# พัฒนาต้นแบบการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว

นางสาวธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

# PILOT DEVELOPEMENT OF WATER TEMPERATURE CONTROL PRIOR TO ENTERING THE ECONOMIZER TO PREVENT ACID CONDENSATION

Miss.Thitiya Plianmanee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | พัฒนาต้นแบบการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว |
| โดย | นางสาวธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตดิน แดงเที่ยง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์)

ธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี : พัฒนาต้นแบบการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว (PILOT DEVELOPEMENT OF WATER TEMPERATURE CONTROL PRIOR TO ENTERING THE ECONOMIZER TO PREVENT ACID CONDENSATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 134 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อป้องกันกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกลั่นตัว ซึ่งจะส่งผลให้ผิวถ่ายเทความร้อนของอีโคโนไมเซอร์เกิดการผุกร่อนได้ โดยในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้ความร้อนจากน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์และเสริมด้วยความร้อนจากไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุม ซึ่งศึกษาจากกรณีของโรงพยาบาลปทุมธานี

จากการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ต่างกัน โดยเมื่อการเผาไหม้มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหมดพอดี เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และถ่านหิน จะมีอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวที่ 59.6 $^{\circ}$C, 54.4 $^{\circ}$C, 50.2 $^{\circ}$C, 47.0 $^{\circ}$C และ 42.2 $^{\circ}$C ตามลำดับ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ดังนั้น จึงได้มีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ให้สูงกว่า 54.4 $^{\circ}$C โดยได้มีการกำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 70 $^{\circ}$C

จากการวิจัยได้ทำการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ทั้งหมด 3 วิธี คือ ควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด ควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด และสุดท้ายได้ใช้การควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าการควบคุมอุณหภูมิน้ำแต่ละวิธีนั้นสามารถประหยัดเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้เมื่อเทียบกับช่วงก่อนที่มีการอุ่นน้ำได้ 1.41%, 3.32% และ 5.77% ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2555

## 5170723021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEYWORDS : ECONOMIZER / CORROSION / CONDENSING TEMPERATURE

THITIYA PLIANMANEE : PILOT DEVELOPMENT OF WATER TEMPERATURE CONTROL PRIOR TO ENTERING THE ECONOMIZER TO PREVENT ACID CONDENSATION. ADVISOR : ASST.PROF. MINGSAK TANGTRAKUL, 134 pp.

This research studied on preheating feedwater temperature control prior to entering economizer to prevent acid condensation. Since the problem of acid corrosion caused by combustion of fuel induced equipment damage due to the temperature of the heat transfer surface. In this study the use of heat from the warm water heater by economizer assisted with heat from steam produced by the boiler to increase the temperature of the water before economizer controlled by using computer program as the case study of Pathumtani Hospital.

From this study revealed that each type of fuel has a different condensing temperature of the acid after a completed fuel combustion. Fuels such as natural gas, liquefied petroleum gas,diesel, fuel oil and coal had a temperature of condensation of acid at 59.6 °C, 54.4 °C, 50.2 °C, 47.0 °C and 42.2 °C, respectively. In this study, the use of LPG as fuel, therefore, the combustion temperature of the water before economizer have to exceed 54.4 °C is determined by the temperature at 70 °C.

From the research three methods were used to control the water temperature before entering the economizer by using the equations control valve as an open loop control, by the adjustment of the equations control valve to find out the flow rate of steam as an open loop control and finally take control by monitoring the temperature of the water before economizer as a closed loop control. It was found that each method of the water temperature control used can save fuel burn consumption compared to the pre-heated water with 1.41%, 3.32% and 5.77%, respectively

Department : Mechanical Engineering Student's Signature Thitiya Plianmanee
Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature
Academic Year : 2012

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสสำคัญในการทำงานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงให้ความกรุณาถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ ประสบการณ์อันล้ำค่าต่างๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง อันเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรัญญากรณ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แตงเที่ยง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยชิ้นนี้จนกระทั่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัยของสำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้เงินสนับสนุนงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินสนับสนุนงานวิจัยบางส่วน ขอขอบคุณโรงพยาบาลปทุมธานีที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณแมนพงษ์ ตั้งตระกูล ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ รวมทั้งร่วมทำการทดลองในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา อันคุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

# สารบัญ

หน้า

**บทคัดย่อภาษาไทย**..... ง
**บทคัดย่อภาษาอังกฤษ**..... จ
**กิตติกรรมประกาศ**..... ฉ
**สารบัญ**..... ช
**สารบัญตาราง**..... ฎ
**สารบัญภาพ**..... ฎ
**คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ**..... ฒ

**บทที่ 1 บทนำ**..... 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... 2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา..... 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

**บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**..... 4

**บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง**..... 10

3.1 หม้อไอน้ำ..... 10
3.2 ความร้อนเหลือทิ้ง..... 11
3.2.1 ความหมายของความร้อนเหลือทิ้ง..... 11
3.2.2 แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซเสียกลับมาใช้ใหม่..... 11
3.3 อีโคโนไมเซอร์..... 14
3.3.1 ข้อจำกัดในการออกแบบและใช้อีโคโนไมเซอร์..... 14
3.3.2 ลักษณะการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... 15
3.4 การกลั่นตัวของกรด..... 15
3.5 กฎอนุรักษ์พลังงาน..... 18
3.5.1 กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1..... 19
3.5.2 กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2..... 21

หน้า

3.6 พื้นฐานของระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ..... 23
3.6.1 วิธีการควบคุมกระบวนการทำงาน..... 23
3.7 ความรู้เกี่ยวกับวาล์วควบคุม..... 25
3.7.1 คุณสมบัติการไหลผ่านวาล์วควบคุม..... 26

**บทที่ 4 วิธีการศึกษาวิจัย**..... 28

4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์..... 28
4.2 การทำงานของระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์..... 31
4.3 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัว..... 32
4.4 ขั้นตอนการทดลอง..... 33
4.4.1 ส่วนการปรับตั้งตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมในเบื้องต้น..... 34
ก่อนการควบคุมแบบอัตโนมัติ
4.4.2 ส่วนการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์แบบอัตโนมัติ..... 34
4.5 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม..... 34
4.6 การติดตั้งอุปกรณ์การวัด..... 35
4.6.1 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ..... 35
4.6.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล..... 37
4.6.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน..... 38
4.7 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา..... 39
4.7.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ..... 39
4.7.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล..... 40
4.7.3 อุปกรณ์วัดความดัน..... 41
4.7.4 วาล์วควบคุม..... 41
4.7.5 อุปกรณ์รับ – ส่ง ข้อมูลและระบบควบคุม..... 42
4.7.6 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)..... 44

**บทที่ 5 การเตรียมอุปกรณ์และการทำงานของโปรแกรม**..... 45

5.1 การเตรียมอุปกรณ์วัดความดัน..... 45
5.2 การเตรียมอุปกรณ์วัดอัตราการไหล..... 46
5.2.1 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (M1)..... 47
5.2.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำหลังออกจากปั๊ม (M2)..... 48

หน้า

5.2.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ (M3)..... 48
5.3 การเตรียมวาล์วควบคุม..... 49
5.3.1 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจาก..... 50
อีโคโนไมเซอร์ (FCV1)
5.3.2 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)..... 53
6.3.3 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)..... 57
5.4 การบันทึกผลและการควบคุมโดยผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 58
5.4.1 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์..... 58
5.4.2 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อน..... 61
บางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)
5.4.3 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ..... 63
(FCV2)
5.4.4 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อน..... 65
เข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)
5.4.5 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้า..... 67
อีโคโนไมเซอร์

**บทที่ 6 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม**..... 72

6.1 การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด..... 73
6.1.1 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลัง..... 75
ออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)
6.1.2 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)..... 76
6.1.3 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้า..... 77
อีโคโนไมเซอร์ (FCV3)
6.2 การควบคุมโดยการใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหา..... 77
อัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด
6.2.1 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลัง..... 79
ออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)
6.2.2 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)..... 80
6.2.3 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้า..... 81
อีโคโนไมเซอร์ (FCV3)

หน้า

6.3 การควบคุมโดยควบคุมแบบปิด มีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้า..... 81
อีโคโนไมเซอร์
6.3.1 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลัง..... 83
ออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)
6.3.2 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)..... 84
6.3.3 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้า..... 85
อีโคโนไมเซอร์ (FCV3)

**บทที่ 7 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล**..... 86

7.1 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ..... 86
7.2 อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์ เมื่อไม่มีการอุ่นน้ำก่อนเข้า..... 88
อีโคโนไมเซอร์
7.3 การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด..... 90
7.4 การควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อหา..... 92
อัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด
7.5 การควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิ..... 95
ของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์
7.6 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ด้วยวิธีต่างๆ..... 98

**บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ**..... 101

8.1 สรุปผลการวิจัย..... 101
8.2 ข้อเสนอแนะ..... 102

**รายการอ้างอิง**..... 103

**ภาคผนวก**..... 105

ภาคผนวก ก การคำนวณอุณหภูมิกลั่นตัวของกรด..... 106
ภาคผนวก ข ขั้นตอนการใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์..... 117
ภาคผนวก ค ข้อมูลการตรวจวัด..... 126

**ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์**..... 134

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเตา..... 16
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลสำหรับการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม.....
ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด 74
ตารางที่ 6.2 ข้อมูลสำหรับการควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม.....
เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำแบบเปิด 78
ตารางที่ 6.3 ข้อมูลสำหรับการควบคุมโดยควบคุมแบบปิดมีการตรวจสอบอุณหภูมิ.....
ของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ 82
ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์แบบต่าง ๆ..... 99

# สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ไดอะแกรมของโรงไฟฟ้าหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... 4
ภาพที่ 2.2 การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์แบบรวมของหม้อไอน้ำ 2 ลูกรวมกัน..... 5
ภาพที่ 2.3 รอยแตกรูปฟันปลาที่เกิดกับท่อในอีโคโนไมเซอร์ แถวที่ 13..... 6
ภาพที่ 2.4 ไดอะแกรมสำหรับโปรแกรม Labview..... 8
ภาพที่ 2.5 ถังที่มีการให้ความร้อนและมีใบพัดกวนภายในถังตลอดเวลา..... 9
ภาพที่ 3.1 หม้อไอน้ำ..... 11
ภาพที่ 3.2 recuperator..... 12
ภาพที่ 3.3 recuperative burner..... 12
ภาพที่ 3.4 regenerative burner..... 12
ภาพที่ 3.5 air preheater..... 13
ภาพที่ 3.6 waste heat boiler..... 13
ภาพที่ 3.7 อีโคโนไมเซอร์..... 13
ภาพที่ 3.8 ลักษณะท่อภายในของอีโคโนไมเซอร์..... 14
ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ของระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ..... 15
ภาพที่ 3.10 สัญลักษณ์อัตราการไหลและเอนทาลปีตำแหน่งแหน่งต่างๆ..... 19
ภาพที่ 3.11 ก. ปริมาตรควบคุมของท่อน้ำออกจากปั๊มภายในเครื่องแลกเปลี่ยน..... 21
ความร้อนตัวที่ 1
ภาพที่ 3.11 ข. ปริมาตรควบคุมของท่อน้ำร้อนออกจากอีโคโนไมเซอร์ภายในเครื่อง..... 21
แลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1
ภาพที่ 3.12 ก. ปริมาตรควบคุมของท่อน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2..... 22
ภาพที่ 3.12 ข. ปริมาตรควบคุมของท่อไอน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2... 22
ภาพที่ 3.13 โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุมการทำงาน..... 23
ภาพที่ 3.14 องค์ประกอบของการควบคุมแบบเปิด..... 24
ภาพที่ 3.15 องค์ประกอบของการควบคุมแบบปิด..... 24
ภาพที่ 3.16 คุณสมบัติการไหลผ่านวาล์วควบคุม..... 26
ภาพที่ 4.1 หม้อไอน้ำที่ทำการศึกษาวิจัย..... 28
ภาพที่ 4.2 อีโคโนไมเซอร์..... 29
ภาพที่ 4.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 และ 2..... 29

หน้า

ภาพที่ 4.4 วาล์วควบคุม..... 30
ภาพที่ 4.5 ถังคอนเดนเสต..... 30
ภาพที่ 4.6 ปั๊มน้ำ..... 32
ภาพที่ 4.7 แผนผังระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ..... 32
ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวสำหรับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ..... 33
ภาพที่ 4.9 การควบคุมอัตราการไหลผ่านจุดต่างๆ..... 35
ภาพที่ 4.10 ตำแหน่งการติดตั้ง RTD PT 100..... 36
ภาพที่ 4.11 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลชนิด K..... 37
ภาพที่ 4.12 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล..... 38
ภาพที่ 4.13 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน..... 39
ภาพที่ 4.14 RTD PT 100..... 40
ภาพที่ 4.15 เทอร์มอคัปเปิลชนิด K..... 40
ภาพที่ 4.16 Vortex flow meter..... 41
ภาพที่ 4.17 Pressure Transmitter..... 41
ภาพที่ 4.18 วาล์วควบคุม..... 42
ภาพที่ 4.19 NI 9217..... 42
ภาพที่ 4.20 NI 9203..... 43
ภาพที่ 4.21 NI 9265..... 43
ภาพที่ 4.22 ชุดบันทึกข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบ..... 43
ภาพที่ 4.23 Data Logger DL2100..... 44
ภาพที่ 5.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลทั้ง 3 ตัว..... 46
ภาพที่ 5.2 ตำแหน่งการติดตั้งวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว..... 50
ภาพที่ 5.3 อัตราการไหลของน้ำผ่าน FCV1 ที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ..... 51
ภาพที่ 5.4 การหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV1..... 52
ภาพที่ 5.5 อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV2 ที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ..... 54
ตามสมการของวาล์วควบคุม
ภาพที่ 5.6 การหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV2 ตามสมการของวาล์วควบคุม..... 54
ภาพที่ 5.7 อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV2 ที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ..... 55
ตามสมการที่ได้จากการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม
ภาพที่ 5.8 การหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV2 ตามสมการที่ได้จาก..... 56
การปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม

หน้า

ภาพที่ 5.9 อัตราการไหลน้ำผ่าน FCV3 ที่ตำแหน่งควบคุมต่าง ๆ..... 57
ภาพที่ 5.10 ผังงานของระบบ..... 60
ภาพที่ 5.11 ผังงานการควบคุมน้ำผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อน..... 62
เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1
ภาพที่ 5.12 ผังงานการควบคุมไอน้ำผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ..... 64
ภาพที่ 5.13 ผังงานการควบคุมน้ำผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้า..... 66
อีโคโนไมเซอร์
ภาพที่ 5.14 หลักการทำงานของ LabVIEW..... 67
ภาพที่ 5.15 Block Diagram ของระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์..... 68
ภาพที่ 5.16 Front Panel ของระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำอัตโนมัติก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์.. 68
ภาพที่ 5.17 กล่องควบคุม..... 70
ภาพที่ 6.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดต่าง ๆ..... 72
ภาพที่ 7.1 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวสำหรับเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ..... 87
ภาพที่ 7.2 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลชนิด K บริเวณตำแหน่งต่าง ๆ..... 88
ภาพที่ 7.3 อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์บริเวณตำแหน่งต่าง ๆ..... 89
ภาพที่ 7.4 อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ปรับตามสมการของวาล์วควบคุม..... 90
ภาพที่ 7.5 อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์ตามสมการวาล์วควบคุม..... 91
ภาพที่ 7.6 ตำแหน่งควบคุมสำหรับการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม..... 92
ภาพที่ 7.7 อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์จากสมการการปรับตำแหน่ง..... 93
วาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ
ภาพที่ 7.8 อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์สำหรับการควบคุมแบบปิดเมื่อใช้..... 94
สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ
ภาพที่ 7.9 ตำแหน่งควบคุมสำหรับการควบคุมแบบปิดเมื่อใช้สมการการ..... 95
ปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ
ภาพที่ 7.10 อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์การควบคุมเป็นแบบปิด..... 96
ภาพที่ 7.11 อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์เมื่อเป็นการควบคุมแบบปิด..... 97
ภาพที่ 7.12 ตำแหน่งควบคุมเมื่อเป็นการควบคุมแบบปิด..... 98

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|
| e | ทางออก | - |
| $E_{CV}$ | พลังงานรวมในระบบเปิด | kJ |
| h | ค่าเอนทาลปี | kJ/kg |
| $h_{1a}$ | ค่าเอนทาลปีของน้ำที่ออกจากปั๊ม | kJ/kg |
| $h_{1b}$ | ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจาก HX 1 ก่อนเข้า HX 2 | kJ/kg |
| $h_{1c}$ | ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจาก HX 2 ก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ | kJ/kg |
| $h_{1d}$ | ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ | kJ/kg |
| $h_{2a}$ | ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจาก HX 1 | kJ/kg |
| $h_{5a}$ | ค่าเอนทาลปีของไอน้ำที่ใช้ | kJ/kg |
| $h_{5b}$ | ค่าเอนทาลปีของน้ำออกจาก HX 2 ก่อนกลับเข้าถังคอนเดนเสต | kJ/kg |
| H | ตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม | - |
| i | ทางเข้า | - |
| ke | พลังงานศักย์ | kJ/kg |
| $\dot{m}$ | อัตราการไหลเชิงมวล | kg/h |
| $\dot{m}_1$ | อัตราการไหลของน้ำที่ออกจากปั๊ม | kg/h |
| $\dot{m}_2$ | อัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ | kg/h |
| $\dot{m}_5$ | อัตราการไหลของไอน้ำที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ | kg/h |
| $\dot{m}_{max}$ | อัตราการไหลสูงสุดของของไหลเมื่อผ่านวาล์วควบคุม | kg/h |
| $\dot{m}_v$ | อัตราการไหลของของไหลผ่านวาล์วควบคุม | kg/h |
| $\dot{m}_{v1}$ | อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ผ่าน FCV1 | kg/h |
| $\dot{m}_{v2}$ | อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV 2 | kg/h |
| N | จำนวนโมล | mol |
| pe | พลังงานจลน์ | kJ/kg |
| $P_{H_2O}$ | ความดันย่อยของไอน้ำ | atm |
| $P_{SO_2}$ | ความดันย่อยของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ | atm |
| $\dot{Q}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านขอบเขตของระบบ | kW |
| $\dot{Q}_{hot\ water}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า | kW |
| $\dot{Q}_{steam}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนของไอน้ำที่นำมาใช้ | kW |
| $\dot{Q}_{water}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า | kW |

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|
| $T_{acid}$ | อุณหภูมิกลั่นตัวของกรด | $^{o}C$ , K |
| $T_{sur,1}$ | อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์ตำแหน่งที่ 1 | $^{o}C$ |
| $T_{sur,2}$ | อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์ตำแหน่งที่ 2 | $^{o}C$ |
| $T_{sur,3}$ | อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์ตำแหน่งที่ 3 | $^{o}C$ |
| $T_{sur,4}$ | อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์ตำแหน่งที่ 4 | $^{o}C$ |
| V | ความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบเทียบกับจุดอ้างอิง | m/s |
| $\dot{W}$ | ปริมาณงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา | kW |
| $x_P$ | สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดความดัน | A |
| $x_{V,F}$ | สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง | A |
| $x_{V,S}$ | สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ | A |
| $x_{V,W}$ | สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ | A |
| $y_P$ | ค่าความดันของอุปกรณ์วัดความดัน | bar |
| $S_{i,1}$ | รับค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV1 | % |
| $S_{i,2}$ | รับค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV2 | % |
| $S_{i,3}$ | รับค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV3 | % |
| $S_{o,1}$ | ส่งค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV1 | % |
| $S_{o,2}$ | ส่งค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV2 | % |
| $S_{o,3}$ | ส่งค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV3 | % |
| $y_{V,F}$ | ค่าอัตราการไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง | kg/h |
| $y_{V,S}$ | ค่าอัตราการไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ | kg/h |
| $y_{V,W}$ | ค่าอัตราการไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ | kg/h |
| z | ระดับของระบบเทียบกับจุดอ้างอิงภายนอก | m |
| $\tau$ | Valve rangeability | - |

