

ระบบขนส่งด้วยลมสำหรับการนำผงชีวมวลกลับมาใช้ใหม่

Pneumatic Conveying System for recycle of pulverized biomass



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบขนส่งด้วยลมสำหรับการนำผงชีวมวลกลับมาใช้ใหม่

Pneumatic Conveying System for recycle of pulverized biomass



กฤตเมธ ลลิตวณิชกุล

กษิติศ ภัณฑจจร

กันตพันธ์ ปรีวัฒนศักดิ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Pneumatic Conveying System for recycle of pulverized biomass



Krithmate Lalitvanichkul

Kasidit Phanthachon

Gantapon Pariwattanasak

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECKNOLOGY LADKRABANG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบขนส่งด้วยลมสำหรับการนำผงชีวมวลกลับมาใช้ใหม่

นาย กฤตเมธ ลลิตวณิชกุล 59010030

นาย กษิติศ ภัณฑจร 59010054

นาย กันตพนธ์ ปรีวัฒนศักดิ์ 59010081

รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้ ระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลมเป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม เดิมทีระบบนี้จะใช้เพื่อขนส่งวัสดุทางการเกษตรเท่านั้น แต่เมื่อเวลาผ่านไประบบนี้ได้พัฒนาและประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและอุตสาหกรรมทางการเกษตรเพื่อขนส่งเม็ดพลาสติก ขี้วมอลต์และวัสดุประเภทอื่น ๆ เนื่องจากระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมมีข้อดีหลายประการ ทั้งในด้านของความปลอดภัย ความรวดเร็วในการส่ง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้จัดทำขึ้นโดยนำระบบขนส่งวัสดุด้วยลมนี้มาประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล เพื่อนำเชื้อเพลิงจากเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรอง นำส่งไปยังถังเก็บเชื้อเพลิง โดยขั้นตอนแรกได้นำสไลด์วาล์วขับเคลื่อนโดยลูกสูบนิวแมติกควบคุมด้วยการตั้งเวลาติดตั้งที่ระหว่างเครื่องดักฝุ่นด้วยถุงกรองกับถังพักเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่ได้สร้างขึ้น ขึ้นต่อมาเมื่อปิดวาล์วแล้ว นำอากาศจากพัดลมเป่าอากาศ เข้าไปยังถังพักเชื้อเพลิงที่ได้สร้างขึ้น เพื่อนำอากาศเหล่านี้พาเชื้อเพลิงขนส่งไปยังถังเก็บเชื้อเพลิง โดยมีอัตราการไหลของเชื้อเพลิงเพื่อไปยังถังเก็บเท่ากับ  $1.73 \times 10^{-3}$  กิโลกรัมต่อวินาที มีความดันสูญเสียในระบบจากการคำนวณเท่ากับ 1.38 กิโลปาสคาล ความดันสูญเสียในระบบจากการทดลองเท่ากับ 2.47 กิโลปาสคาล

จากผลการทดลอง เจ็อนไซท์ที่เหมาะสมที่สุดของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม คือ น้ำหนัก 100 กรัม และอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากพัดลมเป่าอากาศ 3.5 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ซึ่งเจ็อนไซท์นี้ทำให้เชื้อเพลิงไม่เหลือตกค้างในถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก โดยที่ระบบทั้งหมดถูกควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ อย่างไรก็ตามระบบนี้สามารถขนส่งเชื้อเพลิงได้ในปริมาณน้อย บางครั้งอาจต้องทำงานหลายครั้งต่อระบบการเผาไหม้ 1 ครั้ง สุดท้ายนี้ฝุ่นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงจะถูกนำกลับไปใช้ในระบบเผาไหม้และไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน

## Pneumatic Conveying System for Biomass Storage System

Krithmate Lalitvanichkul 59010030

Kasidit Phanthachon 59010054

Gantapon Pariwattanasak 59010081

Assoc.Prof.Dr.Jarawat Charoensuk Advisor

Education Year 2019

### Abstract

Nowadays, Pneumatic Conveying systems is a system that is widely used in many industries. Initially, this system was used to transport agricultural materials only. Then, this system has been developed and applied in the petrochemical industry and agricultural industry for Plastic resins, rice, malt, and other materials transportation since Pneumatic Conveying system has many advantages. Which include safety, decreasing time of transportation and economics values

The purpose of thesis is improving pneumatic conveying system in biomass combustion laboratory to transport pulverized biomass from bag filter to hopper. Firstly, pneumatic slide valve with timer was installed between bag filter and small hopper. Then, the valve has been closed and bring the air into small hopper for pulverized transportation as mass flow rate of pulverized biomass  $1.73 \times 10^{-3}$  kg/s. The experiment of pressure drop was 2.47 kPa whereas pressure loss equation showed 1.38 kPa of pressure drop.

From the experiment, The appropriate condition of the pneumatic conveying system is 100 grams of mass and volume flow rate  $3.5 \text{ m}^3/\text{min}$ . Which this condition has no remaining biomass. All of them are controlled by automatic microcontroller systems. However, It transports less biomass per time which makes this system works many times per 1 cycle of the combustion system. Finally, This high-quality biomass is used repeatedly in the combustion system and has no negative effects on health.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อประกอบการเรียนวิชา PROJECT ให้นักศึกษาได้นำความรู้ความสามารถในภาคทฤษฎีมาทำการปฏิบัติการ เป็นการเพิ่มพูนความรู้ ความสามารถ และประสบการณ์ ให้แก่นักศึกษาได้เป็นอย่างดี

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ดีก็เพราะความกรุณาที่ให้ความช่วยเหลือของ รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้และเป็นที่ปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ได้ทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณคณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม และช่วยให้ความรู้ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ช่วงเหลือแก้ไขให้คำแนะนำ รวมทั้งเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือให้นักศึกษาเข้าใจปัญหานั้น ขอขอบคุณเพื่อนพี่น้องนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ จนสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการทำปริญญาานิพนธ์ครั้งนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีมาจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กฤตเมธ ลลิตวณิชกุล 59010030

กษิติศ ภัณฑจร 59010054

กันตพันธ์ ปรีวัฒน์ศักดิ์ 59010081

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
2.2.1 ความดันสูญเสียน้ำ	6
2.2.2 ขนาดมอเตอร์ของพัดลมเป่าอากาศ	8
2.2.3 การขนถ่ายวัสดุด้วยลม	10
2.2.4 นิยามและรูปแบบของฮอปเปอร์	10

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 นิยามและรูปแบบวาล์ว	13
2.2.6 ประเภทและหลักการทำงานของตัวต้นกำเนิดลม	15
2.2.7 มุมกองวัสดุ	18
2.2.8 Programmable logic Control (PLC)	19
2.2.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์	20
2.2.10 รีเลย์	21
2.2.11 โหลดเซลล์ (Load cell )	22
2.2.12 เซนเซอร์แสง (Optical Sensor)	25
2.2.13 The Tuning Fork Sensor	26
2.2.14 Level sensor	27
2.2.15 โซลินอยด์วาล์ว	27
2.2.16 เซ็ควาล์วลม	28
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	29
3.1 การคำนวณอัตราการขนส่งเชื้อเพลิง	29
3.2 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิง	31
3.3 การคำนวณหาความดันสูญเสีย	32
3.3.1 ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง	32
3.3.2 ความดันสูญเสียเนื่องจากการชนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง	33

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ	33
3.3.4 ความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง	36
3.3.5 ความดันสูญเสียรวม	36
3.4 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของพัดลมเป่าอากาศ	37
3.5 การออกแบบระบบวาล์ว	41
3.6 การออกแบบถังพักเชื้อเพลิง	42
3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งเพิ่มเติม	44
3.7.1 การเลือกใช้งานระหว่าง Microcontroller board กับ PLC	44
3.7.2 การเลือกใช้เซ็นเซอร์	46
3.7.3 Relay module	47
3.7.4 โซลินอยด์วาล์ว	48
3.7.5 Pneumatic check valve	49
บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	50
4.1 วัตถุประสงค์	50
4.2 แนวทางการทดลอง	50
4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	50
4.4 ขั้นตอนการทดลอง	51
4.4.1 การทดลองหามวลตั้งต้นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม	51

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 การทดลองหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องต้นกำเนิดลมที่เหมาะสม	51
4.4.3 การทดลองหาวิธีการทำงานแบบวนซ้ำที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์	52
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	54
5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม	54
5.1.1 ผลการทดสอบความสามารถของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม	54
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	60
6.1 สรุปผลการทดลอง	60
6.2 ข้อเสนอแนะ	60
บรรณานุกรม	62
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก	65
ภาคผนวก ข	71

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบการไหลกับมูกองวัสดุ	18
ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียของท่อโค้ง	36
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของพัดลมเป่าอากาศที่นำมาเปรียบเทียบ	38
ตารางที่ 3.3 สรุปผลการคำนวณเพื่อออกแบบขนาดของพัดลมเป่าอากาศ	40
ตารางที่ 3.4 ข้อดีและข้อเสียของวาล์วที่นำมาเปรียบเทียบ	41
ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่าง Microcontroller board กับ PLC	44
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของ Arduino UNO R3	44
ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบหลักการทำงานของเซนเซอร์แต่ละชนิด	46
ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของ Force Sensitive Resistor FSR - Square	46
ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของ Relay module	47
ตารางที่ 5.1 การขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 2.5 ลบ.ม./นาที	54
ตารางที่ 5.2 การขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาที	56
ตารางที่ 5.3 การขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาที	57
ตารางที่ ข.1 สรุปผลการคำนวณเพื่อออกแบบขนาดของพัดลมเป่าอากาศ	72
ตารางที่ ข.2 การขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 2.5 ลบ.ม./นาที	73
ตารางที่ ข.3 การขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาที	73
ตารางที่ ข.4 การขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาที	74

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับปริมาณลม	9
รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศในระบบกับปริมาณลม	9
รูปที่ 2.3 ฮอปเปอร์แบบไหลทั้งหมด	11
รูปที่ 2.4 ฮอปเปอร์แบบไหลเฉพาะส่วนกลาง	11
รูปที่ 2.5 ฮอปเปอร์แบบไหลสมำเสมอ	12
รูปที่ 2.6 ลักษณะการติดขัดภายในฮอปเปอร์	12
รูปที่ 2.7 วิธีการทำให้วัสดุอยู่ในสภาพของไหล	13
รูปที่ 2.8 แบบจำลองแนวคิดของสไลด์วาล์ว	14
รูปที่ 2.9 รูปแบบของโรตารีวาล์ว	15
รูปที่ 2.10 พัฒลมแบบใบพัดตรง	16
รูปที่ 2.11 พัฒลมแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า	16
รูปที่ 2.12 พัฒลมแบบใบพัดโค้งไปข้างหลัง	17
รูปที่ 2.13 พัฒลมแบบเกลียว	17
รูปที่ 2.14 พัฒลมแบบเส้นตรง	18
รูปที่ 2.15 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์	20
รูปที่ 2.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino	21
รูปที่ 2.17 Relay module	22
รูปที่ 2.18 Strain Gauge Load cell	22

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.19 Hydraulic Load Cell	23
รูปที่ 2.20 Pneumatic Load cell	23
รูปที่ 2.21 Piezoresistive	24
รูปที่ 2.22 Magnetostrictive	24
รูปที่ 2.23 เซนเซอร์แสงชนิดต่าง ๆ	26
รูปที่ 2.24 The Tuning Fork Sensor	26
รูปที่ 2.25 Level sensor	27
รูปที่ 2.26 Solenoid Valve	28
รูปที่ 2.27 Pneumatic Check Valve	28
รูปที่ 3.1 แสดงการวัดน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ตกลงมาในครึ่งชั่วโมง	29
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบขนาดพัดลมเป่าอากาศ	30
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและปริมาณลม	37
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณลมของพัดลมเป่าอากาศ UB1102	38
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณลมของพัดลมเป่าอากาศ STPT600	38
รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณลมของพัดลมเป่าอากาศแต่ละชนิด	39
รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบกราฟการทำงานของพัดลมเป่าอากาศ	39
รูปที่ 3.8 Slide valve ที่ออกแบบ	42
รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของมุมกองวัสดุ	42

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.10 ถังเก็บเชื้อเพลิงที่ออกแบบ	43
รูปที่ 3.11 Microcontroller ที่ติดตั้ง	45
รูปที่ 3.12 Code ที่ใช้กับ Microcontroller เพื่อให้ระบบทำงานแบบอัตโนมัติ	45
รูปที่ 3.13 Load cell ที่ใช้งานในระบบ	47
รูปที่ 3.14 Solenoid valve 5/2	48
รูปที่ 3.15 SPA AIR BLOWER CHECK VALVE 1.5 INCH SLIP / 2 INCH SPG 1/4 LB	49
รูปที่ 4.1 การเดินสายไฟของระบบอัตโนมัติ	53
รูปที่ 4.2 การต่อสไลด์วาล์วกับระบบลม	53
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงผลการทดลองขณะที่โบลเวอร์มีอัตราการไหล 2.5 ลบ.ม.ต่อ 1 นาที	55
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับมวลของเชื้อเพลิงตั้งต้น (2.5m <sup>3</sup> /min)	55
รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลการทดลองขณะที่โบลเวอร์มีอัตราการไหล 3 ลบ.ม.ต่อ 1 นาที	56
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับมวลของเชื้อเพลิงตั้งต้น (3 m <sup>3</sup> /min)	57
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการทดลองขณะที่โบลเวอร์มีอัตราการไหล 3.5 ลบ.ม.ต่อ 1 นาที	58
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับมวลของเชื้อเพลิงตั้งต้น (3.5m <sup>3</sup> /min)	59
รูปที่ ก.1 แบบสไลด์วาล์ว	66
รูปที่ ก.2 แบบหน้าแปลนเชื่อมต่อระหว่างถังถังเชื้อเพลิงและส่วนกรองเชื้อเพลิง	66
รูปที่ ก.3 แบบถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก	67
รูปที่ ก.4 ชุดควบคุมการทำงาน	67

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ ก.5 ถังกักเก็บเชื้อเพลิงที่ติดตั้งวาล์วเรียบร้อย	68
รูปที่ ก.6 โซลีนอยด์วาล์ว	68
รูปที่ ก.7 ครอบบอกลูกสูบนิวมติก	69
รูปที่ ก.8 ปี่มลม	69
รูปที่ ก.9 พื้นที่ก่อนการติดตั้ง	70
รูปที่ ก.10 พื้นที่หลังการติดตั้ง	70



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมมีลักษณะการทำงานที่ง่ายและเหมาะสมกับการขนถ่ายวัสดุปริมาณมวล ซึ่งวัสดุจะอยู่ในรูปของเม็ดและผงไปตามท่อโดยลมและยังสามารถใช้ขนวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากมาย

ปัจจุบันนี้การขนส่ง ลำเลียงขนถ่ายวัสดุด้วยระบบลมได้มีบทบาทที่สำคัญต่อคุณภาพของสินค้า ซึ่งเทคโนโลยีการลำเลียงประเภทนี้ได้รับการพัฒนาให้สามารถลำเลียงขนส่งวัสดุชนิดเม็ด ชนิดผง ผ่านท่อลำเลียงไปยังพื้นที่โรงงานเป็นระยะทางไกล ซึ่งจะทำให้ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายเรื่องแรงงานการลำเลียงและบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุวัสดุ ทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายการทำความสะอาดในการลำเลียง เพราะเป็นระบบปิด สามารถควบคุมการฟุ้งกระจายของวัสดุ ช่วยลดการปนเปื้อนของวัสดุขณะลำเลียง และใช้พื้นที่ในการติดตั้งไม่มาก

ทีมโปรเจกต์จึงเลือกทำโปรเจกต์เกี่ยวกับ การขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม ไปยังถังกักเก็บ เพื่อให้การขนส่งเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ป้องกันความชื้นจากการปนเปื้อน ทั้งนี้ยังเป็นการช่วยลดแรงงานคนอันเนื่องการขนย้ายเชื้อเพลิงและยังช่วยประหยัดเวลาระหว่างการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการ โครงการพัฒนาและประเมินสมรรถนะสำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดฝุ่นเพื่อการใช้งานระยะยาวสำหรับภาคอุตสาหกรรม

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อสร้างและออกแบบเครื่องขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม พร้อมทั้งวาล์วที่ควบคุมด้วยลม

1.2.2 เพื่อออกแบบระบบการทำงานของเครื่องขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลมให้มีการทำงานแบบอัตโนมัติ

1.2.3 เพื่อลดระยะเวลา และแรงงานคนในการเคลื่อนย้ายเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตงาน

- 1.3.1 สร้างและออกแบบถังพักเชื้อเพลิงแบบทรงกรวยตัด
- 1.3.2 ออกแบบวาล์วชนิดควบคุมด้วยลมและลำดับขั้นตอนการทำงานของวาล์วควบคุม
- 1.3.3 ติดตั้งงานท่อสำหรับขนส่ง
- 1.3.4 เลือกประเภท ชนิด ของเครื่องเป่าลมและติดตั้งในระบบ
- 1.3.5 ทำการทดลองเป่าเชื้อเพลิงโดยเปลี่ยนความเร็วและความดันให้เหมาะสมและใช้งานได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างและออกแบบเครื่องขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม โดยควบคุมระบบการทำงานอัตโนมัติของเครื่องได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยทำให้เชื้อเพลิงไม่มีการรั่วไหลหรือมีการปนเปื้อนปัจจัยต่างๆจากสิ่งแวดล้อม อันเนื่องมาจากการขนย้ายด้วยแรงงานคน

## บทที่ 2

# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณหาความเร็วลมสำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้น เพื่อให้ผู้ออกแบบระบบกำหนดค่าความเร็วลมขนถ่ายวัสดุอย่างถูกต้อง ผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีการออกแบบระบบโดยคำนึงถึงประเภทของการขนถ่ายวัสดุด้วยลมเป็นหลัก ซึ่งแบ่งได้เป็นสองประเภท ได้แก่การขนถ่ายวัสดุแบบเบาบางและการขนถ่ายวัสดุแบบหนาแน่น โดยการขนถ่ายวัสดุแบบเบาบาง จะกำหนดความเร็วลมขนถ่ายวัสดุให้สูงกว่าความเร็วลมต่ำสุดที่คิดจากทฤษฎีเพื่อให้วัสดุนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ ส่วนการขนถ่ายวัสดุแบบหนาแน่นจะกำหนดความเร็วลมขนถ่ายวัสดุให้ต่ำกว่าความเร็วลมต่ำสุดที่คิดจากทฤษฎีเพื่อให้วัสดุนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้ แต่ปัจจุบันนี้สมการสำหรับการคำนวณหาความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการขนถ่ายวัสดุนั้น ยังมีข้อจำกัดความผิดพลาดจากการคำนวณและเงื่อนไขต่าง ๆ ทำให้การคำนวณยังได้ค่าที่ไม่ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งการกำหนดความเร็วลมสำหรับขนถ่ายวัสดุที่เหมาะสมอาจถือได้ว่าเป็นขั้นตอนที่ยากที่สุดในการออกแบบระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม [12]

#### สมการคำนวณความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยลม

Rose and Duckworth (1969) [6] ได้ทำการทดลองโดยใช้วัสดุ mustard bead, glass bead, steel bead และ lead bead เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์หาความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยลม โดยใช้ท่อขนถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร เขียนสมการได้เป็น [2]

$$\frac{v_{st}}{U_{fo}} = 3.2\mu^{0.2} \left(\frac{D}{d}\right)^{0.6} \left(\frac{\rho_p}{\rho}\right)^{-0.7} \left(\frac{v_{st}^2}{gD}\right)^{0.25} \quad (2.1)$$

$$U_{fo} = \frac{gd^2(\rho_p - \rho_f)}{18\eta} \quad (2.2)$$

$$\eta = 1.783 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{288}\right)^{0.77} \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$v_{st}$	คือความเร็วต่ำสุดในการขนส่ง, m/s
	$U_{fo}$	คือความเร็วในการตกอิสระของวัสดุ, m/s
	$\mu$	คืออัตราการขนถ่ายวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ
	$D$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m
	$d$	คือเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิง, m
	$\rho_p$	คือความหนาแน่นเชื้อเพลิง, kg/m <sup>3</sup>
	$\rho_f$	คือความหนาแน่นอากาศภายในระบบ, kg/m <sup>3</sup>
	$\rho$	คือความหนาแน่นอากาศ, kg/m <sup>3</sup>
	$g$	คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s <sup>2</sup>
	$\eta$	ค่าความหนืดของอากาศ, Pa.sec
	$T$	ค่าอุณหภูมิ, K

Rizk (1976) [4] ได้ทำการทดลองโดยใช้วัสดุ Styropor และ Polystyrol เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์หาความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยลม โดยใช้ท่อขนถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50, 100, 200 และ 400 มิลลิเมตรตามลำดับ โดยให้นิยามไว้ว่าความดันต่ำสุดของระบบ จะอยู่ระหว่างความดันของวัสดุขณะมีการไหล กับความดันของวัสดุขณะไม่มีการไหล เขียนสมการได้เป็น [7]

$$\mu = \left( \frac{1}{10^{\delta}} \right) \left( \frac{v_{st}}{\sqrt{gD}} \right)^{\chi} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \delta &= 1.44d + 1.96 \\ \chi &= 1.1d + 2.5 \end{aligned}$$

Matsumoto (1977) [3] ได้ทำการทดลองโดยใช้วัสดุ Glass Bead, Copper Bead และ Polystyrol เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์หาความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยลม [3] โดยใช้ท่อขนถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 26 มิลลิเมตร และ 49 มิลลิเมตร โดยให้นิยามไว้ว่าความดันต่ำสุดในระบบคือความดันที่วัสดุเริ่มกองที่ผิวท่อ เขียนสมการได้เป็น [11]

$$d^* = 1.39D \left( \frac{\rho_p}{\rho} \right)^{-0.74} \quad (2.5)$$

กรณี  $d > d^*$

$$\mu = 0.373 \left( \frac{\rho_p}{\rho} \right)^{1.06} \left( \frac{U_{fo}}{10\sqrt{gD}} \right)^{-3.7} \left( \frac{v_{st}}{10\sqrt{gD}} \right)^{3.61} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี  $d < d^*$

$$\mu = 5560 \left( \frac{d}{D} \right)^{1.43} \left( \frac{v_{st}}{10\sqrt{gD}} \right)^{3.61} \quad (2.7)$$

