

ชุดควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิร้อนที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
STABILITY CONTROL OF HOT AIR TEMPERATURE FROM THE GASIFICATION
PROCESS

ปกป้อง วานิชสุจิต
มนัสพงษ์ อริยะสุขสกุล
อภิชาติ แซ่ไคว่

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2558

ชุดควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิร้อนที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
STABILITY CONTROL OF HOT AIR TEMPERATURE FROM THE GASIFICATION
PROCESS

ปกป้อง วานิชสุจิต
มนัสพงษ์ อริยะสุขสกุล
อภิชาติ แซ่โค้ง

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
ปีการศึกษา 2558

**STABILITY CONTROL OF HOT AIR TEMPERATURE FROM THE GASIFICATION
PROCESS**

**POKPONG WANICHSUJIT
MANATPONG ARIYASUKSAKUL
APICHART SAEKHOW**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY 2015**


ปริญญาโท
โดย

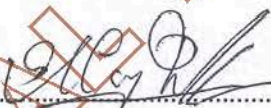
ชุดควบคุมเสถียรภาพของอุณหภูมิร้อนที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน
นายปกป้อง วานิชสุจิต
นายมนัสพงษ์ อริยะสุขสกุล
นายอภิชาติ แซ่โค้ว

อาจารย์ที่ปรึกษา
จำนวนหน้า
ปีการศึกษา

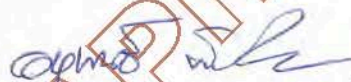
อาจารย์อนุพันธ์ พิมพ์ช่วย
126 หน้า
2558


ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติปริญญาโทนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล


.....ประธานกรรมการสอบปริญญาโท
(อาจารย์ ไพบูลย์ ลิมนิตพานิชย์)


.....กรรมการสอบปริญญาโท
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี)


.....กรรมการสอบปริญญาโท
(อาจารย์ ดร. ภัคพงศ์ จันทเปรมจิตต์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์อนุพันธ์ พิมพ์ช่วย)


.....ประธานหลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล
(อาจารย์ ดร. ภัคพงศ์ จันทเปรมจิตต์)

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ในการออกแบบและสร้างชุดอุปกรณ์แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ชุดควบคุมการทำงานและชุดจ่ายลม โดยลมร้อนที่ได้เหมาะสมที่จะใช้เพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เห็ดหอม ยางพารา พริก เป็นต้น ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้คงที่ จะส่งผลให้สามารถเพิ่มศักยภาพในการอบให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น ทั้งนี้เป้าหมายในการสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน คือ สามารถสร้างลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส

ผลการออกแบบและสร้างพบว่าได้ทำการสร้างท่อทางเดินลม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 เซนติเมตร ความยาว 290 เซนติเมตร พร้อมหม้อฉนวนใยแก้วความหนา 2 นิ้ว โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดดูดลม 51.5 เซนติเมตร ซึ่งมีขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า 3 แรงม้า เพื่อใช้ในการสร้างลมร้อน โดยสามารถสร้างลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลเชิงมวลเฉลี่ยในช่วงที่อุณหภูมิเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิ 50, 55, และ 60 องศาเซลเซียส มีค่า 0.68, 0.59 และ 0.39 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

ผลการศึกษาการทำงาน พบว่าเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนด้วยการป้อนค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller แบบระบบอัตโนมัติกับแบบการคำนวณทางทฤษฎีด้วยวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้มีความเสถียรภาพได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดในแบบระบบอัตโนมัติเท่ากับ 0.26 และ 1.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และในส่วนของแบบการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 0.65 และ 2.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยสรุปได้ว่าการป้อนค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller แบบระบบอัตโนมัติสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้มีความเสถียรภาพมากกว่าแบบการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งลมร้อนที่ได้มีอุณหภูมิคงที่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ประโยชน์ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรต่างๆ ได้ต่อไป

คำสำคัญ : แก๊สซิฟิเคชัน, ลมร้อน, อุณหภูมิ

Abstract

The purposes of this project are to design and create the temperatures controller for the hot air from the gasification process. There are two parts of the controller: controller cabinet and air dispenser. The hot air must be appropriate for roasting products such as shitake mushroom, rubber, and pepper. By controlling the temperature of the hot air, the effectiveness of roasting can be increased. However, the goal is to create the controller that can create the hot air with the temperatures of 50, 55, 60, 65, 70, 75, and 80 Degrees Celsius and the highest temperature error is three Degrees Celsius.

By designing and creating the controller, it was found that the air tube with the diameter of 54 centimeter, length of 290 centimeter, and two inch thick fiberglass insulation was created. The diameter of the propellers was 51.5 centimeter. The three horsepower electric motor was used for creating the hot air with the temperatures of 50, 55, 60, 65, 70, 75, and 80 Degrees Celsius. The average mass flow rates when the temperatures were at 50, 55, and 60 Degrees Celsius were 0.68, 0.59, and 0.39 kilograms/second, respectively.

By controlling the hot air with the parameters of the automatic temperature controller and theoretical calculation method of Ziegler - Nichols, it was found that the temperatures of the hot air could be stable. The average highest temperature errors and standard deviations of the automatic system were 0.26 and 1.9 Degrees Celsius, respectively. The theoretical calculation models had the average highest temperature errors and standard deviations of 0.65 and 2.5 Degrees Celsius, respectively. It can be concluded that inputting the values into the parameters of the controller of the automatic system could stabilize the temperature of the hot air more effectively than the theoretical calculation methods. The temperatures of the hot air must be appropriate for roasting agricultural yields in the future.

Keywords : Gasification, Hot air, Temperature

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำปริญญาโทฉบับนี้ ไคร่ขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อ อาจารย์อนุพันธ์ พิมพ์ช่วย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท กรุณาให้คำแนะนำและปรึกษา ตลอดจนความอนุเคราะห์ด้านต่างๆ ทั้งให้ความรู้ ความเข้าใจ และชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหา ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำปริญญาโท เป็นอย่างยิ่งมาโดยตลอด จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ขอขอบพระคุณ ดร.ภักพงษ์ จินทเปรมจิตต์ และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำต่างๆ และขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่ให้กำลังใจและคำปรึกษาต่างๆ ตลอดมา

ทั้งนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง ขอขอบพระคุณ คุณธานี ธรรมสุนทร ที่อำนวยความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงการและขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทงบประมาณเงินรายได้ เพื่อใช้ในการดำเนินงานจนทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ii
Abstract.....	iii
กิตติกรรมประกาศ.....	iv
สารบัญ.....	v
สารบัญรูปภาพ.....	ix
สารบัญตาราง.....	xi
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	xiii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของการโครงการ.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 งบประมาณของโครงการที่ใช้.....	2
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 หลักการเกิดแก๊สในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	4
2.3 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในโครงการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรในปัจจุบัน.....	7
2.4 การถ่ายเทความร้อนในตู้แลกเปลี่ยนความร้อน.....	7
2.4.1 หลักการพาความร้อนในตู้แลกเปลี่ยนความร้อน.....	8
2.4.2 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่จะต้องใช้ในการผลิตลมร้อน.....	13
2.5 การควบคุมอุณหภูมิลมร้อน.....	14
2.5.1 เทอร์โมคัปเบิล.....	14
2.5.2 Temperature Controller.....	16
2.5.3 อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์.....	17
2.6 การควบคุมแบบพีไอดี.....	18
2.6.1 สัดส่วน Proportional control action (P - Action).....	19
2.6.2 ปริพันธ์ Integral control action (I - Action).....	20
2.6.3 อนุพันธ์ Derivative control action (D - Action).....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	23
3.1 แนวคิดในการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	23
3.2 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานเพื่อประกอบการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน...	25
3.2.1 การศึกษาอุณหภูมิที่ผิวครีป.....	26
3.2.2 การศึกษาการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศ.....	26
3.3 ค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ.....	28
3.4 การต่ออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิการผลิตลมร้อน.....	29
3.5 การออกแบบชุดจ่ายลมร้อน.....	30
3.5.1 แทนวางมอเตอร์.....	30
3.5.2 ท่อทางเดินลมร้อน.....	31
3.5.3 ความหนาของฉนวนหุ้มท่อทางเดินลมร้อน.....	32
3.6 ระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	33
3.6.1 การออกแบบตัวแปรการควบคุมแบบพีไอดี.....	34
บทที่ 4 การสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	36
4.1 ความเกี่ยวข้องของอุปกรณ์.....	37
4.2 รายละเอียดส่วนประกอบของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	38
4.2.1 ตัวควบคุมการทำงาน.....	38
4.2.1.1 Temperature Controller.....	38
4.2.1.2 อินเวอร์เตอร์.....	39
4.2.1.3 Temperature Display.....	39
4.2.1.4 เทอร์โมคัปเปิล.....	40
4.2.2 ชุดจ่ายลม.....	40
4.2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	41
4.2.2.2 เฟลา.....	41
4.2.2.3 ไบพัดตุลลม.....	41
4.2.2.4 แทนวางมอเตอร์และคลັบลูกปืน.....	42
4.2.2.5 ยอยเหล็ก.....	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.6 ตลับลูกปืนคู่กตา.....	42
4.2.3 ท่อทางเดินลมร้อน.....	43
4.2.4 ตู้อแลกเปลี่ยนความร้อน.....	43
4.2.5 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	44
4.3 เครื่องมือวัดค่าความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ.....	45
บทที่ 5 การศึกษาการควบคุมอุณหภูมิ.....	46
5.1 ขั้นตอนการผลิตลมร้อน.....	46
5.1.1 การเตรียมเชื้อเพลิง.....	46
5.1.2 จุดผลิตแก๊สเชื้อเพลิง.....	47
5.1.3 การตั้งค่าชุดควบคุมการทำงาน.....	47
5.1.3.1 Temperature Controller.....	47
5.1.3.2 อินเวอร์เตอร์.....	48
5.1.4 การวัดค่าสนใจที่จะศึกษา.....	48
5.1.5 วิเคราะห์ผลการศึกษชุดควบคุมอุณหภูมิลมร้อน.....	49
5.2 ผลการศึกษา.....	49
5.2.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิและค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ.....	49
5.2.2 ผลการศึกษาความชื้นสัมพัทธ์.....	50
5.2.3 ผลการศึกษาความถี่ของกระแสไฟฟ้า.....	51
5.2.4 ผลการศึกษาอัตราการไหลเชิงมวล.....	52
5.3 การศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนอัตโนมัติ.....	53
5.3.1 การศึกษาสัญญาณเอาต์พุตของ Temperature Controller.....	53
5.3.2 การหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบ PID Controller.....	54
5.3.3 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller จากการค้าน้ำหนักทาง ทฤษฎีของซีเกลอร์ – นิโคลส์.....	58
5.4 วิเคราะห์ผลการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	60
บทที่ 6 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ.....	62
6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	62
6.2 การควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	62
6.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนแบบระบบอัตโนมัติกับการคำนวณทางทฤษฎี.....	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.4 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างวิธีการคำนวณ.....	67
ภาคผนวก ข. ผลการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิสมร่อน.....	75
ภาคผนวก ค. รายละเอียดการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิสมร่อน.....	124

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภาพระบบการอบยางพาราโครงการวิศวกรรมศาสตร์ปี 2556.....	1
2.1 การเกิดปฏิกิริยาใน Moving Bed Gasifier.....	5
2.2 เตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลตามขวาง.....	7
2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อน.....	8
2.4 กราฟประสิทธิภาพของเครื่องปวงแหวน.....	10
2.5 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K.....	15
2.6 Temperature Controller	16
2.7 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์.....	17
2.8 วงจรคอนเวอร์เตอร์.....	17
2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	18
2.10 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	19
3.1 ระบบการผลิตลมร้อนและชุดควบคุมอุณหภูมิ.....	24
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียสกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์.....	27
3.3 การต่ออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิการผลิตลมร้อน.....	29
3.4 แทนางมอเตอร์.....	30
3.5 ท่อทางเดินลมร้อน.....	31
3.6 ขอบเขตของระบบและอุณหภูมิต่างๆ.....	32
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยและค่านำความร้อนของฉนวนไฟเบอร์กลาส.....	33
3.8 ไดอะแกรมของระบบควบคุม.....	33
3.9 กราฟวัดผลการตอบสนองแบบขั้นบันไดของซีเกลอร์ - นิโคลส์.....	34
3.10 ผังการทำงานของระบบควบคุม.....	35
4.1 ชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	36
4.2 การทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน.....	37
4.3 ตู้ควบคุมการทำงาน.....	38
4.4 Temperature Controller.....	39
4.5 อินเวอร์เตอร์.....	39
4.6 Temperature Display.....	39
4.7 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K.....	40
4.8 ชุดจ่ายลม.....	40
4.9 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	41

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.10	เพลลา.....	41
4.11	ไบพัตดลม.....	41
4.12	แท่นวางมอเตอร์.....	42
4.13	ยอยเหล็ก.....	42
4.14	ตลับลูกปืนตุ๊กตา.....	43
4.15	ท่อทางเดินลมร้อน.....	43
4.16	ตู้แลกเปลี่ยนความร้อน.....	44
4.17	เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Crossdraft Gasifier.....	44
4.18	เครื่องมือวัดความเร็วลม.....	45
4.19	เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ.....	45
5.1	ไม้ยูคาลิปตัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ถึง 50 มิลลิเมตร.....	46
5.2	เติมเชื้อเพลิง.....	47
5.3	จุดไฟที่ด้านล่างเตา.....	47
5.4	เปิดทางเข้าของอากาศ.....	47
5.5	เปลวไฟที่เกิดจากกระบวนการ.....	47
5.6	การปรับค่าอัตโนมัติ.....	48
5.7	ตำแหน่งในการวัดค่าออกหมุ่.....	48
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	49
5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	50
5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	51
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	52
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าต่อสัญญาณอนาล็อกที่ปล่อยจาก Temperature Controller.....	53
5.13	การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการตอบสนองแบบขั้นบันไดของซีเกลอร์ – นิโคลส์.....	54
5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ.....	55
5.15	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส.....	56
5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิ 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส.....	57
5.17	การเปรียบเทียบการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณทางทฤษฎี.....	59

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 รายละเอียดและราคาของอุปกรณ์โครงการ.....	2
1.2 แผนการดำเนินงานเดือนสิงหาคม 2558 ถึงเดือนพฤษภาคม 2559.....	3
3.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ผิวครีปที่ระดับเปลวไฟต่างๆ.....	26
3.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ค่าต่างๆ.....	26
3.3 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์จากการศึกษา.....	28
3.4 การหาค่าตัวแปรโดยวิธีการตอบสนองแบบขั้นบันไดของซีเกลอร์- นิโคลส์.....	34
5.1 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากที่ตั้งไว้.....	56
5.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิที่คลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง.....	58
5.3 ค่าความผิดพลาดกับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการปรับแต่ง.....	60
ข.1 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส.....	76
ข.2 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส.....	78
ข.3 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส.....	80
ข.4 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส.....	82
ข.5 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส.....	84
ข.6 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส.....	86
ข.7 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส.....	88
ข.8 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของมอเตอร์ต่อความเร็วลม.....	90
ข.9 ศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	91
ข.10 ศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส.....	91
ข.11 ศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส.....	92
ข.12 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่ออัตราสัญญาณแอล็อก.....	92
ข.13 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ 50 เซลเซียส.....	94
ข.14 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ 55 เซลเซียส.....	96
ข.15 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ 60 เซลเซียส.....	98
ข.16 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ 65 เซลเซียส.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ข.17 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุดหนุนมี 70 เซลเซียส.....	102
ข.18 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุดหนุนมี 75 เซลเซียส.....	104
ข.19 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุดหนุนมี 80 เซลเซียส.....	106
ข.20 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุดหนุนมี 50 องศาเซลเซียส	108
ข.21 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุดหนุนมี 55 องศาเซลเซียส	110
ข.22 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุดหนุนมี 60 องศาเซลเซียส	112
ข.23 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุดหนุนมี 65 องศาเซลเซียส	114
ข.24 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุดหนุนมี 70 องศาเซลเซียส	116
ข.25 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุดหนุนมี 75 องศาเซลเซียส	118
ข.26 อุดหนุนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุดหนุนมี 80 องศาเซลเซียส	120
ข.27 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าผสม.....	122
ข.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยและค่านำความร้อนของฉนวนไฟเบอร์กลาส.....	123

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
A_{fin}	ตารางเมตร	พื้นที่ของครีบริ้ววงแหวน
A_{unfin}	ตารางเมตร	พื้นที่ของท่อทรงกระบอก
A_{room}	ตารางเมตร	พื้นที่หน้าตัดภายในห้องแลกเปลี่ยนความร้อน
A_{tube}	ตารางเมตร	พื้นที่หน้าตัดของท่อทรงกระบอกที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน
C_p	กิโลจูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส	ความร้อนจำเพาะของอากาศ
D_{fin}	เมตร	เส้นผ่านศูนย์กลางของครีบริ้ววงแหวน
D_{unfin}	เมตร	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทรงกระบอก
D_{out}	-	สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์
$e(t)$	-	ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา
\dot{G}	กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที	ความเร็วอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่าน 1 ช่องว่างระหว่างครีบริ้ว
h_{fin}	วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของครีบริ้ววงแหวน
h_{unfin}	วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อทรงกระบอก
l_{out}	-	สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
k	วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส	ค่าสภาพการนำความร้อน
K_d	-	อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
K_I	-	อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
K_p	-	อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้
k_m	วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส	ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำครีบริ้ววงแหวน
L	ตารางมิลลิเมตร	ความยาวสมมูล
L	เมตร	ผลต่างระหว่างรัศมีครีบริ้ววงแหวนนำความร้อนและรัศมีท่อทรงกระบอกนำความร้อน
L_{unfin}	เมตร	ความยาวของท่อทรงกระบอก
\dot{m}	กิโลกรัมต่อวินาที	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ
N	ท่อ	จำนวนท่อที่คาดว่าจะใช้
N_t	ท่อ	จำนวนท่อทั้งหมด

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
n_{fin}	ครีบ	จำนวนครีบรูปวงแหวน
n_{row}	ท่อ	จำนวนแถวของท่อทรงกระบอกที่มีอากาศไหลผ่าน
Nu_{fin}	-	ค่าตัวเลขนัมเบอร์ที่ผิวครีบรูปวงแหวน
$Nu_{fin,unfin}$	-	ค่าตัวเลขนัมเบอร์
Nu_{unfin}	-	ค่าตัวเลขนัมเบอร์ที่ผิวท่อทรงกระบอก
PB	เปอร์เซ็นต์	ส่วนกลับอัตราขยายสัดส่วน
Pr_{unfin}	-	ค่าพริ้นด์เทิลที่ผิวท่อทรงกระบอก
P_{out}	-	สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
q_c	วัตต์ต่อตารางเมตร	อัตราการนำความร้อนเชิงปริมาตร
$\dot{Q}_{1\ tube}$	วัตต์	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อ 1 ชุดท่อ
$\dot{Q}_{39\ tube}$	วัตต์	อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม 39 ชุดท่อ
\dot{Q}_{fin}	วัตต์	อัตราการถ่ายเทความร้อนของครีบรูปวงแหวน
\dot{Q}_{unfin}	วัตต์	ถ่ายเทความร้อนผ่านท่อทรงกระบอก
\dot{Q}_A	วัตต์	ภาระความร้อนที่ต้องให้กับอากาศที่ใช้ในการอบ
r_{fin}	เมตร	รัศมีวงในของครีบรูปวงแหวน
r_{unfin}	เมตร	รัศมีของท่อทรงกระบอก
r_1	เมตร	รัศมีท่อทรงกระบอกนำความร้อน
r_2	เมตร	รัศมีของครีบรูปวงแหวนนำความร้อน
R	เมตร	รัศมีวงนอกของครีบรูปวงแหวน
Re_{fin}	-	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ผิวครีบรูปวงแหวน
Re_{unfin}	-	ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ผิวท่อทรงกระบอก
S	เมตร	ระยะห่างระหว่างครีบ
T_d	วินาที	ค่าคงที่ของเวลาอนุพันธ์
T_i	วินาที	ค่าคงที่ของเวลาปริพันธ์
t_{fin}	เมตร	ความหนาของครีบรูปวงแหวนนำความร้อน
t_{unfin}	เมตร	ความหนาของท่อทรงกระบอก

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	หน่วย	คำอธิบาย
T_c	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิจากอากาศภายนอก
T_e	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิทางออก
T_h	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิจากผิวของท่อทรงกระบอก
T_i	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิทางเข้า
T_s	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิที่ผิวครีบ
ΔT	องศาเซลเซียส	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออก ของตุ้ลแลกเปลี่ยนความร้อน
ΔT_{lm}	องศาเซลเซียส	อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยลอการิทึม
v_r	เมตรต่อวินาที	ความเร็วของอากาศในห้องแลกเปลี่ยนความร้อน
η_{fin}	ร้อยละ	ประสิทธิภาพในการพาความร้อนของครีบรูปวง แหวน
ξ	-	ค่าที่ใช้เปิดตารางหาประสิทธิภาพของครีบรูปวง แหวน
μ	กิโลกรัมต่อเมตรวินาที	ความหนืดไดนามิกส์
ρ	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร	ความหนาแน่นของอากาศ
v	ตารางเมตรต่อวินาที	ค่าความหนืดคิเนมาติก
σ	นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร	ความเค้นดัด
c	มิลลิเมตร	ระยะจากแกนสะเทิน
E	ปาสคาล	ค่า Young's modulus
I	-	โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่
k	-	รัศมีไจเรชั่น
M	นิวตันมิลลิเมตร	โมเมนต์ดัด
P_{cr}	นิวตัน	แรงวิกฤติ
Q	บีทียู	ความร้อนที่สูญเสีย
t_h	องศาฟาเรนไฮต์	อุณหภูมิผิวท่อ
t_k	นิ้ว	ความหนาของฉนวน
t_m	องศาฟาเรนไฮต์	อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผิวท่อกับผิวฉนวน
t_s	องศาฟาเรนไฮต์	อุณหภูมิที่ผิวฉนวน
k	Btu-in/ft ² · °F · hr	ค่าความนำความร้อนของฉนวนไฟเบอร์กลาส

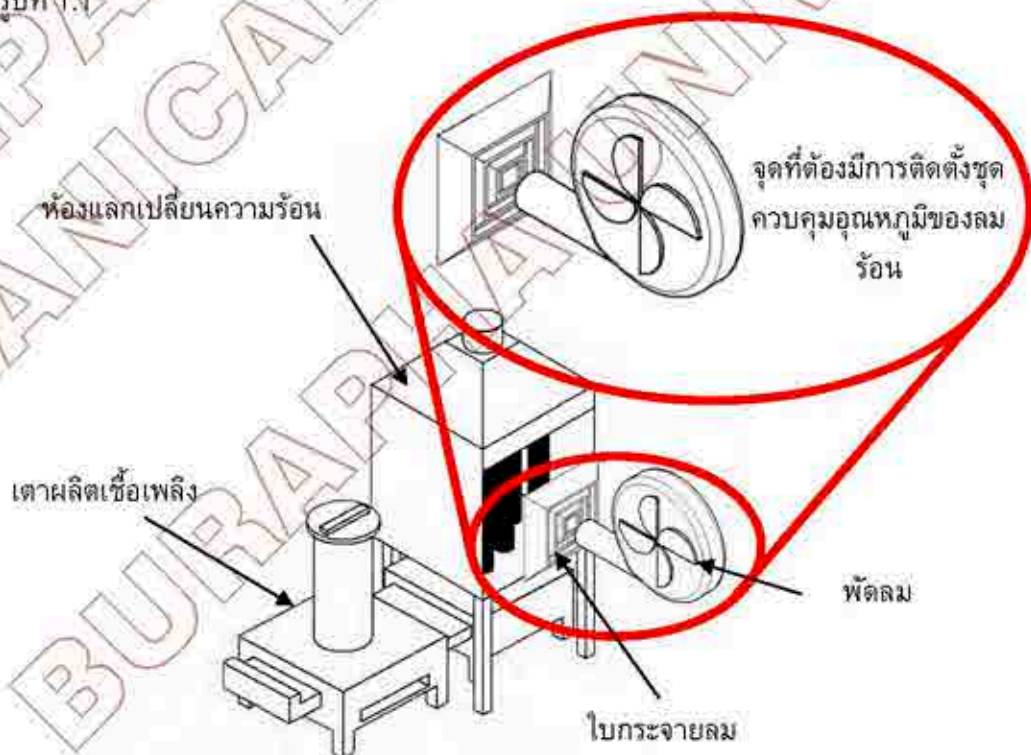
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานลมร้อนที่ผลิตได้จากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ทำงานควบคู่กับตู้แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่ออบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เห็ดหอม ยางพารา และพริก เป็นต้น โดยมีรายละเอียดของระบบดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่ปัญหาที่พบในทุกๆ ระบบคือ อุณหภูมิของการอบนั้นไม่สามารถควบคุมให้คงที่เป็นค่าที่แน่นอนเป็นระยะเวลานานๆ ได้ จึงส่งผลให้การศึกษาการอบแห้งดังกล่าวเป็นไปด้วยความยากลำบากในเรื่องของการควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา

จากความสำคัญที่กล่าวมาได้เล็งเห็นความสำคัญนี้ จึงได้เกิดแนวคิดที่จะทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้มีความแม่นยำและมีความเสถียรมากขึ้น โดยมีแนวคิดที่จะใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของลมร้อนที่ผ่านจากท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมการทำงานของพัดลม เพื่อปรับและรักษาอุณหภูมิให้คงที่ ทำให้สามารถเพิ่มศักยภาพในการอบให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น ทั้งนี้จุดที่จะทำการปรับปรุงและติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิดังกล่าว มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนภาพระบบการอบยางพาราโครงการวิศวกรรมศาสตร์ ปี 2556 [1]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ออกแบบและสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตจากกระบวนการ Gasification เพื่อให้อุณหภูมิของลมร้อนมีความคงที่

1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ

1. ชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิต่ำกว่า 3 องศาเซลเซียส
2. ช่วงอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตได้อยู่ระหว่าง 50 – 80 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตจากกระบวนการ Gasification ได้

1.5 งบประมาณของโครงการที่ใช้

โครงการนี้ใช้งบประมาณที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 รายละเอียดและราคาของอุปกรณ์โครงการ

รายการ	ราคารวม (บาท)
1. Temperature Display	อุปกรณ์จากโครงการเก่า
2. ชุดพัดลมพร้อมอินเวอร์เตอร์	อุปกรณ์จากโครงการเก่า
3. ชุดท่อทางเดินลมร้อน	9,000
4. Temperature Controller	3,700
5. ชุดแท่นวางมอเตอร์	2,200
6. ฉนวนใยแก้ว	1,500
6. ชุดเพลลาพร้อมชุดตลับลูกปืน	1,200
7. อุปกรณ์ทางไฟฟ้า เช่น สายไฟ, เบรกเกอร์, ฟิวส์	1,000
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	18,600

1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.2 แผนการดำเนินงานเดือนสิงหาคม 2558 ถึงเดือนพฤษภาคม 2559

แผนการดำเนินงาน	สิงหาคม				กันยายน				ตุลาคม				พฤศจิกายน				ธันวาคม				มกราคม				กุมภาพันธ์				มีนาคม				เมษายน				พฤษภาคม			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.ศึกษาข้อมูล ที่เกี่ยวข้องกับชุดควบคุม	■	■	■	■																																				
2.ออกแบบชุดควบคุม									■	■	■	■																												
3.จัดซื้ออุปกรณ์													■	■	■	■	■	■	■	■																				
4.สร้างชุดควบคุม																	■	■	■	■	■	■	■	■																
5.ทดสอบชุดควบคุม																									■	■	■	■	■	■	■	■								
6.วิเคราะห์แลสรุปผล																																					■	■	■	■
7.จัดฉบับสมบูรณ์																																								

บทที่ 2

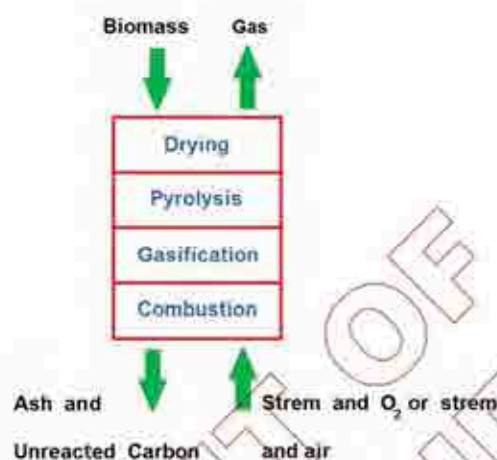
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนจะประกอบด้วย 3 ส่วนประกอบที่สำคัญคือ เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ตู้แลกเปลี่ยนความร้อน และชุดควบคุมอุณหภูมิของระบบผลิตลมร้อน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับส่วนต่างๆ ประกอบด้วยหลักการเกิดแก๊สในเตาผลิตเชื้อเพลิง, ทฤษฎีในส่วนของ การแลกเปลี่ยนความร้อน และทฤษฎีในส่วนของ การควบคุมรวมไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียดดังแสดงต่อไปนี้

