# การปรับปรุงระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

# IMPROVEMENT OF WATER CIRCULATION SYSTEM USED FOR WET SCRUBBER

จิรายุ รักชาติ
ชยุตพงศ์ คิดรุ่งเรือง
รวิภาส ศรีวิชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

# การปรับปรุงระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

# IMPROVEMENT OF WATER CIRCULATION SYSTEM USED FOR WET SCRUBBER

จิรายุ รักชาติ
ชยุตพงศ์ คิดรุ่งเรือง
รวิภาส ศรีวิชัย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# IMPROVEMENT OF WATER CIRCULATION SYSTEM USED FOR WET SCRUBBER

JIRAYU RAKCHAT
CHAYUTPONG KIDRUNGRUENG
RAWIPAS SRIWICHAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2559
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**เรื่อง** การปรับปรุงระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก
IMPROVEMENT OF WATER CIRCULATION SYSTEM USED FOR WET SCRUBBER

ผู้จัดทำ

1. นายจิรายุ รักชาติ รหัสประจำตัว 56010205
2. นายชยุตพงศ์ คิดรุ่งเรือง รหัสประจำตัว 56010265
3. นายรวิภาส ศรีวิชัย รหัสประจำตัว 56011003

อาจารย์ที่ปรึกษา
( รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก


| | | |
|---|---|---|
| นายจิรายุ | รักชาติ | 56010205 |
| นายชยุตพงศ์ | คิดรุ่งเรือง | 56010265 |
| นายรวิภาส | ศรีวิชัย | 56011003 |
| รศ.ดร.จารุวัตร | เจริญสุข | อาจารย์ที่ปรึกษา |

ปีการศึกษา 2559


**บทคัดย่อ**


โครงงานนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบน้ำหมุนเวียนที่ใช้ในการบำบัดอากาศแบบเปียก โดยการลดอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนซึ่งถูกใช้ในการลดมลพิษจากไอเสียของเตาพลังงานชีวมวล โดยการดูดไอเสียไหลผ่านละอองน้ำ ซึ่งฝุ่นควันมลพิษจะถูกละอองน้ำดักจับไว้และตกลงมาสู่ภาชนะด้านล่างกลายเป็นน้ำที่มีตะกอนและอุณหภูมิสูง จากนั้นจะถูกดูดไปบ่อบำบัดก่อนที่น้ำบางส่วนจะถูกปล่อยทิ้งและส่วนที่เหลือจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง ซึ่งอุปกรณ์หอหล่อเย็นเดิมนั้นไม่มีประสิทธิภาพในการทำความเย็นที่เพียงพอ จึงทำให้น้ำหมุนเวียนและน้ำทิ้งมีอุณหภูมิที่สูงเกิน 40°C ซึ่งเกินกว่าอุณหภูมิของการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก และเกินกว่าอุณหภูมิน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนด ดังนั้นการทดลองของโครงงานนี้ จึงได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นด้วยการสร้างหอหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเดิม และทำการศึกษาผลกระทบของการลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก โดยการทดลองนี้มีตัวชี้วัดคืออุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนและความหนาแน่นของฝุ่นในไอเสียที่ปล่องไอเสีย ซึ่งผลจากการทดลองพบว่า หลังจากทำการปรับปรุงระบบแล้วนั้น น้ำหมุนเวียนมีอุณหภูมิที่ลดลงจากเดิมมากกว่า 20°C และยังส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงขึ้นอีกด้วย




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMPROVEMENT OF WATER CIRCULATION SYSTEM USED FOR WET SCRUBBER


| | | |
|---|---|---|
| Jirayu | Rakchat | 56010205 |
| Chayutpong | Kidrungrueng | 56010265 |
| Rawipas | Sriwichai | 56011003 |
| Assoc.Prof.Dr.Jarruwat | Charoensuk | Advisor |


Year 2016


## ABSTRACT

The purpose of this project is to improve water circulation system for wet scrubber unit by reducing circulation water temperature which used for extracting pollution from exhaust gas of biomass combustion. Exhaust gas passage was installed with array of water spray where fly ash and flue gas were collected by the scrubbing water and drop into a basin. The waste water with high temperature is then transferred to waste water treatment pond before reused again and some was drained out. Due to the original cooling tower was not sufficient enough, circulation water temperature greater more than 40°C. This was more than recommended temperature range and allowable drained water temperature as regulated by laws. So this project is aimed to improve circulation water cooling efficiency, by create a cooling tower with more efficiency and also study about impact of reducing circulation water temperature to particulate reducing efficiency. The performance indicators of this experiment are: i) quantity of fly ash in exhaust gas at the stack and, ii) circulation water temperature. The result of experiment after improvement shown that circulation water temperature was decrease than before more than 20°C and particulate density in exhaust gas at the stack was lower.




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มิอาจสำเร็จลุล่วงได้หากขาดความช่วยเหลือ คำแนะนำ ความกรุณา จากท่าน รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงงานนี้ ทางผู้จัดทำรู้สึกทราบซึ้งในความเมตตาอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะอาจารย์ผู้เป็นกรรมการคุมสอบโครงงานนี้ รวมไปถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลหลายท่าน ผู้ซึ่งได้ช่วยเหลือแนะนำสั่งสอน ให้คำปรึกษา คำติชมในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การทำวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ทางผู้จัดทำยังขอขอบพระคุณพี่จุลวิชญ์ มาฟัก เจ้าหน้าที่ประจำโรงปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล กองเครื่องมือและอุปกรณ์ซ่อมอากาศยาน ฝ่ายช่าง บริษัท การบินไทย จำกัด มหาชน พร้อมทั้งเจ้าหน้าที่ อันได้แก่ คุณอาชรินทร์ และพี่แขก รวมไปถึงพี่ๆนักศึกษาปริญญาโทผู้ร่วมในโครงงานวิจัยเตาเชื้อเพลิงพลังงานชีวมวลแบบเชื้อเพลิงบดของท่านอาจารย์จารุวัตร เจริญสุข อันได้แก่ พี่พงศนันท์ แก่นพรม พี่นรเศรษฐ์ พิกุลเงิน พี่พีรพัฒน์ เทพลิบ และพี่นันทพล จันคง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือการทำโครงงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี จนสำเร็จลุล่วงในที่สุด และขอขอบคุณเพื่อนๆในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือตลอดมา โดยเฉพาะนายฉัตรเฉลิม แก้วชมพู ผู้ซึ่งคอยช่วยเหลือสละเวลาและแรงกายประหนึ่งเป็นสมาชิกในทีมก็มิปาน

สุดท้ายนี้ขอกราบพระคุณบิดา มารดาและบุคคลในครอบครัวทุกท่านเป็นอย่างยิ่ง ที่เฝ้าเลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและให้ทุนทรัพย์ในการศึกษา รวมทั้งเป็นกำลังใจในการแก้ไขอุปสรรคต่างๆเสมอมาและขอบพระคุณผู้ให้การสนับสนุนทุกท่านที่มิได้เอ่ยนามมา ณ ที่นี้ด้วย

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน และขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยและสิ่งศักดิ์สิทธิ์จากทั่วสากลโลก จงอำนวยอวยพรให้ความสุขสวัสดีจงมีแด่ทุกท่านด้วยเทิญ

นายจิรายุ รักชาติ
นายชยุตพงศ์ คิดรุ่งเรือง
นายรวิภาส ศรีวิชัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... II

กิตติกรรมประกาศ ..... III

สารบัญ ..... IV

สารบัญตาราง ..... X

สารบัญรูป ..... XI

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ ..... XV

บทที่ 1 บทนำ ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ..... 2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา ..... 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย ..... 2

1.5 ขั้นตอนการศึกษา ..... 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 3

1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา ..... 3

1.8 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา ..... 3

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ..... 5

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ..... 5

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ..... 6

2.2.1 คุณสมบัติของน้ำ ..... 6

2.2.1.1 การเปลี่ยนสถานะของน้ำ ..... 6

2.2.1.2 ไอน้ำในอากาศ ..... 7




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


2.2.1.3 ความดันไอน้ำ ..... 9

2.2.1.4 ความชื้น ..... 9

2.2.2 หอทำความเย็น (Cooling Tower) ..... 10

2.2.2.1 การแบ่งชนิดของหอทำความเย็น ..... 10

2.2.2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนในหอผึ่งน้ำเย็น ..... 13

2.2.2.3 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในหอผึ่งน้ำเย็นชนิดพัดลมดูด ..... 14

2.2.2.4 แผนภาพ t-h แสดงสภาวะของอากาศและน้ำ
ขณะอยู่ในหอผึ่งน้ำเย็น ..... 15

2.2.2.5 การถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำและอากาศ ..... 17

2.2.2.6 อัตราส่วนของอัตราการไหล L/G ในหอผึ่งน้ำเย็น ..... 17

2.2.3 เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet Scrubber) ..... 18

2.2.3.1 ชนิดของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก ..... 19

2.2.4 หลักการเครื่องมือวัดอัตราการไหล ..... 21

2.2.4.1 Orifice Meter ..... 21

2.2.4.2 Venturi Meter ..... 21

2.2.4.3 สมการสำหรับคำนวณหาอัตราการไหล ..... 22

2.2.5 บอร์ด Arduino Uno R3 ..... 24

2.2.5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของ Arduino ..... 24

2.2.5.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino ..... 25

2.2.5.3 ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Uno R3 ..... 28

2.2.6 การวัดอุณหภูมิด้วยไอซี DS18B20 Digital Thermometer ..... 29




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


2.2.6.1 ข้อมูลเชิงเทคนิคเกี่ยวกับไอซี DS18B20 ..... 29

2.2.6.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับบอร์ด Arduino ..... 30

2.2.6.3 Arduino Sketch ..... 31

2.2.7 Flow Meter ..... 32

2.2.7.1 การวัดอัตราการไหลของปริมาตร (Volumetric Flow Rate) ..... 32

2.2.7.2 การวัดอัตราการไหลของมวล (Mass Flow Rate) ..... 32

2.2.7.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดการไหลสำหรับ Flow Meter ..... 33

2.2.8 เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ (Water Flow sensor) ..... 35

2.2.8.1 ข้อมูลเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล ..... 35

2.2.8.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำกับบอร์ด Arduino ..... 36

2.2.8.3 Arduino Sketch ..... 37

2.2.9 กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ..... 38

บทที่ 3 การออกแบบพัฒนาระบบ ออกแบบชุดทดลอง และการคำนวณ ..... 39

3.1 การออกแบบพัฒนาระบบ ..... 39

3.1.1 การออกแบบสร้างหอทำความเย็นใหม่ ..... 40

3.1.1.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์ม
โดยใช้แผนภูมิสำเร็จรูป ..... 42

3.1.1.2 การออกแบบพัดลมดูดอากาศ ..... 43

3.1.1.3 การสร้างหอทำความเย็นใหม่ ..... 43

3.2 การออกแบบชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสีย ..... 46

3.2.1 ออกแบบท่อเวนทูรี (venturi tube) ..... 46

3.2.2 ส่วนประกอบเครื่องเก็บผลฝุ่นที่ปะปนในไอเสีย ..... 46




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


3.2.3 การสอบเทียบค่าความแม่นยำในการวัดของอุปกรณ์เวนทูรี่ ..... 49

3.3 การคำนวณอื่นๆ ..... 51

3.3.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพหอทำความเย็นใหม่ ..... 51

3.3.2 การแสดงสมการสมดุลพลังงานและอัตราการสูญเสียน้ำ
ของหอทำความเย็นใหม่ ..... 51

3.3.3 การคำนวณหาปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยออกจาก
เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก ..... 55

บทที่ 4 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง ..... 57

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ..... 57

4.1.1 อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นเดิม (Old cooling system devices) ..... 57

4.1.1.1 หอทำความเย็นเดิม ..... 57

4.1.1.2 บ่อพักน้ำ ..... 58

4.1.2 หอทำความเย็นใหม่ (New cooling tower) ..... 58

4.1.3 ชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสีย ..... 59

4.1.4 Differential Pressure ..... 59

4.1.5 เครื่องชั่งแบบละเอียด ..... 60

4.1.6 บอร์ด Arduino Uno R3 และเซนเซอร์ ..... 60

4.1.7 ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump) ..... 61

4.1.8 ปั๊มน้ำอัตโนมัติ (Automatic Pump) ..... 62

4.1.9 ปั๊มน้ำแบบจุ่ม ..... 63

4.1.10 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger) ..... 63




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


4.1.11 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouples type K) ..... 64

4.1.12 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด ..... 65

4.1.13 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของสภาพอากาศ ..... 65

4.1.14 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Infrared Thermometer) ..... 66

4.2 การทดลอง ..... 66

4.2.1 วิธีการทดลองเก็บผลอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียน ..... 66

4.2.2 วิธีการทดลองเพื่อเก็บผลความหนาแน่นฝุ่นปะปนในไอเสีย ..... 68

4.2.3 การเก็บผลการทดลองอื่นๆ ..... 68

4.2.3.1 การเก็บผลค่าสภาพอากาศ ..... 68

4.2.3.2 การเก็บผลปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่ ..... 68

4.2.3.3 การเก็บผลอุณหภูมิไอเสีย ..... 69

4.2.3.4 การเก็บผลค่าอุณหภูมิพื้นผิวของหอทำความเย็น ..... 69

บทที่ 5 ผลการทดลอง ..... 70

5.1 ผลการเก็บค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียน ..... 70

5.1.1 ผลการเก็บค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ ..... 70

5.1.2 ผลการเก็บค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ ..... 71

5.2 ผลการเก็บตัวอย่างไอเสียเพื่อหาค่าความหนาแน่นของฝุ่นปะปน ..... 73

5.2.1 ความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสียก่อนการปรับปรุงระบบ ..... 73

5.2.2 ความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสียหลังการปรับปรุงระบบ ..... 73

5.3 ผลการทดลองอื่นๆ ..... 74

5.3.1 ปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก ..... 74




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.2 ผลของประสิทธิภาพปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่และการแสดงสมการสมดุลพลังงาน ..... 75

5.3.2.1 ประสิทธิภาพหอทำความเย็นใหม่ ..... 75

5.3.2.2 ปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่ ..... 75

5.3.2.3 ภาระความร้อนที่ถูกดึงออกโดยหอทำความเย็นใหม่ ..... 75

บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ ..... 78

6.1 บทสรุป ..... 78

6.2 ข้อเสนอแนะ ..... 79

เอกสารอ้างอิง ..... 80

ภาคผนวก ..... 82

ภาคผนวก ก. แบบอุปกรณ์หอทำความเย็นใหม่ ..... 83



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ผลการสอบเทียบค่าระหว่าง Hotwire Anemometer และ venture meter ..... 50

5.1 แสดงผลอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ ..... 70

5.2 แสดงผลอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ ..... 71

5.3 ตารางผลการเก็บตัวอย่างไอเสียก่อนการปรับปรุงระบบ ..... 73

5.4 ตารางผลการเก็บตัวอย่างไอเสียหลังการปรับปรุงระบบ ..... 73

5.5 ตารางแสดงสภาวะการทดลองก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ ..... 74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ..... 6
2.2 โมเลกุลน้ำในภาชนะ ..... 8
2.3 โมเลกุลของก๊าซต่างๆ ในกลุ่มอากาศ ..... 9
2.4 Induced Draft Cooling Tower (A) Counter Flow (B) Cross Flow ..... 11
2.5 Forced Draft Cooling Tower ..... 12
2.6 Natural Draft Cooling Tower (A) Counter Flow (B) Cross Flow ..... 12
2.7 การถ่ายเทความร้อนของหยดน้ำ ..... 14
2.8 ภาวะตอนบนของหอผึ่งน้ำเย็นชนิดพัดลมดูด ..... 14
2.9 ภาวะตอนล่างของหอผึ่งน้ำเย็นชนิดพัดลมดูด ..... 15
2.10 สภาวะของอากาศและน้ำขณะถ่ายโอนความร้อนภายในหอผึ่งน้ำเย็น ..... 16
2.11 แผนภาพการถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำและอากาศ ..... 16
2.12 ศักย์ขับความร้อนบนแผนภาพการถ่ายโอน ..... 17
2.13 Wet Scrubber ..... 19
2.14 สครับเบอร์แบบสเปรย์ ..... 19
2.15 สครับเบอร์แบบหอบรรจุ ..... 20
2.16 สครับเบอร์แบบถาดหรือเพลท ..... 20
2.17 สครับเบอร์แบบเวนทูรี ..... 21
2.18 Orifice meter ..... 21
2.19 Venturi Meter ..... 22
2.20 เครื่องเวนทูรีสำหรับใช้วัดอัตราการไหล ..... 23
2.21 บอร์ด Arduino Uno R3 ..... 24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.22 บอร์ด Arduino ต่อกับ LED ..... 24
2.23 บอร์ด Arduino ต่อกับบอร์ด XBee Shield ..... 25
2.24 การเชื่อมต่อ Arduino กับคอมพิวเตอร์ ..... 25
2.25 การเลือกรุ่น Arduino ..... 26
2.26 การเลือก port ที่เชื่อมต่อกับ Arduino ..... 26
2.27 การ compile โปรแกรม ..... 27
2.28 การอัพโหลดไปยังบอร์ด Arduino ..... 27
2.29 ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Uno R3 ..... 28
2.30 แสดงขาและตัวถัง TO-92 ของไอซี DS18B20 ..... 30
2.31 แสดงอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ DS18B20 ที่ใช้ในการทดลอง ..... 30
2.32 ฮาร์ดแวร์และการต่อวงจรทดลอง ..... 32
2.33 เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำรุ่น FS400A-G1 ..... 35
2.34 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำกับบอร์ด Arduino ..... 36
3.1 แผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ ..... 39
3.2 แผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ ..... 40
3.3 แผนภูมิสำเร็จรูปของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าหอทำความเย็น ..... 42
3.4 หอทำความเย็นใหม่ ..... 44
3.5 แผงขยายฟิล์มในหอทำความเย็นใหม่ ..... 44
3.6 หัวฉีดสเปรย์และแผงขยายฟิล์มภายในหอทำความเย็นใหม่ ..... 45
3.7 พัดลมดูดอากาศด้านบนหอทำความเย็นใหม่ ..... 45
3.8 หอทำความเย็นเดิม ..... 45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.9 ท่อปล่อยน้ำร้อนและแผงขยายฟิล์มชนิดน้ำตกกระแทกภายในหอทำความเย็นเดิม ..... 45
3.10 ลักษณะการติดตั้งท่อเวนทูรีภายในท่อ ..... 46
3.11 แสดงส่วนประกอบเครื่องเก็บผลฝุ่น ..... 47
3.12 หน้ากากอนามัยที่ใช้เป็นผ้ากรองฝุ่นในชุดทดลอง ..... 47
3.13 เครื่องชั่งแบบระเอียด ..... 47
3.14 เครื่องดูดฝุ่น ..... 48
3.15 เครื่องเวนทูรีสำหรับใช้วัดอัตราการไหล ..... 48
3.16 เครื่องวัดความเร็วลม Hotwire Anemometer ..... 49
3.17 เวนทูรี (venture meter) ..... 49
3.18 ชุดทดลองการสอบเทียบค่า ..... 50
3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Q_{th}$ และ $Q_{ac}$ ..... 50
4.1 ภายในหอทำความเย็นเดิม ..... 57
4.2 บ่อพักน้ำ ..... 58
4.3 หอทำความเย็นใหม่ ..... 58
4.4 ชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสีย ..... 59
4.5 Differential Pressure ..... 59
4.6 เครื่องชั่งแบบระเอียด ..... 60
4.7 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 ..... 60
4.8 เซนเซอร์วัดอัตราการไหลรุ่น FS400A-G1 ..... 61
4.9 บอร์ด Arduino UNO R3 ..... 61
4.10 แสดงปั๊มหอยโข่ง AQUA CPM-158 ..... 61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 แสดงปั๊มหอยโข่ง Ho-metech CPM-200 ..... 62
4.12 แสดงปั๊มหอยโข่ง GRUNDFOS Type:CHI4-20A-W-G-BUBV ..... 62
4.13 แสดงปั๊มน้ำอัตโนมัติ Mitsubishi-105QS ..... 62
4.14 แสดงปั๊มน้ำอัตโนมัติ Mitsubishi-EP-305QS ..... 63
4.15 แสดงปั๊มน้ำไดโว่ Mitsubishi Tornado WSP-105S ..... 63
4.16 แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Data logger GRAPHTEC midi LOGGER GL820 ..... 64
4.17 แสดงหัวโพรบของเทอร์โมคัพเปิลชนิด K ..... 64
4.18 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด ..... 65
4.19 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของสภาพอากาศ ..... 65
4.20 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดรุ่น Testo 881 ..... 66
5.1 กราฟแสดงอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนก่อนเข้ากระบวนการทำความเย็น ..... 72
5.2 กราฟแสดงอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังผ่านกระบวนการทำความเย็น ..... 72
5.3 แผนภูมิเปรียบเทียบความหนาแน่นฝุ่นก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ ..... 73
ก.1 แบบอุปกรณ์หอทำความเย็นใหม่ ..... 84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์

| | |
|---|---|
| $A$ | พื้นที่ ($m^2$) |
| $A_a$ | พื้นที่หน้าตัดแหวนระหว่างท่อและทุ่นซึ่งแปรผันตามระดับความสูง ($m^2$) |
| $A_f$ | พื้นที่หน้าตัดของทุ่น ($m^2$) |
| $A_s$ | พื้นที่ผิว ($m^2$) |
| $(A/F)$ | อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง |
| $(A/F)_{stoich}$ | อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่สภาวะเผาไหม้พอดี |
| $C_c$ | ตัวประกอบแก้ไขความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ |
| $C_d$ | ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน |
| $C_p$ | ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K) |
| $C_w$ | ตัวประกอบแก้ไขความดันของน้ำ |
| $D$ | เส้นผ่านศูนย์กลาง (m) |
| $E_g$ | การปล่อยออกรังสีจากก๊าซต่อหน่วยพื้นที่($W/m^2$) |
| $\dot{E}_{in}$ | พลังงานที่ทางเข้า (kJ) |
| $\dot{E}_{out}$ | พลังงานที่ทางออก (kJ) |
| $f$ | สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน |
| $F$ | แรง (N) |
| $F_B$ | แรงลอยตัว (N) |
| $F_D$ | แรงต้านการไหล (N) |
| $F_G$ | แรงโน้มถ่วงของโลก (N) |
| $F_y$ | แรงในทิศทางแกน y (N) |
| $H$ | เฮด (m) |
| $h$ | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$) |
| $h_l$ | การสูญเสียเฮดรอง (m) |
| $h_m$ | การสูญเสียเฮดหลัก (m) |
| $\bar{h}$ | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$) |
| $\bar{h}_L$ | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยตามความยาว ($W/m^2 \cdot K$) |
| $I_\lambda$ | ค่าความเข้มของลำแสง ($W/m^2$) |
| $k$ | สัมประสิทธิ์การสูญเสีย |
| $K_R$ | ค่าคงที่ของมิเตอร์ |
| $L$ | ความหนา (m) |
| $L_e$ | ความยาวรังสีเฉลี่ย (m) |
| $m_{air}$ | มวลของอากาศ (kg) |
| $m_{fuel}$ | มวลของเชื้อเพลิง (kg) |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

| | |
|---|---|
| $\dot{m}$ | อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s) |
| Nu | ค่านัสเซลนัมเบอร์ |
| $P_c$ | ความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ (atm) |
| $P_L$ | ความดันลด (Pa) |
| $P_{out}$ | ความดันทางออก (Pa) |
| $P_w$ | ความดันของน้ำ (atm) |
| $P_x$ | ความดัน ณ ตำแหน่งใดๆ (Pa) |
| Pr | เลขพรันด์เทิล |
| q" | ฟลักซ์ความร้อน ณ จุดใดๆบนพื้นผิว ($W/m^2$) |
| $q_{conv}$ | ฟลักซ์ความร้อนจากการพาความร้อน ($W/m^2$) |
| $q_{net}$ | ฟลักซ์ความร้อนสุทธิ ($W/m^2$) |
| Q | อัตราไหล ($m^3/s$) |
| $\dot{Q}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อน (kW) |
| Re | ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ |
| $Re_D$ | ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลภายนอกท่อ |
| $T_g$ | อุณหภูมิแก๊ส ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $T_m$ | อุณหภูมิเฉลี่ย ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $T_{m,i}$ | อุณหภูมิเฉลี่ยทางเข้า ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $T_{m,o}$ | อุณหภูมิเฉลี่ยทางทางออก ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $T_s$ | อุณหภูมิพื้นผิว ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $T_\infty$ | อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $\Delta T_i$ | ผลต่างของอุณหภูมิทางเข้า ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $\Delta T_{lm}$ | อุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $\Delta T_o$ | ผลต่างของอุณหภูมิทางออก ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| $\Delta T_s$ | ผลต่างของอุณหภูมิผิวกับสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$ หรือ K) |
| U | ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม |
| V | ความเร็ว (m/s) |
| $\dot{m}_w$ | อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s) |
| $\dot{m}_d$ | อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่กระเซ็น (kg/s) |
| $\dot{m}_{da}$ | อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (kg/s) |
| $\dot{m}_v$ | อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำ(kg/s) |
| $\rho$ | ค่าความหนาแน่น ($kg/m^3$) |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1
# บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของการพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet Scrubber) ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย ขั้นตอนของการศึกษา แผนการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และคำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

นับตั้งแต่การเกิดเหตุการณ์ปฏิวัติอุตสาหกรรมในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 18 เป็นต้นมานั้น โลกได้เกิดการขยายตัวทางอุตสาหกรรมอย่างมหาศาล ซึ่งพลังงานหลักที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมนั้น มาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล หรือเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นหลัก ด้วยเหตุนี้เองจึงก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศตามมามากมาย อาทิเช่น ก๊าซไอเสีย และเถ้าฝุ่นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในวิธีการที่ใช้ลดมลพิษทางอากาศได้อย่างดีคือการใช้เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก โดยการให้ไอเสียไหลผ่านละอองน้ำเพื่อชะล้างฝุ่นควันมลพิษ ซึ่งน้ำที่ใช้ชะล้างนั้น จะได้รับความร้อนและฝุ่นมลพิษจากไอเสีย จึงทำให้กลายเป็นน้ำที่มีตะกอนเถ้าลอยปะปนและมีอุณหภูมิสูง จึงต้องถูกนำไปบำบัดก่อนที่บางส่วนจะถูกปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม และส่วนที่เหลือจะถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ชะล้างไอเสียอีกครั้ง ทว่าในปัจจุบันนั้น ระบบบำบัดน้ำหมุนเวียนยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะสามารถลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนให้มีอุณหภูมิไม่เกินกว่า 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการใช้งานที่เหมาะสมของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกและเป็นอุณหภูมิน้ำทิ้งที่กฎหมายกำหนด จึงเป็นเหตุให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมและอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆได้

ทางผู้วิจัยจึงได้นำเอาระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกในโครงการวิจัยเตาพลังงานชีวมวลแบบเชื้อเพลิงบดมาวิจัยและพัฒนาปรับปรุงใหม่ โดยทำการพัฒนาประสิทธิภาพในส่วนของการลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียน ให้มีค่าต่ำกว่าหรือเข้าใกล้ 40 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก โดยการเพิ่มประสิทธิภาพระบบทำความเย็นของน้ำหมุนเวียน
2. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ และการเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านหอทำความเย็น (Cooling Tower) จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนดียิ่งขึ้น
2. อุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนที่ลดลง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกดียิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถลดการระเหยกลายเป็นไอของน้ำชะล้างได้มากขึ้น จึงทำให้ส่วนของน้ำชะล้างที่เป็นของเหลว ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ดักจับฝุ่นมีปริมาณมากขึ้น เมื่ออัตราการไหลของน้ำชะล้างก่อนและหลังการพัฒนาระบบมีค่าเท่ากัน