Schade (1987) [8] ได้ทำการทดลองกับท่อขนาด 50, 60, 80, 100, 120 และ 150 มิลลิเมตร กับวัสดุ Granule Sand, Styropor, Rubber และ Polystyrol การทดลองจะใช้แผ่นประจวบวงไว้ที่ผิวด้านล่างของท่อเพื่อวัดการตกลงที่ผิวด้านล่างของท่อวัสดุทดลอง ซึ่งการทดลองจะหาความเร็วลมในขณะวัสดุมีความเร็วเป็นศูนย์ ซึ่งจะทำให้ความเร็วลมที่ได้ต่ำกว่ากรณีอื่น ๆ ที่ทำการทดลองมา

$$\frac{v_{st}}{\sqrt{gD}} = \mu^{0.11} \left( \frac{D}{d} \right)^{0.025} \left( \frac{\rho_p}{\rho} \right)^{0.34} \quad (2.8)$$

Weber (1981) [9] ได้แสดงผลการทดลองโดยไม่ระบุรายละเอียดในการทดลอง ให้ความสัมพันธ์ของสมการดังนี้ [10]

กรณี  $U_{fo} \leq 3 \text{ m/s}$

$$\frac{v_{st}}{\sqrt{gD}} = \left[ 7 + \frac{8}{3} U_{fo} \right] \mu^{0.25} \left( \frac{d}{D} \right)^{0.1} \quad (2.9)$$

กรณี  $U_{fo} \geq 3 \text{ m/s}$

$$\frac{v_{st}}{\sqrt{gD}} = 15 \mu^{0.25} \left( \frac{d}{D} \right)^{0.1} \quad (2.10)$$

Geldart (1992) [13] ได้ทำการทดลองที่ความดันสูง (สูงถึง 82.5 บาร์) ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.19 มิลลิเมตร และ 12.52 มิลลิเมตร กับวัสดุที่เป็นถ่านหินขนาดเฉลี่ย 8, 18, และ 26 ไมโครเมตร การทดลองจะปรับค่าความดันในระบบให้คงที่จากนั้นจะวัดปริมาณการชนถ่ายวัสดุที่ความเร็วลมแตกต่างกันไป ความเร็วลมที่สามารถชนถ่ายวัสดุได้มากที่สุดนั้นถือว่าเป็นความเร็วลมต่ำสุดสำหรับการชนถ่ายวัสดุ ซึ่งจากการทดลองจะได้สมการคือ [1]

กรณี  $\frac{m_s}{AD} > 47,000$

$$v_{st} = \frac{1.5 \left( \frac{m_s}{A} \right)^{0.465} \eta^{0.55}}{D^{0.01} \rho^{0.42}} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี  $\frac{m_s}{AD} < 47,000$

$$v_{st} = \frac{8.7 \left( \frac{m_s}{A} \right)^{0.302} D^{0.153} \eta^{0.55}}{\rho^{0.42}} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $m_s$  คืออัตราการขนถ่ายเชื้อเพลิง, kg/s

$A$  คือพื้นที่หน้าตัดของท่อขนส่ง,  $m^2$

$\eta$  คือประสิทธิภาพของพัดลม

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 ความดันสูญเสีย

การไหลมักเกิดการสูญเสียความดันขึ้นเสมอตลอดระยะเวลาการไหล การสูญเสียดังกล่าวเกิดขึ้นจากหลายกรณี เช่น การเปลี่ยนแปลงความสูงของการไหล การเปลี่ยนแปลงหน้าตัดการไหล ความหนาแน่นและความหนืดของของไหล ความฝืดของผนังท่อซึ่งส่งผลให้การไหลปั่นป่วน เป็นต้น การจะขับเคลื่อนของไหลให้เคลื่อนตัวจากต้นทางไปยังตำแหน่งปลายทางที่ต้องการนั้น จำเป็นต้องทราบการสูญเสียดังกล่าวทั้งหมดตลอดเส้นทางการไหลนั้นเสียก่อน จึงจะสามารถออกแบบระบบที่เหมาะสมมาใช้งานได้

#### ความดันสูญเสียในระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลม

##### 2.2.1.1 ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง

ขณะที่วัสดุบรรจุอยู่ในถังเก็บจะอยู่ในสภาพนิ่ง แต่เมื่อถูกจ่ายเข้าไปในระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมอย่างทันที เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วที่ได้กำหนดไว้ ทำให้เกิดความดันสูญเสียขึ้นทั้งจากวัสดุและอากาศ ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ [5]

$$\Delta P_a = \rho_f v^2 \left( 0.5 + \frac{\mu v_s}{v} \right) \quad (2.13)$$

$$v_s = v(1 - 0.008d^{0.3} \rho_p^{0.5}) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $\Delta P_a$  คือความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง, Pa  
 $v$  คือความเร็วขนถ่ายวัสดุหรือความเร็วของอากาศ, m/s  
 $v_s$  คือความเร็วของวัสดุขณะขนถ่าย, m/s

### 2.2.1.2 ความดันสูญเสียเนื่องจากการขนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง

การขนส่งวัสดุขึ้นในแนวตั้งทำให้เกิดความดันสูญเสียตามแรงโน้มถ่วง ซึ่งสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$\Delta P_z = \frac{\mu \rho_f g z v}{v_s} \quad (2.15)$$

- เมื่อ  $\Delta P_z$  คือความดันสูญเสียเนื่องจากการขนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง, Pa  
 $z$  คือระยะทางการขนส่งวัสดุในแนวตั้ง, m

### 2.2.1.3 ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ

ความดันสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างท่อกับอากาศ และระหว่างท่อกับวัสดุ ซึ่งจะสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ [16]

$$\Delta P_L = \frac{\rho_f L v^2}{2D} (\lambda_f + \mu \lambda_s) \quad (2.16)$$

$$\lambda_f = \frac{0.316}{R_e^{0.25}} \quad (2.17)$$

กรณีวัสดุมีขนาด  $d < 0.5$  mm

$$\lambda_s = \frac{2.1 F_{rp}^{0.25}}{\mu^{0.3} F_r} \left( \frac{D}{d} \right)^{0.1} \quad (2.18)$$

กรณีวัสดุมีขนาด  $d > 0.5$  mm

$$\lambda_s = \frac{0.082 F_{rp}^{0.25}}{\mu^{0.3} F_r^{0.86}} \left( \frac{D}{d} \right)^{0.1} \quad (2.19)$$

$$F_r = \frac{v^2}{gD} \quad (2.20)$$

$$F_{rp} = \frac{U_{fo}^2}{gd} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$\Delta P_L$	คือความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ, Pa
	$L$	คือความยาวรวมของท่อ, m
	$\lambda_f$	คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อกับอากาศ
	$\lambda_s$	คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างท่อกับวัสดุ
	$F_r$	คือ Froude number
	$F_{rp}$	คือ Froude number ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการตกอิสระของวัสดุ

#### 2.2.1.4 ความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง

ในขณะที่วัสดุและอากาศไหลผ่านท่อโค้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลทันที เป็นผลให้ความเร็วของวัสดุและอากาศลดลง ดังนั้นเมื่อวัสดุและอากาศไหลออกจากท่อโค้งจะมีความเร็วต่ำเกินไป จำเป็นต้องมีการเร่งความเร็วให้กับวัสดุและอากาศให้มีความเร็วตามที่ได้ออกแบบไว้ จึงทำให้เกิดความดันสูญเสียขึ้นในระบบ สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

$$\Delta P_b = \frac{NB\rho_f v^2}{2} (1 + \mu) \quad (2.22)$$

เมื่อ	$\Delta P_b$	คือความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง, Pa
	$N$	คือจำนวนท่อโค้งในระบบ
	$B$	คือสัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียของท่อโค้ง

#### 2.2.1.5 ความดันสูญเสียรวม

ความดันสูญเสียรวมสามารถคำนวณโดยตรงได้จากการนำความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ และความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้งนำมารวมกันโดยตรง

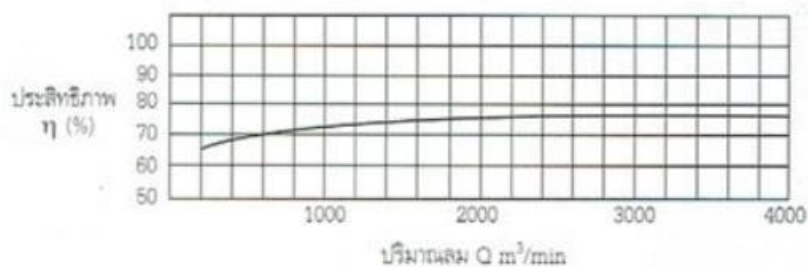
$$\Delta P_t = \Delta P_a + \Delta P_z + \Delta P_L + \Delta P_b \quad (2.23)$$

เมื่อ	$\Delta P_t$	คือความดันสูญเสียรวม, Pa
-------	--------------	--------------------------

#### 2.2.2 ขนาดมอเตอร์ของพัดลมเป่าอากาศ

การคำนวณหาค่ากำลังในการขับเคลื่อนของพัดลมเป่าอากาศจำเป็นต้องคำนึงถึงความดันสูญเสียรวมในระบบ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ และประสิทธิภาพของพัดลม โดยประสิทธิภาพของพัดลมหาได้จากกราฟดังรูปที่ 2.1 สำหรับสมการที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

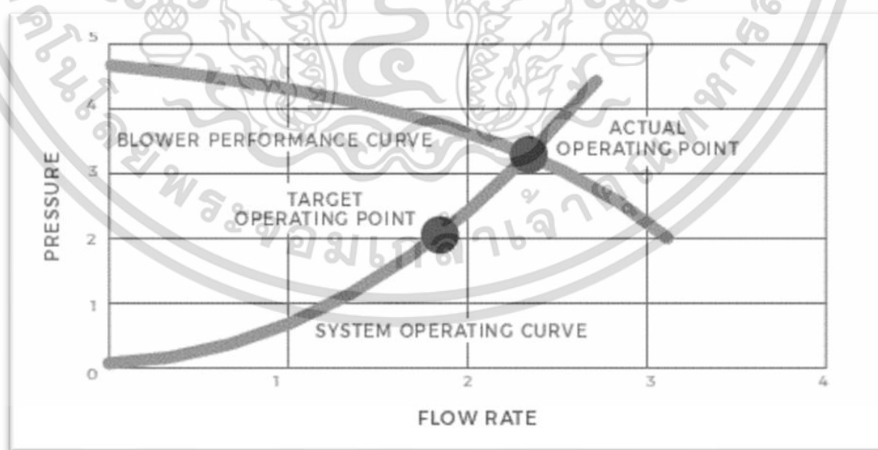


รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับปริมาณลม

$$BHP = \frac{CFM \Delta P}{6356 \eta} \quad (2.24)$$

- เมื่อ  $BHP$  คือขนาดมอเตอร์ของพัดลมเป่าอากาศ, HP  
 $CFM$  คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ, ft<sup>3</sup>/minute  
 $\Delta P$  คือความดันสูญเสียรวมภายในระบบ, inH<sub>2</sub>O  
 $\eta$  คือค่าประสิทธิภาพของพัดลม

ขณะที่พัดลมทำงาน จะทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ได้ด้วยค่าความดันที่เพิ่มขึ้น เราสามารถวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหลของอากาศดังกล่าว ไปใช้ในการเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมของพัดลมชนิดนั้นได้เมื่อทราบคุณสมบัติของพัดลมเป่าอากาศแต่ละตัว



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันอากาศในระบบกับปริมาณลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3. การขนถ่ายวัสดุด้วยลม

การขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นเป็นการนำลมเข้ามาใช้ในการขนส่งวัสดุ โดยเริ่มแรกนั้นการขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นนิยมใช้ขนส่งวัสดุในเชิงอุตสาหกรรมและการขนส่งวัสดุในเชิงการเกษตร เช่น เม็ดพลาสติกชนิดต่าง ๆ ปูนซีเมนต์ แปะ ข้าว และทรายซึ่งจะใช้ระบบลมสุญญากาศก่อน หลังจากนั้นได้มีการนำระบบลมความดันมาประยุกต์ใช้เพิ่มเติมเนื่องจากมีต้นทุนการทำระบบที่ประหยัดมากกว่าระบบสุญญากาศ สำหรับระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมนั้นจะมีข้อดีข้อเสียดังนี้ [14]

#### ข้อดี

- 1) ประหยัดค่าแรงในการขนส่ง
- 2) บำรุงรักษาได้ง่าย
- 3) สามารถประยุกต์เป็นระบบอัตโนมัติได้ง่าย
- 4) ให้ความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน
- 5) ลดการสูญเสียเนื่องจากการรั่วไหลในการขนส่งวัสดุ
- 6) ลดความชื้นที่อาจเกิดได้จากการขนส่ง

#### ข้อเสีย

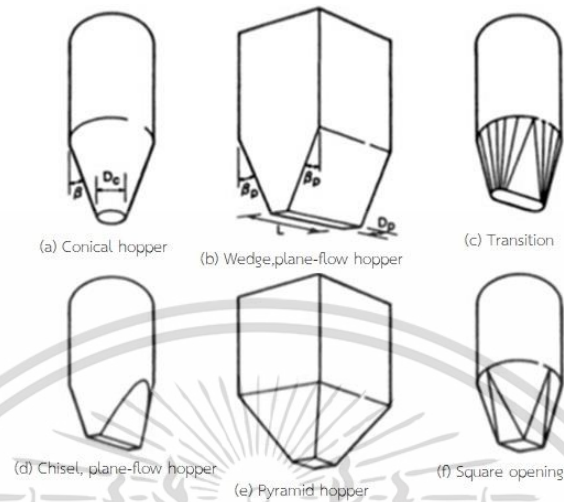
- 1) มีค่าใช้จ่ายในการออกแบบระบบ
- 2) ระบบอาจมีการสึกหรอภายในเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน
- 3) ระยะทางในการขนถ่ายจำกัด
- 4) ต้องใช้ความละเอียดรอบคอบและความชำนาญในการออกแบบสูง

### 2.2.4. นิยามและรูปแบบของฮอปเปอร์

ฮอปเปอร์ [14] หมายถึง สิ่งก่อสร้างที่บรรจุวัสดุปริมาณมวล ใช้เพื่อเก็บวัสดุทางการเกษตร อุตสาหกรรมพลาสติก หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้เก็บวัสดุอื่นได้ก่อนขนส่งออก มักเป็นถังอะลูมิเนียมขนาดใหญ่ ฮอปเปอร์จะมีลักษณะเป็นภาชนะรูปกรวยเพื่อบรรจุวัสดุที่ต้องการขนส่งไปยังที่อื่น เช่น เชื้อเพลิง ฮอปเปอร์จะมีกว้างของส่วนด้านบนมากกว่าด้านล่าง วัสดุที่บรรจุอยู่ภายในฮอปเปอร์จะไหลลงสู่ด้านล่างของฮอปเปอร์อันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก

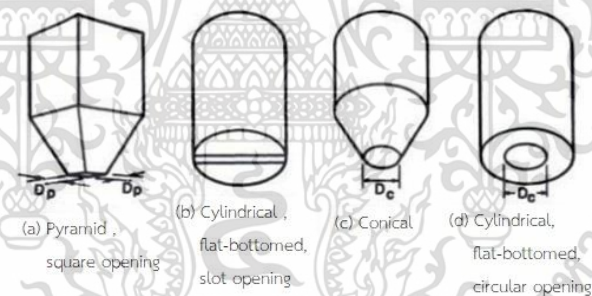
## รูปแบบของฮอปเปอร์

### 1) ฮอปเปอร์แบบวัสดุไหลทั้งหมด (Mass flow hopper)



รูปที่ 2.3 ฮอปเปอร์แบบไหลทั้งหมด

### 2) ฮอปเปอร์แบบวัสดุไหลเฉพาะ ส่วนแกนกลาง (Core flow hopper)

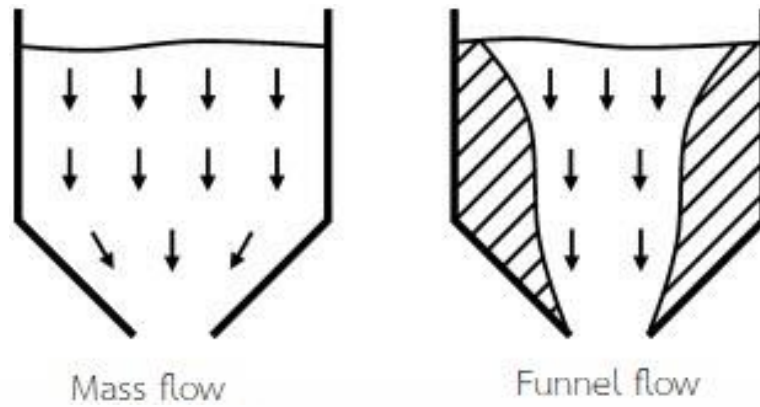


รูปที่ 2.4 ฮอปเปอร์แบบไหลเฉพาะส่วนกลาง

ลักษณะของฮอปเปอร์นั้นอาจปรับเปลี่ยนการออกแบบให้เหมาะสมกับงานได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำตามรูปแบบข้างต้น ทั้งนี้การออกแบบฮอปเปอร์อาจส่งผลต่อลักษณะการไหลที่แตกต่างกันและอาจจะมีปัญหาตามมาในภายหลัง

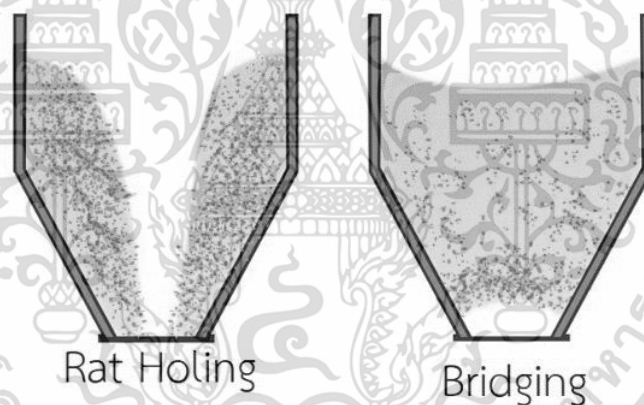
ลักษณะการไหลเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการติดขัดภายในฮอปเปอร์ โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ ๆ คือ การไหลแบบสม่ำเสมอ (Mass Flow) และการไหลแบบเฉพาะที่ (Funnel Flow) ซึ่งวัสดุจะมีลักษณะการไหลแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น มุมเอียงของส่วนปล่อยวัสดุ ขนาดช่องทางปล่อยวัสดุ และคุณสมบัติของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ฮอปเปอร์แบบไหลสม่ำเสมอ

การติดขัดของวัสดุภายในฮอปเปอร์สามารถเกิดได้เป็น 2 ลักษณะ คือ 1.การติดขัดแบบขี้มโด้ง (Arch หรือ Bridging) โดยเกิดจากการไหลแบบสม่ำเสมอ (Mass Flow) 2.การติดขัดแบบรูปทรงกระบอก (Piping หรือ Rathole) โดยเกิดจากการไหลแบบเฉพาะที่ (Funnel Flow)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการติดขัดภายในฮอปเปอร์

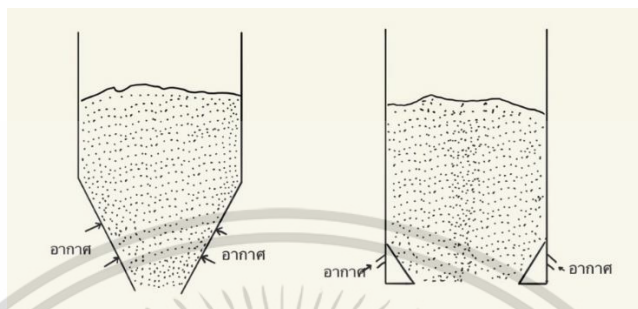
### วิธีการแก้ปัญหาการติดขัดของฮอปเปอร์

#### 1.วิธีการที่ทำให้วัสดุอยู่ในสภาพของไหล (Fluidization Methods)

มีหลักการเบื้องต้นที่จะทำให้ลมความดันต่ำเข้าไปผสมกับวัสดุเพื่อที่จะให้วัสดุสามารถไหลได้คล้ายของเหลวและมีการควบคุมปริมาณลมให้เหมาะสม ในทางปฏิบัติอาจทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ท่อที่เจาะรูเล็ก ๆ รอบท่อแล้วหุ้มด้วยผ้าอีกชั้นหนึ่งเพื่อกันไม่ให้วัสดุไหลเข้าไปในท่อได้

## 2.วิธีการใช้ลมผลักวัสดุ (Air assisted Methods)

วิธีการนี้จะใช้ลมความดันสูงในปริมาณน้อยและทำให้เกิดการขยายตัวแบบทันทีทันใดเพื่อผลักวัสดุให้ไหลออกจากภาชนะบรรจุ โดยการขยายตัวแบบทันทีทันใดของลมจะไปทำลายส่วนที่ติดขัดภายในฮอปเปอร์



รูปที่ 2.7 วิธีการทำให้วัสดุอยู่ในสภาพของไหล

## 3.วิธีการสั่นสะเทือน (Vibration Methods)

การใช้การสั่นสะเทือนเพื่อให้วัสดุไหลออกจากภาชนะบรรจุเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมกันทั่วไป หน้าที่หลักของการสั่นสะเทือนก็คือ การลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเพื่อให้วัสดุแยกตัวออกจากกันและไหลได้

## 4.วิธีการใช้อุปกรณ์ทางกล (Mechanical Method)

อุปกรณ์ทางกลที่ใช้จ่ายวัสดุออกจากภาชนะบรรจุโดยทั่วไปจะใช้จานหมุน สกรู แผ่นกวาด โรตารีวาล์ว ซึ่งโดยส่วนมากจะเข้ากับภาชนะบรรจุขนาดใหญ่