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

สถานการณ์การใช้พลังงานของโลกในปัจจุบันและในอนาคตมีแนวโน้มราคาจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานที่ปรับตัวสูงขึ้น ตามการฟื้นตัวของเศรษฐกิจโลก ทำให้ทุกภาคส่วนให้ความสำคัญในเรื่องของการอนุรักษ์พลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพนั้นย่อมก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานจำนวนมาก ส่งผลให้ต้นทุนด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ การใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ยังนำไปสู่การปล่อยมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น

การผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อนจากหม้อไอน้ำ สำหรับนำไปใช้ประโยชน์นั้น นับว่าเป็นเทคโนโลยีดั้งเดิมที่มีใช้กันอยู่อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน หม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่บรรจุน้ำอยู่ภายในและใส่เชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อเผาไหม้ให้เกิดพลังงานความร้อน แล้วถ่ายเทความร้อนให้น้ำในถัง จนกระทั่งได้ไอน้ำที่มีความดันตามที่ต้องการ โดยพลังงานจากไอน้ำที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านความร้อนและกำลังงานในกิจการต่างๆ เช่น การทำน้ำร้อนในโรงแรม การรีดผ้าการอบผ้าในโรงพยาบาล การผลิตไฟฟ้าในโรงจักรไฟฟ้า และการฆ่าเชื้อในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้อาจจะเป็นของแข็ง เช่น ลิกไนท์ ฟืน แกลบ หรือเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลว เช่น น้ำมันก๊าด น้ำมันเตา น้ำมันดีเซลหรือเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม ก๊าซชีวมวล ทั้งนี้การใช้เชื้อเพลิงชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับว่าหม้อไอน้ำนั้นได้รับการออกแบบมาใช้กับเชื้อเพลิงชนิดใด หรืออาจจะถูกออกแบบให้ใช้กับเชื้อเพลิงสองชนิด เช่น น้ำมันกับก๊าซ การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซสามารถเผาไหม้ได้ง่ายที่สุด สำหรับการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวในการเผาไหม้นั้น พบว่าในประเทศไทยได้รับความนิยมมากที่สุด หม้อไอน้ำนับเป็นอุปกรณ์สำคัญอุปกรณ์หนึ่งของกระบวนการผลิตในวงการอุตสาหกรรม โดยในระบบหม้อไอน้ำนั้นถือได้ว่ามีการใช้พลังงานค่อนข้างมาก การใช้งานหม้อไอน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้นก็เท่ากับเป็นการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งแนวทางกว้างๆ ก็คือลดพลังงานความร้อนสูญเสีย (loss) หรือการเอานำความร้อนสูญเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะส่งผลให้หม้อไอน้ำลดการใช้เชื้อเพลิงลง เช่น การอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ การอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ การนำคอนเดนเสทกลับมาใช้ และการบำรุงรักษาหม้อไอน้ำที่ส่งผลต่อการลดการสูญเสียพลังงาน

การอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำโดยผ่านอีโคโนไมเซอร์ เป็นวิธีนำเอาความร้อนปล่อยทิ้งกลับมาใช้และเป็นวิธีการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้วิธีการหนึ่ง เนื่องจากการที่น้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงลดน้อยลง โดยอีโคโนไมเซอร์เป็นอุปกรณ์ซึ่งเป็นที่รู้จักกันเป็นอย่างดี อีโคโนไมเซอร์จะใช้ความร้อนจากก๊าซ

เสียที่ปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ โดยหม้อไอน้ำจะให้ความร้อนจากการเผาไหม้ผ่านพื้นที่ถ่ายเทความร้อนทำให้น้ำร้อนขึ้นจนกลายเป็นไอน้ำ ซึ่งความร้อนส่วนหนึ่งที่ยังใช้ไม่หมดก็จะทิ้งผ่านก๊าซเสียร้อนออกทางปล่อง ซึ่งการนำความร้อนจากปล่องมาใช้ประโยชน์นั้นเป็นการนำความร้อนที่เหลือทิ้งนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำ ให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนป้อนเข้าหม้อไอน้ำ ส่งผลให้หม้อไอน้ำใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ลดน้อยลง ซึ่งนับเป็นการประหยัดพลังงาน เนื่องจากโดยปกติแล้วหม้อไอน้ำนั้นถือได้ว่ามีการใช้พลังงานค่อนข้างมาก ดังนั้นการใช้งานหม้อไอน้ำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้นก็เท่ากับเป็นการอนุรักษ์พลังงานด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตามการใช้อีโคโนไมเซอร์ในอุตสาหกรรมเป็นเรื่องยาก เนื่องจากการกัดกร่อนของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง อันสืบเนื่องมาจากอุณหภูมิของผิวถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรด ดังนั้นการที่จะใช้อีโคโนไมเซอร์ในอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์นั้น จะต้องควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ไม่ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่กรดเกิดการกลั่นตัว

**1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์**

เพื่อศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนผ่านอีโคโนไมเซอร์ เพื่อป้องกันการกลั่นตัวที่ผิวเนื่องจากอุณหภูมิของผิวถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรด ซึ่งทำให้อุปกรณ์เกิดการผุกร่อนในผิวถ่ายเทความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ โดยใช้ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์และเสริมด้วยความร้อนจากไอน้ำ เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งศึกษาจากกรณีของโรงพยาบาลปทุมธานี

**1.3 ขอบเขตของการศึกษา**

1. ศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในระบบอุ่นน้ำป้อน ก่อนผ่านอีโคโนไมเซอร์และเสริมด้วยไอน้ำ

2. ออกแบบวิธีการปรับอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

3. ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิน้ำในระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ

4. ทำการทดลองพร้อมเก็บข้อมูลการวัด

**1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน**

1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบไอน้ำที่ศึกษา และระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ซึ่งประกอบด้วย อัตราการไหลของน้ำ ไอน้ำ และเชื้อเพลิง, อุณหภูมิน้ำคอนเดนเสต อุณหภูมิน้ำที่ป้อนหม้อไอน้ำเดิม

2. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดกรดกลั่นตัว

3. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการนำอีโคโนไมเซอร์ จากก๊าซเสียปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำมาใช้กับระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ

4. ทำการสมดุลพลังงานของระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ

5. ทำการออกแบบการปรับอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำภายในท่อเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการควบคุม

6. ติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำร้อน

7. เก็บข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

8. รวบรวมข้อมูล และจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

**1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. ได้ตัวอย่างต้นแบบในการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งทำให้ผิวของอีโคโนไมเซอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

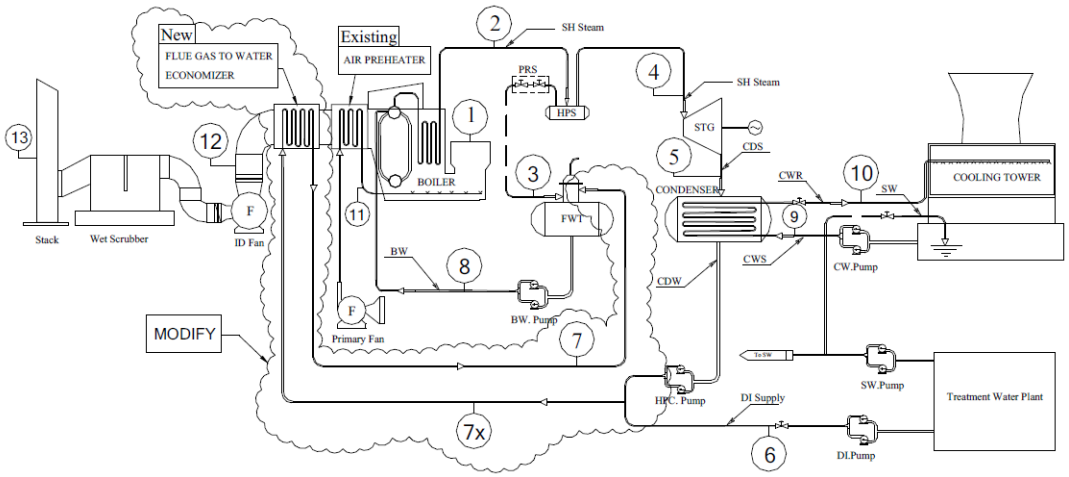
2. เป็นการนำเอาความร้อนจากก๊าซเสียที่ปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยไม่ทำให้อีโคโนไมเซอร์ใช้งานผุกร่อน

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษางานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อป้องกันการกลั่นตัวของกรด ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยพบว่ามีนักวิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำอีโคโนไมเซอร์มาใช้ และได้มีการศึกษาการกลั่นตัวของกรดที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการควบคุมอุณหภูมิรวมถึงอัตราการไหลของสารทำงานภายในท่อ ดังนี้

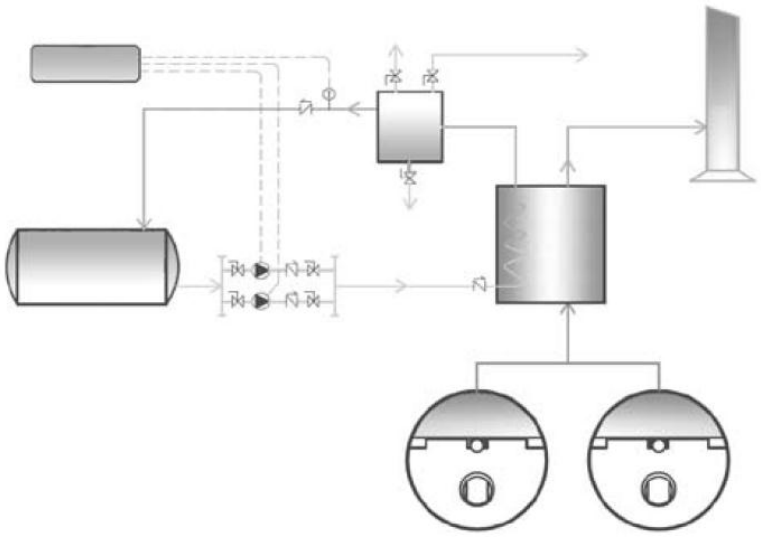
สมเกียรติ บุญณสะ [1] ได้ศึกษาการนำความร้อนสูญเสียที่ปล่องไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ของโรงไฟฟ้า ซึ่งใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง และพบว่าการที่อีโคโนไมเซอร์มีขนาดใหญ่ จะทำให้สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ได้มาก ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนเร็ว ถึงแม้ว่าราคาการลงทุนสำหรับอีโคโนไมเซอร์จะสูงขึ้นก็ตาม การปรับปรุงระบบโดยการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ และสามารถนำความร้อนสูญเสียกลับมาอุ่นน้ำป้อนได้แล้วนั้น ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าลงได้ 0.197 Baht / kWh และลดความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสียสู่บรรยากาศลงได้ 48.3% ประสิทธิภาพสุทธิของโรงไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น 1.12% และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 7 เดือน




ภาพที่ 2.1 ไดอะแกรมของโรงไฟฟ้าหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ธนากร ณ พัทลุง [2] ได้ศึกษาแนวทางการประเมินพลังงานความร้อนที่มีในก๊าซร้อนทิ้ง และแนวทางการนำกลับมาใช้โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลวหรืออีโคโนไมเซอร์ ซึ่งโดยทั่วไปการนำความร้อนของก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำไปใช้อุ่นน้ำป้อนจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ทุก 22 °C ของก๊าซที่สามารถดึงกลับมาได้หรือในทำนองเดียวกันสำหรับทุก 6 °C ที่เพิ่มขึ้นของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำจาก อีโคโนไมเซอร์ หรืออุณหภูมิอากาศก่อนการสันดาปเพิ่มขึ้น 20 °C จากการอุ่นอากาศจะทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1% เช่นกัน ซึ่งก๊าซร้อนทิ้งออกจาก หม้อไอน้ำจะมีอุณหภูมิประมาณ 200 °C - 250 °C ถ้ามีการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ที่รอบนอกปล่อง บางส่วนของความร้อนในก๊าซร้อนทิ้งจะถูกนำกลับคืนมาเพื่ออุ่นน้ำป้อนหรือผลิตน้ำร้อนได้

นอกจากนี้การนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาใช้โดยอีโคโนไมเซอร์ ควรคำนึงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดกำมะถัน ซึ่งเกิดจากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของกำมะถัน สำหรับการหาจุดกลั่นตัวของไอน้ำและกรดกำมะถันนั้น สามารถหาได้จากอุณหภูมิกลั่นตัวของไอน้ำ ซึ่งปริมาณการควบแน่นจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้าง 15 – 40 °C จะทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงที่สุด



ภาพที่ 2.2 การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์แบบรวมของหม้อไอน้ำ 2 ลูกรวมกัน

M. Mobin และคณะ [3] ได้ศึกษาในเรื่องความเสียหายของท่อในอีโคโนไมเซอร์ที่ใช้กับหม้อไอน้ำความดันสูงโดยใช้น้ำมันเตาเกรด C เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งในการศึกษานั้น M. Mobin

และคณะ ได้นำท่ออีโคโนไมเซอร์ แถวที่ 13 และแถวที่ 14 มาศึกษา โดยเมื่อท่ออีโคโนไมเซอร์ผ่านการใช้งานแล้วเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า พบว่าท่ออีโคโนไมเซอร์ แถวที่ 13 มีรอยแตกเป็นรูปฟันปลาบริเวณใกล้กับทางเข้าน้ำป้อน และมีรูเล็กๆ เกิดขึ้นใกล้กับรอยแตกนั้น แต่ท่ออีโคโนไมเซอร์แถวที่ 14 เมื่อสังเกตไม่พบรอยแตกหรือรูเล็กๆ แต่อย่างใด และเมื่อนำเถ้าที่ตกค้างไปตรวจสอบพบว่าประกอบด้วยซัลเฟอร์ 12.8%, ธาตุวาเนเดียม 1.5%, และธาตุเหล็ก 34% ซึ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากอุณหภูมิน้ำป้อนต่ำกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของ $H_2SO_4$ ซึ่งท่ออีโคโนไมเซอร์ สามารถเกิดการผุกร่อนได้ทั้งภายในและภายนอกท่อ โดยการผุกร่อนภายนอกนั้นเกิดขึ้นจากซัลเฟอร์และความชื้นในอีโคโนไมเซอร์, อุณหภูมิท่อ และวิธีในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการผุกร่อนมีสาเหตุมาจากการกลั่นตัวของไอน้ำในก๊าซเสีย ซึ่งการกัดกร่อนนี้สามารถป้องกันได้โดยให้อุณหภูมิของท่ออีโคโนไมเซอร์สูงกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรด และการผุกร่อนภายในท่อนั้นมีสาเหตุมาจากก๊าซออกซิเจนและความไม่เหมาะสมของค่า pH ในน้ำป้อน ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการบำรุงรักษา feedwater heaters โดยการใส่สารเคมีเข้าไปเพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนและควบคุมค่า pH ให้เหมาะสม

ภาพที่ 2.3 รอยแตกรูปฟันปลาที่เกิดกับท่อในอีโคโนไมเซอร์ แถวที่ 13

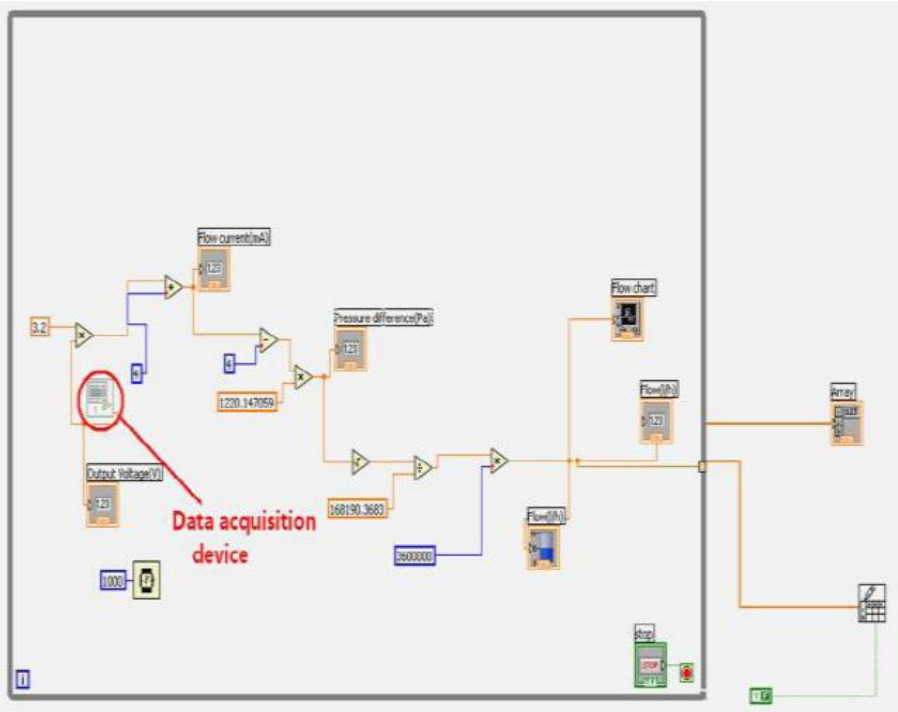
F. Pena และคณะ [4] ได้ศึกษาการคำนวณหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดภายในอีโคโนไมเซอร์ โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ซึ่งวิธีการที่ F. Pena และคณะได้ศึกษานั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่ง F. Pena และคณะ ได้พบว่าก๊าซธรรมชาติมีส่วนประกอบของก๊าซไฮโดรเจนจำนวนมาก ทำให้ปฏิกิริยาหลังการเผาไหม้จะเกิดไอน้ำขึ้นมาก ซึ่งมีผลให้อุณหภูมิกลั่นตัวสูง และทำให้ความเร็วในการกัดกร่อนอุปกรณ์ที่ใช้

สูงขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลให้ระบบเสี่ยงต่อการหยุดชะงัก โดยในการศึกษานี้เป็นการคำนวณปริมาณน้ำควบแน่นทั้งหมดที่เกิดขึ้น ซึ่งอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ แม้ว่าก๊าซเสียจะมีส่วนประกอบของกรด แต่เนื่องจากก๊าซธรรมชาติประกอบด้วยซัลเฟอร์ในปริมาณต่ำซึ่งไม่สามารถตรวจพบได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้แล้ว แต่สามารถพบได้ในรูปของกรดคาร์บอนิก

ในการคำนวณนี้เป็นการคำนวณโดยใช้ปริมาตรอากาศในทางทฤษฎี เพื่อนำไปคำนวณปริมาตรของก๊าซเสีย, คำนวณจำนวนมวลของอากาศในทางทฤษฎี เพื่อใช้ในการคำนวณมวลรวมของอากาศแห้งที่ใช้ในการเผาไหม้ นอกจากนี้ ปริมาตรรวมของก๊าซเสียและปริมาตรรวม มวลรวมของไอน้ำที่ประกอบอยู่ในก๊าซเสียนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนวณ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณความดันย่อยของไอน้ำ ที่ซึ่งสุดท้ายแล้วสามารถนำไปคำนวณอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดต่อไป

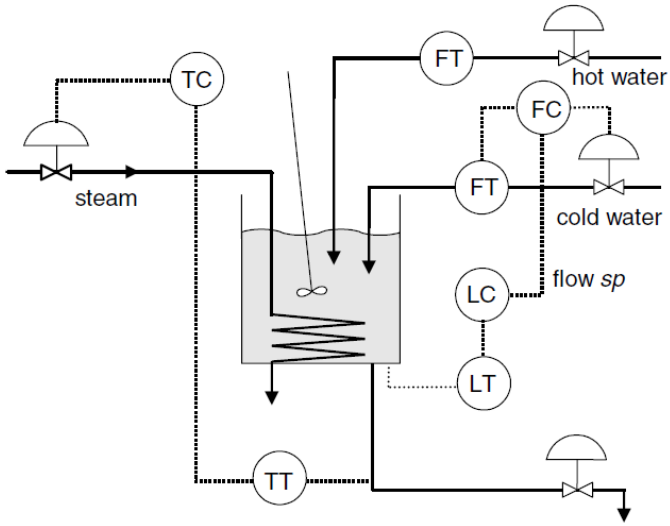
Felix Barreras และคณะ [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการลดหรือการป้องกันการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในส่วนปลายด้านเย็นของหม้อไอน้ำขนาดใหญ่ซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง โดยได้กล่าวว่าในส่วนของปลายด้านเย็นการกัดกร่อนส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของก๊าซเสียต่ำกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดประมาณ 20-30 $^{\circ}C$