2.2 หลักการเกิดแก๊สในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (Gasification) [2]

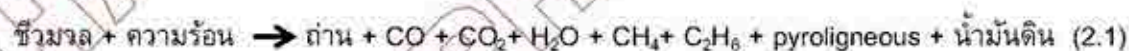
Gasification หรือกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้เป็นต้นให้อยู่ในรูปเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊สดังเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) ในแง่ของกระบวนการหมายถึง ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดที่รวมการไพโรไลซิสในขั้นต้นและการปรับปรุงคุณภาพแก๊สในขั้นถัดไปกระบวนการ Gasification เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมเคมีคอลได้จากปฏิกิริยาของคาร์บอนกับออกซิเจนและไอน้ำที่อุณหภูมิตั้งแต่ความดันตั้งแต่ 1 บรรยากาศขึ้นไปปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายขั้นตอนทั้งปฏิกิริยาดูดความร้อนและปฏิกิริยาคายความร้อนแก๊สเชื้อเพลิงประกอบด้วยแก๊สผสมระหว่าง CO และ H_2 เรียกว่าโปรดิวเซอร์แก๊ส (Producers gas) โปรดิวเซอร์แก๊สเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ของคาร์บอนไปเป็น คาร์บอนไดออกไซด์และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำไปเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนลำดับการเปลี่ยนแปลงอาจแสดงได้โดยตัวอย่างของการเปลี่ยนแปลงใน Moving Bed Gasifier ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และสามารถกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้



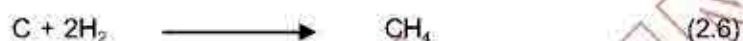
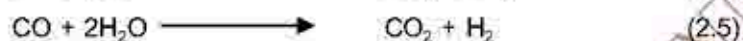
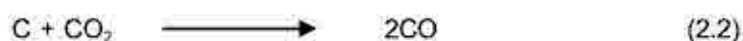
รูปที่ 2.1 การเกิดปฏิกิริยาใน Moving bed Gasifier [3]

1. ชั้นลดความชื้น (Drying Zone) สำหรับในชั้นนี้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่างๆ โดยที่ความร้อนที่ได้มาจากชั้น Pyrolysis จะระเหยความชื้นที่อยู่ในชีวมวลในรูปของไอน้ำ อุณหภูมิในชั้นนี้อยู่ที่ประมาณ 100 - 135 องศาเซลเซียส สรุปคุณสมบัติของ Producer gas ที่จากเทคโนโลยี Gasification นี้จะประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน

2. ชั้นกลั่นสลายตัว (Distillation Zone) หรือ (Pyrolysis Zone) โดยในชั้นนี้เชื้อเพลิงได้รับความร้อน จากชั้นเผาไหม้เพื่อสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้สารระเหยต่างๆ ออกมาซึ่งประกอบไปด้วย เมทานอล กรดน้ำส้ม น้ำมันดิบ และก๊าซที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้จะประมาณ 280 - 500 องศาเซลเซียส ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการในชั้นนี้คือคาร์บอนในรูปถ่าน (Fix Carbon) ดังสมการที่ 2.1



3. ชั้นรีดักชัน (Reduction Zone or Gasification Zone) เป็นโซนของการสังเคราะห์ก๊าซติดไฟได้ทั้งหมด เมื่อแก๊สร้อนต่างๆ ที่เกิดจากการเผาไหม้คือ CO และไอน้ำรวมถึงเชื้อเพลิงที่แตกตัวในชั้น Pyrolysis คือ ทาร์จะไหลเข้าสู่ชั้นปฏิกิริยารีดักชันและจะได้ก๊าซที่ติดไฟได้คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน อุณหภูมิโซนนี้ประมาณ 800-1000 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 และ 2.6



ปฏิกิริยาในสมการที่ 2.2 เรียกว่า Boudouard Reduction Reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic Reaction) ในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณ CO สามารถทำได้โดยสามารถเลือกฉีดไอน้ำร้อนเข้าไปซึ่งไอน้ำจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนดังสมการที่ 2.3 ได้ก๊าซ CO และ H₂ เพิ่ม ซึ่งปฏิกิริยานี้เรียกว่า Watergas Reaction ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนและจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส

สำหรับปฏิกิริยาที่ 2.4 จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500 - 600 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยานี้ทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนใน Producer Gas มีมากขึ้นซึ่งมีผลทำให้ค่าพลังงานความร้อนของแก๊สสูงขึ้นแต่ถ้ามีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ได้คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนตามปฏิกิริยาที่ 2.5 เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Water Shift Reaction ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซที่ได้อลดลงปริมาณของไฮโดรเจนจะสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของรีดักชันอยู่ประมาณ 700 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องปริมาณของไฮโดรเจนสลายอย่างต่อเนื่องแต่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นภายใต้ความดันสูง H₂ อาจเข้าไปรวมตัวกับคาร์บอนและเกิดผลิต CH₄ ออกมาซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Methene Reaction ดังสมการที่ 2.6

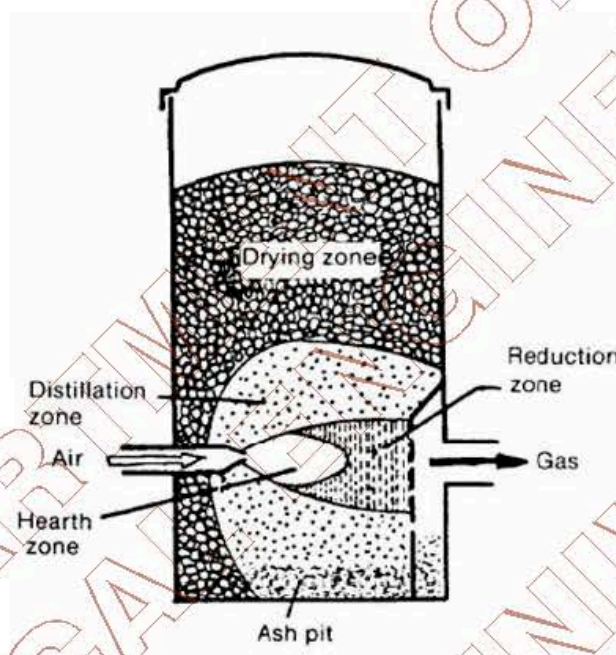
4. ชั้นเผาไหม้ (Hearth Zone or Combustion Zone) เป็นชั้นที่มีการเผาไหม้สารของเชื้อเพลิงที่เป็น ของแข็งซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี คือ คาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักเมื่อมีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำมีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 1,450 องศาเซลเซียส ในบริเวณนี้คาร์บอนจะเผาไหม้กับออกซิเจนในปริมาณที่จำกัด ด้วยปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



ปฏิกิริยาในชั้นเผาไหม้นี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาดูดความร้อนในชั้นรีดักชันโซนและชั้นกลั่นสลายซึ่งผลผลิตหลักที่ได้จากชั้นการเผาไหม้ คือ ความร้อนและเตาถ่าน

2.3 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในโครงการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรในปัจจุบัน [2]

ในปัจจุบันมีการใช้งานเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Crossdraft Gasifier ซึ่งเตาเผาไหม้ชนิดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นระบบที่อากาศไหลขวางกับทิศทางของการไหลเลื่อนของเชื้อเพลิงลักษณะชั้นปฏิกิริยาโดยเฉพาะ Combustion Zone และ Reduction Zone จะอยู่ใกล้ชิดกันมากดังนั้นจะผลิตแก๊สได้อย่างรวดเร็ว ปกติบริเวณการเผาไหม้จะอยู่กึ่งกลางของเตาผลิตแก๊สแต่ขอบเขตของการเผาไหม้อาจขยายกว้างขึ้นเมื่อความเร็วอากาศสูงขึ้นโปรติวเซอร์แก๊สที่ออกจากเตาผลิตแก๊สมีอุณหภูมิสูงและสิ่งปนเปื้อนสูง



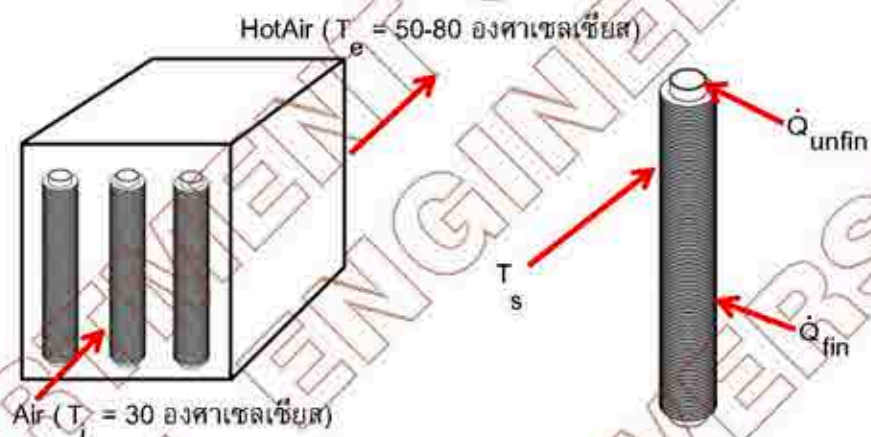
รูปที่ 2.2 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบอากาศไหลตามขวาง [2]

2.4 การถ่ายเทความร้อนในตู้แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์การผลิตลมร้อนซึ่งมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ จำเป็นต้องทราบทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนเพื่อใช้ในการออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิการผลิตลมร้อน เมื่อพื้นที่และอุณหภูมิผิวของชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนในตู้แลกเปลี่ยนความร้อนคงที่ ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีเพียงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนในตู้แลกเปลี่ยนความร้อนนี้ ต้องคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ต้องการก่อน จากนั้นนำค่าดังกล่าวไปสั่งพัดลมทำงานโดยป้อนอากาศในอัตราที่ต้องการต่อไป ซึ่งรายละเอียดในส่วนที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

2.4.1 หลักการพาความร้อนภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อน

ในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนจะต้องทราบอัตราการไหลของอากาศที่จะไหลเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนกับชุดท่อภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งทั้งนี้จากการศึกษาพบว่าความร้อนที่จะถ่ายเทออกจากชุดท่อเข้าสู่อากาศจะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9, 2.10 และ 2.11 โดยค่าความร้อนดังกล่าวจะถูกคำนวณและแสดงไว้ในโครงงานเรื่อง "การปรับปรุงชุดผลิตลมร้อนด้วยกระบวนการ Gasification" ซึ่งผลการคำนวณพบว่าค่าความร้อนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 25,173.37 Watt [4]



รูปที่ 2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\dot{Q}_{1\text{ tube}} = \dot{Q}_{\text{fin}} + \dot{Q}_{\text{unfin}} \quad (2.9)$$

หรือ

$$\dot{Q}_{1\text{ tube}} = \eta_{\text{fin}} h_{\text{fin}} A_{\text{fin}} \Delta T_{\text{lm}} + h_{\text{unfin}} A_{\text{unfin}} \Delta T_{\text{lm}} \quad (2.10)$$

ดังนั้น

$$\dot{Q}_{39\text{ tube}} = \dot{Q}_{1\text{ tube}} \times N_t \quad (2.11)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{1\text{ tube}}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อ 1 ชุดท่อ (วัตต์)

$\dot{Q}_{39\text{ tube}}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม 39 ชุดท่อ (วัตต์)

\dot{Q}_{fin} คือ ถ่ายเทความร้อนผ่านครีบริบวงแหวน (วัตต์)

\dot{Q}_{unfin} คือ ถ่ายเทความร้อนผ่านท่อทรงกระบอก (วัตต์)

N_t คือ จำนวนท่อทั้งหมด (ท่อ)

A_{fin} คือ พื้นที่ของครีบริบวงแหวน (ตารางเมตร)

ซึ่ง A_{fin} สามารถหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนของครีบริ้ววงแหวนได้จากสมการ

$$A_{fin} = 384[2\pi \times (R^2 - r_{fin}^2) + (2\pi \times R \times t_{fin})] \quad (2.12)$$

เมื่อ R คือ รัศมีวงนอกของครีบริ้ววงแหวน (เมตร)

r_{fin} คือ รัศมีวงในของครีบริ้ววงแหวน (เมตร)

t_{fin} คือ ความหนาของครีบริ้ววงแหวน (เมตร)

A_{unfin} คือ พื้นที่ของท่อทรงกระบอก (ตารางเมตร)

ซึ่ง A_{unfin} สามารถหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในส่วนของท่อทรงกระบอกได้จากสมการ

$$A_{unfin} = (2\pi \times r_{unfin} \times L_{unfin}) - [384(2\pi \times r_{unfin} \times t_{unfin})] \quad (2.13)$$

เมื่อ r_{unfin} คือ รัศมีของท่อทรงกระบอก (เมตร)

L_{unfin} คือ ความยาวของท่อทรงกระบอก (เมตร)

t_{unfin} คือ ความหนาของท่อทรงกระบอก (เมตร)

ΔT_{lm} คือ อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยลอการิทึม (องศาเซลเซียส)

ซึ่ง ΔT_{lm} สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.14

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_e) - (T_s - T_i)}{\ln \left(\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} \right)} \quad (2.14)$$

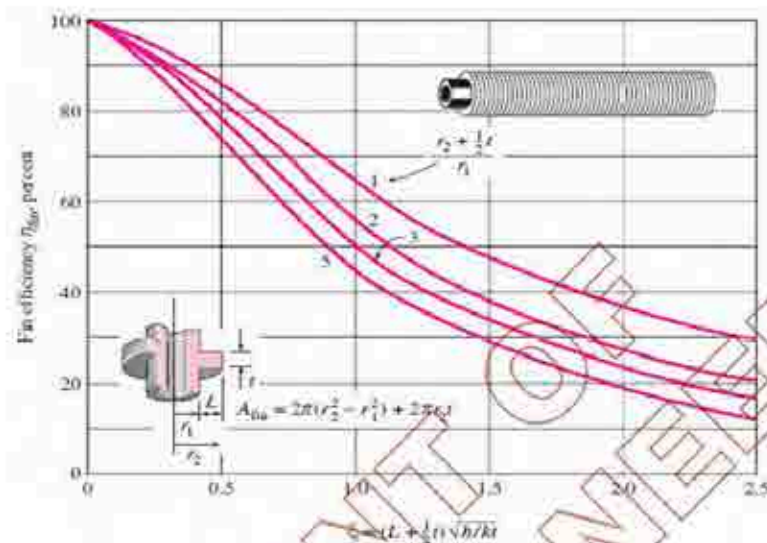
เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวครีบริ้ว (องศาเซลเซียส)

T_e คือ อุณหภูมิทางออก (องศาเซลเซียส)

T_i คือ อุณหภูมิทางเข้า (องศาเซลเซียส)

η_{fin} คือ ประสิทธิภาพในการพาความร้อนของครีบริ้ววงแหวน (ร้อยละ) สามารถหาได้จาก

รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟประสิทธิภาพของครีบบรูปร่างแหวน และสมการคำนวณประสิทธิภาพของครีบบรูปร่างแหวน
ค่าที่ใช้ในการเปิดตารางหาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.15
[6]

$$\xi = \left(L + \frac{t}{2}\right) \sqrt{\frac{h_{fin}}{k \frac{t}{m_{fin}}}} \quad (2.15)$$

- เมื่อ ξ คือ ค่าที่ใช้เปิดตารางหาประสิทธิภาพของครีบบรูปร่างแหวน
- r_2 คือ รัศมีของครีบบรูปร่างแหวนนำความร้อน (เมตร)
- r_1 คือ รัศมีที่ท่อทรงกระบอกนำความร้อน (เมตร)
- t คือ ความหนาของครีบบรูปร่างแหวนนำความร้อน (เมตร)
- L คือ ผลต่างระหว่างรัศมีครีบบรูปร่างแหวนนำความร้อนและรัศมีที่ท่อทรงกระบอกนำความร้อน (เมตร)
- k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำครีบบรูปร่างแหวน (วัตต์ต่อเมตร องศาเซลเซียส)
- h_{fin} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของครีบบรูปร่างแหวน (วัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส)
- h_{unfin} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อทรงกระบอก (วัตต์ต่อตารางเมตร องศาเซลเซียส)

โดยค่าของ h_{fin} และ h_{unfin} สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.16 [5]

$$h_{fin,unfin} = \frac{k}{D_{fin,unfin}} Nu_{fin,unfin} \quad (2.16)$$

- เมื่อ k คือ ค่าสภาพการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส)
 D_{fin} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของครีบริ้ววงแหวน (เมตร)
 D_{unfin} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทรงกระบอก (เมตร)
 $Nu_{fin,unfin}$ คือ ค่าตัวเลขนัมเบอร์
- ซึ่ง Nu_{unfin} สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.17

$$Nu_{unfin} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{unfin}^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{unfin}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (2.17)$$

- เมื่อ Nu_{unfin} คือ ค่าตัวเลขนัมเบอร์ ที่ผิวท่อทรงกระบอก
 Re_{unfin} คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่ผิวท่อทรงกระบอก
 Pr_{unfin} คือ ค่าพริ้นด์เทิล ที่ผิวท่อทรงกระบอก
- ซึ่ง Re_{unfin} สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.18

$$Re_{unfin} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.18)$$

- เมื่อ V_r คือ ความเร็วของอากาศในห้องแลกเปลี่ยนความร้อน (เมตรต่อวินาที)

$$V_r = \frac{\dot{m}}{A_{room} \times \rho} \quad (2.19)$$

- เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)

$$\dot{m} = \rho V A_{tube} \quad (2.20)$$

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

V คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการศึกษา (เมตรต่อวินาที)

A_{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทรงกระบอกที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน (ตารางเมตร)

- A_{room} คือ พื้นที่หน้าตัดภายในห้องแลกเปลี่ยนความร้อน (ตารางเมตร)
 D_{unfin} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทรงกระบอก (เมตร)
 V คือ ค่าความหนืดคินเนมาติก (ตารางเมตรต่อวินาที)

และ Nu_{Fin} สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.21

$$Nu_{fin} = 0.58 \left(\frac{Re_{fin}}{10^4} \right)^{0.77} \quad (2.21)$$

เมื่อ Nu_{fin} คือ ค่านัสเซลต์นัมเบอร์ที่ผิวครีบริบรูปร่างแหวน

Re_{fin} คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ผิวครีบริบรูปร่างแหวน

โดย Re_{fin} สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.22

$$Re_{fin} = \frac{q_c \times G \times D_{unfin}^2}{\mu \times k \times (T_h - T_c)} \quad (2.22)$$

เมื่อ q_c คือ อัตราการนำความร้อนเชิงปริมาตร (วัตต์ต่อตารางเมตร)

ซึ่ง q_c สามารถอ่านค่าหาได้จากสมการ 2.23

$$q_c = \frac{\dot{Q}_A}{A_{fin} + A_{unfin}} \quad (2.23)$$

เมื่อ \dot{Q}_A คือ ภาระความร้อนที่ต้องให้กับอากาศที่ใช้ในการอบ (วัตต์)

ซึ่ง $\dot{Q}_A = \dot{m}_p C_p \Delta T$ (2.24)

เมื่อ \dot{m}_p คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส)

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกของตู้แลกเปลี่ยนความร้อน (องศาเซลเซียส)

N คือ จำนวนท่อที่คาดว่าจะใช้ (ท่อ)

A_{fin} คือ พื้นที่ของครีบริ้ววงแหวน (ตารางเมตร)

A_{unfin} คือ พื้นที่ของท่อทรงกระบอก (ตารางเมตร)

เมื่อ \dot{G} คือ ความเร็วอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่าน 1 ช่องว่างระหว่างครีบริ้ว (mass flow rate) (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

ซึ่ง \dot{G} สามารถคำนวณหาได้จากสมการ 2.25

$$\dot{G} = \frac{\dot{m}}{D_{fin} \times S \times (n_{fin} + 1) \times n_{row}} \quad (2.25)$$

เมื่อ D_{fin} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของครีบริ้ววงแหวน (เมตร)

S คือ ระยะห่างระหว่างครีบริ้ววงแหวน (เมตร)

n_{fin} คือ จำนวนครีบริ้ววงแหวน (ครีบริ้ว)

n_{row} คือ จำนวนแถวของท่อทรงกระบอกที่มีอากาศไหลผ่าน (ท่อ)

D_{unfin} คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทรงกระบอก (เมตร)

μ คือ ความหนืดไดนามิกส์ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

T_h คือ อุณหภูมิจากผิวของท่อทรงกระบอก (องศาเซลเซียส)

T_c คือ อุณหภูมิจากอากาศภายนอก (องศาเซลเซียส)

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรองศาเซลเซียส)

2.4.2 การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่จะต้องใช้ในการผลิตลมร้อน

เมื่อทราบค่าความร้อนที่จะมีการถ่ายเทให้กับลมเย็นเรียบร้อยแล้ว ลำดับถัดไปจะเป็นการคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ต้องใช้เข้ามารับความร้อนดังกล่าวจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นตามที่ ต้องการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.26 ซึ่งสมการนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของอากาศที่จะป้อนให้กับระบบ เพื่อปรับความเร็วรอบของพัดลมเป็นลำดับถัดไป

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{39 \text{ tube}}}{C_p \Delta T} \quad (2.26)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{39 \text{ tube}}$	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม 39 ชุดท่อ (วัตต์)
C_p	คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ (กิโลจูลต่อกิโลกรัมองศาเซลเซียส)
ΔT	คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและขาออกของตู้แลกเปลี่ยนความร้อน (องศาเซลเซียส)

โดยจำนวนชุดท่อดังกล่าวจะถูกคำนวณและแสดงไว้ในโครงการเรื่อง "การปรับปรุงชุดผลิตลมร้อนด้วยกระบวนการ Gasification" ซึ่งผลการคำนวณพบว่าจำนวนชุดท่อดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 39 ชุดท่อ [4] ทั้งนี้จะต้องทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์กับอัตราการไหลของอากาศ เพื่อนำข้อมูลในส่วนนี้ไปคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ต้องใช้ขณะทำงานจริงต่อไป

2.5 การควบคุมอุณหภูมิลมร้อน

การเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิลมร้อนจะเป็นผลมาจากเปลวไฟที่ผลิตได้จากเตาและอัตราการไหลเชิงมวลของลมที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ กล่าวคือหากเปลวไฟจากเตาผลิตแก๊สมีมากจะส่งผลให้อุณหภูมิลมร้อนที่ได้มีค่าสูงขึ้น หากต้องการให้อุณหภูมิคงที่ต้อป้อนลมให้มากขึ้นหรือหากเปลวไฟที่ผลิตได้ลดลงก็จะส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนลดลงและหากต้องการให้อุณหภูมิของลมร้อนคงที่ต้อป้อนลมเข้าสู่กระบวนการให้น้อยลงตามไปด้วย จากที่กล่าวมาจะพบว่าเปลวไฟที่ผลิตได้จากเตานั้นจะไม่สามารถควบคุมให้มีค่าคงที่ได้ ดังนั้นหากต้องการควบคุมให้อุณหภูมิของลมร้อนคงที่แล้วนั้นจะต้องควบคุมที่การป้อนลมเข้าสู่กระบวนการผลิตลมร้อนเป็นหลักทั้งนี้อุปกรณ์ที่จะใช้ในการควบคุมอัตราการป้อนลมนั้นประกอบด้วยชุดเทอร์โมคัปเปิลที่จะมีหน้าที่ในการรับรู้อุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตได้จากนั้นจะส่งข้อมูลให้กับชุด Temperature Controller เพื่อประมวลผลและส่งสัญญาณในการควบคุมการหมุนของชุดพัดลมพร้อมอินเวอร์เตอร์ให้ป้อนลมตามที่ระบบต้องการต่อไป ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดในส่วนของการควบคุมต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.5.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) [7]

เทอร์โมคัปเปิลมีมาตรฐานอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลชนิด S, เทอร์โมคัปเปิลชนิด R, เทอร์โมคัปเปิลชนิด B, เทอร์โมคัปเปิลชนิด J, เทอร์โมคัปเปิลชนิด K, เทอร์โมคัปเปิลชนิด T และเทอร์โมคัปเปิลชนิด E ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งเป็นชนิดที่เลือกใช้ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K [8]

เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ชาติที่เป็นฐานสำหรับการสร้างคือ นิกเกิล เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เริ่มผลิตให้เป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยพื้นฐานการผลิต ขั้วหนึ่งจะเป็นนิกเกิลที่เจือปนด้วยอะลูมิเนียม ส่วนอีกด้านที่เจือปนด้วยโครเมียม เพราะว่าในปี ค.ศ. 1916 ยังไม่สามารถสร้างนิกเกิลบริสุทธิ์ได้จึงได้เติมสารไม่บริสุทธิ์ต่างๆ ในส่วนผสมของวัสดุชนิด K แต่ในปัจจุบันได้มีกรรมวิธีสร้างส่วนผสมที่จะทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวเพื่อเหตุผลในการบำรุงรักษาและสอบเทียบ ด้วยเหตุนี้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเคลื่อนอุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนดไว้ข้อควรระวังในการใช้งานของชนิด K มีดังนี้

1. ขั้วลบของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นวัสดุเฟอร์ไรต์แมกเนติก (เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก) ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่จุดคิวรีของมัน (Curie point คืออุณหภูมิที่มันเปลี่ยนจากคุณสมบัติเหล็กไปเป็นแม่เหล็ก) อยู่ในช่วงที่ใช้รวมพอดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางเอาต์พุตอย่างทันทีทันใด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าจุดคิวรีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะผสม จุดคิวรีนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องศึกษาหากการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ไม่ทราบค่า ณ อุณหภูมิที่ไม่ทราบค่านี้

2. ที่อุณหภูมิสูงๆ (ช่วง 200 องศาเซลเซียส ถึง 600 องศาเซลเซียส) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีผลของฮีสเทอรีซิสเกิดขึ้นขณะที่มันอ่านค่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคลาดตาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

3. ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ขั้วของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

4. การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ หรือในพื้นที่อื่นๆ ที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูงๆ ชาติบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุต

ย่านการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น -270 องศาเซลเซียสถึง +1,370 องศาเซลเซียส

ข้อดีของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

- เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
- สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก -180 องศาเซลเซียสถึงประมาณ $1,350$ องศาเซลเซียส
- สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อยได้ดีกว่าแบบอื่นๆ
- สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
- ให้อัตราการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันใกล้เคียงกับ 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

- ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง
- ไม่เหมาะกับการทำงานที่มีไอของซัลเฟอร์
- ไม่เหมาะกับการสภาพงานที่เป็นสแตนเลส (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
- หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2.5.2 Temperature Control [9]

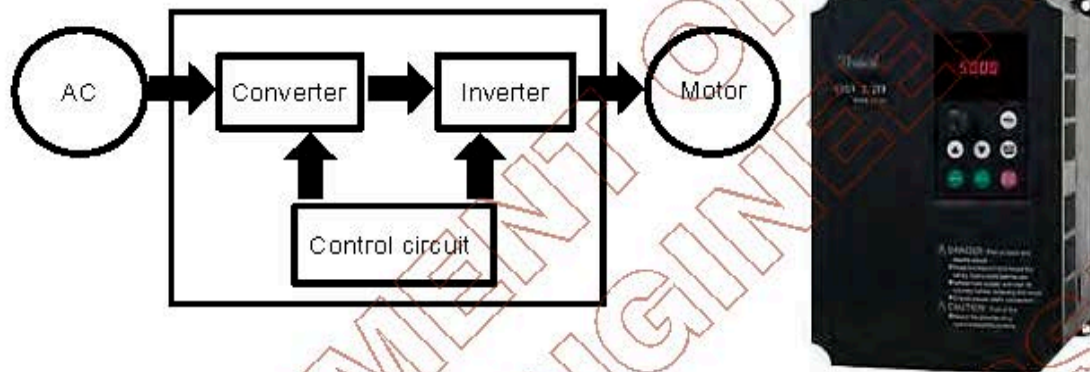
เครื่องควบคุมอุณหภูมิเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามค่าที่กำหนดไว้ โดยจะนำมาใช้การสั่งให้อุปกรณ์สำหรับทำความร้อนหรืออุปกรณ์ทำความเย็นทำงานตามที่ได้ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ การนำมาใช้งานและควบคุมก็ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการใช้งานดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีหลักการทำงานคือเครื่องวัดอุณหภูมิก็จะมีส่วนที่รับอุณหภูมิ (อินพุต) จากเทอร์โมคัปเปิลแล้วนำมาแสดงผลที่หน้าจอแสดงผล พร้อมกับควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตามค่าที่กำหนดไว้ หากอุณหภูมิไม่ได้ตามที่กำหนดไว้ก็จะมีส่วนของการสั่งงานออกไปยังอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.6 Temperature Control [9]