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. การทดลองมีอัตราพลังงานความร้อนที่ได้จากเตาเผาสูงสุดที่ 300 kW โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้คือแก๊สธรรมชาติชนิดเหลว (LPG) และชีวมวลผงจากขี้เลื่อยไม้ยางพารา
2. ไม่คำนึงถึงความร้อนสูญเสียจากท่อน้ำและอุปกรณ์ต่างๆ
3. การวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาในส่วนของเคมีและชีวภาพ
4. สร้างหอทำความเย็นใหม่ โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศเท่ากับ 60 ตารางเมตร และติดตั้งพัดลมดูดอากาศที่ด้านบนของหอทำความเย็น
5. ศึกษาถึงผลกระทบของการลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียน ต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก
6. ลดอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนให้เข้าใกล้หรือต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ทำการสำรวจถึงปัญหาของระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก
2. กำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์และขอบเขตของการศึกษา
3. ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบทำความเย็นของน้ำหมุนเวียน
4. ทำการศึกษาและออกแบบสร้างชุดทดสอบความหนาแน่นฝุ่นปะปนในไอเสียหลังผ่านการชะล้าง
5. ศึกษาและทำการสอบเทียบอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ
6. ทำการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ
7. ทำการทดลองเพื่อเก็บค่าผลการทดลองต่างๆก่อนการปรับปรุงระบบ
8. ทำการศึกษาและออกแบบสร้างอุปกรณ์หอทำความเย็นอันใหม่
9. ทำการติดตั้งหอทำความเย็นใหม่
10. ทำการทดลองเพื่อเก็บค่าผลการทดลองต่างๆหลังการปรับปรุงระบบ
11. วิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งสรุปผลการปรับปรุงระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการลดอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียน

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงวิธีการในการพัฒนาระบบทำความเย็นของน้ำหมุนเวียน
2. ได้ทราบถึงผลกระทบของอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนต่อประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่น
3. ได้ทราบถึงวิธีการแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าต่างๆในสภาวะการทำงานจริง

## 1.7 ข้อจำกัดของการศึกษา

1. ปัจจัยอื่นๆที่อยู่นอกเหนือการควบคุมของผู้ศึกษา
2. การกำหนดจำนวนครั้ง ระยะเวลาและเงื่อนไขในการทดลองขึ้นอยู่กับการตัดสินใจของทุกกลุ่มที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย มิใช่กลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง
3. งบประมาณที่ได้รับ จำนวนสินค้าขั้นต่ำที่ผู้ผลิตยอมขาย และราคาของอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
4. พื้นที่ในการปฏิบัติการ

## 1.8 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

1. เถ้าลอย คือ เถ้าที่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา เมื่อเผาไหม้จะลอยออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ
2. เชื้อเพลิงชีวมวล คือ เชื้อเพลิงที่ผลิตขึ้นจากสารอินทรีย์ ซึ่งมาจากพืชและสัตว์ อาทิเช่น วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เศษไม้ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet scrubber) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการบำบัดไอเสียก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยการใช้ละอองน้ำเป็นตัวชะล้างไอเสีย
4. หอทำความเย็น (Cooling tower) คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการลดอุณหภูมิน้ำ โดยการใช้อากาศที่เย็นกว่า เข้าแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำร้อน
5. แผงขยายฟิล์ม (Film fill media) คือ อุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ถูกติดตั้งภายในหอทำความเย็น มีหน้าที่เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ และเพิ่มระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อน
6. น้ำกระเซ็นสูญเสีย (Drift loss) คือ น้ำที่สูญเสียไปจากหอทำความเย็นในสถานะของเหลว โดยจะถูกดูดไปพร้อมกับอากาศที่ไหลออกจากหอทำความเย็น
7. น้ำชะล้าง (Scrubbing liquid) คือ น้ำที่ถูกใช้เพื่อชะล้างมลพิษจากไอเสีย จะถูกฉีดพ่นในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก โดยให้สัมผัสโดยตรงกับไอเสียที่ไหลผ่าน ซึ่งทันทีที่สัมผัสกัน น้ำจะดักจับเอามลพิษต่างๆในไอเสีย ทั้งแก๊สพิษและฝุ่นควันต่างๆ รวมถึงการลดอุณหภูมิของไอเสียอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 2
# งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) นายอนันต์ ฟองลมุล [6] ได้ศึกษาและพัฒนา การออกแบบหอทำความเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางสำหรับงานอุตสาหกรรม โดยมีวิธีขั้นพื้นฐานเป็นการคำนวณหาขนาดของส่วนประกอบต่างๆ ของหอทำความเย็น และได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากการออกแบบของบริษัทผลิตหอทำความเย็นรายหนึ่ง จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากการออกแบบของบริษัทผลิตหอทำความเย็นรายหนึ่ง ประกอบด้วยข้อมูลด้านความร้อนและข้อมูลด้านขนาด ผลที่ได้คือข้อมูลด้านความร้อนมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง –25.52 ถึง 10.39 เปอร์เซ็นต์ สำหรับข้อมูลด้านขนาดมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนโดยมีรายละเอียดดังนี้ ขนาดส่วนประกอบภายในหอทำความเย็น ซึ่งประกอบด้วย ขนาดบานเกล็ดช่องลมทางเข้า ขนาดแผงขยายฟิล์มน้ำ ขนาดแผงกันละอองน้ำ และขนาดพัดลมมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 8 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ของผลการคำนวณโดยบริษัทผลิตหอทำความเย็น และขนาดส่วนประกอบภายนอกหอทำความเย็น ซึ่งประกอบด้วย ขนาดปล่องปล่อยลม ขนาดตัวเรือนหอทำความเย็นและขนาดความสูงหอทำความเย็น มีความคลาดเคลื่อน อยู่ในช่วง –8.8 ถึง 9.8 เปอร์เซ็นต์ของผลการคำนวณโดยบริษัทผลิตหอทำความเย็น หรือผลการคำนวณโดยวิธีขั้นพื้นฐานที่ได้ หอทำความเย็นมีขนาดเล็กกว่าและใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าหอทำความเย็นที่ได้จากการคำนวณโดยบริษัท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

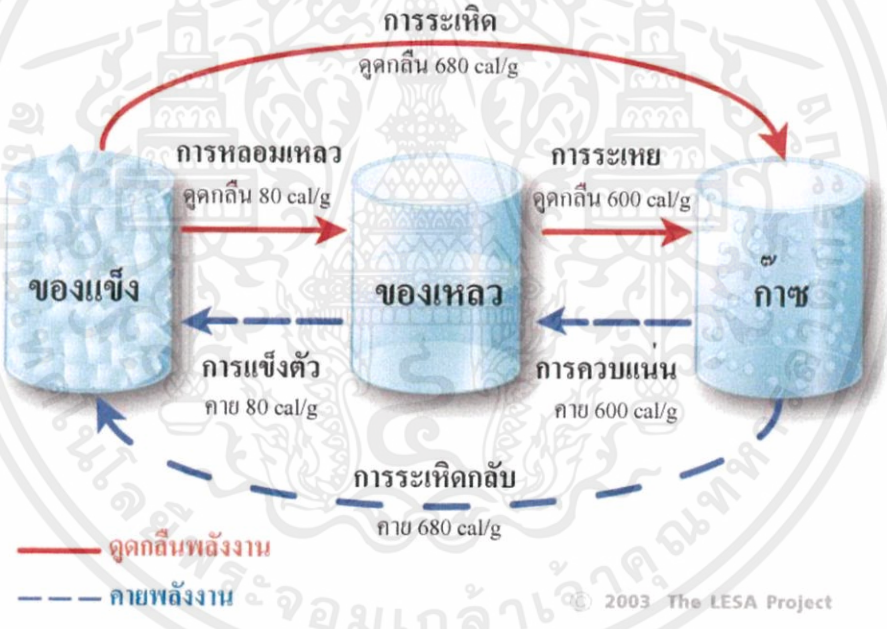
## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 คุณสมบัติของน้ำ [13]

#### 2.2.1.1 การเปลี่ยนสถานะของน้ำ

ไอน้ำ เป็นน้ำที่อยู่ในสถานะแก๊ส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น น้ำในอากาศสามารถเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปสู่อีกสถานะหนึ่ง หรือแปรเปลี่ยนกลับไปมาได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันอากาศ การเปลี่ยนสถานะของน้ำมีการดูดกลืนหรือการคายความร้อน โดยที่ไม่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลง เราเรียกว่า “ความร้อนแฝง” (Latent Heat)

ความร้อนแฝงมีหน่วยวัดเป็นแคลอรี โดย 1 แคลอรี เท่ากับ ปริมาณความร้อนซึ่งทำให้น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 ℃ (ดังนั้นหากเราเพิ่มความร้อน 10 แคลอรีให้กับน้ำ 1 กรัม น้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น 10 ℃)




**รูปที่ 2.1** พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำ [13]

1) การหลอมเหลว-การแข็งตัว

ถ้าเราต้องการให้น้ำแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว เราจะเพิ่มความร้อนให้แก้วซึ่งบรรจุน้ำแข็ง น้ำแข็งดูดกลืนความร้อนนี้ไว้ โดยยังคงรักษาอุณหภูมิ 0 ℃ คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงจนกว่าน้ำแข็งจะละลายหมดก้อน ความร้อนที่ถูกดูดกลืนเข้าไปจะทำลายโครงสร้างผลึกน้ำแข็ง ทำให้น้ำแข็งเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว เราเรียกว่า “การหลอมเหลว” (Melting) ซึ่งต้องการดูดกลืนความร้อนแฝง 80 แคลอรี/กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางกลับกัน เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นน้ำแข็ง เราเรียกว่า “การแข็งตัว” (Freezing) น้ำจะคายความร้อนแฝงออกมา 80 แคลอรี/กรัม เช่นกัน

2) การระเหย-การควบแน่น

เมื่อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ เราเรียกว่า “การระเหย” (Evaporation) ซึ่งต้องการดูดกลืนความร้อนแฝง 600 แคลอรี เพื่อที่จะเปลี่ยน น้ำ 1 กรัมให้กลายเป็นไอน้ำ

ในทางกลับกัน เมื่อไอน้ำกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำ “การควบแน่น” (Condensation) น้ำจะคายความร้อนแฝงออกมา 600 แคลอรี/กรัม เช่นกัน

3) การระเหิด-การระเหิดกลับ

ในบางครั้งน้ำแข็งสามารถเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำได้โดยตรง โดยที่ไม่จำเป็นต้องละลายเป็นของเหลวแล้วระเหยเป็นก๊าซ การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นก๊าซโดยตรงนี้เราเรียกว่า “การระเหิด” (Sublimation) ซึ่งต้องการดูดกลืนความร้อนแฝง 680 แคลอรี เพื่อที่จะเปลี่ยน น้ำแข็ง 1 กรัมให้กลายเป็นไอน้ำ

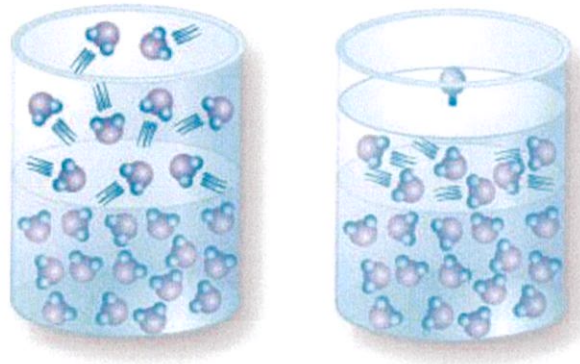
ในทางกลับกัน เมื่อไอน้ำจะเปลี่ยนสถานะเป็นน้ำแข็งโดยตรง เราเรียกว่า “การระเหิดกลับ” (Deposition) ไอน้ำจะคายความร้อนแฝงออกมา 680 แคลอรี/กรัม เช่นกัน

**2.2.1.2 ไอน้ำในอากาศ**

ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำคือ อุณหภูมิ และความดัน ปัจจัยทั้งสองเกี่ยวพันใกล้ชิดจนเปรียบเสมือนด้านหัวและก้อยของเหรียญเดียวกัน เพียงแต่จะเราจะมองที่ด้านไหน การมองว่า “อุณหภูมิ” คือระดับของพลังงาน จะช่วยให้ทำความเข้าใจเรื่องปริมาณไอน้ำในอากาศได้ง่ายขึ้น

ระดับพลังงาน ณ อุณหภูมิห้อง (10 ℃ – 40 ℃) ทำให้โมเลกุลของน้ำสั่น น้ำจึงมีสถานะเป็นของเหลว หากพลังงานเพิ่มขึ้นโมเลกุลของน้ำก็จะสั่นมากขึ้น จนถึงระดับหนึ่งก็จะหลุดลอยเป็นอิสระ น้ำจึงเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นก๊าซ ซึ่งเรียกว่า “ไอน้ำ” ในทางตรงข้ามหากพลังงานลดต่ำลงโมเลกุลของน้ำจะเกาะตัวกันแน่นขึ้นจนเกิดผลึกหรือมีสถานะเป็นของแข็ง เราจึงสรุปได้ว่า “วันที่มีอุณหภูมิสูงมีไอน้ำในอากาศมาก วันที่มีอุณหภูมิต่ำมีไอน้ำในอากาศน้อย” หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า “ฤดูร้อนย่อมมีไอน้ำในอากาศมากกว่าฤดูหนาว” หรือ “บริเวณร้อนชื้นย่อมมีไอน้ำในบรรยากาศมากกว่าบริเวณหนาวเย็นแถบขั้วโลก” ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะมีปริมาณไอน้ำในอากาศ ในจำนวนที่ชี้เฉพาะขึ้นอยู่กับระดับของพลังงาน (อุณหภูมิ) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดแนวโน้มว่ามีไอน้ำในบรรยากาศมากขึ้น และหากอุณหภูมิลดต่ำลงจะมีแนวโน้มว่า ไอน้ำจะเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว หรือของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



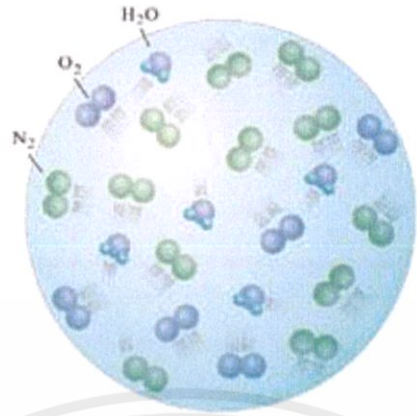
**รูปที่ 2.2** โมเลกุลน้ำในภาชนะ [13]

หากมีกล้องวิเศษที่สามารถมองถังน้ำในรูปที่ 2.2 ด้วยกำลังขยายหนึ่งพันล้านเท่า เราจะมองเห็นโมเลกุลของน้ำอยู่เบียดเสียด วิ่งไปวิ่งมา โดยที่โมเลกุลแต่ละโมเลกุลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแตกต่างกันช้าบ้าง เร็วบ้าง ซึ่งค่าเฉลี่ยของความเร็วในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก็คือ “อุณหภูมิ” ของน้ำ (พลังงานจลน์) ถ้าโมเลกุลที่อยู่บริเวณผิวน้ำมีความเร็วมากพอ ที่จะทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่หลุดออกไปสู่อากาศ โมเลกุลเหล่านี้จะเปลี่ยนสถานะจากน้ำเป็นไอน้ำ ซึ่งก็คือ “การระเหย” นั่นเอง

เมื่อเราปิดฝาถังและดันเข้าไปดังเช่นในรูป 2.2 ทางขวามือ น้ำที่เคยระเหยเป็นไอน้ำ จะถูกควบแน่นกลับเป็นของเหลวอีกครั้งหนึ่ง หาก “จำนวนโมเลกุลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอน้ำจะเท่ากับจำนวนโมเลกุลของไอน้ำที่ควบแน่นกลับเป็นน้ำพอดี” เราเรียกว่า “อากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ” ในทางกลับกันหากเราดึงฝาเปิดออก ไอน้ำในอากาศซึ่งเคยอยู่ในถังจะหนีออกมา ทำให้จำนวนโมเลกุลของไอน้ำที่เหลืออยู่ข้างในน้อยลง อากาศจึงไม่เกิดการอิ่มตัว ปัจจัยในธรรมชาติที่ทำให้อากาศไม่เกิดการอิ่มตัวคือ กระแสลม เมื่ออากาศเสียดสีกับพื้นน้ำ โมเลกุลของอากาศจะส่งถ่ายพลังงานไปยังโมเลกุลของน้ำ หากมีกระแสลมแรง พลังงานที่ส่งถ่ายก็จะมาก ทำให้โมเลกุลของน้ำสั่นหลุดเป็นอิสระเปลี่ยนสถานะกลายเป็นก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.3 ความดันไอน้ำ




**รูปที่ 2.3** โมเลกุลของก๊าซต่างๆ ในกลุ่มอากาศ [13]

อากาศมีแรงดันออกทุกทิศทุกทาง ความดันนี้เกิดขึ้นจากการพุ่งชนกันของโมเลกุลของก๊าซ ถ้าสมมติให้กลุ่มอากาศ (Air Parcel) ในรูปที่ 2.3 มีความกดอากาศ 1,000 มิลลิบาร์ มีองค์ประกอบเป็นก๊าซไนโตรเจน 78% ก๊าซออกซิเจน 21% และไอน้ำประมาณ 1% ด้วยสัดส่วนนี้ ก๊าซไนโตรเจนทำให้เกิดแรงดัน 780 มิลลิบาร์ ก๊าซไนโตรเจนทำให้เกิดแรงดัน 210 มิลลิบาร์และไอน้ำทำให้เกิดแรงดัน 10 มิลลิบาร์ จะเห็นได้ว่า “ความดันไอน้ำ” (Vapor Pressure) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความดันก๊าซทั้งหมด อย่างไรก็ตามหากเราเพิ่มความดันให้กับกลุ่มอากาศ โดยการเพิ่มปริมาณอากาศในลักษณะเดียวกับการเป่าลูกโป่ง ทำให้จำนวนโมเลกุลของไอน้ำอากาศมากขึ้น ความดันไอน้ำมากขึ้นย่อมทำให้อุณหภูมิสูงตามขึ้นไปตามกฎของก๊าซ

เราจึงสรุปได้ว่า “อุณหภูมิของอากาศแปรผันตามความดันไอน้ำหรือปริมาณของไอน้ำในอากาศ” ดังนั้น “อากาศชื้นย่อมมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศแห้ง”

### 2.2.1.4 ความชื้น

ความชื้น (Humidity) หมายถึง จำนวนไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ ความชื้นของอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความดัน และอุณหภูมิ

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) หมายถึง “อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศ ต่อ ปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว” หรือ “อัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริง ต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว” โดยค่าความชื้นสัมพัทธ์แสดงอยู่ในรูปของร้อยละ (%)

ปริมาณของไอน้ำในอากาศขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ อากาศร้อนมีปริมาณไอน้ำมากกว่าอากาศเย็น ดังนั้นหากเราลดอุณหภูมิของอากาศจนถึงจุดๆ หนึ่ง จะเกิดภาวะ “อากาศอิ่มตัว” (Saturated Air) อากาศจะไม่สามารถคงปริมาณไอน้ำไว้ได้มากกว่านี้ (อากาศมีความชื้นสัมพัทธ์ 100%) ดังนั้นหากอุณหภูมิยังคงลดต่ำลงอีก ไอน้ำจะควบแน่นเป็นของเหลว เนื่องจากไม่มีพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงพอจะทำให้โมเลกุลหลุดลอยอิสระ อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการควบแน่นนี้เรียกว่า “จุดน้ำค้าง” (Dew Point) โดย “จุดน้ำค้างของอากาศชื้นมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดน้ำค้างของอากาศแห้ง”

**2.2.2 หอทำความเย็น (Cooling Tower) [11][6][9]**

หอทำความเย็นหรือหอระบายความร้อน (Cooling Tower) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการระบายความร้อนออกจากน้ำร้อนในระบบการทำความเย็น หรือจากกระบวนการผลิต เพื่อทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงและนำกลับมาเป็นน้ำหมุนเวียนใช้ต่อไป การระบายความร้อนในหอทำความเย็นจะอาศัยการถ่ายโอนความร้อนโดยใช้วิธีการระเหยตัวของน้ำ (Evaporation) สู่อากาศบรรยากาศ เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนจะเกิดขึ้นเสมอเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศ

หอทำความเย็นเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการฉีดน้ำที่มีอุณหภูมิสูงให้กระจายตัวออกเป็นละอองเล็กๆ ตกผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (Baffles or Fill Material) ละอองน้ำเหล่านี้จะเกาะตัวกับแผงขยายฟิล์มน้ำ ทำให้เกิดเป็นพื้นที่เปียก ซึ่งจะสัมผัสกับอากาศที่ผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ ก่อให้เกิดกระบวนการถ่ายโอนความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) ระหว่างน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำขณะเดียวกันนั้นละอองน้ำบางส่วนก็จะระเหยตัวกลายเป็นไอน้ำไปในอากาศ เพราะอากาศในขณะนั้นยังมีสภาพไม่อิ่มตัว น้ำจึงสามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ซึ่งกระบวนการระเหยกลายเป็นไอของละอองน้ำนี้จะทำให้น้ำสูญเสียความร้อนแฝง (Latent Heat) ดังนั้นละอองน้ำที่ระเหยตัวจึงดึงความร้อนจากปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ อาจกล่าวได้ว่า กระบวนการถ่ายโอนความร้อนภายในหอทำความเย็น แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) การถ่ายโอนความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) จากน้ำที่มีอุณหภูมิสูง ไปสู่อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

2) การถ่ายโอนความร้อนแฝง (Latent Heat) จากการระเหยตัวของน้ำไปสู่อากาศที่ยังไม่อิ่มตัว

ปัจจัยที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของทำความเย็นได้ มีดังนี้

1) เพิ่มการแตกตัวของละอองน้ำทำให้พื้นที่ผิวของละอองน้ำในการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มมากขึ้น

2) เพิ่มพื้นที่แผงขยายฟิล์มน้ำทำให้น้ำมีโอกาสสัมผัสกับอากาศมากขึ้น

3) เพิ่มปริมาณอากาศ เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อน

**2.2.2.1 การแบ่งชนิดของหอทำความเย็น [9]**

ผู้ผลิตหอทำความเย็นจะผลิตหอทำความเย็นหลายชนิดแตกต่างกัน ให้ผู้ใช้เลือกใช้ชนิดที่เหมาะสมกับงาน ของตนได้โดยแบ่งได้ประมาณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) แบ่งตามลักษณะการไหลของอากาศ

1.1) ชนิดอากาศไหลสวนทางกับน้ำ (Counter Flow)

การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นโดยที่ทิศทางการไหลของน้ำกับอากาศอยู่ในทิศทางที่สวนทางกัน

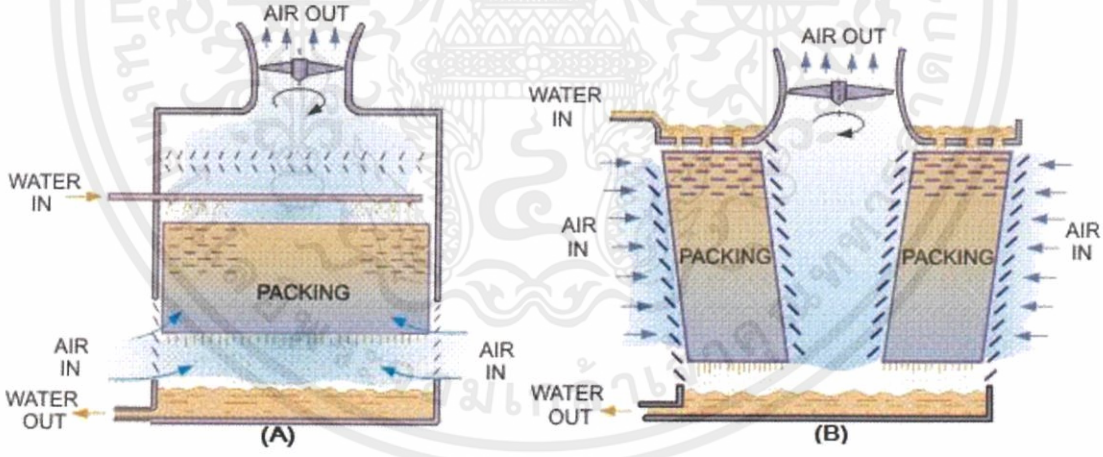
1.2.) ชนิดอากาศไหลขวางทางกับน้ำ (Cross Flow)

การแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดขึ้นโดยที่ทิศทางการไหลของน้ำตัดกับทิศทางที่อากาศไหลเข้าหอทำความเย็น

ชนิดอากาศไหลสวนทางกับน้ำ ได้เปรียบทางด้าน ราคา สมรรถนะสูง ส่วนชนิดอากาศไหลขวางทางกับน้ำ ได้เปรียบทางด้านแรงต้านการไหลของอากาศต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่อากาศไหลเข้ามากกว่า สิ่งสกปรกที่อุดตันมีผลต่อการทำงานน้อยกว่า และการสูญเสียของน้ำ เนื่องจากการกระเซ็น (Drift Loss) ต่ำ

2) แบ่งตามลักษณะการทำงานของพัดลม

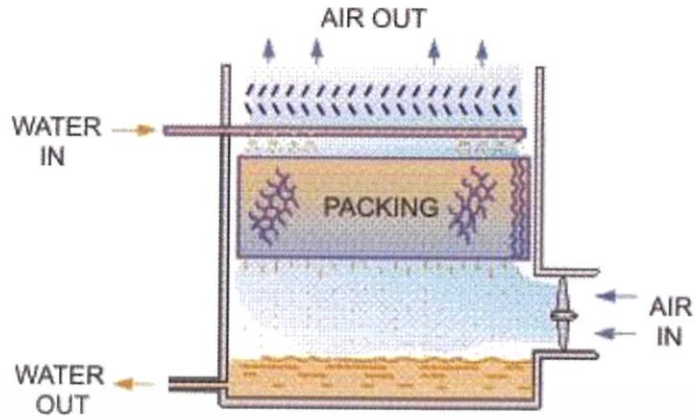
2.1) ชนิดพัดลมดูดอากาศไหลผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (Induced Draft) ชนิดนี้ส่วนใหญ่จะออกแบบให้อากาศชื้นไหลผ่านพัดลม ชุดขับเคลื่อนพัดลม ผลทำให้อุปกรณ์เหล่านั้นมีอายุการใช้งานสั้นลง