Heng Zhu และคณะ [6] ได้ใช้โปรแกรม Labview ในการวัดและควบคุม โดยได้ศึกษาการสมดุลพลังงานของกระบวนการไหลของอากาศ เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งการสูญเสียที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสาเหตุทำให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มสูงขึ้นและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองกับเครื่อง Bitwinder โดยทำการวัดอัตราการไหลของอากาศและน้ำ โดยนำค่าที่ได้จากการวัดมาคำนวนโดยการสมดุลพลังงานการไหลของอากาศเพื่อลดพลังงานสูญเสีย ซึ่งในการทดลองนั้นมีการใช้ PID controller เข้ามาช่วยในการวัดและการควบคุม โดย PID controller จะเชื่อมต่อกับน้ำในหม้อไอน้ำ เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำในหม้อไอน้ำและวัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากหม้อไอน้ำ ซึ่งอัตราการไหลของน้ำจะถูกวัดและควบคุมโดยเครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่ออากาศบริเวณทางเข้าเครื่อง BitWinder มีความดันสูงขึ้น จะทำให้พลังงานสูญเสียลดลง และเมื่อมีการเพิ่ม proportional band และค่า reset time จะทำให้ระบบมีความเสถียรเพิ่มขึ้น




ภาพที่ 2.4 ไดอะแกรมสำหรับโปรแกรม Labview

Nina F. Thornhill และคณะ [7] ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวัดและควบคุม โดยได้ศึกษาแบบจำลองของถังต้นแบบที่มีการให้ความร้อนและมีใบพัดกวนภายในถังตลอดเวลา โดยในการวิเคราะห์นั้นได้ใช้ทั้งการควบคุมแบบปิดและการควบคุมแบบเปิดเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งการควบคุมแบบเปิดนั้นใช้ในการควบคุมตำแหน่งของวาล์วสำหรับปรับการไหลของน้ำเย็น และการไหลของไอน้ำ ส่วนการควบคุมแบบปิดนั้นใช้เกี่ยวกับอุณหภูมิและควบคุมวงจร เมื่อค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการควบคุมแตกต่างกันโดยค่า P และ I แทนการควบคุมช่วงในการปรับให้มีการไหลแบบช้าจนถึงให้มีการไหลแบบเร็ว ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่าผลที่ได้กราฟมีลักษณะผสมเพราะในกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในการวัดจะมีสิ่งรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย




ภาพที่ 2.5 ถังที่มีการให้ความร้อนและมีใบพัดกวนภายในถังตลอดเวลา

# บทที่ 3

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหม้อไอน้ำ ความร้อนเหลือทิ้ง อีโคโนไมเซอร์ การกลั่นตัวของกรด กฎอนุรักษ์พลังงาน พื้นฐานของระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ และความรู้เกี่ยวกับวาล์วควบคุม

## 3.1 หม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำ (Boiler) คือ เครื่องหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไอน้ำโดยการถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้แก่น้ำซึ่งอยู่ในภาชนะปิดมิดชิด ให้ได้ไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อนำไอน้ำไปใช้ประโยชน์ เช่น ขับเครื่องกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ขับเครื่องจักรไอน้ำ (Steam Engine) และยังนำเอาความร้อนจากไอน้ำที่ผลิตได้มาใช้ในหม้อหุงต้มอาหาร หม้ออบแห้ง หม้อต้มน้ำอ้อย หม้อเคี่ยวน้ำตาล ซึ่งภายในหม้อไอน้ำประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนเก็บน้ำและส่วนเก็บไอน้ำ ซึ่งได้รับการออกแบบและสร้างอย่างแข็งแรงถูกต้องตามหลักเกณฑ์ทางวิศวกรรม

ภาพที่ 3.1 หม้อไอน้ำ

พิกัดหม้อไอน้ำ [8] หมายถึง อัตราการผลิตไอน้ำที่หม้อไอน้ำสามารถผลิตได้ต่อหน่วยเวลาเป็นกิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือตันต่อชั่วโมง แต่การกำหนดพิกัดหม้อไอน้ำก็ขึ้นอยู่กับชนิดของไอน้ำที่ผลิตออกมา

ถ้าเป็นไอน้ำอิ่มตัวก็จะกำหนดเป็นอัตราการผลิตไอน้ำต่อหน่วยเวลา เช่น 1 ตันต่อชั่วโมง หมายถึง ปริมาณความร้อนที่สามารถทำให้น้ำขนาด 1 ตัน ที่อุณหภูมิ 100 °C กลายเป็นไอน้ำที่ 100 °C หมดภายในเวลา 1 ชั่วโมง

**3.2 ความร้อนเหลือทิ้ง**

ในโรงงานอุตสาหกรรม และในโรงพยาบาลที่มีการใช้พลังงานความร้อน มักจะมีความร้อนที่ใช้ไม่หมดแล้วปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ ส่งผลให้เกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นโรงงานควรสำรวจความร้อนสูญเสียและแหล่งของความร้อนที่ปล่อยทิ้งแล้วหาแนวทางเพิ่มประสิทธิภาพและนำกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้ต้นทุนการใช้พลังงานความร้อนลดต่ำลง

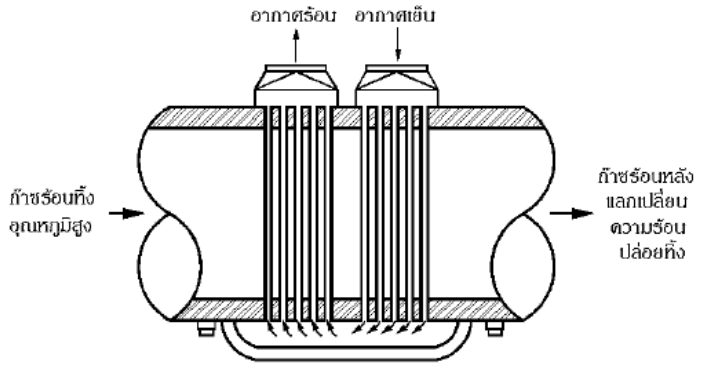
**3.2.1 ความหมายของความร้อนเหลือทิ้ง**

พลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศหลังจากผ่านการใช้ประโยชน์แล้ว ซึ่งอาจอยู่ในรูปอากาศ ก๊าซ น้ำ หรือของเหลวอื่นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศ

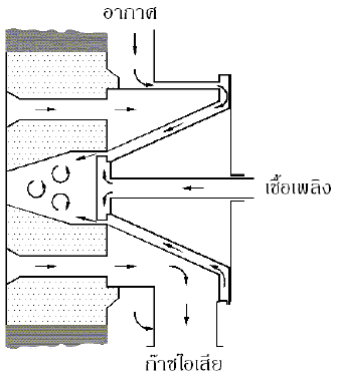
**3.2.2 แนวทางการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซเสียกลับมาใช้ใหม่**

ก๊าซเสียที่ปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำถือเป็นการสูญเสียความร้อนในปริมาณมาก ดังนั้น ควรนำกลับมาใช้ประโยชน์ในแนวทางดังต่อไปนี้

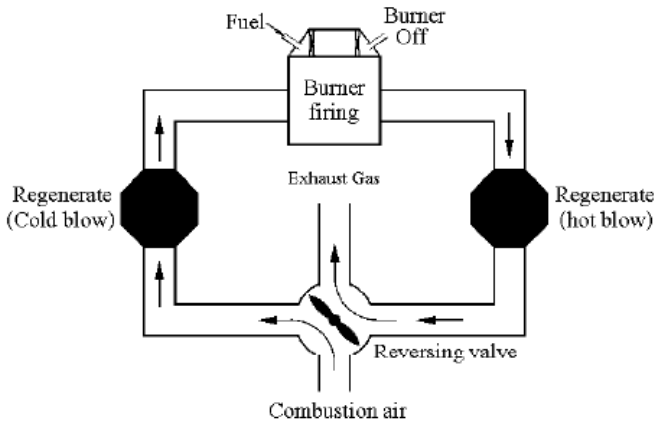
1) นำมาใช้อุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น recuperator, recuperative burner, regenerative burner และ air preheater



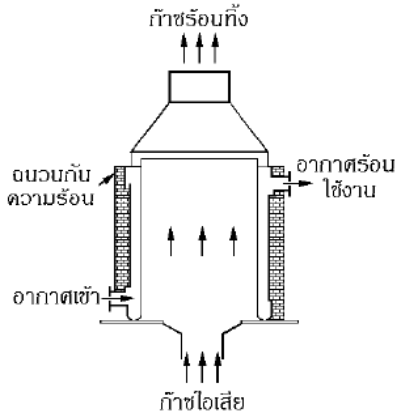

ภาพที่ 3.2 recuperator




ภาพที่ 3.3 recuperative burner

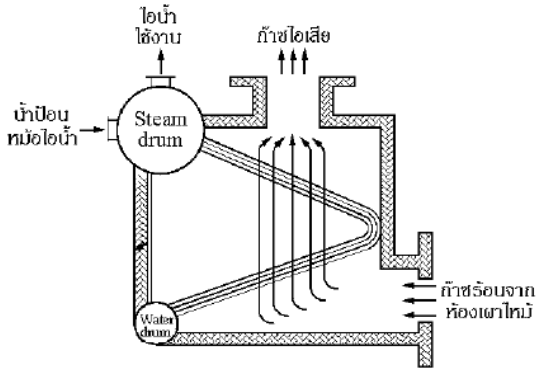



ภาพที่ 3.4 regenerative burner



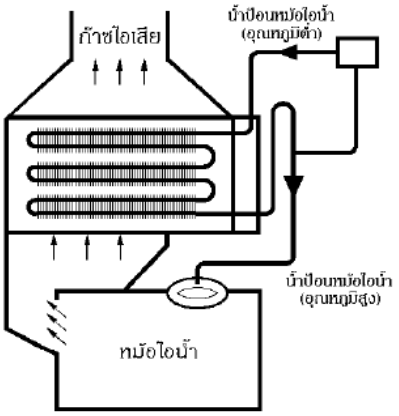

ภาพที่ 3.5 air preheater

2) นำมาใช้ผลิตไอน้ำโดยใช้ waste heat boiler




ภาพที่ 3.6 waste heat boiler

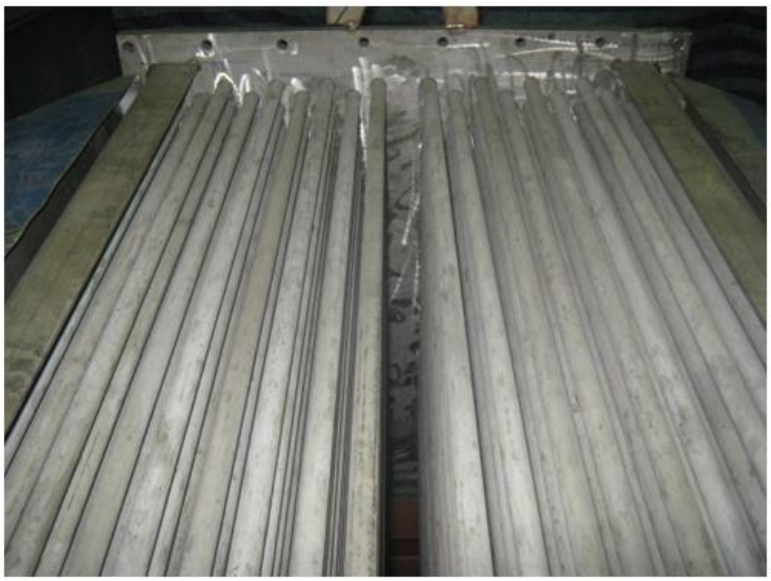
3) นำมาใช้อุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำโดยใช้อีโคโนไมเซอร์




ภาพที่ 3.7 อีโคโนไมเซอร์

### 3.3 อีโคโนไมเซอร์

อีโคโนไมเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยรับความร้อนจากแหล่งความร้อน (ก๊าซทิ้งจากกระบวนการผลิตหรือหม้อไอน้ำ) และถ่ายเทให้กับน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต สำหรับระบบหม้อไอน้ำนั้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลวทำงานจะได้รับความร้อนจากก๊าซไอเสียทิ้งจากหม้อไอน้ำโดยส่วนใหญ่และถ่ายเทให้กับน้ำ (preheating) ก่อนเข้าหม้อไอน้ำ การแลกเปลี่ยนความร้อนนี้อาศัยหลักการนำความร้อนและพาความร้อนผ่านตัวกลางวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง ท่อน้ำที่วิ่งเข้าสู่อีโคโนไมเซอร์จะมีลักษณะเป็นท่อและขดเป็นรูปตัวยู U สลับกันไปมาเพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว



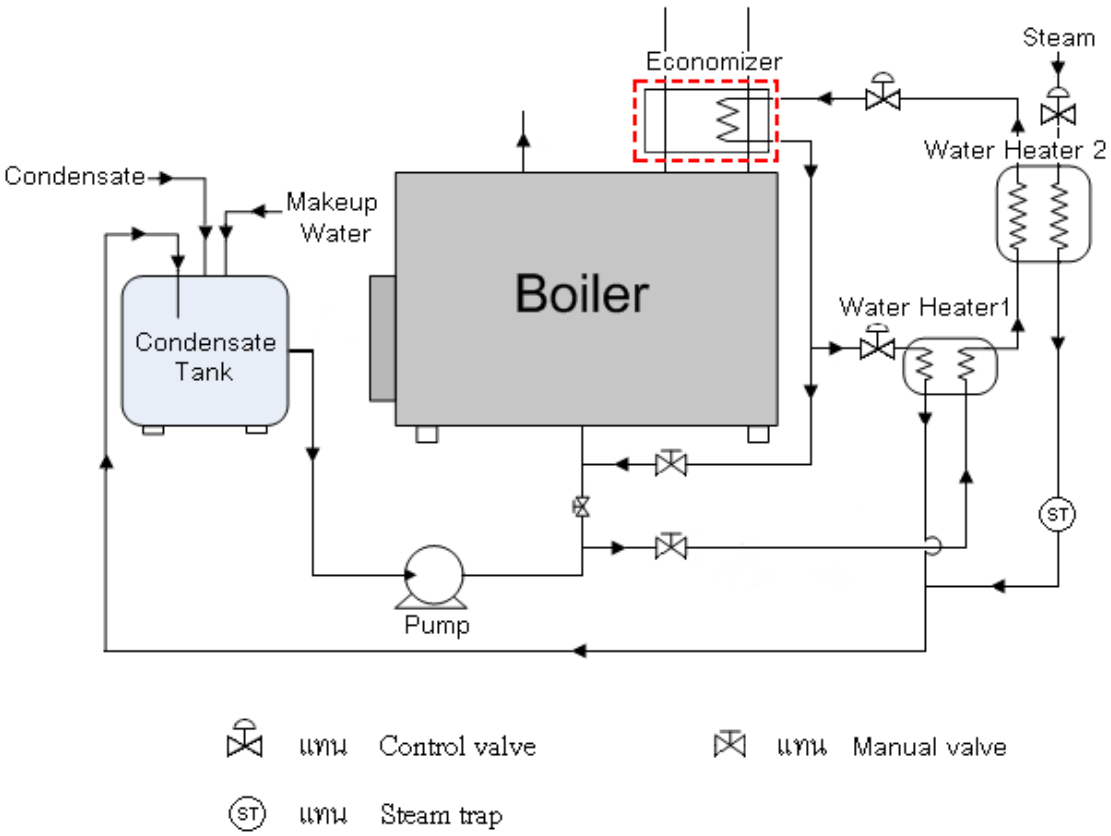
ภาพที่ 3.8 ลักษณะท่อภายในของอีโคโนไมเซอร์

#### 3.3.1 ข้อจำกัดในการออกแบบและใช้อีโคโนไมเซอร์

การนำก๊าซเสียกลับมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ โดยผ่านอีโคโนไมเซอร์ซึ่งโดยทั่วไปอีโคโนไมเซอร์จะทำจากโลหะที่สามารถทนต่ออุณหภูมิก๊าซเสียได้ นอกจากนี้การนำความร้อนจากก๊าซเสียกลับมาใช้โดยผ่านอีโคโนไมเซอร์นั้น ควรคำนึงถึงอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น Sulfurous acid ($H_2SO_3$) และ Sulfuric acid ($H_2SO_4$) ซึ่งกรดเหล่านี้เกิดจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้มีองค์ประกอบของกำมะถัน (S)

### 3.3.2 ลักษณะการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ในการนำเอาความร้อนจากก๊าซร้อนปล่อยทิ้งมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ แสดงการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ดังนี้




ภาพที่ 3.9 ตำแหน่งติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ของระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ

## 3.4 การกลั่นตัวของกรด

สารมลพิษในไอเสียที่พบอยู่บ่อยครั้งในกระบวนการเผาไหม้จากการใช้เชื้อเพลิง คือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($SO_2$) และออกไซด์ของไนโตรเจน ($NO_x$) ซึ่งเป็นสารมลพิษหลักที่ถูกควบคุมด้วยกฎหมาย โดยเฉพาะก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะส่งผลกระทบทั้งเป็นมลพิษอากาศ และยังทำให้เกิดความเสียหายโดยกัดกร่อนอุปกรณ์ต่างๆ อีกด้วย

เมื่อผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ถูกทำให้มีอุณหภูมิเย็นลงต่ำกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของไอน้ำ โดยความชื้นบางส่วนจะเกิดการควบแน่น ดังนั้น การทราบอุณหภูมิกลั่นตัวจึงเป็นเรื่องสำคัญ เพราะว่าหยดน้ำนั้นมักจะรวมตัวกับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้เปลี่ยนไปเป็นกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นสารที่มีความกัดกร่อนสูง ซึ่งอุณหภูมิ

กลั่นตัว คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการควบแน่นเกิดขึ้นเมื่ออากาศถูกทำให้เย็นตัวลงที่ความดันคงที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่ความดันไอของน้ำ [9]

กระบวนการเผาไหม้จริงในทางปฏิบัติมักจะมีการใช้อากาศมากเกินกว่าปริมาณตามปริมาณสัมพันธ์ ซึ่งปริมาณสัมพันธ์ (stoichiometric) หรือปริมาณอากาศตามทฤษฎี (theoretical air) คือ ปริมาณอากาศน้อยสุดที่ต้องการใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ เพื่อให้มั่นใจว่าการเผาไหม้นั้นจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ ปริมาณของอากาศที่มากเกินกว่าปริมาณตามปริมาณสัมพันธ์จะถูกเรียกว่า อากาศส่วนเกิน (excess air) ปริมาณของอากาศส่วนเกินนี้ มักจะแสดงเทียบกับปริมาณของอากาศตามปริมาณสัมพันธ์ในรูปของร้อยละของอากาศส่วนเกิน (percent excess air) หรือร้อยละของอากาศที่ใช้เทียบกับปริมาณทางทฤษฎี (percent theoretical air) ถ้ามีการใช้อากาศในปริมาณที่เท่ากับปริมาณสัมพันธ์ เราจะถือว่าร้อยละของอากาศส่วนเกินเท่ากับ 0% หรือร้อยละของอากาศที่ใช้เมื่อเทียบกับปริมาณทางทฤษฎีเท่ากับ 100% และถ้ามีการใช้อากาศน้อยกว่าปริมาณสัมพันธ์ของปฏิกิริยาแล้วเราจะเรียกว่า การขาดอากาศ ซึ่งมักจะแสดงในเทอมของร้อยละของการขาดอากาศ

ต่อไปเป็นการแสดงตัวอย่างการหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเตา โดยในที่นี้ได้สมมติให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละของอากาศส่วนเกินเท่ากับ 0%) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย $CO_2$, $H_2O$, $N_2$ และ $SO_2$ ที่ไม่ได้ถูกใช้ และน้ำมันเตามีองค์ประกอบของธาตุโดยเฉลี่ยแสดงดังตาราง

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเตา (รายงานการทดสอบของกรมวิทยาศาสตร์ หมายเลขปฏิบัติการ L51/05648.1)

| องค์ประกอบ | ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก |
|---|---|
| C | 82.8 |
| H | 12.9 |
| O | 3.20 |
| S | 0.52 |