2.5.3 อินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์

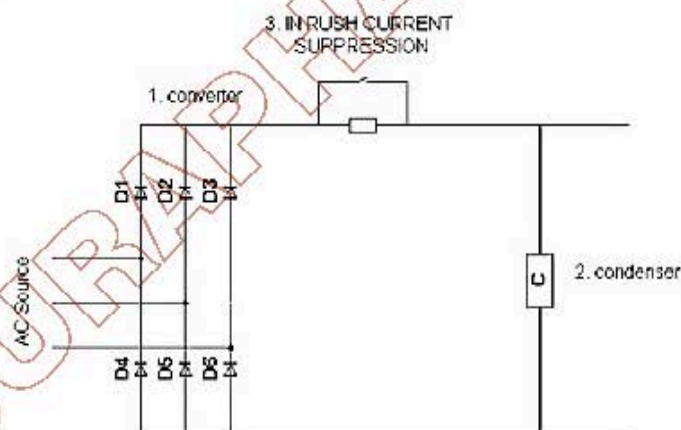
การทำงานของอินเวอร์เตอร์ คือ แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับไปยังคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วนำไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ต่อเป็นอินพุตเข้าไปในวงจรถอนเวอร์เตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่สามารถเลือกความเร็วได้ เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้มีความเร็วตามต้องการได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 [10]



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมมอเตอร์ [10]

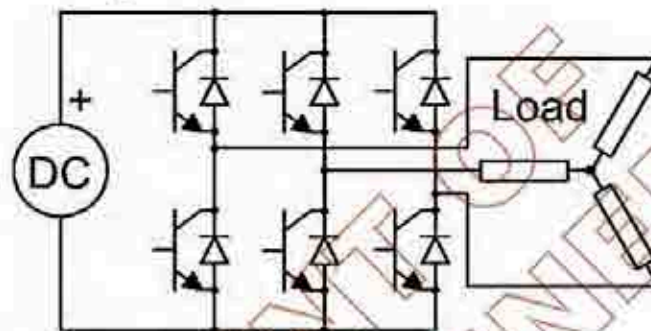
ในส่วนของคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนของคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยกลุ่มของไดโอด
2. ส่วนของคอนเดนเซอร์ ทำหน้าที่กรองกระแส โดยใช้ตัวเก็บประจุ
3. วงจรจำกัดกระแสอินรัช (IN RUSH CURRENT SUPPRESSION) ทำหน้าที่จำกัดกระแสขณะที่มีการเปิดสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์เป็นครั้งแรก [10]



รูปที่ 2.8 วงจรคอนเวอร์เตอร์ [10]

อินเวอร์เตอร์ จะเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยจะนำไฟฟ้ากระแสตรงต่อเข้ากับทรานซิสเตอร์ทั้ง 6 ตัว จากนั้นทำการเปิด - ปิดทรานซิสเตอร์ทั้ง 6 ตัวเป็นจังหวะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับขึ้นโดยถ้ามีการควบคุมเวลาในการเปิด - ปิดทรานซิสเตอร์ ที่ต่างกันจะได้ไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.9 [10]



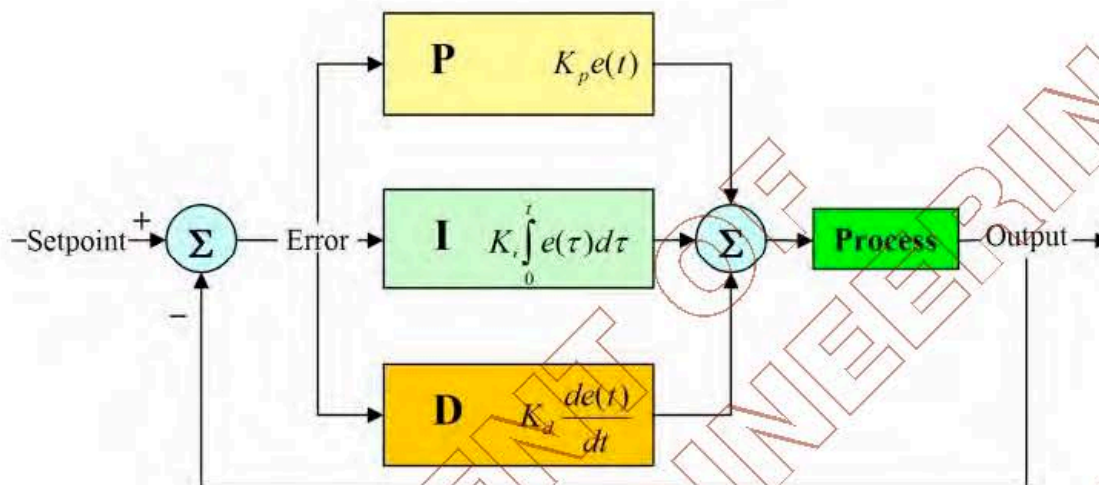
รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส [11]

2.6 การควบคุมแบบพีไอดี [13]

ระบบควบคุมอุณหภูมิของสมรือนที่ออกมาจะต้องควบคุมอัตราการจ่ายลมให้กับระบบ โดยมีอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการจ่ายลมให้กับระบบ ซึ่งในการควบคุม Temperature Controller จะใช้ระบบควบคุมแบบ PID Controller โดยการควบคุมดังกล่าวนี้จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

PID Controller (ระบบควบคุมแบบสัดส่วน - ปริพันธ์ - อนุพันธ์) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการค่าตัวแปรของพีไอดีที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ

วิธีการคำนวณของระบบควบคุมพีไอดี ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน, ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งหึ่งผ่านพ้นไป และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด ซึ่งผลรวมตามน้ำหนักของทั้งสามจะใช้ในการปรับกระบวนการโดยการปรับค่าคงที่ในระบบควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาดค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation)



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดี [13]

การควบคุมแบบพีไอดี ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการที่ 2.27

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \quad (2.27)$$

เมื่อ P_{out} , I_{out} และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุมพีไอดี จากแต่ละเทอมซึ่งนิยามตาม รายละเอียดดังนี้

2.6.1 สัดส่วน Proportional control action (P - Action)

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนอง ของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่า อัตราขยายสัดส่วนเทอม ของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ 2.28

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.28)$$

เมื่อ P_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

K_p คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

2.6.2 ปริพันธ์ Integral control action (I - Action)

ผลจากเทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก Reset) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์, K_i เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ 2.29

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.29)$$

เมื่อ I_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

K_i คือ อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่ เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้

2.6.3 อนุพันธ์ Derivative control action (D - Action)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆ เวลา (นั่นคือเป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาด ของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียกอัตรา) ขึ้นกับอัตราขยายอนุพันธ์ K_d เทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ 2.30

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.30)$$

เมื่อ D_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์

K_d คือ อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลา

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้ จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ

ซึ่งลักษณะการทำงานของตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในเทอมของเวลาได้ ดังสมการ 2.31

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.31)$$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกตแก้ว ไกรวงศ์ (2547) ได้ศึกษาและสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบตั้งโปรแกรมเพื่อใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51 โดยเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้เป็นเตาไฟฟ้าแบบลดความต้านทาน โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ลวดความร้อน และลดความร้อนนั้นจะให้ความร้อนออกมา โดยได้ดำเนินการวิจัยดังนี้ เขียนโปรแกรมคำสั่งสำหรับควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ AT89C51 และทำการทดสอบการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิและโปรแกรมควบคุม อุณหภูมิตั้งแต่เริ่มต้นจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตาเผาอุณหภูมิสูง จนกระทั่งอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงถึง 500 องศาเซลเซียส ควบคุมให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าการแกว่งของอุณหภูมิในช่วงนี้เฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.4 จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นจนถึง 700 องศาเซลเซียส ควบคุมให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าการแกว่งของอุณหภูมิในช่วงนี้เฉลี่ยประมาณร้อยละ 0.5 จากนั้น อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนถึง 900 องศาเซลเซียส และควบคุมให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ค่าการแกว่งของอุณหภูมิในช่วงนี้เฉลี่ยร้อยละ 0.5 ผลการทดสอบโปรแกรมคำสั่งควบคุมอุณหภูมิ ณ ระดับอุณหภูมิที่กำหนด 3 ระดับ คือ 500, 700 และ 900 องศาเซลเซียสของเตาเผาอุณหภูมิสูง พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงให้คงที่ได้ตามที่กำหนดไว้ โดยค่าการแกว่งของอุณหภูมิไม่เกินร้อยละ 1 [14]

ปริญญา กระจุกหลวงคังงาม (2553) ได้ศึกษาวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการออกแบบวิธีเปิด - ปิดหัวเผาในกระบวนการอุ่นเตาเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้สอดคล้องกันกับอุณหภูมิอ้างอิงและลดอัตราการสิ้นเปลือง เชื้อเพลิงในกระบวนการอุ่นเตาของเตาอบเหล็กชนิด Walking Hearth ของ บริษัท ราชสีมาผลิตภัณฑ์ จำกัด แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการอุ่นเตาสำหรับเตาอบเหล็กชนิด Walking Hearth ที่สร้างขึ้นภายใต้ ข้อมูลและอุปกรณ์เครื่องมือวัด ได้แก่ อินพุตคือจำนวนหัวเผาที่เปิด และเอาต์พุตคืออุณหภูมิในแต่ละโซน โดยค่าอุณหภูมิที่วัดได้เป็นค่าเฉลี่ยจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้โซนละ 2 ตัว จึงได้พิจารณาสมการ สมดุลทางความร้อนที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 จุด และเพื่อให้ง่ายต่อการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนออกทางผนังเตา ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการประมาณค่าโดยวิธีผลต่างกำลังสองน้อยที่สุดเป็นตัวบ่งชี้ค่าความเหมาะสมของค่าตัวแปร โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมในการค้นหาค่าตัวแปรโดยประมาณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการอุ่นเตาในลักษณะการทำงานของระบบพลวัตแบบวงเปิด โดยอาศัยการประมาณค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดรวมทั้งการเก็บค่าข้อมูลทั้ง อินพุตและเอาต์พุตเพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพฤติกรรมการตอบสนองที่สอดคล้องกันกับข้อมูลการศึกษา

เพื่อนำแบบจำลองโดยประมาณที่ได้ ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบวิธีการเปิด-ปิดหัวเผา ผลจากการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็กชนิด Walking Hearth โดยวิธีระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดและออกแบบวิธีการเปิด-หัวเผาสำหรับกระบวนการอุ่นเตา ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ด้วยจีนเนติกอัลกอริทึมได้แสดงผลการตอบสนองอุณหภูมิใน Soaking Zone ที่สอดคล้องกันกับอุณหภูมิอ้างอิงเมื่อใช้วิธีเปิด - ปิดหัวเผาที่ได้ออกแบบโดย เทคนิคความเหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้ได้ค่าความคลาดเคลื่อนเพียงร้อยละ 13.34 ซึ่งการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็กและออกแบบวิธีเปิด - หัวเผาสำหรับกระบวนการอุ่นเตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งด้านการตอบสนองของอุณหภูมิและการประหยัดเชื้อเพลิง [15]

ณัฐนันท์ ปลายเนตร และ ศุภชัย ปลายเนตร (2556) ได้เสนอการออกแบบและพัฒนาเตาอบชุบมิตพัว มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเตาอบชุบอุณหภูมิสูง สำหรับใช้ทดแทนเตาอบชุบแข็งมิตพัวแบบเดิม ซึ่งเป็นแบบใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ ความคุมอุณหภูมิเตาอบด้วยวิธีการควบคุมแบบพีไอดีคอนโทรล วัสดุที่ใช้ทดสอบ คือ เหล็กเหน็บของรถยนต์ซึ่งนำมาผลิตมิตพัว ผลการทดสอบประสิทธิภาพ ด้านการควบคุมอุณหภูมิโดยทำการปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 50 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 900 องศาเซลเซียส ผลการศึกษา พบว่าเตาอบชุบที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพด้านการควบคุมอุณหภูมिर้อยละ 98.78 และมีค่าความคลาดเคลื่อนด้านการควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยร้อยละ 1.22 โดยได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนของผลต่างของอุณหภูมิที่ปรับตั้งกับอุณหภูมิจริงภายในเตาอบชุบ [16]

บทที่ 3

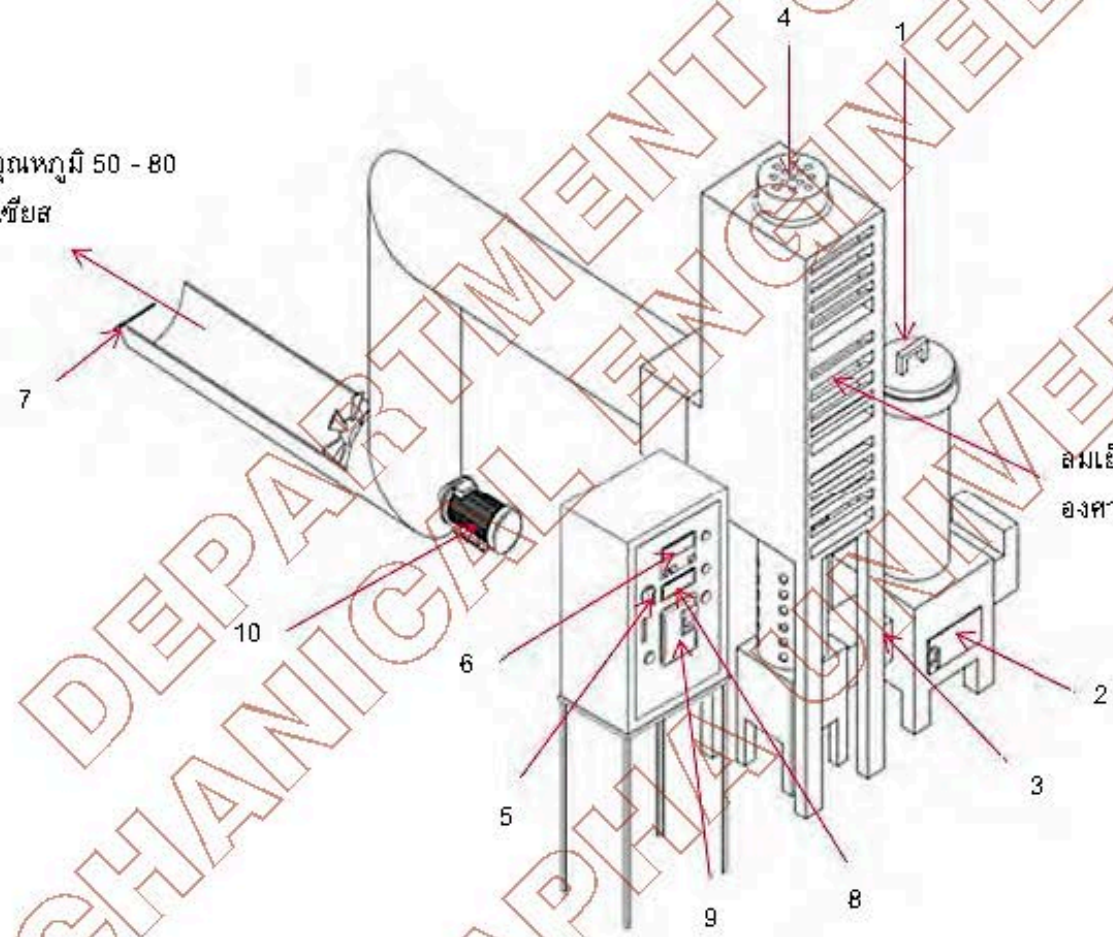
การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

3.1 แนวคิดในการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

จากการออกแบบของโครงการทางวิศวกรรมในระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมาได้ออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่ออบผลิตภัณฑ์ต่างๆ แต่อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้นั้นไม่คงที่ ดังนั้นในโครงการวิศวกรรมนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในห้องอบให้มีความคงที่มากขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำไปสู่การออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนโดยใช้หลักการปรับอัตราการไหลของอากาศ กล่าวคือเมื่อเปลวไฟที่ผลิตได้จากชุดเตาผลิตแก๊สลดลง จะส่งผลให้อุณหภูมิของชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง หากต้องการให้อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกมาคงที่ ต้องลดการจ่ายลมเข้าสู่ระบบ และในทางกลับกันหากเปลวไฟที่ได้จากเตาผลิตแก๊สเพิ่มสูงขึ้น จะต้องเพิ่มการจ่ายลมเข้าสู่ระบบเช่นกันเพื่อให้อุณหภูมิของลมร้อนที่ออกมาคงที่ตลอดเวลา

ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนเป็นเรื่องยากเนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณเปลวไฟที่ผลิตจากกระบวนการ Gasification ให้ได้แม่นยำเหมือนกับการควบคุมอุณหภูมิของฮีตเตอร์ ดังนั้นโครงการนี้หากต้องการควบคุมอุณหภูมิจึงสามารถควบคุมได้เพียงอัตราการไหลของอากาศเท่านั้น โดยในชุดควบคุมนี้จะมีเทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตได้ จากนั้นส่งข้อมูลให้กับ Temperature Controller เพื่อส่งสัญญาณให้กับอินเวอร์เตอร์ไปควบคุมการหมุนของชุดมอเตอร์พัดลมให้ป้อนลมตามที่ระบบต้องการโดยระบบที่ใช้ควบคุมจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1

ลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 - 80 องศาเซลเซียส



ลมเย็นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3.1 ระบบการผลิตลมร้อนและชุดควบคุมอุณหภูมิ

กลไกการทำงานของเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

1. ใส่เชื้อเพลิงลงไปในปล่อง (หมายเลข 1)
2. จุดไฟให้กับเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง (หมายเลข 2)
3. เมื่อระบบ Gasification สมบูรณ์จะเกิดเปลวไฟไหลขึ้นภายในท่อ (หมายเลข 3)
4. เปลวไฟจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจะไหลในชุดท่อและออกสู่ปลายชุดท่อเป็นแก๊สไอเสีย (หมายเลข 4)
5. เปิดสวิตช์ตู้คอนโทรล (หมายเลข 5) เพื่อให้ระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนและมอเตอร์พัดลมทำงาน (หมายเลข 10)
6. ตั้งค่าอุณหภูมิที่จะควบคุม 50 ถึง 80 องศาเซลเซียสที่ Temperature Controller (หมายเลข 6)
7. เทอร์โมคัปเปิล (หมายเลข 7) วัดอุณหภูมิของลมร้อนที่ทางออก
8. สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล (หมายเลข 7) จะถูกส่งไปยัง Temperature Controller (หมายเลข 6) และ Temperature Display (หมายเลข 8)
9. สัญญาณจาก Temperature Controller (หมายเลข 6) จะถูกส่งไปยังอินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 9)
10. อินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 9) จะปรับความถี่จากสัญญาณที่ได้รับเพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์พัดลม (หมายเลข 10) เพื่อให้ได้อุณหภูมิลมร้อนที่ต้องการ

3.2 การศึกษาข้อมูลพื้นฐานเพื่อประกอบการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

จากการศึกษาพบว่าสิ่งที่มีผลต่ออุณหภูมิของลมร้อนมี 2 อย่างที่สำคัญ คือ เปลวไฟ และอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ จากที่กล่าวมาในเบื้องต้นเปลวไฟไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งถ้ามีเปลวไฟออกมาจากชุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงมากอุณหภูมิของผิวชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะสูง แต่ถ้าเปลวไฟน้อยอุณหภูมิของผิวชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะต่ำ ดังนั้นการที่จะควบคุมอุณหภูมิให้คงที่จึงต้องทำการควบคุมที่อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศให้มากตามเปลวไฟที่มาก หรือน้อยตามเปลวไฟที่น้อย เพื่อให้อุณหภูมิคงที่จึงเกิดเป็นแนวคิดในการออกแบบ

ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาอุณหภูมิของผิวชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่อาจจะเกิดขึ้นในกรณีต่าง ๆ เพื่อนำอุณหภูมิที่ผิวของชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนไปคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ต้องการให้คงที่ เมื่อทราบค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแล้วจึงทำการศึกษาค่าความถี่ของการปรับอินเวอร์เตอร์เพื่อให้ชุดมอเตอร์พัดลมหมุนจนได้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศตามที่ต้องการ จึงเป็นที่มาของการศึกษาค่าอุณหภูมิที่ผิวครีปและค่าความถี่ที่มีผลต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

3.2.1 การศึกษาอุณหภูมิที่ผิวครีบ

ในการศึกษาเพื่อหาอุณหภูมิที่ผิวครีบจะทำการศึกษาโดยจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากโรงงานเก่า เมื่อระบบ Gasification สมบูรณ์จึงทำการวัดอุณหภูมิของผิวครีบโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยจะแบ่งการวัดจากระดับเปลวไฟที่จะออกจากกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเป็นระดับสูง กลาง และต่ำ โดยระดับของเปลวไฟต่างๆ จะส่งผลให้ค่าการแลกเปลี่ยนความร้อนของชุดท่อไม่เท่ากัน โดยผลจากการศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.1 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.)

ตารางที่ 3.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิที่ผิวครีบที่ระดับเปลวไฟต่างๆ

ระดับเปลวไฟ	อุณหภูมิผิวครีบ (องศาเซลเซียส)	การแลกเปลี่ยนความร้อน ของ 1 ชุดท่อ (วัตต์)
ต่ำ (อุณหภูมิเปลวไฟ 500 องศาเซลเซียส)	240	382.023
กลาง (อุณหภูมิเปลวไฟ 600 องศาเซลเซียส)	270	427.771
สูง (อุณหภูมิเปลวไฟ 700 องศาเซลเซียส)	310	488.565

3.2.2 การศึกษาการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อศึกษาผลกระทบต่ออัตราการไหลของอากาศ

ในการทำงานของระบบผลิตลมร้อนต้องการทราบอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ทำให้เกิดลมร้อนตามอุณหภูมิที่ต้องการ ดังนั้นจึงทำการศึกษาการปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์เพื่อหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ความถี่ต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์ ทำได้โดยต่อชุดมอเตอร์พัดลมเข้ากับอินเวอร์เตอร์และปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่ระดับต่างๆ และใช้เครื่องวัดความเร็วลมวัดค่าความเร็วลมของอากาศที่ไหลออกจากใบพัดของพัดลม ซึ่งได้ค่าอัตราการไหลเชิงมวลดังแสดงในตารางที่ 3.2 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.)

ตารางที่ 3.2 ผลการศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่มีอุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ของอินเวอร์เตอร์ค่าต่างๆ

ความถี่ของกระแสไฟฟ้า ที่จ่ายให้มอเตอร์ (เฮิรตซ์)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
2.5	1.19	0.31
5	2.03	0.54
7.5	3.59	0.95
10	4.02	1.06

ความถี่ของกระแสไฟฟ้า ที่จ่ายให้มอเตอร์ (เฮิรตซ์)	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)
12.5	6.56	1.73
15	6.91	1.82
17.5	9.35	2.47
20	10.49	2.77

หมายเหตุ : ในเบื้องต้นทำการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเร็วลมกับค่าความถี่ไฟฟ้าที่ส่งให้มอเตอร์ โดยศึกษาที่อุณหภูมิตั้งที่ 33 องศาเซลเซียสเท่านั้น เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบในเบื้องต้น ซึ่งในการคำนวณจริงจะต้องใช้คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิมลร้อนที่ผลิตได้คือ 80, 75, 70, 65, 60, 55 และ 50 องศาเซลเซียส โดยจะสามารถทำการคำนวณได้จริงเมื่อสร้างอุปกรณ์เสร็จแล้ว

จากตารางที่ 3.2 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศโดยมีตัวแปรคือความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศอุณหภูมิตั้งที่ 33 องศาเซลเซียสกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์

3.3 ค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อให้ได้อุณหภูมิของลมร้อนตามที่ต้องการ

จากการศึกษาพบว่าเมื่อต้องการค่าอุณหภูมิของลมร้อนให้ได้ตามที่กำหนด สามารถคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเพื่อเปรียบเทียบความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ซึ่งทำให้ชุดพัดลมมอเตอร์ทำงานตามความถี่ของอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.)

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศกับความถี่ของอินเวอร์เตอร์จากการศึกษา

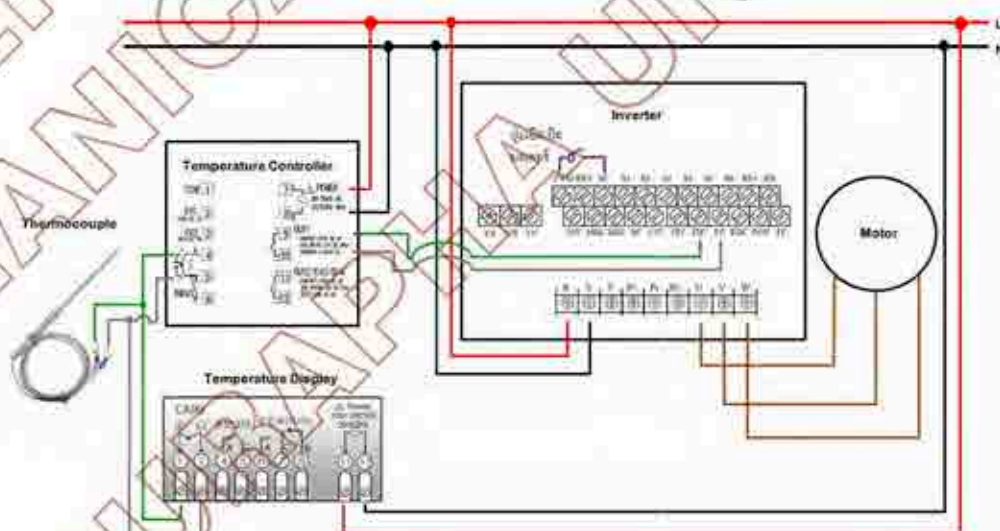
อุณหภูมิของอากาศ ที่ต้องการ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่ผิวครีบ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลเชิง มวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)	ความถี่ของ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้ มอเตอร์ (เฮิรตซ์)
80	สูง (310 องศาเซลเซียส)	0.36	3.51
	กลาง (270 องศาเซลเซียส)	0.31	2.79
	ต่ำ (240 องศาเซลเซียส)	0.26	2.13
75	สูง (310 องศาเซลเซียส)	0.41	4.21
	กลาง (270 องศาเซลเซียส)	0.34	3.22
	ต่ำ (240 องศาเซลเซียส)	0.29	2.57
70	สูง (310 องศาเซลเซียส)	0.46	4.78
	กลาง (270 องศาเซลเซียส)	0.39	3.95
	ต่ำ (240 องศาเซลเซียส)	0.33	3.08
65	สูง (310 องศาเซลเซียส)	0.53	5.35
	กลาง (270 องศาเซลเซียส)	0.45	4.68
	ต่ำ (240 องศาเซลเซียส)	0.39	3.96
60	สูง (310 องศาเซลเซียส)	0.63	5.98
	กลาง (270 องศาเซลเซียส)	0.53	5.35
	ต่ำ (240 องศาเซลเซียส)	0.46	4.78
55	สูง (310 องศาเซลเซียส)	0.86	6.40
	กลาง (270 องศาเซลเซียส)	0.75	6.71
	ต่ำ (240 องศาเซลเซียส)	0.68	6.37

อุณหภูมิของอากาศที่ต้องการ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่ผิวครีป (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (กิโลกรัมต่อวินาที)	ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ (เฮิรตซ์)
50	สูง (310 องศาเซลเซียส)	1.00	10.42
	กลาง (270 องศาเซลเซียส)	0.85	7.32
	ต่ำ (240 องศาเซลเซียส)	0.73	6.54

หมายเหตุ : ค่าดังตารางนี้ได้มาจากการศึกษาอุณหภูมิมล 33 องศาเซลเซียส ซึ่งในการที่โรงงานจริงจะทำการปรับปรุงให้ได้ค่าที่ใช้ตามอุณหภูมิของลมร้อนจริงต่อไป

3.4 การต่ออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิการผลิตลมร้อน

ในระบบควบคุมของโรงงานนี้มีอุปกรณ์ที่สำคัญประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิล, Temperature Controller, Temperature Display, อินเวอร์เตอร์ และชุดมอเตอร์พัดลม โดยการต่อระบบควบคุมจะเริ่มจาก เทอร์โมคัปเปิลต่อเข้ากับ Temperature Controller และ Temperature Display ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อเป็นอินพุตให้ทั้ง 2 อุปกรณ์ในการควบคุมและแสดงผลของอุณหภูมิ และอินพุตจาก เทอร์โมคัปเปิลผ่าน Temperature Controller จะได้อเอาท์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก ไปยังอินเวอร์เตอร์ต่อเข้ากับช่องรับสัญญาณอนาล็อกเพื่อปรับความถี่ของอินเวอร์เตอร์ตามเอาท์พุตที่ได้จาก Temperature Controller และความถี่ของอินเวอร์เตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้กับชุดมอเตอร์พัดลม โดยที่ความเร็วรอบจะปรับเปลี่ยนตามความถี่ของอินเวอร์เตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.3



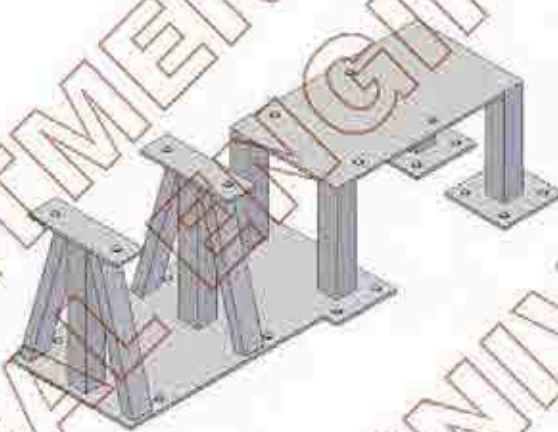
รูปที่ 3.3 การต่ออุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิการผลิตลมร้อน