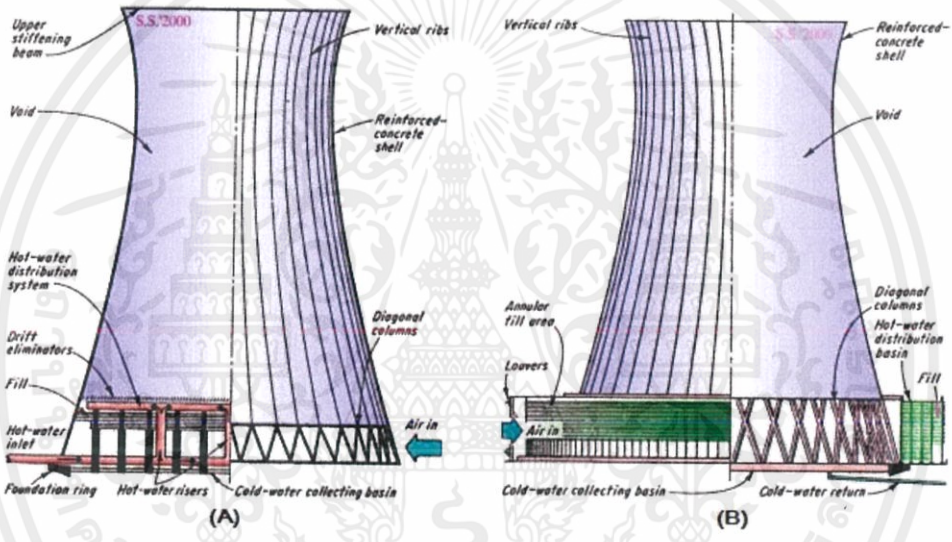

**รูปที่ 2.4** Induced Draft Cooling Tower (A) Counter Flow (B) Cross Flow [18]

2.2) ชนิดพัดลมเป่าอากาศไหลผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (Forced Draft) ชนิดนี้อากาศชื้นไม่ไหลผ่านชุดพัดลม และระบบขับเคลื่อนอายุการใช้งานของอุปกรณ์เหล่านี้จึงยาวกว่า ขณะทำงานอากาศไหลผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำไม่สม่ำเสมอ ทำให้สมรรถนะต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.5** Forced Draft Cooling Tower [18]




**รูปที่ 2.6** Natural Draft Cooling Tower (A) Counter Flow (B) Cross Flow [10]

2.3) ชนิดอากาศไหลตามธรรมชาติ (Natural Draft) ชนิดนี้ใช้หลักการอากาศร้อนลอยตัวขึ้น อากาศเย็นไหลเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการไหลของอากาศ จึงไม่ต้องใช้พลังงานขับเคลื่อนอากาศ ข้อเสียเปรียบคือ ความสามารถต่ำ, ตัวใหญ่, ราคาแพง

3) แบ่งตามชนิดของแผงขยายฟิล์มน้ำ

3.1) ชนิดเป็นแผ่นฟิล์ม (Film Type) แผงขยายฟิล์มน้ำชนิดนี้ทำจากพลาสติกแผ่นบาง รีดเป็นลอนให้มีพื้นที่มาก น้ำที่ไหลผ่านถูกกระจายออกเป็นแผ่นบางและไหลเกาะติดไปกับแผงขยายฟิล์มน้ำ เม็ดน้ำหลุดลอยไปกับอากาศ (Drift Loss) น้อย ข้อเสียมีช่องทางอากาศและน้ำไหลเล็กจึงอุดตันได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2) ชนิดน้ำตกกระแทก (Splash Type) ชนิดนี้น้ำตกกระแทกแผงขยายฟิล์มน้ำ น้ำจะแตกกระจายเป็นเม็ดเล็กๆ เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวระบายความร้อนวิธีหนึ่ง เม็ดน้ำจะลอยอยู่ในกระแสการไหลของอากาศ การสูญเสียน้ำเนื่องจากกระเซ็นจึงสูง ข้อดีคือช่องทางอากาศไหลใหญ่ อุดตันยาก

4) แบ่งตามระบบน้ำ

4.1) ระบบเปิด (Open Type) น้ำระบายความร้อน สัมผัสกับอากาศโดยตรง น้ำระเหยตัวเพื่อระบายความร้อน สิ่งสกปรกที่ปนมากับน้ำและอากาศ ถูกสะสมในหอทำความน้ำเย็น จึงต้องควบคุมคุณภาพน้ำโดยการถ่ายทิ้ง เติมสารเคมี หรือใช้ไฟฟ้าสลายตะกัน ฯลฯ

4.2) ระบบปิด (Closed Type) ความร้อนของน้ำในระบบถ่ายเทผ่านผนังของระบบไปสู่น้ำและอากาศที่อยู่ภายนอก น้ำในระบบไม่ระเหยตัว ไม่สัมผัสกับอากาศ น้ำจึงสะอาดอยู่ตลอดเวลา ไม่สร้างปัญหาการอุดตันในระบบ ข้อเสียของระบบนี้ คือ มีขนาดใหญ่, ราคาแพง, การทำงานซับซ้อน

**2.2.2.2 กลไกการถ่ายเทความร้อนในหอทำความเย็น [6]**

การที่อุณหภูมิของน้ำลดลงนั้นเนื่องมาจากการที่มีน้ำบางส่วนระเหยแล้วดูดความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยจากน้ำส่วนที่เหลือ ทำให้อุณหภูมิลดลงและการลดลงของอุณหภูมิของน้ำอีกส่วนหนึ่งจะเกิดจากการถ่ายโอนความร้อนสัมผัสระหว่างหยดน้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของอากาศ ไอน้ำจากการระเหยจะถูกอากาศที่ไหลผ่านหอทำความเย็นพาออกไป โดยจะมีการถ่ายโอนความร้อนออกจากหยดน้ำดังนี้

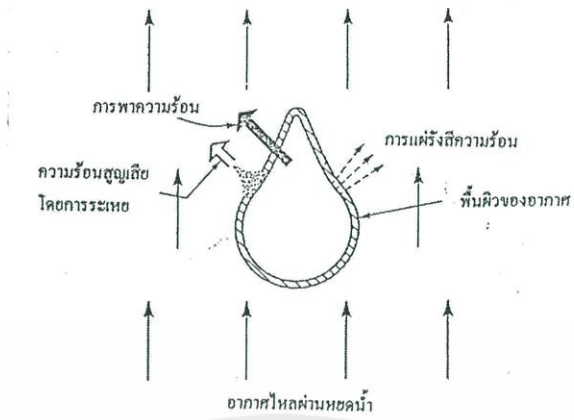
1) การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสีจากผิวรอบๆ ของหยดน้ำ ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนแบบนี้เกิดขึ้นน้อยมาก โดยปกติการคำนวณจะไม่นำความร้อนส่วนนี้มาคิด

2) การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อนของหยดน้ำ ซึ่งการถ่ายโอนความร้อนแบบนี้เกิดขึ้นน้อยมากเช่นเดียวกับข้อแรก และไม่นำมาคิดในการคำนวณ

3) การถ่ายโอนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งการค่าถ่ายโอนความร้อนจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความแตกต่างระหว่างอากาศกับน้ำ โดยปกติค่าการถ่ายโอนความร้อน โดยการพาความร้อนจะมีค่าประมาณ 25-30% ของความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในหอทำน้ำเย็น

4) การถ่ายโอนความร้อนจากการระเหย เป็นความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความดันไอ (หรือความชื้นสัมบูรณ์) ระหว่างฟิล์มอากาศรอบหยดน้ำกับอากาศที่ไหลผ่าน ซึ่งในหอทำความเย็นจะมีค่าการถ่ายโอนความร้อนจากการระเหยประมาณ 70-75% ของความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในหอทำความเย็น

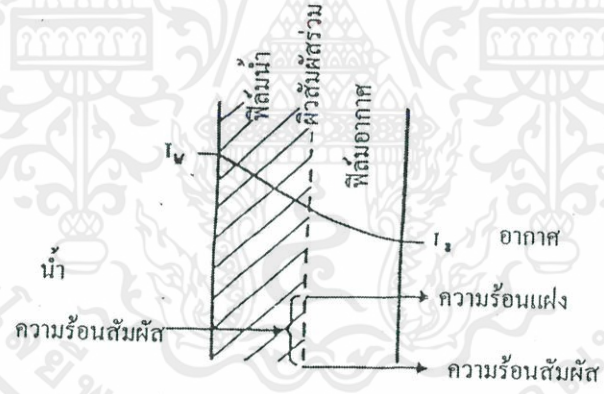
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.7** การถ่ายเทความร้อนของหยดน้ำ [6]

### 2.2.2.3 ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในหอทำความเย็นชนิดพัดลมดูด [6]

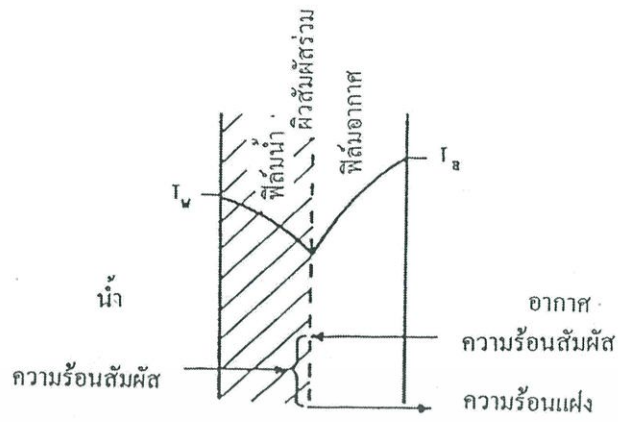
กระบวนการถ่ายโอนความร้อนและมวลที่เกิดขึ้นภายในหอทำความเย็น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน การถ่ายโอนความร้อนจะเป็นกระบวนการแบบพาความร้อนและการถ่ายโอนมวลเป็นกระบวนการแบบการระเหยสามารถใช้ Whitman Two-Film Theory มาอธิบายปรากฏการณ์นี้ โดยแบ่งพิจารณาหอทำความเย็นเป็นสองส่วน




**รูปที่ 2.8** ภาวะตอนบนของหอทำความชนิดพัดลมดูด [6]

ในส่วนบนของหอทำความเย็นดังรูปที่ 2.8 เมื่อน้ำร้อนเข้าทางตอนบนของหอจะถูกกระจายตัวให้สัมผัสโดยตรงกับอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ในเวลาเดียวกันความดันไอน้ำของฟิล์มน้ำสูงกว่าความดันไอน้ำทางด้านฟิล์มอากาศ ดังนั้นด้วยสาเหตุความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันไอน้ำนี้เองจะเป็นแรงขับในทิศทางตามกัน กล่าวคือ จะมีการถ่ายโอนความร้อนแฝง และความร้อนสัมผัสจากน้ำไปยังอากาศจึงทำให้น้ำมีอุณหภูมิลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



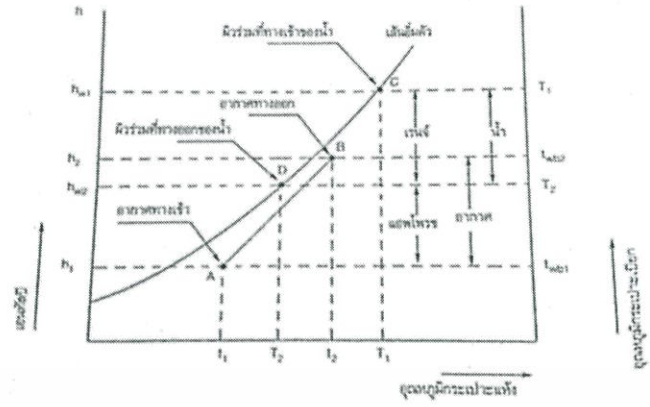

**รูปที่ 2.9** ภาวะตอนล่างของหอทำความเย็นชนิดพัดลมดูด [6]

สำหรับส่วนล่างของหอทำความเย็นดังภาพที่ 2.9 น้ำซึ่งอุณหภูมิลดลงแล้วอาจจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า หรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ ดังนั้น อากาศจึงถ่ายโอนความร้อนสัมผัสไปยังน้ำและในขณะเดียวกันอากาศตอนล่างยังมีความชื้นต่ำอยู่ จึงเป็นสาเหตุให้มีการถ่ายโอนมวล (ความร้อนแฝง) จากน้ำไปสู่อากาศ ทำให้แรงขับทั้งสองจึงมีทิศทางตรงกันข้ามกัน จะเห็นว่าปรากฏการณ์นี้เป็นลักษณะเดียวกับคำนิยามของอุณหภูมิกระเปาะเปียก หลังจากที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำและอากาศแล้ว อุณหภูมิของน้ำก็จะลดลง

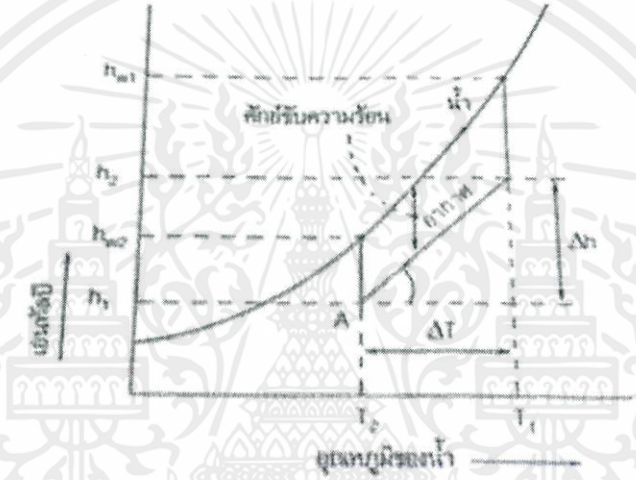
**2.2.2.4 แผนภาพ t-h แสดงสภาวะของอากาศและน้ำขณะอยู่ในหอทำความเย็น [11]**

การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนกับอากาศ จะทำให้สภาวะของอากาศและน้ำเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 2.10 บนเส้นสภาวะของอากาศ AB อากาศเข้าหอทำความเย็นที่จุด A ที่อุณหภูมิ $t_1$ และออกที่จุด B ที่อุณหภูมิ $t_2$ สำหรับเส้นสภาวะของน้ำให้พิจารณาบนเส้นอิ่มตัวของอากาศ (เส้นโค้งด้านซ้ายสุด) จุด C และ D เป็นจุดที่น้ำไหลเข้าและออกจากหอทำความเย็นที่อุณหภูมิ $T_1$ และ $T_2$ ตามลำดับ ผลต่างระหว่าง $T_1$ และ $T_2$ เรียกว่า “เรนจ์” (Range) แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนสัมผัส และผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำทางออก ($T_2$) กับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า ($t_{wb1}$) เรียกว่า “แอพโพรช” (Approach) แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแฝง และจะเห็นได้ว่าการที่จะแปลงจากรูปที่ 2.10 ไปเป็นแผนภาพการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Diagram) โดยการปรับเส้นสภาวะอากาศให้คร่อมอยู่ระหว่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของน้ำ ดังรูปที่ 2.11 และคร่อมอยู่ระหว่างเอนทัลปีทางออกและทางเข้าของอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.10** สภาวะของอากาศและน้ำขณะถ่ายโอนความร้อนภายในหอทำความเย็น [11]




**รูปที่ 2.11** แผนภาพการถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำและอากาศ [11]

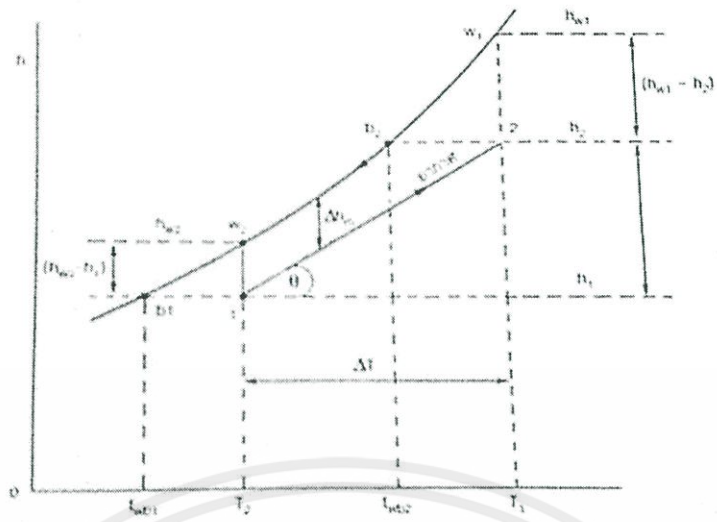
จะพบว่าบนแผนภาพการถ่ายโอนความร้อนในรูปที่ 2.11 นี้

1) แกนแนวนอนจะเปลี่ยนจากแกนอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศเป็นอุณหภูมิของน้ำ แต่ยังคงแสดงในพจน์ของเอนทัลปีของอากาศ และจะไม่สามารถแสดงเป็นอุณหภูมิของอากาศได้

2) เส้นสภาวะของอากาศ (AB) จะแสดงอยู่ระหว่างค่าเอนทัลปีทางเข้า ($h_1$) และค่าเอนทัลปีทางออก ($h_2$) ที่จุด A และ B ตามลำดับ

3) ผลต่างของเอนทัลปีระหว่างอากาศและน้ำสามารถทราบได้โดยตรง ทั้งนี้ขึ้นอยู่ว่าขณะนั้นน้ำมีอุณหภูมิเท่าใด ผลต่างของเอนทัลปีระหว่างเส้นสภาวะของน้ำกับเส้นสภาวะของอากาศเรียกว่า “ศักย์ขับความร้อน” (Driving Force) ศักย์ขับความร้อนที่ตำแหน่งหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่ตำแหน่งนั้น ค่าเฉลี่ยของศักย์ขับความร้อนที่ทุกๆ ตำแหน่งตามความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำเรียกว่า ศักย์ขับความร้อนเฉลี่ย (Mean Driving Force), $\Delta h_m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.12** ศักย์ขับความร้อนบนแผนภาพการถ่ายโอน [11]

### 2.2.2.5 การถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำและอากาศ [11]

ในรูปที่ 2.12 เป็นแผนภาพแสดงสภาวะของอากาศและน้ำขณะถ่ายโอนความร้อนภายในแผงขยายฟิล์มน้ำ โดยกำหนดให้อากาศไหลเข้าที่หน้าตัด 1 และออกที่หน้าตัด 2 เส้นตรง 1-2 คือ เส้นสภาวะของอากาศ ลากเส้นแนวดิ่งผ่านจุด 1 และ 2 ไปตัดกับเส้นโค้งอิ่มตัว (เส้นสภาวะของน้ำ) ได้จุด $w_1$ และ $w_2$ ตามลำดับ ที่จุด $w_1$ และ $w_2$ นี้อากาศจะอยู่ในสภาวะอิ่มตัว และมีเอนทัลปีเท่ากับ $h_{w1}$ และ $h_{w2}$ ตามลำดับ ถ้าลากเส้นตรงแนวนอนผ่านจุด 1 และ 2 และเลยไปตัดกับเส้นโค้งอิ่มตัวที่จุด $b_1$ และ $b_2$ ตามลำดับ ที่จุด $b_1$ และ $b_2$ ที่ได้นี้จะมีอุณหภูมิเท่ากับ $t_{wb1}$ และ $t_{wb2}$ ของอากาศในสภาวะ 1 และ 2 ตามลำดับ ศักย์ขับความร้อนที่ตำแหน่งหน้าตัดทางเข้าของน้ำเท่ากับ $(h_{w1}-h_2)$ และหน้าตัดทางออกของน้ำเท่ากับ $(h_{w2}-h_1)$

### 2.2.2.6 อัตราส่วนของอัตราการไหล L/G ในหอทำความเย็น [11]

จากหัวข้อ 2.2.2.4 “แผนภาพ t-h แสดงสภาวะของอากาศและน้ำขณะอยู่ในหอทำความเย็น” จะทำให้เราเขียนเส้นสภาวะของอากาศได้ (เส้นตรง AB) โดยอาศัยสมดุลของพลังงาน

ความร้อนที่อากาศรับไว้ได้ = ความร้อนสัมผัสที่คายออกจากน้ำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวของแผงขยายฟิล์มน้ำ

$$G(h_2-h_1)=Lc_LDT=L(h_{w1}-h_{w2}) \tag{2.1}$$

$$\frac{L}{G}=\frac{h_2-h_1}{h_{w1}-h_{w2}} \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet Scrubber) [15][2]

เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (Wet Scrubber) หรือ สครับเบอร์ (Scrubber) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกำจัดแก๊สและไอ (Gas and Vapor) ตลอดจนอนุภาคที่มีขนาดเล็ก โดยใช้ของเหลว เช่น น้ำเป็นตัวดักจับด้วยการพ่นฉีดของเหลวหรือน้ำให้เป็นละอองฝอยขนาดเล็กให้กระจายไปปะทะกับกระแสแก๊ส โดยอาศัยกลไกของการสกัดกั้น การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย และการแพร่ จากนั้นหยดน้ำที่จับกับอนุภาคจะถูกแยกโดยแรงโน้มถ่วงหรือแรงเหวี่ยง

การดักจับฝุ่นด้วยเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก มี 3 ขั้นตอน คือ

1) อนุภาคสัมผัสและดักจับด้วยหยดของเหลว

2) แยกหยดของเหลวออกจากกระแสก๊าซ

3) บำบัดของเหลว (น้ำเสีย) ก่อนระบายทิ้ง

เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

1) พัดลมดูดอากาศ (Exhaust Fan) ทำหน้าที่ดูดอากาศเสียเข้าสู่สครับเบอร์

2) ปั๊ม (Circulation Pump) ทำหน้าที่ดูดน้ำจากถังหมุนเวียนน้ำไปสู่หัวฉีด (Nozzle) และฉีดเป็นละอองฝอยไปทั่วทั้งสครับเบอร์

3) ตัวสครับเบอร์ (Scrubber Main Body) ประกอบไปด้วย

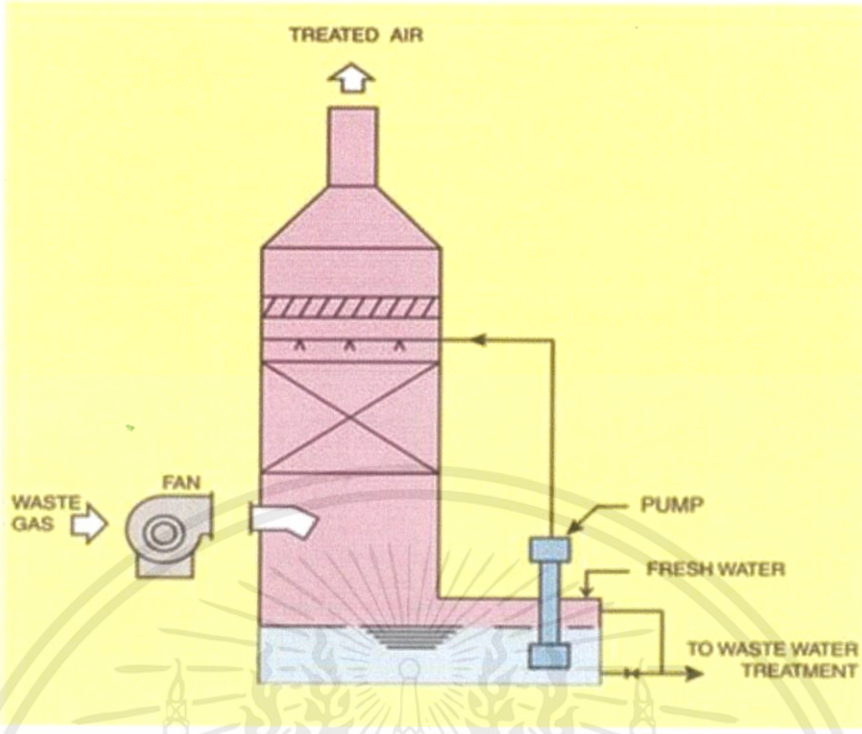
3.1) ตัวเพิ่มพื้นที่ในการกระจายตัวของแก๊ส (Scrubber Tower Packing) ทำหน้าที่ในการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับของเหลว

3.2) หัวฉีดสเปรย์ (Spray Nozzle) ทำหน้าที่ฉีดน้ำให้ทั่วถึงอย่างสม่ำเสมอภายในตัว สครับเบอร์

3.3) ตัวดักจับละอองน้ำ (Mist Separator) ทำหน้าที่ดักจับละอองน้ำที่เกิดจากการฉีดสเปรย์ในสครับเบอร์ไม่ให้หลุดออกไปภายนอกเพราะจะนำพาแก๊สเสียปนออกไปด้วย

4) ถังหมุนเวียนน้ำ (Circulation Tank) ทำหน้าที่เก็บกักน้ำไว้สำหรับหมุนเวียนใช้ในระบบ

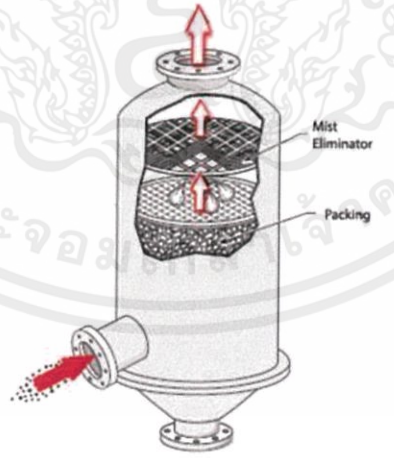
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.13** Wet Scrubber [15]

### 2.2.3.1 ชนิดของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก [2]

1) สครับเบอร์แบบสเปรย์ (Spray Tower Scrubbers) มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ปกติก๊าซไหลสวนทิศกับของเหลว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานต่ำ เหมาะกับฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และสามารถกำจัดก๊าซมลพิษได้อีกด้วย โดยส่วนบนของหอมีแผ่นดักละอองน้ำ (D e m i s t e r)

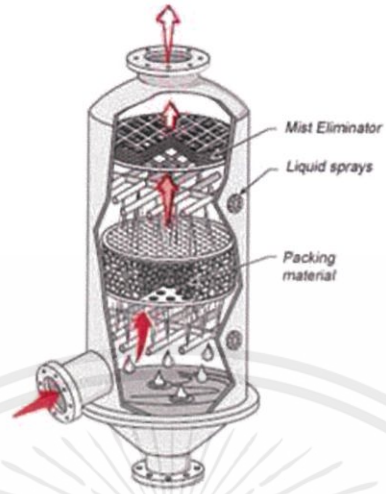



**รูปที่ 2.14** สครับเบอร์แบบสเปรย์ [8]

2) สครับเบอร์แบบหอบรรจุหรือหอแพค (Packed Bed Scrubbers) ปกตินิยมใช้กำจัดก๊าซและไอแต่สามารถจับฝุ่นได้ด้วย เป็นหอที่บรรจุชิ้นวัสดุไว้เต็มแล้วฉีดของเหลวให้ไหลผ่านวัสดุลง

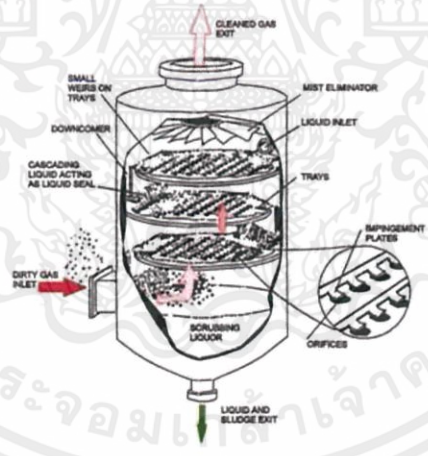
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านล่าง กระแสก๊าซจะไหลสวนทิศกับของเหลว อนุภาคหรือก๊าซจะชนและแพร่ผ่านฟิล์มของเหลวที่เคลือบวัสดุอยู่แล้วไหลสู่ด้านล่าง




