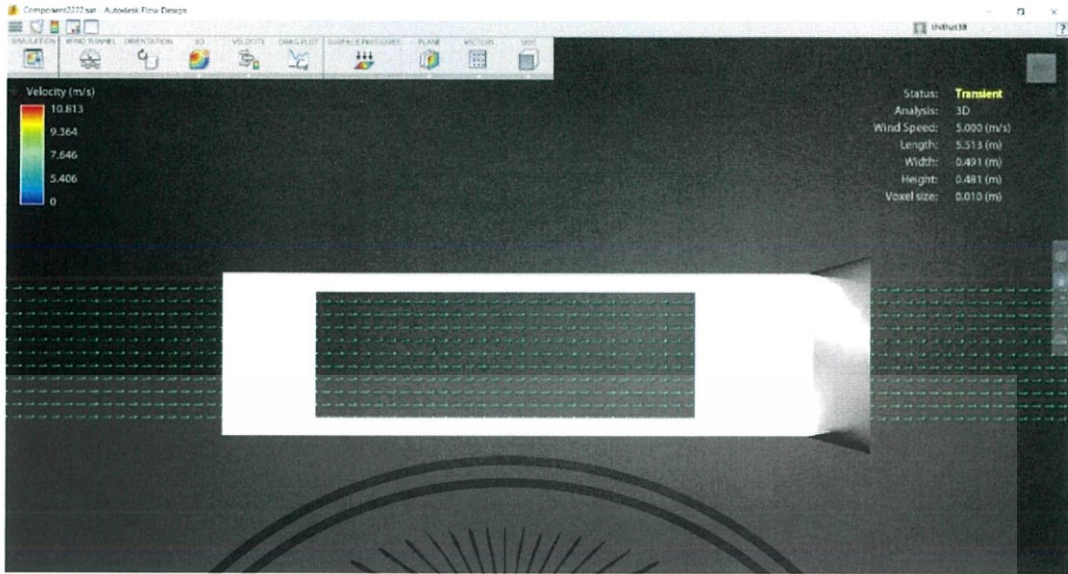


รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 5 m/s (1)



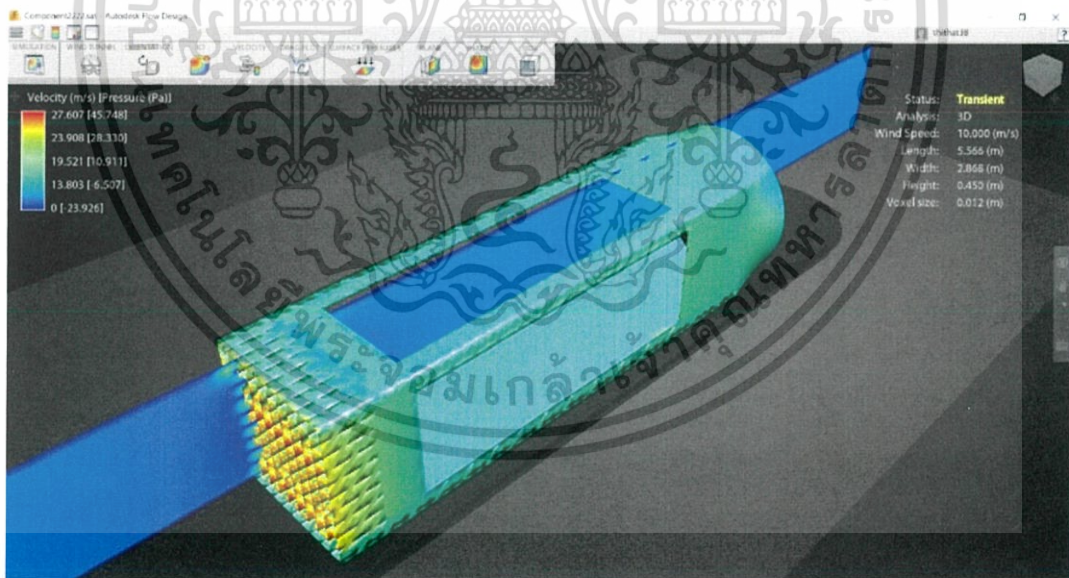
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 5 m/s (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



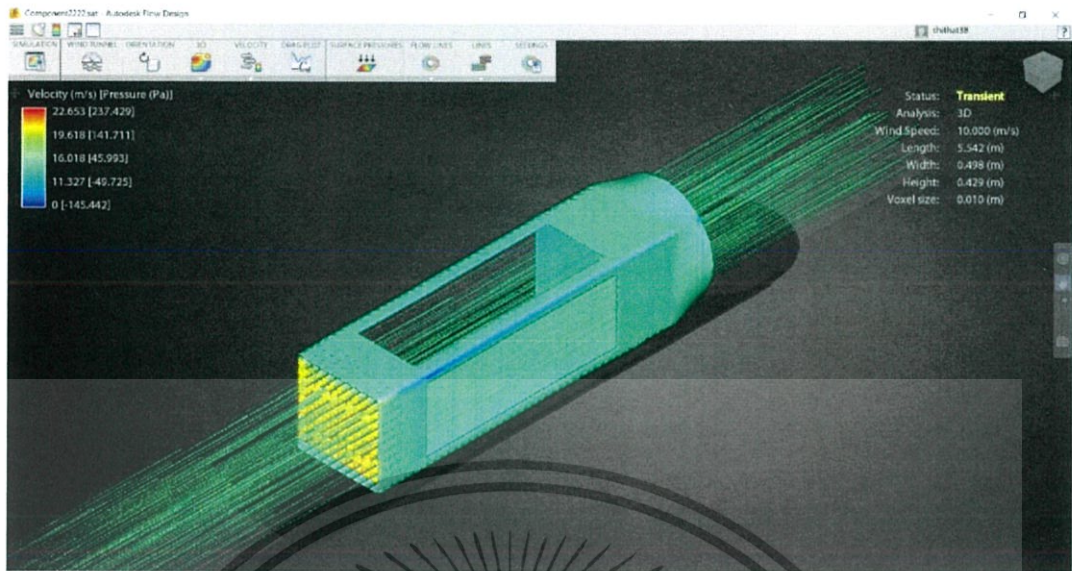
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 5 m/s (3)

2. การจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 10 m/s



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 10 m/s (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



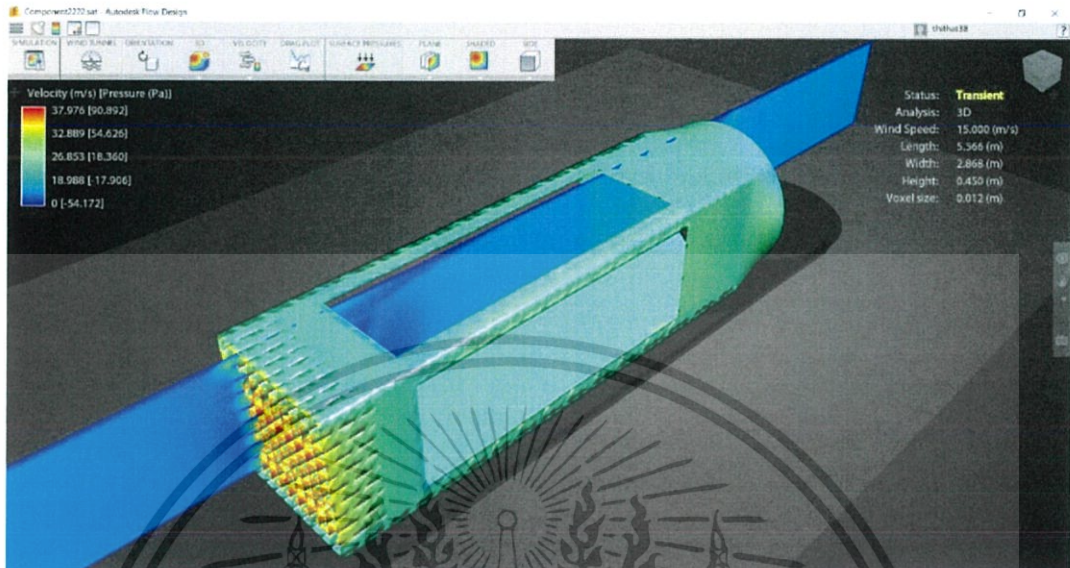
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 10 m/s (2)