## 5.วิธีการเคลือบผิวส่วนปล่อยวัสดุ (Hopper Liners Methods)

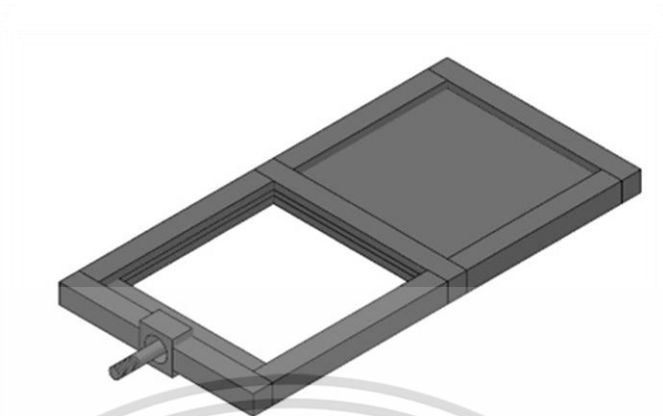
เป็นการใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำเคลือบผิวด้านในของภาชนะบรรจุก็เพื่อทำให้วัสดุสามารถไหลได้ง่าย เป็นเทคนิคที่คุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

### 2.2.5 นิยามและรูปแบบวาล์ว

วาล์วเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการไหลในระบบท่อ ซึ่งวาล์วมีหลายประเภท สามารถเลือกใช้ได้ตามความเหมาะสมของงานนั้น ๆ วาล์วแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การเลือกวาล์วจำเป็นต้องคำนึงถึงหลายเหตุผล เช่น อัตราการไหลที่ต้องการ ประเภทของวัสดุที่อยู่ในระบบท่อ ความดันของของไหลที่อยู่ในระบบท่อ ซึ่งในระบบขนถ่ายเชื้อเพลิงด้วยลมนี้มีตัวเลือกวาล์วอยู่ 2 ประเภทที่เหมาะสมกับปริญญานิพนธ์ คือ 1.slide gate valve 2.rotary valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1) slide gate valve



รูปที่ 2.8 แบบจำลองแนวคิดของสไลด์วาล์ว

เป็นเกทวาล์วประเภทหนึ่งที่ใช้ร่วมกับลูกสูบลมสำหรับเปิด-ปิดแผ่นกัน เพื่อเปิด-ปิดทางเข้าไม่ให้ฝุ่นเชื้อเพลิงไหลผ่านวาล์วไป การใช้งานวาล์วประเภทนี้ที่ถูกต้องจะต้องเปิดหรือปิดให้สุด เนื่องจากการรองรับ และการบังคับวาล์วไม่แข็งแรงเพียงพอ จากโครงสร้างของวาล์ว วาล์วชนิดนี้จึงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ควบคุมอัตราการไหล

## ข้อดี

1. ออกแบบได้ง่าย และประหยัดงบประมาณการก่อสร้าง
2. ขณะปิด สามารถปิดได้สนิทไม่มีอากาศไหลออก
3. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย
4. บำรุงรักษาได้ง่าย

## ข้อเสีย

1. ระบบไม่สามารถทำงานเป็นระบบอัตโนมัติได้ ต้องใช้ระบบอื่นช่วย
2. ใช้ได้แค่เปิด-ปิดเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) Rotary valve



รูปที่ 2.9 รูปแบบของโรตารีวาล์ว

โรตารีวาล์วเป็นวาล์วประเภทหนึ่งที่มีใบหมุนอยู่ภายในตัววาล์ว มีหน้าที่ลำเลียงวัสดุให้ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างในอัตราการขนส่งคงที่ นอกจากนี้วาล์วประเภทนี้ยังสามารถควบคุมแรงดันของด้านบนและด้านล่างให้สม่ำเสมอ

### ข้อดี

- 1) สามารถควบคุมอัตราการไหลได้

### ข้อเสีย

- 1) ออกแบบได้ยาก และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง
- 2) ไม่สามารถปิดการไหลของอากาศได้สนิทเท่ากับเกทวาล์ว
- 3) ใช้พื้นที่การติดตั้งมาก

### 2.2.6 ประเภทและหลักการทำงานของตัวต้นกำเนิดลม

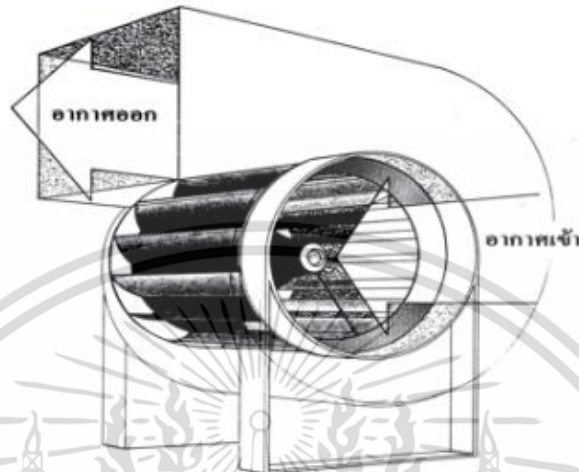
พัดลมมีหลายประเภทตามขนาดอัตราการไหลและความดันของของไหลที่ลำเลียง โดยตามวัตถุประสงค์การใช้งาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ [15]

#### 1) พัดลมแบบหมุนแรงเหวี่ยง(Centrifugal Flow or Radial Fans)

พัดลมแบบแรงเหวี่ยงที่มีการไหลของอากาศในแนวรัศมี โดยจะประกอบด้วยใบพัดที่อยู่ในตัวพัดลม โดยชุดใบพัดนี้จะประกอบด้วยแผ่นใบเล็ก ๆ ที่มีลักษณะโค้งงอ โดยสามารถเพิ่มความดันของอากาศให้สูงขึ้นโดยการเพิ่มขนาดความยาวของใบพัด ซึ่งจะทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในระบบมีค่ามากขึ้น อากาศจะไหลผ่านเข้าไปในท่อทางเข้าโดยมีทิศทางขนานกับแกนใบพัดและไหลออกในทิศทางตั้งฉากกับแกนของใบพัด พัดลมประเภทนี้จำแนกตามลักษณะรูปร่างของใบพัดได้ 3 แบบ คือ

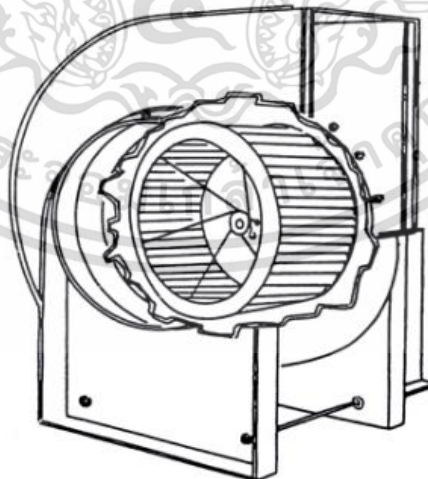
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1) แบบใบพัดตรง (Straight Blade) พัดลมชนิดนี้มีจำนวนใบพัดประมาณ 6 ถึง 20 ใบ โดยใบพัดจะอยู่ในระนาบรัศมีจะเพลาดด้วยความเร็วต่ำดังนั้นจึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการปริมาณของอากาศจำนวนน้อย ๆ แต่มีความกดดันของอากาศสูง



รูปที่ 2.10 พัดลมแบบใบพัดตรง

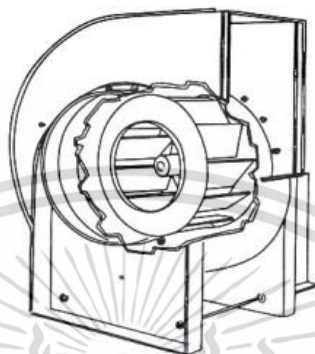
1.2) แบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า (Forward Curved Blade Fans) โดยใบพัดจะโค้งไปข้างหน้าในทิศทางเดียวกับการหมุนของชุดใบพัด โดยมีจำนวนบัตรใบพัดประมาณ 20 ถึง 60 ใบ เรือใบพัดชนิดนี้มีข้อดีก็คือเสียงเบาแต่ข้อเสียคือมีลักษณะมอเตอร์ที่ทำงานเกินกำลังนั้น พัดลมชนิดนี้จึงทำงานแบบไม่เสถียร ซึ่งพัดลมชนิดนี้ไม่ควรใช้กับงานที่มีอัตราการไหลคงที่



รูปที่ 2.11 พัดลมแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3) แบบใบพัดโค้งไปข้างหลัง (Backward Curved Blade Fans) โดยใบพัดชนิดนี้จะเอียงไปด้านหลัง ในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนของใบพัด มีจำนวนใบพัดประมาณ 10 ถึง 50 ใบ ใบพัดชนิดนี้หมุนด้วยความเร็วรอบสูง เสียงเบา มอเตอร์มีทำงานเกินกำลัง มีความเสถียร เพราะฉะนั้นจึงเหมาะกับการระบายอากาศ เนื่องจากสามารถควบคุมความกดดันและปริมาณอากาศได้ง่าย

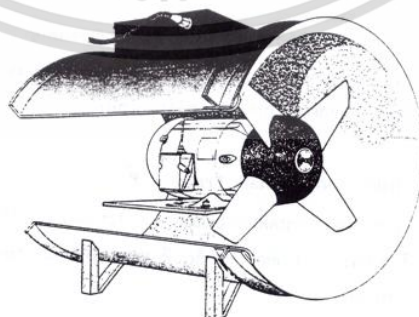


รูปที่ 2.12 พัดลมแบบใบพัดโค้งไปข้างหลัง

## 2) พัดลมแบบอากาศไหลตามแนวแกน (Axial Flow Fans)

พัดลมนี้ อากาศจะไหลขนานกับแกนใบพัด และตั้งฉากกับระนาบการหมุนของใบพัด ซึ่งพัดลมชนิดนี้มอเตอร์กำลังจะอยู่ในตัวพัดลมทำให้มอเตอร์ระบายความร้อนออกไปกับอากาศที่ไหลผ่าน พัดลมชนิดนี้มีราคาถูก เสียงดัง และการทำงานของพัดลมไม่เสถียร จึงเหมาะกับการระบายอากาศขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายง่าย แบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

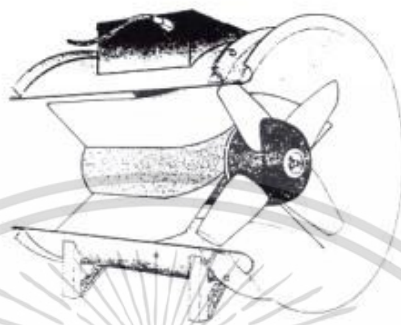
2.1) พัดลมที่เป็นเกลียว (Tube Axial Fans) พัดลมชนิดนี้มีโครงสร้างประกอบด้วยชุดใบพัดที่หมุนอยู่ในท่อรูปทรงกระบอก อากาศจะไหลผ่านชุดใบพัดและถูกหมุนเป็นเกลียว มีลักษณะการไหลแบบปั่นป่วน พัดลมชนิดนี้จึงให้ค่าความกดดันปานกลาง



รูปที่ 2.13 พัดลมแบบเกลียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) พัดลมที่เป็นเส้นตรง (Vane Axial Fans) พัดลมชนิดนี้มีแผ่นคลิบเพื่อใช้ในการบังคับการไหลของอากาศ บริเวณท่อด้านหลังมีชุดใบพัดเพื่อช่วยในการไหลของอากาศปั่นป่วนลดลง และลดพลังงานที่สูญเสียอันเนื่องมาจากการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานสูง แต่มีราคาค่อนข้างสูง



รูปที่ 2.14 พัดลมแบบเส้นตรง

### 2.2.7 มุมกองวัสดุ

มุมกองวัสดุเกิดจากวัสดุมีการเลื่อนไหลตามธรรมชาติ โดยวัดมุมที่พื้นผิวของวัสดุกระทำกับพื้นราบ ซึ่งมุมกองวัสดุจะสามารถบอกถึงคุณสมบัติในการไหลของวัสดุได้โดยมีข้อมูลดังตาราง [1] [14]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบการไหลกับมุมกองวัสดุ

มุมกองวัสดุ (องศา )	คุณสมบัติในการไหล
25-30	ไหลได้ดีมาก
30-38	ไหลได้ดี
38-45	ไหลได้พอสมควร
45-55	วัสดุมีคุณสมบัติการเกาะติด ไหลได้ยาก
55-70	วัสดุมีคุณสมบัติการเกาะติด ไหลได้ยากมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.8 Programmable logic Control (PLC)

โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic Control : PLC) เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการทำงานต่าง ๆ โดยภายในมี Microprocessor เป็นมันสมองสิ่งสำคัญ PLC จะมีส่วนที่เป็นอินพุตและเอาต์พุตที่สามารถต่อออกไปใช้งานได้ทันที ตัวตรวจวัดหรือสวิทช์ต่าง ๆ จะต่อเข้ากับอินพุต ส่วนเอาต์พุตจะใช้ต่อออกไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่เป็นเป้าหมาย เราสามารถสร้างวงจรหรือแบบของการควบคุมได้โดยการป้อนเป็นโปรแกรมคำสั่งเข้าไปใน PLC นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์อื่นเช่นเครื่องอ่านบาร์โค้ด (Barcode Reader) เครื่องพิมพ์ (Printer) ซึ่งในปัจจุบันนอกจากเครื่อง PLC จะใช้งานแบบเดี่ยว (Stand alone) แล้วยังสามารถต่อ PLC หลายๆ ตัวเข้าด้วยกัน (Network) เพื่อควบคุมการทำงานของระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วยจะเห็นได้ว่าการใช้งาน PLC มีความยืดหยุ่นมาก ดังนั้นในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงเปลี่ยนมาใช้ PLC มากขึ้น

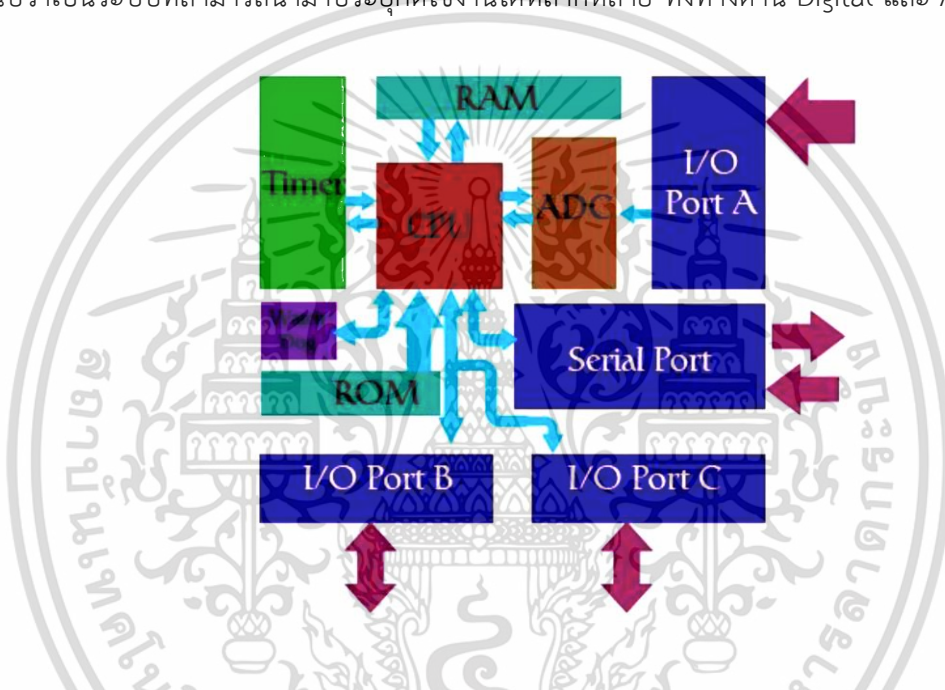
### 2.2.8.1 โปรแกรมเมเบิล ลอจิก คอนโทรลเลอร์ (PLC)

PLC เป็นอุปกรณ์ชนิดโซลิด – สเตท (Solid State) ที่ทำงานแบบลอจิก (Logic Functions) การออกแบบการทำงานของ PLC จะคล้ายกับหลักการทำงานของคอมพิวเตอร์ จากหลักการพื้นฐานแล้ว PLC จะประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า Solid-State Digital Logic Elements เพื่อให้ทำงานและตัดสินใจแบบลอจิก PLC ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม

การใช้ PLC สำหรับควบคุมเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้ระบบของรีเลย์ (Relay) ซึ่งจำเป็นจะต้องเดินสายไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า Hard- Wired ฉะนั้นเมื่อมีความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนกระบวนการผลิต หรือลำดับการทำงานใหม่ ก็ต้องเดินสายไฟฟ้าใหม่ ซึ่งเสียเวลาและเสียค่าใช้จ่ายสูง แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้ PLC แล้ว การเปลี่ยนกระบวนการผลิตหรือลำดับการทำงานใหม่นั้นทำได้โดยการเปลี่ยนโปรแกรมใหม่เท่านั้น นอกจากนี้แล้ว PLC ยังใช้ระบบโซลิด – สเตท ซึ่งน่าเชื่อถือกว่าระบบเดิม การกินกระแสไฟฟ้าน้อยกว่า และสะดวกกว่าเมื่อต้องการขยายขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร

## 2.2.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน เป็นระบบคอนโทรลขนาดเล็กเรียกอีกอย่างหนึ่งคือเป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยผ่านการออกแบบวงจรให้เหมาะกับงานต่าง ๆ และยังสามารถโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมขา Input / Output เพื่อสั่งงานให้ไปควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้อีกด้วย ซึ่งก็นับว่าเป็นระบบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ทั้งทางด้าน Digital และ Analog

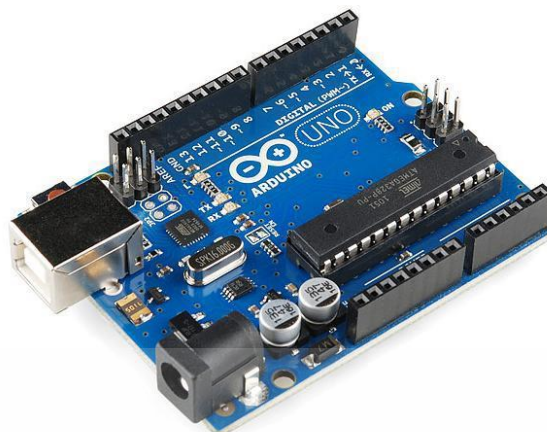


รูปที่ 2.15 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.2.9.1 Arduino

Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดแบบสำเร็จรูปในยุคปัจจุบัน ซึ่งถูกสร้างมาจาก Controller ตระกูล ARM ของ ATMEEL ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดคือเรื่องของ Open Source ที่สามารถนำไปพัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ และความสามารถในการเพิ่ม Boot Loader เข้าไปที่ตัว ARM จึงทำให้การ Upload Code เข้าตัวบอร์ดสามารถทำได้ง่ายขึ้น และยังมีการพัฒนา Software ที่ใช้ในการควบคุมตัวบอร์ดของ Arduino มีลักษณะเป็นภาษา C++ ที่โปรแกรมเมอร์มีความคุ้นเคยในการใช้งาน ตัวบอร์ดสามารถนำโมดูลมาต่อเพิ่ม ซึ่งทาง Arduino เรียกว่าเป็น shield เพื่อเพิ่มความสามารถเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

### 2.2.10 รีเลย์

รีเลย์ (Relay) คือ สวิตช์ตัด-ต่อวงจรแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้หลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำงานเมื่อมีการจ่ายไฟไปตามกำหนดทำให้เกิดวงจรเปิด เมื่อไม่มีการจ่ายไฟจะทำให้เกิดวงจรปิดทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้รีเลย์เป็นสวิตช์นั้นไม่ทำงาน รีเลย์ที่ผลิตในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด รีเลย์ที่นิยมใช้งานและรู้จักกันแพร่หลาย 4 ชนิดมีดังนี้

- อาร์เมเจอร์ (Armature Relay) เป็นรีเลย์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด บางครั้งเรียกรีเลย์แบบนี้ว่า รีเลย์ชนิดแคลปเปอร์ (Clapper Relay)
- รีดรีเลย์ (Reed Relay) เป็นรีเลย์ไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแคปซูลขนาดเล็ก ประกอบด้วยส่วนที่เรียกว่ารีดแคปซูล ซึ่งมีคอยล์พันบนแกนบ็อบบี้ รีดแคปซูลจะเป็นหลอดแก้ว ภายในบรรจุก๊าซเฉื่อย หน้าสัมผัสเป็นโลหะผสมแผ่นบาง ๆ ปลายตัด 2 แผ่น วางซ้อนแต่ไม่สัมผัสกัน เป็นสวิตช์ชุดเดียวทางเดียวหน้าสัมผัสปกติเปิดวงจร (SPST-NO)
- รีดสวิตช์ (Reed Switch) เป็นรีเลย์อีกชนิดหนึ่งแต่ไม่มีชุดขดลวดสำหรับสร้างสนามแม่เหล็ก การควบคุมการปิดเปิดหน้าสัมผัส ของสวิตช์จะใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกมาควบคุมหน้าสัมผัส
- โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid-State Relay) เป็นรีเลย์ที่ไม่มีโครงสร้างทางกลอยู่ภายใน มีขั้วต่ออย่างละ 2 ขั้ว ขั้วอินพุต เป็นขั้วสำหรับป้อนสัญญาณควบคุม เพื่อบังคับให้ขั้วเอาต์พุตปิดหรือเปิดวงจร โดยจะมีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างขั้วอินพุตและเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

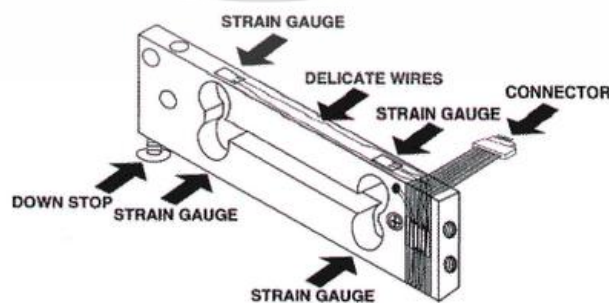


รูปที่ 2.17 Relay module

### 2.2.11 โหลดเซลล์ (Load cell )

โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปร่าง (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ ฯลฯ แบ่งออกเป็น 5 แบบ ดังนี้