3.5 การออกแบบชุดจ่ายลมร้อน

ชุดจ่ายลมร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดูดลมจากภายนอกที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไหลผ่านตู้แลกเปลี่ยนความร้อน โดยในการออกแบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ แท่นวางมอเตอร์ ท่อทางเดินลมร้อน และฉนวนกันความร้อน ซึ่งประกอบด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.5.1 แท่นวางมอเตอร์ [17]

แท่นวางมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (รายละเอียดการออกแบบแท่นวางมอเตอร์แสดงในภาคผนวก ก.) ได้คำนวณการไหลรวมของอุปกรณ์ที่วางบนแท่นมอเตอร์เพื่อหาขนาดของเหล็กที่จะใช้ในการสร้างแท่นวางมอเตอร์ ความหนาของแผ่นวางมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 3.487 มิลลิเมตร ซึ่งในการสร้างเลือกใช้ความหนา 5 มิลลิเมตร และความหนาของเหล็กกล่องที่ใช้ทำเสาแท่นวางมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.054 มิลลิเมตร ซึ่งในการสร้างเลือกใช้เหล็กกล่องหนา 2.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 แท่นวางมอเตอร์

ซึ่งความหนาของแผ่นวางมอเตอร์ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.1)

$$\sigma_y = \frac{Mc}{I} \quad (3.1)$$

เมื่อ σ_y คือ ความเค้นดัด (นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

M คือ โมเมนต์ดัด (นิวตันมิลลิเมตร)

c คือ ระยะจากแกนสะเทิน (มิลลิเมตร)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

ซึ่งความหนาของเหล็กกล่องที่ใช้ทำเสาแผ่นวางมอเตอร์ สามารถคำนวณได้ดังสมการ (3.2)

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{kL^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ P_{cr} คือ แรงวิกฤติ (นิวตัน)

E คือ ค่ายังมอดูลัส (ปาสคาล)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

k คือ รัศมีเงาเรขาคณิต

L คือ ความยาวสมมูล (ตารางมิลลิเมตร)

3.5.2 ท่อทางเดินลมร้อน

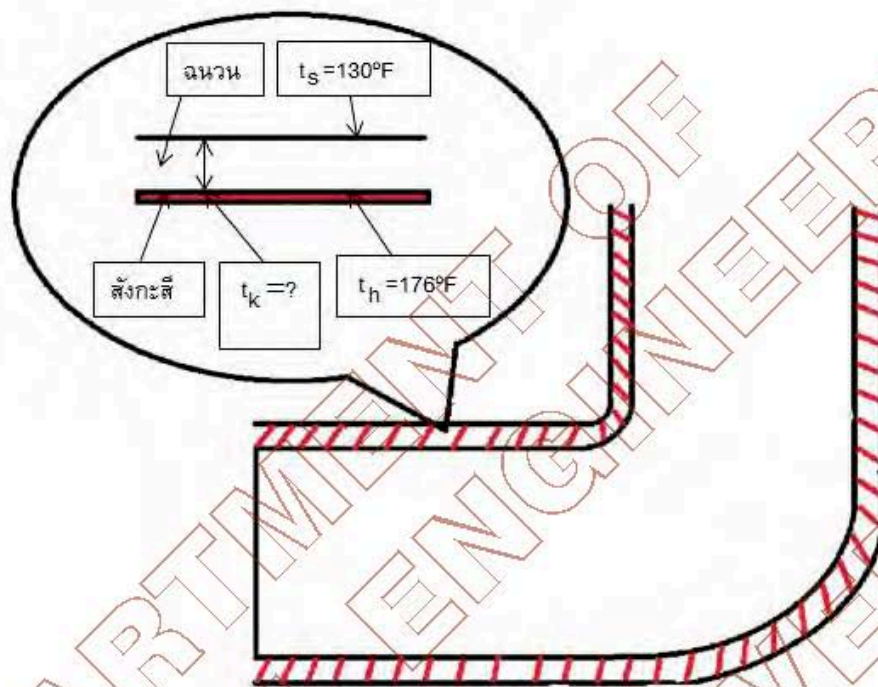
ท่อทางเดินลมร้อนแสดงดังรูปที่ 3.5 (รายละเอียดการออกแบบแทนวางมอเตอร์แสดงในภาคผนวก ค.) ได้ออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อให้มีขนาด 54 เซนติเมตร ความยาว 290 เซนติเมตร และท่อเปลี่ยนรูปทรงจากตู้ผลิตลมร้อนสู่ท่อทางเดินลมร้อนขนาด 54 เซนติเมตร ซึ่งทำหน้าที่ส่งลมร้อนในขณะที่ใบพัดดูดลมจากภายนอกเข้าสู่กระบวนการผลิตลมร้อน



รูปที่ 3.5 ท่อทางเดินลมร้อน

3.5.3 ความหนาของฉนวนหุ้มท่อทางเดินลมร้อน [18]

ในการพิจารณาความหนาของฉนวนนั้นจะกำหนดขอบเขตของระบบและอุณหภูมิต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขอบเขตของระบบและอุณหภูมิต่างๆ

กำหนด $t_h = 176^\circ\text{F}$, $t_s = 130^\circ\text{F}$ (โดยปกติอุณหภูมิที่ผิวฉนวนอยู่ระหว่าง $130 - 150^\circ\text{F}$)

จาก $t_m = \frac{t_h + t_s}{2} = \frac{176 + 130}{2} = 153^\circ\text{F}$ นำอุณหภูมิเปิดตารางหาค่า $k = 0.28$ ซึ่งหาได้

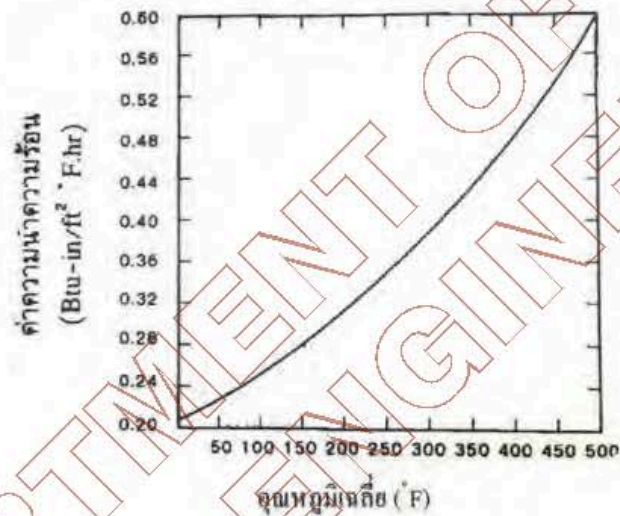
จากกราฟแสดงในรูปที่ 3.7

กำหนดความร้อนที่สูญเสียโดยทั่วไปกำหนดไม่เกิน 50 Btu

$$\text{จาก } t_k = \frac{k(t_h - t_s)}{Q} = \frac{0.28(176 - 130)}{50} = 0.2576 \text{ นิ้ว}$$

ดังนั้นจากผลการคำนวณจะต้องใช้ฉนวนใยแก้วที่มีความหนา 1 นิ้ว ในการหุ้มท่อทางเดินลมร้อน แต่ในที่นี้จะใช้ความหนา 2 นิ้ว เพื่อหุ้มท่อเนื่องจากมีราคาต่ำกว่าความหนา 1 นิ้ว

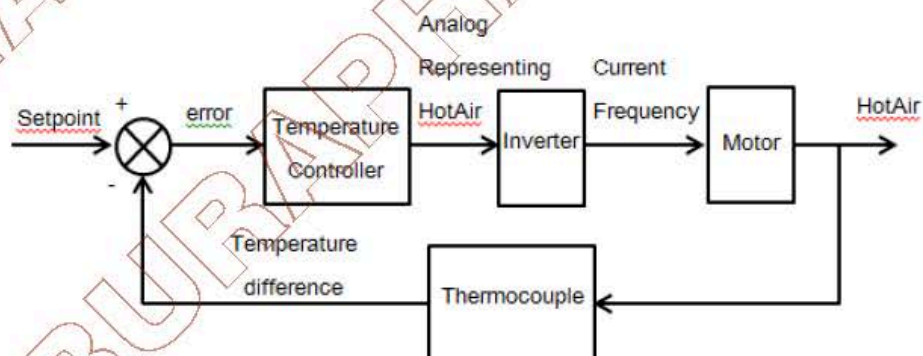
- เมื่อ t_k คือ ความหนาของฉนวน (นิ้ว)
 t_h คือ อุณหภูมิผิวท่อ (องศาฟาเรนไฮต์)
 t_m คือ อุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยระหว่างผิวท่อกับผิวฉนวน (องศาฟาเรนไฮต์)
 t_s คือ อุณหภูมิที่ผิวฉนวน (องศาฟาเรนไฮต์)
 k คือ ค่าความนำความร้อนของฉนวนไฟเบอร์กลาส (Btu - in/ft² · °F · hr)



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยและค่านำความร้อนของฉนวนไฟเบอร์กลาส

3.6 ระบบควบคุมอัตโนมัติ

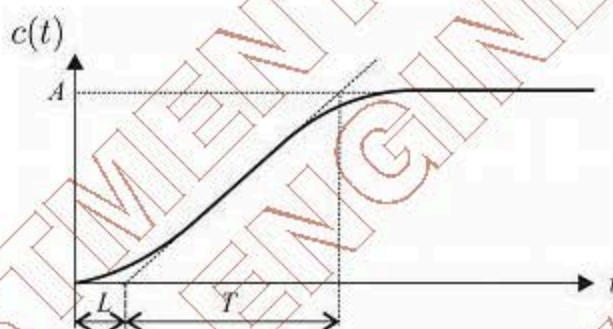
ระบบควบคุมในโรงงานนี้จะมีการทำงานของระบบผลิตลมร้อน ซึ่งไดอะแกรมของระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยสั่งให้ Temperature Controller ปลดปล่อยสัญญาณไปควบคุมการปรับความเร็วของอินเวอร์เตอร์ให้สั่งชุดมอเตอร์พัดลมทำงานให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศตามที่ต้องการ ซึ่งโปรแกรมควบคุมมีผังงานการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมของระบบควบคุม

3.6.1 การออกแบบตัวแปรการควบคุมแบบพีไอดี

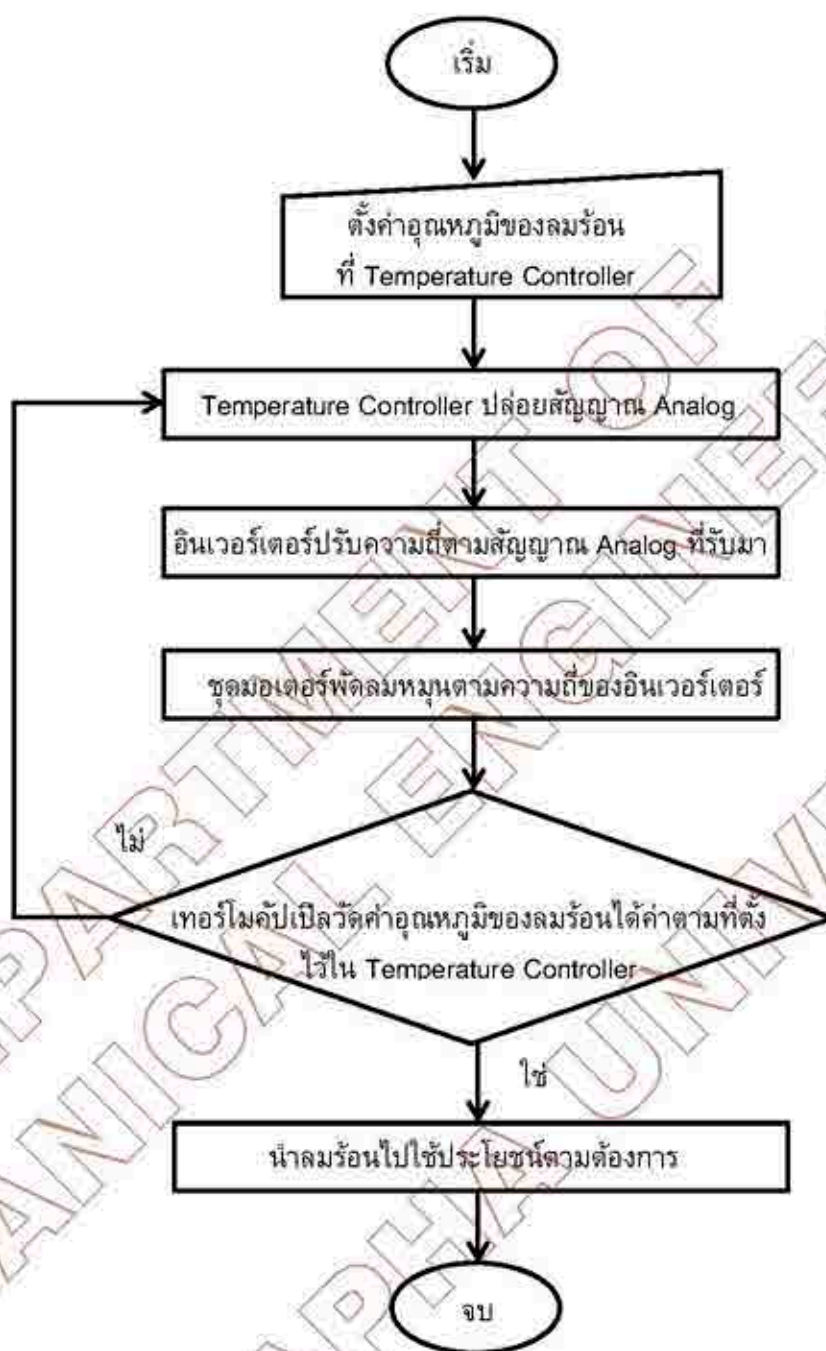
การออกแบบตัวแปรการควบคุมแบบพีไอดี จะใช้วิธีการของซีเกลอร์ - นิโคลส์ (Ziegler - Nichols) ซึ่งในที่นี้เราจะใช้วิธีการตอบสนองแบบขั้นบันไดของซีเกลอร์ - นิโคลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และการหาค่าตัวแปรการควบคุมแบบพีไอดีสามารถหาค่าได้จากตารางที่ 3.4 โดยค่าตัวแปรการควบคุมจะส่งผลกับชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน คือ ค่า K_p ช่วยในการเพิ่มหรือลดสัญญาณขาออกยังมีค่าต่ำ สัญญาณขาออกยิ่งเพิ่มขึ้น ค่า T_i ช่วยในการลดค่าความผิดพลาดระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ และ T_d ช่วยในการลดเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูตส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนเข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วขึ้น



รูปที่ 3.9 การวัดผลการตอบสนองแบบขั้นบันไดของซีเกลอร์ - นิโคลส์ [19]

ตารางที่ 3.4 การหาค่าตัวแปรโดยวิธีการตอบสนองแบบขั้นบันไดของซีเกลอร์ - นิโคลส์ [19]

คอนโทรลเลอร์	K_p	T_i	T_d
P	T/AL	-	-
PI	$0.9T/AL$	$L/0.3$	-
PID	$1.2T/AL$	$2L$	$L/2$

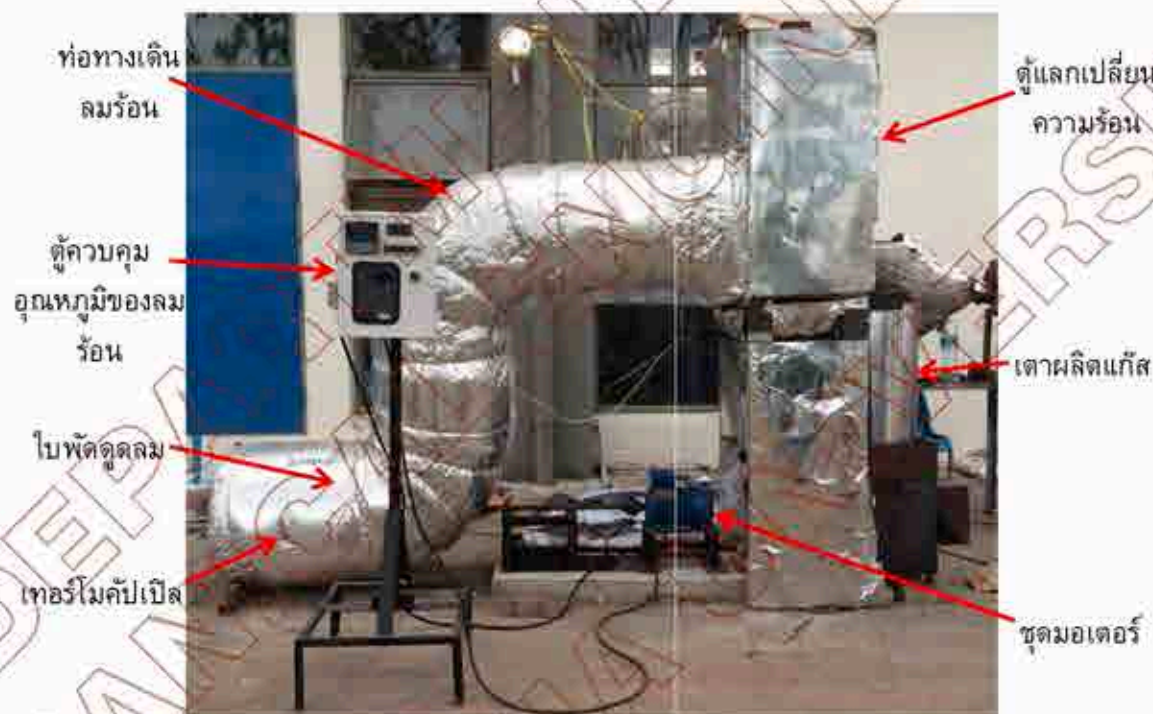


รูปที่ 3.10 ผังการทำงานของระบบควบคุม

บทที่ 4

การสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

จากข้อมูลที่น่าเสนอในแต่ละบทข้างต้นได้กล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบและส่วนประกอบของอุปกรณ์ ซึ่งลำดับถัดไปคือการสร้างชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตด้วยกระบวนการ Gasification โดยชุดอุปกรณ์จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ชุดควบคุมการทำงานและชุดจ่ายลม มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดการทำงานและการสร้างในแต่ละชั้นส่วนดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

4.1 ความเกี่ยวข้องของอุปกรณ์

ในการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนมีความเกี่ยวข้องของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยเริ่มจากการวัดอุณหภูมิของลมร้อนด้วยเทอร์โมคัปเปิลส่งค่าไปยัง Temperature Controller ทำการคำนวณค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลกับอุณหภูมิที่ตั้งค่าหลังจากการคำนวณค่าความผิดพลาด Temperature Controller จะส่งสัญญาณแอนะล็อกในช่วงระหว่าง 0 ถึง 20 มิลลิแอมป์ ออกมาควบคุมความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ปรับค่า ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ได้นั้นจะส่งไปยังคัปมอเตอร์ให้ปรับความเร็วรอบตามความถี่ของกระแสไฟฟ้าโดยมีใบพัดดูดลมเป็นอุปกรณ์สร้างลมร้อนให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เหมาะสมกับอุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการ



รูปที่ 4.2 การทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

4.2 รายละเอียดส่วนประกอบของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

จากการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน ซึ่งมีรายละเอียดส่วนประกอบของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ตู้ควบคุมการทำงานและชุดจ่ายลม โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ตู้ควบคุมการทำงาน

ตู้ควบคุมการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.3 เป็นอุปกรณ์ที่ทำเพิ่มขึ้นมาเพื่อใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยได้ทำการวัดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละอุปกรณ์ จึงเลือกซื้อตู้พลาสติกขนาดกว้าง 29 เซนติเมตร ยาว 39 เซนติเมตร และหนา 15 เซนติเมตร โดยตู้ควบคุมการทำงานมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 4.3 ตู้ควบคุมการทำงาน

4.2.1.1 Temperature Controller

Temperature Controller ที่ใช้เป็น ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY900 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน โดยการปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ซึ่งจะมีเทอร์โมคัปเปิลเป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิแล้วส่งค่ากลับไปยัง Temperature Controller ทำการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อที่จะส่งสัญญาณล็อกในช่วงระหว่าง 0 ถึง 20 มิลลิแอมป์ ออกไปควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศให้เหมาะสมกับค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของลมร้อนที่ตั้งค่าไว้



รูปที่ 4.4 Temperature Controller

4.2.1.2 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ที่ใช้เป็น ยี่ห้อ Haltech - GR รุ่น H3200A02D2K ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังมอเตอร์ เพื่อควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ซึ่งจะรับสัญญาณอนาล็อกในช่วงระหว่าง 0 ถึง 20 มิลลิแอมป์ จาก Temperature Controller มาปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ตั้งไว้



รูปที่ 4.5 อินเวอร์เตอร์

4.2.1.3 Temperature Display

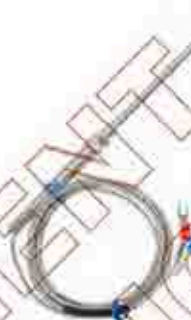
Temperature Display ที่ใช้ เป็น ยี่ห้อ CONOTEC รุ่น FOX - 2C2 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แสดงค่าของอุณหภูมิ โดยจะรับค่าจากเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ มาแสดงผลบนหน้าจอ



รูปที่ 4.6 Temperature Display

4.2.1.4 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็น ชนิด K ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิในการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน มีจำนวนทั้งสิ้น 5 ตัว ซึ่งต่อเข้ากับ Temperature Controller 1 ตัว และ Temperature Display อีก 4 ตัว โดยจะวัดค่าอุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ คือ อากาศภายนอก เปลวไฟ คิว้นไอเสีย ต้นทางของท่อทางเดินลมร้อน และปลายทางของท่อทางเดินลมร้อน จากนั้นค่าของอุณหภูมิที่วัดได้จะถูกนำไปแสดงทางหน้าจอของ Temperature Display และนำไปป้อนเข้า Temperature Controller เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิต่อไป



รูปที่ 4.7 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

4.2.2 ชุดจ่ายลม

ชุดจ่ายลมดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ดูดลมจากภายนอกที่อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมไหลผ่านตู้แลกเปลี่ยนความร้อน โดยภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีชุดท่อติดครบ จึงทำให้ลมที่ไหลผ่านอุณหภูมิเพิ่มขึ้นออกไปยังท่อทางเดินลมร้อน ซึ่งมีมอเตอร์พัดทำหน้าที่ดูดลมอยู่ที่ตำแหน่งทางออกของท่อทางเดินลมร้อน โดยชุดจ่ายลมมีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 4.8 ชุดจ่ายลม

4.2.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้า

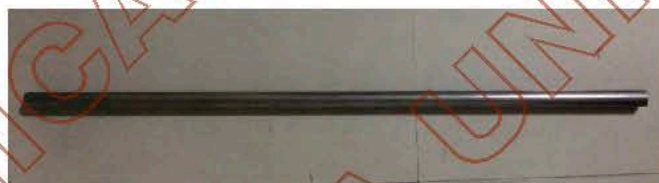
มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้า ที่ใช้เป็น ยี่ห้อ Suntech รุ่น GL90L-2 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่หมุนใบพัดเพื่อดูดลม ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ใช้มาจากอินเวอร์เตอร์ โดยการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า เพื่อให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่เหมาะสมในการผลิตลมร้อน



รูปที่ 4.9 มอเตอร์ไฟฟ้า

4.2.2.2 เพล่า

เพล่าที่ใช้ทำจากเหล็ก AISI 1045 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ความยาว 130 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังใบพัดดูดลม ซึ่งในการสร้างได้ทำการกลึงเพล่าข้างใดข้างหนึ่งเพื่อใส่ใบพัดดูดลมให้ขนาดเท่ากับขนาดของรูใบพัดดูดลม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.38 เซนติเมตร ความลึก 5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.10 เพล่า

4.2.2.3 ใบพัดดูดลม

ใบพัดดูดลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 51.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างลมโดยการดูดลมจากภายนอกเข้าสู่กระบวนการผลิตลมร้อน



รูปที่ 4.11 ใบพัดลม

4.2.2.4 แท่นวางมอเตอร์และตลับลูกปืน

แท่นวางมอเตอร์ขนาดกว้าง 25 เซนติเมตร ยาว 93 เซนติเมตร ความสูงของแท่นวางมอเตอร์ 17 เซนติเมตร ความสูงของแท่นวางตลับลูกปืนตึกตา 22 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ยึดมอเตอร์กับตลับลูกปืนตึกตาเข้ากับแท่นวางมอเตอร์เพื่อให้ความสูงของใบพัดอยู่ในช่องทางเดินลมร้อนได้พอดี โดยในการสร้างได้ใช้วัสดุประกอบด้วยเหล็กกล่องขนาด $3.2 \times 3.2 \times 0.2$ เซนติเมตร และเหล็กแผ่นหนา 0.5 เซนติเมตร ซึ่งทำการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมไฟฟ้าตามแบบที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 4.12 แท่นวางมอเตอร์

4.2.2.5 ยอยเหล็ก

ยอยเหล็ก ยี่ห้อ Neo-Flex รุ่น 1 - KR - 3012 แกนใหญ่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร แกนเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร และขนาดมอเตอร์ที่รองรับ 1 ถึง 3 แรงม้า โดยแสดงดังรูปที่ 4.13 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างแกนเพลลาของมอเตอร์กับแกนเพลลาที่ใช้หมุนใบพัดตุลลม ซึ่งในการสร้างได้ทำการกลึงแกนเล็กด้านซ้ายให้เท่ากับแกนของเพลลามอเตอร์และด้านขวาให้เท่ากับขนาดของแกนเพลลาที่ใช้หมุนใบพัดตุลลม



รูปที่ 4.13 ยอยเหล็ก

4.2.2.6 ตลับลูกปืนตึกตา

ตลับลูกปืนตึกตาที่เลือกใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ยี่ห้อ TNT ดังแสดงในรูป 4.14 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ยึดแกนเพลลาเข้ากับแท่นวางตลับลูกปืนตึกตา



รูปที่ 4.14 คลับลูกปืนคู่กวด

4.2.3 ท่อทางเดินลมร้อน

ท่อทางเดินลมร้อนทำจากสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 เซนติเมตร ความยาว 290 เซนติเมตร พร้อมหุ้มฉนวนใยแก้วความหนา 2 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ส่งลมร้อนในขณะที่ใบพัดดูดลมจากภายนอกเข้าสู่กระบวนการผลิตลมร้อน



รูปที่ 4.15 ท่อทางเดินลมร้อน

4.2.4 ตู้แลกเปลี่ยนความร้อน

ตู้แลกเปลี่ยนความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.16 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับความร้อนจากเตาผลิตเชื้อเพลิงแบบ Crossdraft Gasifier ซึ่งภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อน จะมีชุดท่อติดครีบที่ให้ความร้อนกับลมที่ไหลผ่านไปสู่ท่อทางเดินลมร้อนต่อไป โดยชุดท่อติดครีบมีจำนวน 39 ชุดท่อ แต่ละท่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร และจำนวนครีบ 227 ครีบ ซึ่งครีบมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 7.62 เซนติเมตร



รูปที่ 4.16 ตู้แลกเปลี่ยนความร้อน

4.2.5 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Crossdraft Gasifier เป็นระบบที่อากาศไหลขวางกับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งจะเปลี่ยนเชื้อเพลิงในรูปของของแข็งให้อยู่ในรูปแก๊สเชื้อเพลิง จากนั้นจะใช้ประโยชน์จากไอร้อนที่เกิดจากเปลวไฟ ทำให้ชุดท่อติดครีบท่อกันอยู่ในตู้แลกเปลี่ยนความร้อนอุณหภูมิสูงขึ้นไป เพื่อนำความร้อนไปใช้ในการผลิตลมร้อนต่อไป



รูปที่ 4.17 เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ Crossdraft Gasifier

4.3 เครื่องมือวัดค่าความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

เครื่องมือวัดค่าความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ยี่ห้อ Testo ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศในการทดลองควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนเพื่อหาความเร็วของลมร้อนและค่าความชื้นสัมพัทธ์ในลมร้อนที่ไหลออกจากท่อทางเดินลมร้อน โดยสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงมวลในอากาศของลมร้อนและประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 4.18 เครื่องมือวัดความเร็วลม



รูปที่ 4.19 เครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ

บทที่ 5

การศึกษาการควบคุมอุณหภูมิ

หลังจากทำการสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการทดลองชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน เพื่อศึกษาการทำงานของชุดควบคุมการทำงานให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ได้จากการบวนการ Gasification ให้ได้ตามที่ต้องการโดยทำการศึกษการผลิตลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส ตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ซึ่งรายละเอียดในการศึกษาจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการผลิตลมร้อน การควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน และผลการศึกษาดังกล่าว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ขั้นตอนการผลิตลมร้อน

ในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนนั้นจะมีขั้นตอนในการปฏิบัติดังนี้ คือ เริ่มจากการเตรียมเชื้อเพลิง โดยใส่เชื้อเพลิงลงในเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจนเกิดเปลวไฟขึ้นที่ปล่องไฟที่อยู่ใต้ตู้แลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นตู้แลกเปลี่ยนความร้อนจะได้รับความร้อนจากไอร้อนที่เกิดจากเปลวไฟที่ออกมาจากเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีชุดท่อติดครีบบอยู่ภายในเป็นส่วนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับลมที่ไหลผ่าน โดยมีชุดควบคุมการทำงานและชุดจ่ายลมเพื่อควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้ได้ตามที่ตั้งค่าไว้ ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