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_{6.894}H_{12.799} + 0.2O_2 + 0.016S + 0.003N + a\,(O_2 + 3.76N_2) \qquad (3.1)$$

$$\rightarrow\ 6.894CO_2 + 6.399H_2O + 0.016SO_2 + (0.0015 + 3.76a)N_2$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a ได้โดยการทำการดุล O ดังนี้

$$O \quad : \quad 0.4 + 2a = (6.894 \times 2) + 6.399 + (0.016 \times 2)$$

$$a = 9.91$$

แทนค่า a = 9.91 ในสมการ (3.1) จะได้ดังนี้

$$C_{6.894}H_{12.799} + 0.2O_2 + 0.016S + 0.003N + 9.91(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 6.894CO_2 + 6.399H_2O + 0.016SO_2 + 37.263N_2 \quad (3.2)$$

เมื่อ $H_2O$ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำและรวมตัวกับ $SO_2$ ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง [10] จะได้สมการดังนี้

$$H_2O + SO_2 \rightarrow H_2SO_3 \quad (3.3)$$

การหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เพื่อป้องกันการกลั่นตัวของกรดจากก๊าซเสียนั้น สามารถหาได้ 2 วิธี คือ

1) หาจากสมการของ Kiang [11]

ในการหาอุณหภูมิกลั่นตัวของ sulfurous acid ($H_2SO_3$) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตามสมการของ Kiang นั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{1000}{T} = 3.9526 - 0.1863 \log_e(P_{H_2O}) + 0.000867 \log_e(P_{SO_2}) + 0.000913 \log_e(P_{H_2O}) \log_e(P_{SO_2}) \quad (3.4)$$

เมื่อ $T_{acid}$ แทน อุณหภูมิกลั่นตัวของกรด (K)

P แทน ความดันย่อย (atm)

โดย

ค่าความดันย่อยของไอน้ำ ($P_{H_2O}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{H_2O} = \left(\frac{N_{H_2O}}{N_{prod}}\right)(P_{prod}) \quad (3.5)$$

ค่าความดันย่อยของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ($P_{SO_2}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{SO_2} = \left(\frac{N_{SO_2}}{N_{prod}}\right)\left(P_{prod}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อ N แทน จำนวนโมล (โมล)

2) หาจากค่าความดันย่อยของไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

$$T_{acid} = T_{sat\ @\ P_{H_2O}} \quad (3.7)$$

**3.5 กฎอนุรักษ์พลังงาน**

กฎการอนุรักษ์พลังงาน มีหลักการว่า “พลังงานสามารถเปลี่ยนรูปหรือถูกถ่ายโอนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นหรือทำลายให้สูญสลายไปได้” ซึ่งอาจกล่าวเป็นสมการได้ดังนี้

{พลังงงานที่เข้าสู่ระบบ} – {พลังงงานที่ออกจากระบบ} = {พลังงงานรวมในระบบที่เปลี่ยนไป}

จะได้สมการของกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบเปิด ดังนี้

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i\right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e\right) = \Delta E_{CV} \quad (3.8)$$

หรือ

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta ke + \Delta pe) + \Delta E_{CV} \quad (3.9)$$

เมื่อ $\dot{Q}$ แทน อัตราการถ่ายโอนความร้อนผ่านขอบเขตของระบบ

$\dot{W}$ แทน ปริมาณงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$\dot{m}$ แทน อัตราการไหลเชิงมวล

$\Delta E_{CV}$ แทน พลังงานรวมในระบบเปิดที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการ

h แทน ค่าเอนทาลปี

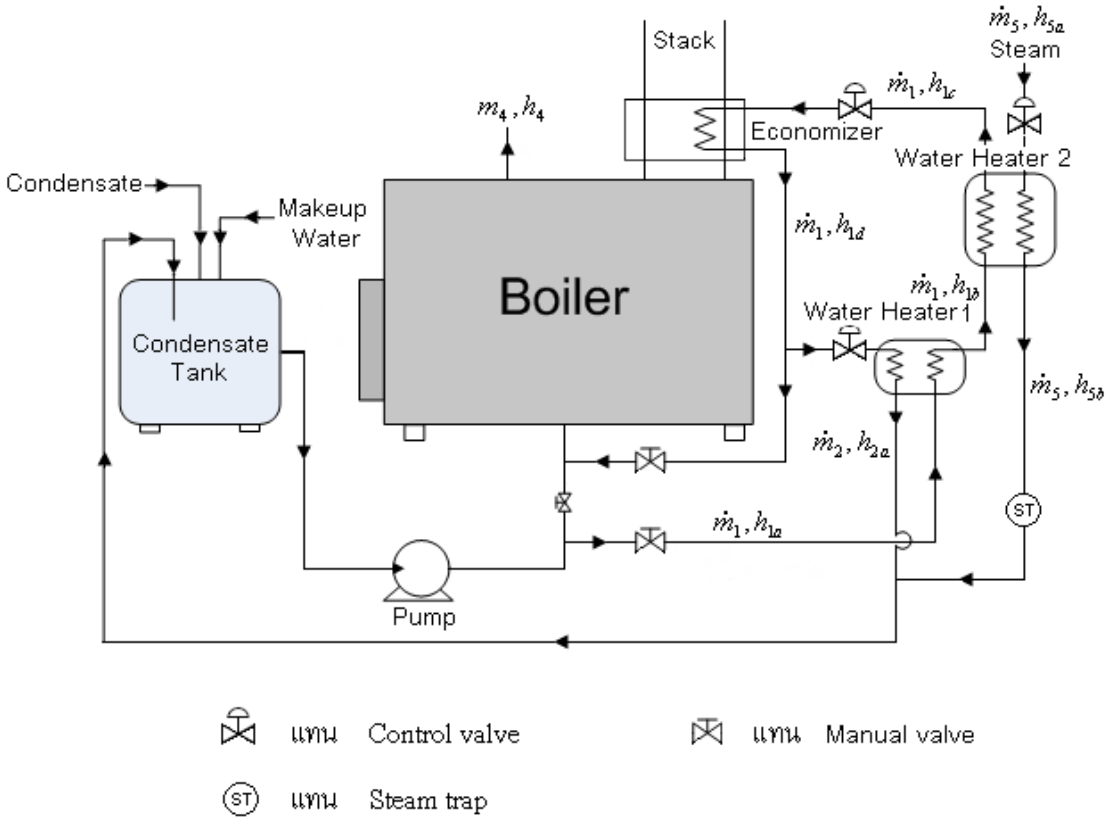
V แทน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบเทียบกับจุดอ้างอิงภายนอก

z แทน ระดับของระบบเทียบกับจุดอ้างอิงภายนอก

i แทน ทางเข้า

e แทน ทางออก

สำหรับระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำที่ทำการศึกษาวิจัยนั้นได้ศึกษาเกี่ยวกับสมดุลพลังงาน เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำภายในท่อเมื่อไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1 และ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 2 ตามลำดับ โดยกำหนดตำแหน่ง ṁ และ h แสดงดังภาพ




ภาพที่ 3.10 สัญลักษณ์อัตราการไหลและเอนทาลปีตำแหน่งแหน่งต่างๆ

### 3.5.1 กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1

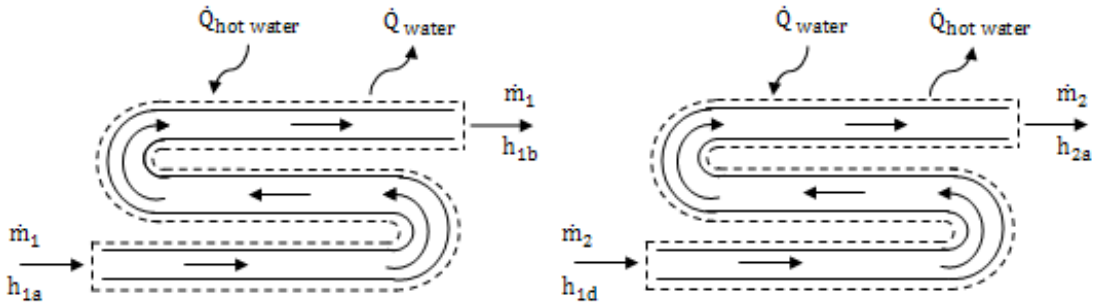
ในการใช้กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 นั้น มีข้อพิจารณาตัวแปรแต่ละอย่างได้ดังนี้

1) $\Delta E_{CV} = 0$ เนื่องจากในกระบวนการมีการไหลแบบคงตัว

2) $\dot{W} \cong 0$ เนื่องจากไม่มีงานผ่านขอบเขตของระบบ

3) $\Delta ke \cong 0,\ \Delta pe \cong 0$ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานงานจลน์มีน้อยมาก จึงไม่มีการคิดผลจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งสองรูปนี้

4) $\dot{Q}_{water} = \dot{Q}_{hot\ water}$ เนื่องจากภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เท่ากันระหว่างน้ำที่ออกจากปั๊มและน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ เพียงแต่มีทิศทางตรงข้ามกันเท่านั้น




ก. ข.

ภาพที่ 3.11 ก. ปริมาตรควบคุมของท่อน้ำออกจากปั๊มภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1

ข. ปริมาตรควบคุมของท่อน้ำร้อนออกจากอีโคโนไมเซอร์ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1

จากกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 สามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_1 (h_{1b} - h_{1a}) = \dot{m}_2 (h_{1d} - h_{2a}) \qquad (3.10)$$

เมื่อ $\dot{m}_1$ แทน อัตราการไหลของน้ำที่ออกจากปั๊ม (kg/h)

$\dot{m}_2$ แทน อัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (kg/h)

$h_{1a}$ แทน ค่าเอนทาลปีของน้ำที่ออกจากปั๊ม (kJ/kg)

$h_{1b}$ แทน ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 (kJ/kg)

$h_{1d}$ แทน ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (kJ/kg)

$h_{2a}$ แทน ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนกลับเข้าสู่ถึงคอนเดนเสต (kJ/kg)

จากกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ในสมการ (3.10) นั้น สามารถหาอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่นำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ($\dot{m}_2$) เพื่อให้น้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 มีอุณหภูมิตามที่ต้องการได้ดังนี้

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_1 (h_{1b} - h_{1a})}{(h_{1d} - h_{2a})} \qquad (3.11)$$

**3.5.2 กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2**

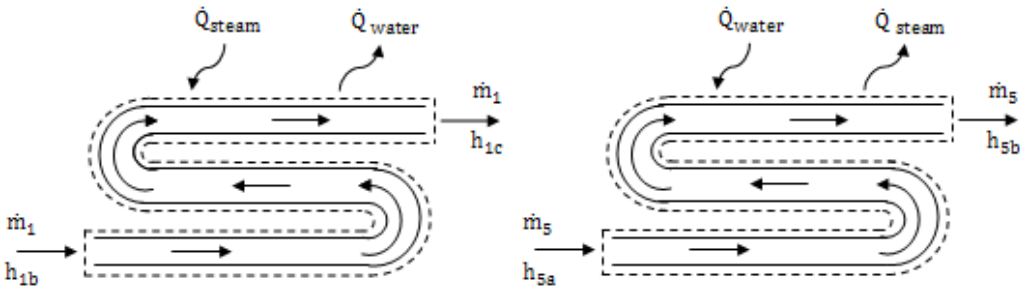
ในการใช้กฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 นั้น มีข้อพิจารณาตัวแปรแต่ละอย่างได้ดังนี้

1) $\Delta E_{CV} = 0$ เนื่องจากในกระบวนการมีการไหลแบบคงตัว

2) $\dot{W} \cong 0$ เนื่องจากไม่มีงานผ่านขอบเขตของระบบ

3) $\Delta ke \cong 0,\ \Delta pe \cong 0$ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานงานจลน์มีน้อยมาก จึงไม่มีการคิดผลจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งสองรูปนี้

4) $\dot{Q}_{steam} = \dot{Q}_{water}$ เนื่องจากภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่เท่ากันระหว่างน้ำที่เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 และไอน้ำที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ เพียงแต่มีทิศทางตรงข้ามกันเท่านั้น




ก. ข.

ภาพที่ 3.12 ก. ปริมาตรควบคุมของท่อน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2

ข. ปริมาตรควบคุมของท่อไอน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2

จากกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 สามารถแสดงสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\dot{m}_1 (h_{1c} - h_{1b}) = \dot{m}_5 (h_{5a} - h_{5b}) \quad (3.12)$$

เมื่อ $\dot{m}_1$ แทน อัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 (kg/h)

$\dot{m}_5$ แทน อัตราการไหลของไอน้ำที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำ (kg/h)

$h_{1b}$ แทน ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 (kJ/kg)

$h_{1c}$ แทน ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (kJ/kg)

$h_{5a}$ แทน ค่าเอนทาลปีของไอน้ำที่ใช้ (kJ/kg)

$h_{5b}$ แทน ค่าเอนทาลปีของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนกลับเข้าสู่ถังคอนเดนเสต (kJ/kg)

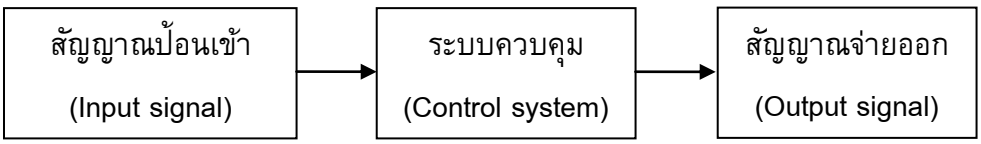
จากกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ในสมการ (3.12) นั้น สามารถหาอัตราการไหลของไอน้ำที่นำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ($\dot{m}_5$) เพื่อให้น้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 มีอุณหภูมิตามที่ต้องการได้ดังนี้

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{m}_1 (h_{1c} - h_{1b})}{(h_{5a} - h_{5b})} \tag{3.13}$$

## 3.6 พื้นฐานของระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ

ระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติ หมายถึง ระบบควบคุมซึ่งสามารถทำงานอย่างต่อเนื่องได้ด้วยตนเอง เมื่อมีการป้อนสัญญาณเริ่มต้นการทำงานเกิดขึ้น โดยที่มนุษย์ไม่ต้องเข้าไปมีส่วนร่วมในกระบวนการควบคุมการทำงานของระบบไม่ว่าระบบควบคุมนั้นจะได้มีการกำหนดรูปแบบในการทำงานให้สามารถทำงานได้เป็นผลสำเร็จตลอดทั้งระบบ หรือการบังคับให้ระบบควบคุมเกิดการทำงานในลักษณะที่จะนำมาซึ่งผลงาน (Output) ที่มีคุณสมบัติสอดคล้องหรือเป็นไปตามเป้าหมายที่ถูกกำหนดไว้ (Set point) ได้ด้วยตัวของมันเอง สำหรับพารามิเตอร์ที่มักจะถูกควบคุมให้มีค่าเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดเอาไว้ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหล ความเร็ว และความดัน

โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุมการทำงาน โดยเงื่อนไขข้อกำหนดที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมจะถูกเรียกว่า “อินพุต” (Input) ส่วนผลของการทำงาน หรือสัญญาณที่ถูกจ่ายออกจากระบบควบคุมการทำงานจะถูกเรียกว่า “เอาต์พุต” (Output) ดังแสดงในภาพที่ 3.13



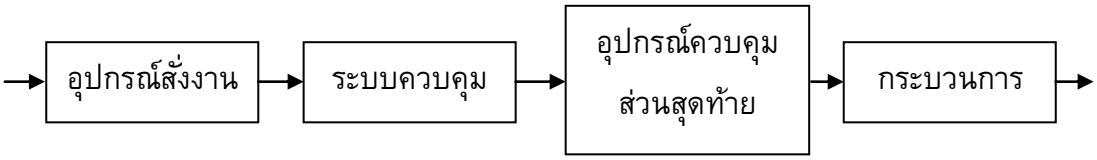

ภาพที่ 3.13 โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบควบคุมการทำงาน

### 3.6.1 วิธีการควบคุมกระบวนการทำงาน

วิธีที่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมพารามิเตอร์ ปริมาณ หรือสัญญาณต่าง ๆ ของกระบวนการทำงานให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการนั้น โดยทั่วไปสามารถกระทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ

1) การควบคุมแบบเปิด (Open loop control)

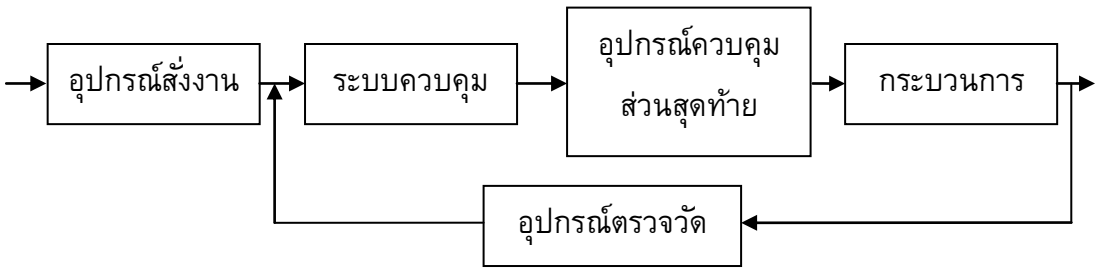
การควบคุมแบบเปิด เป็นลักษณะของการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตของระบบ หรือการทำงานของกระบวนการไม่มีผลต่อการทำงานของระบบควบคุม นั่นคือสัญญาณเอาต์พุตของระบบ หรือกระบวนการไม่ได้ถูกตรวจวัด หรือถูกป้อนกลับมาเพื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ดังนั้นความเที่ยงตรงของการควบคุมแบบเปิดนี้จึงขึ้นอยู่กับการปรับเทียบระบบ




ภาพที่ 3.14 องค์ประกอบของการควบคุมแบบเปิด

2) การควบคุมแบบปิด (Closed loop control)

การควบคุมแบบปิด เป็นลักษณะของการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตของระบบ หรือการทำงานของกระบวนการมีผลโดยตรงต่อการทำงานของระบบควบคุม ดังนั้นหลักการควบคุมแบบวงจรปิดนี้ก็คือ “การควบคุมแบบป้อนกลับ” (Feedback control) ซึ่งสัญญาณป้อนกลับนี้อาจเป็นสัญญาณเอาต์พุตของกระบวนการโดยตรง หรือเป็นสัญญาณที่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสัญญาณเอาต์พุตก็ได้ โดยในวงจรควบคุมแบบปิดค่าที่ถูกตรวจวัดได้จากการทำงานของระบบจะถูกป้อนกลับเข้ามาที่อินพุตของเครื่องควบคุม โดยจะถูกเรียกว่า “การป้อนข้อมูลกลับ” (Feedback)




ภาพที่ 3.15 องค์ประกอบของการควบคุมแบบปิด

คุณภาพของระบบที่ถูกทำให้เกิดขึ้นโดยวงจรควบคุมแบบวงจรปิดก็คือคุณภาพของการควบคุมนั้นเอง เพื่อที่จะทำให้พฤติกรรมในสภาวะซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงมีคุณสมบัติที่ดี หลักเกณฑ์สำคัญที่จะส่งผลทำให้คุณภาพในการควบคุมสูงขึ้น ก็คือ

1) มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในสภาวะคงตัวน้อย

2) มีการเกิดผลตอบสนองพุ่งเกิน (Overshooting) เกิดขึ้นน้อย

3) เมื่อตัวแปรอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลง ตัวแปรที่ถูกควบคุมจะต้องเกิดการเปลี่ยนตามอย่างทันทีทันใด นั่นก็คือ ใช้เวลาในการเข้าสู่สภาวะสมดุน้อย

4) ระบบมีเสถียรภาพ

**3.7 ความรู้เกี่ยวกับวาล์วควบคุม**

วาล์วควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นวาล์วควบคุมที่ใช้ในการควบคุมการไหลของของไหล เช่น ก๊าซ ไอน้ำ น้ำ หรือสารเคมีต่างๆ เพื่อคอยรักษาค่าตัวแปรต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายในการควบคุมที่ผู้ใช้ต้องการให้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ โดยจะมีตัวตรวจจับ (sensors) และตัวรับค่าจากตัวตรวจจับ (Transmitters) คอยรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับค่าตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ โดยมีตัวควบคุมนำค่าตัวแปรต่างๆ เหล่านี้มาตัดสินใจว่าต้องทำอย่างไร โดยส่งค่าตัวแปรกลับไป เมื่อตัวควบคุมได้รับข้อมูลการวัดและเมื่อคำนวณเรียบร้อยแล้ว ตัวควบคุมก็จะส่งค่าไปควบคุมวาล์วควบคุม