**รูปที่ 2.15** สครับเบอร์แบบหอบรรจุ [8]

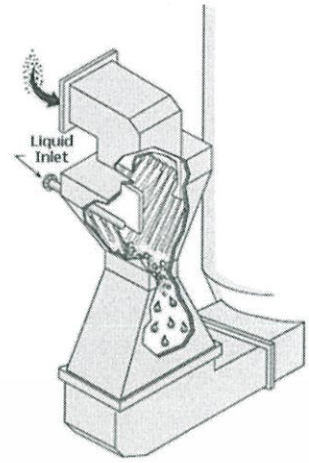
3) สครับเบอร์แบบถาดหรือเพลท (Tray or Plate Scrubbers) เป็นหอที่มีเพลทที่ถูกเจาะรูวางอยู่ภายใน ก๊าซจะไหลสวนทางแล้วผ่านรูของเพลท โดยจะให้ของเหลวไหลผ่านเพลทลงมาด้านล่าง มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคปานกลาง เหมาะสมกับฝุ่นที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน




**รูปที่ 2.16** สครับเบอร์แบบถาดหรือเพลท [8]

4) สครับเบอร์แบบเวนทูรี (Venturi Scrubbers) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้มากที่สุดชนิดหนึ่ง เนื่องจากประสิทธิภาพสูงมากในการรับอนุภาคขนาดเล็กโดยเฉพาะเล็กกว่า 1 ไมครอน และสามารถรับก๊าซได้ โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ส่วนคอคอด (Converging Section) ส่วนคอ (Throat) และส่วนขยาย (Diverging Section) การทำงานของเวนทูรีสครับเบอร์ คือก๊าซที่ไหลเข้าจะมีของเหลวพ่นตรงส่วนคอด หรือส่วนคอ ซึ่งเป็นช่วงที่ก๊าซมีความเร็วสูง 60-244 m/s ก๊าซที่ไหลด้วยความเร็วสูงจะทำให้ของเหลวแตกออกเป็นละอองฝอย และมีความเร็วสูง ทำให้ประสิทธิภาพของสครับเบอร์แบบเวนทูรีมีค่าสูง แต่จะมีค่าความดันสูญเสียสูงตามด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



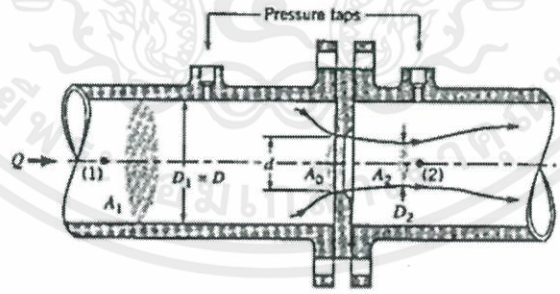

**รูปที่ 2.17** สครับเบอร์แบบเวนทูรี [8]

### 2.2.4 หลักการของเครื่องมือวัดอัตราการไหล [4]

มิเตอร์วัดอัตราการไหลมีหลายประเภทที่นิยมใช้คือ Orifice Meter และ Venturi Meter ซึ่งทั้ง 2 แบบ ทำงานโดยใช้หลักการลดพื้นที่หน้าตัดของการไหลทำให้ความเร็วของการไหลสูงขึ้นพร้อมกับความดันที่ลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ลดลงและความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดเป็นแนวคิดหลักของของการวัดอัตราการไหล

#### 2.2.4.1 Orifice Meter

ปกติจะติดตั้งไว้ระหว่างท่อที่มีของไหลไหลผ่านและตัว Orifice Meter จะใช้หน้าแปลนที่มีรูติดตั้งไว้โดยการแทรกไว้ระหว่างตัวเรือน Orifice เพื่อทำให้ความดันลดลงและเจาะช่องเพื่อต่อ Port วัดความดันที่ทางเข้าและออกของแผ่น Orifice

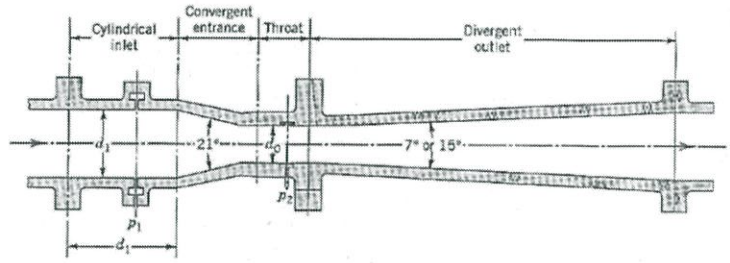



**รูปที่ 2.18** Orifice meter [4]

#### 2.2.4.2 Venturi Meter

ใช้หลักการเดียวกันกับ Orifice Meter แต่ Venturi Meter ถูกออกแบบมาเพื่อลดความดันให้สูญเสียไปน้อยที่สุดโดยการค่อยๆลดขนาดหน้าตัดท่อและค่อยๆขยายหน้าตัดท่อออกดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.19** Venturi Meter [4]

2.2.4.3 **สมการสำหรับคำนวณหาอัตราการไหล**

สมการสำหรับคำนวณหาอัตราการไหล Orifice meter และ Venturi meter โดยประยุกต์มาจากสมการของ Bernoulli

$$\frac{P_2}{\rho_2 g}+\frac{v_2^{\,2}}{2g}+z_2=\frac{P_1}{\rho_1 g}+\frac{v_1^{\,2}}{2g}+z_1 \qquad (2.3)$$

โดยกำหนดให้

1) ไหลในแนวความสูงเดียวกัน $z_1 = z_2$

2) เป็นของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) $\rho_1 = \rho_2$

3) เป็นการไหลแบบต่อเนื่อง $Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$

จาก (2.3) ; $$\frac{P_2}{\rho_2 g}+\frac{v_2^{\,2}}{2g}=\frac{P_1}{\rho_1 g}+\frac{v_1^{\,2}}{2g} \qquad (2.4)$$

จากสมการอัตราไหล ; $$v_1=\frac{A_2}{A_1}v_2 \qquad (2.5)$$

แทน(2.4) ลง (2.5) ; $$v_2=\sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho(1-(\frac{A_2}{A_1})^2)}}=\sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho(1-(\frac{D_2}{D_1})^4)}} \qquad (2.6)$$

โดยที่ ; $$Q=A_2 v_2=A_2\sqrt{\frac{2(P_1-P_2)}{\rho(1-(\frac{D_2}{D_1})^4)}} \qquad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ;

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2\rho_2 gh}{\rho_1(1-(\frac{D_2}{D_1})^4)}} \quad (2.8)$$

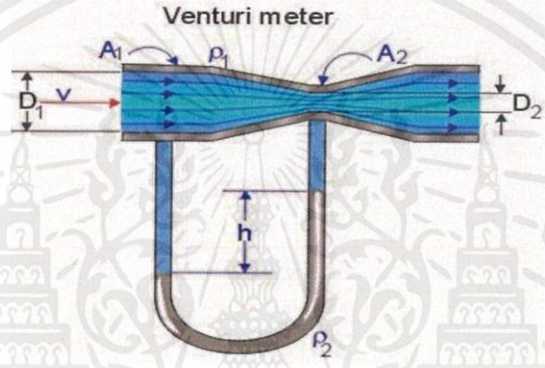
เมื่อ $h$ คือความสูงอ่านจากมานอมิเตอร์( m )

$D_1, D_2$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ( m )

$\rho_1$ คือความหนาแน่นของอากาศภายในท่อ $(\mathrm{kg/m^3})$

$\rho_2$ คือความหนาแน่นของของเหลวในมานอมิเตอร์ $(\mathrm{kg/m^3})$

$g$ คือแรงดึงดูดของโลก $(\mathrm{m^2/s})$




**รูปที่ 2.20** เครื่อง**เวนทูรี**สำหรับใช้วัดอัตราการไหล[20]

การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องมือวัดอัตราการไหล Venturi Meter และ Orifice Meter

$$C_D = \frac{Q_{actual}}{Q_{th}} \quad (2.9)$$

2.2.4.3.1 Density Of Air Calculations [15]

คำนวณหาความหนาแน่นของอากาศ เนื่องจากอากาศที่ผู้วิจัยศึกษาเป็นส่วนของอากาศชื้น ในส่วนของสเปรย์น้ำและไอเสียปะปน จึงคำนวณได้จากสมการ

$$\rho_{humid\ air} = \frac{P_d}{R_d T} + \frac{P_v}{R_v T} \quad (2.10)$$

เมื่อ $\rho_{humid\ air}$ คือความหนาแน่นของอากาศชื้น $(\mathrm{kg/m^3})$

$P_d$ คือความดันของอากาศแห้ง $(\mathrm{Pa})$

$R_d$ คือค่าคงที่จำเพาะของอากาศแห้ง $(\mathrm{J/kg \cdot K})$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T$ คืออุณหภูมิ (K)

$P_v$ คือความดันของไอ (Pa)

$R_v$ คือค่าคงที่จำเพาะของไอ ($J/kg \cdot K$)

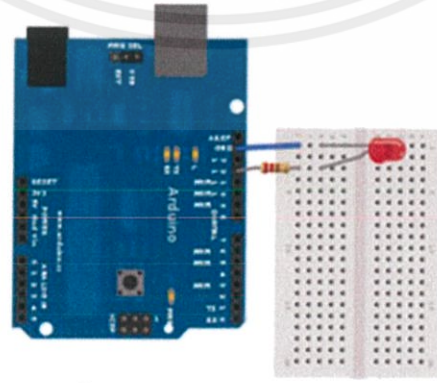
### 2.2.5 บอร์ด Arduino Uno R3 [14]

#### 2.2.5.1 ข้อมูลเบื้องต้นของ Arduino

**รูปที่ 2.21** บอร์ด Arduino Uno R3 [14]

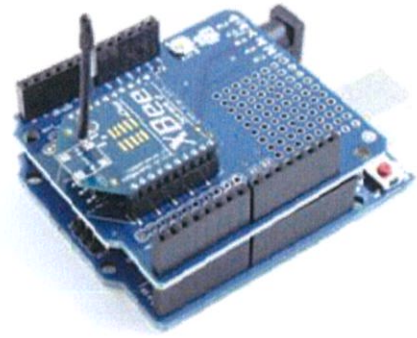
Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือ มีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

ความง่ายของ Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิคส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด (รูปที่ 2.21) หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ (รูปที่ 2.22) เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบน Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย



**รูปที่ 2.22** บอร์ด Arduino ต่อกับ LED [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

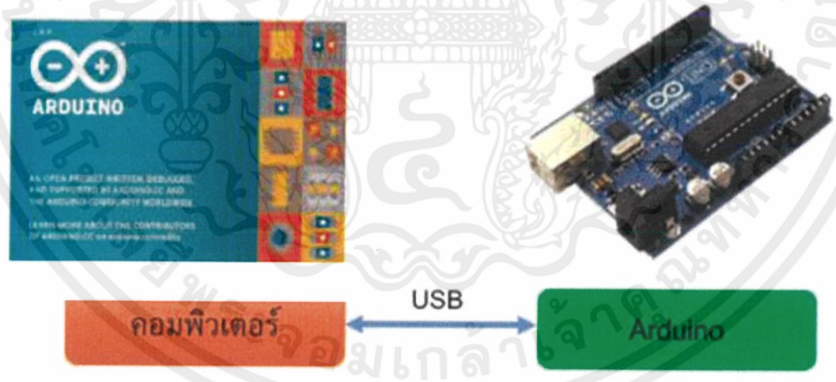


**รูปที่ 2.2**3 บอร์ด Arduino ต่อกับบอร์ด XBee Shield [14]

จุดเด่นที่ทำให้ Arduino เป็นที่นิยม

1) ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
2) มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแรง
3) Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
4) ราคาไม่แพง
5) Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

**2.2.5.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino**

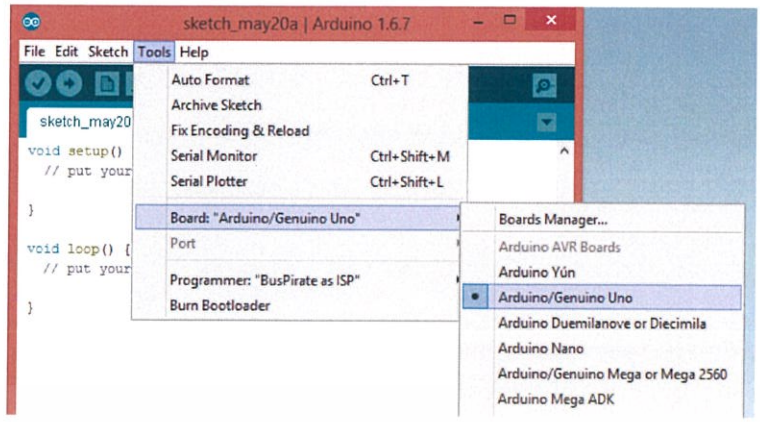



**รูปที่ 2.24** การเชื่อมต่อ Arduino กับ คอมพิวเตอร์ [14]

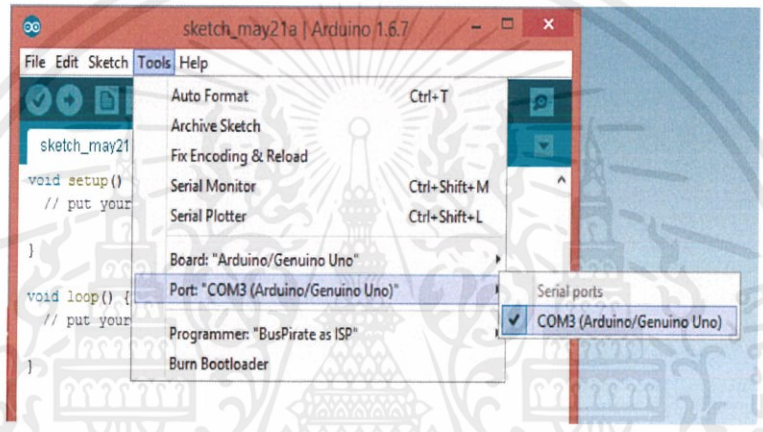
1) เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ผ่านทางโปรแกรม Arduino IDE ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก Arduino.cc/en/main/software

2) หลังจากที่เขียนโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้และหมายเลข Com port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.25** การเลือกรุ่น Arduino [14]




**รูปที่ 2.26** การเลือก port ที่เชื่อมต่อกับ Arduino [14]

3) กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โปรแกรม จากนั้นกดปุ่มอัพโหลด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัพโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “Done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที

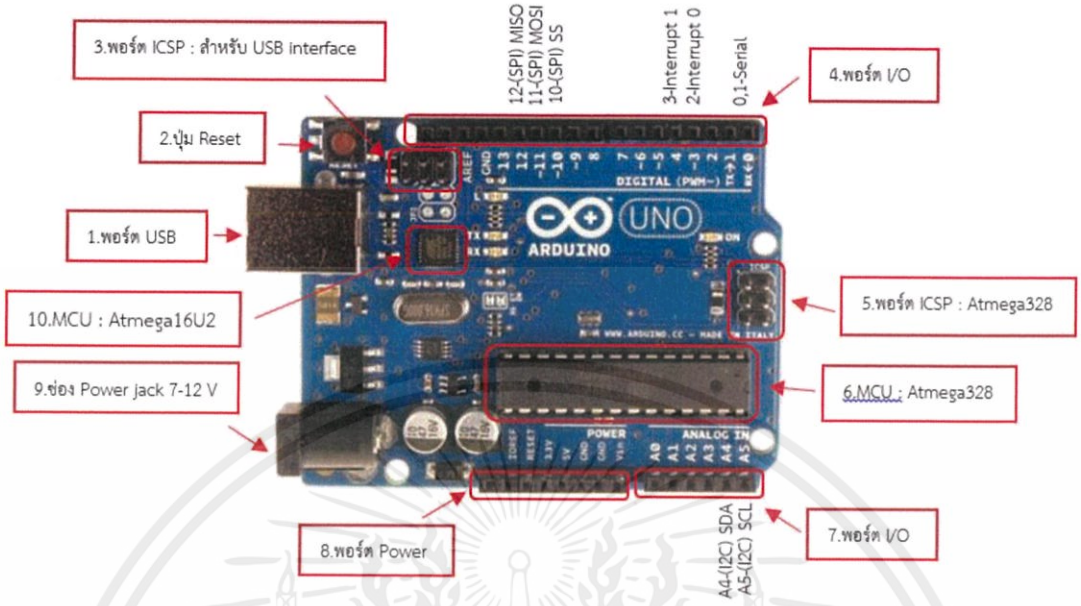
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 2.27** การ compile โปรแกรม [14]

**รูปที่ 2.28** การอัพโหลดไปยังบอร์ด Arduino [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5.3 ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Uno R3




**รูปที่ 2.29** ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Uno R3 [14]

หมายเลข 1 USB Port : ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัพโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด

หมายเลข 2 Reset Button : เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่

หมายเลข 3 ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com Port บน Atmega16U2

หมายเลข 4 I/OPort : Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นเพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM

หมายเลข 5 ICSP Port : Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader

หมายเลข 6 MCU : Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino

หมายเลข 7 I/OPort นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อกตั้งแต่ขา A0-A5

หมายเลข 8 Power Port : ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, $V_{in}$

หมายเลข 9 Power Jack รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V

หมายเลข 10 MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่านAtmega16U2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.6 การวัดอุณหภูมิด้วยไอซี DS18B20 Digital Thermometer[1]

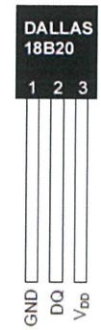
ในปัจจุบัน มีไอซีสำหรับวัดอุณหภูมิให้เลือกใช้อยู่หลายแบบ แบ่งตามรูปแบบของเอาต์พุตได้เป็นสองประเภทคือ ไอซีที่ให้เอาต์พุตแบบอนาล็อก และแบบดิจิทัล โดยทั่วไปไอซีแบบดิจิทัล จะมีวงจรประเภท ADC (Analog to Digital Converter) รวมอยู่ภายใน บางตระกูลหรือบางรุ่น สามารถโปรแกรมหรืออ่านค่ารีจิสเตอร์ภายในได้ เช่น เพื่อกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของไอซี ในส่วนการเชื่อมต่อกับไมโครคอน-โทรลเลอร์ มักจะเป็นการสื่อสารข้อมูลแบบ SPI หรือ I2C เพื่อประหยัดขา I/O ในการเชื่อมต่อ

การใช้งานไอซี DS18B20 Digital Thermometer และเขียนโปรแกรมติดต่อสื่อสารด้วย Arduino จุดเด่นของไอซีในตระกูลนี้คือ การสื่อสารข้อมูลด้วยสัญญาณเพียงเส้นเดียว นำอุปกรณ์หรือไอซีมาต่อกันหลายตัวเป็นบัส (Bus) ได้ โดยใช้โปรโตคอลสื่อสารที่เรียกว่า 1-Wire (OneWire)

#### 2.2.6.1 ข้อมูลเชิงเทคนิคเกี่ยวกับไอซี DS18B20

- ใช้แรงดันไฟเลี้ยง Vdd (หรือ Vcc) ได้ในช่วง 3.0V ถึง 5.5V
- มี 3 ขา (สำหรับตัวถัง TO-92) คือ Gnd (Pin 1), DQ (Pin 2), Vdd (Pin 3)
- ใช้งานได้สองแบบ : normal mode (ใช้ทั้ง 3 ขา) และ parasite power mode (ใช้เพียง 2 ขา คือ DQ และ GND ในขณะที่ขา Vdd จะต่อกับขา Gnd)
- สามารถนำไอซีมาพ่วงต่อกันในบัสเดียว (เส้นสัญญาณ DQ) ได้หลายอุปกรณ์
- ในการใช้งาน จะต้องต่อ pull-up 4.7 kΩ (หรือน้อยกว่าได้เล็กน้อย) ที่ขา DQ กับแรงดันไฟเลี้ยง
- วัดอุณหภูมิได้ในช่วง -55 ℃ ถึง +125 ℃
- มีความแม่นยำ ±0.5 ℃ สำหรับอุณหภูมิในช่วง -10℃ ถึง +85℃
- มีความละเอียดของค่าที่อ่านได้ 12 บิต (Resolution)
- ใช้เวลาในการแปลงข้อมูลสำหรับ ADC ไม่เกิน 750 มิลลิวินาที สำหรับข้อมูล 12 บิต
- ไอซีแต่ละตัวมีหมายเลขเฉพาะตัว ขนาด 64 บิต (64-bit serial code)
- สำหรับตระกูล DS18B20 มีค่าไบต์สำหรับ 8-bit family code ตรงกับ 28h (0x28) เป็นไบต์แรกของหมายเลขอุปกรณ์
- ภายในไอซี DS18B20 มีหน่วยความจำแบบ SRAM ขนาดความจุ 9 ไบต์ (Byte 0 ถึง Byte 9) และเรียกว่า Scratchpad ส่วนหนึ่งของหน่วยความจำนี้ จะใช้สำหรับเก็บค่าอุณหภูมิที่ได้จากการอ่านและแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลในแต่ละครั้ง (ใช้ 2 ไบต์ และเก็บไว้ใน Byte 0 และ Byte 1) และยังมีการคำนวณค่า CRC (checksum) ขนาดหนึ่งไบต์ด้วย (เก็บไว้ใน Byte 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 2.30** แสดงขาและตัวถัง TO-92 ของไอซี DS18B20 [1]

**รูปที่ 2.31** แสดงอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ DS18B20 ที่ใช้ในการทดลอง [1]

โดยที่ 3-Wire connector : Black=GND, Yellow=DQ, Red=Vdd

### 2.2.6.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับบอร์ด Arduino

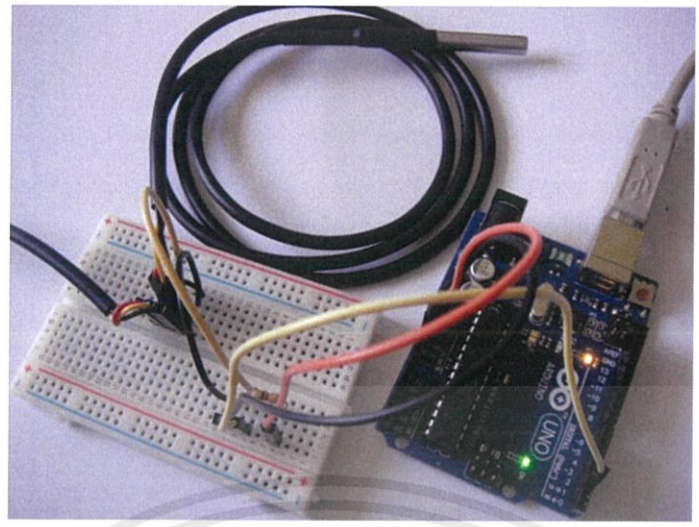
ในการเขียนโปรแกรมสำหรับ Arduino เพื่อเชื่อมต่อกับไอซี DS18B20 สามารถใช้ไลบรารี่ "OneWire.h" ของ Arduino ซึ่งทำให้สะดวกในการเขียนโปรแกรม เช่น เพื่อการค้นหาหลายเลข (64-bit code) ของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับบัส 1-Wire การสั่งให้ไอซีตามหมายเลขอุปกรณ์อ่านและแปลงค่าอุณหภูมิ จากนั้นเว้นระยะเวลาอย่างน้อย 750 msec แล้วจึงอ่านค่าจากหน่วยความจำ Scratchpad ของไอซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6.3 Arduino Sketch

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
// Data wire is plugged into pin 2 on the Arduino
#define ONE_WIRE_BUS 2
// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices
// (not just Maxim/Dallas temperature ICs)
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature sensors(&oneWire);
void setup(void)
{
// start serial port
Serial.begin(9600);
Serial.println("Dallas Temperature IC Control Library Demo");
// Start up the library
sensors.begin();
}
void loop(void)
{
// call sensors.requestTemperatures() to issue a global temperature
// request to all devices on the bus
Serial.print(" Requesting temperatures...");
sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get temperatures
Serial.println("DONE");
Serial.print("Temperature for Device 1 is: ");
Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0)); // Why "byIndex"?
// You can have more than one IC on the same bus.
// 0 refers to the first IC on the wire
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.32** ฮาร์ดแวร์และการต่อวงจรทดลอง [1]

### 2.2.7 Flow Meter [16]

หลักการทำงานของ Flow Meter หากใช้หน่วยของการวัดของไหลเป็นตัวกำหนด มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ การวัดอัตราการไหลของปริมาตร และ การวัดอัตราการไหลของมวล

#### 2.2.7.1 การวัดอัตราการไหลของปริมาตร (Volumetric Flow Rate)

มีหน่วยเป็น $m^3/s$ ตาม SI หรือเท่ากับลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วย Q การหาค่าอัตราการไหลของปริมาตรสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q = A \times v \tag{2.11}$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหลของปริมาตร $(m^3/s)$

v คือความเร็วของการไหล $(m/s)$

A คือพื้นที่หน้าตัดที่ของไหลวิ่งผ่าน $(m^2)$

#### 2.2.7.2 การวัดอัตราการไหลของมวล (Mass Flow Rate)

มีหน่วยเป็น kg/s ตาม SI หรือเท่ากับกิโลกรัมต่อวินาที โดยจะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย $\dot{m}$ และการหาค่าอัตราการไหลของมวลสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\dot{m} = \rho \times Q = \rho \times V \times A = J_m \times A \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Q คืออัตราการไหลของปริมาตร $(m^3 / s)$

$\rho$ คือความหนาแน่นของมวลของไหลต่อ 1 หน่วยปริมาตร $(kg / m^3)$

v คือความเร็วของการไหล $(m / s)$

A คือพื้นที่หน้าตัดที่ของไหลวิ่งผ่าน $(m^2)$

$J_m$ คือMass Flux $(kg / m^2 \cdot s)$

ปัจจุบันการใช้งานเครื่องมือวัดการไหล Flow Meter มีการใช้งานทั้ง 2 รูปแบบ โดย Flow Meter ที่เป็นแบบ การวัดอัตราการไหลของปริมาตร (Volumetric Flow Rate) นั้น จะมีการใช้งานมากที่สุด ดังนั้นในเบื้องต้นจะอธิบายการทำงานของ Flow Meter ชนิดต่างๆ ที่ใช้สำหรับการวัดอัตราการไหลของปริมาตร (Volumetric Flow Rate) ซึ่งในส่วนของตัว Flow Meter นั้นจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบ 2 ส่วน ใหญ่ๆ คือ

1) Flow Sensor หรือ Flow Transducer

เป็นตัวเซนเซอร์ชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่อยู่ในรูปแบบทางฟิสิกส์ ซึ่งในที่นี้คืออัตราการไหลของของไหล ให้มาอยู่ในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้า หรือการเคลื่อนที่ทางกล เพื่อทำหน้าที่ส่งสัญญาณเหล่านี้ไปยังส่วน Flow Indicator หรือ Display Unit

2) Flow Indicator หรือ Display Unit

เป็นอุปกรณ์หรือส่วนประกอบที่จะทำหน้าที่ในการนำสัญญาณที่ได้จาก Flow Sensor หรือ Flow Transducer มาแสดงผล ไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบของ สเกล ระดับความสูง เข็ม หรือตัวเลขดิจิตอล เพื่อให้สามารถสื่อสารกับผู้ใช้งานให้รับรู้ได้ว่าค่าการไหลเป็นเท่าไร

โดยตัว Flow Meter บางชนิดไม่จำเป็นต้องมีองค์ประกอบทั้ง 2 ส่วนแยกกันอยู่โดยอิสระ อาจจะอยู่ภายในตัวเดียวกัน ทำงานพร้อมกันเลยก็ได้ เช่น มิเตอร์วัดอัตราการไหลของน้ำประปาที่ถูกติดตั้งอยู่บริเวณที่พักอาศัย หรือ โรงงานอุตสาหกรรม ที่มีทั้ง 2 ส่วนทำงานพร้อมกัน