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 10 m/s (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 15 m/s

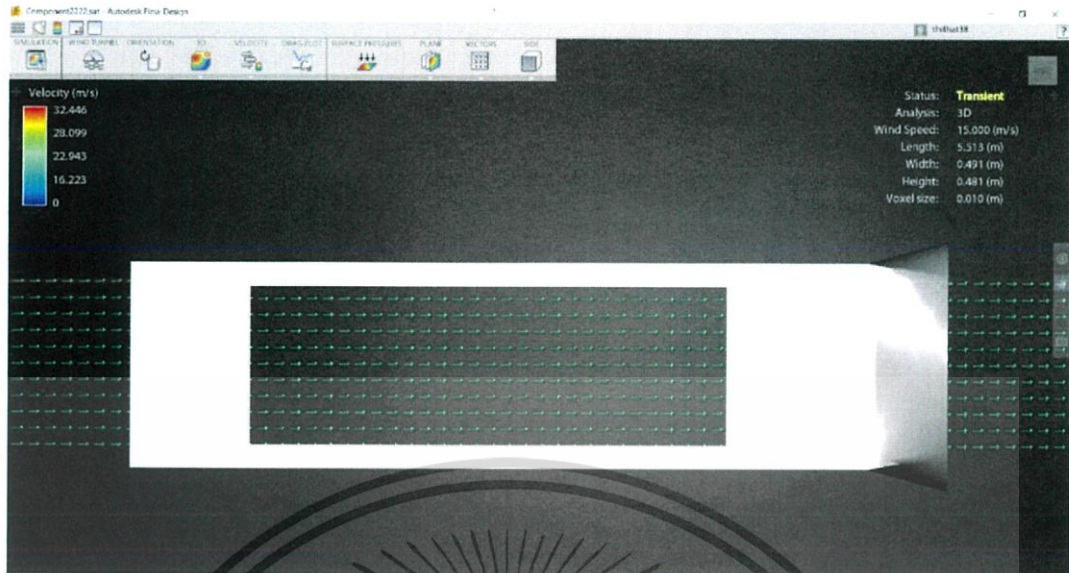


รูปที่ 4.11 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 15 m/s (1)



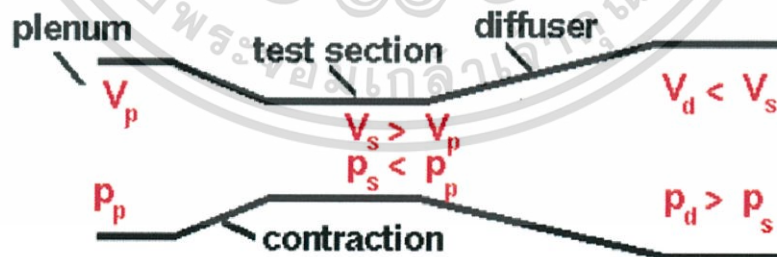
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 15 m/s (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการไหลของลมที่ความเร็วลม 15 m/s (3)

ซึ่งจากการจำลองการไหลของลมด้วยโปรแกรม Flow Design จะเห็นได้ว่า บริเวณส่วนอากาศแพ่งเข้า (Contraction) มีความดันสูง ซึ่งส่งผลให้ความเร็วลมในส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section) มีความเร็วลมที่สูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความดันในส่วนทดสอบชิ้นงาน (Test Section) จะมีความดันที่ต่ำกว่า เป็นสาเหตุให้ความเร็วลมที่ผ่านส่วนเชื่อมต่อไปยังส่วนกำลัง (Diffuser) มีการลดความเร็วลง ซึ่งตรงกับหลักการออกแบบอุโมงค์ลมดังรูปที่ 4.14



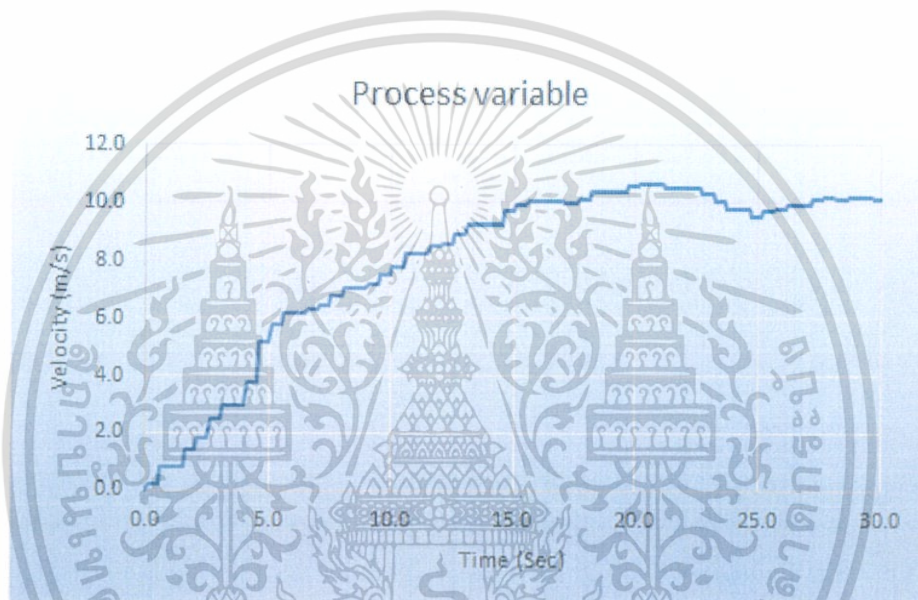
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความดันในการออกแบบอุโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองปรับจูนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW

เนื่องจากการควบคุมมอเตอร์ขนาดสามแรงม้า จึงใช้การปรับจูนค่าพารามิเตอร์พีไอดี ด้วยวิธี ลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อให้เกิดผลเสียต่อมอเตอร์น้อยที่สุด และใช้การควบคุมแบบ PI Controller เพื่อลดความเร็วในการเข้าสู่เสถียรภาพ ส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ใกล้เคียงกับความเร็วของใบพัดเนื่องจากแรงเฉื่อย โดยมีผลการทดลองดังนี้