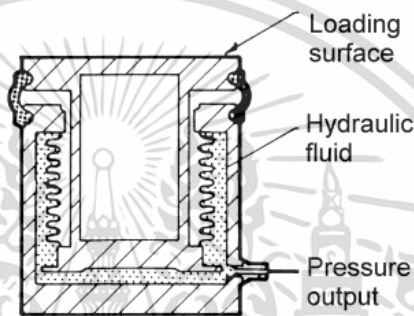
- โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain Gauge Load cell) หลักการของโหลดเซลล์ ประเภทนี้ก็คือ เมื่อมีน้ำหนักมากกระทำ ความเครียด(Strain) จะเปลี่ยนเป็นความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากกระทำ ปกติแล้วมักจะใช้เกจวัดความเครียด 4 ตัว (วงจร Wheatstone Bridge Circuit) ในการวัดโดยเกจตัวต้านทานทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของมันไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึงส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.18 Strain Gauge Load cell

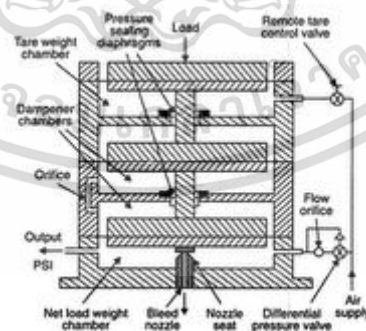
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic Load Cell) ลักษณะของการทำงานก็คือจะวัดน้ำหนักจากการเปลี่ยนแปลงความดันของของเหลวภายในระบบเมื่อมีแรงกระทำที่แท่นรับน้ำหนัก ในโหลดเซลล์แบบไฮดรอลิกที่มีแผ่นไดอะแฟรม โดยแรงจะถูกส่งผ่านลูกสูบเป็นผลให้ของเหลวภายในช่องแผ่นไดอะแฟรมถูกกดอัด ซึ่งการวัดแรงที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้จากความดันของของเหลวความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับแรงดันของของเหลวนี้ มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นและไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณของของเหลวในกระบอกสูบโดยปกติโหลดเซลล์แบบนี้จะความแม่นยำ (Accuracy) ในการวัดอยู่ที่ประมาณ 0.3 % ที่ Full Scale ซึ่งระดับความแม่นยำนี้ก็เป็นที่ยอมรับได้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป



รูปที่ 2.19 Hydraulic Load Cell

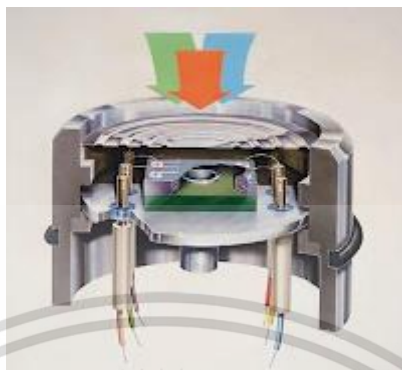
- โหลดเซลล์แบบนิวเมติก (Pneumatic Load cell) ซึ่งจะทำงานโดยใช้หลักการสมดุลแรง เช่นเดียวกับแบบไฮดรอลิก แต่ต่างกันที่โหลดเซลล์แบบนี้จะมีความแม่นยำกว่าแบบไฮดรอลิก เพราะว่ามีการใช้ช่องว่างหลายช่อง ในการหน่วยความดันของของเหลวเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน โหลดเซลล์แบบนี้ มักจะใช้วัดสิ่งของที่มีน้ำหนักไม่มากนักในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความสะอาดและความปลอดภัยสูง



รูปที่ 2.20 Pneumatic Load cell

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไพโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive) ซึ่งมีการทำงานเหมือนกับเกจวัดความเครียด แต่ไพโซรีซิสทีฟสามารถผลิตสัญญาณออกมาได้ในระดับสูงจึงเหมาะสำหรับ เครื่องชั่งน้ำหนักที่ไม่ซับซ้อนในการวัดเนื่องจากสามารถต่อเข้าโดยตรงกับส่วนแสดงผล



รูปที่ 2.21 Piezoresistive

- แมกเนโตสเตร็กทีฟ (Magnetostrictive) การทำงานของเซนเซอร์แบบนี้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงในการแผ่สัญญาณแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่อยู่ภายใต้แรงที่มากระทำแรงทำให้เกิดการผิดรูปของสนามแม่เหล็กและจะเกิดสัญญาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อแรงที่มากระทำ ซึ่งจะใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กนั่นเองครับ โดยอุปกรณ์ลักษณะนี้จะตรวจวัดการเคลื่อนที่ของแกนแม่เหล็ก และวัดการเหนี่ยวนำของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.22 Magnetostrictive

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.12 เซนเซอร์แสง (Optical Sensor)

เซนเซอร์แสง (Optical Sensor) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือการนำไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมันได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบ มีหลายชนิดดังนี้

#### - LDR

ตัวต้านทานแปรค่าตามแสง หรือ LDR (Light Dependent Resistor) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตรวจจับแสง โดยหากมีแสงมาตกกระทบน้อย จะทำให้มีความต้านทานมาก และหากมีแสงมาตกกระทบมาก ความต้านทานจะน้อยลง

#### - Photo Diode

โฟโตไดโอด (Photo Diode) จะถูกแบ่งออกเป็นอีก 2 ชนิด คือ

- ตอบสนองต่อแสงที่สามารถมองเห็นได้

- ตอบสนองต่อแสงความถี่สูงย่านอินฟราเรด

หลักการทำงานคือ เมื่อมีแสงมีตกกระทบมาก จะทำให้สามารถนำกระแสได้มาก หากมีแสงมาตกกระทบน้อยจนถึงจุดจุดหนึ่ง จะไม่นำกระแสเลย การนำโฟโตไดโอดไปใช้งาน จะต้องต่อในลักษณะไบอัสกลับ จึงจะสามารถใช้งาน

#### - Photo Transistors

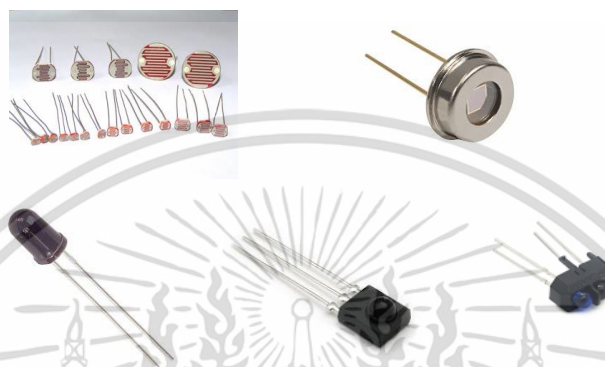
โฟโตทรานซิสเตอร์ (Photo Transistors) แบ่งเป็น 2 ชนิดเช่นเดียวกับโฟโตไดโอด ลักษณะภายนอกคล้ายๆกับโฟโตไดโอด การใช้งานก็เช่นเดียวกันจำเป็นต้องดู Datasheet ประกอบการใช้งาน

#### - IR Sensor

IR Sensor คืออุปกรณ์ที่นำโฟโตไดโอด หรือโฟโตทรานซิสเตอร์ มารวมเข้ากับวงจรควบคุมภายใน เพื่อใช้สำหรับความถี่สูงโดยเฉพาะ IR Sensor นั้น จะตอบสนองกับแสงอินฟราเรดเท่านั้น ใช้งานร่วมกับ LED อินฟราเรด นิยมใช้ส่งข้อมูลที่อยู่ในระยะไกล เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้งาน IR Sensor เช่น ทรานซิสเตอร์ เครื่องเล่น DVD วิทยุในรถยนต์ และกล้องรับดาวเทียม เป็นต้น

- Reflective Optical Sensor

คืออุปกรณ์ที่นำโฟโตทรานซิสเตอร์ หรือโฟโตไดโอด มารวมกับ LED อินฟราเรด เพื่อใช้ในการตรวจจับการสะท้อนแสง หรือระยะความใกล้ของวัตถุ หลักการคือเมื่อมีแสงไปตกกระทบกับวัตถุใด ๆ วัตถุนั้นจะสะท้อนแสงกลับมาที่โฟโตไดโอดหรือโฟโตทรานซิสเตอร์ ตัวอย่างที่นำไปใช้งานจริงก็เช่น หุ่นยนต์วิ่งตามเส้น



รูปที่ 2.23 เซนเซอร์แสงชนิดต่าง ๆ

### 2.2.13 The Tuning Fork Sensor

The Tuning Fork Sensor ถูกออกแบบมาเพื่อการทำงานสำหรับแก๊สและของเหลว โดยการทำงานของ The Tuning Fork Sensor เมื่อถูกปกคลุมไปด้วยของเหลวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่จากน้ำหนักที่ซึ่งโดยการแปลงสัญญาณความถี่เป็นสัญญาณไฟฟ้า ส่วนใหญ่เซนเซอร์ชนิดนี้ใช้งานกับของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบ่อยครั้ง

The Tuning Fork Sensor สามารถตรวจจับวัสดุในสถานะแก๊สและของเหลว เซนเซอร์ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ  $-10^{\circ}\text{C}$  ถึง  $60^{\circ}\text{C}$  และช่วงความชื้น 5-95% โดยไม่มีการควบแน่น การทำงานของเซนเซอร์อ้างอิงจากทฤษฎีการสั่นของโมเลกุลที่ดูดซับมาจากพื้นผิว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเซนเซอร์ส่งผลให้เกิดความถี่และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

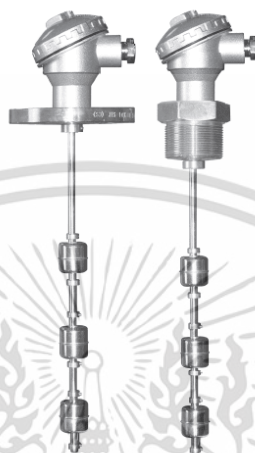


รูปที่ 2.24 The Tuning Fork Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.14 Level sensor

เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดระดับความสูงของของแข็งหรือของเหลวที่อยู่ในภาชนะ โดยการทำงานของเซนเซอร์คือเมื่อลูกลอยของเซนเซอร์เคลื่อนที่ เซนเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแล้วส่งค่าออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 2.25 Level sensor

### 2.2.15 โซลินอยด์วาล์ว

โซลินอยด์วาล์ว วาล์วควบคุมทิศทางลมโดยใช้คอยล์ไฟฟ้าสั่งการร่วมกับสปริงหรือคอยล์ไฟฟ้าอีกตัวเมื่อต้องการให้วาล์วอยู่อีกตำแหน่ง โซลินอยด์วาล์วประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับทำหน้าที่ปิดเปิดวาล์วเมื่อเปิดและปิดสวิตช์ เมื่อกระแสไหลผ่านขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะดูดเต็ยวาล์วเพื่อเปิดวาล์ว และเมื่อปิดสวิตซ์ตัดกระแสไฟฟ้าเต็ยวาล์วจะกลับไปสู่ตำแหน่งเดิม

โซลินอยด์วาล์วสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการเลื่อนวาล์วคือ 1. เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยสปริง (Single Solenoid Valve) และ 2. เลื่อนวาล์วด้วยโซลินอยด์วาล์วกลับด้วยโซลินอยด์วาล์ว (Double Solenoid Valve)

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทได้ตามการใช้งาน อาทิ โซลินอยด์วาล์วน้ำ, โซลินอยด์วาล์วแก๊ส, โซลินอยด์วาล์วไฮดรอลิก, โซลินอยด์วาล์วลม

คุณสมบัติของโซลินอยด์วาล์วลม คือวาล์วที่ควบคุมทิศทางลมด้วยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถควบคุมทิศทางลมได้ตามต้องการมีหลายแบบให้เลือกเช่น 2/2 , 3/2 , 5/2 way และ มีทั้งแบบ N/O ( Normal Open ) , N/C ( Normal Close ) สั่งการร่วมกับสปริงหรือคอยล์ไฟฟ้าอีกตัวเมื่อต้องการให้วาล์วอยู่อีกตำแหน่งโดยแบบ 2 ทางจะใช้กับงานลม แก๊สทั่วไป น้ำ และน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 Solenoid Valve

### 2.2.16 เช็ควาล์วลม

เช็ควาล์วลม (Pneumatic Check Valve) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบคุมทิศทางการไหลและอัตราการไหลของแรงดันลมให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับ โดยปัจจุบันเช็ควาล์วลมที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปจะมีหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้งาน เช่น เช็ควาล์วสปริง ฟุตวาล์วสปริง และเช็ควาล์วบีบลมสามทาง ซึ่งแต่ละแบบผลิตจากวัสดุทองเหลืองหรือสแตนเลสที่มีความแข็งแรงทนทาน ไม่เป็นสนิม ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี และยังประหยัดพื้นที่การติดตั้งภายในท่อ ดังนั้นจึงมักนิยมนำเช็ควาล์วลมมาใช้งานเครื่องดูดสูญญากาศ, ท่อไอน้ำ, ระบบ HVAC, บีบแรงดัน, หม้อไอน้ำ และอีกมากมาย



รูปที่ 2.27 Pneumatic Check Valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

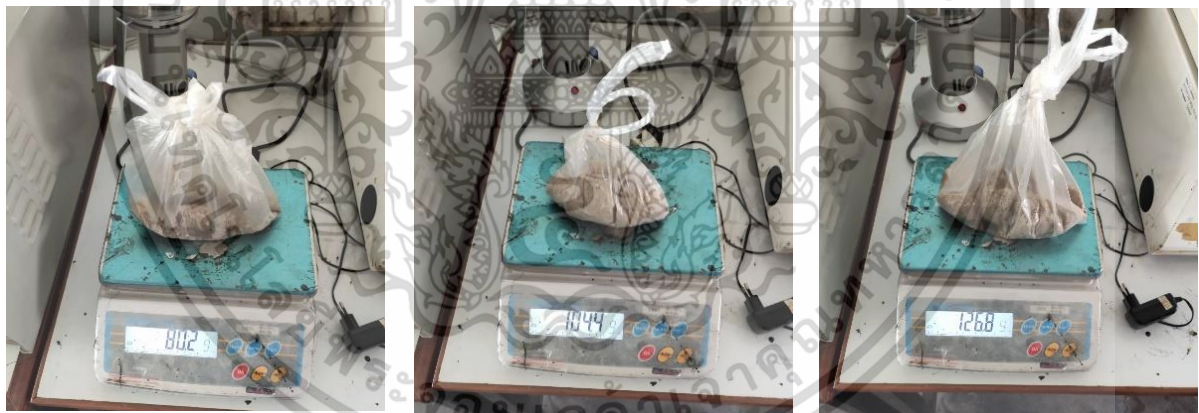
## บทที่ 3

### การคำนวณและการออกแบบ

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณและการออกแบบระบบสำหรับการขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล โดยแนวคิดในการออกแบบระบบจะประกอบด้วยถังพักเชื้อเพลิง (hopper) วาล์ว (valve) ท่อสำหรับขนส่ง และพัดลมเป่าอากาศ มาประยุกต์รวมกันในการออกแบบระบบนี้ เพื่อการลำเลียงเชื้อเพลิงในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

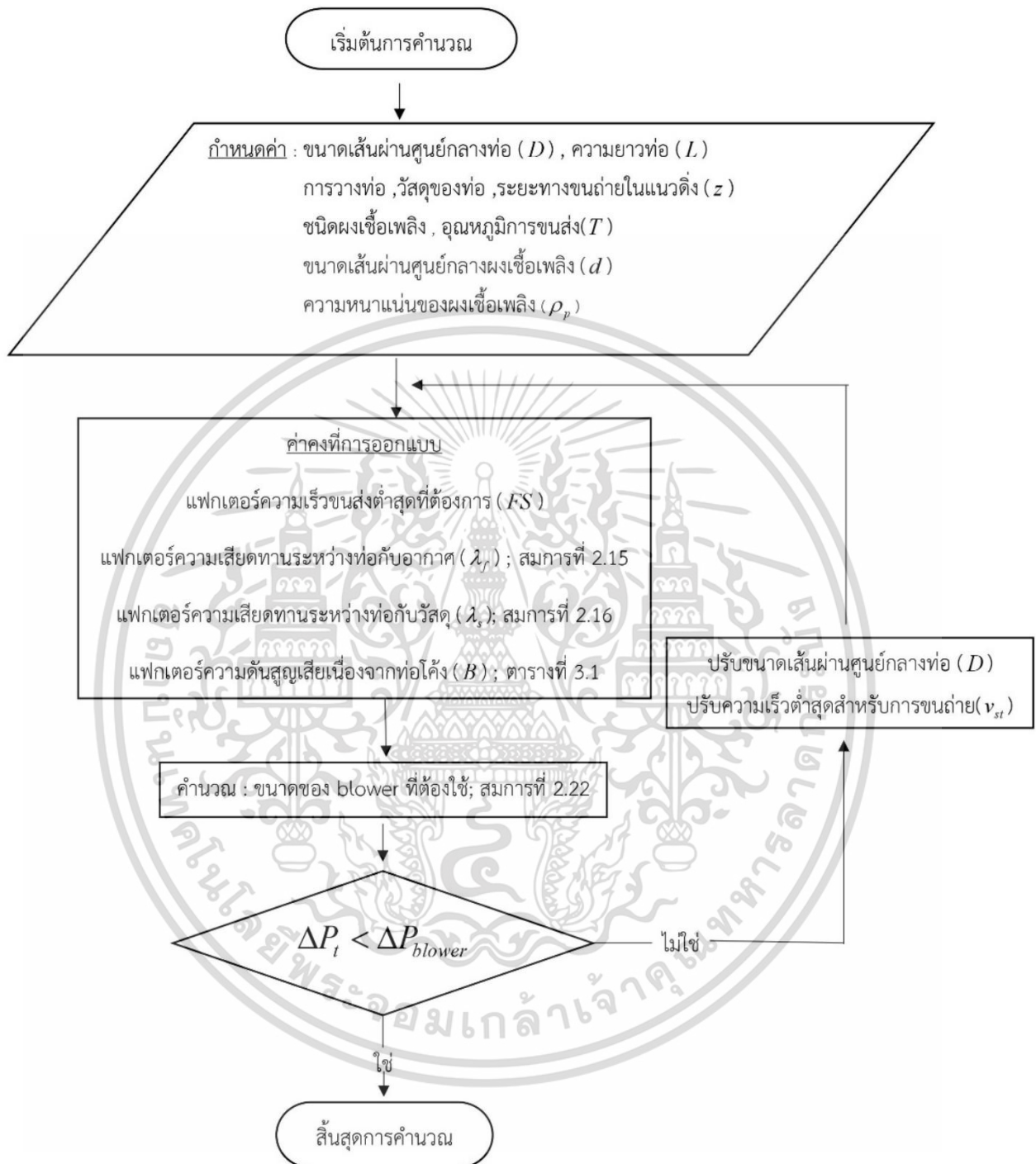
#### 3.1 การคำนวณอัตราการขนส่งเชื้อเพลิง

จากการทดลองวัดปริมาณเชื้อเพลิงที่ตกลงมาในถังพักเชื้อเพลิงในครึ่งชั่วโมงได้ปริมาณดังรูป ซึ่งได้ปริมาณเชื้อเพลิงเฉลี่ย 0.208 kg/h ระบบโดยรวมจะทำงานทุก 5 ชั่วโมงจึงมีปริมาณเชื้อเพลิงในถังพักประมาณ 1.038 kg จากการทดลองระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลมจะแบ่งการทำงานหลายครั้งให้ขนส่งเชื้อเพลิงครั้งละไม่เกิน 0.104 kg เพื่อป้องกันการติดค้างภายในถังกักเก็บเชื้อเพลิงได้อัตราการขนส่งเชื้อเพลิง  $1.73 \times 10^{-3}$  kg/s



รูปที่ 3.1 แสดงการวัดน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ตกลงมาในครึ่งชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อออกแบบขนาดพัดลมเป่าอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิง

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนส่งมีค่า 2.54 mm ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงมีค่า 407.8 kg/m<sup>3</sup> ความหนาแน่นของอากาศมีค่า 1.2 kg/m<sup>3</sup> อัตราการขนส่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.73×10<sup>-3</sup> kg/s ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.81 m/s<sup>2</sup> และเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 0.01 mm ความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิงสามารถคำนวณสมการของ Matsumoto ได้จากสมการที่ 2.5 และสมการที่ 2.7 [11]

$$d^* = 1.39D \left( \frac{\rho_p}{\rho} \right)^{-0.74}$$

$$d^* = 1.39(25.4) \left( \frac{407.8}{1.2} \right)^{-0.74}$$

$$d^* = 0.47 \text{ mm}$$

คิดกรณี  $d < d^*$  เนื่องจาก  $d$  มีค่า 0.01 mm

$$\mu = \frac{m_s}{\rho A v_{st}} = 5560 \left( \frac{d}{D} \right)^{1.43} \left( \frac{v_{st}}{10\sqrt{gD}} \right)^{3.61}$$

$$\frac{1.73 \times 10^{-3}}{1.2 \times \pi \times \left( \frac{25.4 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 v_{st}} = 5560 \left( \frac{0.01}{25.4} \right)^{1.43} \left( \frac{v_{st}}{10\sqrt{9.81 \times 25.4 \times 10^{-3}}} \right)^{3.61}$$

$$v_{st} = 7.76 \text{ m/s}$$

คำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิงจากสมการของ Schade จากสมการที่ 2.8

$$\frac{v_{st}}{\sqrt{gD}} = \mu^{0.11} \left( \frac{D}{d} \right)^{0.025} \left( \frac{\rho_p}{\rho} \right)^{0.34} = \left( \frac{m_s}{\rho A v_{st}} \right)^{0.11} \left( \frac{D}{d} \right)^{0.025} \left( \frac{\rho_p}{\rho} \right)^{0.34}$$

$$\frac{v_{st}}{\sqrt{9.81 \times 25.4 \times 10^{-3}}} = \left( \frac{1.73 \times 10^{-3}}{1.2 \times \pi \times \left( \frac{25.4 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 v_{st}} \right)^{0.11} \left( \frac{25.4}{0.01} \right)^{0.025} \left( \frac{407.8}{1.2} \right)^{0.34}$$

$$v_{st} = 4.2 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิงจากสมการของ Rizk โดยจะใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงในหน่วยมิลลิเมตรแทนในสมการที่ 2.4

$$\delta = 1.44d + 1.96$$

$$\delta = 1.44(0.01) + 1.96$$

$$\delta = 1.9744$$

$$\chi = 1.1d + 2.5$$

$$\chi = 1.1(0.01) + 2.5$$

$$\chi = 2.511$$

$$\mu = \left( \frac{1}{10^\delta} \right) \left( \frac{v_{st}}{\sqrt{gD}} \right)^\chi$$

$$\frac{1.73 \times 10^{-3}}{1.2 \times \pi \times \left( \frac{25.4 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 v_{st}} = \left( \frac{1}{10^{1.9744}} \right) \left( \frac{v_{st}}{\sqrt{9.81 \times 25.4 \times 10^{-3}}} \right)^{2.511}$$

$$v_{st} = 3 \text{ m/s}$$

จากการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดในการขนส่งเชื้อเพลิงภายในท่อโดยใช้การเปรียบเทียบจากสมการของ Matsumoto [3], Schade [8] และ Rizk [4] เลือกค่าความเร็วของสมการ Matsumoto เนื่องจากให้ค่าความเร็วมากที่สุด ได้ค่าความเร็วลมที่ 7.76 m/s ใช้ค่าความปลอดภัยในการใช้งานจริงตามมาตรฐานเท่ากับ 2 จึงได้ค่าความเร็วในการขนส่งเชื้อเพลิง 15.52 m/s ในการขนส่งแบบเบาบางในท่อขนาด 1 นิ้ว