วาล์วควบคุมโดยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยส่วนหลัก 2 ส่วนประกอบเข้าด้วยกัน คือ

1) ตัววาล์ว (Valve Body)

ตัววาล์วเป็นส่วนที่สัมผัสกับของไหลโดยตรง

2) หัวขับ (Actuator)

หัวขับมีส่วนประกอบที่จะทำให้วาล์วควบคุมเปลี่ยนตำแหน่งควบคุมเพื่อการตอบสนองต่อสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม นอกจากนั้นแล้วหัวขับยังต้องถูกพัฒนา

ให้มีแรงขับเพียงพอเพื่อทำให้ชนะแรงเสียดทานภายในส่วนประกอบของตัววาล์ว ซึ่งในการศึกษาวิจัยได้ใช้หัวขับเป็นแบบไฟฟ้า

### 3.7.1 คุณสมบัติการไหลผ่านวาล์วควบคุม

คุณสมบัติการไหลผ่านวาล์วควบคุมเป็นสัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลผ่านวาล์วควบคุมและตำแหน่งควบคุม (0 - 100%) โดยคุณสมบัติการไหลผ่านวาล์วควบคุมจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ

1) Quick opening flow characteristic

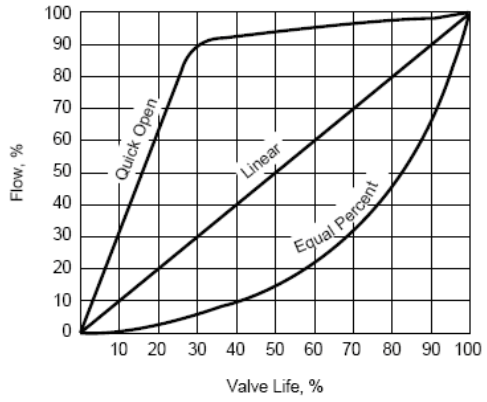
จะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลมากที่สุด โดยเมื่อวาล์วเริ่มเปิดเพียงนิดเดียวจากตำแหน่งเริ่มต้นที่ปิดสุด อัตราการไหลจะไหลได้เต็มที่หรือมากที่สุด ภายในเวลาอันรวดเร็ว โดยวาล์วควบคุมลักษณะนี้ถูกออกแบบมาสำหรับวาล์วแบบปิด – เปิด

2) Linear flow characteristic

จะมีอัตราการไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม โดยค่าความชันของกราฟ จะเท่ากันทุกจุด

3) Equal percentage flow characteristic

สัดส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมจะไม่เป็นเชิงเส้น




ภาพที่ 3.16 คุณสมบัติการไหลผ่านวาล์วควบคุม [14]

สำหรับในการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกใช้วาล์วควบคุมแบบ Equal percentage flow characteristic เนื่องจากในระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้นต้องการควบคุมอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำ เพื่อให้สามารถปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้ตามความต้องการ ซึ่งอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำเมื่อวาล์วควบคุมไปยังตำแหน่งควบคุมต่างๆ นั้น สามารถหาได้จากสมการ [12] ดังนี้

$$\dot{m}_v = \frac{e^x}{\tau}\dot{m}_{max} \tag{3.14}$$

โดย

$$x = (\ln \tau) \times H \tag{3.15}$$

เมื่อ $\dot{m}_v$ แทน อัตราการไหลของของไหลผ่านวาล์วควบคุมเมื่อไปตำแหน่ง H

$\tau$ แทน Valve rangeability

H แทน ตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม (เปิด = 1, ปิด = 0)

$\dot{m}_{max}$ แทน อัตราการไหลสูงสุดของของไหลเมื่อผ่านวาล์วควบคุม

โดยในการเลือกวาล์วควบคุมสำหรับใช้งาน จะพิจารณาตัวแปรหลักให้เป็นไปตามความต้องการตามกระบวนการ ดังนี้

1) สมรรถนะการควบคุม

2) ความดันตกคร่อม

3) อุณหภูมิ

4) ย่านการควบคุม

# บทที่ 4

# วิธีการศึกษาวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว โดยการใช้ความร้อนจากน้ำร้อนบางส่วนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์และเสริมด้วยความร้อนบางส่วนจากไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำของโรงพยาบาลปทุมธานี เนื่องจากการใช้อีโคโนไมเซอร์ จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซเสียต่ำลงมาก อาจถึงจุดที่ทำให้กรดในก๊าซเสียเกิดการกลั่นตัวเป็นของเหลว แล้วทำให้โลหะที่ใช้ทำอุปกรณ์ผุกร่อนได้ หากปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ก็จะมีการนำอีโคโนไมเซอร์ไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายทั้งในอาคารและอุตสาหกรรม

## 4.1 ข้อมูลเบื้องต้นของระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

ระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำที่ทำการศึกษาวิจัยนั้นมีส่วนประกอบ ดังนี้

1) หม้อไอน้ำ ขนาด 3,000 kg/hr โดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

ภาพที่ 4.1 หม้อไอน้ำที่ทำการศึกษาวิจัย

2) อีโคโนไมเซอร์ เป็นอุปกรณ์อุ่นน้ำด้วยก๊าซเสียปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ

ภาพที่ 4.2 อีโคโนไมเซอร์

3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำร้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ไปยังน้ำที่เข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำสูงพอที่ไม่ให้กรดกลั่นตัว

4) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เป็นอุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำภายหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 โดยเมื่อน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ต้องการ วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำบางส่วนที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ จะเปิดให้ไอน้ำไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ได้ตามที่ต้องการ (อุณหภูมิกลั่นตัวของกรด)

ภาพที่ 4.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 และ 2

5) วาล์วควบคุม เป็นอุปกรณ์สำหรับควบคุมอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำ เพื่อเป็นการควบคุมอุณหภูมิของน้ำภายในท่อก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากจากเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

ภาพที่ 4.4 วาล์วควบคุม

6) อุปกรณ์ประกอบอื่นๆ เช่น ถังคอนเดนเสต ปั๊ม กับดักไอน้ำ อุปกรณ์วัดอัตราการไหล อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ และอุปกรณ์วัดความดัน

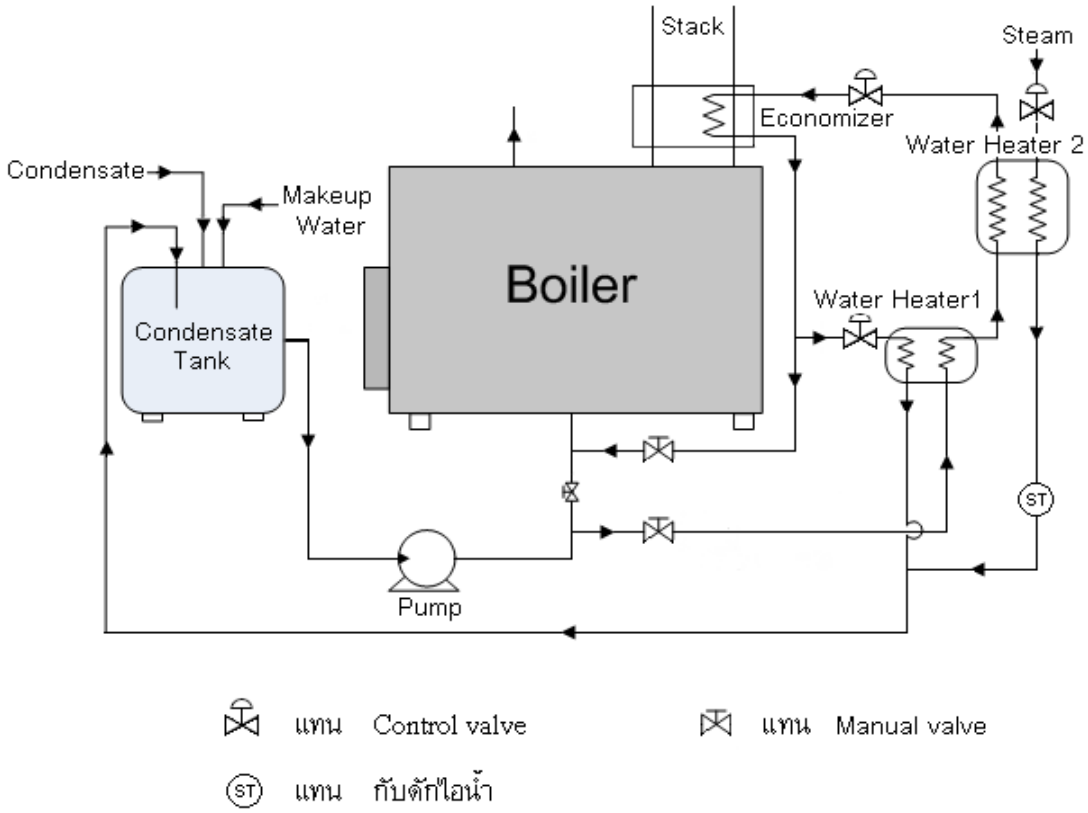
ภาพที่ 4.5 ถังคอนเดนเสต

ภาพที่ 4.6 ปั๊มน้ำ

**4.2 การทำงานของระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์**

ในการเริ่มต้นการทำงานของระบบนั้น น้ำจะถูกปั๊มเข้าหม้อไอน้ำโดยตรง เมื่อหม้อไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำที่ความดันตามที่ต้องการได้แล้วนั้น วาล์วที่ควบคุมการไหลของน้ำเข้าหม้อไอน้ำโดยตรงนั้นจะถูกปิด แล้วเปิดวาล์วให้น้ำไหลผ่านเข้าสู่ระบบอุ่นน้ำที่ทำการศึกษาวิจัย ซึ่งน้ำจะไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 โดยแลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำร้อนบางส่วนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ ต่อจากนั้นน้ำภายในท่อจะไหลไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำบางส่วนที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ ทำให้น้ำมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 นี้จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 นี้ จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความนร้อนตัวที่ 1 ต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ (อุณหภูมิกลั่นตัวของกรด) โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 จะเพิ่มอุณหภูมิของน้ำภายในท่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความนร้อนตัวที่ 1 สูงกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ วาล์วที่ควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำเพื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะถูกปิด ทำ

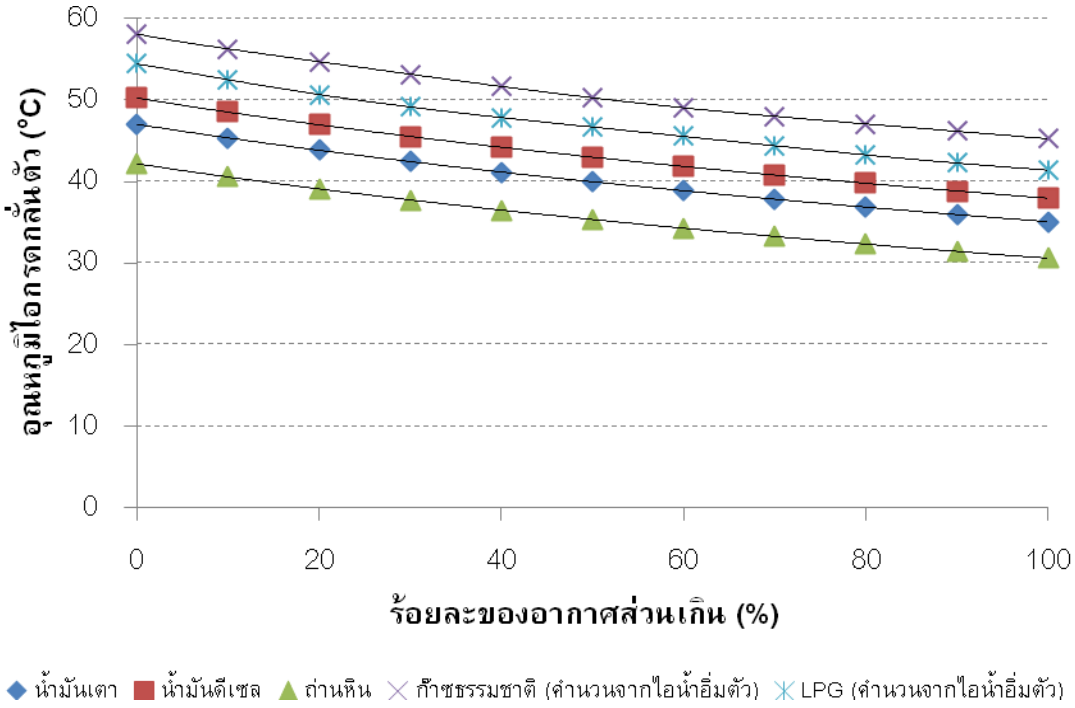
ให้น้ำไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 โดยไม่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอน้ำ และหลังจากนั้นน้ำจะไหลเข้าสู่อีโคโนไมเซอร์โดยรับความร้อนกับก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ออกจากหม้อไอน้ำ ซึ่งน้ำบางส่วนภายหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์แล้วนั้นจะไหลไปยังหม้อไอน้ำและน้ำบางส่วนจะถูกนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความนร้อนตัวที่ 1 ซึ่งแสดงการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ได้ดังภาพที่ 4.7




ภาพที่ 4.7 แผนผังระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ

**4.3 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัว**

จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวต่างกัน โดยเมื่อการเผาไหม้มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหมดพอดี (ร้อยละของอากาศส่วนเกินเป็นศูนย์) ซึ่งเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และถ่านหิน จะมีอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวที่ 59.6 $^{\circ}$C, 54.4 $^{\circ}$C, 50.2 $^{\circ}$C, 47.0 $^{\circ}$C และ 42.2 $^{\circ}$C ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.8




ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวสำหรับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

สำหรับในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัว เมื่อการเผาไหม้มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหมดพอดี เพื่อให้ได้ค่าที่อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ที่สูงสุด

**4.4 ขั้นตอนการทดลอง**

ในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการแบ่งวิธีการควบคุมระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ออกเป็น 3 วิธี ประกอบด้วย

1) การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด

2) การควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด

3) การควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบปิด ซึ่งมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

จากการศึกษาวิจัยทั้ง 3 วิธีข้างต้น ทำให้มีขั้นตอนในการทดลอง 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนการปรับตั้งตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม และส่วนการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

**4.4.1 ส่วนการปรับตั้งตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมในเบื้องต้นก่อนการควบคุมแบบอัตโนมัติ**

ขั้นตอนการทดลองในส่วนนี้ เพื่อต้องการหาค่าอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำภายในท่อ เมื่อผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 และ ตัวที่ 2 ตามลำดับ

1) เปิดน้ำจากปั๊มเข้าสู่ระบบที่ทำการศึกษาวิจัย

2) ปรับตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว โดยทำการปรับทีละตัวที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 เครื่อง จากสมการสมดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3) บันทึกค่าการไหลภายในท่อ เช่น อุณหภูมิของน้ำ อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของไอน้ำ ความดันไอน้ำ และตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม

**4.4.2 ส่วนการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์แบบอัตโนมัติ**

1) เปิดน้ำจากปั๊มเข้าสู่ระบบที่ทำการศึกษาวิจัย

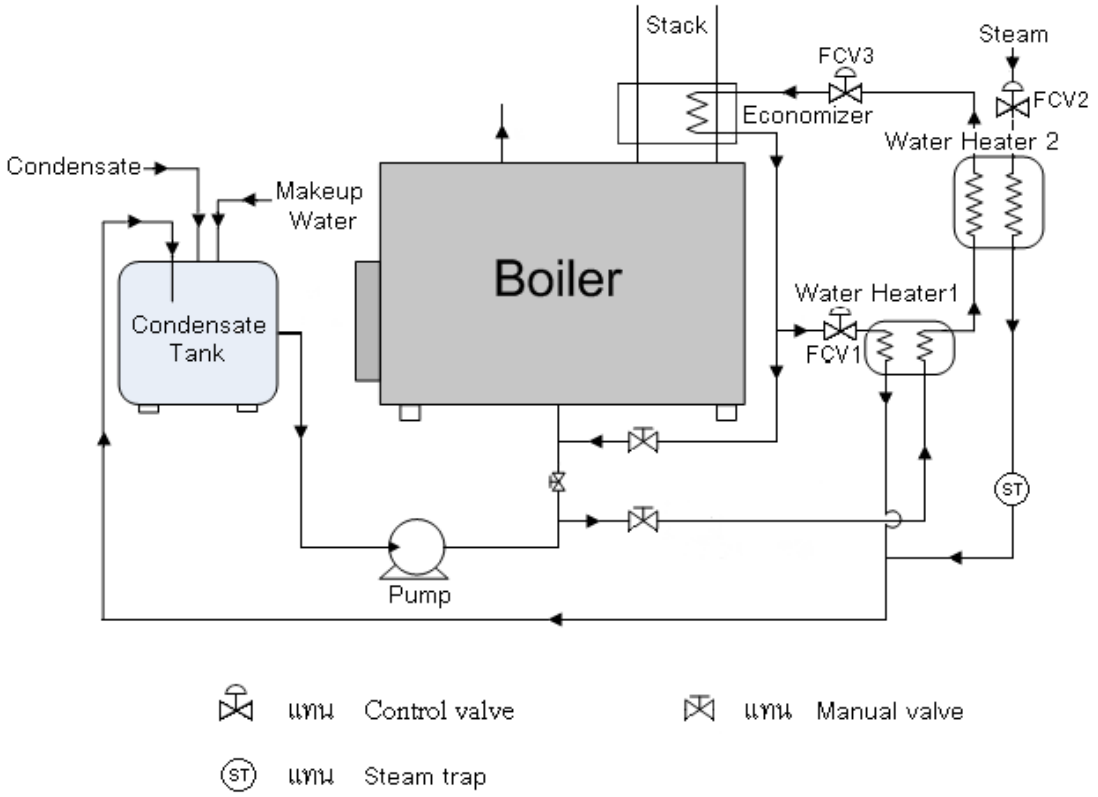
2) ควบคุมอัตราการไหลของน้ำแบบอัตโนมัติจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผ่านวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว

3) บันทึกค่าการไหลภายในท่อ เช่น อุณหภูมิของน้ำ อัตราการไหลของน้ำ อัตราการไหลของไอน้ำ ความดันไอน้ำ และตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม

**4.5 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม**

ในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น ได้ใช้วาล์วควบคุมในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำซึ่งมีทั้งหมด 3 ตัว ประกอบด้วย FCV1 ติดตั้งที่ตำแหน่งท่อไอน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อ

ควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 FCV2 ติดตั้งที่ตำแหน่งท่อน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อให้น้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และ FCV3 ติดตั้งที่ตำแหน่งท่อแบ่งน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 เพื่อเป็นการแบ่งน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์มาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4.9