**2.2.7.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดการไหลสำหรับ Flow Meter**

โดยธรรมชาติของของไหลจะมีตัวแปรต่างๆ ที่คอยส่งผลกระทบ เมื่อพิจารณาตัวแปรเหล่านี้จะพบว่าตัวแปรต่างๆ จะเป็นส่วนหนึ่งในการพิจารณาเลือก Flow Meter เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และ อ่านค่าได้อย่างถูกต้อง โดยตัวแปรต่างๆ ที่จะต้องพิจารณาในการเลือกใช้ Flow Meter สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) อุณหภูมิ (Temperature) ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหล ซึ่งเกิดมาจากการแลกเปลี่ยนความร้อน หรือความเย็นในขณะเคลื่อนที่นั้น จะมีผลทำให้ค่าความหนืด ความหนาแน่น หรือตัวแปรอื่นๆ เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในของไหลที่มีสถานะเป็นของเหลว Liquid นั้นค่าเหล่านี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งบางครั้งก็จะถือว่าไม่เปลี่ยนแปลง แต่สำหรับของไหลที่มีสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไอ (Vapor) นั้นจะมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล ซึ่งจำเป็นต้องมีการวัดค่าของอุณหภูมิ เพื่อนำมาเป็นค่าชดเชยในการวัด

2) ความดัน (Pressure) จะเป็นตัวอย่างอิงในการวัดค่าการวัดอัตราการไหลของปริมาตร ซึ่งจะนิยมระบุไว้ในกรณีที่การวัดนั้นไม่ได้อยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.695949 Psia และอุณหภูมิ 60 °F เช่น ถ้าวัดค่าอัตราการไหลของอากาศได้ 20 CMF จะหมายความว่า ณ ขณะนั้นวัดค่าอัตราการไหลได้ 20 CMF ที่อุณหภูมิ 60 °F ความดัน 14.7 Psia

3) ความหนืด (Viscosity) หรือ ค่าแรงต้านการไหลของของไหล ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของของไหลต่างๆ โดยถ้าค่าความหนืดมีค่าสูงจะต้องใช้ค่าความต่างของแรงดันมากเพื่อให้ของไหลนั้นเคลื่อนที่ โดยค่าความหนืดสามารถหาได้จากค่า แรงเค้นเฉือนต่ออัตราเฉือน

4) ความหนาแน่น (Density) อัตราส่วนระหว่างปริมาณของมวลสารต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพของวัสดุ โดยน้ำที่อุณหภูมิ 0 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ 14.7 Psia นั้นจะมีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 999.845 $kg/m^3$

5) ความอัดตัวได้ (Compressibility) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาตรต่อความดัน โดยเมื่อมีการให้ความดันที่ของไหลแล้ว ปริมาตรของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ โดยสำหรับของไหลที่เป็นของเหลว (Liquid) นั้น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อความดันนั้นมีค่าน้อย จึงไม่ค่อยนำมาคิดถ้าความดันที่เกิดขึ้นไม่สูงมากนั้น แต่สำหรับของไหลที่เป็นไอ (Vapor) แล้วความดันจะมีผลต่อปริมาตรเป็นอย่างยิ่ง จึ่งจำเป็นต้องนำค่าความดันมาคิดด้วย ซึ่งเราสามารถใช้กฎต่างๆ สำหรับของไหลแต่ละประเภทได้ดังนี้

5.1) ของไหลที่เป็นไอ (Vapor) จะใช้กฎ (Gas Law)

5.2) ของไหลที่เป็นของเหลว (Liquid) จะใช้ค่า (Bulk Modulus) ซึ่งหาได้จากสมการ

6) ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) หรือ RD คือตัวเลขที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งจะใช้ในการบ่งบอกถึงลักษณะหรือรูปแบบการไหลของของไหล เพื่อจะใช้ช่วยในการเลือกรูปแบบและชนิดของ Flow Meter ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถคำนวณได้จาก

$$R_D = \frac{v \times D \times \rho}{\eta} \tag{2.13}$$

เมื่อ $R_D$ คือตัวเลขเรย์โนลด์

$\rho$ คือความหนาแน่นของมวลของไหลต่อ 1 หน่วยปริมาตร $(kg/m^3)$

$v$ คือความเร็วของการไหล $(m/s)$

$D$ คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ $(m)$

$\eta$ คือค่าความหนืดของของไหล $(s/m \cdot kg)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคำนวณค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) หรือ RD ได้แล้ว สามารถนำมาอธิบายรูปแบบการไหลได้เป็น 2 แบบ คือ

6.1) Laminar Flow เป็นรูปแบบการไหลของของไหลที่เป็นไปอย่างราบเรียบ โดยในขณะที่เกิดการไหลนั้น ชั้นของของไหลจะขนานกันไปเรื่อยๆ ซึ่งโดยปกติของไหลที่มีลักษณะการไหลแบบนี้จะค่อนข้างมีความหนืดสูงและเหนียวข้น เช่น น้ำมันเตา ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลของสารเหล่านี้จะยึดเกาะกันแน่นทำให้ไหลได้ต่ำ โดยค่า Rangeability ของของไหลที่มีรูปแบบการไหล Laminar Flow จะค่อนข้างคงที่ หรือเป็นเชิงเส้นมากกว่าแบบ Turbulent แต่ในการใช้งานจริงที่พบ จะไม่ค่อยพบการไหลแบบ Laminar Flow แต่จะพบแบบที่เป็น Turbulent มากกว่า

6.2) Turbulent Flow เป็นรูปแบบการไหลของของไหลที่เป็นไปอย่างไม่ราบเรียบ และไม่มีระเบียบ โดยในขณะที่เกิดการไหลนั้น ชั้นของไหลที่เกิดขึ้นจะไม่แน่นอน เกิดการหมุนวนบ้าง ซึ่งโดยปกติของไหลที่มีลักษณะการไหลแบบนี้จะค่อนข้างมีความหนืดต่ำ เช่น น้ำ ไอน้ำ แก๊ส

โดยสามารถแยกรูปแบบการไหลได้ จากการพิจารณาค่าของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) หรือ RD โดยถ้าย่านของตัวเลขนี้อยู่ในช่วง 0 - 2000 ถือว่าเป็นการไหลแบบ Laminar Flow และ ถ้าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) หรือ RD มีค่ามากกว่า 4000 ขึ้นไปจะถือว่าเป็นการไหลแบบ Turbulent Flow ซึ่งเห็นได้ว่ามีอยู่ช่วงหนึ่งที่หายไป นั่นก็คือ 2000-4000 ซึ่งในช่วงนี้เป็นช่วงการไหลในย่านวิกฤติ ซึ่งมีการไหลทั้ง 2 แบบปนกันไป จึงจำเป็นต้องออกแบบระบบให้การไหลไม่ตกอยู่ในย่านนี้เพราะจะทำให้การหาเครื่องมือวัดหรือ Flow Meter ที่ทำได้ยากและมีราคาที่ค่อนข้างสูง

### 2.2.8 เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำ (Water Flow sensor) [3]

**รูปที่ 2.33** เซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำรุ่น FS400A-G1 [3]

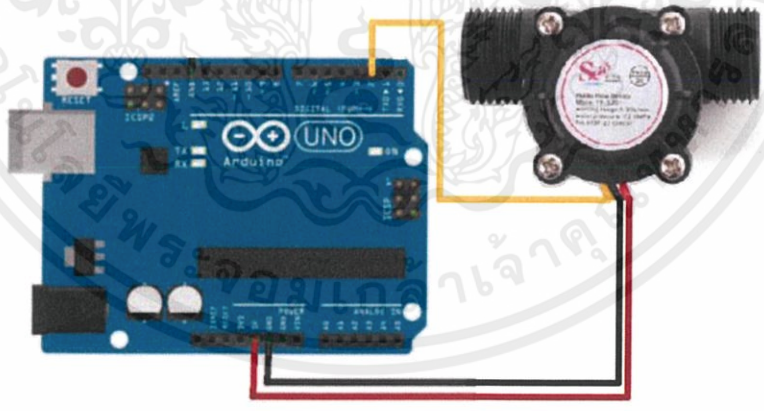
#### 2.2.8.1 ข้อมูลเซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล

- 100% Brand new and high quality
- Waterproof, heat resistance, pressure resistance, cold resistance
- Easy to install

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Frequency: F=4.8 × Q (L / Min) error: ± 2%
- voltage: 3.5-24 VDC, current can not exceed 10mA, 450 output pulses/liters,
- F=constant × units of flow (L / min) × time (seconds).
- Flow range: 1-60 L/min
- Maximum current: 15 mA (DC 5V)
- Working voltage range: DC 524 V
- Load capacity: ≤10 mA(DC 5V)
- Operating Temp: ≤80
- Operating humidity: 35%90%RH
- Allow compression: Water pressure >1.20Mpa
- Insulation resistance: >100M OHM
- Storage Temperature: -25 +80
- Storage humidity: 25%95%RH
- Output Waveform: Square Wave, output pulse signal
- ROHS Compliant
- Material: ABS Plastic
- Color: Black
- Cable length: approx. 15 cm