### 3.3 การคำนวณหาความดันสูญเสีย

การหาค่าความดันสูญเสียในระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวลจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนประกอบดังนี้

#### 3.3.1. ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง

ขณะที่วัสดุถูกบรรจุไว้ในสภาพนิ่ง เมื่อถูกจ่ายเข้าไปในระบบขนส่งเชื้อเพลิงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมอย่างทันทีเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้ในความเร็วที่กำหนดไว้ ทำให้เกิดความดันสูญเสียขึ้นจากเชื้อเพลิงในระบบและอากาศ โดยมีค่าความหนาแน่นของอากาศในระบบหาได้จากค่าความดันในระบบซึ่งมีค่า 101.77 kPa มีอุณหภูมิในระบบประมาณ 35 องศาเซลเซียส ความเร็วขนถ่ายวัสดุเท่ากับ 15.52 m/s ค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศมีค่า 0.18 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วเชื้อเพลิงเท่ากับ 15.44 m/s จึงสามารถคำนวณความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่งได้จากสมการที่ 2.13 [5]

$$\rho_f = \frac{P}{RT}$$

$$\rho_f = \frac{101.77}{0.287 \times (273 + 35)}$$

$$\rho_f = 1.15 \text{ kg/m}^3$$

$$\Delta P_a = \rho_f v^2 \left( 0.5 + \frac{\mu v_s}{v} \right)$$

$$\Delta P_a = 1.15 \times 15.52^2 \left( 0.5 + \frac{0.18 \times 15.44}{15.52} \right)$$

$$\Delta P_a = 0.19 \text{ kPa}$$

### 3.3.2 ความดันสูญเสียเนื่องจากการชนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง

การขนส่งวัสดุขึ้นในแนวตั้งทำให้มีการทำให้เกิดความดันสูญเสียตามแรงโน้มถ่วง โดยมีค่าอัตราการชนถ่ายวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ 0.18 ความหนาแน่นของอากาศในระบบมีค่า 1.15 kg/m<sup>3</sup> ระยะทางการขนส่งเชื้อเพลิงในแนวตั้งเท่ากับ 2.05 m ความเร็วชนถ่ายวัสดุเท่ากับ 15.52 m/s และความเร็วเชื้อเพลิงเท่ากับ 15.44 m/s จึงสามารถคำนวณความดันสูญเสียเนื่องจากการชนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง ได้จากสมการที่ 2.15 [1]

$$\Delta P_z = \frac{\mu \rho_f g z v}{v_s}$$

$$\Delta P_z = \frac{0.18 \times 1.15 \times 9.81 \times 2.05 \times 15.52}{15.44}$$

$$\Delta P_z = 0.004 \text{ kPa}$$

### 3.3.3 ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ

ก่อนจะหาค่าแฟกเตอร์สำหรับการหาความดันสูญเสีย จำเป็นต้องรู้ค่าความเร็วในการตกอิสระของเชื้อเพลิง โดยมีอุณหภูมิในระบบ 308 K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 25.4 mm ค่าความหนาแน่นของอากาศในระบบ 1.15 kg/m<sup>3</sup> และความหนาแน่นของเชื้อเพลิง 407.8 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งคำนวณหาค่าความเร็วในการตกอิสระของเชื้อเพลิงจากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3

$$\eta = 1.783 \times 10^{-5} \left( \frac{T}{288} \right)^{0.77}$$

$$\eta = 1.783 \times 10^{-5} \left( \frac{273 + 35}{288} \right)^{0.77}$$

$$\eta = 1.8776 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{sec}$$

$$U_{fo} = \frac{gd^2(\rho_p - \rho_f)}{18\eta}$$

$$U_{fo} = \frac{9.81 \times (0.01 \times 10^{-3})^2 (407.8 - 1.15)}{18(1.8776 \times 10^{-5})}$$

$$U_{fo} = 1.18 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

การหาค่าความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อนั้นมีแฟกเตอร์ที่จำเป็นต้องรู้ค่าก่อนหาค่าความดันอยู่ 2 ค่าคือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อกับอากาศและสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อกับเชื้อเพลิง โดยมีความเร็วการขนส่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 15.52 m/s และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชื้อเพลิง 0.01 mm เพื่อหาค่าฟรูดนัมเบอร์ ( Froude number ) และฟรูดนัมเบอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วในการตกอิสระของเชื้อเพลิงสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจากสมการที่ 2.20 และสมการที่ 2.21 [16]

$$F_r = \frac{v^2}{gD}$$

$$F_r = \frac{15.52^2}{9.81 \times 25.4 \times 10^{-3}}$$

$$F_r = 967$$

$$F_{rp} = \frac{U_{fo}^2}{gd}$$

$$F_{rp} = \frac{(1.18 \times 10^{-3})^2}{9.81 \times 0.01 \times 10^{-3}}$$

$$F_{rp} = 0.0142$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 0.01 mm จึงเลือกใช้สมการสำหรับกรณีวัสดุมีขนาด  $d < 0.5$  mm โดยค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่ากับ 0.18 หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อกับเชื้อเพลิงจากสมการที่ 2.18

$$\lambda_s = \frac{2.1F_p^{0.25}}{\mu^{0.3}F_r} \left( \frac{D}{d} \right)^{0.1}$$

$$\lambda_s = \frac{2.1 \times 0.0142^{0.25}}{0.18^{0.3} \times 967} \left( \frac{25.4}{0.01} \right)^{0.1}$$

$$\lambda_s = 2.7 \times 10^{-3}$$

ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ( Reynold number ) สำหรับการขนส่งเชื้อเพลิงเท่ากับ 34314 หาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างท่อกับอากาศจากสมการที่ 2.17

$$\lambda_f = \frac{0.316}{R_e^{0.25}}$$

$$\lambda_f = \frac{0.316}{34314^{0.25}}$$

$$\lambda_f = 0.0232$$

สำหรับการหาค่าความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ มีความหนาแน่นของอากาศในระบบเท่ากับ  $1.15 \text{ kg/m}^3$  ความยาวของท่อสำหรับขนส่งเท่ากับ 6 m ความเร็วในการขนส่งเชื้อเพลิงเท่ากับ  $15.52 \text{ m/s}$  จะหาค่าความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อจากสมการที่ 2.16

$$\Delta P_L = \frac{\rho_f L v^2}{2D} (\lambda_f + \mu \lambda_s)$$

$$\Delta P_L = \frac{1.15 \times 6 \times 15.52^2}{2 \times 25.4 \times 10^{-3}} (0.0232 + 0.18 \times 2.7 \times 10^{-3})$$

$$\Delta P_L = 0.78 \text{ kPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 ความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง

ในขณะที่เชื้อเพลิงและอากาศไหลผ่านท่อโค้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลทันที เป็นผลทำให้ความเร็วของเชื้อเพลิงและอากาศลดลง จึงทำให้เกิดความดันสูญเสียในระบบเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง

ตารางที่ 3.1 สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียของท่อโค้ง[1]

อัตราส่วนรัศมีมีความโค้งกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโค้ง	B
2	1.5
4	0.75
>6	0.5

จากตารางที่ 3.1 เนื่องจากอัตราส่วนรัศมีมีความโค้งกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโค้งมีมากกว่า 6 จึงได้ค่าสัมประสิทธิ์ความดันสูญเสียของท่อโค้งเท่ากับ 0.5 และท่อโค้งในระบบจำนวน 5 ท่อ หากค่าความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้งได้จากสมการที่ 2.22

$$\Delta P_b = \frac{NB\rho_f v^2}{2}(1+\mu)$$

$$\Delta P_b = \frac{5 \times 0.5 \times 1.15 \times 15.52^2}{2}(1+0.18)$$

$$\Delta P_b = 0.41 \text{ kPa}$$

### 3.3.5 ความดันสูญเสียรวม

ความดันสูญเสียทั้งหมดหาได้จากการรวมกันของความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง , ความดันสูญเสียเนื่องจากการชนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง , ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อและความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง โดยความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่งมีค่าเท่ากับ 0.19 kPa ความดันสูญเสียเนื่องจากการชนถ่ายวัสดุในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.004 kPa ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อมมีค่าเท่ากับ 0.78 kPa และความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้งมีค่าเท่ากับ 0.41 kPa ความดันสูญเสียรวมสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.23

$$\Delta P_t = \Delta P_a + \Delta P_z + \Delta P_L + \Delta P_b$$

$$\Delta P_t = 0.19 + 0.004 + 0.78 + 0.41$$

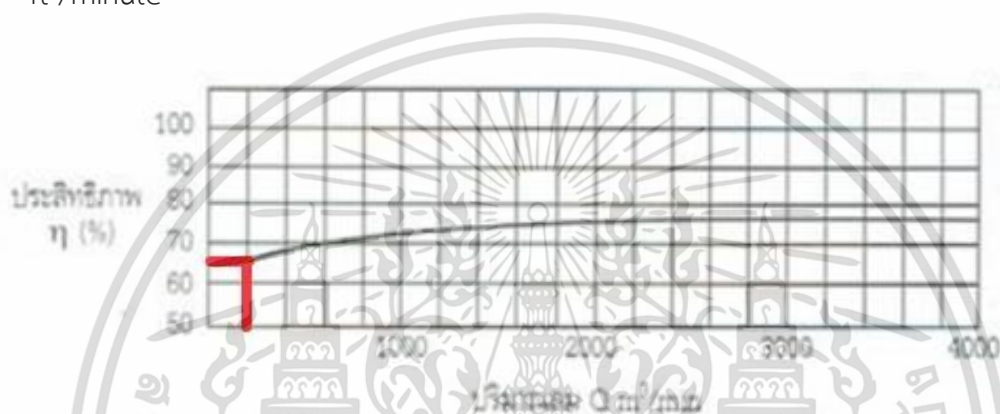
$$\Delta P_t = 1.38 \text{ kPa}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีได้ค่าความดันสูญเสียรวมเท่ากับ 1.38 kPa และได้ค่าจากการทดลองในถังขนาด 20 ลิตรได้ค่าความดันสูญเสียเท่ากับ 2.47 kPa

### 3.4 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของพัดลมเป่าอากาศ

ความดันสูญเสียรวมภายในระบบทั้งหมดคือ  $\Delta P_t$  ซึ่งเท่ากับ 2.47 kPa หรือ 9.9 inH<sub>2</sub>O แต่การใช้งานจริงในระบบนั้นต้องใช้ในขนาดที่มากกว่าจึงใช้ค่าความปลอดภัยเท่ากับ 1.5 ดังนั้นความดันสูญเสียรวมในระบบเท่ากับ 14.85 inH<sub>2</sub>O อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศเท่ากับ 16.66 ft<sup>3</sup>/minute



รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและปริมาณลม

จากรูปที่ 3.3 ปริมาณลมของระบบมีค่าน้อยกว่าช่วงในกราฟจึงเลือกใช้ค่าประสิทธิภาพที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งเท่ากับ 0.65 และขนาดมอเตอร์ของพัดลมสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.24

$$BHP = \frac{CFM \Delta P}{6356 \eta}$$

$$BHP = \frac{16.66 \times 14.85}{6356 \times 0.65}$$

$$BHP = 0.060 \text{ HP}$$

$$BHP = 45 \text{ watt}$$

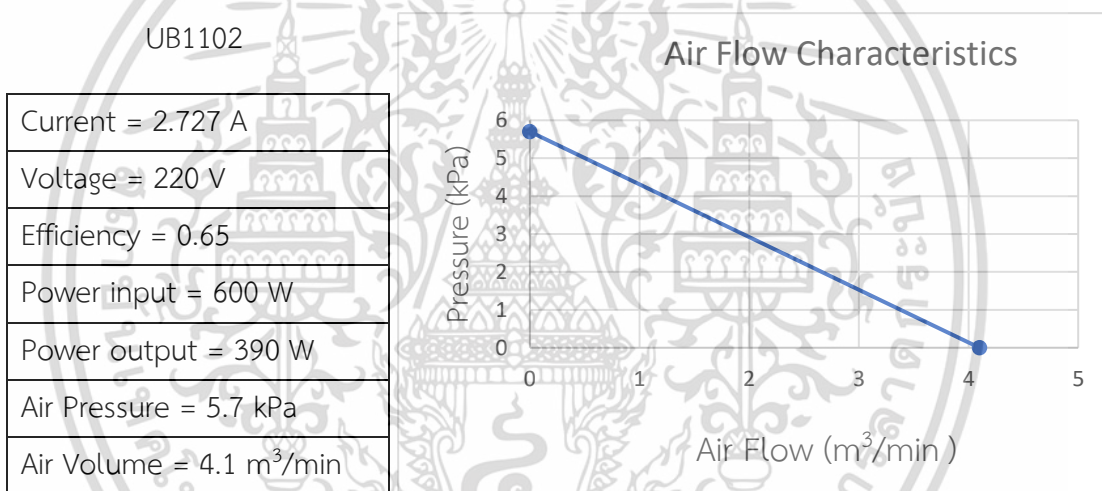
จากการคำนวณขนาดมอเตอร์ของตัวต้นกำเนิดลมได้ค่า 45 watt ดังนั้นขนาดมอเตอร์ที่เลือกใช้ต้องมีขนาดมากกว่า 45 watt ซึ่งในตลาดมีตัวเลือกดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

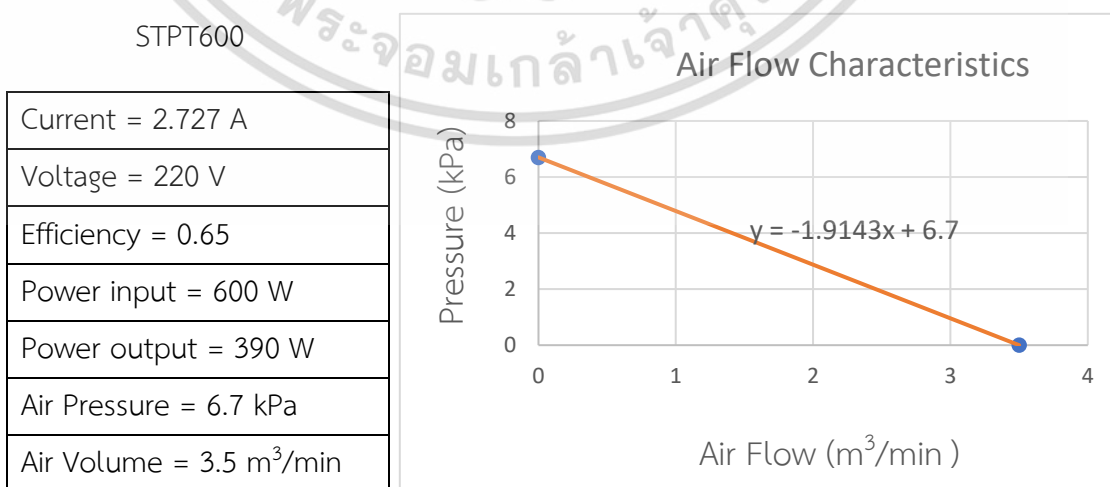
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของพัดลมเป่าอากาศที่นำมาเปรียบเทียบ

ชื่อรุ่น	Max air volume(m <sup>3</sup> /min)	Power input(watt)
STPT600	3.5	600
UB1102	4.1	600
BDB600	5	600

จากตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบดังกล่าวจึงเลือกใช้พัดลมเป่าอากาศรุ่น STPT600 เนื่องจากมีกำลังเพียงพอ เลือกความเร็วได้หลายค่าและมีราคาสมเหตุสมผล ซึ่งการที่ปรับความเร็วได้ทำให้สามารถเลือกค่าความเร็วที่เหมาะสมที่สุดต่อการทดลอง จะได้ข้อมูลทางเทคนิคของพัดลมเป่าอากาศแต่ละชนิด สามารถวาดความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาณลมในระบบแต่ละชนิดได้ดังรูปที่ 3.4 รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 และมีการเปรียบเทียบพัดลมเป่าอากาศแต่ละชนิดดังรูปที่ 3.7

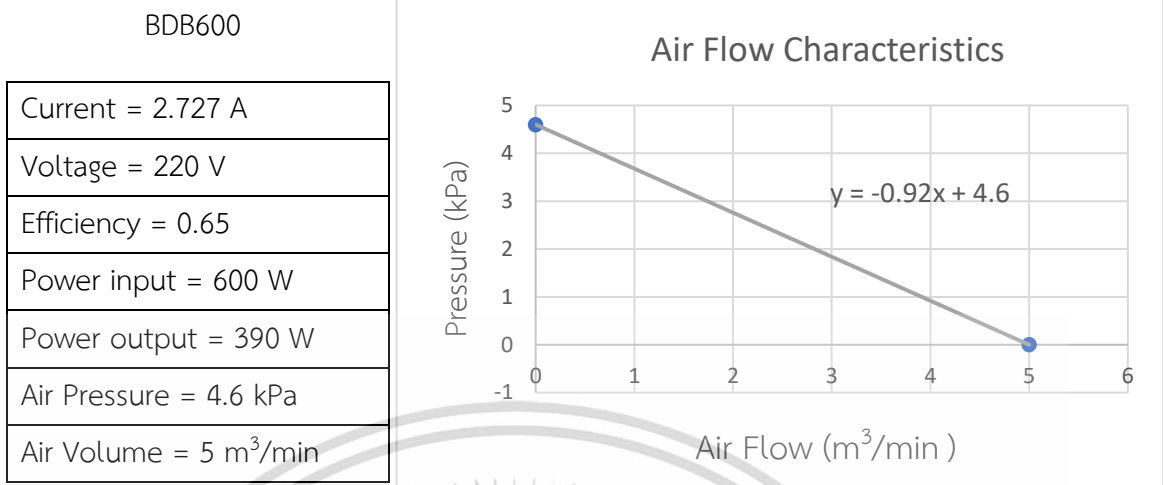


รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณลมของพัดลมเป่าอากาศ UB1102

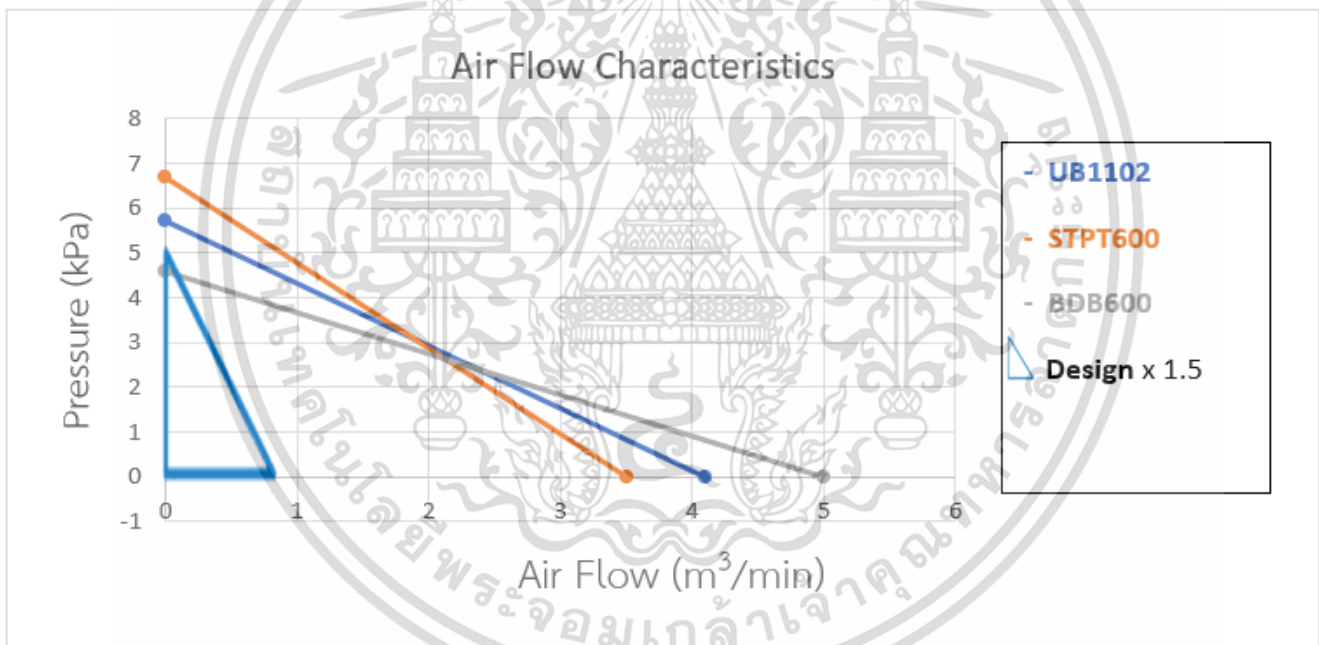


รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณลมของพัดลมเป่าอากาศ STPT600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาณลมของพัดลมเป่าอากาศแต่ละชนิด



รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบกราฟการทำงานของพัดลมเป่าอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สรุปผลการคำนวณเพื่อออกแบบขนาดของพัดลมเป่าอากาศ