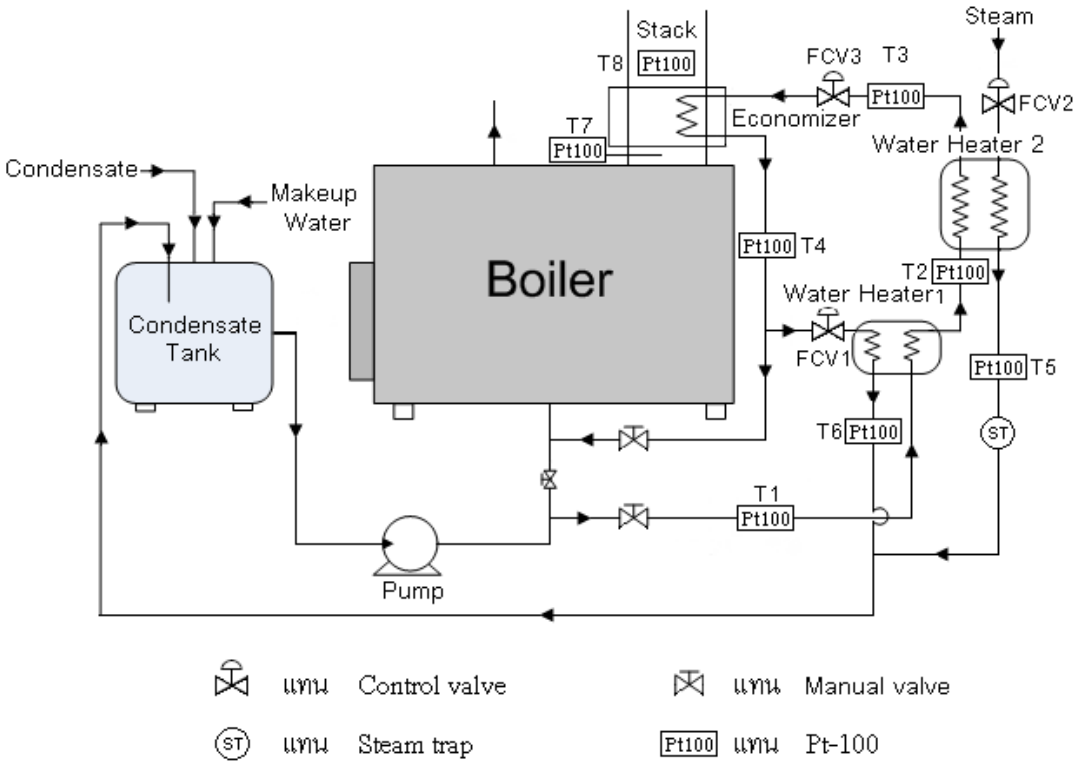

ภาพที่ 4.9 การควบคุมอัตราการไหลผ่านจุดต่างๆ

## 4.6 การติดตั้งอุปกรณ์การวัด

### 4.6.1 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

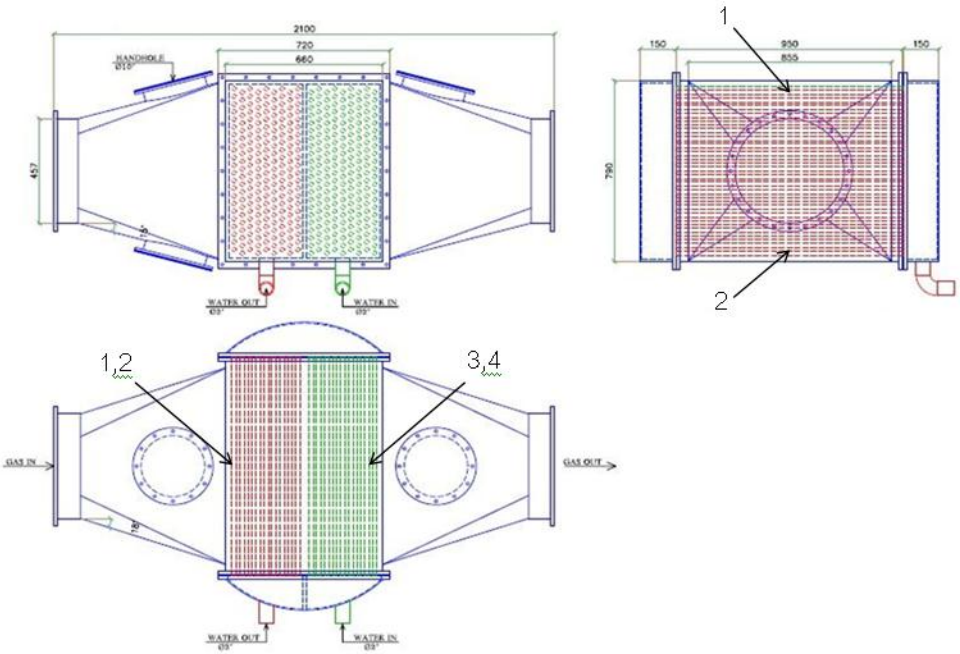
ในการวัดอุณหภูมิของระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำนั้น ใช้ RTD PT100 จำนวน 8 ตัว ประกอบด้วย T1 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อหลังออกจากปั๊มน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากถังคอนเดนเสต T2 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความ

ร้อนตัวที่ 2 เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 T3 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 T4 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ T5 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนกลับเข้าสู่ถังคอนเดนเสต เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนกลับเข้าสู่ถังคอนเดนเสต T6 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนกลับเข้าสู่ถังคอนเดนเสต เพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนกลับเข้าสู่ถังคอนเดนเสต T7 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อก๊าซไอเสียก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อวัดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำภายในอีโคโนไมเซอร์ และT8 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อก๊าซไอเสียหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ เพื่อวัดอุณหภูมิของก๊าซไอเสียก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ แสดงดังภาพที่ 4.10




ภาพที่ 4.10 ตำแหน่งการติดตั้ง RTD PT 100

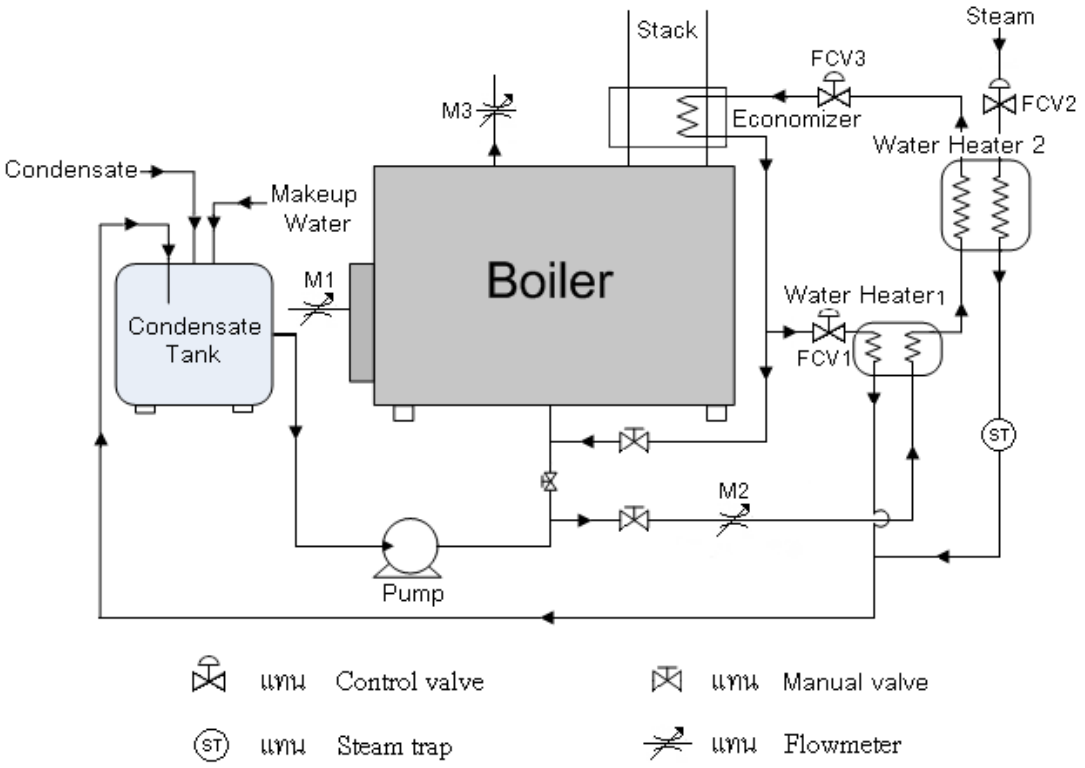
นอกจากนี้ในการวัดอุณหภูมิ ยังมีการใช้เทอร์มอคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์ จำนวน 4 ตัว โดย TC1 และ TC2 จะติดตั้งบริเวณผิวท่อน้ำทางออกจากอีโคโนไมเซอร์ ส่วน TC3 และ TC4 จะติดตั้งบริเวณผิวท่อน้ำทางเข้าอีโคโนไมเซอร์ แสดงดังภาพที่ 4.11




ภาพที่ 4.11 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลชนิด K

### 4.6.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

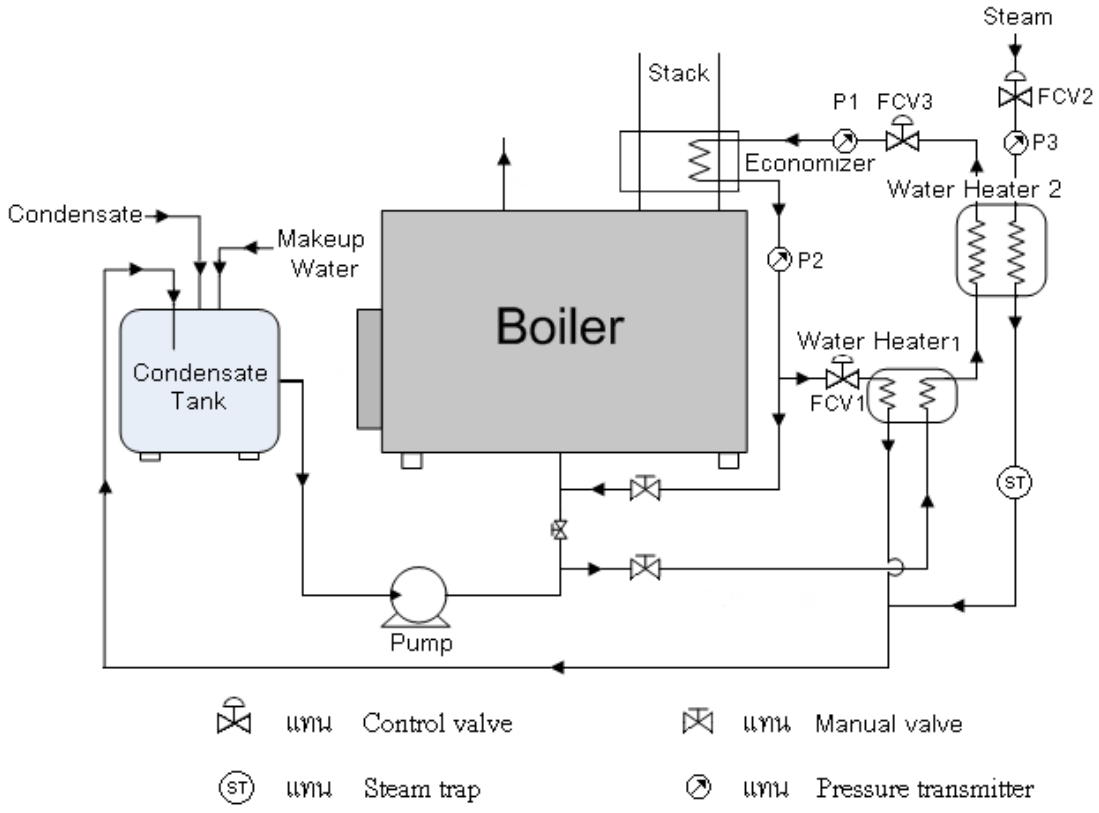
อุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ใช้ในการทดลองนั้น ใช้แบบ Vortex flow meter ซึ่งสามารถใช้ได้กับตัวกลางที่เป็นน้ำ ไอน้ำ และก๊าซ ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลนั้น จะมีทั้งหมด 3 ตัว ประกอบด้วย M1 ติดตั้งที่ตำแหน่งท่อหลังออกจากปั๊มน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 เพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำเมื่อออกจากปั๊ม M2 ติดตั้งที่ตำแหน่งท่อไอน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อวัดอัตราการไหลของไอน้ำ และ M3 ติดตั้งที่ตำแหน่งท่อก๊าซปิโตรเลียมเหลวก่อนเข้าหม้อไอน้ำ เพื่อวัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ แสดงดังภาพที่ 4.12




ภาพที่ 4.12 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

### 4.6.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในการทดลองนั้น สามารถใช้ได้กับตัวกลางที่เป็นน้ำและไอน้ำ ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันนั้น จะมีทั้งหมด 3 ตัว ประกอบด้วย P1 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อวัดความดันของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ P2 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อน้ำหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ เพื่อวัดความดันของน้ำหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ และP3 ติดตั้งที่ตำแหน่งในท่อไอน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อวัดความดันของไอน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 แสดงดังภาพที่ 4.13




ภาพที่ 4.13 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน

## 4.7 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

### 4.7.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

ชนิดและลักษณะของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจวัดและเก็บข้อมูลมีดังนี้

1) RTD PT 100 ที่ใช้ในการทดลองนั้นจะมี 2 ขนาดคือ 6 x 50 มิลลิเมตร สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำภายในท่อ และ 9.5 x 200 มิลลิเมตร สำหรับวัดอุณหภูมิก๊าซไอเสีย ซึ่งมีช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 - 600 ºC เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องและมีความเร็วในการตอบสนองสูง โดยมีสายส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ภาพที่ 4.14 RTD PT 100

2) เทอร์มอคัปเปิลชนิด K ที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นสายเพื่อให้สะดวกต่อการนำไปติดไว้บริเวณผิวท่อของอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งมีช่วงการวัดตั้งแต่ 0 - 1,370 ºC

ภาพที่ 4.15 เทอร์มอคัปเปิลชนิด K

### 4.7.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลที่ใช้คือ Vortex flow meter สามารถวัดอัตราการไหลได้ทั้งของน้ำ ไอน้ำ และก๊าซ โดยใช้หลักการของกลศาสตร์ของไหล เมื่อวัตถุขวางการไหลจะสร้างกระแสวน ซึ่งจำนวนวงของกระแสวนจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของของไหลในระบบ เครื่องจะทำการวัดจำนวนกระแสวนและส่งสัญญาณอนาล็อก 4-20 mA โดยมีสายส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล อุปกรณ์วัดอัตราการไหลนี้สามารถใช้กับตัวกลางที่มีอุณหภูมิ -40 $^{\circ}$C – 300 $^{\circ}$C ความดันไม่เกิน 2.5 MPa และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม -20 $^{\circ}$C – 50 $^{\circ}$C

ภาพที่ 4.16 Vortex flow meter

### 4.7.3 อุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้คือ Pressure Transmitter ยี่ห้อ Trafag สามารถตรวจวัดความดันได้ไม่เกิน 16 บาร์ ใช้กับตัวกลางที่อุณหภูมิ -25 – 125 °C และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม -20 °C – 50 °C โดยมีสายส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ภาพที่ 4.17 Pressure Transmitter

### 4.7.4 วาล์วควบคุม

วาล์วควบคุมที่ใช้ เป็นของบริษัท spirax sarco ใช้หัวขับแบบไฟฟ้าในการบังคับตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม สามารถรับ – ส่ง สัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA โดยใช้ได้กับตัวกลางที่เป็นของเหลว และเป็นไอน้ำ สามารถใช้กับตัวกลางที่มีอุณหภูมิ -10 – 300 °C และทนความดันได้สูงสุด 17 บาร์

ภาพที่ 4.18 วาล์วควบคุม

### 4.7.5 อุปกรณ์รับ – ส่ง ข้อมูลและระบบควบคุม

ในการวัดข้อมูล และควบคุมการทำงานของระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) ชุดระบบรับ – ส่ง สัญญาณ จากบริษัท National Instrument สามารถเลือกชนิดของ Input Module ได้มากมายหลากหลายแบบตามต้องการ ใช้ในการออกแบบโปรแกรม LabVIEW ที่ต้องการรับสัญญาณหลายๆ แบบและหลายๆ ช่องสัญญาณ เหมาะกับการสร้างระบบเริ่มต้นหรือต้นแบบที่ต้องการความสะดวก สะดวกในการต่อ Hardware เพื่อรับสัญญาณต่างๆ มาเข้าคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้โมดูลทั้งหมดจำนวน 4 โมดูล ได้แก่

1.1) NI 9217 ใช้รับสัญญาณจาก RTD PT100 โดยใช้กับทั้งแบบ 3 สาย และ 4 สาย สามารถเชื่อมต่อช่องรับสัญญาณได้ 4 ช่องสัญญาณ

ภาพที่ 4.19 NI 9217

1.2) NI 9203 ใช้รับสัญญาณอินพุท 4 – 20 mA จากอุปกรณ์การวัด สามารถเชื่อมต่อช่องรับสัญญาณได้ 8 ช่องสัญญาณ

ภาพที่ 4.20 NI 9203

1.3) NI 9265 ใช้รับ - ส่งสัญญาณ 4 – 20 mA สามารถเชื่อมต่อช่องกับอุปกรณ์การวัดได้ 4 ช่องสัญญาณ

ภาพที่ 4.21 NI 9265

2) คอมพิวเตอร์ ใช้ในการรับ – ส่ง ข้อมูลไปยังชุดระบบรับ – ส่ง สัญญาณ

ภาพที่ 4.22 ชุดบันทึกข้อมูลและควบคุมการทำงานของระบบ

### 4.7.6 เครื่องวัดและบันทึกอุณหภูมิ (Data logger)

สำหรับการวัดและบันทึกอุณหภูมิได้ใช้ Data Logger DL2100 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลค่าวัดทั้งแบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล โดยข้อมูลนี้จะถูกบันทึกอย่างต่อเนื่องไว้ในหน่วยความจำภายในเครื่อง ซึ่งสัญญาณแบบอนาล็อกสามารถเลือกให้ใช้ตัวตรวจวัดได้หลายแบบ เช่น เทอร์มอคัปเปิล ค่าความต่างศักย์และกระแส 4 -20 mA เป็นต้น

ภาพที่ 4.23 Data Logger DL2100

# บทที่ 5

# การเตรียมอุปกรณ์และการทำงานของโปรแกรม

ในการควบคุมระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว และในการเก็บข้อมูลการตรวจวัดต่างๆ นั้น จะมีการใช้อุปกรณ์ในการควบคุมระบบและในการตรวจวัดค่าต่างๆ ประกอบด้วย อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดอัตราการไหล และวาล์วควบคุม ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ต้องมีการปรับตั้งค่าต่างๆ เพื่อให้ได้ผลการตรวจวัดที่ถูกต้อง

## 5.1 การเตรียมอุปกรณ์วัดความดัน

ในการเตรียมอุปกรณ์สำหรับวัดความดันในระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น โดยในการศึกษาวิจัยได้ใช้อุปกรณ์วัดความดันจำนวน 3 ตัว ซึ่งทั้ง 3 ตัว สามารถตั้งค่าอุปกรณ์การวัดได้จากข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของ Pressure Transmitter ยี่ห้อ Trafag โดยสามารถตรวจวัดความดันได้ไม่เกิน 16 บาร์ และมีการส่งสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA ดังนั้นสามารถตั้งค่าได้จากสมการเส้นตรงดังนี้

$$y_P = ax_P + b \tag{5.1}$$

ในการหาสมการเพื่อนำไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดความดันนั้น จากสมการ (5.1) จะได้สมการทั้งหมด 2 สมการ และตัวแปรทั้งหมด 2 ตัวแปร โดยในสมการที่ 1 ได้กำหนดให้ $x_P = 0.004$ A , $y_P = 0$ บาร์ และสมการที่ 2 ได้กำหนดให้ $x_P = 0.02$ A , $y_P = 16$ บาร์ แสดงดังสมการ (5.2) และ (5.3) ดังนี้

$$0 = a(0.004) + b \tag{5.2}$$

$$16 = a(0.02) + b \tag{5.3}$$

จากสมการ (5.2) และ (5.3) จะได้ a = 1,000 และ b = - 4 ซึ่งเมื่อนำค่า a และ b ที่ได้ไปแทนในสมการ (5.1) จะได้สมการดังนี้

$$y_P = 1000x_P - 4 \tag{5.4}$$

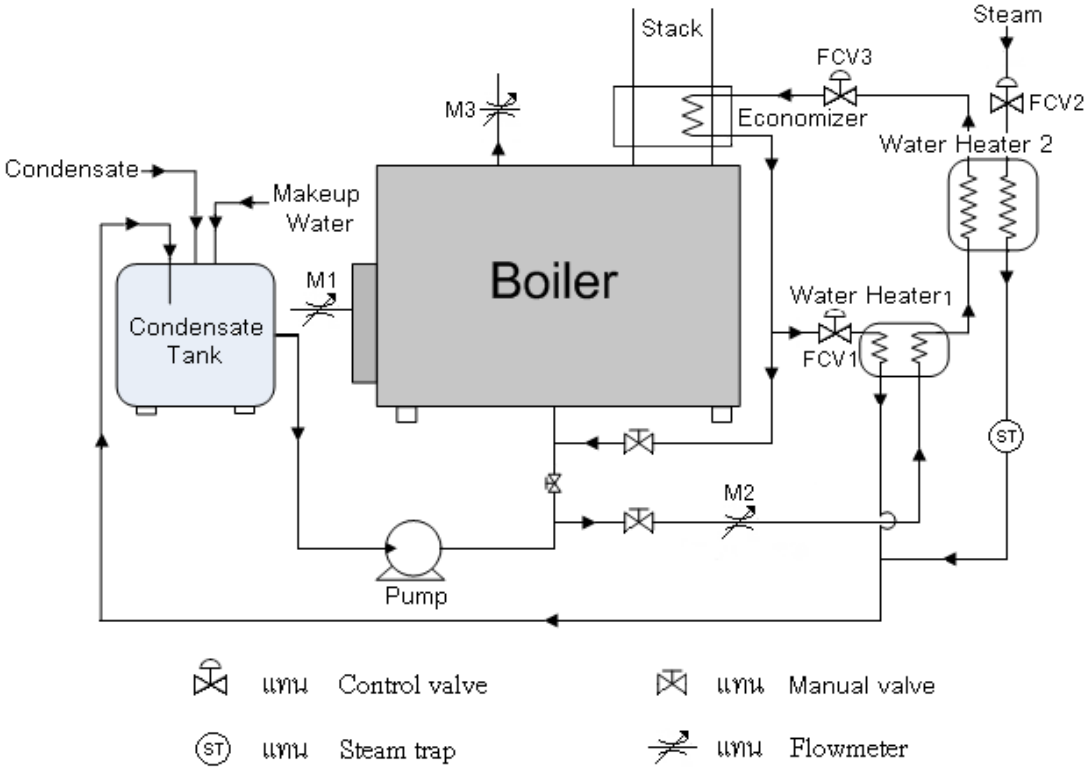
เมื่อ $x_P$ แทน สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดความดัน