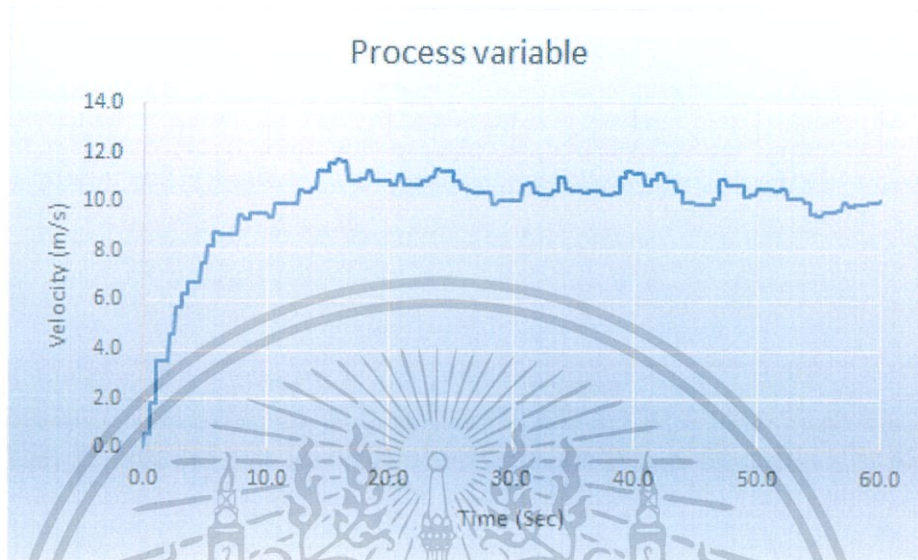
1. จากการทดลองปรับค่า $K_c = 0.01$, ปรับค่า $T_i = 0.01$, ปรับค่า $T_d = 0$ ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.15 ผลการปรับจูนค่าพีไอดี (1)

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับค่า $K_c = 0.01$, ปรับค่า $T_i = 0.01$, ปรับค่า $T_d = 0$ ทำให้ระบบมี Rise Time = 15.3 sec และมี Setting Time = 25.8 sec

2. จากการทดลองปรับค่า $K_c = 0.015$, ปรับค่า $T_i = 0.008$, ปรับค่า $T_d = 0$ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

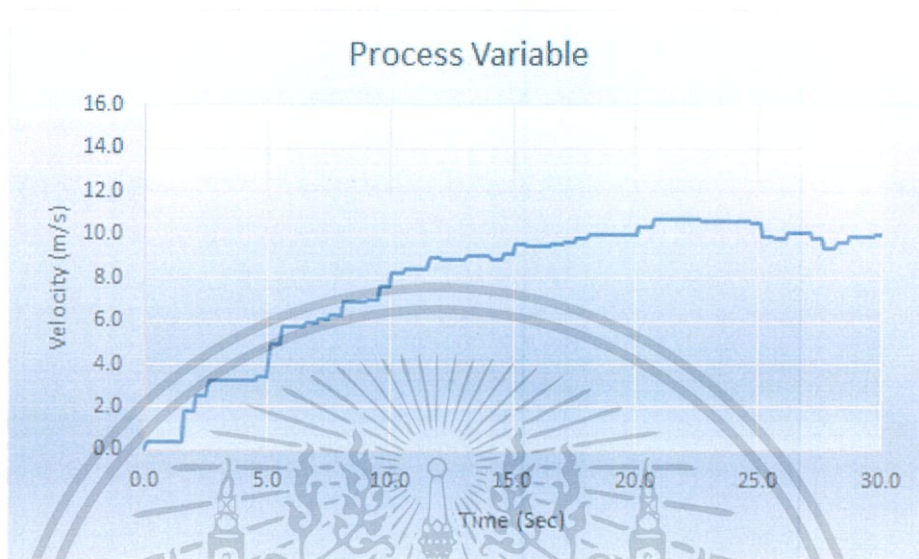


รูปที่ 4.16 ผลการปรับจูนค่าพีไอดี (2)

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับค่า $K_c = 0.015$, ปรับค่า $T_i = 0.008$, ปรับค่า $T_d = 0$ ทำให้ระบบ มี Rise Time = 10.1 sec และมี Setting Time = 53.6 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากการทดลองปรับค่า $K_c = 0.005$, ปรับค่า $T_i = 0.005$, ปรับค่า $T_d = 0$ ได้ผลการทดลอง ดังนี้



รูปที่ 4.17 ผลการปรับจูนค่าพีไอดี (3)

ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับค่า $K_c = 0.005$, ปรับค่า $T_i = 0.005$, ปรับค่า $T_d = 0$ ทำให้ระบบ มี Rise Time = 16.9 sec และมี Setting Time = 28.2 sec

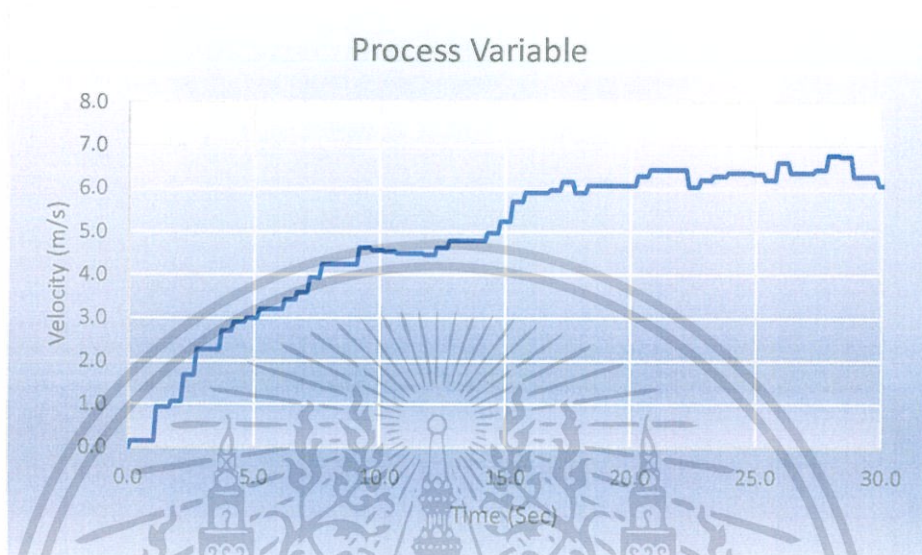
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลการปรับจูนพารามิเตอร์

Input			Output	
K_c	T_i	T_d	Rise time	Setting time
0.01	0.01	0	15.3	25.8
0.015	0.008	0	10.1	53.6
0.005	0.005	0	16.9	28.2

จากการเปรียบเทียบผลการปรับจูนพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่า การปรับค่า $K_c = 0.005$, $T_i = 0.005$, $T_d = 0$ เหมาะสมกับระบบมากที่สุด เนื่องจากมีการพุ่งเกินน้อย และไม่เข้าสู่สภาวะเร็วจนเกินไป ทำให้ส่งผลเสียอันเนื่องมาจากแรงเฉื่อยของใบพัดต่อมอเตอร์น้อย

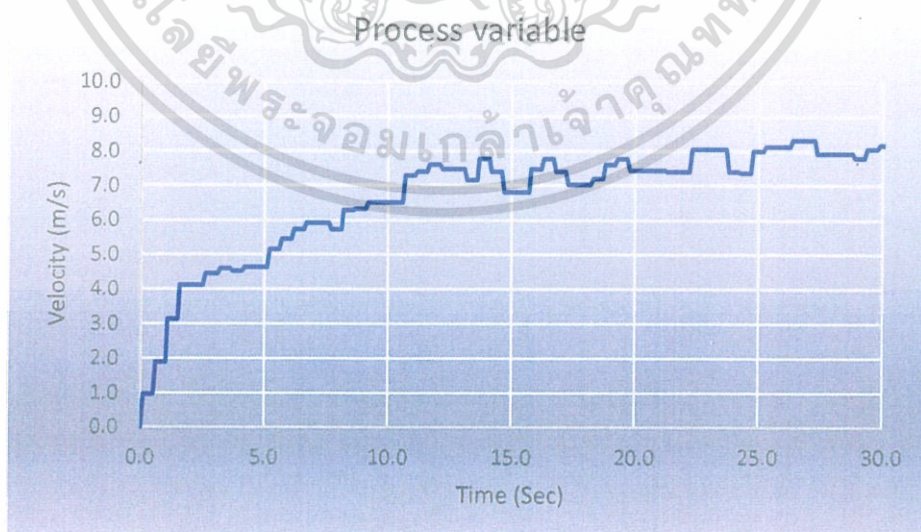
4.5 ผลการทดลองจริง

ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ $K_c = 0.005$, $T_i = 0.005$, $T_d = 0$ ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วลม 6 เมตรต่อวินาที