5.1.1 การเตรียมเชื้อเพลิง

เตรียมเชื้อเพลิงที่ใช้คือไม้ยูคาลิปตัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ถึง 50 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตัดเป็นท่อนเล็กๆ ดังแสดงรูปในที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ไม้ยูคาลิปตัสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ถึง 50 มิลลิเมตร

5.1.2 จุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิง

ทำการจุดเตาโดยนำเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้ใส่ไปในส่วน Drying Zone ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ให้เต็ม แล้วทำการปิดฝาและเติมน้ำที่ด้านบนเพื่อป้องกันการไหลออกของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ทางฝาด้านบน จากนั้นทำการจุดไฟที่ด้านล่างของเตาดังแสดงในรูปที่ 5.3 เมื่อไฟติดให้ปิดประตูด้านล่างและทำการเปิดทางเข้าของอากาศดังแสดงในรูปที่ 5.4 เมื่อเกิดแก๊สเชื้อเพลิงมีปริมาณที่เพียงพอต่อการเกิดเปลวไฟดังแสดงในรูป 5.5 ได้แล้วซึ่งไฟจะติดขึ้นมาเอง โดยเปลวไฟจะก่อให้เกิดไอร้อนส่งผลให้เกิดความร้อนขึ้นภายในตู้แลกเปลี่ยนความร้อนต่อไป



รูปที่ 5.2 เติมน้ำเชื้อเพลิง



รูปที่ 5.3 จุดไฟที่ด้านล่างเตา



รูปที่ 5.4 เปิดทางเข้าของอากาศ



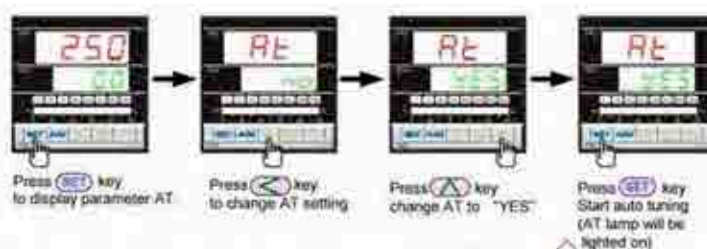
รูปที่ 5.5 เปลวไฟที่เกิดจากกระบวนการ

5.1.3 การตั้งค่าชุดควบคุมการทำงาน

ในส่วนของการตั้งค่าชุดควบคุมการทำงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนของ Temperature Controller กับ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดการตั้งค่าดังนี้

5.1.3.1 Temperature Controller

ในครั้งแรกที่ทำการทดลองต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์จากระบบอัตโนมัติของอุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการเพื่อให้ Temperature Controller หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ จากนั้นหรือจนกว่าการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะเสร็จสิ้นจึงเริ่มทำการตั้งค่าอุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการ โดยมีลำดับขั้นตอนในการปรับค่าพารามิเตอร์จากระบบอัตโนมัติดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 การปรับค่าอัตโนมัติ

5.1.3.2 อินเวอร์เตอร์

หลังจากที่ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการแล้วให้หยุดการทำงานของอินเวอร์เตอร์เพื่อ ทำการตั้งค่าอินเวอร์เตอร์ให้รับสัญญาณอนาล็อกในช่วงระหว่าง 0 ถึง 20 มิลลิแอมป์ ที่ปล่อยออกจาก Temperature Controller จากนั้นตั้งค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าในกรณีนี้ Temperature Controller เกิดการแจ้งเตือนในกรณีนี้ตั้งค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ 5 เฮิรตซ์ เพื่อให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเหมาะสมกับค่าความผิดพลาดระหว่างอุณหภูมิที่ตั้งไว้กับอุณหภูมิของลมร้อน ณ ขณะนั้น

5.1.4 การวัดค่าที่สนใจจะศึกษา

ในการศึกษาระบบควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนนั้นจะต้องทำการวัดอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของลมร้อน ซึ่งในที่นี้ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดค่าอุณหภูมิทั้งหมด 5 จุด ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยที่จุดที่ 1 วัดอุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการที่จะควบคุม จุดที่ 2 วัดอุณหภูมิของลมร้อนที่ผ่านชุดท่อตัดกลับ จุดที่ 3 วัดอุณหภูมิของควันไอเสีย จุดที่ 4 วัดอุณหภูมิของอากาศ และจุดที่ 5 วัดอุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากกระบวนการ Gasification สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการค่าวัดอุณหภูมิคือ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K โดยผลการวัดค่าแสดงดังตารางในภาคผนวก ข.



รูปที่ 5.7 ตำแหน่งในการวัดค่าอุณหภูมิ

5.1.5 วิเคราะห์ผลการศึกษาคงควบคุมอุณหภูมิลมร้อน

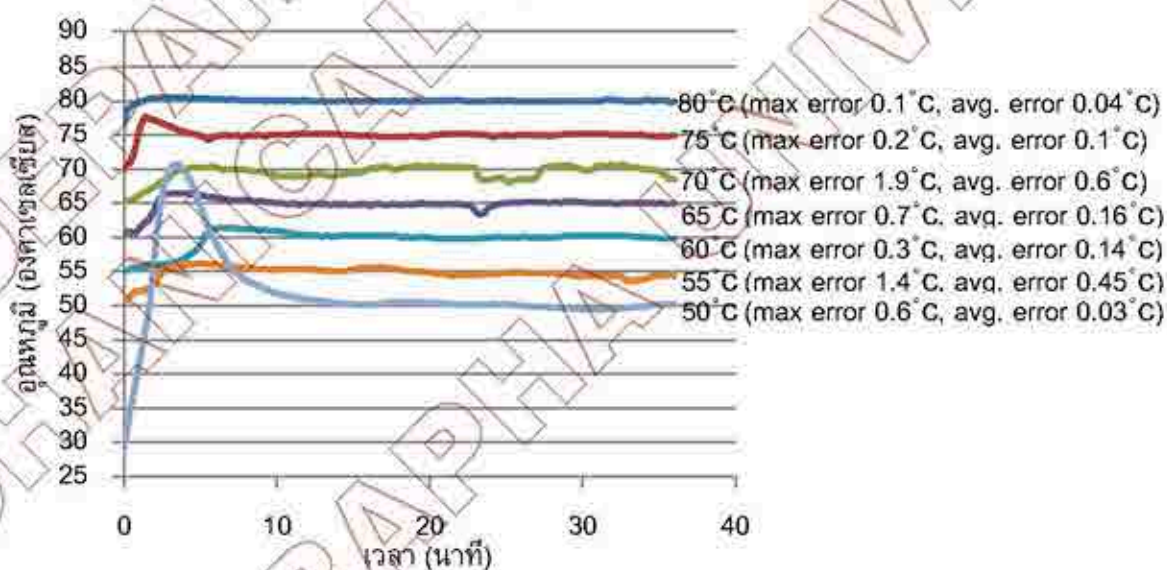
ในการวิเคราะห์ผลการศึกษาคงควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนในช่วงอุณหภูมิต่างๆ คือ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส เพื่อทำการเปรียบเทียบว่าคงควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิแต่ละอุณหภูมิให้มีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิเคราะห์จะทำให้สามารถนำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์อื่นๆ ซึ่งมีอุณหภูมิที่ต่างกันได้อีกต่อไป

5.2 ผลการศึกษา

ในการทดลองคงควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนได้ทำการศึกษาในเรื่องของการควบคุมอุณหภูมิที่ 50, 55, 60, 65, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ให้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนที่ผลิตได้ ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับค่าอัตราไหลเชิงมวลของอากาศที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน ซึ่งรายละเอียดของควรรศึกษามีดังต่อไปนี้

5.2.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิและค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ

จากที่ได้ทำการศึกษาในหัวข้อที่ 5.1 ซึ่งจากการทดลองคงควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน พบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิที่ 50, 55, 60, 65, 70 และ 80 องศาเซลเซียส ให้ไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส โดยการนำผลการทดลองดังกล่าวในภาคผนวก ข. มาแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.8



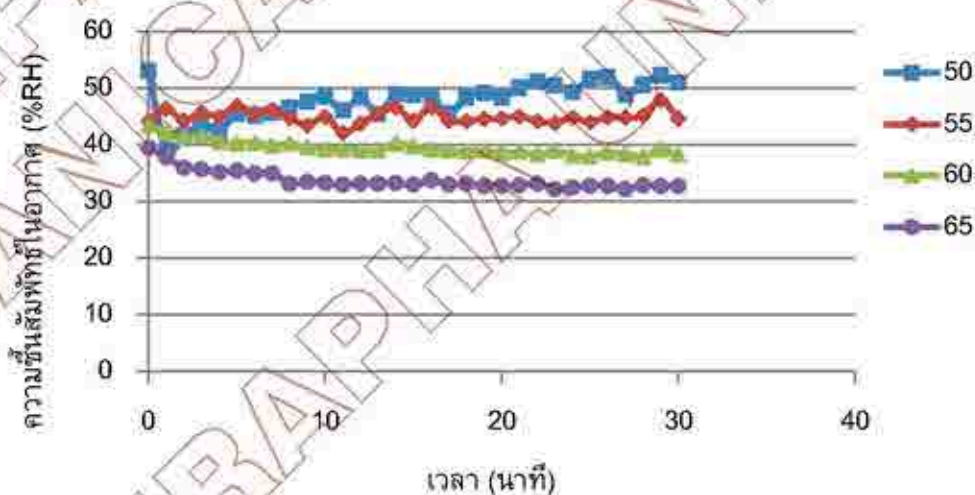
หมายเหตุ : การทดลองเป็นการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและเปลี่ยนไปควบคุมที่อุณหภูมิต่างๆ ทันทีโดยไม่ทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงใหม่
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของลมร้อนกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่อทำการปรับอุณหภูมิของลมร้อนไปที่อุณหภูมิต่างๆ ชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนสามารถควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของลมร้อน ส่งผลให้เกิดความเสถียรภาพในการควบคุม ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส โดยที่ช่วงอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงแรกที่กราฟมีค่าสูงขึ้นต่างจากกราฟที่อุณหภูมิอื่นเนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นของกระบวนการอุณหภูมิของชุดทดสอบยังไม่เกิดความเสถียร แต่เมื่อเวลาผ่านไปชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนจะสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้เกิดความเสถียรภาพได้ ซึ่งแตกต่างจากอุณหภูมิอื่นที่เริ่มปรับค่าตอนที่อุณหภูมิของชุดทดสอบมีความเสถียรภาพอยู่แล้ว ทำให้เมื่อปรับค่าอุณหภูมิชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนจะสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้เข้าสู่ความเสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว

จากการทดลองชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนพบว่าที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65, 70 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 1.9 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นไปตามขอบเขตที่ตั้งไว้คือ ต้องการควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส

5.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์

จากการศึกษาชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนโดยทำการวัดค่าความสัมพันธ์ของลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55, 60 และ 65 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องมือวัดความสัมพันธ์ในอากาศ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ในอากาศของลมร้อนที่ผลิตได้ โดยนำผลการทดลองดังตารางในภาคผนวก ข. มาแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.9



หมายเหตุ : การทดลองเป็นการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและ

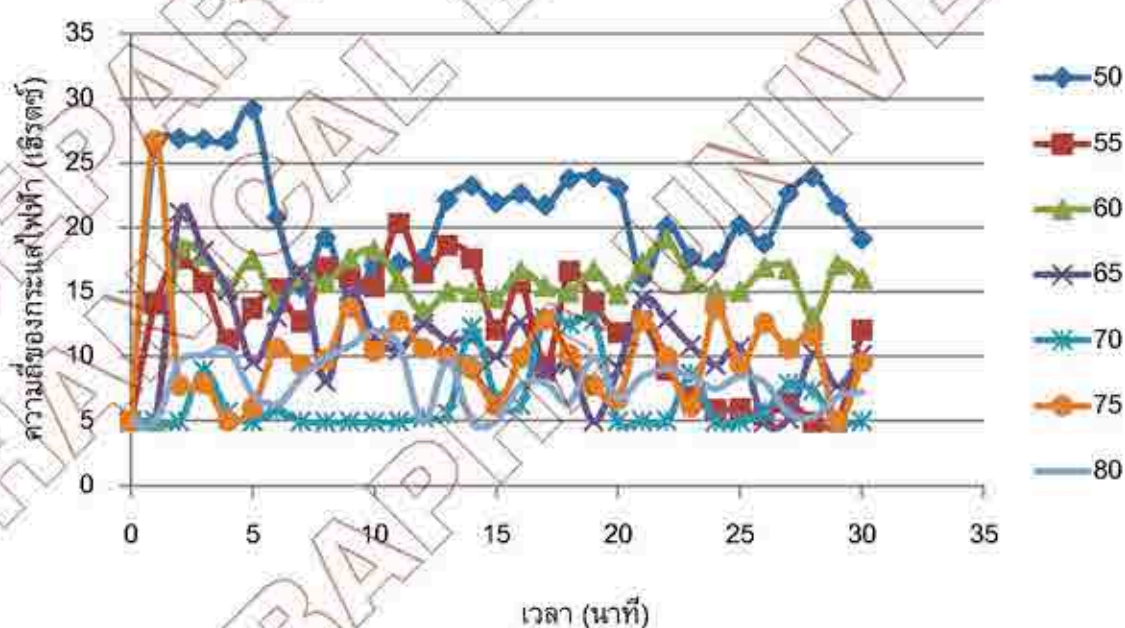
เปลี่ยนไปควบคุมที่อุณหภูมิต่างๆ ทันทีโดยไม่ทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงใหม่

รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ของลมร้อนกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ความชื้นสัมพัทธ์ของลมร้อนกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นจะส่งผลทำให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีค่าลดลง โดยสังเกตได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงมากในช่วงแรกเนื่องจากเป็นช่วงที่เริ่มกระบวนการทดลองอุณหภูมิยังไม่เข้าสู่เสถียรภาพ โดยเป็นช่วงที่ชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนเริ่มทำความร้อนให้แก่ลมที่ไหลผ่านชุดท่อติดครบ เพื่อให้อุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้นตามที่ตั้งไว้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปชุดควบคุมอุณหภูมิของร้อนปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศให้เหมาะสม เพื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงจนอุณหภูมิเข้าสู่เสถียรภาพ ซึ่งจะแตกต่างจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ที่อุณหภูมิต่ำอื่น โดยทำการปรับค่าต่อจากอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิในการผลิตลมร้อนเริ่มเข้าสู่เสถียรภาพ ทำให้เมื่อปรับค่าอุณหภูมิต่ำอื่นจะเข้าสู่เสถียรภาพได้อย่างรวดเร็ว

5.2.3 ผลการศึกษาความถี่ของกระแสไฟฟ้า

จากที่ได้ทำการศึกษาพบว่าค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเพื่อปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของลมร้อนทำให้เกิดความเสถียรภาพ จากผลการทดลองดังตารางในภาคผนวก ข. สามารถแสดงกราฟความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.10



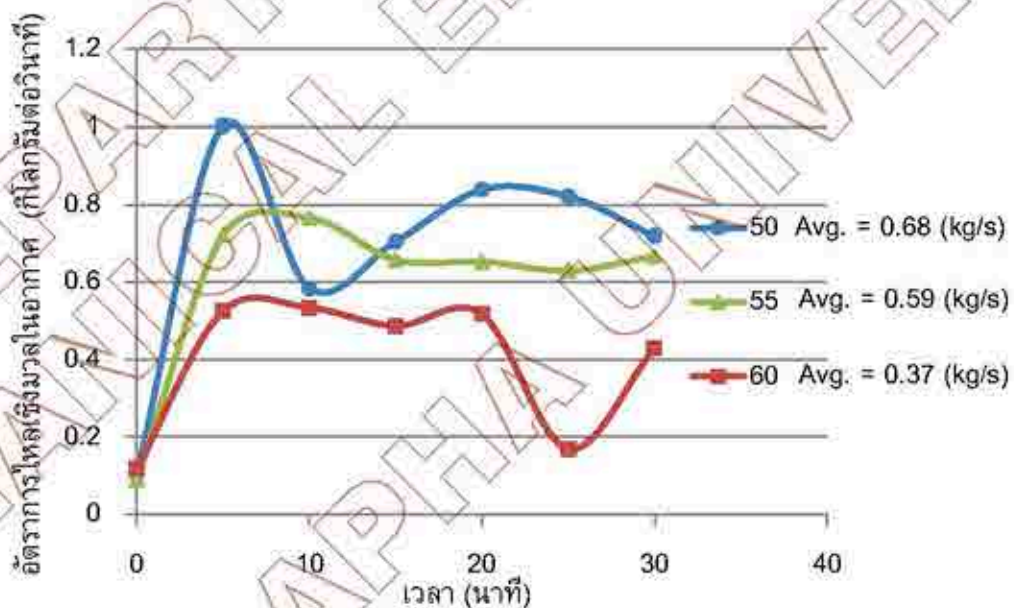
หมายเหตุ : การทดลองเป็นการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและเปลี่ยนไปควบคุมที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งนี้โดยไม่ทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงใหม่

รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของกระแสไฟฟ้ากับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 พบว่าค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าในแต่ละอุณหภูมิจะไม่เกิดความเสถียรภาพ ซึ่งการที่ความถี่ของกระแสไฟฟ้าลดลงหรือเพิ่มขึ้นอยู่เสมอเนื่องจากชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนได้ทำการปรับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้า เพื่อปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการ โดยจะส่งผลให้อุณหภูมิเกิดความเสถียรภาพ โดยหลักการ คือ เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนที่ได้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้จะส่งผลให้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น เพื่อปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่มากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนลดลง หากอุณหภูมิของลมร้อนที่ได้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้ ค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าจะลดลงเพื่อปรับอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มสูงขึ้น

5.2.4 ผลการศึกษาอัตราการไหลเชิงมวล

จากการศึกษาชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนเมื่อทำการวัดค่าความเร็วลมด้วยเครื่องมือวัดค่าความเร็วลมจากลมร้อนที่ผลิตได้ทำให้สามารถคำนวณหาค่าของอัตราการไหลเชิงมวลในอากาศที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถเปรียบเทียบอัตราการไหลเชิงมวลในอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.11



หมายเหตุ : เนื่องจากเครื่องมือวัดค่าความเร็วสามารถทนความร้อนได้ไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ทำให้ไม่สามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลในอากาศของลมร้อนในอุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 60 องศาเซลเซียสได้

รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

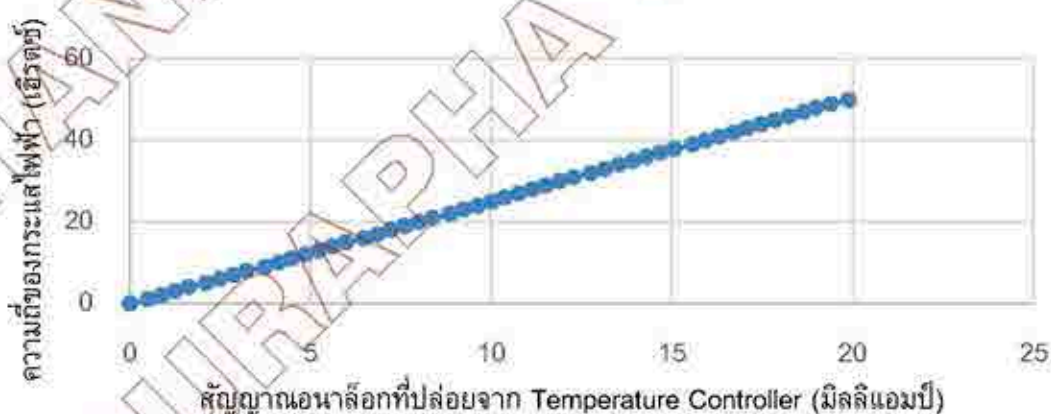
จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศต่อเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 พบว่าอัตราการไหลเชิงมวลในอากาศแต่ละอุณหภูมิจะมีค่าไม่เสถียรภาพ เนื่องจากความถี่ของกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ที่สั่งการทำงานของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเพื่อทำการรักษาอุณหภูมิของลมร้อนให้เกิดความเสถียรภาพหากอุณหภูมิของลมร้อนในช่วงนั้นลดต่ำลงค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จะลดลงตาม เพื่อลดอัตราการไหลเชิงมวลในอากาศส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้อินเวอร์เตอร์ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าให้เพิ่มสูงขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง โดยอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเฉลี่ยในช่วงที่อุณหภูมิเริ่มคงที่ของอุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียสคือ 0.68, 0.59 และ 0.39 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

5.3 การศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนอัตโนมัติ

ในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนอัตโนมัติ โดยทำการศึกษาในเรื่องของสัญญาณเอาท์พุทของ Temperature Controller ที่ใช้ในการสั่งการทำงานของอินเวอร์เตอร์ การหาค่าและการออกแบบค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติของ Temperature Controller ซึ่งมีรายละเอียดในการศึกษาดังต่อไปนี้

5.3.1 การศึกษาสัญญาณเอาท์พุทของ Temperature Controller

จากการศึกษาการทำงานของชุดควบคุมการทำงานพบว่า Temperature controller ใช้สัญญาณอนาล็อกในช่วงระหว่าง 0 ถึง 20 มิลลิแอมป์ สั่งการให้อินเวอร์เตอร์ปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าตามสัญญาณอนาล็อกในช่วงระหว่าง 0 ถึง 20 มิลลิแอมป์ เพื่อให้มอเตอร์ทำการปรับความเร็วรอบให้ได้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศให้เหมาะสมกับอุณหภูมิของลมร้อนที่ต้องการ โดยค่าสัญญาณอนาล็อกที่ Temperature controller ปลดปล่อยออกมาเมื่อเทียบกับความถี่ของกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.12



หมายเหตุ : ในการทดลองจริงใช้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ 5 ถึง 35 เฮิรตซ์

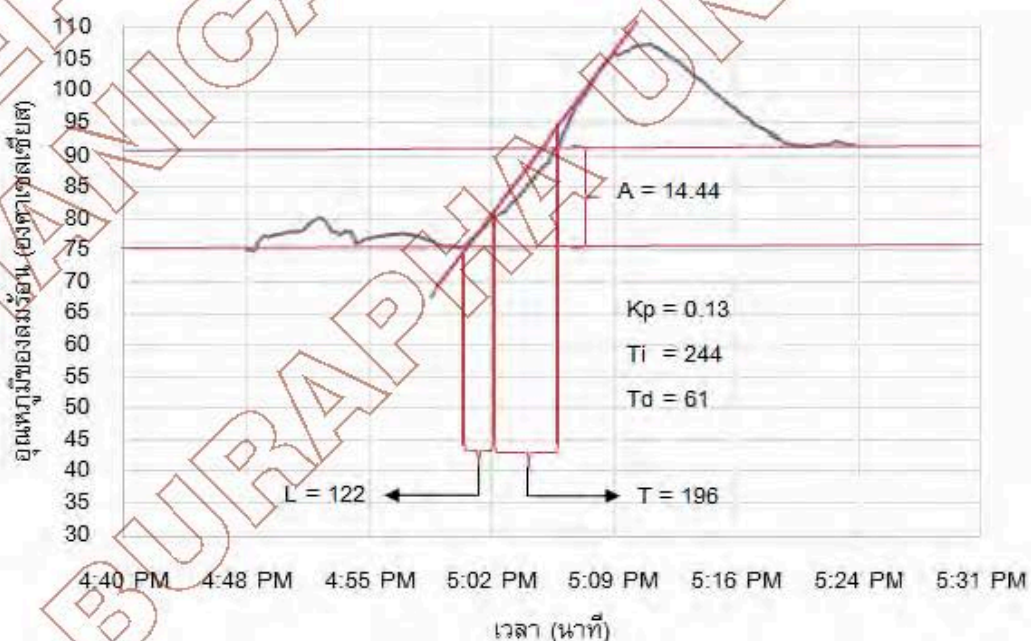
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าต่อสัญญาณอนาล็อกที่ปล่อยจาก Temperature Controller

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ต่อสัญญาณอนาล็อกที่ปล่อยจาก Temperature Controller ดังแสดงในรูปที่ 5.12 จะพบว่าเมื่อค่าสัญญาณอนาล็อกที่ปล่อยมาจาก Temperature Controller พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ส่งผลให้มีค่าเพิ่มขึ้นตามด้วยเช่นกัน โดยในการทดลองจะใช้ค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าในช่วงระหว่าง 5 ถึง 35 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากมอเตอร์ที่นำมาใช้มีความเร็วรอบที่สูงเกินไปจึงต้องจำกัดความถี่ของกระแสไฟฟ้าเพื่อไม่ให้มอเตอร์ทำงานเต็มกำลัง

5.3.2 การหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบ PID Controller

ในการทำงานของชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนนั้น จะต้องใช้การควบคุมแบบ PID Controller เข้ามาช่วยให้การทำงานมีความเสถียรภาพ โดยในการทดลองได้ทำการสั่งให้ Temperature Controller ปรับค่าพารามิเตอร์จากระบบอัตโนมัติ ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถคำนวณการออกแบบตัวแปรการควบคุมแบบพีไอดี ได้โดยใช้วิธีการของซีเกลอร์ - นีโคลส์ (Ziegler - Nichols) ซึ่งมีรายละเอียดในการหาค่าดังนี้

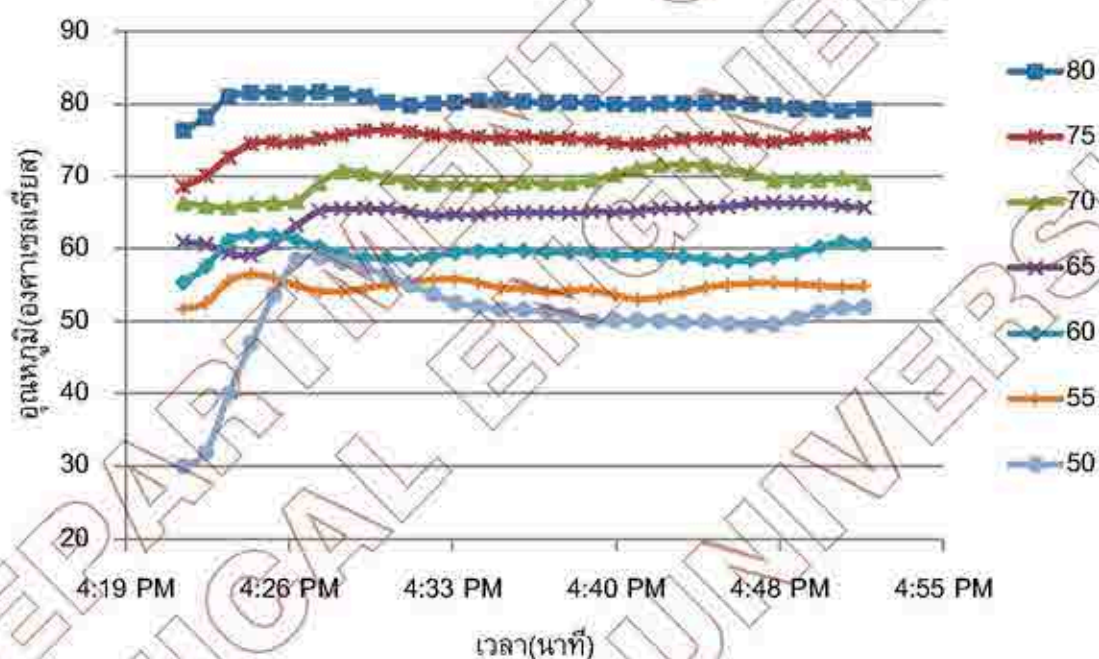
ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์เริ่มจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller ให้มีการควบคุมแบบสัดส่วน โดยทำการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ Temperature Controller มีค่า PB (Proportional Band) เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ T_I (Integral Time) เท่ากับ ค่าสูงสุด และ T_D (Derivative Time) เท่ากับศูนย์ จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิของลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส รอจนกว่าอุณหภูมิของลมร้อนจะเข้าสู่เสถียรภาพ จากนั้นทำการรบกวนสัญญาณ โดยการปรับอุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 80 องศาเซลเซียส รอจนกว่าอุณหภูมิเข้าสู่เสถียรภาพ ซึ่งจะมีรายละเอียดการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 การหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการตอบสนองแบบขั้นบันไดของซีเกลอร์ - นีโคลส์

จากรูปที่ 5.13 สามารถนำค่าที่ได้คือค่าของ $A = 14.44$, $L = 122$ และ $T = 196$ มาทำการหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบพีไอดี ได้โดยตาราง 3.4

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.4 สามารถหาค่าพารามิเตอร์การควบคุมแบบพีไอดี ได้โดยที่ค่า $K_p = 0.13$, $T_i = 244$ และค่า $T_d = 61$ ซึ่งเมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์กลับไปยัง Temperature Controller และทำการทดลองควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส โดยผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.14



หมายเหตุ : การทดลองเป็นการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและเปลี่ยนไปควบคุมที่อุณหภูมิต่างๆ ทั้งนี้โดยไม่ทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงใหม่