$y_P$ แทน ค่าความดันของอุปกรณ์วัดความดัน

ดังนั้น ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดความดัน จะมีการนำสมการ (5.4) ไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์

**5.2 การเตรียมอุปกรณ์วัดอัตราการไหล**

ในการเตรียมอุปกรณ์สำหรับวัดอัตราการไหลในระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น โดยในการศึกษาวิจัยได้ใช้อุปกรณ์วัดอัตราการไหลจำนวน 3 ตัว ซึ่งทั้ง 3 ตัว มีการตั้งค่าที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางที่ต้องการตรวจวัด เช่น ก๊าซปิโตรเลียมเหลว น้ำ และไอน้ำ แสดงดังภาพ




ภาพที่ 5.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลทั้ง 3 ตัว

### 5.2.1 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (M1)

ในการเตรียมอุปกรณ์ได้มีการตั้งค่าตามคุณลักษณะเฉพาะของ Vortex flow meter ที่ใช้ โดยสามารถตรวจวัดอัตราการไหลได้ไม่เกิน 600 kg/h และมีการส่งสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA ดังนั้นสามารถตั้งค่าได้จากสมการเส้นตรงดังนี้

$$y_{V,F} = ax_{V,F} + b \quad (5.5)$$

ในการหาสมการเพื่อนำไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงนั้น จากสมการ (5.5) จะได้สมการทั้งหมด 2 สมการ และตัวแปรทั้งหมด 2 ตัวแปร โดยในสมการที่ 1 ได้กำหนดให้ $x_{V,F}$ = 0.004 A , $y_{V,F}$ = 0 kg/h และสมการที่ 2 ได้กำหนดให้ $x_{V,F}$ = 0.02 A , $y_{V,F}$ = 600 kg/h แสดงดังสมการ (5.6) และ (5.7) ดังนี้

$$0 = a(0.004) + b \quad (5.6)$$

$$600 = a(0.02) + b \quad (5.7)$$

จากสมการ (5.6) และ (5.7) จะได้ a = 37,500 และ b = - 150 ซึ่งเมื่อนำค่า a และ b ที่ได้ไปแทนในสมการ (5.5) จะได้สมการดังนี้

$$y_{V,F} = 37{,}500x_{V,F} - 150 \quad (5.8)$$

เมื่อ $x_{V,F}$ แทน สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

$y_{V,F}$ แทน ค่าอัตราการไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

ดังนั้น ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหล จะมีการนำสมการ (5.8) ไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์

### 5.2.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำหลังออกจากปั๊ม (M2)

ในการเตรียมอุปกรณ์ได้มีการตั้งค่าตามคุณลักษณะเฉพาะของ Vortex flow meter ที่ใช้ โดยสามารถตรวจวัดอัตราการไหลได้ไม่เกิน 12,000 kg/h และมีการส่งสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA ดังนั้นสามารถตั้งค่าได้จากสมการเส้นตรงดังนี้

$$y_{V,W} = ax_{V,W} + b \quad (5.9)$$

ในการหาสมการเพื่อนำไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำภายในท่อนั้น จากสมการ (5.9) จะได้สมการทั้งหมด 2 สมการ และตัวแปรทั้งหมด 2 ตัวแปร โดยในสมการที่ 1 ได้กำหนดให้ $x_{V,W}$ = 0.004 A , $y_{V,W}$ = 0 kg/h และสมการที่ 2 ได้กำหนดให้ $x_{V,W}$ = 0.02 A , $y_{V,W}$ = 12,000 kg/h แสดงดังสมการ (5.10) และ (5.11) ดังนี้

$$0 = a(0.004) + b \quad (5.10)$$

$$12{,}000 = a(0.02) + b \quad (5.11)$$

จากสมการ (5.6) และ (5.7) จะได้ a = 750,000 และ b = - 3,000 ซึ่งเมื่อนำค่า a และ b ที่ได้ไปแทนในสมการ (5.5) จะได้สมการดังนี้

$$y_{V,W} = 750{,}000x_{V,W} - 3{,}000 \quad (5.12)$$

เมื่อ $x_{V,W}$ แทน สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ

$y_{V,W}$ แทน ค่าอัตราการไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำ

ดังนั้น ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหล จะมีการนำสมการ (5.12) ไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์

### 5.2.3 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ (M3)

ในการเตรียมอุปกรณ์ได้มีการตั้งค่าตามคุณลักษณะเฉพาะของ Vortex flow meter ที่ใช้ โดยสามารถตรวจวัดอัตราการไหลได้ไม่เกิน 3,360 kg/h และมีการส่งสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA ดังนั้นสามารถตั้งค่าได้จากสมการเส้นตรงดังนี้

$$y_{V,S} = ax_{V,S} + b \quad (5.13)$$

ในการหาสมการเพื่อนำไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำภายในท่อนั้น จากสมการ (5.9) จะได้สมการทั้งหมด 2 สมการ และตัวแปรทั้งหมด 2 ตัวแปร โดยในสมการที่ 1 ได้กำหนดให้ $x_{V,S}$ = 0.004 A , $y_{V,S}$ = 0 kg/h และสมการที่ 2 ได้กำหนดให้ $x_{V,S}$ = 0.02 A , $y_{V,S}$ = 3,360 kg/h แสดงดังสมการ (5.14) และ (5.15) ดังนี้

$$0 = a(0.004) + b \tag{5.14}$$

$$3{,}360 = a(0.02) + b \tag{5.15}$$

จากสมการ (5.6) และ (5.7) จะได้ a = 210,000 และ b = - 840 ซึ่งเมื่อนำค่า a และ b ที่ได้ไปแทนในสมการ (5.5) จะได้สมการดังนี้

$$y_{V,S} = 210{,}000x_{V,S} - 840 \tag{5.16}$$

เมื่อ $x_{V,S}$ แทน สัญญาณอนาล็อกของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ

$y_{V,S}$ แทน ค่าอัตราการไหลของอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของไอน้ำ

ดังนั้น ในการตั้งค่าอุปกรณ์วัดอัตราการไหล จะมีการนำสมการ (5.16) ไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์

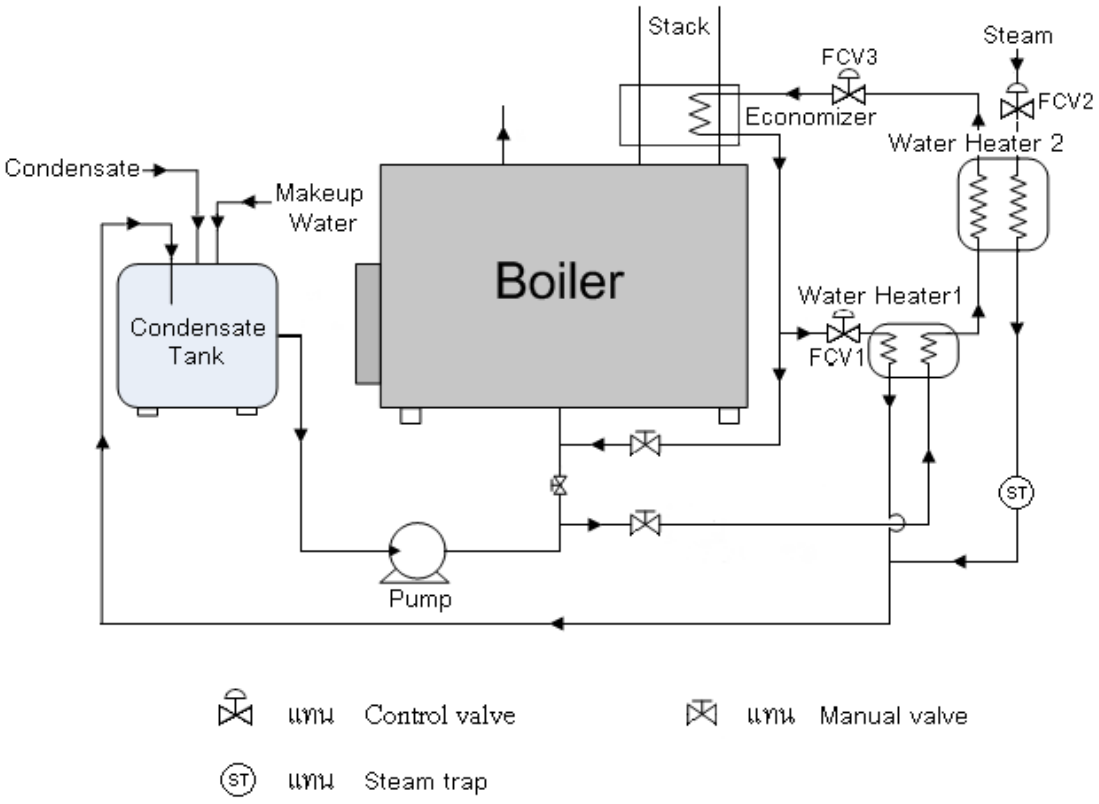
**5.3 การเตรียมวาล์วควบคุม**

สำหรับวาล์วควบคุมที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ประกอบด้วยวาล์วควบคุมทั้งหมดจำนวน 3 ตัว โดยตำแหน่งวาล์วควบคุมแต่ละตัวแสดงดังภาพที่ 4.9 ประกอบด้วย

1) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)

2) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)

3) วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)

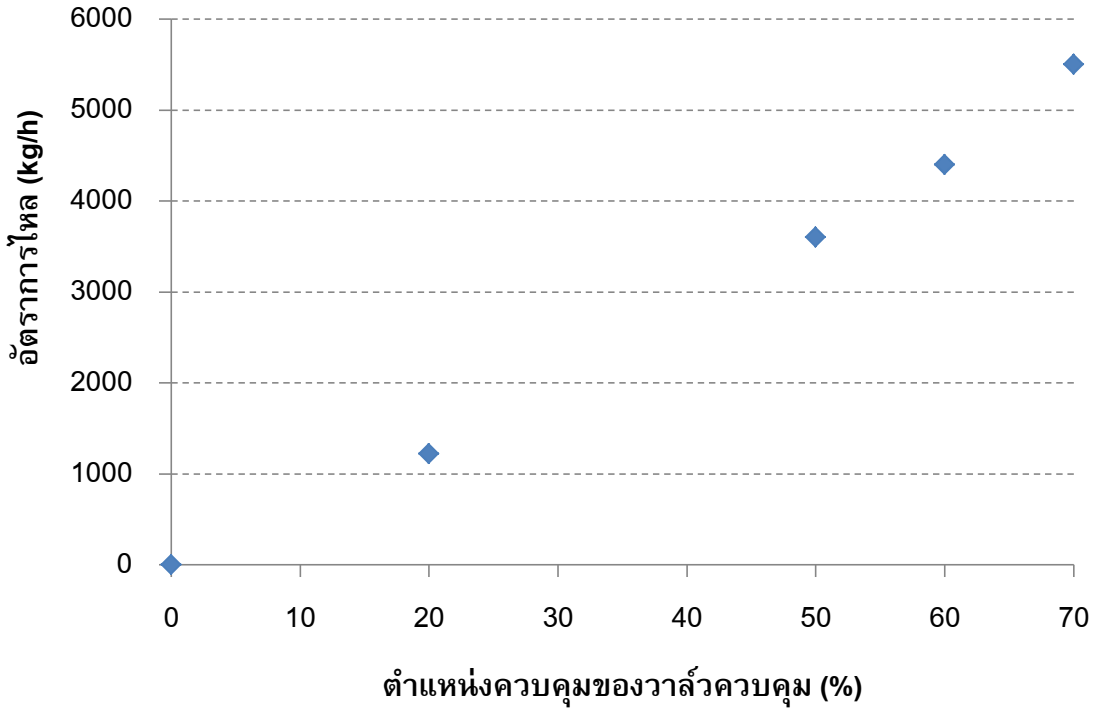



ภาพที่ 5.2 ตำแหน่งการติดตั้งวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว

**5.3.1 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)**

ในการหาสมการตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1) นั้น เริ่มจากในการทดลองเบื้องต้นได้ทำการปรับตำแหน่งควบคุมของ FCV1 เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำเมื่อวาล์วควบคุมไปตำแหน่งควบคุมต่างๆ

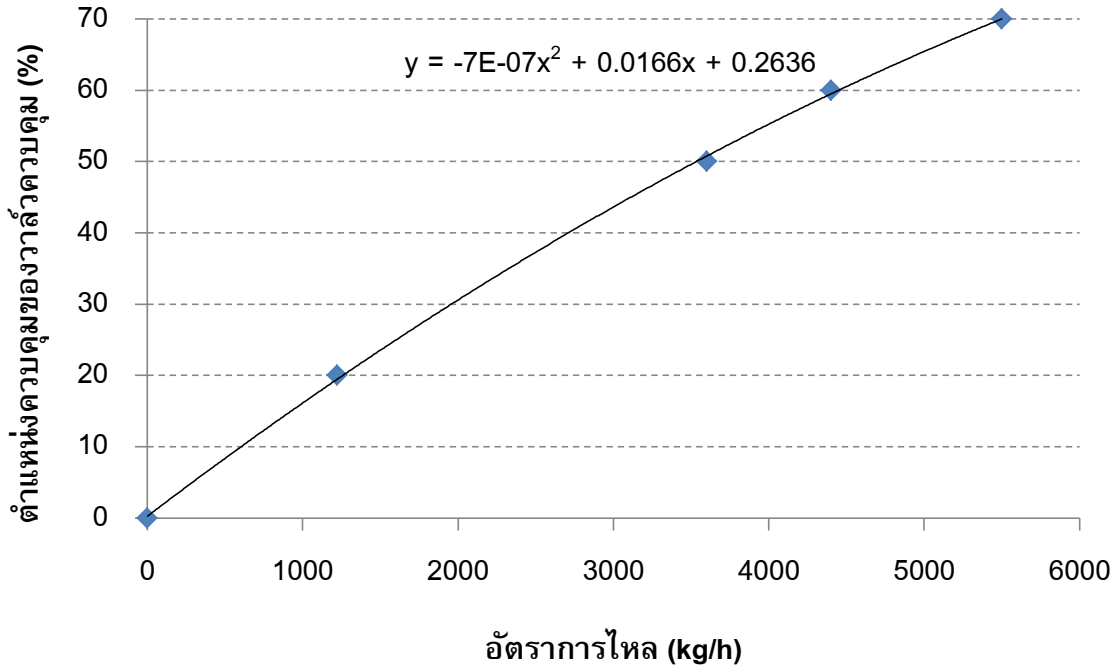
ในการหาตำแหน่งควบคุมการปรับอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์นั้น ในการศึกษาวิจัยได้พิจารณาจากการปรับตำแหน่งควบคุมเปิดที่มากที่สุดที่ไม่ทำให้ปริมาณการไหลของน้ำป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำลดลง ซึ่งจากการทดลองพบว่าการปรับวาล์วควบคุมปริมาณน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ตำแหน่งควบคุมเปิด 50% จะเป็นตำแหน่งควบคุมเปิดที่มากที่สุดที่ไม่ทำให้ระดับน้ำภายในหม้อไอน้ำลดลง โดยอัตราการไหลของน้ำผ่านวาล์วควบคุมเมื่อวาล์วควบคุมไปตำแหน่งควบคุมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5.3




ภาพที่ 5.3 อัตราการไหลของน้ำผ่าน FCV1 ที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ

จากภาพ พบว่า เมื่อวาล์วควบคุมเปิด 50% น้ำจะไหลผ่านวาล์วควบคุมด้วยอัตราเร็วประมาณ 3,600 kg/h ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้ำ 53.7% ของปริมาณน้ำทั้งหมด (ประมาณ 6,700 kg/h) ที่ออกจากปั๊มเข้าสู่ระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว

ซึ่งในการตั้งค่าการทำงานของ FCV1 นี้ สามารถตั้งค่าได้โดยใช้ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ผ่านวาล์วควบคุม (ปริมาณน้ำร้อนที่ต้องการนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับน้ำที่ออกจากปั๊ม ภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1) เพื่อหาตำแหน่งวาล์วควบคุมที่เหมาะสมต่อไป ดังภาพที่ 5.4




ภาพที่ 5.4 การหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV1

ในการหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV1 นั้น สามารถหาสมการจากภาพที่ 5.4 ดังนี้

$$S_{o,1} = -0.0000001\dot{m}_{v1} + 0.016\dot{m}_{v1} + 0.263 \qquad (5.17)$$

เมื่อ $S_{o,1}$ แทน ส่งค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV1

$\dot{m}_{v1}$ แทน อัตราการไหลของน้ำร้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ผ่าน FCV1

จากสมการ (5.17) เป็นสมการการตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม เมื่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ต้องการน้ำร้อนปริมาณไม่เกิน 3,600 kg/h มาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่ออกจากปั๊มภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 วาล์วควบคุมจะไปยังตำแหน่งควบคุมต่างๆ ดังสมการ (5.17) แต่ถ้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ต้องการน้ำร้อนในปริมาณที่มากกว่า 3,600 kg/h FCV1 ก็จะเปิดได้เต็มที่ 50% เท่านั้น เนื่องจากถ้าวาล์วควบคุมเปิดมากกว่านี้ จะทำให้ระดับน้ำภายในหม้อไอน้ำลดลงได้

ดังนั้น ในการตั้งค่าวาล์วควบคุมตัวที่ 1 จะมีการนำสมการ (5.17) ไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์

**5.3.2 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)**

สำหรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2) นี้ จะแบ่งวิธีการตั้งค่าออกเป็น 2 วิธี คือ

1) ตั้งค่าตำแหน่งควบคุมตามสมการของวาล์วควบคุม

2) ตั้งค่าตำแหน่งควบคุมตามค่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง

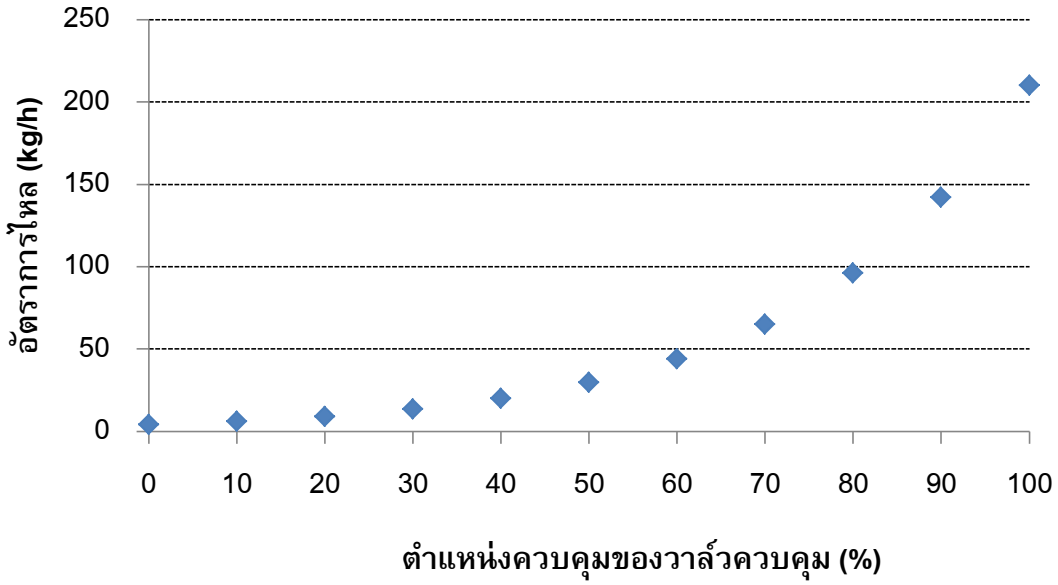
ซึ่งแต่ละวิธีสามารถอธิบายได้ดังนี้

**1) ตั้งค่าตำแหน่งควบคุมตามสมการของวาล์วควบคุม**

ในการหาอัตราการไหลของไอน้ำเมื่อไหลผ่านวาล์วควบคุมเมื่อวาล์วควบคุมไปยังตำแหน่งต่างๆ นั้น สามารถหาได้จากสมการของวาล์วควบคุมตามสมการ (3.14)