**2.2.8.2 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำกับบอร์ด Arduino**




**รูปที่ 2.34** การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดอัตราการไหลของน้ำกับบอร์ด Arduino [3]

โดย 3-Wire connector: Black=GND, Yellow=DQ, Red=Vdd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.8.3 Arduino Sketch

```
int flowPin = 2;    //This is the input pin on the Arduino
    double flowRate;    //This is the value we intend to calculate.
    volatile int count; //This integer needs to be set as volatile to ensure it updates
    correctly during the interrupt process.
    void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    pinMode(flowPin, INPUT);           //Sets the pin as an input
    attachInterrupt(0, Flow, RISING);  //Configures interrupt 0 (pin 2 on the Arduino
Uno) to          run the function "Flow"
    Serial.begin(9600);  //Start Serial
    }
    void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:
    count = 0;      // Reset the counter so we start counting from 0 again
    interrupts();   //Enables interrupts on the Arduino
    delay (1000);   //Wait 1 second
    noInterrupts(); //Disable the interrupts on the Arduino
    //Start the math
    flowRate = (count * 2.25);        //Take counted pulses in the last second and
  multiply    by 2.25mL
    flowRate = flowRate * 60;         //Convert seconds to minutes, giving you mL /
  Minute
    flowRate = flowRate / 1000;       //Convert mL to Liters, giving you Liters /
  Minute
    Serial.println(flowRate);         //Print the variable flowRate to Serial
  }
  void Flow()
  {
    count++; //Every time this function is called, increment "count" by 1 }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.9 กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน [7]

โดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงานรวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศ

ข้อ 2 (11) น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีอุณหภูมิไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส

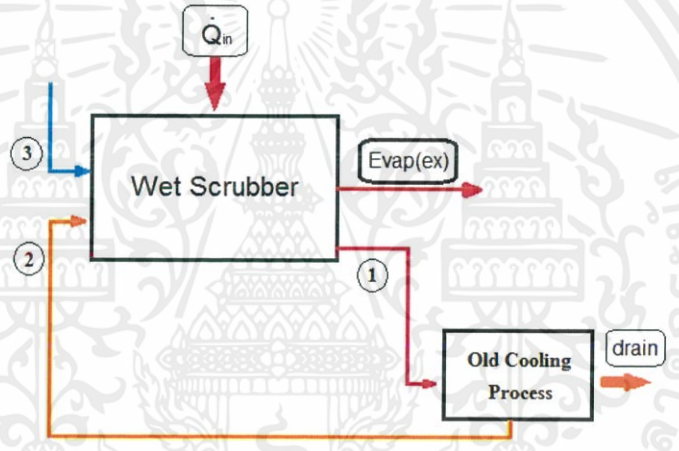
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

# การออกแบบพัฒนาระบบ ออกแบบชุดทดลอง และการคำนวณ

## 3.1 การออกแบบพัฒนาระบบ

จากปัญหาที่ได้กล่าวมาในบทที่ 1 แล้วนั้น ซึ่งก็คือปัญหาด้านอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนที่มีค่าสูงเกินกว่ากำหนด ทำให้ทางผู้วิจัยได้ศึกษาหาแนวทางในการแก้ปัญหา และได้ข้อสรุปว่า ทางผู้วิจัยจะทำการสร้างหอทำความเย็นขึ้นมาใหม่ และติดตั้งเพิ่มเข้าไปในระบบทำความเย็นเดิม โดยจะทำการออกแบบให้หอทำความเย็นมีประสิทธิภาพในการทำความเย็นสูงขึ้น เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของระบบน้ำหมุนเวียน ซึ่งภาพด้านล่างนี้ จะเป็นภาพแสดงการเปรียบเทียบแผนผังการไหลของก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ




**รูปที่ 3.1** แผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ

โดยที่

หมายเลข 1 = น้ำร้อนที่ไหลออกจากภาชนะใต้เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกไปเข้าระบบทำความเย็นเดิม

หมายเลข 2 = น้ำหมุนเวียนหลังผ่านการทำความเย็นโดยระบบทำความเย็นเดิม

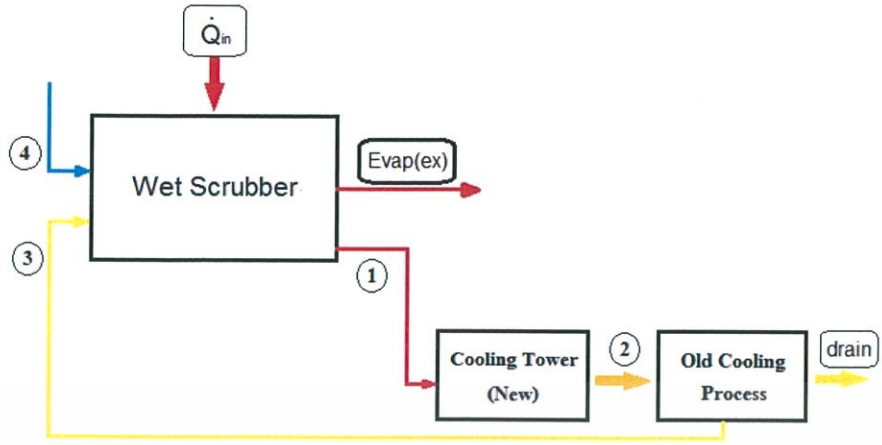
หมายเลข 3 = น้ำประปาที่ถูกใช้เป็นม่านน้ำเพื่อทำการดักจับมลพิษจากไอเสีย

drain = น้ำที่ถูกปล่อยทิ้งไปสู่สิ่งแวดล้อม (อุณหภูมิเท่ากับหมายเลข2)

$\dot{Q}_{in}$ = ความร้อนที่ได้รับจากไอเสียจากเตาเผาพลังงานชีวมวล

Evap(ex) = ไอน้ำที่ถูกดูดออกไปพร้อมกับไอเสียที่ไหลออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.2** แผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ

โดยที่

หมายเลข 1 = น้ำร้อนที่ไหลออกจากภาชนะใต้เครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกไปเข้าหอทำความเย็นใหม่

หมายเลข 2 = น้ำหมุนเวียนหลังผ่านการทำความเย็นโดยหอทำความเย็นใหม่

หมายเลข 3 = น้ำหมุนเวียนหลังผ่านการทำความเย็นโดยระบบทำความเย็นเดิม

หมายเลข 4 = น้ำประปาที่ถูกใช้เป็นม่านน้ำเพื่อทำการดักจับมลพิษจากไอเสีย

drain = น้ำที่ถูกปล่อยทิ้งไปสู่สิ่งแวดล้อม (อุณหภูมิเท่ากับหมายเลข3)

$\dot{Q}_{in}$ = ความร้อนที่ได้รับจากไอเสียจากเตาเผาพลังงานชีวมวล

Evap(ex) = ไอน้ำที่ถูกดูดออกไปพร้อมกับไอเสียที่ไหลออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

จะเห็นได้ว่า แผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนภายหลังการปรับปรุงระบบจะมีหอความเย็นใหม่เพิ่มเข้ามาในระบบ โดยมีตำแหน่งอยู่ก่อนเข้าระบบทำความเย็นเดิม ซึ่งต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการในการออกแบบสร้างหอทำความเย็นใหม่

### 3.1.1 การออกแบบสร้างหอทำความเย็นใหม่

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการวิธีการออกแบบและการคำนวณที่ใช้ในการสร้างหอทำความเย็นใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ระบบทำความเย็นของระบบน้ำหมุนเวียนที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบสร้างหอทำความเย็นใหม่ โดยคำนวณหาภาระความร้อน (Heat load) ที่หอทำความเย็นต้องดึงออกจากน้ำ เพื่อทำให้น้ำหมุนเวียนมีอุณหภูมิต่ำกว่าหรือเท่ากับ 40 °C จากสูตร

$$\text{Heat load} = \dot{m}_w c_p \Delta T \qquad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$\dot{m}_w$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อนที่ไหลเข้าและออกหอทำความเย็น (kg/s)

$c_P$ = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kg/kJ•K)

$\Delta T$ = ผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่ไหลเข้าและไหลออกจากหอทำความเย็น (K or ℃) = $T_{hw}$ - $T_{hw}$

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดในปัจจุบันพบว่า อุณหภูมิน้ำสูงสุดที่ไหลเข้าระบบทำความเย็นในแต่ละการทดลอง มีอุณหภูมิไม่เกิน 70 ℃ เนื่องจากในช่วงสภาวะท้ายๆ ของการทดลองจะเกิดการอุดตันของเชื้อเพลิงในท่อลำเลียงเชื้อเพลิง จึงทำให้ไฟในเตาดับ ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนมีค่าลดลง โดยค่าอุณหภูมิของน้ำขาเข้าระบบทำความเย็นจะอยู่ในช่วง 60-69 ℃ ดังนั้นโดยออกแบบที่เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$T_{hw}$ = อุณหภูมิน้ำที่ไหลเข้าหอทำความเย็น = 70 ℃

$T_{cw}$ = อุณหภูมิน้ำที่ไหลออกจากหอทำความเย็น = 40 ℃

$\dot{m}_w$ = 1.025 kg/s

$c_P$ = 4.18 kg/kJ•K

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 32 ℃

ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ = 70 %

เมื่อแทนค่าลงไปในสมการที่ (3.1) เราจะได้ Heat load = 128.56 kW มาใช้ในการออกแบบหอทำความเย็นใหม่ โดยที่การออกแบบนี้ สมมติให้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำขาเข้าและขาออกหอทำความเย็นมีค่าเท่ากัน

จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบสำคัญของการออกแบบหอทำความเย็นคือ การทำให้น้ำระเหยตัวได้ง่ายและรวดเร็ว ผลความเย็นที่ทำได้คือ ปริมาณความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ และรวมถึงปริมาณความร้อนสัมผัสที่เกิดขึ้นบางส่วนด้วย ซึ่งองค์ประกอบสำคัญในการทำให้เกิดการระเหยตัวได้ง่ายและรวดเร็วขึ้นนั้น ได้แก่

1.พื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำและอากาศมากขึ้น

2.ระยะเวลาที่นานขึ้นในการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำและอากาศ

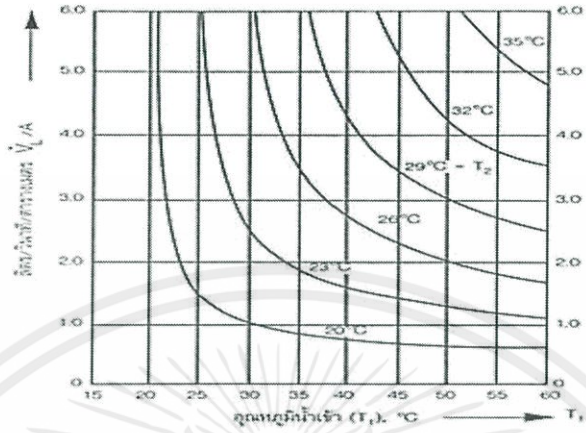
3.อัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านหอทำความเย็นมีมากขึ้น

จากทฤษฎีดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงเลือกที่จะสร้างหอทำความเย็นตัวใหม่นี้ ด้วยการติดตั้งแผงขยายฟิล์ม ให้มีขนาดใหญ่กว่าเดิม ซึ่งแผงขยายฟิล์มมีหน้าที่ในการชะลอการไหลของน้ำ เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ และเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศอีกด้วย นอกจากนี้ยังจะทำการติดตั้งพัดลมดูดอากาศที่ด้านบนของหอทำความเย็น เพื่อเพิ่มความเร็วลมและอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าสู่หอทำความเย็นเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ ซึ่งการออกแบบนี้ได้ศึกษาจากทฤษฎีการหาขนาดของหอทำความเย็นชนิดไหลสวนทางของเมอร์เคิล(Merkel) [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.1 การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์มโดยใช้แผนภูมิสำเร็จรูป [11]

การหาขนาดของพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์ม เพื่อใช้รองรับภาระความร้อนของน้ำ 128.56 kW โดยใช้แผนภูมิสำเร็จรูปของอัตราการไหลของน้ำขาเข้ากับอุณหภูมิของน้ำเข้าดังรูปที่ 3.3




**รูปที่ 3.3** แผนภูมิสำเร็จรูปของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าหอทำความเย็น [11]

อันที่จริงนั้น $T_{hw}$ และ $T_{cw}$ ที่เราใช้คำนวณต้องเป็น 70 และ 40 ℃ ตามลำดับ แต่เนื่องจากค่าอุณหภูมิการออกแบบอยู่นอกเหนือช่วงของข้อมูลในกราฟ ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ค่าอุณหภูมิที่มีในช่วงของกราฟดังกล่าว โดยเลือกให้ใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิเงื่อนไขในการออกแบบ ณ ที่นี้จะเลือกใช้ $T_{hw}$ = 60 ℃ และ $T_{cw}$ = 35 ℃ ซึ่งเมื่อนำค่าอุณหภูมิน้ำไปเปิดหาค่า $\dot{V}_L / A$ ในรูปที่ 3.3 จะได้ค่าเท่ากับ 4.8 L/s•m²

จากสูตรหาพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์ม [11]

$$A = \frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_L / A} \tag{3.2}$$

เมื่อ $\dot{V}_L$ = 1.025 m³/s

$\dot{V}_L / A$ = 4.8 L/s•m²

เมื่อแทนค่าลงไปในสมการที่ (3.2) จะได้ค่า $A$ = 0.2136 m² ซึ่งก็คือพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์ม ซึ่งการคำนวณโดยวิธีนี้นั้น พบว่าค่าอุณหภูมิในการออกแบบอยู่นอกช่วงของกราฟ และปัจจุบันมีแผงขยายฟิล์มมากมายหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละผู้ผลิตไม่ได้มีการเปิดเผยข้อมูลเชิงลึก ดังเช่นกราฟในรูปที่ 3.3 เนื่องจากเป็นข้อมูลลับทางการค้า ซึ่งกราฟในรูปที่ 3.3 ก็เป็นเพียงข้อมูลของผู้ผลิตรายหนึ่ง และอาจไม่เหมือนกับผู้ผลิตรายอื่นเสียทั้งหมด แต่นี่เป็นเพียงข้อมูลเดียวที่ผู้วิจัยสามารถหามาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะออกแบบโดยเผื่อให้มากกว่าการคำนวณ เพราะค่าคุณสมบัติที่นำมาคำนวณได้นั้น อาจไม่เหมือนกับคุณสมบัติของแผงขยายฟิล์มตามท้องตลาดเสียทีเดียว และเพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานในกรณีที่สภาวะอากาศไม่เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบ ซึ่งจากการสำรวจตามท้องตลาด ทางผู้วิจัยได้ตัดสินใจซื้อแผงขยายฟิล์มจากผู้ผลิตรายหนึ่ง ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 1 m² สูง 53 cm และมีพื้นที่ผิวสัมผัส 60 m² ทำจากวัสดุ PVC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากสามารถหาซื้อได้จากผู้ผลิตรายนี้เท่านั้น เพราะเสนอซื้อในจำนวนที่น้อยเกินกว่าผู้ผลิตรายอื่นจะสามารถจัดจำหน่ายให้ได้ และยังมีเรื่องของระยะเวลาในการผลิตซึ่งไม่มีกำหนดวันเวลาชัดเจน

**3.1.1.2 การออกแบบพัดลมดูดอากาศ**

การออกแบบพัดลมดูดอากาศเข้าหอทำความเย็น

จากสูตร [11]

$$L(h_{w1}-h_{w2})=G\,(h_2-h_1) \tag{3.3}$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\frac{L}{G}=\frac{h_2-h_1}{h_{w1}-h_{w2}} \tag{3.4}$$

โดยที่

L/G = อัตราส่วนอัตราการไหลระหว่างน้ำกับอากาศที่ไหลเข้าหอทำความเย็น

$h_{w1}$ = เอ็นทัลปีของน้ำขาเข้าหอทำความเย็น (kJ/kg dry air)

$h_{w2}$ = เอ็นทัลปีของน้ำขาออกหอทำความเย็น (kJ/kg dry air)

$h_2$ = เอ็นทัลปีของอากาศที่ไหลออกจากหอทำความเย็น (kJ/kg dry air)

$h_1$ = เอ็นทัลปีของอากาศที่ไหลเข้าหอทำความเย็น (kJ/kg dry air)

เมื่อแทนค่าต่างๆลงไปในสมการที่ (3.4) โดยกำหนดให้อุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากหอทำความเย็นมีค่าเท่ากับ 45 ℃ จะทำให้ได้ค่า L/G = 0.7588 ซึ่ง L = 1.025 kg/s ดังนั้นจะได้ G = 1.025/0.7588 = 1.351 kg/s ซึ่งก็คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลเข้าหอทำความเย็นที่เหมาะสม

ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกซื้อพัดลมดูดอากาศที่จะทำให้ความเร็วลมที่ไหลเข้าหอทำความเย็นมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1.351 kg/s โดยผู้วิจัยได้เลือกซื้อพัดลมอุตสาหกรรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 24 นิ้ว มอเตอร์ขนาด 1/3 แรงม้า ความเร็วรอบ 1450 RPM ใช้สายพานเป็นตัวส่งกำลัง เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาเหมาะสมคุ้มค่า

**3.1.1.3 การสร้างหอทำความเย็นใหม่**

สรุป ทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างหอทำความเย็นที่มีขนาด กว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร สูง 2.4 เมตร(ไม่รวมล้อ) เพื่อให้เหมาะสมต่อขนาดของการออกแบบเลือกใช้ขนาดแผงขยายฟิล์ม และมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์ม 1 $m^2$ พื้นที่ผิวสัมผัส 60 $m^2$ ซึ่งมากกว่าหอทำความเย็นที่อยู่ในระบบทำความเย็นเดิม โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสเพียง 19.6 $m^2$ เท่านั้น นอกจากนี้ ยังมีพัดลมดูดอากาศด้านบนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 24 นิ้ว มอเตอร์ 1/3 แรงม้า ความเร็วรอบ 1450 RPM ใช้สายพาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

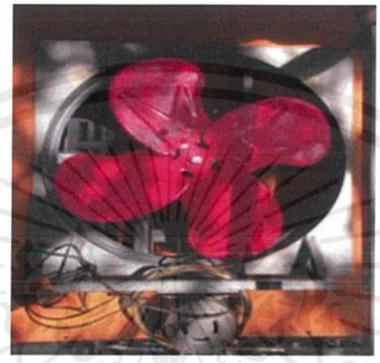
เป็นตัวส่งกำลัง และใช้หัวฉีดสเปรย์น้ำแบบเต็มกรวย (full cone spray) จำนวน 8 หัว ต่อยึดกับท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว ในการฉีดน้ำร้อนให้เป็นละออง เพื่อเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ

**รูปที่ 3.4** หอทำความเย็นใหม่

**รูปที่ 3.5** แผงขยายฟิล์มในหอทำความเย็นใหม่

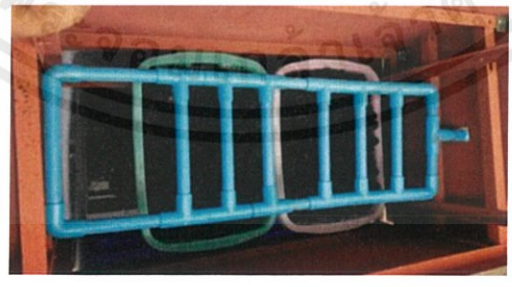
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่** 3.6 หัวฉีดสเปรย์และแผงขยายฟิล์มภายในหอทำความเย็นใหม่



**รูปที่** 3.7 พัดลมดูดอากาศด้านบนหอทำความเย็นใหม่

**รูปที่** 3.8 หอทำความเย็นเดิม



**รูปที่** 3.9 ท่อปล่อยน้ำร้อนและแผงขยายฟิล์มชนิดน้ำตกกระแทกภายในหอทำความเย็นเดิม

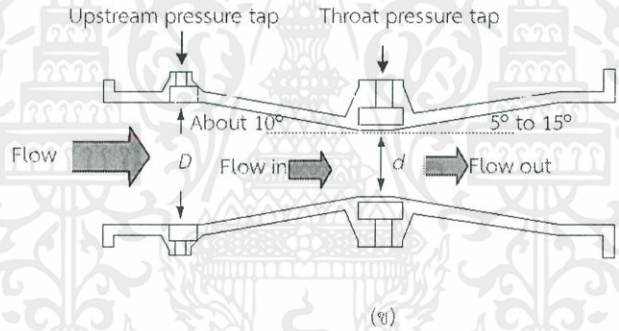
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การออกแบบชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสีย

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างชุดทดลองในการเก็บตัวอย่างไอเสีย เพื่อหาผลความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสีย โดยได้ทำการดูดตัวอย่างไอเสียผ่านผ้ากรองฝุ่น และใช้เครื่องเวนทูรีสำหรับการวัดอัตราการไหลของไอเสียที่ไหลผ่านผ้ากรอง จากนั้นจะนำผ้ากรองหลังผ่านการดักฝุ่นไปชั่งน้ำหนักเพื่อหามวลของฝุ่นที่ปะปนมากับไอเสีย และนำไปหารด้วยปริมาณไอเสียที่ไหลผ่านผ้ากรอง ก็จะได้ค่าความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสียในหน่วย mg/m³ (มิลลิกรัมต่อลูกบาตรเมตร) ซึ่งจะเก็บผลจากการทดลองโดยเปลี่ยนตัวแปร คือ ก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ

### 3.2.1 ออกแบบท่อเวนทูรี (venturi tube) [19]

เป็นอุปกรณ์ใช้วัดการไหล (flow measurement) ที่วัดได้ทั้งของเหลวและก๊าซ ทำงานโดยอาศัยทฤษฎีของแบร์นูรี่ (Bernoulli's theorem) หรือหลักการวัดความดันแตกต่าง (differential pressure) โดยออกแบบท่อเวนทูรีให้มีค่าความดันสูญเสียเกิดขึ้นน้อยที่สุด ลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพื้นที่หน้าตัดของท่อเวนทูรีเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป การเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลจึงเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ส่งผลให้ค่าความดันสูญเสียมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแบบแผ่นออริฟิสหรือนอสเซิล (nozzle)



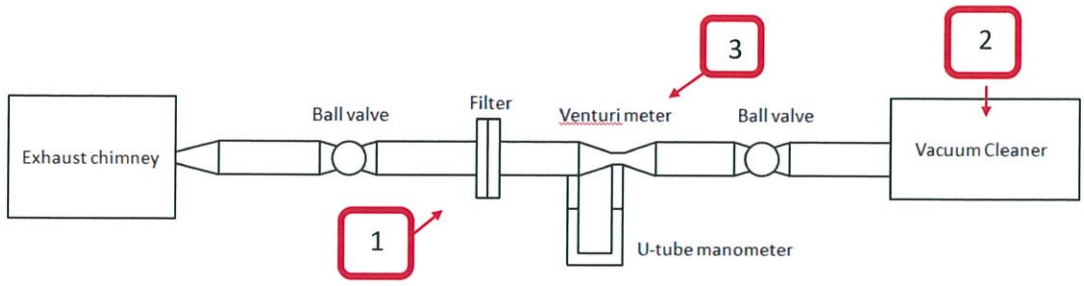

**รูปที่ 3.10** ลักษณะการติดตั้งท่อเวนทูรีภายในท่อ [19]

การวัดการไหลด้วยท่อเวนทูรีให้ค่าความเป็นเชิงเส้น (linearity) ค่าความเที่ยงตรง (precision) และความแม่นยำ (accuracy) สูงกว่าการวัดการไหลด้วยแผ่นออริฟิส โดยท่อเวนจูรีสามารถใช้วัดการไหลของของไหลได้ในทุกกรณีที่แผ่นออริฟิสวัดได้ รวมถึงสามารถใช้งานกับของไหลที่มีสารแขวนลอยปะปนได้โดยไม่เกิดการอุดตัน นอกจากนี้ยังใช้วัดการไหลที่มีค่าอัตราการไหลสูงได้ อย่างไรก็ตาม ท่อเวนทูรีมีราคาค่อนข้างแพง การติดตั้งและการซ่อมบำรุงทำได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นออริฟิส โดยเฉพาะอย่างยิ่งการติดตั้งภายในท่อที่มีขนาดเล็ก ดังนั้น โดยทั่วไปจึงนิยมใช้ท่อเวนทูรีสำหรับการวัดอัตราการไหลในท่อที่มีขนาดใหญ่เท่านั้น

### 3.2.2 ส่วนประกอบเครื่องเก็บผลฝุ่นที่ปะปนในไอเสีย

ส่วนประกอบชุดทดลองเพื่อใช้เก็บผลฝุ่นที่ปะปนในไอเสียมีทั้งหมด 3 ส่วนหลักดังแสดงในรูปที่ 3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 3.11** แสดงส่วนประกอบเครื่องเก็บผลฝุ่น

1) ผ้ากรองไอเสีย (Filter)

เป็นส่วนที่ใช้สำหรับกรองฝุ่นที่ปะปนมากับไอเสีย โดยทางผู้วิจัยได้เลือกใช้หน้ากากอนามัย ซึ่งมีความละเอียดในการกรองถึง 3 ไมครอน

**รูปที่ 3.12** หน้ากากอนามัยที่ใช้เป็นผ้ากรองฝุ่นในชุดทดลอง

**รูปที่ 3.13** เครื่องชั่งแบบละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เครื่องดูดฝุ่น (Vacuum Cleaner)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ดูดไอเสียจากปล่องไอเสียหลังผ่านเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกเก็บให้ไหลผ่านชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสีย

**รูปที่ 3.14** เครื่องดูดฝุ่น

3) เวนทูรี (Venturi meter) [20]

เวนทูรีถูกใช้เพื่อวัดอัตราไหลของไอเสียที่ไหลผ่านผ้ากรอง และนำอัตราไหลที่วัดได้นั้นไปทำการคำนวณเพื่อหาความหนาแน่นฝุ่นที่ปะปนในไอเสีย โดยสูตรที่ใช้ในการคำนวณเวนทูรีคือ

$$Q_{th} = A_2 \sqrt{\frac{2\rho_2 gh}{\rho_1 (1-(\frac{D_2}{D_1})^4)}} \qquad (3.5)$$

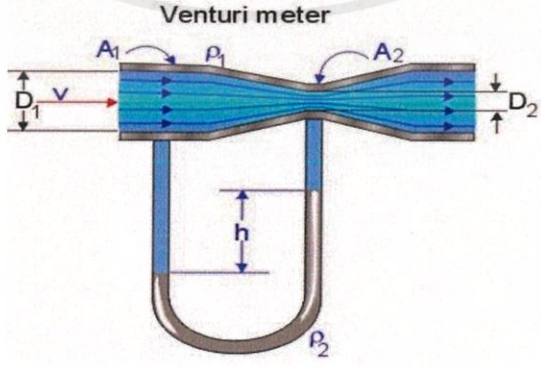
เมื่อ $h$ คือความสูงที่อ่านได้จากมานอมิเตอร์( m )

$D_1, D_2$ คือเส้นผ่านศูนย์กลางหลอดเวนทูรี่( m )

$\rho_1$ คือความหนาแน่นของอากาศภายในท่อเวนทูรี่ $(\mathrm{kg/m^3})$

$\rho_2$ คือความหนาแน่นของของเหลวในมานอมิเตอร์ $(\mathrm{kg/m^3})$

$g$ คือแรงดึงดูดของโลก $(\mathrm{m^2/s})$




**รูปที่ 3.15** เครื่องเวนทูรีสำหรับใช้วัดอัตราการไหล[20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 การสอบเทียบค่าความแม่นยำในการวัดของอุปกรณ์เวนทูรี่

ทางผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบค่าอุปกรณ์เวนทูรี่ โดยการใช้อุปกรณ์ Hotwire Anemometer ที่ผ่านการสอบเทียบค่าตามมาตรฐานแล้ว มาใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบค่า เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการวัดค่าอัตราการไหลของไอเสีย โดยการสอบเทียบค่าความเร็วลมที่วัดได้จาก Hotwire Anemometer และค่าที่อ่านได้จากชุดทดลองเวนทูรี

**รูปที่ 3.16** เครื่องวัดความเร็วลม Hotwire Anemometer

**รูปที่ 3.17** เวนทูรี (venture meter)

สมการคำนวณหาความเร็วของไอเสียที่ไหลผ่านเวนทูรี่

$$v_{th} = \sqrt{\frac{2\rho_2 gh}{\rho_1(1-(\frac{D_2}{D_1})^4)}} \tag{3.6}$$

เมื่อ $D_1 = 0.05$ m

$D_2 = 0.03$ m

$g$ =9.81 m²/s

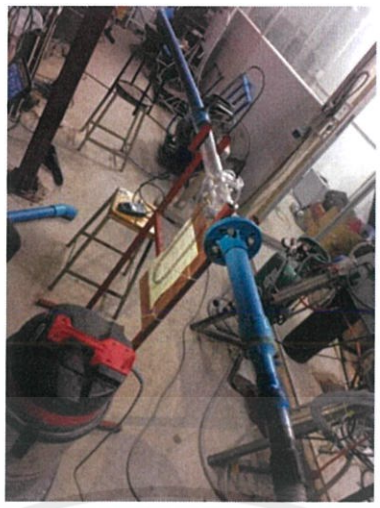
$\rho_2 = 1000$ kg / m$^3$

$\rho_1 = 1.292$ kg / m$^3$

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{\pi x(0.05)^2}{4} = 19.63x10^{-4}\ \text{m}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4} = \frac{\pi x(0.03)^2}{4} = 7.07x10^{-4}\ \text{m}^2$$

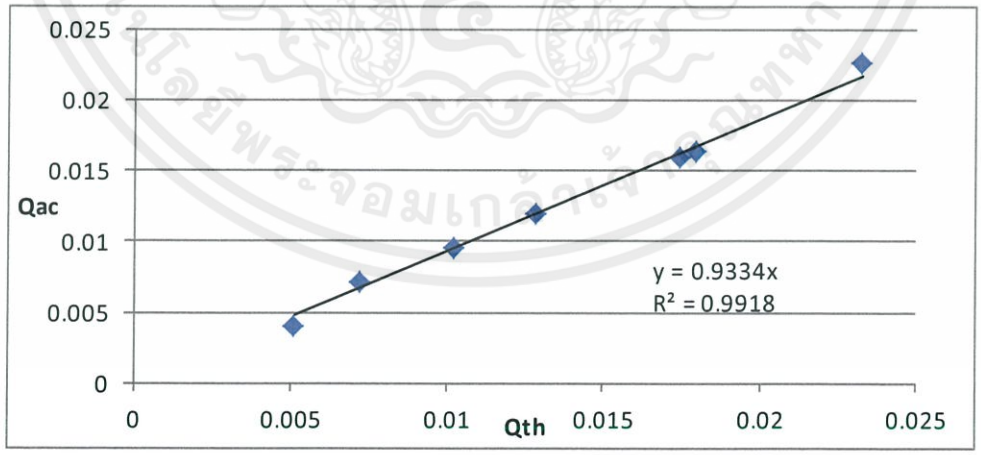
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.18** ชุดทดลองการสอบเทียบค่า

**ตารางที่ 3.1** ผลการสอบเทียบค่าระหว่าง Hotwire Anemometer และ venture meter

| ครั้ง | $v_{ac}(m/s)$ | $Q_{ac} = v_{ac} x A_1 (m^3/s)$ | $h(m)$ | $v_{th}(m/s)$ | $Q_{th} = v_{th} x A_2 (m^3/s)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 11.5 | 0.0226 | 0.062 | 11.8 | 0.0232 |
| 2 | 6.05 | 0.0119 | 0.019 | 6.55 | 0.0129 |
| 3 | 8.33 | 0.0164 | 0.037 | 9.15 | 0.0180 |
| 4 | 8.06 | 0.0158 | 0.035 | 8.90 | 0.0175 |
| 5 | 4.82 | 0.0095 | 0.012 | 5.12 | 0.0102 |
| 6 | 3.64 | 0.0071 | 0.006 | 3.68 | 0.0072 |
| 7 | 2.02 | 0.0040 | 0.003 | 2.60 | 0.0051 |




**รูปที่ 3.19** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Q_{th}$ และ $Q_{ac}$

เมื่อ $Q_{th}$ คือ อัตราการไหลของไอเสียตามทฤษฎี

$Q_{ac}$ คือ อัตราการไหลของไอเสียตามความเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการสอบเทียบค่า จะได้ว่าค่า $Q_{ac} = 0.9347Q_{th}$ ดังนั้นในการคำนวณจริง จะต้องมีการคูณค่าสัมประสิทธิ์ตัวนี้เข้าไป เพื่อให้เกิดความเที่ยงตรงแม่นยำในผลการวัด

## 3.3 การคำนวณอื่นๆ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณหาค่าต่างๆ อันประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพหอทำความเย็นใหม่ การแสดงสมการสมดุลพลังงานของหอทำความเย็น อัตราการสูญเสียน้ำของหอทำความเย็น และการคำนวณหาปริมาณไอน้ำชะล้างที่ระเหยออกไปพร้อมกับไอเสีย

### 3.3.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพหอทำความเย็นใหม่

การคำนวณหาประสิทธิภาพของหอทำความเย็น สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$\eta_{CT} = \frac{T_{hw} - T_{cw}}{T_{hw} - T_{wb}} x100 \tag{3.7}$$

เมื่อ $\eta_{CT}$ คือ ประสิทธิภาพของหอทำความเย็น

$T_{hw}$ คือ อุณหภูมิน้ำร้อนที่ไหลเข้าหอทำความเย็น (℃)

$T_{cw}$ คือ อุณหภูมิน้ำหลังผ่านการทำความเย็นจากหอทำความเย็น (℃)

$T_{wb}$ คือ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ไหลเข้าหอทำความเย็น (℃)

### 3.3.2 การแสดงสมการสมดุลพลังงานและอัตราการสูญเสียน้ำของหอทำความเย็นใหม่

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการแสดงสมการสมดุลพลังงานของหอทำความเย็นและอัตราการสูญเสียน้ำของหอทำความเย็น ซึ่งสามารถนำไปหาค่าผลลัพธ์ต่างๆได้จากผลของการทดลอง โดยสมการพลังงานนี้ จะคิดที่ช่วงสภาวะสุดท้ายของการทดลอง เนื่องจากมีค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนสูงที่สุด และสมมติให้ระบบเป็นสภาวะสมดุล (steady state) ซึ่งจะสามารถเขียนแสดงสมการได้ดังนี้

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \tag{3.8}$$

$$\dot{m}_{ai} h_{ai} + \dot{m}_{hw} h_{hw} = \dot{m}_{ao} h_{ao} + \dot{m}_{cw} h_{cw} + \dot{m}_{d} h_{d} + \dot{Q}_{lost} \tag{3.9}$$

โดยที่

$\dot{m}_{ai}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้าหอทำความเย็น (kg/s)

$\dot{m}_{ao}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาออกหอทำความเย็น (kg/s) = $\dot{m}_{ai} + \Delta\dot{m}_{v}$

$\Delta\dot{m}_{v}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอออกจากหอทำความเย็น (kg/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\dot{m}_{hw}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำขาเข้าหอทำความเย็น (kg/s)

$\dot{m}_{cw}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำขาออกหอทำความเย็น (kg/s) = $\dot{m}_{hw} - \Delta\dot{m}_v - \dot{m}_d$

$\dot{m}_d$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่กระเซ็นออกจากหอทำความเย็น(drift loss) (kg/s)

$h_{ai}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของอากาศขาเข้าหอทำความเย็น (kJ/kg)

$h_{ao}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของอากาศขาออกหอทำความเย็น (kJ/kg)

$h_{hw}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของน้ำขาเข้าหอทำความเย็น (kJ/kg)

$h_{cw}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของน้ำขาออกหอทำความเย็น (kJ/kg)

$h_d$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของน้ำที่กระเซ็นออกจากหอทำความเย็น (kJ/kg)

$\dot{Q}_{lost}$ = อัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนของหอทำความเย็นจากการพาความร้อน (kW)

จากนั้นทำการจัดรูปสมการพลังงานใหม่ โดยจัดให้ส่วนของน้ำขาเข้าและน้ำขาออกหอทำความเย็นอยู่ทางด้านซ้าย ซึ่งก็คือพจน์ของภาระความร้อนที่ถูกดึงออกจากน้ำ และส่วนที่เหลือให้อยู่ด้านขวามือ จะได้สมการดังนี้