Parameter	Symbol	Value	Unit
<b>การคำนวณความเร็วในการขนส่งเชื้อเพลิง</b>			
Fuel density	$\rho_p$	407.8	kg/m <sup>3</sup>
Air density	$\rho$	1.2	kg/m <sup>3</sup>
อัตราการขนถ่าย	$m_s$	6.23	kg/h
อัตราการขนถ่ายวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ	$\mu$	0.18	
Diameter ของเชื้อเพลิง	$d$	0.01	mm
Diameter ของท่อ	$D$	25.4	mm
ความเร็วต่ำสุดในการขนส่ง	$v_{st}$	7.76	m/s
ความเร็วในการขนส่ง	$v$	<b>15.52</b>	m/s
<b>การคำนวณหาความดันสูญเสีย</b>			
ความดันที่ปลายท่อ	$P$	101.77	kPa
ความเร็วของเชื้อเพลิง	$v_s$	15.44	m/s
Air density ในระบบ	$\rho_f$	1.15	kg/m <sup>3</sup>
ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง	$\Delta P_a$	0.19	kPa
ระยะทางขนถ่ายในแนวตั้ง	$z$	2.05	m
ความดันสูญเสียเนื่องจากการขนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง	$\Delta P_z$	0.004	kPa
ความยาวของท่อ	$L$	6	m
Froude number	$F_r$	967	
Froude number ของความเร็วในการตกอิสระของวัสดุ	$F_{rp}$	0.0142	
ความเร็วในการตกอิสระของวัสดุ	$U_{fo}$	$1.18 \times 10^{-3}$	m/s
แฟกเตอร์ความเสียดทานระหว่างท่อกับวัสดุ	$\lambda_s$	$2.7 \times 10^{-3}$	
Reynold number	$R_e$	34314	
แฟกเตอร์ความเสียดทานระหว่างท่อกับอากาศ	$\lambda_f$	0.0232	
ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ	$\Delta P_L$	0.78	kPa
จำนวนท่อโค้งในระบบ	$N$	5	
แฟกเตอร์ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อโค้ง	$B$	0.5	
ความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง	$\Delta P_b$	0.41	kPa
ความดันสูญเสียรวม	$\Delta P_t$	<b>2.47</b>	kPa
		<b>9.9</b>	inH <sub>2</sub> O
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	<b>CFM</b>	16.66	ft <sup>3</sup> /minute

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของพัดลม	$\eta$	0.65	
ขนาดมอเตอร์ของพัดลม	BHP	0.06	HP
		45	watt

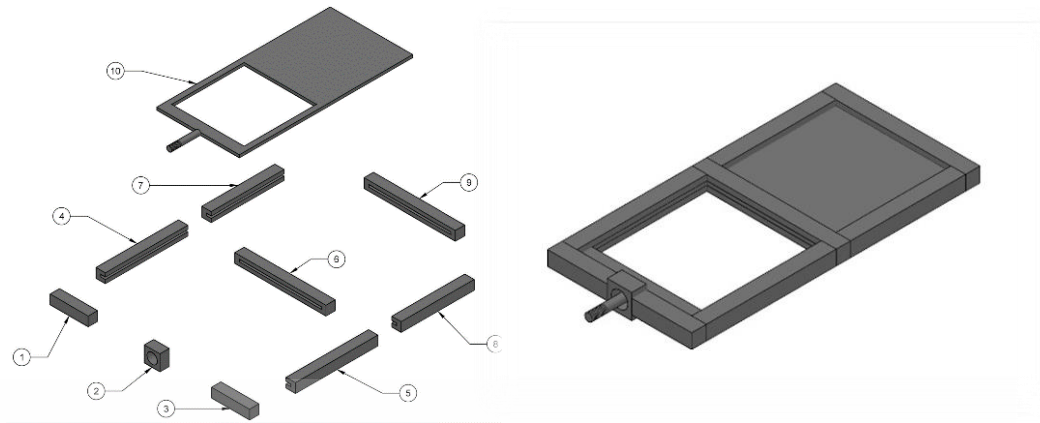
### 3.5 การออกแบบระบบวาล์ว

การเลือกใช้นาฬวาล์วเลือกโดยการออกแบบควบคุมกับถังเก็บเชื้อเพลิงเพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการขนส่งเชื้อเพลิงและให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ที่ใช้ติดตั้ง การเลือกตำแหน่งที่ติดตั้งเลือกโดยเลือกตำแหน่งด้านบนถังพักเชื้อเพลิงที่ออกแบบเพื่อให้ลมหมุนวนไปตามท่อที่ขนส่งเชื้อเพลิงได้ทางเดียวโดยที่ไม่มีลมรั่วไหลไปด้านที่ติดวาล์วไว้ ซึ่งเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวาล์วแต่ละชนิดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ข้อดีและข้อเสียของวาล์วที่นำมาเปรียบเทียบ

ประเภทของวาล์ว	ข้อดี	ข้อเสีย
Slide valve	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ออกแบบได้ง่าย และประหยัดงบประมาณการสร้ง</li> <li>- ขณะปิด สามารถปิดได้สนิทไม่มีอากาศไหลออก</li> <li>- ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย</li> <li>- บำรุงรักษาได้ง่าย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ระบบไม่สามารถทำงานเป็นระบบอัตโนมัติเองได้ ต้องใช้ระบบอื่นช่วย</li> <li>- ใช้ได้แค่เปิด-ปิดเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้</li> </ul>
Rotary valve	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถควบคุมอัตราการไหลได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ออกแบบได้ยาก และมีค่าใช้จ่ายในการสร้งสูง</li> <li>- ไม่สามารถปิดการไหลของอากาศได้สนิทเท่ากับเกทวาล์ว</li> <li>- ใช้พื้นที่การติดตั้งมาก</li> </ul>

จากตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบดังกล่าว จึงเลือกวาล์วประเภท slide valve เนื่องจากระบบที่ออกแบบนั้นไม่ต้องการให้อากาศไหลย้อนกลับไปและใช้พื้นที่จำกัด และข้อดีของ slide valve ยังเหมาะสมกับระบบที่ออกแบบและข้อเสียของ slide valve ไม่ส่งผลต่อระบบ ออกแบบได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.8 Slide valve ที่ออกแบบ

### 3.6 การออกแบบถังพักเชื้อเพลิง

ในการออกแบบถังพักเชื้อเพลิงในระบบควรพิจารณาเงื่อนไข 2 อย่างในการออกแบบ คือ มุมกองวัสดุ และปริมาตรสำหรับกักเก็บเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งของมุมกองวัสดุ

มวลของเชื้อเพลิงเมื่อถูกเทออกจากภาชนะก็จะเกิดการกองของเชื้อเพลิง มุมที่กองของเชื้อเพลิงกระทำกับพื้นราบ เรียกว่า มุมกองวัสดุ ( angle of repose ) โดยมุมกองวัสดุนี้ใช้ในการบอกคุณสมบัติการไหลของเชื้อเพลิงนี้ ใช้ในการคำนวณหาปริมาตรของวัสดุที่อยู่บนอุปกรณ์ขนส่ง และในถังเก็บเชื้อเพลิงด้วย เชื้อเพลิงที่ใช้ในระบบมีมุมกองวัสดุประมาณ 50 องศา ซึ่งค่ามุมกองวัสดุนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณปริมาตรของถังเก็บเชื้อเพลิงต่อไป [1] [14]

การออกแบบถังเก็บเชื้อเพลิงให้สามารถใช้งานระบบและมีปริมาตรเพียงพอสำหรับเก็บเชื้อเพลิงอย่างน้อย 1.038 kg เมื่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 407.8 kg/m<sup>3</sup> โดยรูปทรงต้องคำนึงถึงการกองของเชื้อเพลิงให้น้อยที่สุดและการไหลของอากาศในถังเก็บเชื้อเพลิง โดยมุมมองวัสดุจะพิจารณาจากมุมของเชื้อเพลิงในระบบมีค่าประมาณ 50 องศา จึงออกแบบความลาดเอียงของถังพักเป็นมุม 67 องศา

### 3.6.1 การคำนวณหาปริมาตรของถังเก็บเชื้อเพลิง

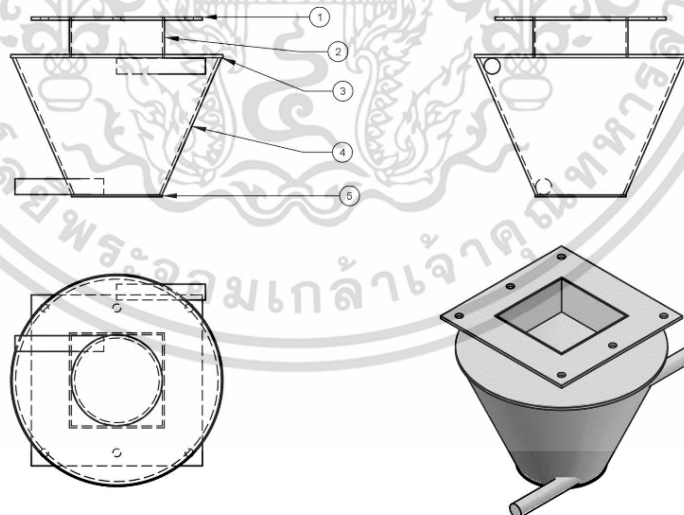
เมื่อความหนาแน่นของเชื้อเพลิงมีค่า 407.8 kg/m<sup>3</sup> น้ำหนักของเชื้อเพลิงในถังเก็บเชื้อเพลิงใน 5 ชั่วโมงประมาณ 1.038 kg สามารถหาปริมาตรของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{1.038}{407.8}$$

$$V = 2.55 \text{ dm}^3$$

ปริมาตรถังเก็บเชื้อเพลิงที่ควรใช้ต้องมากกว่า 2.55 dm<sup>3</sup> โดยถังเก็บเชื้อเพลิงที่ออกแบบมีปริมาตร 10 dm<sup>3</sup> ซึ่งเป็นผลดีในการเก็บและขนส่งเชื้อเพลิงเนื่องจากมีพื้นที่ให้ลมหมุนวนและขนส่งเชื้อเพลิงได้ดี



รูปที่ 3.10 ถังเก็บเชื้อเพลิงที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งเพิ่มเติม

#### 3.7.1 การเลือกใช้งานระหว่าง Microcontroller board กับ PLC

ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่าง Microcontroller board กับ PLC

ชนิดอุปกรณ์	ข้อดี	ข้อเสีย
PLC	- มีความเสถียร - ใช้งานง่ายโดยใช้ Ladder diagram - เชื่อมต่อไฟแบบขนาน	- ราคาแพง - ติดตั้งได้ยาก
Microcontroller	- ติดตั้งได้ง่าย - ราคาถูก	- ทำงานได้ไม่ดีในที่ที่มีความถี่รบกวน - เชื่อมไฟแบบอนุกรม

ถึงแม้ว่าระบบ PLC จะมีข้อดีที่มากกว่าแต่ระบบที่ทางกลุ่มโปรเจกต์นำไปติดตั้งเป็นระบบที่มีความถี่รบกวนในระบบน้อยมาก , มีพื้นที่ในการติดตั้งเพียงพอและการเขียนโปรแกรมลงในบอร์ดไม่ซับซ้อนมากจึงเลือกใช้ microcontroller ที่มีราคาถูกกว่าระบบ PLC ในการติดตั้ง

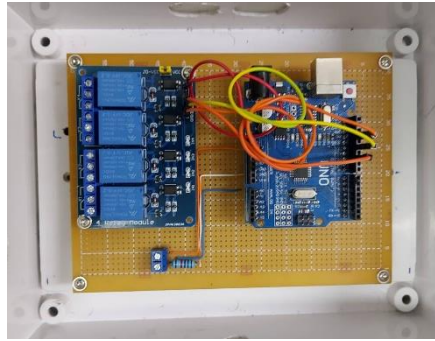
Microcontroller board ที่เลือกใช้คือ Arduino UNO R3 มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของ Arduino UNO R3

Microcontroller	ATmega328P
Operating voltage	5 V
Input voltage (recommended)	7-12 V
Input voltage (limit)	6-20 V
Digital I/O pins	14
PWM Digital I/O pins	6
Analog Input pins	6
DC Current per I/O pin	20 mA
DC Current for 3.3V pin	50 mA
Flash memory	32 KB(ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock speed	16 MHz
LED_BUITIN	13
Width	53.4 mm
Weight	25 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 Microcontroller ที่ติดตั้ง

```

system | Arduino 1.8.12 (Windows Store...
File Edit Sketch Tools Help
system $
int FSR_Pin = A0; //analog pin 0
#define A 12
#define B 10
int test;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A, OUTPUT);
  pinMode(B, OUTPUT);
  pinMode(A0, INPUT);
}

void loop() {
  int FSRReading = analogRead(FSR_Pin);
  Serial.println(FSRReading);
  delay(250);
  test=FSRReading;
  if (test >=205)
  {
    digitalWrite(A, HIGH);
    delay(5000);
    digitalWrite(A, LOW);
    delay(5000);
    digitalWrite(B, HIGH);
    delay(60000);
    digitalWrite(B, LOW);
    delay(5000);
  }
  test = 0;
}
29 Arduino Uno on COM7

```

รูปที่ 3.12 Code ที่ใช้กับ Microcontroller เพื่อให้ระบบทำงานแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เกี่ยวกับการแข่งขันเพื่อการแข่งขันเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เนื้อหาไปเผยแพร่ข้อมูลด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.2 การเลือกใช้เซนเซอร์

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบหลักการทำงานของเซนเซอร์แต่ละชนิด

ชนิดเซนเซอร์	การทำงาน
Load cell	แปลงค่าแรงกด แรงดึงที่กระทำบนตัว load cell เป็นสัญญาณไฟฟ้า
Optical Sensor	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน หรือการนำไฟฟ้า ที่ไหลผ่านตัวมันได้ เมื่อมีแสงมาตกกระทบ
Level sensor	เมื่อลูกลอยของเซนเซอร์เคลื่อนที่ เซนเซอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานแล้วส่งค่าออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า
The Tuning Fork Sensor	โมเลกุลดูดซับการสั่นจากพื้นผิวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของเซนเซอร์ส่งผลให้เกิดความถี่และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า

การทำงานของระบบที่นำเซนเซอร์ไปติดตั้งเป็นการลำเลียงฝุ่นขนาดเล็ก มีการฟุ้งกระจายและมีจำนวนไม่มากจึงเลือกใช้เซนเซอร์ชนิด Load cell

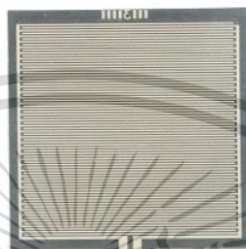
Load cell ที่เลือกใช้งานสำหรับระบบคือ Force Sensitive Resistor FSR - Square โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของ Force Sensitive Resistor FSR - Square

Dimensions	Overall length : 3.5" Overall width : 1.75" Sensing area : 1.75x1.5"
Thickness	0.45 mm
Trigger Force	20g, triggered (default resistance<200k $\Omega$ )
Pressure Measuring Range	20g~10kg
Static Pressure & Dynamic Pressure Measurement (within the frequency of 10Hz)	
Initial Resistance	>10M $\Omega$
Activation Time	<0.01S
Operating Temperature	-40 $^{\circ}$ C~+85 $^{\circ}$ C
Lifespan	>1 million times

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hysteresis	+10% , (RF+ -RF-)/FR+ , 1000 g Force
Response Time	<10 ms
EMI	Not generate
EDS	Not generate
Drift	<5% , 2.5Kg Force , Static load 24H



รูปที่ 3.13 Load cell ที่ใช้งานในระบบ

### 3.7.3 Relay module

Relay module ที่ใช้คือ 5V 4-Channel Relay โดยมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของ Relay module

controlled directly by Micro-controller	Arduino , 8051, AVR, PIC, DSP, ARM, ARM, MSP430, TTL logic
Driver Current	15-20mA
Equip with high-current relay	AC250V 10A ; DC30V 10A
Relay output status	Indication LED's

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.4 โซลินอยด์วาล์ว

ระบบที่ทำการติดตั้งมีการติดตั้ง Slide valve ซึ่งต้องใช้ลมในการทำงานของวาล์วในระบบ โดยมีขนาดท่อลมจากปั๊มลม 1/4 นิ้วและใช้ไฟ 220 โวลต์

โซลินอยด์วาล์วที่เลือกใช้คือ โซลินอยด์วาล์ว 5/2 1/4" 220 VAC เป็นโซลินอยด์วาล์ว 5/2 ทาง เป็นวาล์วควบคุมการไหลที่มี 5 port และมีการไหล 2 ทิศทาง ใช้กับท่อขนาด 1/4 นิ้ว ใช้ไฟ กระแสสลับ 220 โวลต์ในการทำงาน การทำงานของโซลินอยด์วาล์วควบคุมผ่าน Microcontroller เพื่อให้ระบบทำงานแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 3.14 Solenoid valve 5/2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.5 Pneumatic check valve

การทำงานของระบบลำเลียงเชื้อเพลิงไปห้องเผาไหม้มีการลำเลียงเชื้อเพลิงโดยใช้ลมจากพัดลมเป่าอากาศตัวอื่น การติดตั้งระบบลำเลียงลมเพิ่มจึงต้องเพิ่มวาล์วเข้าไปปิดในระบบเพื่อเป็นการไม่ไปรบกวนการเคลื่อนที่ของลมในระบบลำเลียงเชื้อเพลิงไปห้องเผาไหม้

Pneumatic check valve ที่เลือกใช้ติดตั้งบริเวณพัดลมเป่าอากาศคือ SPA AIR BLOWER CHECK VALVE 1.5 INCH SLIP / 2 INCH SPG 1/4 LB เป็นวาล์วที่สามารถติดตั้งกับท่อขนาด 1.5 นิ้วหรือ 2 นิ้วได้



รูปที่ 3.15 SPA AIR BLOWER CHECK VALVE 1.5 INCH SLIP / 2 INCH SPG 1/4 LB

เนื่องจากไม่มีการทดลองไม่ได้รวมความดันตกรวมของ check valve จึงอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของโบลเวอร์สู่ระบบ อย่างไรก็ตามจากการทดลองเบื้องต้นอัตราการไหลของอากาศก็ยังสามารถขนถ่ายเชื้อเพลิงไปยังถังเก็บได้ซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 5

## บทที่ 4

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 4.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทดสอบหาขีดจำกัดของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมวลของเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องกำเนิดลม
3. ทดสอบการทำงาน เพื่อหาตัวแปรควบคุมของมวลเชื้อเพลิงตั้งต้นและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องกำเนิดลมที่เหมาะสมกับระบบการขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม
4. เพื่อทดสอบการทำงานของระบบวาล์วที่ควบคุมด้วยลูกสูบลม
5. เพื่อทดสอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการสั่งงานระบบขนส่งวัสดุด้วยลมแบบอัตโนมัติ

### 4.2 แนวทางการทดลอง

1. ทดลองหามวลของเชื้อเพลิงที่ระบบสามารถขนส่งไปถึงกักเก็บได้โดยการกำหนดเวลาในการขนส่งให้คงที่แล้วเปลี่ยนค่ามวลของเชื้อเพลิงและความเร็วลม
2. ทดลองหาอัตราการไหลของเครื่องต้นกำเนิดลมที่เหมาะสมกับการทำงานโดยรวมของระบบ
3. ปรับรอบการทำงานของวาล์ว เครื่องต้นกำเนิดลม ให้ทำงานสัมพันธ์กันเป็นระบบโดยใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์

### 4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด
2. นาฬิกาจับเวลา
3. โบลเวอร์
4. โซลินอยด์วาล์ว
5. สไลด์วาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วาล์วกันกลับ
7. ถังกักเก็บฝุ่น
8. Thin Film Pressure Sensor
9. Arduino UNO R3 SMD (CH340G)
10. สายจัมเปอร์
11. สายพีวีซีใส่ลวด

#### 4.4 ขั้นตอนการทดลอง

##### 4.4.1 การทดลองหามวลตั้งต้นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม

1. ชั่งมวลของเชื้อเพลิงที่ค่าทดลองต่าง ๆ
2. บรรจุเชื้อเพลิงลงในถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper)
3. ติดตั้งท่อจากตัวต้นกำเนิดลมถึงถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper)
4. ติดตั้งท่อจากถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper) ถึงถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ (silo)
5. ปิดสไลด์วาล์ว
6. เปิดเครื่องกำเนิดลมเป็นเวลา 1 นาที
7. นำเชื้อเพลิงที่เหลือในถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก มาชั่งหามวลที่เหลือจากการขนส่ง
8. ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนมวลตั้งต้นของเชื้อเพลิงเพิ่มทีละ 25 กรัมไปจนถึง 200 กรัม
9. บันทึกผลการทดลอง

##### 4.4.2 การทดลองหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องต้นกำเนิดลมที่เหมาะสมกับระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม

1. บรรจุเชื้อเพลิงลงในถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper)
2. ติดตั้งท่อจากเครื่องต้นกำเนิดลมถึงถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ติดตั้งท่อจากถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper) ถึงถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ (silo)

4. ปิดสไลด์วาล์ว

5. ปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องต้นกำเนิดลมที่ค่าทดลองต่าง ๆ

6. เปิดเครื่องกำเนิดลมเป็นเวลา 1 นาที

7. นำเชื้อเพลิงที่เหลือในถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก มาชั่งหามวลที่เหลือจากการขนส่ง

8. ทำการทดลองซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องกำเนิดลมตั้งแต่ 2.5 ลบ.ม./นาที เพิ่มทีละ 0.5 ลบ.ม./นาที จนถึง 3.5 ลบ.ม./นาที

9. บันทึกผลการทดลอง

#### 4.4.3 การทดลองหาวิธีการทำงานแบบวนซ้ำที่ควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

1. ต่อสายจัมเปอร์จาก Thin Film Pressure Sensor เข้ากับ Arduino UNO R3 SMD (CH340G)

2. เทียบค่าที่อ่านได้จาก Thin Film Pressure Sensor กับมวลของเชื้อเพลิงตั้งต้นเพื่อใช้ในการเขียนโค้ด

3. ต่อสายจัมเปอร์จาก 5V Relay Module ช่องที่ 1 เข้ากับ Arduino UNO R3 SMD (CH340G)

4. ต่อสายไฟจากเครื่องต้นกำเนิดลมเข้ากับ 5V Relay Module ช่องที่ 1

5. ต่อสายจัมเปอร์จาก 5V Relay Module ช่องที่ 2 เข้ากับ Arduino UNO R3 SMD (CH340G)