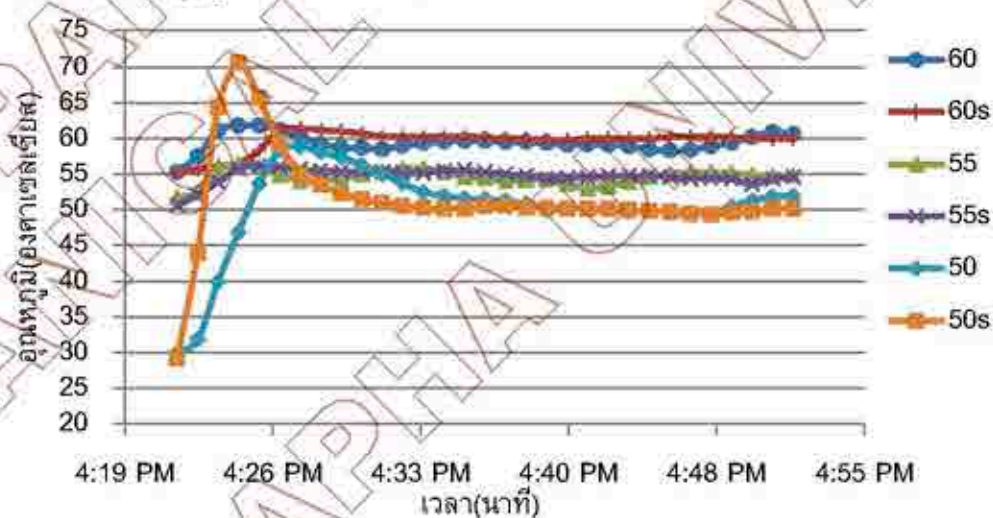
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.14 พบว่าชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตได้ให้มีความเสถียรภาพ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของลมร้อนดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งเป็นไปตามขอบเขตที่กำหนดไว้

ตารางที่ 5.1 ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากที่ตั้งไว้

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากที่ตั้งไว้	
	อุณหภูมิกลาดเคลื่อนเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิกลาดเคลื่อนสูงสุด (องศาเซลเซียส)
50	1.04	2.50
55	0.65	2.00
60	0.80	1.70
65	0.53	1.20
70	0.92	1.60
75	0.33	0.80
80	0.30	1.00

จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller ระหว่างการป้อนค่าพารามิเตอร์แบบระบบอัตโนมัติกับค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบได้ดังแสดงดังในรูป 5.15

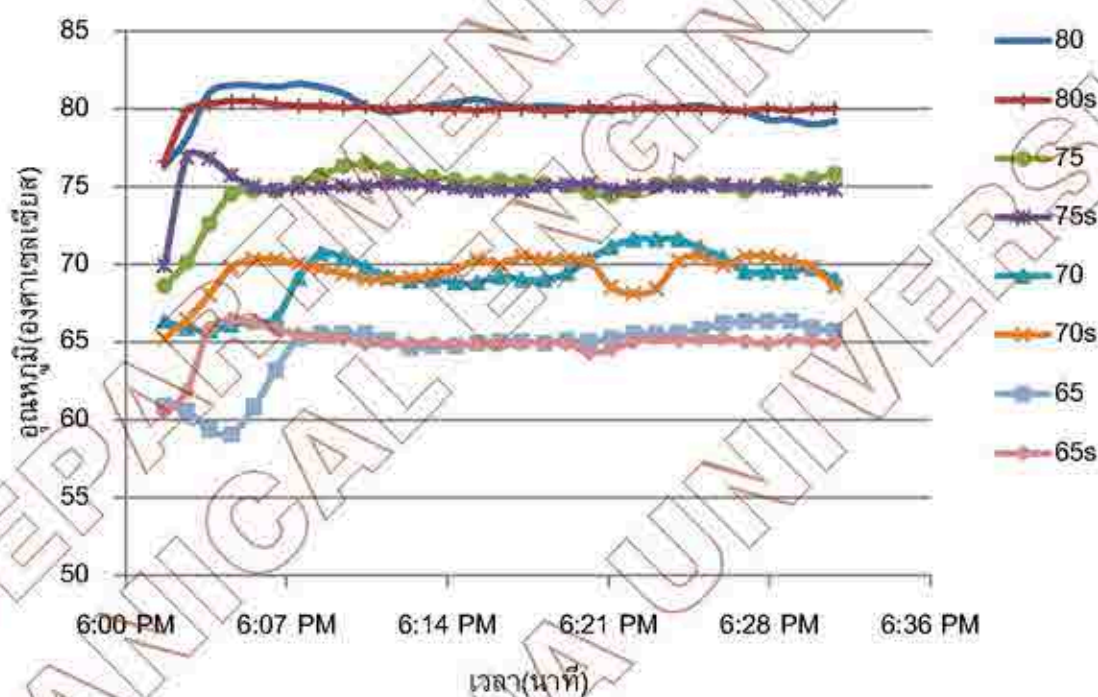


หมายเหตุ : การทดลองเป็นการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากอุณหภูมิที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียสเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง แต่อุณหภูมิที่ 50s, 55s และ 60s องศาเซลเซียสเป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการหาแบบระบบอัตโนมัติ โดยไม่ทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงใหม่

รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิที่ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.15 พบว่าในช่วงอุณหภูมิของลมร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส ค่าพารามิเตอร์จากระบบอัตโนมัติเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนสามารถทำการลดอุณหภูมิของลมร้อนให้เข้าสู่เสถียรภาพได้เร็วกว่าแบบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง และอุณหภูมิมีความคงที่มากกว่า ทั้งที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส และยังมีความเสถียรภาพในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนมากกว่าเช่นกัน

ในส่วนของอุณหภูมิ 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูง เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างระหว่างการป้อนค่าพารามิเตอร์แบบระบบอัตโนมัติกับค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง จากทดลองสามารถเปรียบเทียบได้ดังแสดงดังรูป 5.16



หมายเหตุ : การทดลองเป็นการทดลองอย่างต่อเนื่องโดยเริ่มจากอุณหภูมิที่ 65, 70, 75 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง แต่อุณหภูมิที่ 65s, 70s, 75s และ 60s องศาเซลเซียส เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการหาแบบระบบอัตโนมัติ โดยไม่ทำการจุดเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงใหม่

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิ 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิ 65, 70, 75 และ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 5.16 อุณหภูมิของลมร้อนที่ป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติมีความเสถียรภาพมากกว่าอุณหภูมิที่ป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง แต่ชุดควบคุมสามารถควบคุม

อุณหภูมิของลมร้อนได้ทั้งสองค่าพารามิเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้มีอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกัน

การเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของอุณหภูมิระหว่างการป้อนค่าพารามิเตอร์แบบระบบอัตโนมัติกับค่าพารามิเตอร์จากการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 5.2

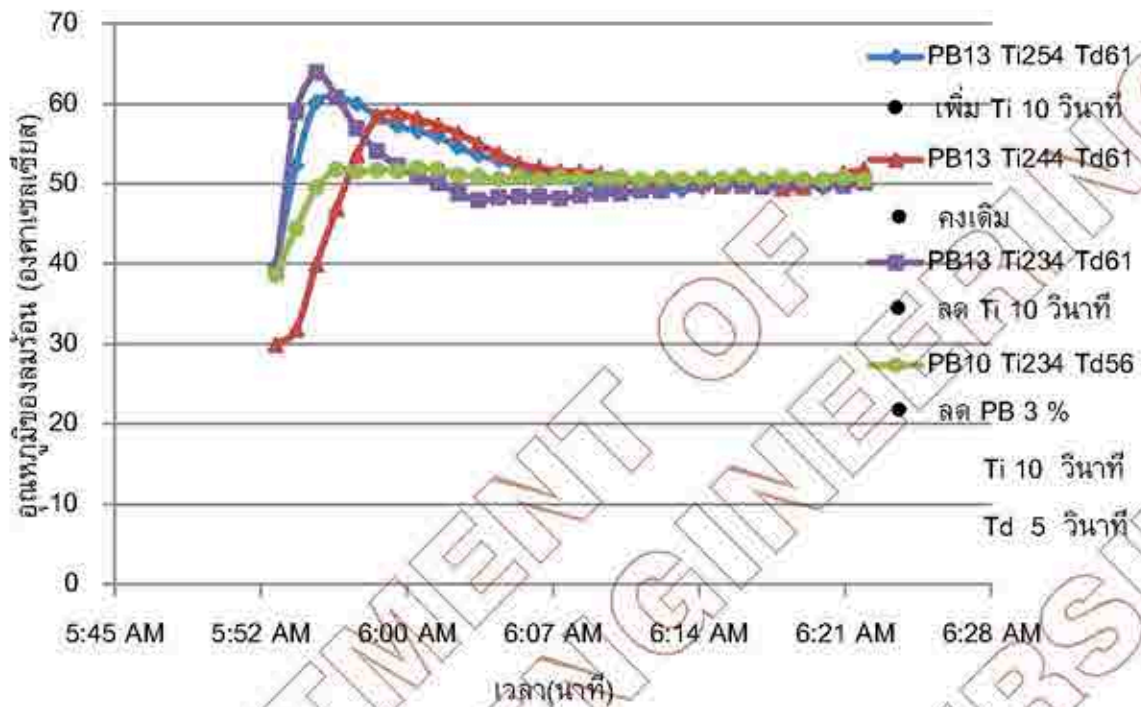
ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิที่คลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตโนมัติ		การทดลอง	
	อุณหภูมิ คลาดเคลื่อนเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ คลาดเคลื่อนสูงสุด (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ คลาดเคลื่อนเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิ คลาดเคลื่อนสูงสุด (องศาเซลเซียส)
50	0.30	0.60	1.04	2.50
55	0.45	1.40	0.65	2.00
60	0.14	0.30	0.80	1.70
65	0.16	0.70	0.53	1.20
70	0.60	1.90	0.92	1.60
75	0.11	0.20	0.33	0.80
80	0.04	0.10	0.30	1.00

จากตารางการเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิที่คลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติ ซึ่งในที่นี้สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองให้มีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิน้อยลงได้ โดยจะแสดงในหัวข้อต่อไป

5.3.3 การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller จากการค้าหนดทางทฤษฎีของซีเกลอร์ – นิโคลส์

ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์สามารถช่วยลดค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิลมร้อนได้ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี นำมาทดลองป้อนค่าเข้ากับ Temperature Controller พบว่ามีค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิลมร้อนอยู่มาก แต่ไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ซึ่งการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์สามารถเทียบได้ดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากค่านวณทางทฤษฎี

จากรูปที่ 5.17 พบว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์สามารถช่วยลดค่าความผิดพลาดได้จริง โดยในการทดลองเริ่มจากการเพิ่มค่า T_i (Integral Time) เท่ากับ 10 วินาที และลดค่า T_i (Integral Time) เท่ากับ 10 วินาที ทั้งสองแบบนี้การตอบสนองต่อความผิดพลาดของอุณหภูมิลมร้อนช้าเกินไป จึงเลือกแบบลด T_i (Integral Time) เท่ากับ 10 วินาที มาทำการปรับค่า PB (Proportional Band) ลดลง เท่ากับ 3 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้การตอบสนองต่อความผิดพลาดของอุณหภูมิลมร้อนเร็วขึ้น แต่เมื่อการตอบสนองเร็วขึ้นส่งผลให้เกิดค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และได้ทำการลดค่า T_i (Integral Time) ในเบื้องต้นแล้ว จึงต้องทำการลดค่า T_d (Derivative Time) เท่ากับ 5 วินาที ด้วยเพื่อให้เหมาะสมไปในทิศทางเดียวกัน

สามารถเปรียบเทียบความผิดพลาดของอุณหภูมิลมร้อนที่ได้จากการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎีได้ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดกับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการปรับแต่ง

ค่าพารามิเตอร์	ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิจากที่ตั้งค่าไว้
PB = 13, T_i = 254, T_d = 61	0.76 องศาเซลเซียส
PB = 13, T_i = 244, T_d = 61	1.04 องศาเซลเซียส
PB = 13, T_i = 234, T_d = 61	0.72 องศาเซลเซียส
PB = 10, T_i = 234, T_d = 56	0.67 องศาเซลเซียส

จากตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับอุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการปรับแต่ง พบว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้า Temperature Controller สามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนได้ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์เดิมที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับค่าพารามิเตอร์ที่นำมาปรับแต่ง ซึ่งจะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยลดต่ำลงถึง 0.37 องศาเซลเซียส

5.4 วิเคราะห์ผลการศึกษการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

จากการศึกษาชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่าชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ได้ทำการศึกษาและออกแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้มีความเสถียรภาพได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิลมร้อนสูงสุด 1.9 องศาเซลเซียส และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ย 0.26 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศของลมร้อนที่ทดลองจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของลมร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นสำหรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการส่งพลังงานมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเพื่อรักษาอุณหภูมิของลมร้อนให้เกิดความเสถียรภาพหากอุณหภูมิของลมร้อนในช่วงนั้นลดต่ำกว่าที่กำหนดไว้ ค่าความถี่ของกระแสไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์จะลดต่ำลง เพื่อปรับลดอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนเพิ่มสูงขึ้นหรือหากอุณหภูมิของลมร้อนสูงเกินกว่าที่ตั้งค่าไว้ อินเวอร์เตอร์จะปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศส่งผลให้อุณหภูมิลดต่ำลง โดยมีค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเฉลี่ยในช่วงที่อุณหภูมิของลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส เริ่มเข้าสู่เสถียรภาพ คือ 0.68, 0.59 และ 0.39 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

จากการศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller ที่ใช้ในชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการป้อนค่าพารามิเตอร์จากระบบอัตโนมัติของ Temperature Controller กับการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ด้วยวิธีการของซีเกลอร์ - นีโคลส์ พบว่าทั้งสองแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนได้ตามที่ขอบเขตที่กำหนดไว้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 0.26 และ 1.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับในแบบระบบอัตโนมัติ และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ย

และค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 0.65 และ 2.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติของ Temperature Controller สามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้มีความเสถียรภาพมากกว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากคำนวณทางทฤษฎี

DEPARTMENT OF
MECHANICAL ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY

บทที่ 6

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนโดยใช้ความร้อนจากชุดท่อติดครีปที่อยู่ภายในตู้ แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งรับความร้อนจากกระบวนการ Gasification เพื่อใช้ในการผลิตลมร้อนให้สามารถปรับอุณหภูมิของลมร้อนตั้งแต่ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส โดยมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส

ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้ได้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ และทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของ Temperature Controller พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติและการคำนวณทางทฤษฎีสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนได้ไม่เกินขอบเขตที่กำหนดไว้ ซึ่งพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติจะส่งผลให้อุณหภูมิของลมร้อนมีความเสถียรภาพมากกว่าค่าพารามิเตอร์จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยรายละเอียดในส่วนต่างๆ สามารถแยกสรุปเป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

ชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่ผลิตด้วยกระบวนการ Gasification โดยชุดอุปกรณ์จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ตู้ควบคุมการทำงานและชุดจ่ายลม ซึ่งอุปกรณ์ภายในตู้ควบคุมการทำงานจะประกอบไปด้วย Temperature Controller ยี่ห้อ TAIE รุ่น FY900, อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ Haitech - GR รุ่น H3200A02D2K, Temperature Display CONOTEC รุ่น FOX - 2C2 และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในส่วนของชุดจ่ายลมจะประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 3 แรงม้า ยี่ห้อ Suntech รุ่น GL90L-2, เหล็กที่ทำจากเหล็ก AISI 1045, ใบบัดดูลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 51.5 เซนติเมตร, แท่นวางมอเตอร์และตลับลูกปืนตึกตา, ยอยเหล็ก ยี่ห้อ Neo - Flex รุ่น 1 - KR - 3012, ตลับลูกปืนตึกตา, ท่อทางเดินลมร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 เซนติเมตร ความยาว 290 เซนติเมตร ซึ่งชุดอุปกรณ์ 2 ส่วนนี้จะประกอบเข้ากับตู้แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อสร้างลมร้อนที่มีอุณหภูมิคงที่ต่อไป

6.2 การควบคุมอุณหภูมิของลมร้อน

ในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนจากผลการศึกษาข้างต้น พบว่าชุดควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิลมร้อนสูงสุดเท่ากับ 1.9 องศาเซลเซียส และมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.26 องศาเซลเซียส โดยค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศเฉลี่ยที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนที่อุณหภูมิ 50, 55 และ 60 องศาเซลเซียส ให้มีเสถียรภาพได้ คือ 0.68, 0.59 และ 0.39 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

6.3 ผลการควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนแบบระบบอัตโนมัติกับการคำนวณทางทฤษฎี

จากการศึกษาการป้อนค่าพารามิเตอร์จากระบบอัตโนมัติของ Temperature Controller กับการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ด้วยวิธีการของซีเกลอร์ - นิโคลส์ พบว่าทั้งสองแบบสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนตามที่ขอบเขตที่กำหนดได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส แต่ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติของ Temperature Controller มีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 0.26 และ 1.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 0.65 และ 2.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติสามารถควบคุมอุณหภูมิของลมร้อนให้มีความเสถียรภาพมากกว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยอุณหภูมิของลมร้อนที่ 50, 55, 60, 65, 70, 75 และ 80 องศาเซลเซียส มีค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 0.74, 0.2, 0.66, 0.37, 0.32, 0.22 และ 0.26 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติ

6.4 ข้อเสนอแนะ

ควรต่อท่อดูดอากาศออกไปให้พ้นจากฉนวนไฟที่กั้นขึ้น เพื่อให้ได้ลมสะอาดมาใช้ในการผลิตลมร้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรุต พานโคตร, นิธินันท์ คงภูมิ, ระบบสร้างลมร้อนด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อใช้ในการอบ
 ย่างพารา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, [2556].
- [2] งานวิจัยการผลิตแก๊สชีววมวลจากใบอ้อย , มหาวิทยาลัยขอนแก่น , [Online].
 Available : https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20101027113756.pdf
 [สิงหาคม 2558].
- [3] นายเกียรติศักดิ์ มงคลสวัสดิ์ชัย, งานวิจัยกรณีศึกษาระบบการทำงานของ Gasifier พิกซ์เบดแบบไหล
 ลง, มหาวิทยาลัยสยาม, [Online].
 Available : <http://www.research-system.siam.edu/co-operative/940-2013-12-20-05-58-534>
 [สิงหาคม 2558].
- [4] ณัฐชา ภิรมย์ลาวัณย์, ชเนศ สุขวัฒน์จรรยา, พิษิตชัย สุขวัฒน์, การปรับปรุงชุดผลิตลมร้อนด้วย
 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, [2558].
- [5] Yunus A. Cengel, "Heat and Mass Transfer (SI Units)", 4th Edition, USA, McGraw-Hill, 2011.
- [6] มัทธนา รังสิโยภาส, การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer), คณะวิศวกรรมศาสตร์,
 มหาวิทยาลัยบูรพา, [2557].
- [7] พื้นฐานอุปกรณ์เครื่องมือวัด , Electronic physics science naresuan University, [Online].
 Available : <http://student.nu.ac.th/electronic/> [สิงหาคม 2558].
- [8] เทอไม้คัปเปิล, บริษัท สุปรีมไลน์ จำกัด, [Online].
 Available : <http://www.xn--42c1bna1als2dxb6a9ihv3l.com/> [ตุลาคม 2558].
- [9] เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล, บริษัท สุปรีมไลน์ จำกัด, [Online].
 Available : <http://www.supremelines.co.th/> [สิงหาคม 2558].
- [10] รชฏ อินทรหะ, นิตา เทียนชูพงษ์, Application of Inverter, Converter - UPS, Motor control,
 [Online]. Available : <https://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/power/apps/> [สิงหาคม 2558]
- [11] ทรงกลด ศรีปรังค์ , ออกแบบและสร้างระบบสมองกลฝังตัวสำหรับควบคุมอินเวอร์เตอร์สามเฟส,
 2557, [Online]. Available : http://sriprang2524.blogspot.com/2011/09/blog-post_28.html
 [สิงหาคม 2558].
- [12] ณัฏฐ์พิสิษฐ์ คำยันต์, สิทธิศักดิ์ อินทุพงษ์, อติพงษ์ กรุดนาลัย, ตู้อบสมุนไพรควบคุมความร้อน
 ด้วยระบบ PID โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
 ลาดพร้าว, 2556 [Online].
 Available : <http://hrd.rmutl.ac.th/qa/docUpload/pj/3520101206348/150728175024fullpp.pdf>
 [พฤศจิกายน 2558].

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] ชวนากร จนดรัมย์, ชีระพันธ์ ศรีแจ่ม, การศึกษาตัวควบคุมแบบรวมชนิด PID สำหรับการควบคุมความดัน อุดเหมภูมิ และระดับน้ำโดยใช้ตัวควบคุมเชิงตรรกะ รุ่น SIEMENS S7 - 300, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2555 [Online].
Available : https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20130311161953.pdf [พฤศจิกายน 2558].
- [14] เกศแก้ว ไกรวงศ์, ชุดควบคุมอุดเหมภูมิของเตาเผาอุดเหมภูมิสูงแบบตั้งโปรแกรม, สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2547 [Online].
Available : http://thesis.swu.ac.th/swuthesis/Phys/Keadkaew_K.pdf [สิงหาคม 2558].
- [15] ปริญญา ตระกูลวงศ์งาม, การควบคุมอุดเหมภูมิในกระบวนการอุ่นเตาสำหรับเตาอบเหล็กชนิด Walking Hearth, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2553 [Online].
Available : <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/3766/2/Fulltext.pdf> [สิงหาคม 2558].
- [16] ณัฐชนันท์ ปลายเนตร, ศุภชัย ปลายเนตร, การพัฒนาเตาอบชุบโลหะโดยใช้ระบบควบคุมอุดเหมภูมิแบบพีไอดีสำหรับอุตสาหกรรมผลิตมีดพราชมชน, 2556 [Online].
Available : <http://202.29.13.46/journal/uploads/article/161/23/11.pdf> [สิงหาคม 2558].
- [17] ศิริกัลยา สุวจิตตวนนท์, เทคโนโลยีการจัดการและการอนุรักษ์พลังงาน, กรุงเทพฯ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.
- [18] วรวิทย์ อังภากรณ์, ชาญ ผนังงาน, การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1, กรุงเทพฯ, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2556.
- [19] ภักพงษ์ จันทเปรมจิตต์, การทดลองกระบวนการควบคุม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, [2554].

DEPARTMENT OF
MECHANICAL ENGINEERING
ภาคนวค
BURAPHA UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

DEPARTMENT OF
MECHANICAL ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY

ก.1 การถ่ายเทความร้อนของ 1 ชุดท่อ

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของ 1 ชุดท่อ

กำหนดให้ $T_s = 240$

$T_i = 33$

$T_e = 80$

หา Q_{unfin}

$$\text{จาก } \Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_e) - (T_s - T_i)}{\ln \left(\frac{T_s - T_e}{T_s - T_i} \right)} = \frac{(240 - 80) - (240 - 30)}{\ln \left(\frac{240 - 80}{240 - 30} \right)}$$

$$\Delta T_{lm} = 182.492 \text{ } ^\circ\text{C}$$

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่าที่อุณหภูมิ $33 \text{ } ^\circ\text{C}$ มีค่า $\rho =$

$$1.1526 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot A_{\text{tube}} = 0.229 \text{ m}^2 \cdot V = 2.030 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{จาก } \dot{m} = \rho V A_{\text{tube}} = 1.1526 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2.030 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.229 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} = 0.536 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{กำหนดค่า } A_{\text{room}} = 0.5005 \text{ m}^2$$

$$\text{จาก } V_r = \frac{\dot{m}}{\rho A_{\text{room}}} = \frac{0.536 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1.1526 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.5005 \text{ m}^2}$$

$$V_r = 0.928 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

กำหนด $D_{unfin} = 0.034 \text{ m}$, จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่า

$$\text{ที่อุณหภูมิ } 55 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ มีค่า } \nu = 0.00001847 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Re}_{unfin} = \frac{V_r D}{\nu} = \frac{0.928 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.034 \text{ m}}{0.00001847 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$Re_{unfin} = 1709.777$$

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C มีค่า $Pr = 0.7215$

$$Nu_{unfin} = 0.3 + \frac{0.62 Re_{unfin}^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{1/4}\right]} \left[1 + \left(\frac{Re_{unfin}}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$Nu_{unfin} = 0.3 + \frac{0.62 (1709.777)^{1/2} (0.7215)^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{0.7215}\right)^{1/4}\right]} \left[1 + \left(\frac{1709.777}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$Nu_{unfin} = 21.175$$

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C มีค่า $k = 0.027715 \frac{W}{m \cdot c}$

$$D_{unfin} = 0.034 \text{ m}$$

$$h_{unfin} = \frac{k}{D_{unfin}} Nu_{unfin} = \frac{0.027715 \frac{W}{m \cdot c}}{0.034 \text{ m}} \times 21.175$$

$$h_{unfin} = 17.26 \frac{W}{m^2 \cdot c}$$

$$\text{กำหนด } r_{unfin} = 0.017 \text{ m}, t_{unfin} = 0.0008 \text{ m}, L_{unfin} = 1 \text{ m}$$

$$A_{unfin} = (2\pi \times r_{unfin} \times L_{unfin}) - [384(2\pi \times r_{unfin} \times t_{unfin})]$$

$$A_{unfin} = (2\pi \times 0.017 \text{ m} \times 1 \text{ m}) - [384(2\pi \times 0.017 \text{ m} \times 0.0008 \text{ m})]$$

$$A_{unfin} = 0.0874 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_{unfin} = h_{unfin} A_{unfin} \Delta T_{lm}$$

$$\dot{Q}_{unfin} = 17.26 \frac{W}{m^2 \cdot c} \times 0.0874 \text{ m}^2 \times 182.492 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{unfin} = 275.301 \text{ W}$$

หา \dot{Q}_{fin} กำหนด $D_{fin} = 0.072 \text{ m}$, $S = 0.00423$, $n_{fin} = 98$, $n_{row} = 11$

$$\text{จาก } \dot{G} = \frac{\dot{m}}{D_{fin} \times S \times (n_{fin} + 1) \times n_{row}} = \frac{0.536 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0.072 \text{ m} \times 0.00423 \text{ m} \times (98 + 1) \times 11}$$

$$\dot{G} = 1.616 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

กำหนด $C_p = 1007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{c}}$, $\Delta T = 47 \text{ }^\circ\text{c}$

$$\text{จาก } \dot{Q}_A = \dot{m} C_p \Delta T = 0.536 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 1007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{c}} \times 47 \text{ }^\circ\text{c}$$

$$\dot{Q}_A = 25368.11 \text{ W}$$

กำหนด $R = 0.036 \text{ m}$, $r_{fin} = 0.017 \text{ m}$, $t_{fin} = 0.0004 \text{ m}$, $N = 55$ ท่อ

$$\begin{aligned} A_{fin} &= 384 [2\pi \times (R_{fin}^2 - r_{fin}^2) + (2\pi \times R_{fin} \times t_{fin})] \\ &= 384 \left[2\pi \times \left((0.036 \text{ m})^2 - (0.017 \text{ m})^2 \right) + (2\pi \times 0.036 \text{ m} \times 0.0004 \text{ m}) \right] \\ &= 1.457 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{จาก } q_c = \frac{\dot{Q}_A}{A_{fin} + A_{unfin}} = \frac{25368.11 \text{ W}}{1.457 \text{ m}^2 + 0.0874 \text{ m}^2}$$

$$q_c = 298.743 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่าที่อุณหภูมิ $55 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่า μ ที่ $= 0.000019855 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$, $k = 0.0277150 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}}$, $D_{unfin} = 0.072 \text{ m}$

$$\text{จาก } Re_{fin} = \frac{q_c \times \dot{G} \times D_{unfin}^2}{\mu \times k \times (T_h - T_c)}$$

$$= \frac{298.7433 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 1.617 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \times (0.072 \text{m})^2}{0.00001985 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \times 0.027715 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \times (240 - 55) \text{C}}$$

$$= 24584.77$$

จาก $Nu_{fin} = 0.58 \left(\frac{Re_{fin}}{10^4} \right)^{0.77} = 0.58 \left(\frac{24584.77}{10^4} \right)^{0.77}$

$$Nu_{fin} = 1.098$$

จาก $h_{fin} = \frac{k}{D_{fin}} Nu_{fin} = \frac{0.027715 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}}{0.072 \text{m}} \times 1.098$

$$h_{fin} = 0.423 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}$$

กำหนด $L = 0.019 \text{ m}$, $t_{fin} = 0.0004 \text{ m}$, $k_m = 0.803 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}}$

จาก $\zeta = \left(L + \frac{t_{fin}}{2} \right) \left(\sqrt{\frac{h_{fin}}{k_m t_{fin}}} \right) =$

$$\left(0.019 \text{m} + \frac{0.0004 \text{m}}{2} \right) \left(\sqrt{\frac{0.423 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}}{0.803 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \times 0.0004 \text{m}}} \right) \quad \zeta = 0.69646$$