$$\dot{m}_{hw}h_{hw} - \dot{m}_{cw}h_{cw} = \dot{m}_{ao}h_{ao} - \dot{m}_{ai}h_{ai} + \dot{m}_d h_d + \dot{Q}_{lost} \tag{3.10}$$

$$\text{Heat load} = \dot{m}_{ao}h_{ao} - \dot{m}_{ai}h_{ai} + \dot{m}_d h_d + \dot{Q}_{lost} \tag{3.11}$$

ตัวแปรต่างๆในสมการ จะถูกหามาจากผลการทดลอง ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในบทที่ 5 ส่วนอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อน ( $\dot{Q}_{lost}$ ) นั้น สูญเสียจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติโดยอากาศบริเวณรอบข้าง โดยคำนวณจากสูตร [21]

$$\dot{Q}_{lost} = hA\left(T_s - T_\infty\right) \tag{3.12}$$

โดยที่

$h$ = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m²•K)

$A$ = พื้นที่ผิวของผนังหอทำความเย็น (m²)

$T_s$ = อุณหภูมิพื้นผิวของผนังคูลลิ่งทาวเวอร์ (℃ or K)

$T_\infty$ = อุณหภูมิของอากาศบริเวณรอบข้าง (℃ or K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจะทำการเก็บค่าอุณหภูมิพื้นผิวของผนังหอทำความเย็นโดยการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด และคำนวณหาค่า h จากสูตร [21]

$$h = \frac{Nu \bullet k}{L} \tag{3.13}$$

เมื่อได้ผลจากการทดลองแล้ว จะทำการคำนวณโดยหาค่าต่างๆจากตาราง A-15 [21] และแทนค่ากลับเข้าไปในสมการ (3.12) โดยคิดจากสภาวะพื้นที่ผิวแต่ละด้าน จากนั้นนำมารวมกัน จะได้อัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนของอากาศบริเวณรอบๆหอทำความเย็นทั้งหมด

จากนั้นคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้า โดยการใช้เครื่องวัดความเร็วลม วัดค่าความเร็วลมที่ทางเข้าหอทำความเย็น จากนั้นนำไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากสูตร

$$\dot{V}_{ai} = A_{ai} v_{ai} \tag{3.14}$$

โดยที่

$\dot{V}_{ai}$ = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ไหลเข้าหอทำความเย็น (m³/s)
$A_{ai}$ = บริเวณพื้นที่หน้าตัดที่อากาศขาเข้าหอทำความเย็นไหลเข้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 m²
$v_{ai}$ = ความเร็วลมของอากาศที่ไหลเข้าหอทำความเย็น (m/s)

เมื่อได้อัตราการไหลเชิงปริมาตรจากการคำนวณในสมการที่ (3.14) มาแล้วนั้น จะสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้าหอทำความเย็นได้ จากสูตร

$$\dot{m}_{ai} = \rho_{air} \dot{V}_{ai} \tag{3.15}$$

โดยที่

$\dot{m}_{ai}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาเข้าหอทำความเย็น (kg/s)
$\rho_{air}$ = ความหนาแน่นของอากาศขาเข้าหอทำความเย็น (kg/m³)

นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ และอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำกระเซ็นที่สูญเสีย จากสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{ai} = \dot{m}_{da} + \dot{m}_{vi} \tag{3.16}$$

จาก

$$\dot{m}_{da} = \frac{\dot{m}_{ai}}{1 + \omega_1} \tag{3.17}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\Delta \dot{m}_v = \dot{m}_{da} \times (\omega_2 - \omega_1) \tag{3.18}$$

โดยที่

$\dot{m}_{da}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง (kg/s)

$\omega_1$ = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศขาเข้า

$\omega_2$ = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศขาออก

$\dot{m}_{vi}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำในอากาศขาเข้า (kg/s)

ปริมาณน้ำที่สูญเสียของหอทำความเย็นทั้งหมดต่อ 1 วินาที สามารถหาได้จากการทดลองโดยการวัดปริมาตรน้ำในภาชนะใต้หอทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อหน่วยเวลา ซึ่งปริมาณน้ำที่สูญเสียไปทั้งหมด คือผลรวมของน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ และน้ำที่กระเซ็นสูญเสียออกจากหอทำความเย็น โดยสามารถเขียนได้ดังสมการด้านล่างดังนี้

$$\Delta \dot{m}_v + \dot{m}_d = \text{ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากหอทำความเย็นทั้งหมด} \tag{3.19}$$

ตัวแปรที่ทราบค่าได้จากการทดลองคือ ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากหอทำความเย็นทั้งหมด และปริมาณไอน้ำที่ระเหยออกไปจากหอทำความเย็น ( $\Delta \dot{m}_v$ ) จากการคำนวณในสมการที่ (3.18) ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาคำนวณหาค่าปริมาณน้ำกระเซ็นสูญเสีย ( $\dot{m}_d$ ) จากสมการที่ (3.19) ได้

จากนั้นคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศขาออกและอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำขาออกจากหอทำความเย็นจากสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_{ao} = \dot{m}_{ai} + \Delta \dot{m}_v \tag{3.20}$$

$$\dot{m}_{cw} = \dot{m}_{hw} - \Delta \dot{m}_v - \dot{m}_d \tag{3.21}$$

นำค่าอัตราการไหลเชิงมวลที่ได้ทั้งหมดรวมถึงค่าเอ็นทัลปีของน้ำจากตาราง A-4 [22] และค่าเอ็นทัลปีของอากาศจากแผนภูมิไซโครเมทริก [17] ไปคำนวณในสมการ (3.10) จะทำให้ได้ค่าต่างๆซึ่งแสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทพลังงานความร้อนของกระบวนการทำงานของหอทำความเย็น รวมไปถึงค่าภาระความร้อนที่ได้จากความเป็นจริงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การคำนวณหาปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการคำนวณหาปริมาณน้ำหมุนเวียนที่ถูกดูดกลับไปใช้เป็นน้ำชะล้างในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งน้ำชะล้างส่วนหนึ่งจะระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากไอเสียที่ไหลเข้ามาในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกและถูกดูดออกไปทางปล่องไอเสียพร้อมกับไอเสียที่ถูกชะล้างแล้ว โดยการคำนวณหาปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยออกไปนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลพลังงานของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกดังต่อไปนี้ โดยคิดที่สภาวะสมดุล (steady state)

$$\sum \dot{E}_{in} = \sum \dot{E}_{out} \tag{3.22}$$

$$\dot{m}_{xi} h_{xi} + \dot{m}_{fw} h_{fw} + \dot{m}_{rw} h_{rw} = \dot{m}_{xi} h_{xo} + \dot{m}_{v} h_{v} + \dot{m}_{hw} h_{hw} \tag{3.23}$$

จาก
$$h = c_p T \tag{3.24}$$

ดังนั้นแทนค่ากลับเข้าไปในสมการที่ (3.23) ใหม่จะได้ว่า

$$\dot{m}_{xi} c_{p_{xi}} T_{xi} + \dot{m}_{fw} h_{fw} + \dot{m}_{rw} h_{rw} - \dot{m}_{xi} c_{p_{xo}} T_{xo} - \dot{m}_{hw} h_{hw} = \dot{m}_{v} h_{v} \tag{3.25}$$

โดยที่

$\dot{m}_{xi}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของไอเสียที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kg/s)
$\dot{m}_{fw}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำประปาที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kg/s)
$\dot{m}_{rw}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำชะล้างที่ดูดจากน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (kg/s)
$\dot{m}_{v}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำที่ระเหยออกไปกับไอเสีย (kg/s)
$\dot{m}_{hw}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kg/s)
$c_{p_{xi}}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของไอเสียที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kJ/kg•°C)
$c_{p_{xo}}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของไอเสียที่ไหลออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kJ/kg•°C)
$T_{xi}$ = อุณหภูมิไอเสียที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (°C)
$T_{xo}$ = อุณหภูมิไอเสียที่ไหลออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (°C)
$h_{fw}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของน้ำประปาที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kJ/kg)
$h_{rw}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของน้ำชะล้างที่ดูดจากน้ำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (kJ/kg)
$h_{hw}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของน้ำที่ออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kJ/kg)
$h_{v}$ = เอ็นทัลปีจำเพาะของไอน้ำที่ระเหยออกไปกับไอเสีย (kJ/kg)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาอัตราการระเหยกลายเป็นไอของน้ำชะล้าง สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.25) โดยแทนค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการทดลองลงไปในสมการ ซึ่งค่าเอ็นทัลปีจำเพาะของน้ำ สามารถหาได้จากตาราง A-4 [22] ส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะและอัตราการไหลเชิงมวลของไอเสีย สามารถหาได้จากตารางคุณสมบัติของไอเสียจากงานวิจัย [5]

อย่างไรก็ตาม สมการการคำนวณในบทนี้ ยังมิอาจคำนวณได้ เนื่องจากยังไม่ทราบค่าตัวแปรต่างๆ เพราะว่าตัวแปรต่างๆนั้น จะได้มาจากผลการทดลอง ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในบทถัดๆไป ส่วนในบทถัดไปนี้ จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 4

# อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง อาทิเช่น ปั๊มน้ำ เครื่องมือวัดต่างๆ รวมไปถึงวิธีการทดลองและการเก็บผลการทดลอง โดยการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็นสองกรณีเงื่อนไข คือ ก่อนการปรับปรุงระบบ และหลังการปรับปรุงระบบโดยการเพิ่มหอทำความเย็นใหม่เข้าไปในระบบทำความเย็นของน้ำหมุนเวียน

## 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

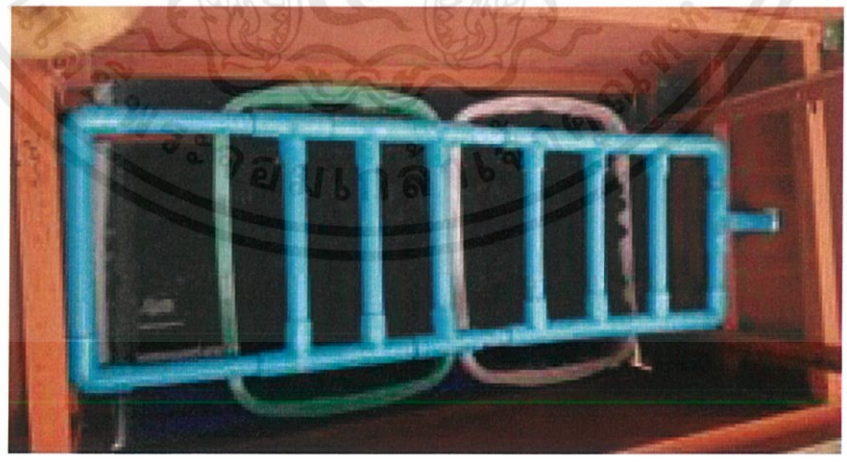
### 4.1.1 อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นเดิม (Old cooling system devices)

อุปกรณ์ในระบบทำความเย็นเดิม ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ

1) หอทำความเย็นเดิม (Old cooling tower)
2) บ่อพักน้ำ (clarifier)

#### 4.1.1.1 หอทำความเย็นเดิม

หอทำความเย็นเดิมนั้น ถูกสร้างขึ้นโดยมีขนาด กว้าง 120 cm ยาว 73 cm สูง 65 cmเป็นหอทำความเย็นชนิดไหลสวนทาง และใช้แรงลมธรรมชาติในการดูดอากาศไหลผ่านหอทำความเย็น ภายในติดตั้งแผงขยายฟิล์มชนิดน้ำตกกระแทก โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสของแผงขยายฟิล์มเท่ากับ 19.6 $m^2$ และพ่นน้ำร้อนออกผ่านรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ที่ถูกเจาะไว้ใต้ท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว จำนวน 30 รู

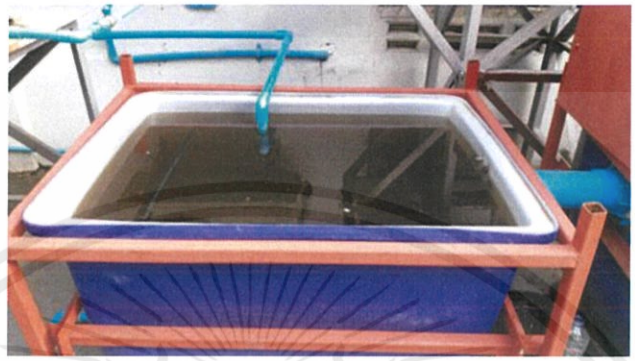


**รูปที่ 4.1** ภายในหอทำความเย็นเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1.2 บ่อพักน้ำ

บ่อพักน้ำขนาด กว้าง 110 cm ยาว 80 cm สูง 68 cm เป็นส่วนที่ต่อมาจากหอทำความเย็นเดิม ซึ่งเป็นบริเวณที่น้ำหมุนเวียนหลังผ่านการลดอุณหภูมิจากหอทำความเย็นเดิมจะไหลผ่านมาเพื่อลดอุณหภูมิและให้ตกตะกอนบางส่วน ก่อนที่จะถูกดูดกลับไปใช้เป็นน้ำชะล้างในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกอีกครั้ง โดยที่น้ำหมุนเวียนบางส่วนจะถูกปล่อยทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมจากบ่อพักน้ำนี้เช่นกัน



**รูปที่ 4.2 บ่อพักน้ำ**

### 4.1.2 หอทำความเย็นใหม่ (New cooling tower)

หอทำความเย็นใหม่นี้ถูกสร้างขึ้น โดยให้มีขนาด พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างน้ำกับอากาศ และอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่านมากกว่าหอทำความเย็นในระบบเดิม โดยมีขนาดกว้าง 1 m ยาว 1 m สูง 2.4 m(ไม่รวมล้อ) พื้นที่ผิวสัมผัสของแผงขยายฟิล์ม 60 $m^2$ นอกจากนี้ ยังมีพัดลมดูดอากาศด้านบน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด 24 นิ้ว มอเตอร์ 1/3 แรงม้า ความเร็วรอบ 1450 RPM ใช้สายพานเป็นตัวส่งกำลัง และใช้หัวฉีดสเปรย์น้ำแบบเต็มกรวย (full cone spray) จำนวน 8 หัว ในการฉีดน้ำร้อนให้เป็นละออง เพื่อเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ

**รูปที่ 4.3** หอทำความเย็นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.3 ชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสีย

ชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสียนี้ ถูกจัดทำขึ้นเพื่อใช้วัดหาค่าความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสีย โดยได้มีการกล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบ และอุปกรณ์ภายในต่างๆมาแล้ว ในหัวข้อที่ 3.2 ในบทที่ 3

**รูปที่ 4.4** ชุดทดลองเก็บผลตัวอย่างไอเสีย

### 4.1.4 Differential Pressure

เป็นอุปกรณ์ใช้วัดความแตกต่างของความดันระหว่างจุดสองจุด จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อความดันทั้งสองจุดที่วัดมีค่าเท่ากัน ใช้สำหรับวัดความแตกต่างของความดันของหลอดรูตัวยู (U-Type Manometer) แต่ละข้างเพื่อนำไปใช้ในสูตรหาความหนาแน่นของไอเสียในท่อดังสมการที่ (4.1)

$$\rho_{humid\ air} = \frac{P_d}{R_d T} + \frac{P_v}{R_v T} \tag{4.1}$$

**รูปที่ 4.5** Differential Pressure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.5 เครื่องชั่งแบบละเอียด

เครื่องชั่งแบบละเอียดใช้สำหรับชั่งของที่ใช้ความละเอียดสูง ในการทดลองนี้ใช้สำหรับชั่งแผ่นกรองไอเสียก่อน-หลังเก็บผลไอเสีย เพื่อดูปริมาณฝุ่นที่ปะปนในไอเสีย

**รูปที่ 4.6** เครื่องชั่งแบบละเอียด

### 4.1.6 บอร์ด Arduino Uno R3 และเซนเซอร์

เซนเซอร์สำหรับเก็บผลอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน ณ จุดต่างๆ โดยใช้ Arduino อ่านค่าและประมวลผลข้อมูลจากนั้นแสดงผลไปที่หน้าจอคอมพิวเตอร์

**รูปที่ 4.7** เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4.8** เซนเซอร์วัดอัตราการไหลรุ่น FS400A-G1 [3]

**รูปที่ 4.9** บอร์ด Arduino UNO R3 [14]

### 4.1.7 ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump)

ปั๊มแบบนี้ทำงานโดยอาศัยการหมุนของใบพัดหรืออิมเพลเลอร์ (Impeller) โดยของเหลวจะถูกดูดเข้าทางศูนย์กลางใบพัด แล้วถูกผลักดันออกไปด้วยแรงผลักดันของครีบใบพัดและแรงเหวี่ยงหนีจุดศูนย์กลาง

**รูปที่ 4.10** แสดงปั๊มหอยโข่ง AQUA CPM-158

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4.11** แสดงปั๊มหอยโข่ง Ho-me tech CPM-200

**รูปที่ 4.12** แสดงปั๊มหอยโข่ง GRUNDFOS Type : CHI4-20 A-W-G-BUBV

### 4.1.8 ปั๊มน้ำอัตโนมัติ (Automatic Pump)

เป็นปั๊มน้ำที่ควบคุมโดยการใช้สวิตช์ความดันที่วัดความดันจากน้ำภายในท่อ มีอัตราการสูบน้ำ 33ลิตรต่อนาที ระยะส่ง 12 เมตร ระยะดูด 8 เมตร และท่อดูด 3/4 นิ้ว

**รูปที่ 4.13** แสดงปั๊มน้ำอัตโนมัติ Mitsubishi-105QS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4.14** แสดงปั๊มน้ำอัตโนมัติ Mitsubishi-EP-305QS

### 4.1.9 ปั๊มน้ำแบบจุ่ม

เป็นปั๊มน้ำที่ใช้จุ่มลงไปในภาชนะรองรับน้ำ โดยมีใบพัดบริเวณด้านล่างของปั๊มเป็นตัวดูดน้ำขึ้นมาในแนวดิ่ง และจะส่งไปตามท่อด้านบน ปั๊มชนิดนี้มีความทนทานต่อสภาพน้ำที่ไม่สะอาด แต่มีข้อเสียคือแรงดันค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับปั๊มน้ำชนิดอื่นๆ

**รูปที่ 4.15** แสดงปั๊มน้ำไดโว่ Mitsubishi Tornado WSP-105S

### 4.1.10 เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

เครื่องบันทึกอุณหภูมิ คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า แล้วทำการบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น โดยการแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นข้อมูลที่ต้องการให้แสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**รูปที่ 4.16** แสดงเครื่องบันทึกอุณหภูมิ Data logger GRAPHTEC midi LOGGER GL820

### 4.1.11 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouples type K)

เทอร์โมคัปเปิลคืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ 2 ชนิด ที่เชื่อมติดกัน เมื่ออุณหภูมิที่ปลายลวดด้านที่เชื่อมกันแตกต่างกับปลายลวดด้านที่เหลือจะเกิดความต่างศักดิ์ มีหน่วยเป็น ไมโครโวลท์ (μV) หรือ มิลลิโวลท์ (mV) ซึ่งเรานำความต่างศักย์ที่พบนี้มาแปลงเป็นอุณหภูมิ

**รูปที่ 4.17** แสดงหัวโพรบของเทอร์โมคัพเปิลชนิด K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.1.12 เทอร์โมมิเตอร์ชนิดของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด

เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล ด้วยหลักการขยายตัวหรือหดตัวของของเหลว โดยเมื่อของเหลวได้รับความร้อน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ของเหลวจะเกิดการขยายตัว และหดตัวลงเมื่ออุณหภูมิลดลง อุปกรณ์วัดชนิดนี้มีของเหลวซึ่งก็คือแอลกอฮอล์บรรจุอยู่ภายในหลอดแก้วปิด

**รูปที่ 4.18** เทอร์โมมิเตอร์ชนิดของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด

### 4.1.13 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของสภาพอากาศ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อวัดอุณหภูมิและความชื้นของสภาพอากาศบริเวณที่ทำการทดลอง รวมไปถึงสภาพอากาศขาออกจากหอทำความเย็นด้วย

**รูปที่ 4.19** เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นของสภาพอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.1.14 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด (Infrared Thermometer)**

**เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิพื้นผิวของวัตถุโดยการวัดพลังงานที่ปล่อยออกของวัตถุ**

**รูปที่ 4.20** เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดรุ่น Testo 881

## 4.2 การทดลอง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองเพื่อเก็บผลค่าต่างๆที่ต้องการ โดยจะทำการทดลองเป็น 2 กรณี คือ ก่อนและหลังการปรับปรุงระบบโดยการติดตั้งหอทำความเย็นใหม่เข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นน้ำหมุนเวียน โดยการทดลองนี้ จะปฏิบัติการโดยการจุดเตาเผาพลังงานชีวมวลแบบผง ใช้เศษไม้ยางพาราบดเป็นเชื้อเพลิง อัตราความร้อนสูงสุดของเตาเผาที่ทำการทดลองเท่ากับ 300 kW

### 4.2.1 วิธีการทดลองเก็บผลอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียน

1) ติดตั้งปั๊มน้ำ บอลวาล์ว และท่อน้ำ ณ จุดต่างๆที่ต้องการใช้งาน

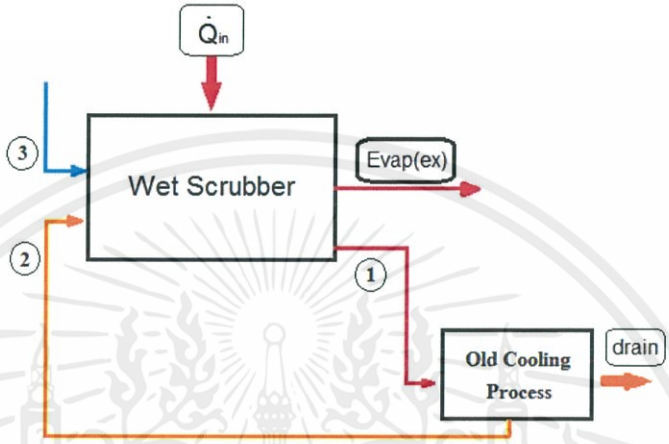
2) เชื่อมต่อเซนเซอร์อุณหภูมิและเซนเซอร์วัดอัตราการไหลกับ Arduino แสดงผลที่ได้ผ่านทาง หน้าจอคอมพิวเตอร์

3) ทำการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าระบบทำความเย็นทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง ให้มีค่าเท่ากับ 1.025 kg/s โดยการปรับระบบองศาของบอลวาล์ว และดูค่าอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนที่วัดโดยเซ็นเซอร์ผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

4) ทำการจดบันทึกอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียนที่วัดได้ ขณะทำการทดลอง โดยจะเริ่มทำการจดบันทึกตั้งแต่เริ่มการจุดเตา จนกระทั่งเปลวไฟในเตาดับ หรือเกิดเหตุขัดข้อง หรือตามความเหมาะสม

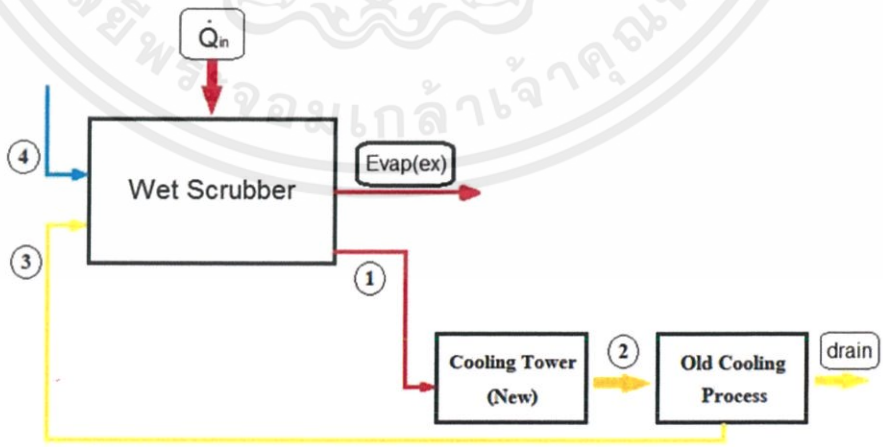
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิน้ำ จะทำการติดตั้งเพื่อวัดค่า ณ จุดต่างๆโดยจะแสดงให้เห็นในแผนผังการไหลของน้ำหมุนเวียน ดังในรูปที่ 3.1 จะแสดงถึงแผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ ซึ่งอุณหภูมิน้ำจะถูกวัดค่าในตำแหน่งหมายเลข 1 และ หมายเลข 2 ซึ่งก็คือตำแหน่งของน้ำร้อนที่ไหลจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกมาเข้าระบบทำความเย็น และตำแหน่งของน้ำหลังผ่านการทำความเย็นแล้วและถูกดูดกลับไปใช้ใหม่ ตามลำดับ ส่วนหมายเลขอื่นๆ และตัวแปรอื่นๆในรูปภาพ ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1 ในบทที่ 3




**รูปที่ 3.1** แผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ

ส่วนการวัดค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ จะทำการวัดค่าที่ตำแหน่งหมายเลข 1 2 และ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งก็คือตำแหน่งของน้ำร้อนที่ไหลออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกไปเข้าหอทำความเย็นใหม่ ตำแหน่งของน้ำหลังผ่านการทำความเย็นโดยหอทำความเย็นใหม่แล้ว และตำแหน่งของน้ำที่ผ่านการทำความเย็นโดยระบบทำความเย็นเดิมและถูกดูดกลับไปใช้ใหม่ ตามลำดับ ส่วนหมายเลขอื่นๆและตัวแปรอื่นๆในรูปภาพ ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1 ในบทที่ 3




**รูปที่ 3.2** แผนผังการไหลของระบบน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอุณหภูมิของน้ำทิ้ง และอุณหภูมิของน้ำที่ถูกดูดกลับไปชะล้างใช้ใหม่นั้น จะมีค่าเท่ากัน และระบบทำความเย็นเดิมนั้น ประกอบไปด้วยหอทำความเย็นเดิม และถังพักน้ำ นอกจากนี้อุณหภูมิของน้ำประปาก็ถูกวัดค่าด้วยเช่นกัน แต่ไม่ได้กล่าวถึงเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะทำการทดลอง

**4.2.2 วิธีการทดลองเพื่อเก็บผลความหนาแน่นฝุ่นปะปนในไอเสีย**

1) ติดตั้งชุดทดลองเก็บตัวอย่างไอเสีย โดยเชื่อมต่อเข้ากับปล่องไอเสียหลังผ่านเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

2) ทำการดูดเก็บผลไอเสียขณะทำการทดลอง โดยจะทำการเก็บผลในขณะที่อัตราพลังงานความร้อนของเตาเผาคงที่ในช่วง 150 kW , 200 kW , 250 kW และ 300 kW ตามลำดับ

3) ดูดเก็บผลไอเสียเป็นเวลา 5 นาที หรือตามความเหมาะสม ในแต่ละการทดลอง และอ่านค่าความสูงจากหลอดตัวยูในหลอดเวนทูรี (Venturi Meter) เพื่อนำค่าไปคำนวณหาอัตราไหลภายในท่อ

4) อ่านค่าความดันจาก Differential Pressure นำค่าไปหาความหนาแน่นไอเสียภายในท่อ เพื่อนำข้อมูลไปคำนวณหาปริมาณไอเสียที่ไหลผ่านผ้ากรองฝุ่น ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากเวนทูรี่

5) หลังจากทำการดูดเก็บผลตัวอย่างไอเสียแล้ว ทำการเปลี่ยนแผ่นกรองไอเสีย และนำแผ่นกรองไอเสียที่ได้ทำการเก็บผลแล้วนั้นไปอบแห้งก่อนนำไปชั่งในเครื่องชั่งระเอียด

6) นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาความหนาแน่นฝุ่นปะปนในไอเสีย

**4.2.3 การเก็บผลการทดลองอื่นๆ**

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการเก็บค่าต่างๆ นอกเหนือจากอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนและความหนาแน่นฝุ่นปะปน โดยจะกล่าวถึงการเก็บผลสภาพอากาศบริเวณที่ทำการทดลองและที่ทางออกหอทำความเย็น การเก็บผลอุณหภูมิไอเสีย และการเก็บผลปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่

**4.2.3.1 การเก็บผลค่าสภาพอากาศ**

ทำการเก็บค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศบริเวณที่ทำการทดลองและบริเวณทางออกของหอทำความเย็นโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความชื้นของสภาพอากาศ และเทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าต่างๆในสมการสมดุลพลังงานในบทที่ 3

**4.2.3.2 การเก็บผลปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่**

ทำการเก็บค่าโดยการปรับอัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้าหอทำความเย็น ให้มีค่าเท่ากับอัตราการไหลน้ำที่ดูดออกจากภาชนะใต้หอทำความเย็นไปยังระบบทำความเย็นเดิม และทำการจับเวลา จากนั้นวัดระดับน้ำในภาชนะใต้หอทำความเย็นที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งก็คือปริมาณน้ำที่สูญเสียของหอทำความเย็นใหม่ ซึ่งจะถูกนำไปใช้คำนวณในสมการในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3.3 การเก็บผลอุณหภูมิไอเสีย

การเก็บผลอุณหภูมิไอเสีย ณ จุดต่างๆ จะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิให้แสดงผลในเครื่องบันทึกผลอุณหภูมิ (Data logger) โดยจะทำการวัดอุณหภูมิไอเสียก่อนและหลังการชะล้างโดยเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก เพื่อนำค่าไปใช้คำนวณในสมการที่ (3.25) ในบทที่ 3

#### 4.2.3.4 การเก็บผลค่าอุณหภูมิพื้นผิวของหอทำความเย็น

ผลค่าอุณหภูมิพื้นผิวของหอทำความเย็นนั้น ต้องถูกนำไปใช้คำนวณเพื่อหาอัตราการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติจากสมการที่ (3.12) ซึ่งการเก็บผลค่าอุณหภูมิพื้นผิวของหอทำความเย็น กระทำโดยการใช้เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดรุ่น Testo 881 ในการวัดอุณหภูมิพื้นผิวของหอทำความเย็นใหม่

ในบทถัดไป จะกล่าวถึงผลจากการทดลอง ซึ่งเก็บผลโดยวิธีการต่างๆที่ได้กล่าวถึงในบทนี้ และจะนำไปสู่บทสรุปในบทที่ 6 เป็นการต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 5

# ผลการทดลอง

จากบทที่ผ่านมานั้นได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง เงื่อนไขการทดลอง และวิธีการเก็บผลเป็นที่เรียบร้อยแล้ว สำหรับบทนี้จึงเป็นการนำเสนอในส่วนของผลการทดลอง และการอภิปรายผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะนำไปสู่ข้อสรุปของผลการวิจัยในครั้งนี้

## 5.1 ผลการเก็บค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียน

### 5.1.1 ผลการเก็บค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 ณ เวลาต่างๆ โดยแสดงดังตารางที่ 5.1 และถูกทดลองที่สภาวะดังนี้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 32 ℃
ความชื้นสัมพัทธ์ = 68 %