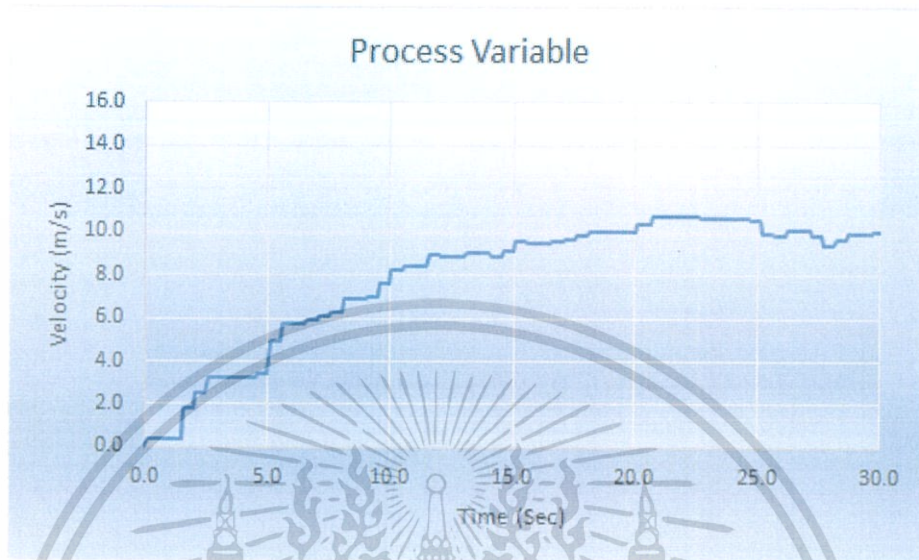
ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ $K_c = 0.005$, $T_i = 0.005$, $T_d = 0$ ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที



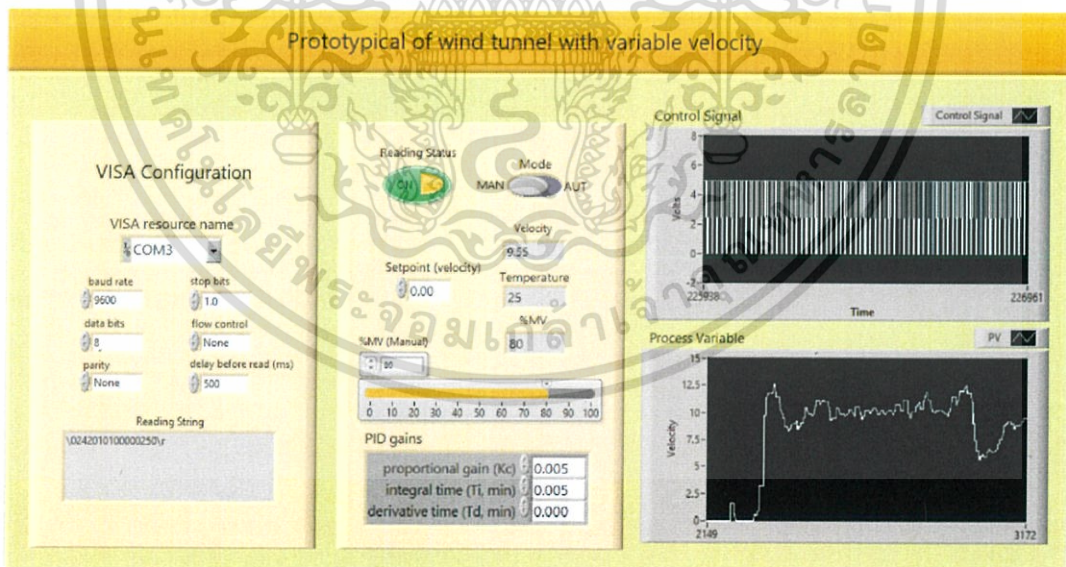
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วลม 8 เมตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ $K_c = 0.005$, $T_i = 0.005$, $T_d = 0$ ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที



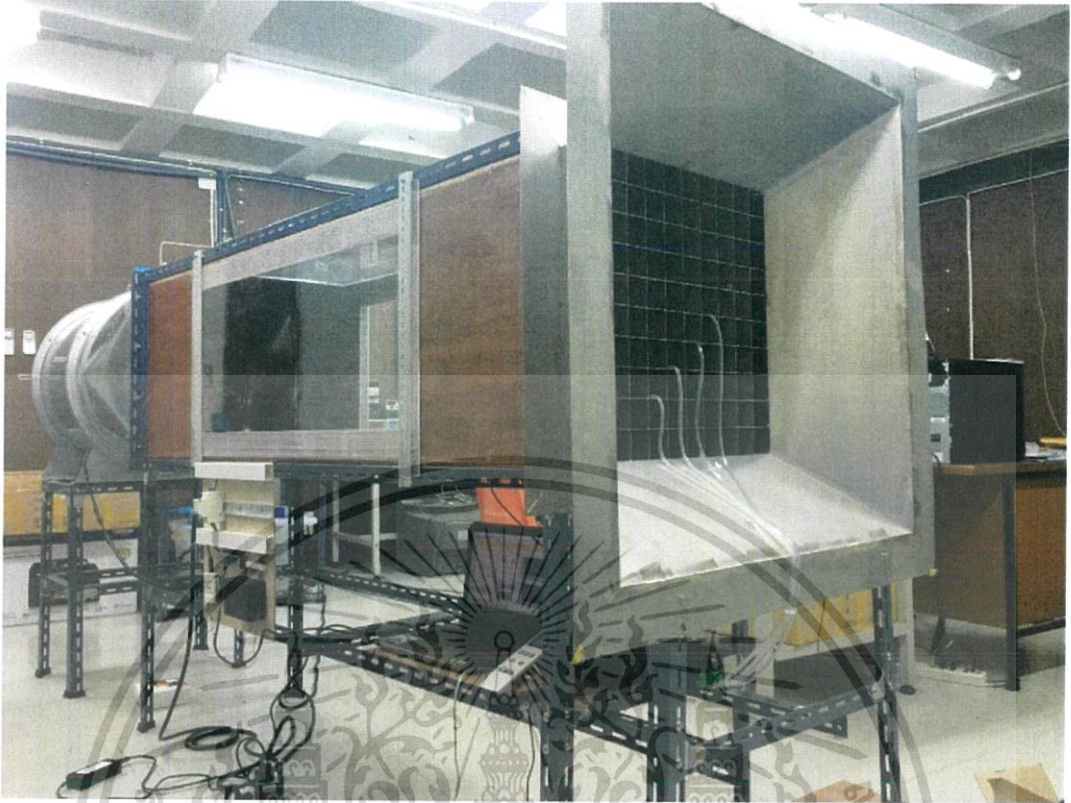
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่ความเร็วลม 10 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.21 หน้าต่างการใช้งาน