6. ต่อสายไฟจากโซลินอยด์วาล์วเข้ากับ 5V Relay Module ช่องที่ 2

7. ต่อสายลมจากปั๊มลมเข้ากับโซลินอยด์วาล์ว

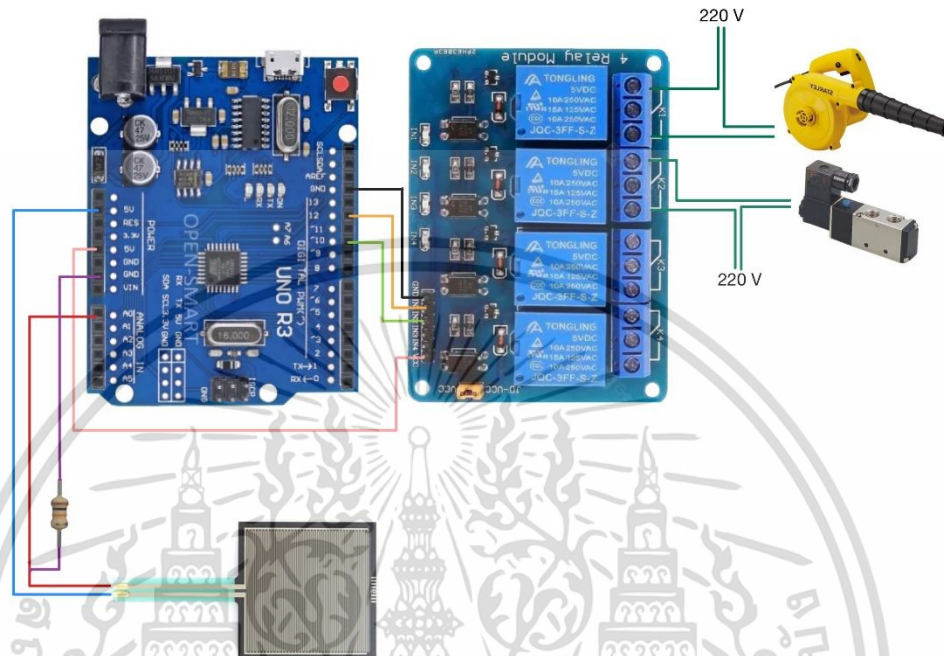
8. ต่อสายลมจากโซลินอยด์วาล์วเข้ากับลูกสูบลมสำหรับขับเคลื่อนสไลด์วาล์ว

9. บรรจุเชื้อเพลิงลงในถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper)

10. อัปโหลดโค้ดการทำงานแบบทำซ้ำลงใน Arduino UNO R3 SMD (CH340G)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เปิดระบบการทำงานอัตโนมัติสำหรับระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม
12. ตรวจสอบการทำงานของระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4.1 การเดินสายไฟของระบบอัตโนมัติ



รูปที่ 4.2 การต่อสไลด์วาล์วกับระบบลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม รวมถึงระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม

การทดลองระบบขนส่งวัสดุด้วยลม ได้แก่ การทดสอบความสามารถในการขนส่งเชื้อเพลิงการทดลองหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เหมาะสมของเครื่องกำเนิดลมในการใช้งาน โดยควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถวิเคราะห์ผลได้ดังนี้

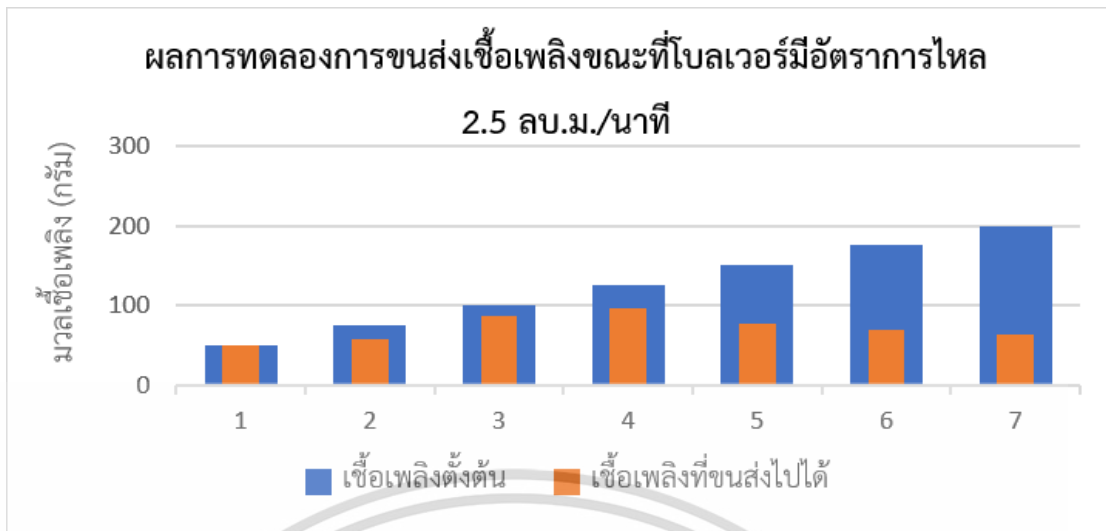
##### 5.1.1 ผลการทดสอบความสามารถของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองการขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 2.5 ลบ.ม./นาที่

การทดลองครั้งที่	เชื้อเพลิงตั้งต้น (กรัม)	เชื้อเพลิงที่ขนส่งได้ (กรัม)
1	50	50
2	75	58
3	100	87
4	125	96
5	150	77
6	175	69
7	200	64

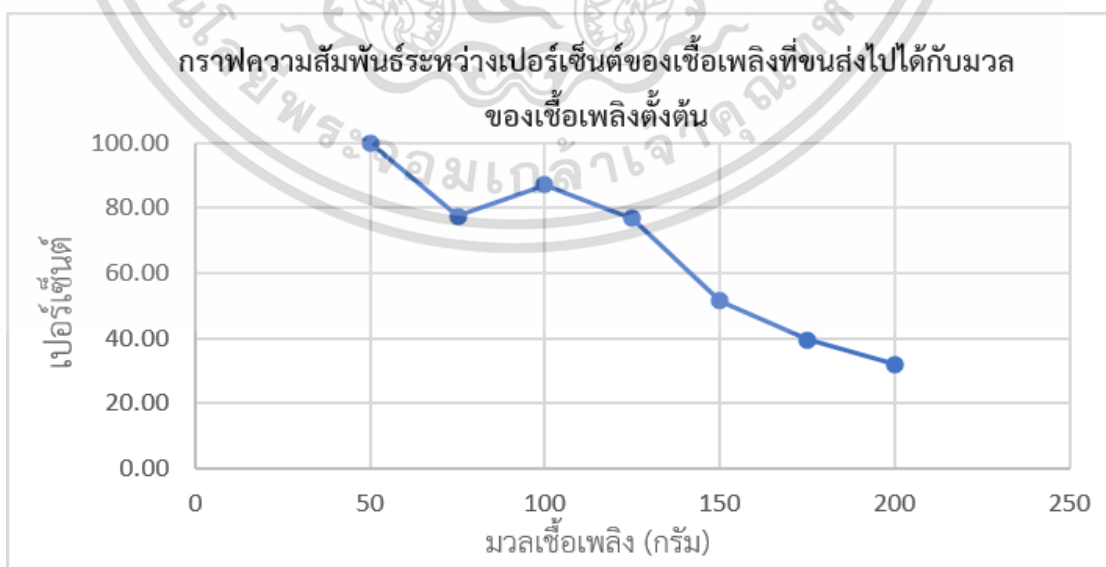
จากการทดสอบการทำงานของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลมที่กำหนดให้เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 2.5 ลบ.ม./นาที่ พบว่าเมื่อมวลตั้งต้นมีขนาด 50 กรัม ระบบสามารถขนส่งเชื้อเพลิงจากถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper) ไปยังถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ (silo) ได้หมดภายในเวลา 1 นาที แต่เมื่อเพิ่มมวลตั้งต้นครั้งละ 25 กรัม พบว่ามีมวลคงเหลือที่ไม่สามารถขนส่งไปได้ภายในถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้นกับเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้ดังกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงผลการทดลองขณะที่โบลเวอร์มีอัตราการไหล 2.5 ลบ.ม.ต่อ 1 นาที

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้นกับเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้ แสดงให้เห็นว่าระบบจะสามารถขนส่งเชื้อเพลิงไปได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีมวลเชื้อเพลิงตั้งต้นเพิ่มขึ้นที่มวล 75 กรัม 100 กรัม และสูงสุดที่ 125 กรัม แต่เมื่อใส่มวลตั้งต้นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นที่ 150 กรัม 175 กรัม และ 200 กรัม พบว่ามวลเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้มีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีมวลตั้งต้นมากเกินไปจะทำให้เกิดการติดค้างของเชื้อเพลิงภายในถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็กเป็นผลให้แรงปะทะของลมจากเครื่องต้นกำเนิดลมไม่มากพอที่จะทำลายก้อนติดค้างของเชื้อเพลิงได้ โดยการทดลองนี้มวลเชื้อเพลิงสูงสุดที่สามารถขนส่งไปได้เท่ากับ 96 กรัม ที่มวลเชื้อเพลิงตั้งต้น 125 กรัม คิดเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการขนส่งเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับเชื้อเพลิงตั้งต้นได้ดังนี้



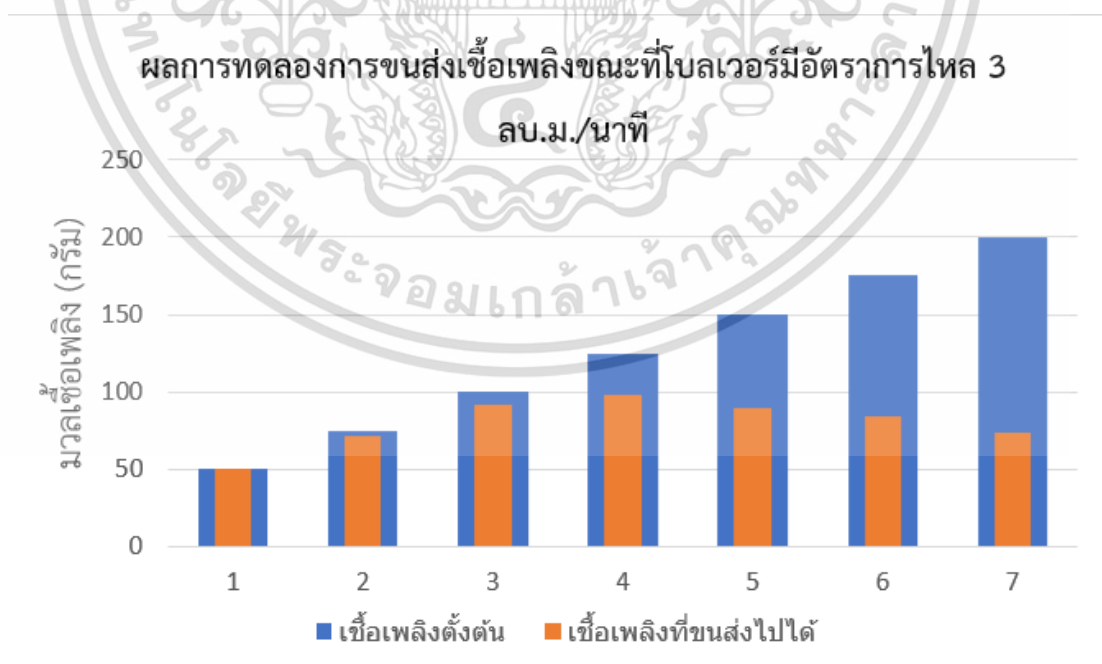
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับมวลของเชื้อเพลิงตั้งต้น (2.5m<sup>3</sup>/min)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองการขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาทึ

การทดลองครั้งที่	เชื้อเพลิงตั้งต้น (กรัม)	เชื้อเพลิงที่ขนส่งได้ (กรัม)
1	50	50
2	75	71
3	100	92
4	125	98
5	150	89
6	175	84
7	200	74

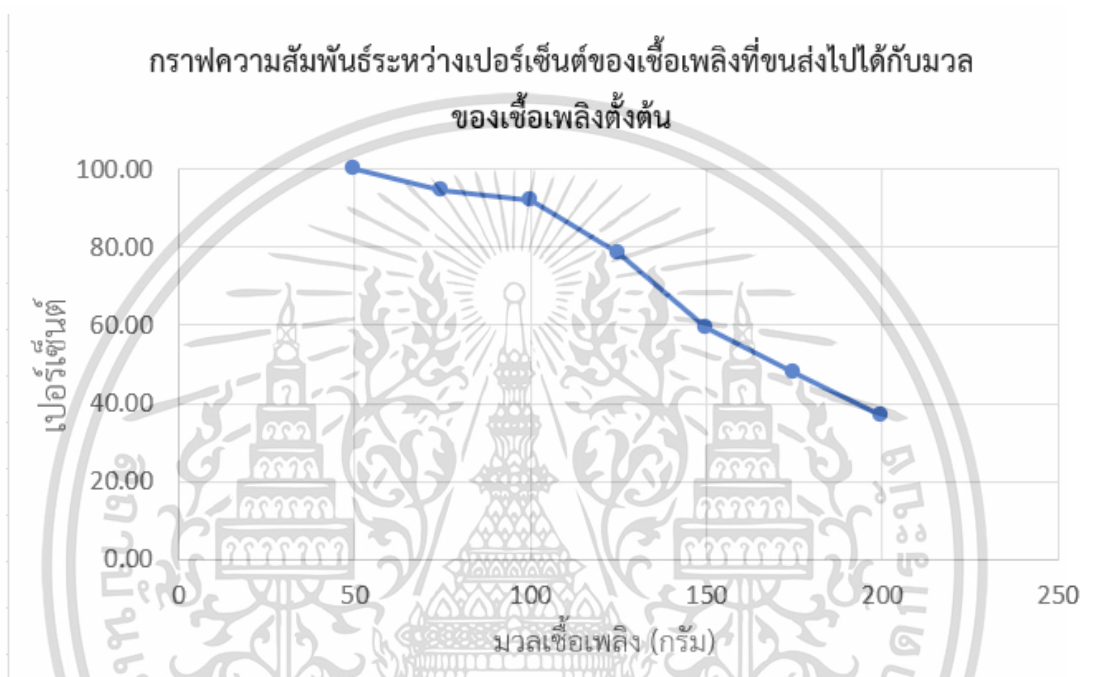
จากการทดสอบการทำงานของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลมที่กำหนดให้เครื่องต้นกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาทึ พบว่าเมื่อมวลตั้งต้นมีขนาด 50 กรัม ระบบสามารถขนส่งเชื้อเพลิงจากถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper) ไปยังถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ (silo) ได้หมดภายในเวลา 1 นาที เหมือนกับที่กำหนดให้เครื่องต้นกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 2.5 ลบ.ม./นาทึ แต่เมื่อเพิ่มมวลตั้งต้นครั้งละ 25 กรัม พบว่ามีมวลคงเหลือที่ไม่สามารถขนส่งไปได้ภายในถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก แต่มีเชื้อเพลิงคงเหลือน้อยกว่าการทดลองครั้งก่อนหน้า แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้นกับเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้ดังกราฟ



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลการทดลองขณะที่โบลเวอร์มีอัตราการไหล 3 ลบ.ม.ต่อ 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้นกับเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้ แสดงให้เห็นว่าระบบจะสามารถขนส่งเชื้อเพลิงไปได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีมวลเชื้อเพลิงตั้งต้นเพิ่มขึ้นที่มวล 75 กรัม 100 กรัม และสูงสุดที่ 125 กรัม แต่เมื่อใส่มวลตั้งต้นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นที่ 150 กรัม 175 กรัม และ 200 กรัม พบว่ามวลเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้มีค่าลดลง โดยการทดลองนี้มวลเชื้อเพลิงสูงสุดที่สามารถขนส่งไปได้เท่ากับ 96 กรัม ที่มวลเชื้อเพลิงตั้งต้น 125 กรัม คิดเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการขนส่งเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับเชื้อเพลิงตั้งต้นได้ดังนี้



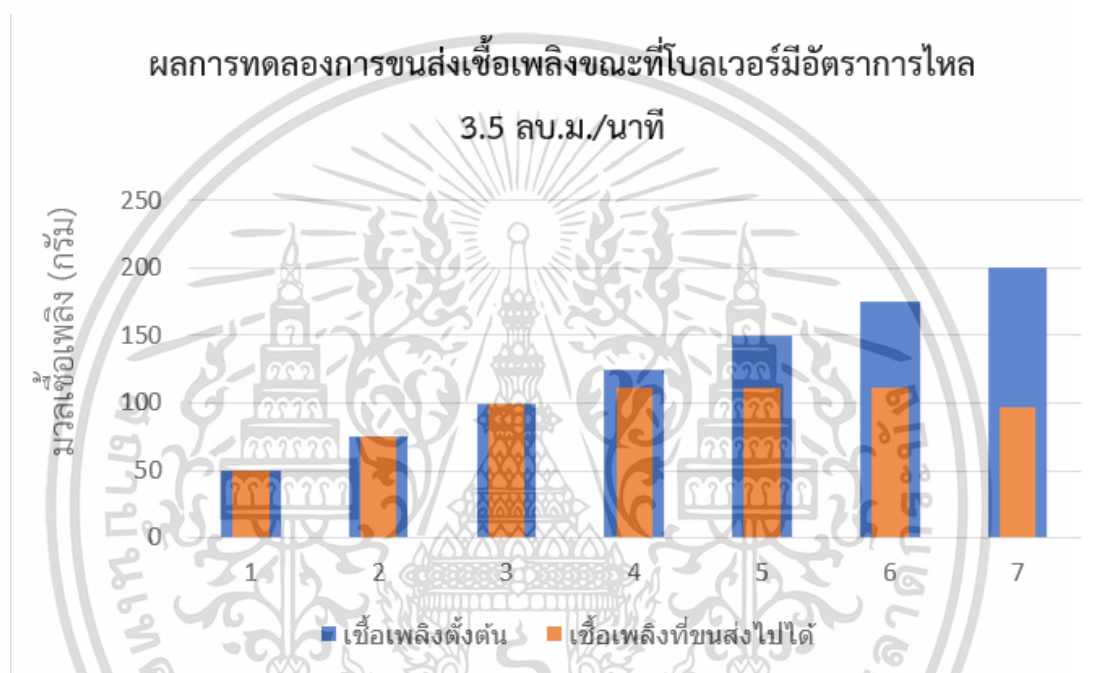
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับมวลของเชื้อเพลิงตั้งต้น ( $3 \text{ m}^3/\text{min}$ )

ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองการขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาที่

การทดลองครั้งที่	เชื้อเพลิงตั้งต้น (กรัม)	เชื้อเพลิงที่ขนส่งได้ (กรัม)
1	50	50
2	75	75
3	100	100
4	125	111
5	150	112
6	175	112
7	200	97

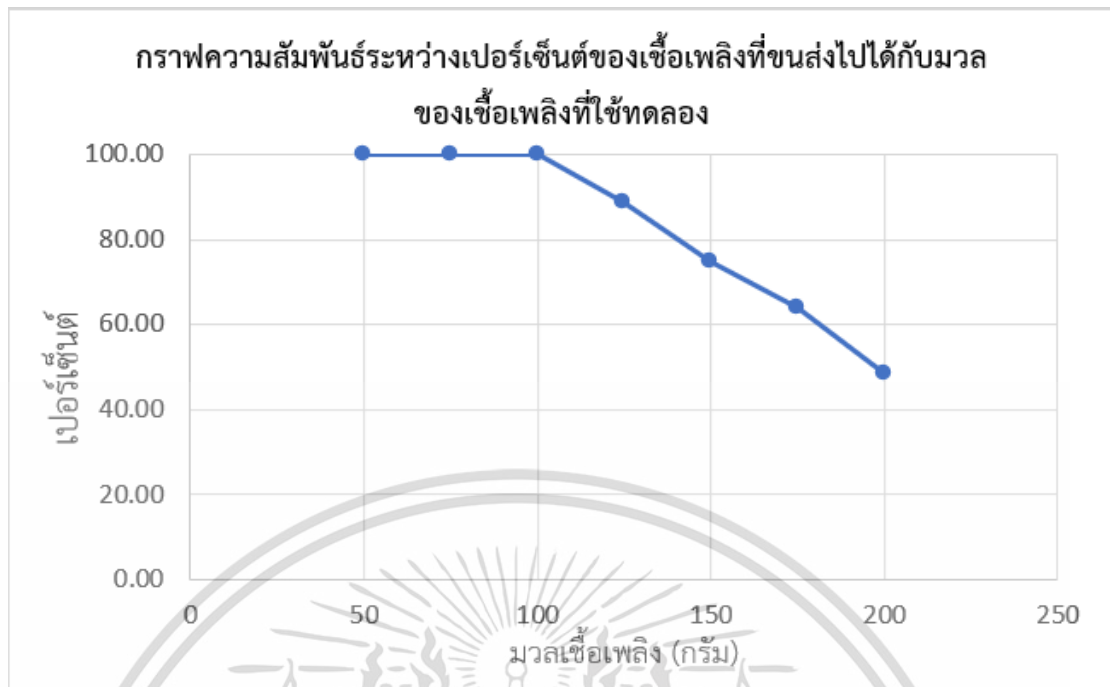
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบการทำงานของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลมที่กำหนดให้เครื่องต้นกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3.5 ลบ.ม/นาที่ พบว่าเมื่อมวลตั้งต้นมีขนาด 50 กรัม 75 กรัม และ 100 กรัม ระบบสามารถขนส่งเชื้อเพลิงจากถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก (small hopper) ไปยังถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ (silo) ได้หมดภายในเวลา 1 นาที แต่เมื่อเพิ่มมวลตั้งต้นครั้งละ 25 กรัม พบว่ามีมวลคงเหลือที่ไม่สามารถขนส่งไปได้ภายในถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก แต่มีเชื้อเพลิงคงเหลือน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองครั้งก่อนๆ แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้นกับเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้ดังกราฟ



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงผลการทดลองขณะที่โบลเวอร์มีอัตราการไหล 3.5 ลบ.ม.ต่อ 1 นาที