จากกราฟ ที่ค่า $\zeta = 0.69646$ จะได้ $\eta_{fin} = 0.95$

จาก $\dot{Q}_{fin} = \eta_{fin} h_{fin} A_{fin} \Delta T_{lm} = (0.95)(0.423 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}})(1.457 \text{ m}^2)(182.492 \text{ C})$

$$\dot{Q}_{fin} = 106.722 \text{ W}$$

จาก $\dot{Q}_{1 \text{ tube}} = \dot{Q}_{fin} + \dot{Q}_{unfin} = 106.722 \text{ W} + 275.301 \text{ W}$

$$\dot{Q}_{1 \text{ tube}} = 382.023 \text{ W}$$

ดังนั้นจะพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อ 1 ชุดท่อมี่ค่า 382.023 วัตต์

ก.2 อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากความเร็วลม

ก.2.1 การคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศจากความเร็วลม

จากตารางคุณสมบัติของอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ พบว่าที่อุณหภูมิ 33°C มีค่า $\rho = 1.153 \text{ kg/m}^3$ และท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 54 เซนติเมตร

$$\dot{m} = \rho V_A A_{\text{tube}}$$

$$\dot{m} = 1.153 \text{ kg/m}^3 (1.19 \text{ m/s}) (\pi (0.27 \text{ m})^2)$$

$$\dot{m} = 0.31 \text{ kg/s}$$

ก.2.2 การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศจากภาวะความร้อนทั้งหมด

จาก $\dot{Q}_{1\text{ tube}} = 382.023 \text{ W}$ สามารถคำนวณหา $\dot{Q}_{39\text{ tube}}$

โดยกำหนดให้ $N_t = 39$ ท่อ

$$\text{ดังนั้น } \dot{Q}_{39\text{ tube}} = \dot{Q}_{1\text{ tube}} \times N_t = 382.023 \text{ W} \times 39 = 14898.897 \text{ W}$$

กำหนด $T_e = 80$ องศาเซลเซียส $T_i = 33$ องศาเซลเซียส

$$\text{จาก } \dot{m} = \frac{\dot{Q}_{39\text{ tube}}}{c_p \Delta T} = \frac{14898.897 \text{ W}}{1007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \times (55 - 33)^{\circ}\text{C}}$$

$$\dot{m} = 0.673 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

ดังนั้นจะพบว่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ไหลในระบบผลิตลมร้อนมีค่า 0.673 กิโลกรัมต่อวินาที

ก.3 ขนาดแท่นวางมอเตอร์

ก.3.1 ความหนาของเหล็กที่ใช้วางมอเตอร์

จากตารางคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าคาร์บอนผสม ชนิดเหล็กที่ใช้ในการออกแบบ AISI 1020 CD มีค่า $\sigma_y = 43 \text{ ksi} \times 6.895 = 399.91 \text{ N/mm}^2$

โดยกำหนดให้ $N = 5$

$$\text{จาก } M = F \times l = (14 \times 9.81) \text{ N} \times \left(\frac{315}{2}\right) \text{ mm} = 21631.05 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$\text{จาก } I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b(180)^3}{12} \text{ mm}^4$$

$$I = \frac{b(180)^3}{12}$$

$$\text{จาก } \sigma_y = \frac{Mc}{I}$$

$$\frac{399.91 \text{ N}\cdot\text{mm}^2}{5} = \frac{(21631.05 \text{ N}\cdot\text{mm}) \left(\frac{b}{2}\right)}{\frac{180(b)^3}{12} \text{ mm}^4}$$

$$b = 3.487 \text{ mm}$$

ดังนั้นจะพบว่าความหนาของเหล็กที่ใช้วางมอเตอร์มีค่า 3.487 mm

หมายเหตุ : ในการสร้างอุปกรณ์จริงเลือกใช้เหล็กหนา 5 mm

ก.3.2 เสาแผ่นวางมอเตอร์

จากตารางค่าคงที่ทางกายภาพของวัสดุวิศวกรรม พบว่าเหล็ก AISI 1020 CD
มีค่า $E = 207 \text{ GPa}$ และเหล็กมีขนาด $b = 0.032 \text{ m}$, $h = 0.032 \text{ m}$, $L = 0.017 \text{ m}$

ในการคำนวณกำหนดชิ้นงานเป็นปลายยึดแน่นสองข้าง $L_e = \frac{L}{2}$

กำหนด $k = 0.012$

$$\text{จาก } P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{kL^2}$$

$$(14 \times 9.81) \text{ N} = \frac{\pi^2 (207 \times 10^9 \text{ Pa}) \left(\frac{(0.032)(0.032)^3}{12} - \frac{(0.032 - 2t)(0.032 - 2t)^3}{12} \right) \text{ mm}^4}{(0.012) \left(\frac{0.017}{2} \right)^2 \text{ mm}^3}$$

$$t = 0.054 \text{ mm}$$

ดังนั้นจะพบว่าความหนาของเหล็กที่ใช้วางมอเตอร์มีค่า 0.054 mm

หมายเหตุ : ในการสร้างอุปกรณ์จริงเลือกใช้เหล็กสองหนา 2.3 mm

ก.4 ความหนาของฉนวนหุ้มท่อทางเดินลมร้อน

พิจารณาค่าความหนาของฉนวนหุ้มท่อทางเดินลมร้อน

กำหนด $t_h = 176^\circ \text{ F}$, $t_a = 91.4^\circ \text{ F}$, $t_s = 130^\circ \text{ F}$ (โดยปกติอุณหภูมิที่ผิวฉนวนอยู่
ระหว่าง $130\text{--}150^\circ \text{ F}$)

$$\text{จาก } t_m = \frac{t_h - t_s}{2} = \frac{176 - 130}{2} = 153^\circ \text{ F} \text{ นำอุณหภูมิเปิดตารางหาค่า } k = 0.28$$

กำหนดความร้อนที่สูญเสียโดยทั่วไปกำหนดไม่เกิน 50 btu

$$\begin{aligned} \text{จาก } t_k &= \frac{k(t_h - t_s)}{Q} \\ &= \frac{0.28(176 - 130)}{50} \\ &= 0.233 \text{ นิ้ว} \end{aligned}$$

ดังนั้นเลือกใช้ความหนาฉนวนหุ้มชุดท่อทางเดินลมร้อนขนาด 2 นิ้ว

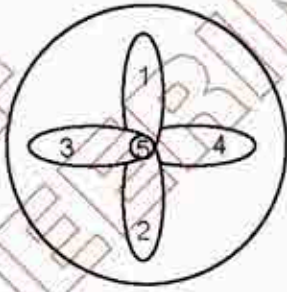
ภาคผนวก ข.

ผลการศึกษารควบคุมอุณหภูมิความร้อน

DEPARTMENT OF
MECHANICAL ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY

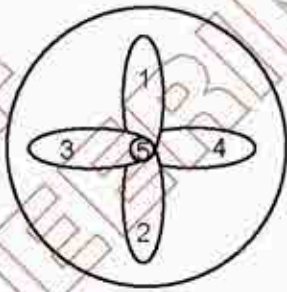
ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบความคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 18.00 - 18.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)					
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย							
	T	RH	T	RH				บน		ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง	
0	29	90.0	32.1	53.0	626	54	280	5.00	0.23	0.85	0.28	0.43	0.31	
1	29	89.1	61.2	38.9	625	99	298	26.72	-	-	-	-	-	
2	30	85.5	70.7	41.6	636	91	289	26.88	-	-	-	-	-	
3	30	87.6	66.8	43.5	607	72	286	26.85	-	-	-	-	-	
4	30	85.8	59.8	42.4	473	51	301	26.72	-	-	-	-	-	
5	30	85.9	55.2	45.4	594	55	295	29.17	5.49	4.27	3.07	3.29	3.93	
6	30	83.6	53.6	45.1	613	53	263	20.76	-	-	-	-	-	
7	30	84.2	52.5	45.5	622	52	248	15.30	-	-	-	-	-	
8	30	82.1	51.6	46.6	611	51	265	19.21	-	-	-	-	-	
9	30	84.1	51.1	47.6	616	50	256	14.43	-	-	-	-	-	
10	30	81.5	50.7	48.5	638	50	252	17.06	1.54	2.15	1.70	3.38	2.90	
11	30	79.4	50.3	46.0	640	50	255	17.23	-	-	-	-	-	
12	30	80.9	50.2	48.2	651	51	253	17.59	-	-	-	-	-	
13	30	82.5	50.1	45.4	634	51	273	22.13	-	-	-	-	-	
14	30	80.6	50.5	48.9	631	51	271	23.21	-	-	-	-	-	
15	30	84.1	50.5	48.8	631	51	270	21.95	1.79	2.14	1.06	2.87	5.33	

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส (ต่อ)

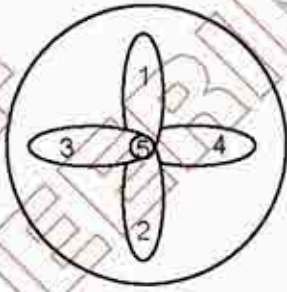
วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 18.00 - 18.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°C) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย							
	T	RH	T	RH				บน		ล่าง	ซ้าย	ขวา	ตรง	
16	30	83.2	50.4	48.6	636	51	273	22.63	-	-	-	-	-	
17	30	79.5	50.3	45.5	623	50	280	21.73	-	-	-	-	-	
18	30	81.4	50.2	48.3	625	50	271	23.75	-	-	-	-	-	
19	30	79.7	50.2	49.1	629	50	285	23.92	-	-	-	-	-	
20	30	86.9	50.2	48.2	643	50	272	23.03	1.62	1.87	1.82	4.18	4.29	
21	30	86.9	50.0	50.0	671	50	257	16.07	-	-	-	-	-	
22	30	81.6	49.9	51.1	675	50	254	20.11	-	-	-	-	-	
23	30	83.5	49.7	50.4	694	50	252	17.65	-	-	-	-	-	
24	30	81.2	49.6	49.3	696	50	241	17.30	-	-	-	-	-	
25	30	80.2	49.5	51.6	716	50	222	20.15	1.93	2.12	1.34	5.39	3.65	
26	30	83.3	49.5	51.9	671	50	245	18.72	-	-	-	-	-	
27	30	80.6	49.7	48.8	631	50	247	22.64	-	-	-	-	-	
28	30	84.5	49.9	50.5	620	51	273	23.90	-	-	-	-	-	
29	30	81.1	50.2	52.2	619	51	260	21.71	-	-	-	-	-	
30	30	82.0	50.0	51.0	618	51	242	19.07	2.34	4.24	2.43	4.02	3.35	

* หมายเหตุ อุปกรณ์วัดความเร็วลมไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 50 °C ได้

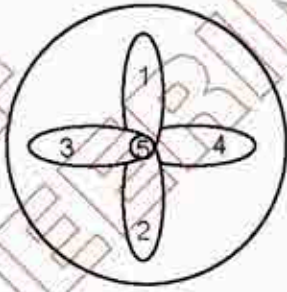
ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส

วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 18.30 - 19.00 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย							
	T	RH	T	RH				บน		ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง	
0	30	91.3	53.6	44.1	633	63	224	5.00	0.35	0.48	0.22	0.51	0.27	
1	30	86.5	55.8	46.3	640	62	229	14.05	-	-	-	-	-	
2	30	86.7	56.1	44.2	646	60	235	17.55	-	-	-	-	-	
3	30	83.1	56.0	45.6	672	60	225	15.71	-	-	-	-	-	
4	30	85.2	55.7	44.9	688	58	223	11.27	-	-	-	-	-	
5	30	86.7	55.5	46.8	680	57	243	13.73	2.21	1.82	2.85	4.60	3.38	
6	30	87.5	55.3	45.5	669	58	238	15.27	-	-	-	-	-	
7	30	86.6	55.3	46.1	685	57	237	12.70	-	-	-	-	-	
8	30	87.8	55.3	44.6	694	57	245	16.85	-	-	-	-	-	
9	30	87.5	55.2	43.4	700	56	233	16.14	-	-	-	-	-	
10	30	90.1	55.1	44.9	703	56	275	15.42	1.70	3.21	2.04	5.33	3.51	
11	30	88.3	55.5	42.0	681	57	282	20.31	-	-	-	-	-	
12	30	84.2	55.7	43.7	681	57	267	16.49	-	-	-	-	-	
13	29	92.0	55.3	45.4	668	57	239	18.63	-	-	-	-	-	
14	30	87.1	55.0	46.5	661	57	229	17.58	-	-	-	-	-	
15	30	84.5	84.8	44.2	658	55	233	12.04	1.29	4.43	2.48	2.62	2.75	

ตารางที่ ข.2 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส (ต่อ)

วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 18.30 - 19.00 น.

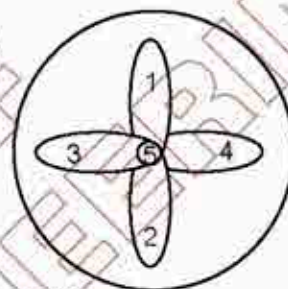
เวลา	อุณหภูมิ (°C) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย							
	T	RH	T	RH										
16	30	85.6	54.5	46.6	657	56	228	15.70	-	-	-	-	-	
17	30	83.6	54.5	44.2	651	57	235	9.12	-	-	-	-	-	
18	30	82.5	54.6	44.1	636	58	237	16.60	-	-	-	-	-	
19	30	83.8	54.8	44.5	639	58	228	14.04	-	-	-	-	-	
20	30	82.3	54.8	44.6	641	59	221	11.85	1.21	2.69	3.79	3.26	2.51	
21	30	86.3	54.7	44.9	641	59	203	12.71	-	-	-	-	-	
22	30	86.3	54.7	44.1	644	59	159	8.97	-	-	-	-	-	
23	30	85.3	54.3	43.8	638	59	154	6.89	-	-	-	-	-	
24	30	87.3	54.4	44.7	653	58	149	5.85	-	-	-	-	-	
25	30	87.6	54.3	43.9	631	58	145	5.91	1.93	1.45	3.60	2.57	3.43	
26	30	84.2	53.6	44.8	615	61	140	5.42	-	-	-	-	-	
27	30	85.6	54.3	44.7	602	61	135	6.39	-	-	-	-	-	
28	30	84.5	54.6	45.1	584	61	141	4.90	-	-	-	-	-	
29	30	88.1	54.7	47.8	591	62	138	4.95	-	-	-	-	-	
30	30	88.5	55.1	44.5	476	62	101	12.05	1.70	1.65	2.85	1.90	3.65	

* หมายเหตุ อุปกรณ์วัดความเร็วลมไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 55 °C ได้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส

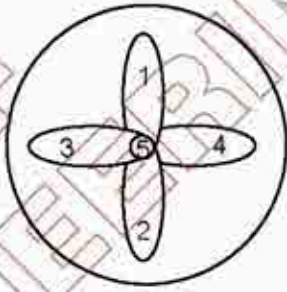
วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 19.00 - 19.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°C) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย	บน		ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง	
	T	RH	T	RH										
0	30	87.1	56.1	43.3	702	65	252		5.00					0.31
1	30	85.9	57.6	42.2	688	72	252	5.00	-	-	-	-	-	
2	30	84.1	60.4	41.3	691	75	264	18.45	-	-	-	-	-	
3	30	81.5	61.4	41.5	701	71	258	17.80	-	-	-	-	-	
4	30	82.1	61.3	40.5	687	70	261	15.40	-	-	-	-	-	
5	30	84.5	61.1	40.2	663	68	266	17.54	1.51	1.59	1.34	3.51	2.71	
6	30	84.6	60.9	40.3	665	66	252	14.15	-	-	-	-	-	
7	30	84.1	60.5	39.8	670	65	253	16.30	-	-	-	-	-	
8	30	85.1	60.2	40.1	675	65	254	15.70	-	-	-	-	-	
9	30	85.6	60.1	39.5	661	65	271	17.58	-	-	-	-	-	
10	30	85.8	60.2	39.1	685	64	277	18.23	1.01	3.54	1.31	1.21	3.77	
11	30	85.2	60.3	39.2	658	65	273	15.94	-	-	-	-	-	
12	30	86.1	60.2	39.0	663	65	264	13.45	-	-	-	-	-	
13	30	85.1	60.0	38.9	689	65	260	15.04	-	-	-	-	-	
14	30	86.2	60.0	40.2	709	64	249	14.95	-	-	-	-	-	
15	30	84.3	59.8	39.7	730	64	247	14.54	0.96	2.60	1.95	1.70	1.68	



ตารางที่ ข.3 ผลการทดสอบความคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

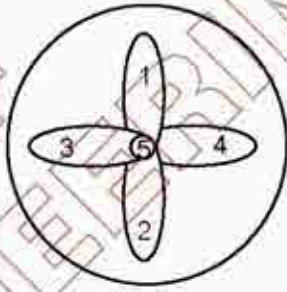
วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 19.00 - 19.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย							
	T	RH	T	RH				บน		ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง	
16	30	84.5	59.8	39.1	728	63	253	16.58	-	-	-	-	-	
17	30	86.1	59.9	38.9	713	63	269	15.43	-	-	-	-	-	
18	30	83.9	60.1	38.8	687	64	270	15.01	-	-	-	-	-	
19	30	86.5	60.0	39.0	678	65	266	16.63	-	-	-	-	-	
20	30	84.8	60.0	38.5	666	64	256	14.85	0.76	2.54	1.87	2.82	2.51	
21	30	83.9	60.0	38.7	646	64	265	17.24	-	-	-	-	-	
22	30	84.6	60.2	38.2	643	64	264	19.05	-	-	-	-	-	
23	30	85.1	60.3	38.9	646	63	257	15.94	-	-	-	-	-	
24	30	84.5	60.3	38.1	639	63	266	15.08	-	-	-	-	-	
25	30	84.4	60.2	37.9	650	63	257	15.03	1.15	1.34	0.81	1.09	1.26	
26	30	86.1	60.1	38.6	671	62	260	16.90	-	-	-	-	-	
27	30	84.0	59.9	38.3	674	62	263	16.76	-	-	-	-	-	
28	30	85.2	59.8	37.8	626	63	260	13.05	-	-	-	-	-	
29	30	86.8	59.9	39.1	609	63	261	17.12	-	-	-	-	-	
30	30	84.2	60.0	38.2	605	63	263	16.02	0.83	2.90	0.70	1.34	2.93	

* หมายเหตุ อุปกรณ์วัดความเร็วลมไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 60 °C ได้

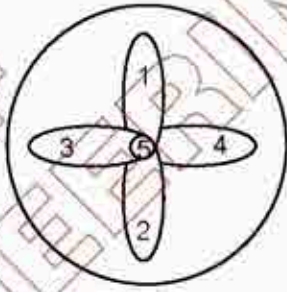
ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส

วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 19.30 - 20.00 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย							
	T	RH	T	RH				บน		ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง	
0	30	86.1	60.0	39.4	595	67	255	5.00	-	-	-	-	-	
1	30	84.8	61.5	37.7	593	80	253	5.00	-	-	-	-	-	
2	30	84.6	65.2	35.9	593	83	247	21.18	-	-	-	-	-	
3	30	84.1	66.5	35.6	597	77	264	18.15	-	-	-	-	-	
4	30	85.1	66.3	35.1	595	74	265	15.11	-	-	-	-	-	
5	30	85.5	65.9	35.4	591	71	255	9.57	-	-	-	-	-	
6	30	86.7	65.5	34.9	588	71	258	13.04	-	-	-	-	-	
7	30	86.1	65.3	34.9	583	70	262	16.60	-	-	-	-	-	
8	30	86.7	65.2	33.1	581	70	258	8.03	-	-	-	-	-	
9	30	85.1	64.9	33.4	583	70	255	14.95	-	-	-	-	-	
10	30	87.1	64.9	33.2	584	70	253	11.55	-	-	-	-	-	
11	30	84.1	64.9	32.9	588	70	251	10.48	-	-	-	-	-	
12	30	87.5	64.8	33.1	591	70	237	12.51	-	-	-	-	-	
13	30	84.6	64.9	33.1	594	70	240	11.25	-	-	-	-	-	
14	30	85.6	64.9	33.2	596	70	244	11.37	-	-	-	-	-	
15	30	87.1	64.9	32.9	603	70	239	9.95	-	-	-	-	-	

ตารางที่ ข.4 ผลการทดสอบความคุมอุณหภูมิที่ 65 องศาเซลเซียส (ต่อ)

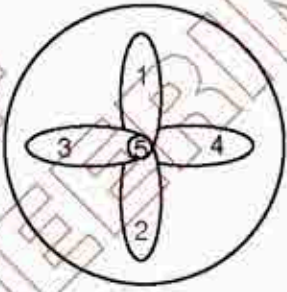
วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 19.30 - 20.00 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)								ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย							
	T	RH	T	RH				บน		ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง	
16	30	85.7	64.8	33.7	602	71	244	12.63	-	-	-	-	-	
17	30	87.1	64.0	32.9	603	71	231	8.75	-	-	-	-	-	
18	30	86.9	64.9	33.1	598	71	228	9.40	-	-	-	-	-	
19	30	86.8	64.8	32.7	601	72	229	4.95	-	-	-	-	-	
20	30	85.7	64.2	32.7	594	76	226	9.05	-	-	-	-	-	
21	30	85.7	65.0	32.8	589	74	219	14.45	-	-	-	-	-	
22	30	85.7	65.2	33.1	586	73	217	12.83	-	-	-	-	-	
23	30	86.1	65.2	32.1	584	72	217	10.83	-	-	-	-	-	
24	30	87.9	65.1	32.4	585	73	220	9.35	-	-	-	-	-	
25	30	85.1	65.2	32.7	583	72	217	10.70	-	-	-	-	-	
26	30	85.6	65.1	32.7	583	72	221	4.90	-	-	-	-	-	
27	30	87.2	65.1	32.1	586	72	219	5.20	-	-	-	-	-	
28	30	85.4	65.0	32.8	595	72	220	10.24	-	-	-	-	-	
29	30	88.1	65.0	32.6	604	72	220	7.68	-	-	-	-	-	
30	30	86.3	64.9	32.6	607	72	210	10.14	-	-	-	-	-	

* หมายเหตุ อุปกรณ์วัดความเร็วลมไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 65 °C ได้

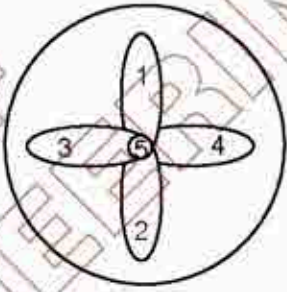
ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส

วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 20.00 - 20.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)							ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย						
	T	RH	T	RH					บน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง
0	30	-	65.0	-	596	77	202	5.00	-	-	-	-	-
1	30	-	66.2	-	594	82	209	5.00	-	-	-	-	-
2	30	-	67.7	-	597	87	208	4.95	-	-	-	-	-
3	30	-	69.7	-	599	87	208	8.95	-	-	-	-	-
4	30	-	70.3	-	596	86	200	5.68	-	-	-	-	-
5	30	-	70.4	-	581	86	165	4.95	-	-	-	-	-
6	30	-	70.0	-	590	87	147	5.85	-	-	-	-	-
7	30	-	69.8	-	581	89	138	4.95	-	-	-	-	-
8	30	-	69.6	-	544	89	136	4.90	-	-	-	-	-
9	30	-	69.0	-	544	89	117	4.93	-	-	-	-	-
10	30	-	69.0	-	537	89	145	4.90	-	-	-	-	-
11	30	-	69.2	-	543	88	156	4.95	-	-	-	-	-
12	30	-	69.2	-	552	88	194	5.27	-	-	-	-	-
13	30	-	69.5	-	552	90	208	5.54	-	-	-	-	-
14	30	-	70.1	-	546	88	214	12.24	-	-	-	-	-
15	30	-	69.9	-	537	90	216	6.80	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

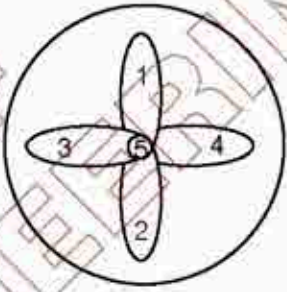
วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 20.00 - 20.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°C) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)							ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย						
	T	RH	T	RH					บน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง
16	30	-	70.4	-	538	87	224	6.20	-	-	-	-	-
17	30	-	70.3	-	542	88	218	12.95	-	-	-	-	-
18	30	-	70.2	-	544	88	218	12.48	-	-	-	-	-
19	30	-	70.2	-	551	86	213	12.79	-	-	-	-	-
20	30	-	68.4	-	615	90	196	4.95	-	-	-	-	-
21	30	-	68.3	-	613	95	188	5.00	-	-	-	-	-
22	30	-	68.6	-	609	100	223	5.00	-	-	-	-	-
23	30	-	70.2	-	650	93	220	8.63	-	-	-	-	-
24	30	-	70.5	-	658	86	218	4.93	-	-	-	-	-
25	30	-	69.8	-	619	90	229	4.90	-	-	-	-	-
26	30	-	70.5	-	615	89	225	5.70	-	-	-	-	-
27	30	-	70.5	-	627	85	213	7.84	-	-	-	-	-
28	30	-	70.2	-	646	84	187	7.35	-	-	-	-	-
29	30	-	69.9	-	664	84	211	4.91	-	-	-	-	-
30	30	-	68.4	-	661	91	241	5.00	-	-	-	-	-

* หมายเหตุ อุปกรณ์วัดความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 70 °C ได้

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส

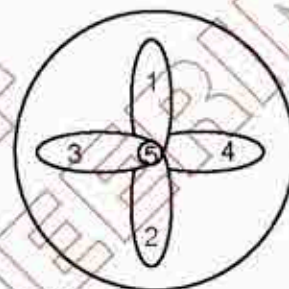
วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 20.30 - 21.00 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)							ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย						
	T	RH	T	RH					บน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง
0	30	-	69.5	-	637	132	267	5.00	-	-	-	-	-
1	30	-	76.4	-	640	123	251	26.75	-	-	-	-	-
2	30	-	76.8	-	642	101	238	7.75	-	-	-	-	-
3	30	-	75.7	-	639	94	244	7.91	-	-	-	-	-
4	30	-	75.1	-	645	91	248	5.02	-	-	-	-	-
5	30	-	74.7	-	627	94	267	6.02	-	-	-	-	-
6	30	-	74.9	-	643	91	254	10.63	-	-	-	-	-
7	30	-	74.9	-	646	89	250	9.35	-	-	-	-	-
8	30	-	75.0	-	637	89	262	9.75	-	-	-	-	-
9	30	-	75.0	-	625	89	267	13.76	-	-	-	-	-
10	30	-	75.2	-	627	87	265	10.39	-	-	-	-	-
11	30	-	75.2	-	644	87	251	12.76	-	-	-	-	-
12	30	-	75.1	-	662	87	250	10.60	-	-	-	-	-
13	30	-	74.9	-	660	87	246	9.95	-	-	-	-	-
14	30	-	74.8	-	675	87	234	9.05	-	-	-	-	-
15	30	-	74.8	-	675	87	245	6.15	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 75 องศาเซลเซียส (ต่อ)

วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 20.30 - 21.00 น.

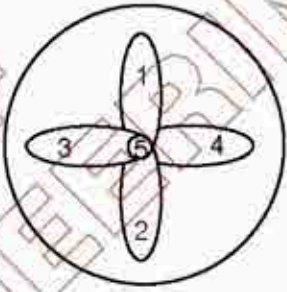
เวลา	อุณหภูมิ (°C) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)							ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย		บน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง
	T	RH	T	RH									
16	30	-	74.7	-	690	88	249	9.90	-	-	-	-	-
17	30	-	75.0	-	680	87	244	12.83	-	-	-	-	-
18	30	-	75.1	-	680	86	245	10.10	-	-	-	-	-
19	30	-	75.2	-	680	85	237	7.75	-	-	-	-	-
20	30	-	74.9	-	661	85	237	6.68	-	-	-	-	-
21	30	-	74.9	-	628	85	244	12.75	-	-	-	-	-
22	30	-	75.0	-	620	86	244	9.95	-	-	-	-	-
23	30	-	75.0	-	609	85	245	6.12	-	-	-	-	-
24	30	-	75.0	-	607	85	253	13.74	-	-	-	-	-
25	30	-	75.1	-	605	85	248	9.38	-	-	-	-	-
26	30	-	75.1	-	599	85	248	12.57	-	-	-	-	-
27	30	-	75.0	-	598	86	242	10.55	-	-	-	-	-
28	30	-	75.0	-	605	85	240	11.64	-	-	-	-	-
29	30	-	74.9	-	604	87	230	4.95	-	-	-	-	-
30	30	-	74.8	-	604	87	223	9.51	-	-	-	-	-



* หมายเหตุ อุปกรณ์วัดความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 75 °C ได้

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส

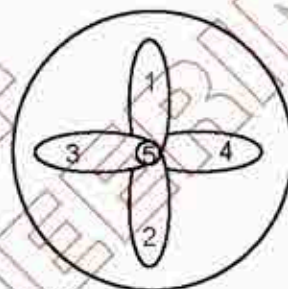
วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 21.00 - 21.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°c) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)							ความถี่ (Hz)	 ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย						
	T	RH	T	RH					บน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง
0	30	-	75.1	-	568	92	244	5.00	-	-	-	-	-
1	30	-	76.4	-	574	103	236	4.95	-	-	-	-	-
2	30	-	79.4	-	574	104	239	9.58	-	-	-	-	-
3	30	-	80.3	-	571	100	234	10.10	-	-	-	-	-
4	30	-	80.5	-	572	98	227	10.55	-	-	-	-	-
5	30	-	80.4	-	574	97	220	7.12	-	-	-	-	-
6	30	-	80.3	-	573	95	222	6.25	-	-	-	-	-
7	30	-	80.3	-	574	96	225	8.41	-	-	-	-	-
8	30	-	80.1	-	569	97	221	9.92	-	-	-	-	-
9	30	-	80.1	-	566	96	221	10.85	-	-	-	-	-
10	30	-	80.1	-	564	96	221	11.95	-	-	-	-	-
11	30	-	80.0	-	562	96	216	10.97	-	-	-	-	-
12	30	-	79.9	-	555	96	214	4.90	-	-	-	-	-
13	30	-	80.0	-	555	97	215	9.69	-	-	-	-	-
14	30	-	80.0	-	550	94	212	4.90	-	-	-	-	-
15	30	-	79.9	-	550	99	211	5.00	-	-	-	-	-

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบควบคุมอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

วันที่ทดลอง 30/04/59 เวลาที่ทดลอง 21.00 - 21.30 น.