หน้าจอแสดงผลสามารถปรับได้ทั้งหมดได้ทั้งอัตโนมัติและปรับค่าเอง และสามารถวัดอุณหภูมิภายในอุโมงค์ลมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การทดลองกับอูโมงค์ลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทวิจารณ์และสรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอถึงการออกแบบ และการสร้างเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ ที่สามารถทำความเร็วลมภายในตัวอุโมงค์ได้ในช่วง 0-15 m/s ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ครอบคลุมความเร็วลมตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายในประเทศไทย โดยที่ใช้ MINI VANE ANEMOMETER รุ่น DIGICON DA-45S ในการเก็บค่าความเร็วลมภายในตัวอุโมงค์ส่งไปยัง DAQ (Data Acquisition) เพื่อแปลงค่าส่งไปยังคอมพิวเตอร์โดยแสดงผลผ่านโปรแกรม LabVIEW และใช้โปรแกรม LabVIEW ในการควบคุม จีเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลเป็น User Interface เพื่อตรวจสอบสถานะความเร็วลมภายในอุโมงค์ ตลอดจนถึงควบคุมการทำงานของมอเตอร์พัดลมที่ใช้ในการสร้างลม

จากการทดสอบและเก็บข้อมูลผลการทดลองของเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติที่ได้ทำการออกแบบสร้างมา พบว่าเครื่องต้นแบบอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติสามารถควบคุมความเร็วลมภายในอุโมงค์ลมได้เป็นผลสำเร็จตามที่คาดหวังไว้

จากการดำเนินงานตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบ การประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกันไปจนถึงการทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลระบบตามที่กล่าวมา มักพบเจอปัญหาและอุปสรรคอยู่เป็นระยะๆ ซึ่งต้องใช้ความรู้ และทักษะต่างๆ มาเพื่อใช้แก้ไข้ปัญหา โดยในขั้นต้นจะเริ่มแก้ไข้ปัญหาโดยการศึกษา ค้นคว้าจากอินเทอร์เน็ต ซึ่งในปัจจุบันสามารถค้นคว้าได้สะดวกและเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้ แต่หากค้นหาไม่พบ หรือไม่สามารถแก้ไข้ปัญหาได้ ขั้นต่อมาคือ การปรึกษาผู้รู้ที่น่าเชื่อถือ อาทิเช่น อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ในภาควิชา และบุคคลภายนอกที่สามารถให้ข้อมูลได้ เพื่อให้ความกระจ่าง อันนำไปสู่การแก้ไข้ปัญหาต่างๆ ให้ผ่านพ้นมาได้ด้วยดี

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

1. เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการนี้ ผลการออกแบบอุโมงค์ลมที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของสถานที่
2. อุปกรณ์ชิ้นส่วนบางส่วนจำเป็นต้องมีการสั่งประกอบขึ้นมาใหม่เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ ซึ่งมีระยะเวลาในการจัดซื้อและจัดสร้างที่ค่อนข้างนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์ชิ้นส่วนบางส่วนมีราคาแพง และมีความยากในการหาซื้อ อีกทั้งยังมีความเปราะบาง จึงต้องดำเนินการด้วยความระมัดระวัง

4. การดำเนินงานและการทำงานของอุโมงค์ลมมีผลกระทบทางด้านเสียง ดังนั้นเพื่อมิให้เป็นการรบกวนผู้อื่นจึงควรเลือกเวลาในการใช้งานให้เหมาะสม

5.3 แนวทางแก้ไข

1. พยายามให้มีข้อผิดพลาดในการออกแบบให้น้อยที่สุด
2. การติดต่อสื่อสารควรทำให้กระจ่างเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาด
3. เปลี่ยนวัสดุในส่วนของตัวอุโมงค์ลมที่ใช้เป็นวัสดุที่แข็งแรงและมีราคาต่ำกว่าของเดิม
4. หาสถานที่ในการดำเนินงานที่ผลกระทบทางด้านเสียงมีน้อย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] “Wind Tunnel (1)” เข้าถึงได้จาก:
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>
- [2] “Wind Tunnel (2)” เข้าถึงได้จาก:
https://www.researchgate.net/profile/Louis_Cattafesta/publication/230271809
- [3] “PID” เข้าถึงได้จาก:
http://eng.sut.ac.th/me/box/3_54/425311/02%20PID%20control%20design.pdf
- [4] “เครื่องวัดความเร็วลม anemometer” เข้าถึงได้จาก:
http://www.easternenergy.net/product_474850.592552_en
- [5] “PWM (1)” เข้าถึงได้จาก:
<https://introduction-pwm.blogspot.com/2007/09/pwm.html>
- [6] “PWM (2)” เข้าถึงได้จาก:
<https://www.allaboutcircuits.com/textbook/semiconductors/chpt-11/PWM/>
- [7] “มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ” เข้าถึงได้จาก:
<http://www.explainthatstuff.com/induction-motors.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของอุปกรณ์ชิ้นส่วนต่างๆที่ใช้ในการออกแบบ

คุณสมบัติทั่วไป		ขนาดและรูปร่าง
วงจร	ไมโครโปรเซสเซอร์ LSI แบบชิปเดี่ยว	
จอแสดงผล	จอ LCD ขนาดใหญ่ 51x32 มม. แสดงค่าความเร็วลม และอุณหภูมิได้พร้อมกัน	
หน่วยการวัด	m/s (เมตรต่อวินาที), km/h (กิโลเมตรต่อชั่วโมง), ft/min (ฟุตต่อนาที), knots (ไมล์ทะเลต่อชั่วโมง), mph (ไมล์ต่อชั่วโมง), อุณหภูมิ : °C, °F, การคงค่าข้อมูล	
ลักษณะของเซนเซอร์	วัดความเร็วลม : ใบพัดแบบยกตัว และ โหลดป้อนเบริงที่มีความเสถียรทนต่อแรงสั่นสะเทือน วัดอุณหภูมิ : เทอร์มิสเตอร์ความเที่ยงตรงสูง	
หน่วยความจำ	บันทึกค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของความเร็วลมพร้อมทั้งเรียกข้อมูลขึ้นมาดูภายหลังได้	
การปิดเครื่อง	มีระบบปิดเครื่องอัตโนมัติ 3 แบบคือ ปิดแบบคงที่ หรือปิดอัตโนมัติโดยสถานีรับสัญญาณปิดเครื่องก็ได้	
อุณหภูมิขณะใช้งาน	เครื่องวัด : 0 °C-80 °C (32 °F-176 °F), โพรบวัด : 0 °C-80 °C (32 °F-176 °F)	
ความชื้นขณะใช้งาน	สูงสุด 80% RH	
เล้าท์ข้อมูล	อินเตอร์เฟซอนุกรม RS232	
ใช้ไฟ	แบตเตอรี่ 9V DC, 006P, MIN1604 (PP3) หรือชนิดที่ใช้งานแทนกันได้ จำนวน 1 ก้อน	
น้ำหนัก	220 กรัม 0.48 ปอนด์	
ขนาด	เครื่องวัด	68x200x30 มม./ 2.7x2.9x1.2 นิ้ว (กว้างสูงหนา)
	โพรบวัด	ใบพัด : เส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มม. ความยาวของคานาใบพัด : 240 มม. (สูงสุด 600 มม. เมื่อยืดออก)
อุปกรณ์มาตรฐาน	<ul style="list-style-type: none"> • โพรบวัด : 1, 5m • แบตเตอรี่ (006P, 9V) : 1 ก้อน • คู่มือการใช้งานพร้อม-แผ่นซีดี (อังกฤษ) : 1 ชุด • กระเป๋าใส่เครื่อง : 1 ใบ 	
อุปกรณ์เสริมเพิ่มเติม	<ul style="list-style-type: none"> • โปรแกรม ระยะเวลาปฏิบัติการ Windows สำหรับใช้ในประเภท Data Logging (05-Data Recorder) (ใน : SW-US01-WIN) • สายเคเบิล RS232 3m : DPK B02 	