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้นกับเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้ แสดงให้เห็นว่าระบบจะสามารถขนส่งเชื้อเพลิงไปได้เพิ่มขึ้นเมื่อมีมวลเชื้อเพลิงตั้งต้นเพิ่มขึ้นที่มวล 75 กรัม 100 กรัม สูงสุดที่ 150 กรัม และ 175 กรัม แต่เมื่อใส่มวลตั้งต้นเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นที่ 200 กรัม พบว่ามวลเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้มีค่าลดลง โดยการทดลองนี้มวลเชื้อเพลิงสูงสุดที่สามารถขนส่งไปได้เท่ากับ 112 กรัม ที่มวลเชื้อเพลิงตั้งต้น 150 กรัม และ 175 กรัม คิดเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการขนส่งเชื้อเพลิงเปรียบเทียบระหว่างเชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับเชื้อเพลิงตั้งต้นได้ดังนี้



รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงที่ขนส่งไปได้กับมวลของเชื้อเพลิงตั้งต้น ( $3.5\text{m}^3/\text{min}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผลการทดลอง

### 6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลม เราพบว่าระบบสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คือ สามารถสร้างและออกแบบระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลมซึ่งประกอบไปด้วยถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก วาล์วที่ควบคุมด้วยลูกสูบลม ระบบทั้งหมดควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบสามารถทดแทนแรงงานมนุษย์ที่ใช้ในการขนส่งเชื้อเพลิงได้โดยเหตุผลด้านความปลอดภัยจากฝุ่นขนาดเล็ก

สำหรับการทำงานของระบบขนส่งเชื้อเพลิงด้วยลมอ้างอิงจากผลการทดลองในบทที่ 5 พบว่าสถานะการทำงานของระบบที่สามารถขนส่งเชื้อเพลิงไปได้หมดนั้น การขนส่งเชื้อเพลิงขนาด 50 กรัมสามารถปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องต้นกำเนิดลมได้ตั้งแต่ 2.5 ลบ.ม./นาที่ จนถึง 3.5 ลบ.ม./นาที่ การขนส่งเชื้อเพลิงที่ 75 กรัม จำเป็นต้องปรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องต้นกำเนิดลมที่ 3.5 ลบ.ม./นาที่ ทั้งนี้สถานะที่กำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเครื่องต้นกำเนิดลมที่ 3.5 ลบ.ม./นาที่ ก็สามารถขนส่งเชื้อเพลิงขนาด 100 กรัม ไปได้หมดเช่นกัน แต่ไม่สามารถขนส่งเชื้อเพลิงขนาด 125 กรัม ได้หมด สรุปได้ว่าระบบควรทำงานเมื่อมีเชื้อเพลิงตั้งต้นครบ 100 กรัม และกำหนดให้อัตราการไหลเชิงปริมาตร 3.5 ลบ.ม./นาที่ โดยระบบการทำงานสามารถเรียงตามขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้ 1.เซนเซอร์รับข้อมูลมวลของเชื้อเพลิงครบ 100 กรัม 2.สไลด์วาล์วที่ควบคุมด้วยลูกสูบลมเปิดออกเพื่อให้ฝุ่นตกไปยังถังเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก 3.ระบบสั่งปิดสไลด์วาล์ว 4.เปิดเครื่องกำเนิดลมเป็นเวลา 1 นาที เพื่อขนส่งเชื้อเพลิง และจะทำงานรูปแบบวนซ้ำเมื่อมีขนาดเชื้อเพลิงครบ 100 กรัมอีกครั้ง

### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในระหว่างทำการทดลอง จะพบว่าในบางครั้งเชื้อเพลิงมีความชื้นเนื่องจากฝนตก เราจึงทำการทดลองในช่วงที่เชื้อเพลิงมีความชื้นมากเพื่อให้มั่นใจว่าในขณะที่เชื้อเพลิงอยู่ในสภาวะปกติ ระบบจะสามารถขนส่งเชื้อเพลิงไปได้หมด ทั้งนี้ระบบสามารถปรับการทำงานให้เหมาะสมใหม่อีกครั้งได้ถ้าสภาพแวดล้อมไม่มีความชื้นโดยอาจจะเพิ่มมวลเชื้อเพลิงตั้งต้นขึ้นเพื่อให้ระบบสามารถขนส่งไปได้เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในด้านของการทดลองเนื่องจากมีเวลาที่ค่อนข้างจำกัดและสถานการณ์ต่าง ๆ ไม่เป็นเอื้ออำนวย จึงอาจทำให้ผลการทดลองน้อยกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งตรงนี้สามารถนำไปต่อยอดได้เพื่อหาระบบการทำงานที่เหมาะสมมากขึ้น โดยทำการทดลองปรับเปลี่ยนเวลาการขนส่งขณะที่ทดลอง โดยอาจจะใช้เวลามากกว่า 1 นาที หรือน้อยกว่า 1 นาที เพื่อให้ผลการทดลองที่ออกมามีความแม่นยำมากขึ้น และนำไปประยุกต์ใช้กับระบบได้เหมาะสมมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] พรชัย จงจิตรไพศาล. 2005. **ระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลม**, สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร.
- [2] Shamlou, P.A., *Handling of Bulk Solids*, London, Butterworths,1990.
- [3] R.D. Marcus. 1990. **Pneumatic Conveying of Solids a theoretical and Practical approach**, Chapman and Hall, London.
- [4] Don W. Green and Marylee Z.Southard. 2000. **Perry's Chemical Engineerings' Handbook, 9<sup>th</sup> Edition**, McGraw Hill Professional, New York City.
- [5] R.D.Marcus,J.D.Hilbert Jr.,G.E.Klinzing, **Flow through bends and acceleration zones in pneumatic conveying systems**, Bulk Solids Handling, 5.4, 1985.
- [6] Rose, H.E. and Duckworth,R.A., **Transport of Solid Particles in Liquid and Gases** The Engineer, Vol.227, No.5905, 1969, pp.478-483
- [7] Rizk, F., **Pneumatic Conveying at Optimum Operation Conditions and a Solution of Barth's**, England, 7-9 April 1976, pp.D4-43-58
- [8] Schase, B, **Zum ubergang Sprung-Strahlenforderung beider Horizontalen Pneumatischen Feststoffodrung**, Dissertation, University of Karlseuhe, 1987.
- [9] Weber, M. "Friction of Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying", Bulk Solid Handling. Volume 11, Number 1 (March,1991), pp.15-18
- [10] Weber, M., **Principle of hydraulic and Pneumatic Conveying in Pipes**, Bulk Solid Handling, Vol.1 (1981) No.1, pp.57-63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Matsumoto, S, Hara, M., Saito, S and Maeda, D, Minimum Transport Velocity for Horizontal Pneumatic Conveying, Journal of Chemical of Japan, Vol.7 (1974), No.6, pp.425-431
- [12] Yi, J., Wypych, P.W. and Pan,R., Minimum Conveying Velocity in Dilute Phase Pneumatic Conveying., Powder Handling and Processing, Vol.10, No.3 July/September 1998, pp.255-261
- [13] Geldart, D., and Ling, S.J., Saltation in High Pressure Conveying in Pipes, Powder Technology Vol.69 (1992), pp.157-162.
- [14] บัณฑิต ต้นติไชยบริบูรณ์,ปฎิวัติ อมตะรุ่งเรือง และ พรพุทธิ วิสุทธิวัชรกุล. 2016. การพัฒนาระบบขนส่งเชื้อเพลิงชีวมวล. ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2004). ตอนที่ 4 บทที่ 1 ระบบอัดอากาศ บีมน้ำ และพัดลม. In ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงานอาวุโส (ผอส.) ด้านความร้อน(pp. 1-1 - 1-72). แหล่งข้อมูล: <https://ienergyguru.com/fan/> ค้นเมื่อวันที่ 12 พฤศจิกายน 2562



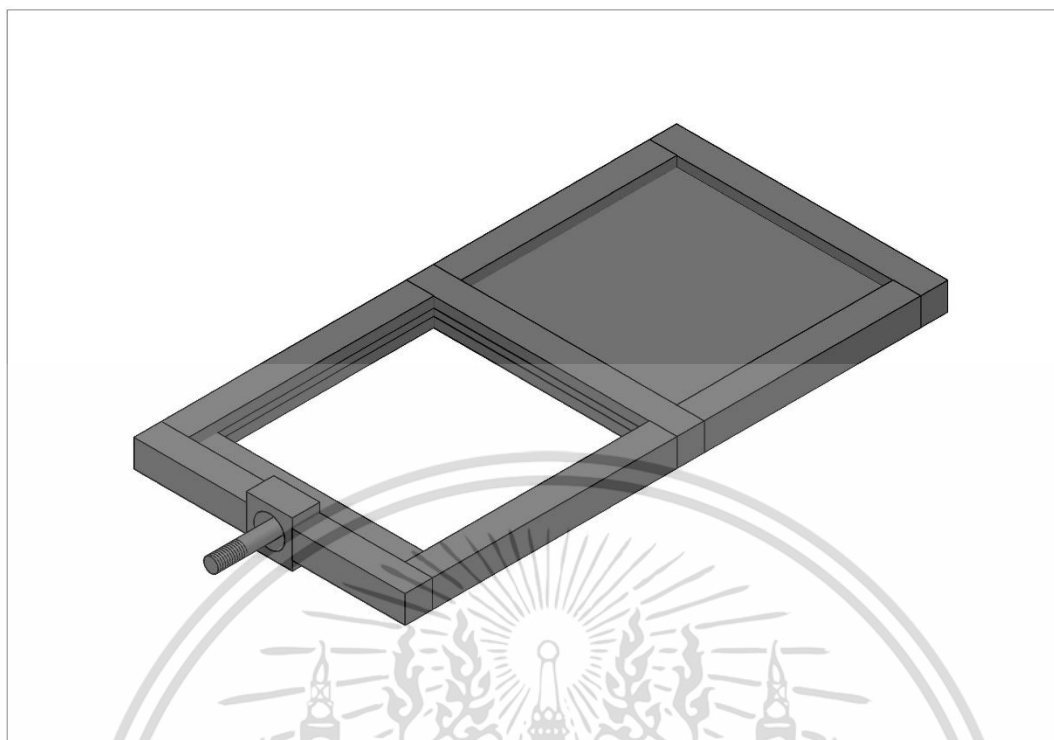
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

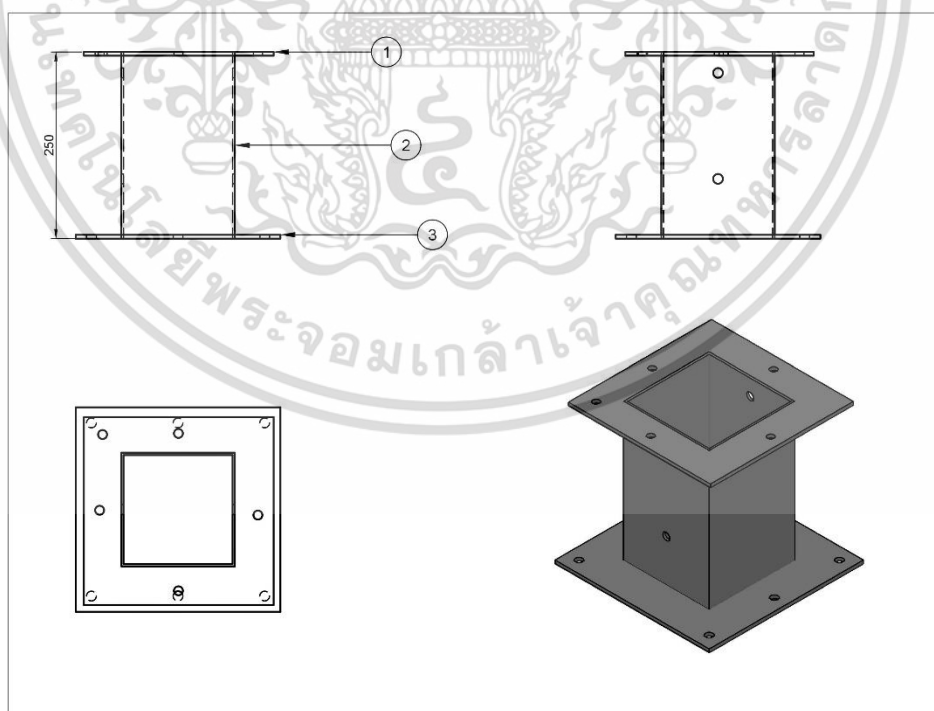


ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

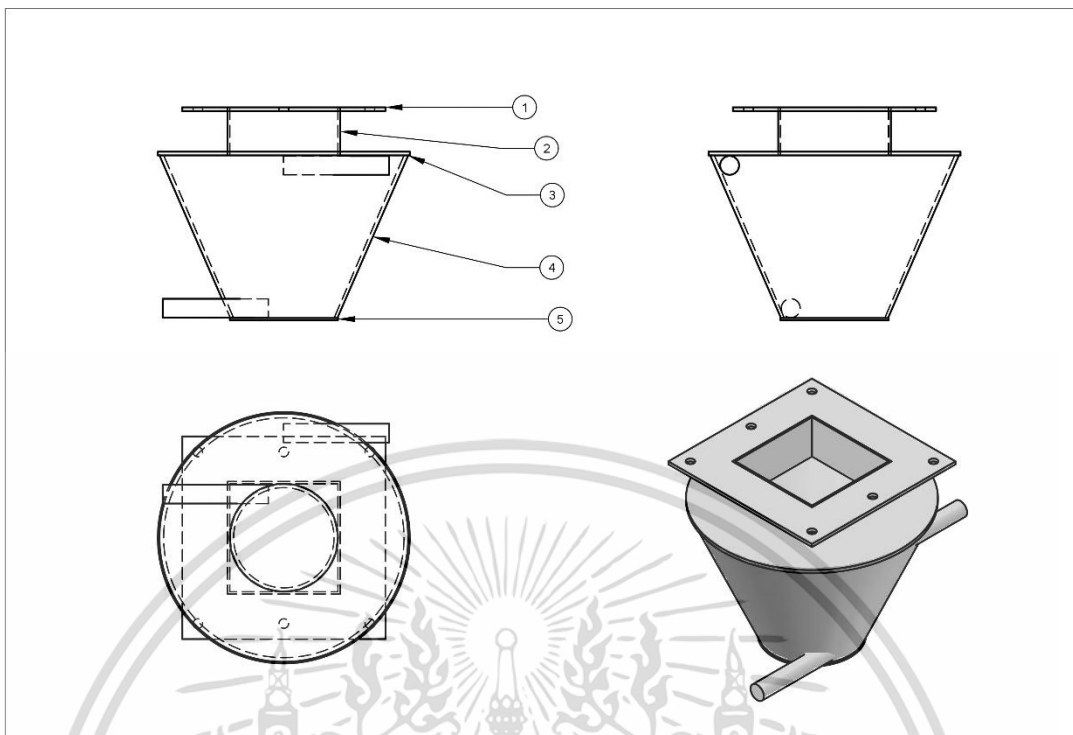


รูปที่ ก.1 แบบสไลด์วาล์ว

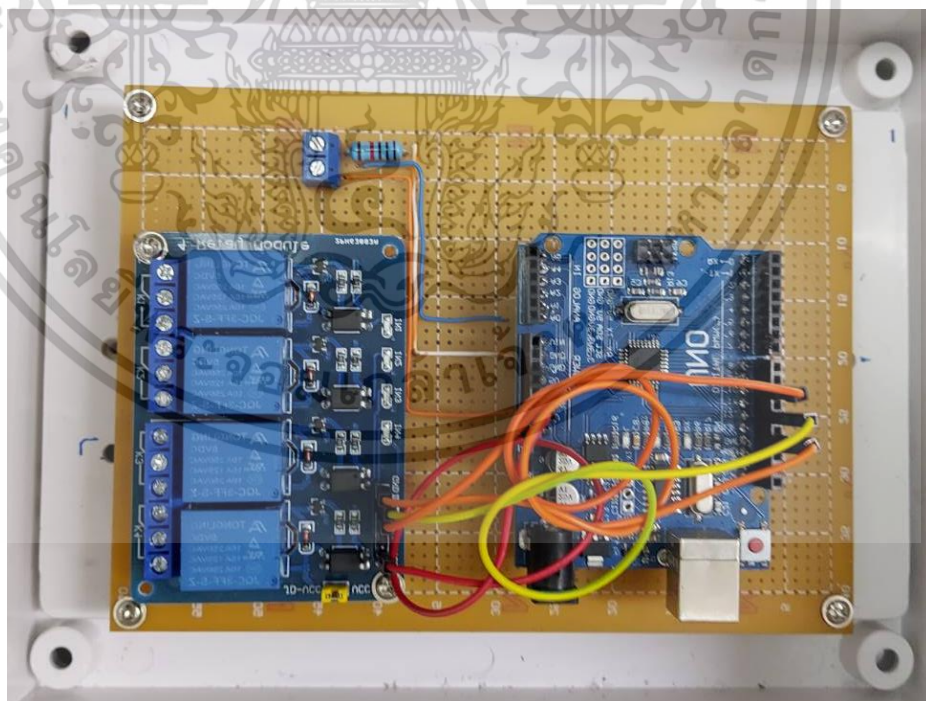


รูปที่ ก.2 แบบหน้าแปลนเชื่อมต่อระหว่างถังฟุ้งเชื้อเพลิงและส่วนกรองเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

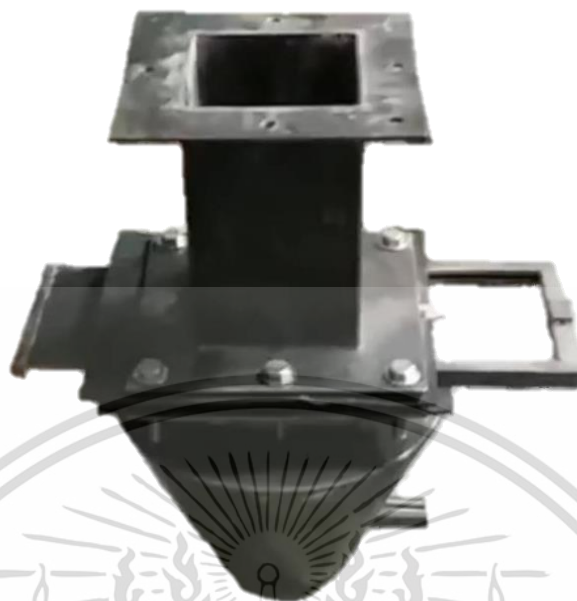


รูปที่ ก.3 แบบถังกักเก็บเชื้อเพลิงขนาดเล็ก



รูปที่ ก.4 ชุดควบคุมการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 ถังกักเก็บเชื้อเพลิงที่ติดตั้งวาล์วเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ ก.6 โซลินอยด์วาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 กระบอกสูบนิวเมติก



รูปที่ ก.8 ปัมลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.9 พื้นที่ก่อนการติดตั้ง



รูปที่ ก.10 พื้นที่หลังการติดตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 สรุปผลการคำนวณเพื่อออกแบบขนาดของพัดลมเป่าอากาศ

Parameter	Symbol	Value	Unit
<b>การคำนวณความเร็วในการขนส่งเชื้อเพลิง</b>			
Fuel density	$\rho_p$	407.8	kg/m <sup>3</sup>
Air density	$\rho$	1.2	kg/m <sup>3</sup>
อัตราการขนถ่าย	$m_s$	6.23	kg/h
อัตราการขนถ่ายวัสดุต่ออัตราการไหลของอากาศ	$\mu$	0.18	
Diameter ของเชื้อเพลิง	$d$	0.01	mm
Diameter ของท่อ	$D$	25.4	mm
ความเร็วต่ำสุดในการขนส่ง	$v_{st}$	7.76	m/s
ความเร็วในการขนส่ง	$v$	<b>15.52</b>	m/s
<b>การคำนวณหาความดันสูญเสีย</b>			
ความดันที่ปลายท่อ	$P$	101.77	kPa
ความเร็วของเชื้อเพลิง	$v_s$	15.44	m/s
Air density ในระบบ	$\rho_f$	1.15	kg/m <sup>3</sup>
ความดันสูญเสียเนื่องจากความเร่ง	$\Delta P_a$	0.19	kPa
ระยะทางขนถ่ายในแนวตั้ง	$z$	2.05	m
ความดันสูญเสียเนื่องจากการขนถ่ายวัสดุในแนวตั้ง	$\Delta P_z$	0.004	kPa
ความยาวของท่อ	$L$	6	m
Froude number	$F_r$	967	
Froude number ของความเร็วในการตกอิสระของวัสดุ	$F_{rp}$	0.0142	
ความเร็วในการตกอิสระของวัสดุ	$U_{fo}$	$1.18 \times 10^{-3}$	m/s
แฟกเตอร์ความเสียดทานระหว่างท่อกับวัสดุ	$\lambda_s$	$2.7 \times 10^{-3}$	
Reynold number	$R_e$	34314	
แฟกเตอร์ความเสียดทานระหว่างท่อกับอากาศ	$\lambda_f$	0.0232	
ความดันสูญเสียจากการไหลไปตามท่อ	$\Delta P_L$	0.78	kPa
จำนวนท่อโค้งในระบบ	$N$	5	
แฟกเตอร์ความดันสูญเสียเนื่องจากท่อโค้ง	$B$	0.5	
ความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลผ่านท่อโค้ง	$\Delta P_b$	0.41	kPa
ความดันสูญเสียรวม	$\Delta P_t$	<b>2.47</b>	kPa
		<b>9.9</b>	inH <sub>2</sub> O
อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ	<b>CFM</b>	16.66	ft <sup>3</sup> /minute

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพของพัดลม	$\eta$	0.65	
ขนาดมอเตอร์ของพัดลม	<i>BHP</i>	<u>0.06</u>	HP
		<u>45</u>	watt

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองการขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 2.5 ลบ.ม./นาที

การทดลองครั้งที่	เชื้อเพลิงตั้งต้น (กรัม)	เชื้อเพลิงที่ขนส่งได้ (กรัม)
1	50	50
2	75	58
3	100	87
4	125	96
5	150	77
6	175	69
7	200	64

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองการขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3 ลบ.ม./นาที

การทดลองครั้งที่	เชื้อเพลิงตั้งต้น (กรัม)	เชื้อเพลิงที่ขนส่งได้ (กรัม)
1	50	50
2	75	71
3	100	92
4	125	98
5	150	89
6	175	84
7	200	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองการขนส่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องกำเนิดลมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตร 3  
ลบ.ม./นาทึ

การทดลองครั้งที่	เชื้อเพลิงตั้งต้น (กรัม)	เชื้อเพลิงที่ขนส่งได้ (กรัม)
1	50	50
2	75	75
3	100	100
4	125	111
5	150	112
6	175	112
7	200	97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้