เวลา	อุณหภูมิ (°C) / ความชื้นสัมพัทธ์ (%)							ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)				
	อากาศภายนอก		ลมร้อน		เปลวไฟ	ทางออกชุดแลกเปลี่ยนความร้อน	ไอเสีย		บน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	กลาง
	T	RH	T	RH									
16	30	-	79.9	-	553	99	214	7.78	-	-	-	-	-
17	30	-	79.9	-	561	98	215	7.94	-	-	-	-	-
18	30	-	80.0	-	571	98	221	6.43	-	-	-	-	-
19	30	-	80.0	-	585	98	220	9.95	-	-	-	-	-
20	30	-	80.0	-	588	97	212	6.80	-	-	-	-	-
21	30	-	80.0	-	588	97	206	8.45	-	-	-	-	-
22	30	-	80.0	-	587	97	202	8.97	-	-	-	-	-
23	30	-	79.8	-	590	98	194	8.43	-	-	-	-	-
24	30	-	79.7	-	592	99	201	7.51	-	-	-	-	-
25	30	-	79.8	-	595	100	200	8.45	-	-	-	-	-
26	30	-	80.0	-	599	98	207	7.98	-	-	-	-	-
27	30	-	80.0	-	610	99	205	5.61	-	-	-	-	-
28	30	-	80.0	-	614	98	200	5.31	-	-	-	-	-
29	30	-	79.9	-	613	99	204	6.84	-	-	-	-	-
30	30	-	80.0	-	611	100	204	7.25	-	-	-	-	-



* หมายเหตุ อุปกรณ์วัดความเร็วลมและความชื้นสัมพัทธ์ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิมากกว่า 80 °C ได้

ตารางที่ ข.8 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของมอเตอร์ต่อความเร็วลม

ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)					
	ซ้าย	บน	ขวา	ล่าง	กลาง	เฉลี่ย
5.00	0.82	1.29	0.95	0.78	0.39	0.85
6.00	1.59	1.68	1.54	1.29	0.84	1.39
7.00	1.98	1.76	1.45	1.48	1.01	1.54
8.00	2.09	2.60	2.01	1.95	1.26	1.98
9.00	2.23	2.09	2.23	2.46	1.76	2.15
10.00	3.29	3.07	3.48	3.10	1.57	2.90
11.00	3.04	3.29	3.68	3.51	1.79	3.06
12.00	4.10	3.79	3.71	3.90	1.95	3.49
13.00	4.57	4.04	4.18	4.10	2.43	3.86
14.00	4.02	4.24	4.21	4.68	2.62	3.95
15.00	4.46	4.88	4.52	4.94	2.85	4.33
16.00	5.21	4.91	5.21	5.41	3.07	4.76
17.00	5.35	5.24	6.08	5.91	3.10	5.14
18.00	6.02	6.11	6.36	6.22	3.32	5.61
19.00	6.25	6.27	6.08	6.27	3.60	5.69
20.00	7.02	6.41	6.66	6.81	3.72	6.12
21.00	7.55	6.63	6.66	7.14	3.29	6.25
22.00	7.83	7.36	7.61	7.55	3.35	6.74
23.00	8.33	7.19	7.78	7.69	3.54	6.91
24.00	8.47	7.61	7.80	7.80	4.10	7.16
25.00	8.36	7.78	7.69	8.61	4.02	7.29
26.00	9.14	8.19	8.08	8.84	4.18	7.69
27.00	9.36	8.75	8.47	9.20	4.16	7.99
28.00	10.10	9.11	8.64	9.70	4.24	8.36
29.00	9.81	9.72	9.78	10.10	4.35	8.75
30.00	10.60	9.42	9.21	9.39	4.52	8.63

ตารางที่ ข.9 ศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)					เฉลี่ย	อัตราการ ไหลเชิงมวล (kg/s)
	ซ้าย	บน	ขวา	ล่าง	กลาง		
0	0.23	0.85	0.28	0.43	0.31	0.42	0.1050286
5	5.49	4.27	3.07	3.29	3.93	4.01	1.0027727
10	1.54	2.15	1.70	3.38	2.90	2.334	0.5836587
15	1.79	2.14	1.96	2.87	5.33	2.818	0.7046916
20	2.62	2.87	2.82	4.18	4.29	3.356	0.8392282
25	2.93	2.12	2.34	5.39	3.65	3.286	0.8217234
30	2.34	2.24	2.43	4.02	3.35	2.876	0.7191956

ตารางที่ ข.10 ศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส

ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)					เฉลี่ย	อัตราการ ไหลเชิงมวล (kg/s)
	ซ้าย	บน	ขวา	ล่าง	กลาง		
0	0.35	0.48	0.22	0.51	0.27	0.366	0.0887590
5	2.21	1.82	2.85	4.60	3.38	2.972	0.7207427
10	1.70	3.21	2.04	5.33	3.51	3.158	0.7658497
15	1.29	4.43	2.48	2.62	2.75	2.714	0.6581749
20	1.21	2.69	3.79	3.26	2.51	2.692	0.6528396
25	1.93	1.45	3.60	2.57	3.43	2.596	0.6295586
30	2.70	2.65	2.85	1.90	3.65	2.750	0.6669053

ตารางที่ ข.11 ศึกษาอัตราการไหลเชิงมวลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ความถี่ (Hz)	ความเร็วลม (m/s)					เฉลี่ย	อัตราการ ไหลเชิงมวล (kg/s)
	ซ้าย	บน	ขวา	ล่าง	กลาง		
0	0.31	0.72	0.25	0.63	0.52	0.486	0.1196967
5	1.51	1.59	1.34	3.51	2.71	2.132	0.5250892
10	1.01	3.54	1.31	1.21	3.77	2.168	0.5339556
15	1.96	2.60	1.95	1.70	1.68	1.978	0.4871606
20	0.76	2.54	1.87	2.82	2.51	2.100	0.5172080
25	0.61	0.72	0.65	0.93	0.52	0.686	0.1689546
30	0.83	2.90	0.70	1.34	2.93	1.740	0.4285437

ตารางที่ ข.12 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่อสัญญาณอนาล็อก

ความถี่ (Hz)	กระแสไฟฟ้า (mA)
0	0.00
1	0.50
2	0.87
3	1.24
4	1.61
5	2.10
6	2.47
7	2.86
8	3.23
9	3.73
10	4.10
11	4.47
12	4.85
13	5.23
14	5.60
15	5.98
16	6.47

ตารางที่ ข.12 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่อสัญญาณนาฬิกา (ต่อ)

ความถี่ (Hz)	กระแสไฟฟ้า (mA)
17	6.85
18	7.22
19	7.60
20	7.98
21	8.37
22	8.86
23	9.23
24	9.62
25	10.00
26	10.36
27	10.75
28	11.14
29	11.51
30	11.89
31	12.28
32	12.76
33	13.14
34	13.53
35	13.92
36	14.29
37	14.68
38	15.06
39	15.57
40	15.93
41	16.31
42	16.70
43	17.07
44	17.46
45	17.85

ตารางที่ ข.12 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ต่อสัญญาณอนาล็อก (ต่อ)

ความถี่ (Hz)	กระแสไฟฟ้า (mA)
47	18.63
48	18.99
49	19.39
50	19.89

ตารางที่ ข.13 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
50 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
4:21 PM	29.9
4:22 PM	31.8
4:23 PM	39.9
4:24 PM	46.9
4:25 PM	53.6
4:26 PM	58.4
4:27 PM	58.8
4:28 PM	58.1
4:29 PM	57.3
4:30 PM	56.3
4:31 PM	55.0
4:32 PM	53.7
4:33: PM	52.5
4:34 PM	52.0
4:35 PM	51.6
4:36 PM	51.5
4:37 PM	51.3
4:38 PM	50.8
4:39 PM	50.0
4:40 PM	50.1
4:41 PM	50.1

ตารางที่ ข.13 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
50 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
4:42 PM	50.0
4:43 PM	49.8
4:44 PM	49.9
4:45 PM	49.6
4:46 PM	49.4
4:47 PM	49.5
4:48 PM	50.4
4:49 PM	51.3
4:50 PM	51.8
4:51 PM	51.9

ตารางที่ ข.14 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
55 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
4:59 PM	51.7
5:01 PM	52.5
5:02 PM	55.5
5:03 PM	56.4
5:04 PM	55.9
5:05 PM	54.9
5:06 PM	54.1
5:07 PM	54.1
5:08 PM	54.5
5:09 PM	55.0
5:10 PM	55.4
5:11 PM	55.7
5:12 PM	55.8
5:13 PM	55.3
5:14 PM	54.6
5:15 PM	54.4
5:16 PM	54.0
5:17 PM	54.2
5:18 PM	54.3
5:19 PM	53.6
5:20 PM	53.0
5:21 PM	53.3
5:22 PM	53.9
5:23 PM	54.6

ตารางที่ ข.14 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
55 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
5:24 PM	55.0
5:25 PM	55.2
5:26 PM	55.2
5:27 PM	55.1
5:28 PM	54.9
5:29 PM	54.7
5:30 PM	54.8

ตารางที่ ข.15 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
60 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
5:31 PM	55.3
5:32 PM	57.5
5:33 PM	61.1
5:34 PM	61.8
5:35 PM	61.8
5:36 PM	61.2
5:37 PM	60.2
5:38 PM	59.2
5:39 PM	58.7
5:40 PM	58.7
5:41 PM	58.5
5:42 PM	59.0
5:43 PM	59.4
5:44 PM	59.6
5:45 PM	59.7
5:46 PM	59.7
5:47 PM	59.5
5:48 PM	59.5
5:49 PM	59.4
5:50 PM	59.1
5:51 PM	59.2
5:52 PM	59.1
5:53 PM	58.9
5:54 PM	58.5

ตารางที่ ข.15 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
5:55 PM	58.3
5:56 PM	58.4
5:57 PM	58.9
5:58 PM	59.4
5:59 PM	60.2
6:01 PM	60.9
6:02 PM	60.6

ตารางที่ ข.16 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
65 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
6:01 PM	60.9
6:02 PM	60.6
6:03 PM	59.4
6:04 PM	59.1
6:05 PM	60.8
6:06 PM	63.2
6:07 PM	65.2
6:08 PM	65.5
6:09 PM	65.5
6:10 PM	65.5
6:11 PM	65.1
6:12 PM	64.6
6:13 PM	64.7
6:14 PM	64.7
6:15 PM	64.9
6:16 PM	65.0
6:17 PM	65.0
6:18 PM	64.9
6:19 PM	65.1
6:20 PM	65.0
6:21 PM	65.2
6:22 PM	65.5
6:23 PM	65.5
6:24 PM	65.6

ตารางที่ ข.16 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
65 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
6:25 PM	65.8
6:26 PM	66.2
6:27 PM	66.3
6:28 PM	66.3
6:29 PM	66.3
6:30 PM	65.9
6:31 PM	65.7

ตารางที่ ข.17 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
70 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
6:29 PM	66.3
6:30 PM	65.9
6:31 PM	65.7
6:32 PM	66.1
6:34 PM	66.3
6:35 PM	66.5
6:36 PM	69.1
6:37 PM	70.7
6:38 PM	70.4
6:39 PM	69.8
6:40 PM	69.2
6:41 PM	68.9
6:42 PM	69.0
6:43 PM	68.8
6:44 PM	68.8
6:45 PM	69.2
6:46 PM	69.0
6:47 PM	69.0
6:48 PM	69.4
6:49 PM	70.3
6:50 PM	71.1
6:51 PM	71.6
6:52 PM	71.6
6:53 PM	71.6

ตารางที่ ข.17 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
6:54 PM	71.0
6:55 PM	70.4
6:56 PM	69.5
6:57 PM	69.5
6:58 PM	69.5
6:59 PM	69.7
7:01 PM	69.0

ตารางที่ ข.18 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
75 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7:09 PM	68.6
7:10 PM	70.1
7:11 PM	72.6
7:12 PM	74.5
7:13 PM	74.7
7:14 PM	74.7
7:15 PM	75.2
7:16 PM	75.7
7:17 PM	76.3
7:18 PM	76.4
7:19 PM	76.1
7:20 PM	75.7
7:21 PM	75.6
7:22 PM	75.4
7:23 PM	75.2
7:24 PM	75.4
7:25 PM	75.3
7:26 PM	75.2
7:27 PM	75.0
7:28 PM	74.6
7:29 PM	74.4
7:30 PM	74.7
7:31 PM	75.1
7:32 PM	75.2

ตารางที่ ข.18 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
75 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7:33 PM	75.2
7:34 PM	75.0
7:35 PM	74.7
7:36 PM	75.1
7:37 PM	75.3
7:38 PM	75.5
7:39 PM	75.8

ตารางที่ ข.19 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
80 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7:40 PM	76.3
7:41 PM	78.1
7:42 PM	81.0
7:43 PM	81.5
7:44 PM	81.5
7:45 PM	81.4
7:46 PM	81.6
7:47 PM	81.4
7:48 PM	81.0
7:49 PM	80.2
7:50 PM	79.8
7:51 PM	80.0
7:52 PM	80.2
7:53 PM	80.4
7:54 PM	80.6
7:55 PM	80.3
7:56 PM	80.1
7:57 PM	80.2
7:58 PM	80.1
7:59 PM	79.9
8:01 PM	79.9
8:02 PM	80.0
8:03 PM	80.0
8:04 PM	80.1

ตารางที่ ข.19 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีกับเวลาที่อุณหภูมิ
80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:05 PM	80.2
8:06 PM	79.9
8:07 PM	79.8
8:08 PM	79.3
8:09 PM	79.3
8:10 PM	79.0
8:11 PM	79.2

ตารางที่ ข.20 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
50 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
5:53 AM	29.2
5:54 AM	43.9
5:55 AM	64.4
5:56 AM	70.6
5:57 AM	65.7
5:58 AM	59.3
5:59 AM	55.0
6:00 AM	53.5
6:01 AM	52.3
6:02 AM	51.5
6:03 AM	51.0
6:04 AM	50.6
6:05 AM	50.3
6:06 AM	50.2
6:07 AM	50.2
6:08 AM	50.5
6:09 AM	50.5
6:10 AM	50.3
6:11 AM	50.3
6:12 AM	50.2
6:13 AM	50.2
6:14 AM	50.2
6:15 AM	50.0
6:16 AM	49.9

ตารางที่ ข.20 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
50 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
6:17 AM	49.7
6:18 AM	49.5
6:19 AM	49.4
6:20 AM	49.6
6:21 AM	49.8
6:22 AM	50.1
6:23 AM	50.2

ตารางที่ ข.21 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
55 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
6:26 AM	50.6
6:27 AM	52.1
6:28 AM	53.9
6:29 AM	55.8
6:30 AM	56.1
6:31 AM	56.0
6:32 AM	55.7
6:33 AM	55.5
6:34 AM	55.3
6:35 AM	55.3
6:36 AM	55.3
6:37 AM	55.2
6:38 AM	55.1
6:39 AM	55.5
6:40 AM	55.6
6:41 AM	55.3
6:42 AM	55.0
6:43 AM	54.8
6:44 AM	54.4
6:45 AM	54.5
6:46 AM	54.6
6:47 AM	54.8
6:48 AM	54.8
6:49 AM	54.8

ตารางที่ ข.21 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
55 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
6:50 AM	54.6
6:51 AM	54.3
6:52 AM	54.4
6:53 AM	54.3
6:54 AM	53.6
6:55 AM	54.3
6:56 AM	54.6

ตารางที่ ข.22 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
60 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7:00 AM	55.1
7:01 AM	55.7
7:02 AM	56.1
7:03 AM	56.5
7:04 AM	58.3
7:05 AM	61.2
7:06 AM	61.4
7:07 AM	61.2
7:08 AM	61.0
7:09 AM	60.7
7:10 AM	60.3
7:11 AM	60.2
7:12 AM	60.2
7:13 AM	60.2
7:14 AM	60.3
7:15 AM	60.1
7:16 AM	60.0
7:17 AM	59.9
7:18 AM	59.8
7:19 AM	59.8
7:20 AM	60.0
7:21 AM	60.0
7:22 AM	60.0
7:23 AM	60.0

ตารางที่ ข.22 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
60 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7:24 AM	60.2
7:25 AM	60.3
7:26 AM	60.3
7:27 AM	60.2
7:28 AM	60.1
7:29 AM	60.0
7:30 AM	59.9

ตารางที่ ข.23 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
65 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7:34 AM	60.6
7:35 AM	61.8
7:36 AM	65.8
7:37 AM	66.4
7:38 AM	66.2
7:39 AM	65.8
7:40 AM	65.5
7:41 AM	65.3
7:42 AM	65.2
7:43 AM	64.9
7:44 AM	64.9
7:45 AM	64.9
7:46 AM	64.9
7:47 AM	64.8
7:48 AM	64.9
7:49 AM	64.8
7:50 AM	64.9
7:51 AM	64.9
7:52 AM	64.9
7:53 AM	64.3
7:54 AM	64.5
7:55 AM	65.0
7:56 AM	65.2
7:57 AM	65.1

ตารางที่ ข.23 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
65 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
7:58 AM	65.2
7:59 AM	65.2
8:00 AM	65.0
8:01 AM	64.9
8:02 AM	65.1
8:03 AM	65.0
8:04 AM	64.9
7:58 AM	65.2

ตารางที่ ข.24 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
70 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:06 AM	65.2
8:07 AM	66.4
8:08 AM	68.0
8:09 AM	69.8
8:10 AM	70.3
8:11 AM	70.3
8:12 AM	70.0
8:13 AM	69.7
8:14 AM	69.4
8:15 AM	69.0
8:16 AM	69.0
8:17 AM	69.1
8:18 AM	69.3
8:19 AM	69.6
8:20 AM	70.3
8:21 AM	70.0
8:22 AM	70.5
8:23 AM	70.3
8:24 AM	70.3
8:25 AM	70.2
8:26 AM	68.5
8:27 AM	68.1
8:28 AM	70.2
8:29 AM	70.3

ตารางที่ ข.24 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
70 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:30 AM	70.5
8:31 AM	69.9
8:32 AM	70.5
8:33 AM	70.5
8:34 AM	70.2
8:35 AM	69.8
8:36 AM	68.5
8:37 AM	69.4

ตารางที่ ข.25 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
75 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
8:40 AM	69.9
8:41 AM	76.9
8:42 AM	76.8
8:43 AM	75.7
8:44 AM	75.0
8:45 AM	74.8
8:46 AM	74.9
8:47 AM	74.9
8:48 AM	75.0
8:49 AM	75.0
8:50 AM	75.2
8:51 AM	75.2
8:52 AM	75.0
8:53 AM	74.9
8:54 AM	74.7
8:55 AM	74.8
8:56 AM	74.7
8:57 AM	75.0
8:58 AM	75.1
8:59 AM	75.2
9:00 AM	74.8
9:01 AM	75.0
9:02 AM	75.0
9:03 AM	75.0

ตารางที่ ข.25 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
75 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
9:04 AM	75.0
9:06 AM	75.1
9:07 AM	75.0
9:08 AM	75.0
9:09 AM	74.8
9:10 AM	74.9
9:11 AM	74.8
9:12 AM	74.7

ตารางที่ ข.26 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
80 องศาเซลเซียส

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
9:15 AM	76.6
9:16 AM	79.8
9:17 AM	80.3
9:18 AM	80.5
9:19 AM	80.5
9:20 AM	80.3
9:21 AM	80.2
9:22 AM	80.2
9:23 AM	80.1
9:24 AM	80.1
9:25 AM	80.0
9:26 AM	80.1
9:27 AM	80.0
9:28 AM	80.0
9:29 AM	79.9
9:30 AM	80.0
9:31 AM	80.0
9:32 AM	79.9
9:33 AM	79.9
9:34 AM	80.1
9:35 AM	80.0
9:36 AM	80.0
9:37 AM	80.1
9:38 AM	80.0

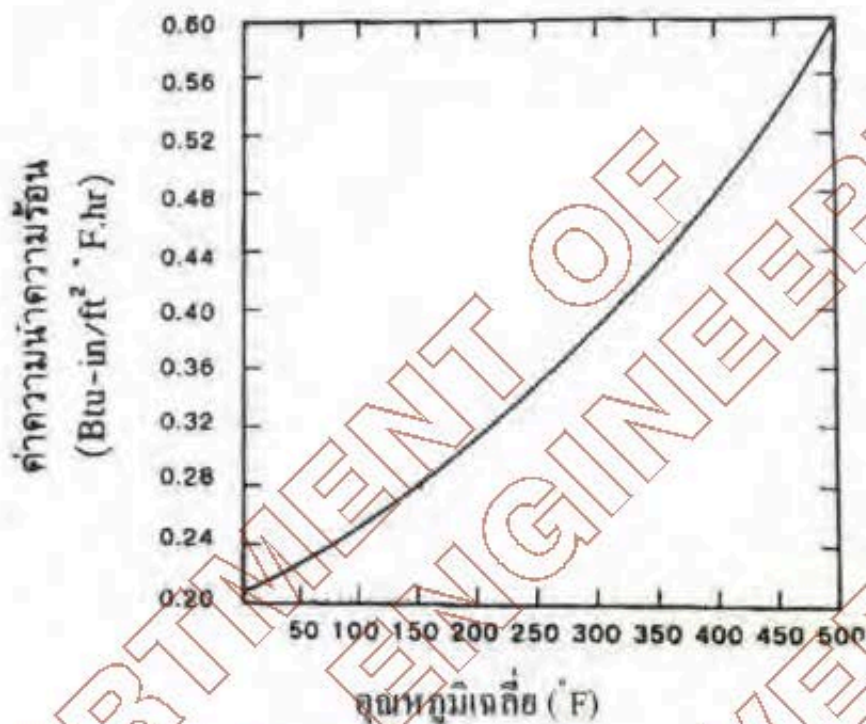
ตารางที่ ข.26 อุณหภูมิจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากระบบอัตโนมัติกับเวลาที่อุณหภูมิ
80 องศาเซลเซียส (ต่อ)

เวลา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
9:39 AM	80.0
9:40 AM	80.0
9:41 AM	79.9
9:42 AM	80.0
9:43 AM	79.9
9:44 AM	80.0
9:45 AM	80.0
9:46 AM	79.9

ตาราง ข.27 คุณสมบัติทางกลของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาและเหล็กกล้าผสม

ASTM Type	Condition	Tensile Strength (ksi)	Yield Strength (ksi)	Elongation 2 in (%)	Reduction in Area (%)	Hardness (BHN)	Mechanical (Based on 1112 = 100)
1010	HR	64	42	18	67	107	45
	CO	78	58	14	52	128	50
	COA	84	65	10	35	131	55
1020	HR	65	43	18	65	108	45
	CO	78	56	20	55	128	50
	A	87	65	17	37	131	55
1030	HR & Turned	84	65	18	58	131	55
	A	72	44	31	68	140	75
	CO	84	75	18	57	177	80
1040	A	87	65	31	68	128	50
	A	78	52	32	52	148	60
	A	91	68	27	50	207	85
1045	A	100	75	17	45	207	85
	A	75	55	38	57	148	60
	A	85	60	28	55	170	70
1050	A	100	75	17	45	212	85
	A	85	60	28	55	217	90
	A	100	75	17	45	217	85
1060	A	112	85	15	35	205	80
	A	105	80	17	40	174	70
	A	120	90	12	30	205	80
1115	A	141	105	10	25	217	90
	A	125	90	12	30	205	80
	A	147	110	10	25	203	80
1135	A	75	50	35	65	140	55
	A	85	60	25	55	170	70
	A	88	61	30	67	131	55
1200	A	88	66	34	66	143	60
	A	105	80	27	50	212	85
	A	85	65	38	68	170	70
1340	A	100	75	26	56	207	85
	A	107	80	17	50	212	85
	A	100	75	25	51	197	80
1345	A	107	80	17	50	197	80
	A	125	90	12	30	205	80
	A	138	100	10	25	212	85

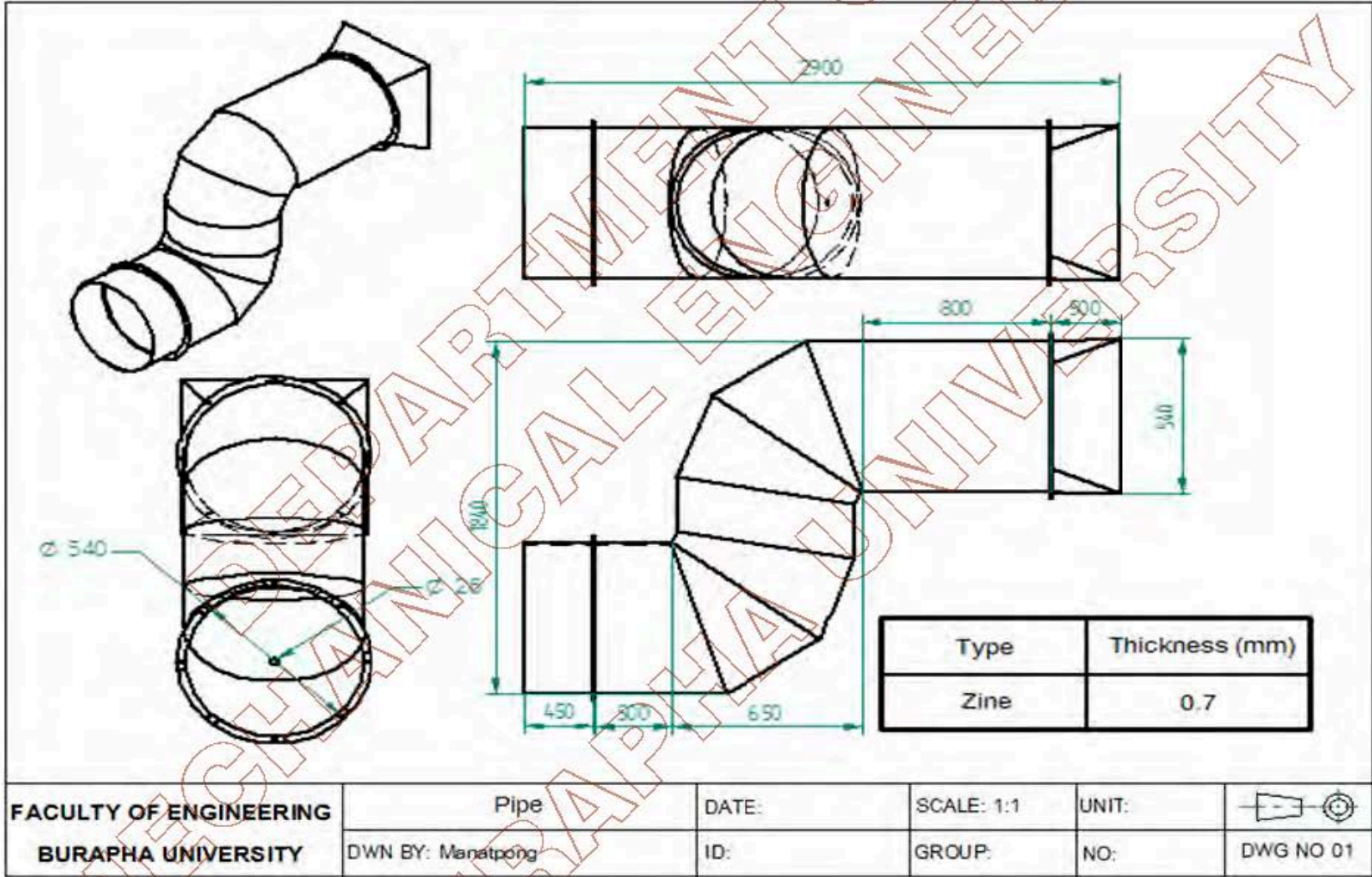
ตาราง ข.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยและค่านำความร้อนของฉนวนไฟเบอร์กลาส

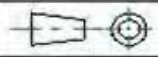


ภาคผนวก ค.

รายละเอียดการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิหม้อหุง

DEPARTMENT OF
MECHANICAL ENGINEERING
BURAPHA UNIVERSITY



FACULTY OF ENGINEERING BURAPHA UNIVERSITY	Pipe	DATE:	SCALE: 1:1	UNIT:	 DWG NO 01
	DWN BY: Manatpong	ID:	GROUP:	NO:	