คุณสมบัติทางไฟฟ้า (ที่อุณหภูมิ 23 ± 5 °C)					การนำไปใช้งาน
หน่วยการวัด	ย่านการวัด	ความละเอียด	ความเที่ยงตรง	หน่วยเหตุ	
ความเร็วลม	m/s	0.8-12.00 m/s	0.01 m/s	±(2%+0.2 m/s)	m/s, เมตรต่อวินาที
	km/h	2.8-43.2 km/h	0.1 km/h	±(2%+0.2 km/h)	km/h, กิโลเมตรต่อชั่วโมง
	mph	1.8-26.8 mph	0.1 mph	±(2%+0.2 mph)	mph, ไมล์ต่อชั่วโมง
	knots	0.8-23.3 knots	0.1 knots	±(2%+0.2 knots)	knots, ไมล์ทะเลต่อชั่วโมง (1 ไมล์ทะเล)
	ft/min	160-2358 ft/min	1 ft/min	±(2%+20 ft/min)	ft/min, ฟุตต่อนาที
อุณหภูมิ	°C	0 °C-80 °C	0.1 °C	±0.3 °C	°C, องศาเซลเซียส
	°F	32 °F-176 °F	0.1 °F	±0.5 °F	°F, องศาฟาเรนไฮต์

รูปที่ ก.1 Specifications of MINI VANE ANEMOMETER DA-45S

จากรูปจะเป็นการแสดงถึง Specifications ของ MINI VANE ANEMOMETER รุ่น DA-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางสเปคพัดลมถักกลม Series T40-A/C



Model No (No.)	Voltage (V)	Power (KW)	Revolution (rpm)	Air Volume (m ³ /h)	Pressure (Pa)
3A	220/380	0.25	1450	2000	52
	220/380	0.55	2900	4650	300
3.5A	220/380	0.37	1450	3000	82
	220/380	0.75	2900	6540	380
4A	220/380	0.55	1450	4600	130
	220/380	1.1	2900	8230	438
5A	220/380	0.75	1450	8050	180
	380	1.5	1450	9300	225
	380	1.5	2900	11832	515
6A	380	3	2900	23500	410
	380	2.2	1450	15000	260
	380	0.75	960	10900	117
7A	380	3	1450	18510	280
	380	1.5	960	17500	158
8A	380	4	1450	36680	440
	380	2.2	960	25613	210
9A	380	5.5	1450	41500	315
	380	3	960	36000	245
10A	380	4	960	43500	278
12A	380	5.5	960	44700	258
14A	380	11	720	65000	460
4C	380	0.75	1450	7200	130
	380	1.1	1450	8500	160
5C	380	0.75	1450	10000	170
	380	1.5	1450	10000	210
6C	380	1.5	1450	13900	230
	380	2.2	1450	16300	270
7C	380	3	1450	19700	294
8C	380	4	1450	24500	325
9C	380	5.5	1450	31450	215
10C	380	4	960	27550	136
12C	380	7.5	960	44500	260

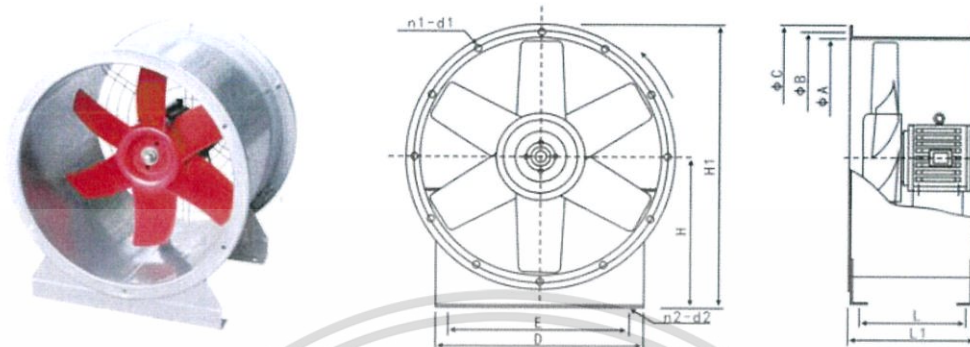


รูปที่ ก.2 คุณสมบัติของพัดลมที่เลือกใช้

จากรูปจะแสดงถึงคุณสมบัติของพัดลมถักกลม T40-A/C โดยเลือกใช้ Model 6A 1,450 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Outline Overall and Installing Dimensions



Model	A	B	C	D	E	n1-d1	n2-d2	H	H1	L	L1
3#	300	325	360	300	250	4-φ12	6-φ7.5	210	380	260	280
3.5#	350	380	415	350	300	4-φ12	6-φ7.5	345	440	300	350
4#	400	425	460	400	350	4-φ12	6-φ7.5	250	480	360	300
5#	500	525	560	500	450	4-φ12	6-φ7.5	300	580	360	300
6#	600	625	660	600	550	4-φ12	6-φ7.5	350	680	410	300
7#	700	725	760	700	650	4-φ12	6-φ7.5	400	780	460	300
8#	800	825	860	800	750	4-φ12	6-φ7.5	450	880	460	300
9#	900	930	960	900	850	4-φ19	8-φ12	537	1090	504	600
10#	1000	1030	1070	1000	950	4-φ21	8-φ12	609	1090	504	600

รูปที่ ก.3 แบบของของพัดลมที่เลือกใช้

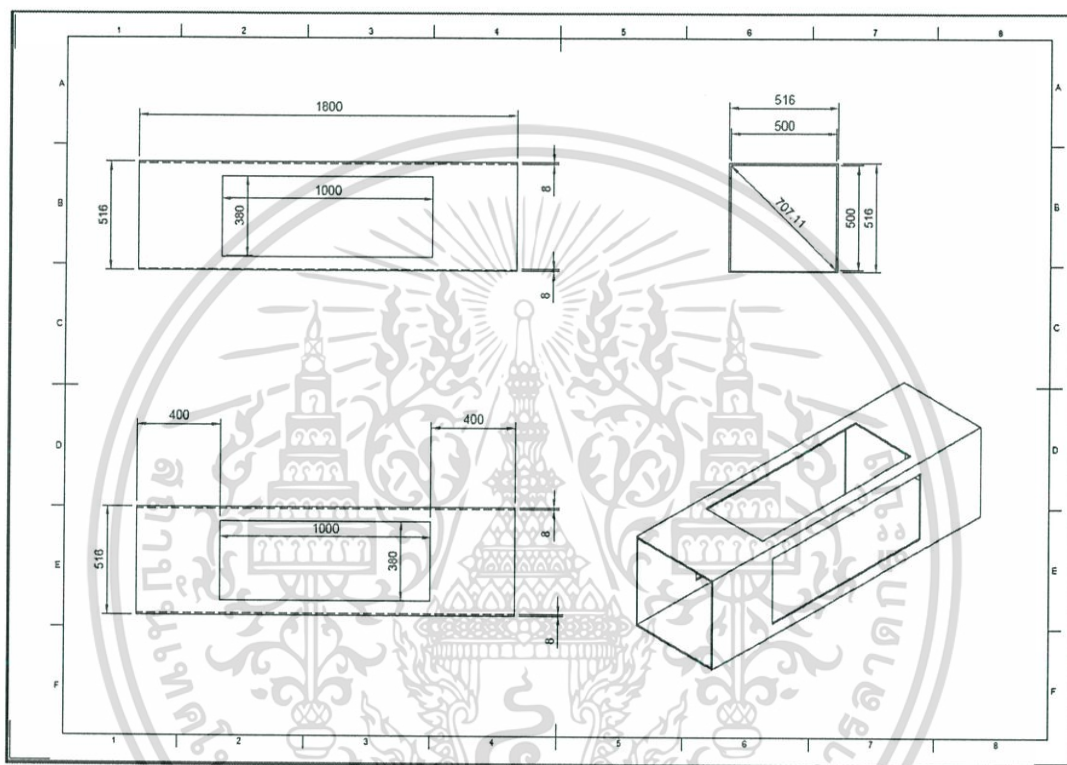
จากรูปจะแสดงถึงขนาดของพัดลมถึงกลม T40-A/C โดยเลือกใช้ Model 6A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