อัตราการไหลของน้ำขาเข้าระบบทำความเย็น = 1.025 kg/s

**ตารางที่ 5.1** แสดงผลอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนก่อนการปรับปรุงระบบ

| เวลา (วินาที) | T1 (℃) | T2 (℃) |
|---|---|---|
| 0 | 30.00 | 30.00 |
| 300 | 31.37 | 30.00 |
| 600 | 33.88 | 30.25 |
| 900 | 36.94 | 30.25 |
| 1200 | 39.44 | 32.25 |
| 1500 | 42.38 | 34.63 |
| 1800 | 46.44 | 37.75 |
| 2100 | 49.75 | 40.63 |
| 2400 | 53.00 | 43.69 |
| 2700 | 55.94 | 46.63 |

| เวลา (วินาที) | T1 (℃) | T2 (℃) |
|---|---|---|
| 3000 | 57.69 | 49.38 |
| 3300 | 56.88 | 51.75 |
| 3600 | 55.25 | 52.63 |
| 3900 | 56.25 | 52.88 |
| 4200 | 56.60 | 53.25 |
| 4500 | 58.38 | 53.88 |
| 4800 | 61.31 | 55.00 |
| 5100 | 64.00 | 57.00 |
| 5400 | 66.00 | 58.50 |
| 5700 | 67.69 | 60.31 |

โดยที่

T1 = อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนก่อนเข้าระบบทำความเย็น
T2 = อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังผ่านระบบทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 ผลการเก็บค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบจากการทดลองในหัวข้อที่ 4 2.1 ณ เวลาต่างๆ โดยแสดงดังตารางที่ 5.2 และถูกทดลองที่สภาวะดังนี้

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = 32 ℃
ความชื้นสัมพัทธ์ = 71 %
อัตราการไหลของน้ำขาเข้าหอทำความเย็นใหม่ = 1.025 kg/s

**ตารางที่ 5.2** แสดงผลอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังการปรับปรุงระบบ

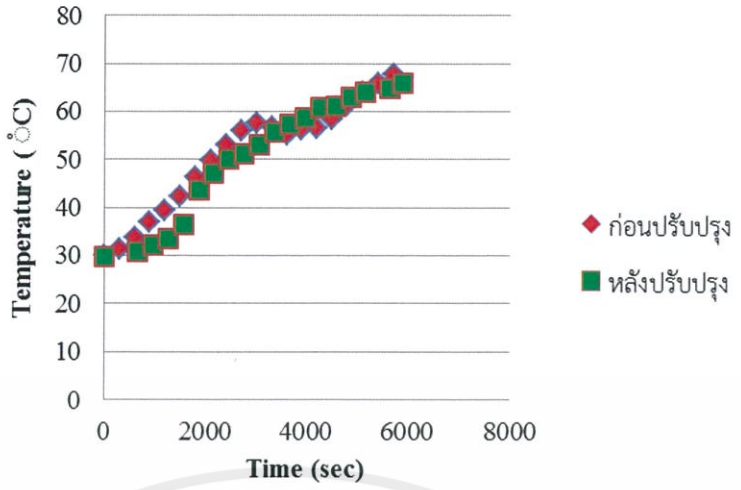
| เวลา (วินาที) | T1 (℃) | T2 (℃) | T3 (℃) |
|---|---|---|---|
| 0 | 29.69 | 29.25 | 29.25 |
| 660 | 30.87 | 29.75 | 29.25 |
| 960 | 32.25 | 29.44 | 29.36 |
| 1260 | 33.63 | 30.00 | 29.46 |
| 1560 | 36.50 | 31.31 | 30.54 |
| 1860 | 43.63 | 34.44 | 31.23 |
| 2160 | 47.31 | 35.75 | 31.62 |
| 2460 | 50.00 | 36.50 | 31.69 |
| 2760 | 51.25 | 37.19 | 31.98 |
| 3060 | 53.06 | 37.31 | 31.94 |
| 3360 | 55.75 | 38.19 | 32.69 |

| เวลา (วินาที) | T1 (℃) | T2 (℃) | T3 (℃) |
|---|---|---|---|
| 3660 | 57.25 | 38.81 | 33.06 |
| 3960 | 58.75 | 39.19 | 34.19 |
| 4260 | 60.90 | 39.31 | 34.81 |
| 4560 | 61.19 | 40.00 | 35.63 |
| 4860 | 63.06 | 40.44 | 36.94 |
| 5160 | 64.06 | 40.63 | 37.08 |
| 5640 | 64.87 | 40.83 | 37.17 |
| 5880 | 66.00 | 41.06 | 37.26 |
| 6180 | 67.50 | 41.38 | 37.50 |
| 6480 | 68.44 | 41.69 | 37.81 |
| 6780 | 68.62 | 42.00 | 38.22 |

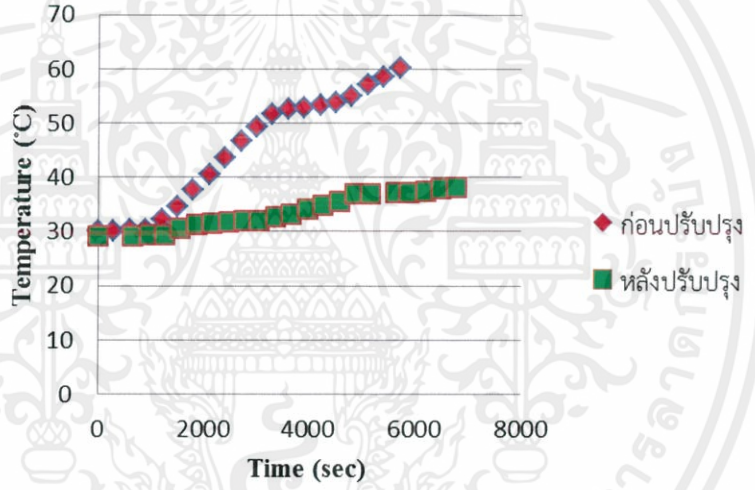
โดยที่

T1 = อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนขาเข้าหอทำความเย็นใหม่
T2 = อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนขาออกหอทำความเย็นใหม่
T3 = อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังหลังผ่านระบบทำความเย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ 5.1** กราฟแสดงอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนก่อนเข้ากระบวนการทำความเย็น




**รูปที่ 5.2** กราฟแสดงอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังผ่านกระบวนการทำความเย็น

จากผลการทดลองพบว่า น้ำหมุนเวียนหลังผ่านกระบวนการทำความเย็นของระบบที่ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพแล้ว มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าก่อนการปรับปรุงระบบ และมีค่าต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ อันเนื่องมาจากการเพิ่มหอทำความเย็นที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนและความเร็วลมที่มากขึ้นเข้าไปในระบบทำความเย็น

อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่ากราฟอุณหภูมิต่อเวลายังคงมีความชันเป็นบวก นั่นหมายถึงเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิน้ำยังคงสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งหากการทดลองไม่ประสบปัญหาเชื้อเพลิงอุดตันในท่อลำเลียงเชื้อเพลิงเสียก่อน อาจจะส่งผลให้อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังผ่านกระบวนการทำความเย็นสูงขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าสูงเกินกว่า 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิของไอเสียที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกมีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้น้ำหมุนเวียนมีอุณหภูมิสูงยิ่งขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลการเก็บตัวอย่างไอเสียเพื่อหาค่าความหนาแน่นของฝุ่นปะปน

### 5.2.1 ความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสียก่อนการปรับปรุงระบบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงค่าความหนาแน่นของฝุ่นที่ปะปนอยู่ในไอ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 ซึ่งจะได้ผลความหนาแน่นฝุ่นปะปนก่อนการปรับปรุงระบบดังตารางที่ 5.3

**ตารางที่ 5.3** ตารางผลการเก็บตัวอย่างไอเสียก่อนการปรับปรุงระบบ

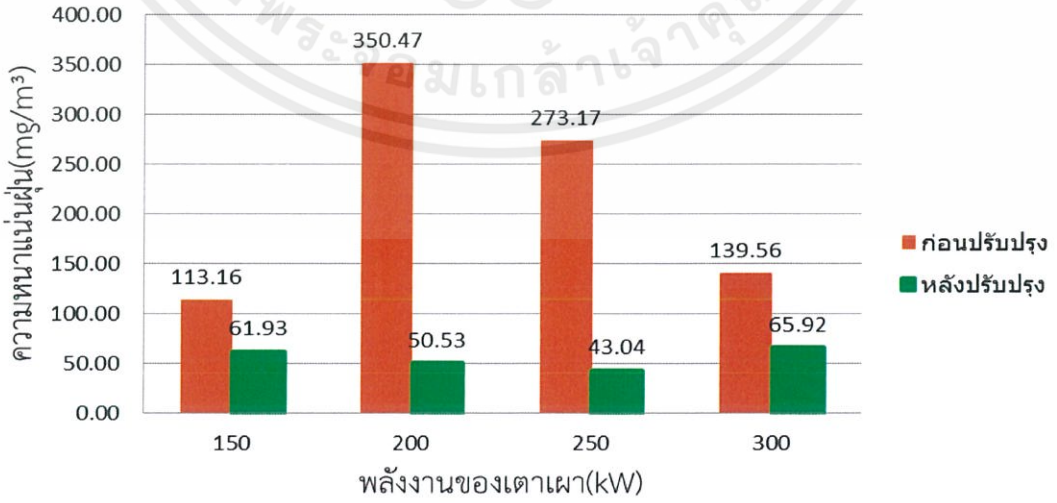
| ครั้ง | พลังงานของเตาเผา(kW) | ปริมาณไอเสีย($m^3$) | น้ำหนักฝุ่น(mg) | ความหนาแน่นฝุ่น(mg/$m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 150 | 1.17 | 132.31 | 113.16 |
| 2 | 200 | 1.17 | 409.77 | 350.47 |
| 3 | 250 | 1.17 | 319.40 | 273.17 |
| 4 | 300 | 1.17 | 163.28 | 139.56 |

### 5.2.2 ความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสียหลังการปรับปรุงระบบ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงค่าความหนาแน่นของฝุ่นที่ปะปนอยู่ในไอเสีย จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 ซึ่งจะได้ผลความหนาแน่นฝุ่นปะปนหลังการปรับปรุงระบบดังตารางที่ 5.4

**ตารางที่ 5.4** ตารางผลการเก็บตัวอย่างไอเสียหลังการปรับปรุงระบบ

| ครั้ง | พลังงานของเตาเผา(kW) | ปริมาณไอเสีย($m^3$) | น้ำหนักฝุ่น(mg) | ความหนาแน่นฝุ่น(mg/$m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 150 | 1.01 | 62.71 | 61.93 |
| 2 | 200 | 1.01 | 51.17 | 50.53 |
| 3 | 250 | 1.01 | 43.58 | 43.04 |
| 4 | 300 | 1.17 | 77.08 | 65.92 |




**รูปที่ 5.3** แผนภูมิเปรียบเทียบความหนาแน่นฝุ่นก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสียหลังการปรับปรุงระบบ มีค่าน้อยกว่าก่อนการปรับปรุงระบบดังแสดงในรูปที่ 5.3 จากสมมติฐานว่า เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนที่มีค่าลดต่ำลง จึงส่งผลให้ปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยออกไปทางปล่องไอเสียมีน้อยลง ซึ่งทำให้ปริมาณน้ำชะล้างในส่วนที่เป็นของเหลวมีมากขึ้น เป็นผลให้การชะล้างฝุ่นควันมลพิษของเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งผลแสดงถึงปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อถัดไปนี้ เพื่อยืนยันผลของสมมติฐานดังกล่าว

## 5.3 ผลการทดลองอื่นๆ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงค่าของผลของการทดลองนอกเหนือจากอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนและความหนาแน่นฝุ่นปะปนในไอเสีย โดยจะกล่าวถึงในส่วนของ ปริมาณน้ำชะล้างที่สูญเสียไปกับการระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากไอเสียภายในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก ประสิทธิภาพและปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่

### 5.3.1 ปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก

จากผลการทดลองเก็บค่าอุณหภูมิและอัตราการไหล ณ จุดต่างๆ ทำให้สามารถนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาปริมาณน้ำชะล้างที่สูญเสียไปกับการระเหยเมื่อได้รับความร้อนจากไอเสีย โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.25) ในหัวข้อที่ 3.3.3 ในบทที่ 3 ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงผลเปรียบเทียบของการคำนวณหาปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหย ของก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ โดยมีสภาวะการทดลองดังนี้

**ตารางที่ 5.5** ตารางแสดงสภาวะการทดลองก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ

| การทดลอง | $T_{xi}$ (℃) | $T_{xo}$ (℃) | $T_{fw}$ (℃) | $T_{hw}$ (℃) | $T_{rw}$ (℃) | $\dot{m}_{xi}$ (kg/s) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ก่อนการปรับปรุง | 1150 | 85 | 30 | 67.5 | 63.5 | 0.1105 |
| หลังการปรับปรุง | 1150 | 75 | 30 | 67.5 | 41.5 | 0.1105 |

โดยที่

$T_{xi}$ = อุณหภูมิไอเสียที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (℃)

$T_{xo}$ = อุณหภูมิไอเสียที่ไหลออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (℃)

$T_{fw}$ = อุณหภูมิของน้ำประปาที่ไหลเข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (℃)

$T_{hw}$ = อุณหภูมิน้ำที่ออกจากเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (℃)

$T_{rw}$ = อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนที่ถูกดูดกลับมาใช้เป็นน้ำชะล้างใหม่ (℃)

$\dot{m}_{xi}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของไอเสียที่เข้าเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก (kg/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการนำค่าต่างๆไปคำนวณ พบว่า ปริมาณน้ำชะล้างที่ระเหยในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกก่อนและหลังการปรับปรุงระบบ มีค่าดังนี้

$$\dot{m}_{v1} = 0.244 \text{ kg/s}$$
$$\dot{m}_{v2} = 0.100 \text{ kg/s}$$

โดยที่

$\dot{m}_{v1}$ = ปริมาณไอน้ำระเหยของน้ำชะล้างที่สูญเสียไปกับไอเสียก่อนการปรับปรุงระบบ
$\dot{m}_{v2}$ = ปริมาณไอน้ำระเหยของน้ำชะล้างที่สูญเสียไปกับไอเสียหลังการปรับปรุงระบบ

พบว่าปริมาณน้ำที่ระเหยของน้ำชะล้างหลังการปรับปรุงระบบ มีค่าน้อยกว่าก่อนการปรับปรุงระบบซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน

**5.3.2 ผลของประสิทธิภาพ ปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่ และการแสดงสมการสมดุลพลังงาน**

**5.3.2.1 ประสิทธิภาพหอทำความเย็นใหม่**

ประสิทธิภาพหอทำความเย็นสามารถคำนวณได้จากวิธีการคำนวณในหัวข้อที่ 3.3.1 ในบทที่ 3 ซึ่งเมื่อแทนค่าผลต่างๆที่ได้จากการทดลองลงไปในสมการที่ (3.7) จะได้ผลประสิทธิภาพของหอทำความเย็นใหม่เท่ากับ 64.66%

**5.3.2.2 ปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่**

ปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ระเหยกลายเป็นไอ และส่วนที่กระเซ็นสูญเสีย จากการคำนวณตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.3.2 ในบทที่ 3 พบว่าปริมาณน้ำสูญเสียของหอทำความเย็นใหม่ทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 0.16 kg/s โดยแบ่งออกเป็นส่วนที่ระเหยได้เท่ากับ 0.041 kg/s และส่วนที่กระเซ็นสูญเสียเท่ากับ 0.119 kg/s เมื่อคำนวณเป็นร้อยละจะได้ว่า อัตราการสูญเสียน้ำจากการระเหยเท่ากับ 4% ส่วนอัตราการสูญเสียน้ำของหอทำความเย็นทั้งหมดเท่ากับ 15.6%

**5.3.2.3 ภาระความร้อนที่ถูกดึงออกโดยหอทำความเย็นใหม่**

จากสมการสมดุลพลังงานของหอทำความเย็นใหม่ในสมการที่ (3.10) สามารถเขียนใหม่โดยจัดรูปให้ส่วนของน้ำที่ไหลเข้าและออกจากหอทำความเย็นอยู่ฝั่งซ้ายของสมการ ซึ่งจะรวมกันได้เป็นภาระความร้อน (Heat load) ดังแสดงในสมการที่ (3.11) จากนั้นคำนวณแยกทีละขั้นตอน โดยจะแยกคำนวณฝั่งซ้ายที่เป็นภาระความร้อนจากส่วนของน้ำที่เข้าและออกหอทำความเย็นดังสมการที่ (5.1) กับฝั่งขวาที่เป็นภาระความร้อนจากส่วนของอากาศ น้ำสูญเสียและพลังงานความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนดังสมการที่ (5.2) โดยแทนค่าต่างๆจากผลการทดลองที่สภาวะดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาเข้าหอทำความเย็น = 71 %
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออกหอทำความเย็น = 100 %
อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ไหลเข้าหอทำความเย็น = 1.025 kg/s
$T_{hw}$ = อุณหภูมิน้ำที่ไหลเข้าหอทำความเย็น = 68.6 ℃
$T_{cw}$ = อุณหภูมิน้ำที่ไหลออกจากหอทำความเย็น = 42 ℃
$T_{ai}$ = อุณหภูมิของอากาศที่เข้าหอทำความเย็น = 32 ℃
$T_{ao}$ = อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากหอทำความเย็น = 43 ℃

$$Heat\,load = \dot{m}_{hw}h_{hw} - \dot{m}_{cw}h_{cw} \tag{5.1}$$

$$Heat\,load = \dot{m}_{ao}h_{ao} - \dot{m}_{ai}h_{ai} + \dot{m}_{d}h_{d} + \dot{Q}_{lost} \tag{5.2}$$

เมื่อแทนค่าต่างๆลงไปในสมการที่ (5.1) จะได้ภาระความร้อนเท่ากับ 142.27 kW

$$\left(1.025 \times 287.2963\right) - \left(0.865 \times 175.9814\right) = 142.27\,\text{kW}$$

เมื่อแทนค่าต่างๆลงไปในสมการที่ (5.2) โดยที่พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการพาความร้อน($\dot{Q}_{lost}$) ซึ่งคำนวณจากการเก็บผลค่าอุณหภูมิพื้นผิวของหอทำความเย็นใหม่และค่าอื่นๆในสมการที่ (3.12) นั้น มีค่าเท่ากับ 0.2 kW จะได้ค่าภาระความร้อนเท่ากับ 150.98 kW

$$\left(1.188 \times 192.9335\right) - \left(1.147 \times 87.0685\right) + \left(0.119 \times 180.16\right) + 0.2 = 150.98\,\text{kW}$$

จากผลการทดลองพบว่า ภาระความร้อนของสมการที่ (5.1) และสมการที่ (5.2) มีค่าไม่เท่ากัน ทั้งที่ความจริงแล้วควรจะมีค่าเท่ากัน ซึ่งอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัด รวมถึงความไม่ละเอียดของสเกลเครื่องวัดความเร็วลม(ทศนิยมตำแหน่งเดียว) เมื่อนำค่าทั้งสองมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนโดยอิงจากค่าภาระความร้อนจากสมการที่ (5.1) เป็นมาตรฐาน เนื่องจากเครื่องมือวัดและวิธีการวัดมีความน่าเชื่อถือมากกว่า จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 6.12%

การคำนวณสมการสมดุลพลังงานที่ได้กล่าวผ่านๆมานั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการคำนวณ โดยสมมติให้การถ่ายเทพลังงานของระบบเป็นสภาวะสมดุล (Steady state) เพื่อให้ง่ายต่อการทดลองและการคำนวณ ซึ่งความเป็นจริงแล้วผลการทดลองนั้น พบว่าเส้นกราฟอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนหลังผ่านการทำความเย็น ยังคงมีค่าความชันเป็นบวก แม้ว่าจะมีค่าน้อยมากก็ตาม ซึ่งหมายถึงอุณหภูมิของระบบยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น หากจะเขียนสมการพลังงานให้ถูกต้องตามความเป็นจริงแล้วนั้น จะสามารถเขียนใหม่ได้ โดยการเพิ่มพจน์ของพลังงานของระบบที่เปลี่ยนแปลงต่อหน่วยเวลาเข้าไปในสมการที่ (5.2) ซึ่งจะทำให้ได้สมการที่ (5.3) ดังนี้

$$Heat\,load = \dot{m}_{ao}h_{ao} - \dot{m}_{ai}h_{ai} + \dot{m}_{d}h_{d} + \dot{Q}_{lost} + \frac{dE_{sys}}{dt} \tag{5.3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยพบว่า ค่าของภาระความร้อนที่คำนวณได้จากผลการทดลองจริง มีค่าไม่เท่ากับภาระความร้อนที่ใช้ในการออกแบบจากการคำนวณในสมการที่ (3.1) เนื่องจากในการทดลองจริง มวลและพลังงานของน้ำบางส่วนสูญเสียไปจากการระเหยและการกระเซ็นสูญเสีย จึงทำให้ค่าภาระความร้อนที่ได้จากการทดลอง (142.27 kW) มีค่าไม่เท่ากับค่าภาระความร้อนที่ใช้ออกแบบ (128.56 kW) เมื่อนำมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับ 10.66%

อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจเกิดมาได้จากหลายปัจจัยนอกจากเครื่องมือวัด อาทิเช่น ความคลาดเคลื่อนของผู้ทำการทดลอง สภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ตลอดเวลา รวมไปถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบดังแสดงในสมการที่ (5.3) แม้ว่าจะมีค่าน้อยมากก็ตาม ซึ่งในบทถัดไปนี้ จะกล่าวถึงบทสรุปของการทดลองและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 6
# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะนำเสนอบทสรุปและข้อเสนอแนะของโครงงานการพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียก เพื่อเป็นการสรุปและข้อเสนอแนะแก่ผู้ที่สนใจศึกษาข้อมูล

## 6.1 บทสรุป

โครงงานนี้ ถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาและพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกที่ใช้กับเตาเผาชีวมวลแบบเชื้อเพลิงบด โดยการแก้ไขปัญหาด้านอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนที่สูงเกินกว่ากำหนด ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ที่อาจเกิดการเสียหายได้มากขึ้น ด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำความเย็นของระบบน้ำหมุนเวียน ซึ่งเดิมนั้นมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการเพิ่มหอทำความเย็นใหม่เข้าไปในระบบ โดยการออกแบบให้มีขนาด พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน และปริมาณอากาศไหลผ่านมากขึ้น และจากผลการทดลองพบว่า การพัฒนาระบบทำความเย็นโดยการเพิ่มหอทำความเย็นใหม่เข้าไปนี้ สามารถลดอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนได้ถึงเป้าหมายที่กำหนด (40 ℃) ณ ขีดความสามารถของระบบเผาไหม้เตาชีวมวลในปัจจุบัน และยังสามารถลดความหนาแน่นของฝุ่นปะปนในไอเสียได้อีกด้วย โดยการทดลองนี้ถูกทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเข้าระบบทำความเย็นเท่ากับ 1.025 kg/s และผลการทดลองที่นำมาคำนวณหาค่าต่างๆ ได้นำเอามาจากผลการทดลองขณะที่ค่าอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนมีค่าสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ผลอุณหภูมิน้ำหมุนเวียน พบว่า แม้ประสิทธิภาพในการทำความเย็นของระบบมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นมากกว่าก่อนการพัฒนาระบบอยู่ก็จริง แต่ก็ยังมิอาจลดอุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนจนถึงขนาดเข้าสู่สภาวะสมดุล (Steady state) ได้อย่างสมบูรณ์ โดยจะสังเกตได้จากเส้นกราฟอุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังผ่านระบบทำความเย็นภายหลังการปรับปรุงระบบนั้น ยังคงมีความชันเป็นบวกอยู่เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนหลังผ่านระบบทำความเย็น จะยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แสดงให้เห็นว่าระบบทำความเย็นนี้ แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่าระบบเดิม แต่ก็ยังต้องการการพัฒนาต่อไป เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำหมุนเวียนในระบบลู่เข้าสู่สภาวะสมดุลในที่สุด ซึ่งจะไม่มีค่าเพิ่มขึ้นแม้ว่าเวลาจะผ่านไปก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1) ในปัจจุบันพิกัดความสามารถของเตาเผาเชื้อเพลิงพลังงานชีวมวลแบบเชื้อเพลิงบดนั้น ยังสูงสุดแค่ที่ 300 kW ซึ่งหากในอนาคตได้มีการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเตาเผา ระบบน้ำหมุนเวียนในปัจจุบันก็อาจมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้นหากมีการพัฒนาระบบเตาเผาเชื้อเพลิงพลังงานชีวมวล ก็ควรที่จะมีการพัฒนาระบบหมุนเวียนน้ำที่ใช้ในเครื่องบำบัดอากาศแบบเปียกด้วยเช่นกัน

2) แม้ว่าผลจากการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาระบบทำความเย็นของน้ำหมุนเวียนทำให้อุณหภูมิน้ำหมุนเวียนมีค่าต่ำลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำชะล้างที่เกิดการระเหยมีอัตราต่ำลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับฝุ่นสูงมากขึ้น เนื่องจากผลความหนาแน่นฝุ่นปะปนในไอเสียหลังการปรับปรุงระบบมีค่าต่ำกว่าก่อนการปรับปรุงระบบ แต่ก็มิอาจชี้ชัดได้ว่าเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบที่สุดต่อการดักจับฝุ่นเถ้าลอย เนื่องจากยังอาจมีปัจจัยอื่นๆมาเกี่ยวข้อง เช่น สภาวะแวดล้อมของการทดลอง ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเตาเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# เอกสารอ้างอิง


[1] **การวัดอุณหภูมิด้วยไอซี DS18B20 Digital Thermometer**. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม, 2560, ชื่อเว็บไซต์ : http://cpre.kmutnb.ac.th/esl/learning/index.php?article=ds18b20-temperature-sensor

[2] **เครื่องจับฝุ่นด้วยหยดน้ำหรือสครับเบอร์ (Wet Collectors or Scrubbers).** สืบค้นเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : http://www.thaieditorial.com/เครื่องจับฝุ่นด้วยหยดน/

[3] **เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหลน้ำ.** สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มกราคม, 2560, ชื่อเว็บไซต์ : http://www.mechashop.com/store/product/view

[4] **ทฤษฎีการไหลในท่อ.** สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : http://irrigation.rid.go.th/rid4/km04/_data/57/general-05.pdf

[5] นนท์ปวิธ คลังหิรัญ (2558). **การพัฒนาตารางคำนวณสำหรับพื้นที่การถ่ายเทความร้อนของหม้อน้ำอุตสาหกรรม**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[6] นายอนันต์ ฟองลมุล. 2549. **การออกแบบหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทาง สำหรับงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[7] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2. 2539. ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง **กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน**.

[8] ผศ.ดร.สมทิพย์ ด่านธีรวนิชย์, ผศ. เจิดจรรย์ ศิริวงศ์ และรศ. ดร.พนาลี ชีวกิดาการ. 2012. **การลดการเกิดปัญหากลิ่นเหม็นของอุตสาหกรรมยางแท่ง STR20 ด้วยระบบดักจับแบบเปียกทางชีวภาพ.** โครงงานวิจัย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี.

[9] ผศ.สิทธิชัย วงศ์ธนสุภรณ์. **หอทำน้ำเย็น**. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[10] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. **หอผึ่งเย็นเปียก**. สืบค้นเมื่อวันที่ 3 พฤศจิกายน, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : http://www.me.psu.ac.th/Power_Plant_Engineering/P7d.htm

[11] มนตรี พิรุณเกษตร. 2553. **ระบบปรับอากาศ-ทำความเย็น ชุดที่ 4**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : เอ็มแอนด์อี


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] **ระบบบำบัดอากาศเสีย**. สืบค้นเมื่อวันที่ 6 ตุลาคม, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : http://www.kyowa.co.th/webmaster/know/8HDNM2010-May-31Mon30831Scrubbe_Wet.pdf

[13] ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์ (LESA). **ความชื้นและเสถียรภาพของอากาศ.** สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : http://portal.edu.chula.ac.th/lesa_cd/assets/document/lesa212/index.html

[14] **Arduino คืออะไร**. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม, 2560, ชื่อเว็บไซต์ : http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/บทความ-arduino-คืออะไร-เริ่มต้นใช้งาน-arduino.html

[15] **Density of air**. สืบค้นเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : https://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air

[16] **Flow Meter มีหลักการทำงานยังไง ถึงได้วัดการไหลได้แม่นยำ?**. สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม, 2560, ชื่อเว็บไซต์ : https://www.factomart.com/th/factomartblog/principle-flow-meter/

[17] **Psychrometric Calculations**. สืบค้นเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์, 2560, ชื่อเว็บไซต์ : http://www.sugartech.co.za/psychro/

[18] Singham J.R. **Cooling Tower**. สืบค้นเมื่อวันที่ 15 ตุลาคม, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : http://www.thermopedia.com/content/663/

[19] **venturi tube / ท่อเวนทูรี** สืบค้นเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : www.foodnetworksolution.com/wiki/word/7249/venturi-tube-ท่อเวนทูรี

[20] **Venturimeter Principle**. สืบค้นเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน, 2559, ชื่อเว็บไซต์ : http://mechanicalbuzz.com/venturi-meter-principle.html

[21] Yunus A. Cengel and Afshin J. Ghajar (2015). **Heat and Mass Tranfer Fundamentals & Applications Fifth Edition in SI Units**. New York : McGraw – Hill Education.

[22] Yunus A. Cengel and Micheal A. Boles. (2015). **Thermodynamics An Engineering Approach Eighth Edition in SI Units**. New York : McGraw – Hill Education.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

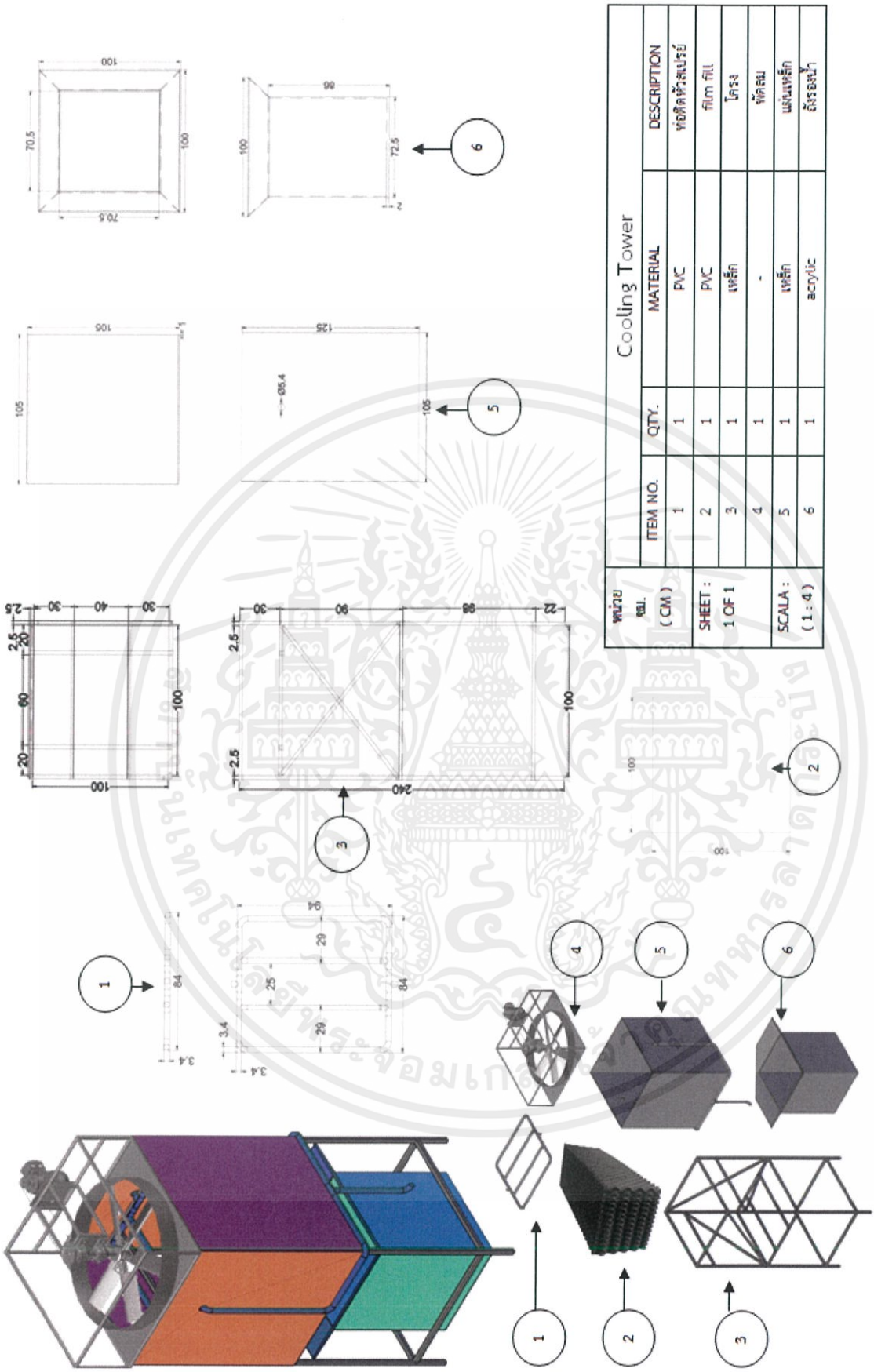
# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ก.

## แบบอุปกรณ์หอทำความเย็นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**รูปที่ ก.1** แบบอุปกรณ์หอทำความเย็นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้