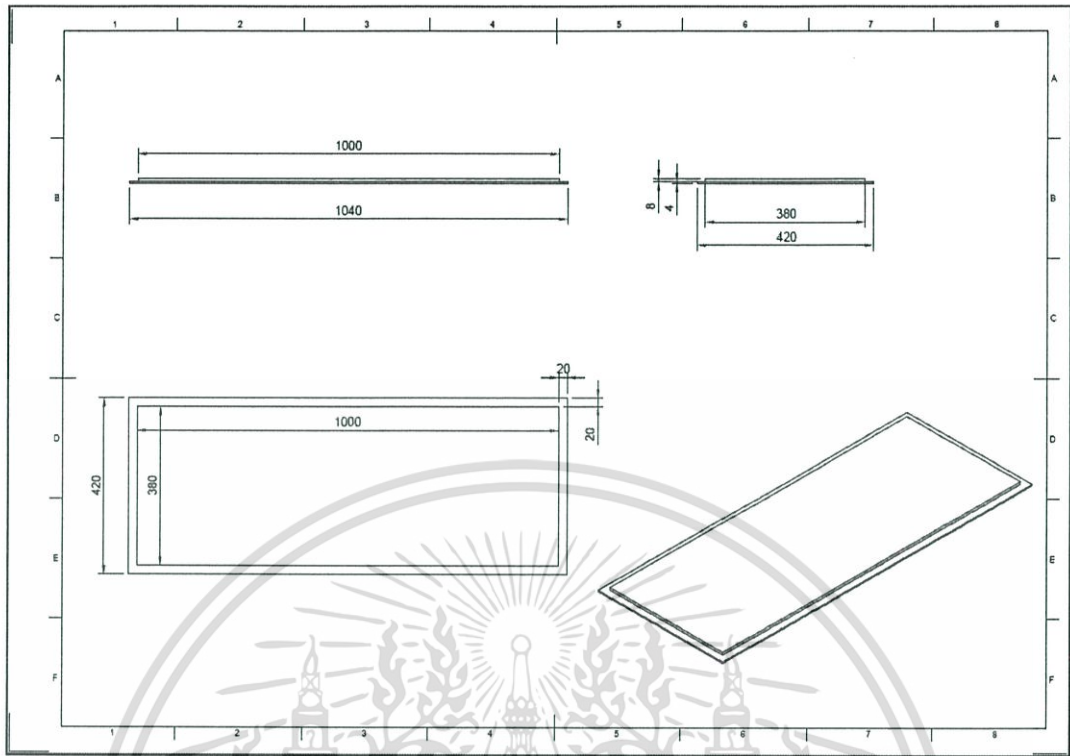
ชิ้นส่วนจากการ CAD Design

แบบรูปที่ได้จากขั้นตอนของการออกแบบ hardware โดยโปรแกรม Fusion360 โดยมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)



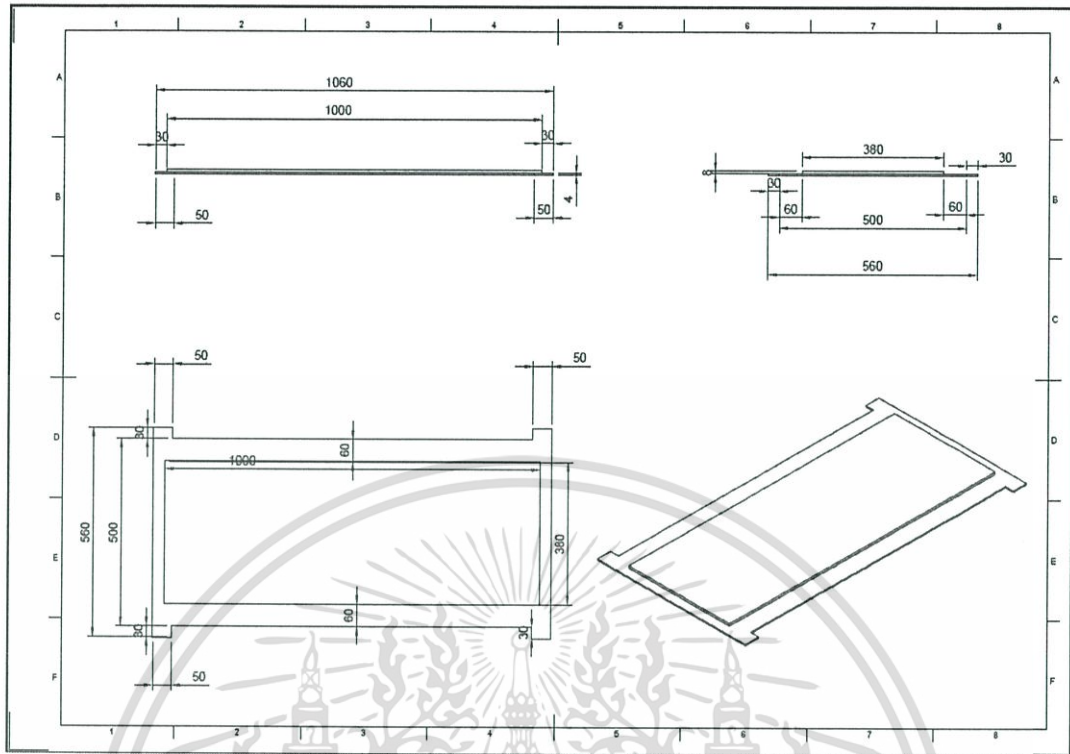
รูปที่ ข.1 แบบของส่วนทดสอบชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



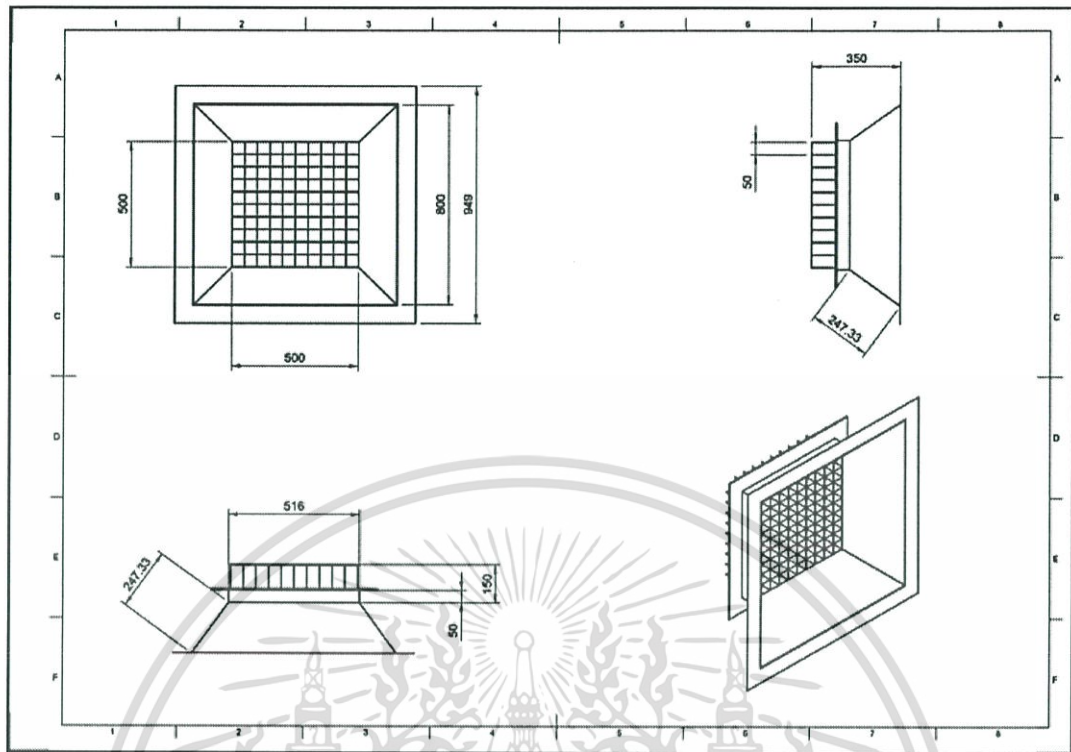
รูปที่ ข.2 แบบของแผ่นอะคริลิคด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



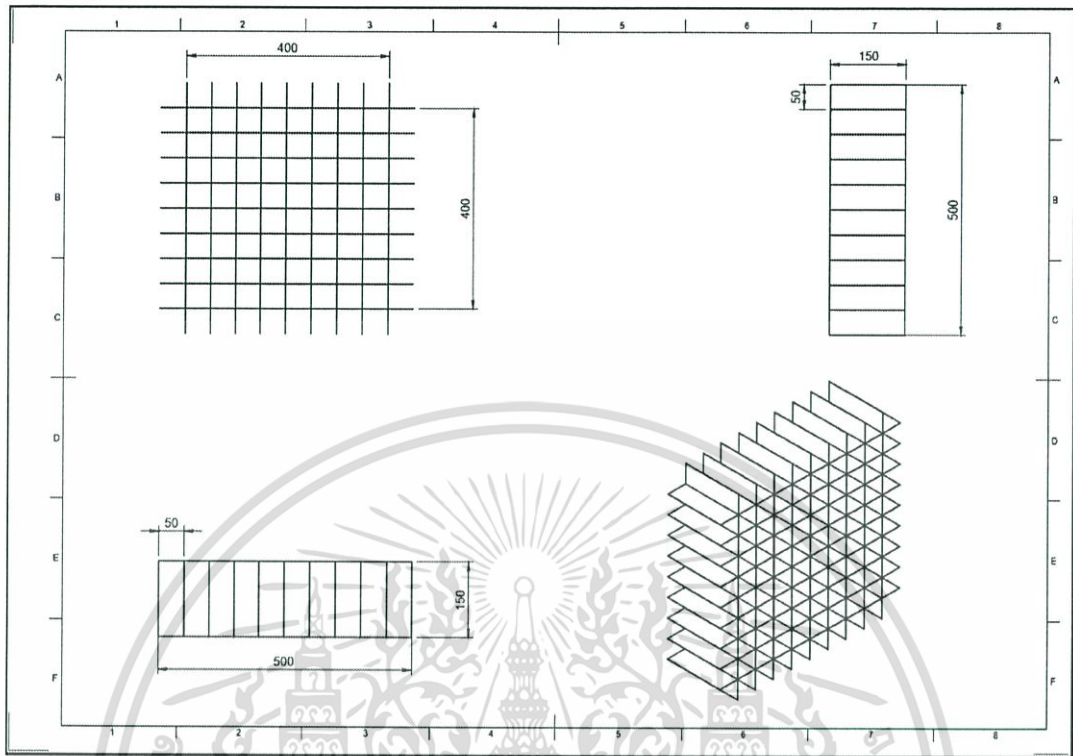
รูปที่ ข.3 แบบของแผ่นอะคริลิคด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



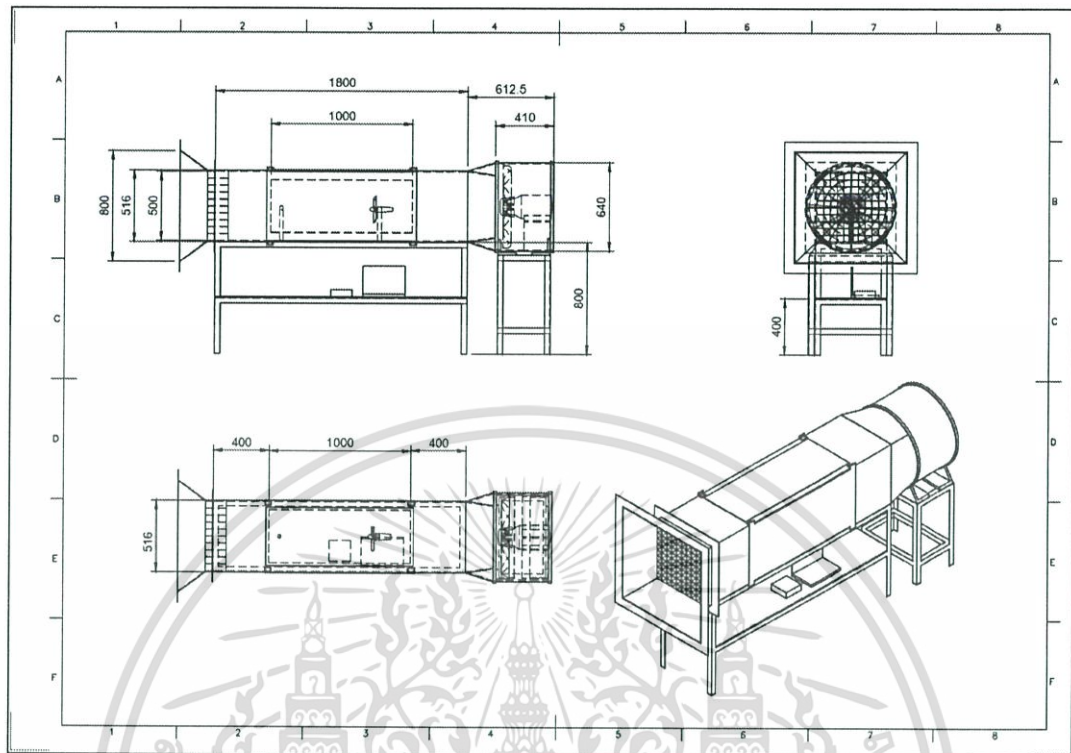
รูปที่ ข.4 แบบของส่วนอากาศแพร่เข้า (Contraction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 แบบของส่วนรังผึ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.6 แบบของอุโมงค์ลมจำลองเลียนแบบความเร็วลมตามธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้