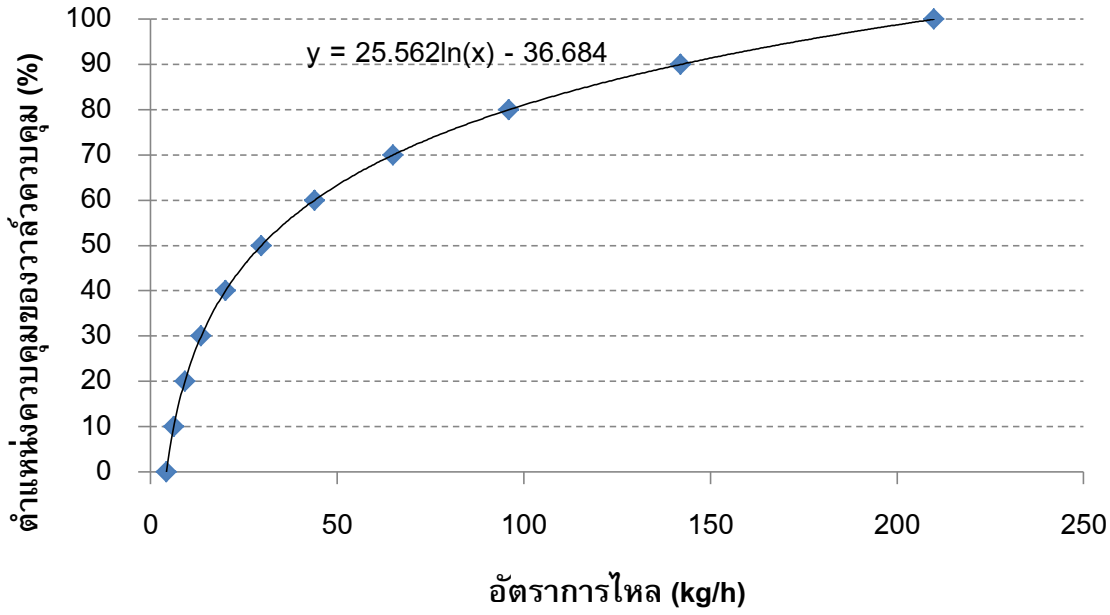
ในขั้นตอนแรก ต้องทำการทดลองโดยการเปิดวาล์วควบคุมที่ตำแหน่งควบคุมเปิด 100% เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำสูงสุดผ่านวาล์วควบคุมเมื่อวาล์วควบคุมเปิด 100% ซึ่งจากการทดลองพบว่าไอน้ำเมื่อไหลผ่านวาล์วควบคุมเมื่อวาล์วควบคุมเปิด 100% จะมีอัตราการไหลสูงสุด 210 kg/h

หลังจากนั้นจึงนำค่าอัตราการไหลสูงสุดที่ได้จากการทดลอง นำไปหาค่าอัตราการไหลของไอน้ำผ่านวาล์วควบคุมตามสมการ (3.14) ทำให้ทราบตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมว่าควรไปยังตำแหน่งใด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของไอน้ำผ่านวาล์วควบคุมกับตำแหน่งตำแหน่งควบคุมตามสมการของวาล์วควบคุมแสดงดังภาพที่ 5.5




ภาพที่ 5.5 อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV2 ที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ ตามสมการของวาล์วควบคุม

ซึ่งในการตั้งค่าการทำงานของ FCV2 นี้ สามารถตั้งค่าได้โดยใช้ค่าอัตราการไหลของไอน้ำที่ต้องการนำมาใช้ในการอุ่นน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อหาตำแหน่งควบคุมที่เหมาะสมต่อไป ดังภาพที่ 5.6




ภาพที่ 5.6 การหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV2 ตามสมการของวาล์วควบคุม

ในการหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV2 ให้ไปยังตำแหน่งควบคุมต่างๆ นั้น สามารถใช้สมการจากภาพที่ 5.6 ดังนี้

$$S_{o,2} = 25.562 \ln(\dot{m}_{v2}) - 36.684 \quad (5.18)$$

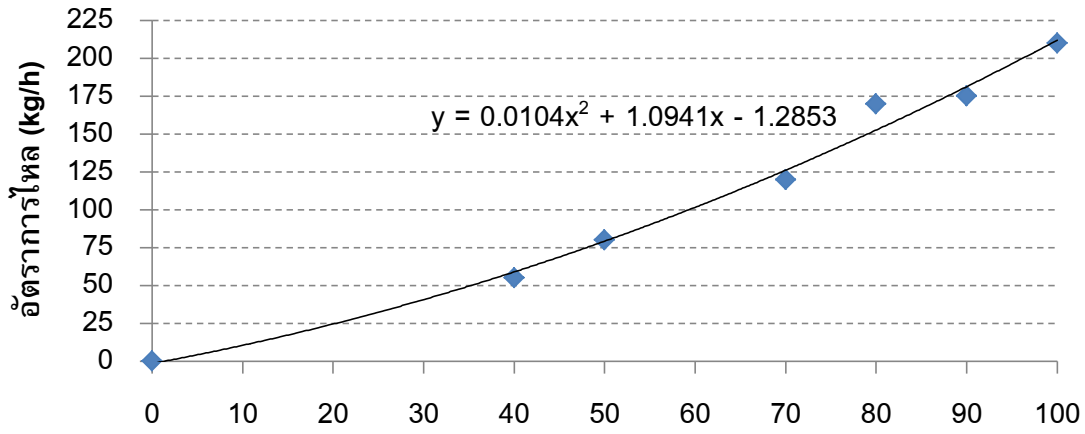
เมื่อ $S_{o,2}$ แทน ส่งค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV2

$\dot{m}_{v2}$ แทน อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV2

ดังนั้น ในการตั้งค่า FCV2 จะมีการนำสมการ (5.18) ไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์

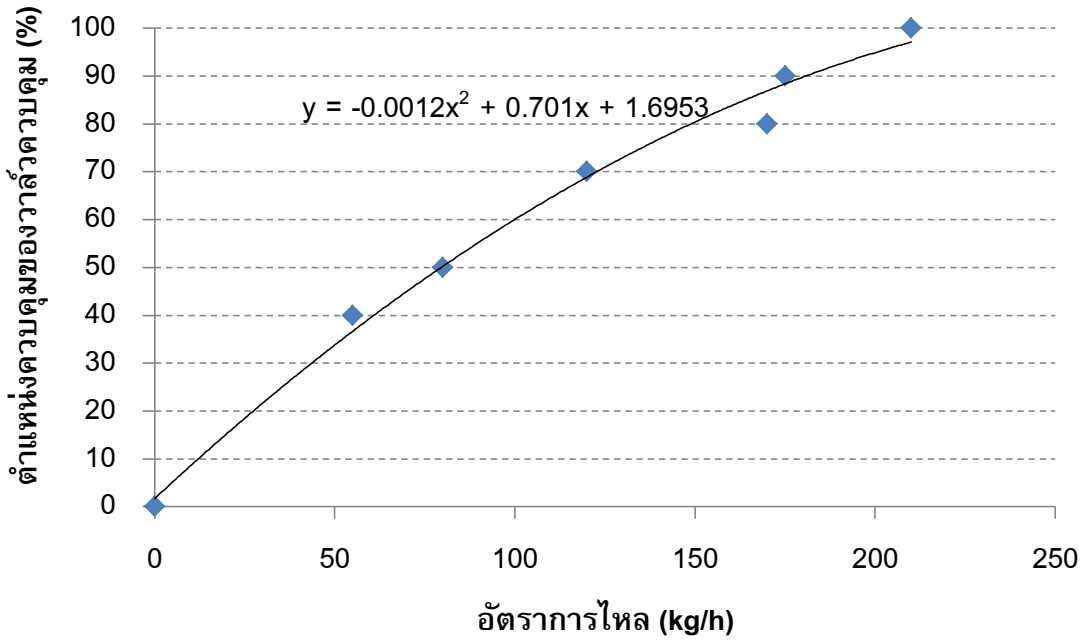
**2) ตั้งค่าตำแหน่งควบคุมตามค่าอัตราการไหลที่ได้จากการทดลอง**

ในการหาอัตราการไหลของไอน้ำเมื่อไหลผ่านวาล์วควบคุม เมื่อวาล์วควบคุมไปยังตำแหน่งควบคุมต่างๆ นั้น สามารถหาได้จากการปรับตำแหน่งควบคุม เพื่อหาค่าอัตราการไหลขอไอน้ำผ่านวาล์วควบคุมที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่า อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV2 เมื่อวาล์วควบคุมไปตำแหน่งควบคุมต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5.7




ภาพที่ 5.7 อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV2 ที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ ตามสมการที่ได้จากการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม

ซึ่งในการตั้งค่าการทำงานของ FCV2 นี้ สามารถตั้งค่าได้โดยใช้ค่าอัตราการไหลของไอน้ำที่ต้องการนำมาใช้ในการอุ่นน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อหาตำแหน่งควบคุมที่เหมาะสมต่อไป ดังภาพที่ 5.8




ภาพที่ 5.8 การหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV2 ตามสมการที่ได้จากการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม

ในการหาสมการตำแหน่งควบคุมของ FCV2 ตามค่าอัตราการไหลของไอน้ำที่ต้องการในการนำมาใช้ในการอุ่นน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 นั้น สามารถใช้สมการจากภาพที่ 5.8 ดังนี้

$$S_{o,2} = -0.001(\dot{m}_{v2})^2 + 0.701\dot{m}_{v2} + 1.695 \qquad (5.19)$$

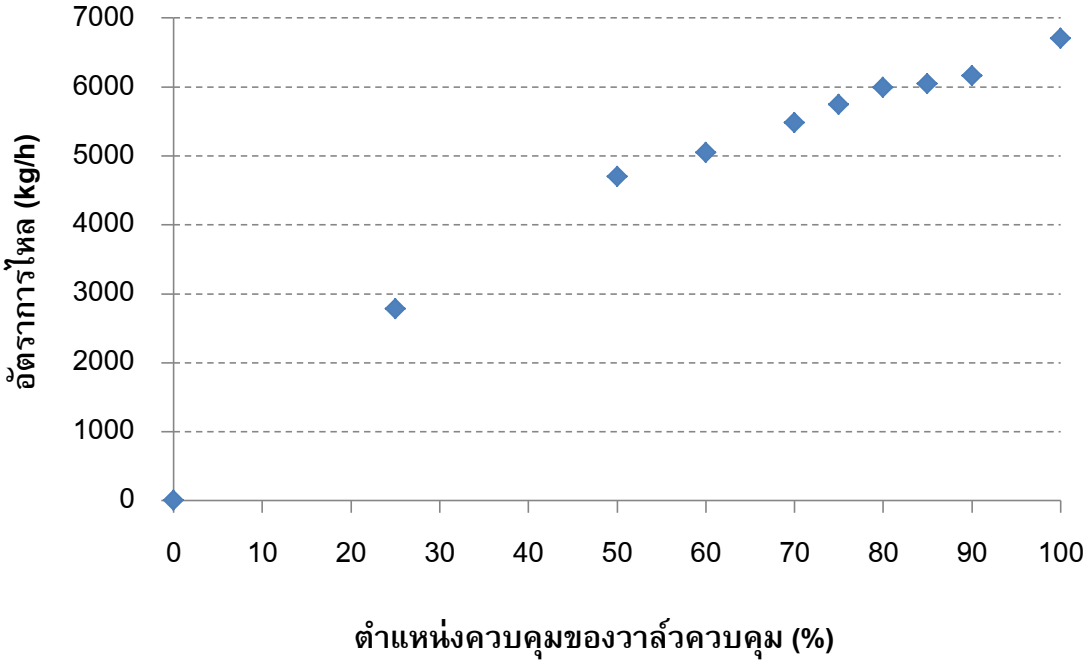
เมื่อ $S_{o,2}$ แทน ส่งค่าตำแหน่งควบคุมของ FCV2

$\dot{m}_{v2}$ แทน อัตราการไหลของไอน้ำผ่าน FCV2

ดังนั้น ในการตั้งค่า FCV2 จะมีการนำสมการ (5.19) ไปใช้ในการตั้งค่าอุปกรณ์

### 5.3.3 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)

ในการหาสมการตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3) นั้น เริ่มจากในการทดลองเบื้องต้นได้ทำการปรับตำแหน่งควบคุมของ FCV3 ไปยังตำแหน่งควบคุมต่างๆ เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ที่ไม่ทำให้ระดับน้ำในหม้อไอน้ำลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งควบคุ กับอัตราการไหลของน้ำภายในท่อก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5.9




ภาพที่ 5.9 อัตราการไหลน้ำผ่าน FCV3 ที่ตำแหน่งควบคุมต่างๆ

จากการทดลองในเบื้องต้น พบว่า เมื่อวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งควบคุม 75% ซึ่งมีอัตราการไหลของน้ำประมาณ 5,738.87 kg/h จะไม่ทำให้ระดับน้ำในหม้อไอน้ำลดลง ซึ่งถ้าตำแหน่งควบคุมอยู่ในตำแหน่งควบคุมที่น้อยกว่า 75% จะทำให้ระดับน้ำในหม้อไอน้ำลดลง เนื่องจากต้องมีการแบ่งน้ำบางส่วนภายหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ไปใช้ในการอุ่นน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 อีกด้วย

ดังนั้น ในการหาสมการตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมตัวที่ 3 นี้ ได้มีการกำหนดตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมจากอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ สำหรับการไปยัง

ตำแหน่งควบคุมต่างๆ ของ FCV3 นี้ ถ้าน้ำอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด วาล์วควบคุมจะเปิด 75% แต่ถ้าน้ำมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่กำหนด วาล์วควบคุมจะเปิด 100%

**5.4 การบันทึกผลและการควบคุมโดยผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์**

ในการบันทึกผลจากการทดลองและการควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์โดยผ่านวาล์วควบคุมนั้นได้ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการบันทึกและควบคุมการทำงาน โดยได้มีการกำหนดอุณหภูมิก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ไว้ที่ 70 °C เนื่องจากหม้อไอน้ำที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนั้น ได้ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยเมื่อเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละของอากาศส่วนเกินเท่ากับ 0%) ก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะมีอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัว 54.4 °C ดังนั้นจึงกำหนดให้อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ให้อยู่ที่ 70 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของก๊าซปิโตรเลียมเหลว

**5.4.1 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์**

สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้นจะใช้วาล์วควบคุมในการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเพื่อไม่ให้อุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดการกลั่นตัว

ซึ่งการออกแบบวิธีการกระบวนการทำงานของวาล์วควบคุมนั้นจะออกแบบ 3 วิธี คือ

1) ใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด

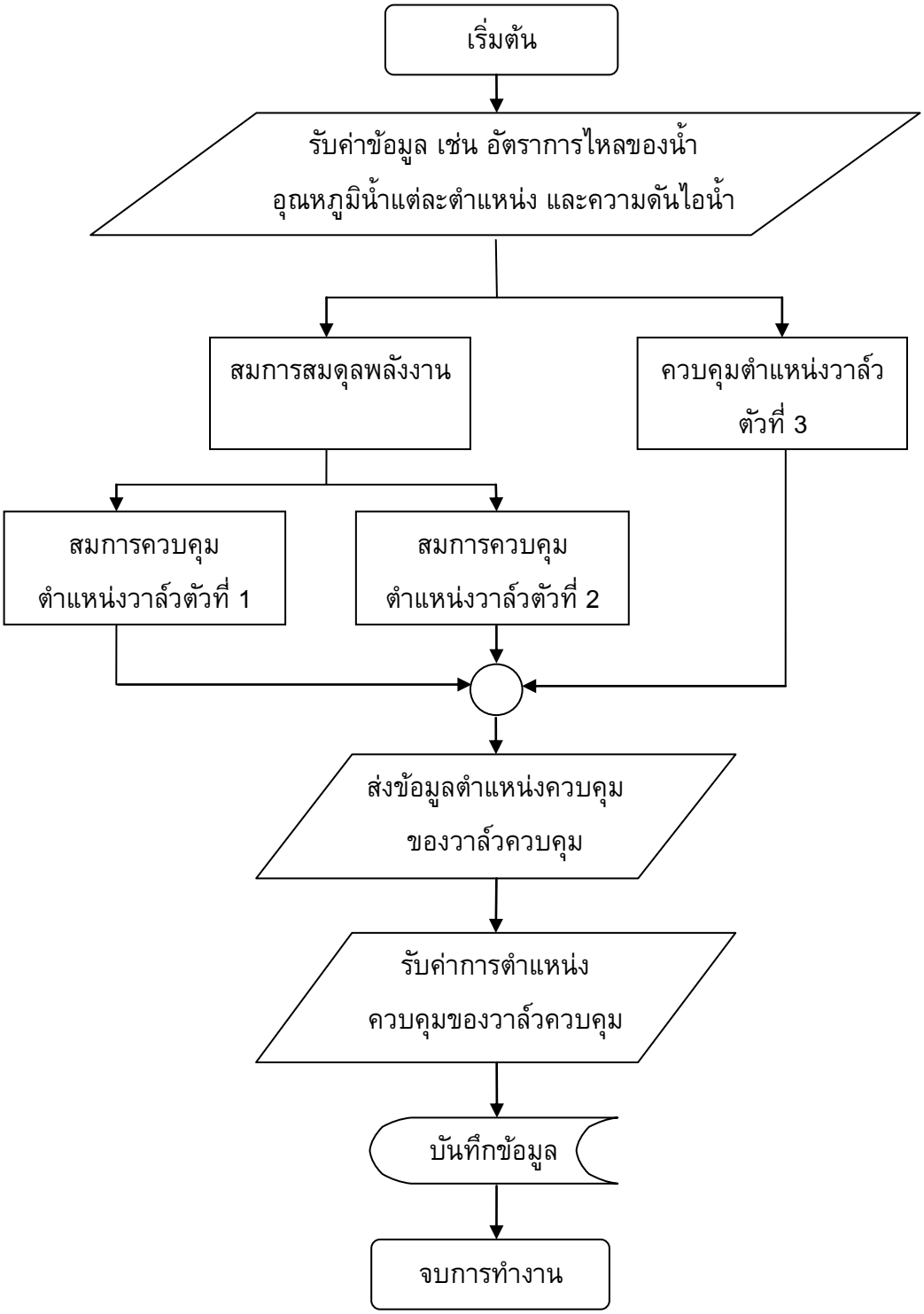
2) ใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด

3) ใช้การควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

โดยวิธีที่ 1 และ 2 จะแตกต่างกันที่สมการที่ใช้ในการควบคุมวาล์ว ซึ่งทั้ง 2 วิธีนี้จะไม่มีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ส่วนวิธีที่ 3 จะมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ว่ามีอุณหภูมิตามที่กำหนดหรือไม่

ในที่นี้ยกตัวอย่างอธิบายวิธีที่ 3 คือ วิธีการควบคุมแบบปิดหรือการควบคุมแบบป้อนกลับโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมด้วยโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจะใส่ค่าอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ต้องการในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์และมีการรับค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ป้อนกลับเข้าระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อนำค่าที่ตรวจวัดได้ไปเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ต้องการและสัญญาณจะถูกส่งจากระบบคอมพิวเตอร์ป้อนให้กับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเพื่อควบคุมการเปิด-ปิดของวาล์วควบคุมต่อไป

ในการบันทึกค่าและการควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยผ่านวาล์วควบคุมของระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้น มีขั้นตอนในการทำงานโดยเริ่มจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะรับสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA และ สัญญาณ RTD จากสายส่งสัญญาณของอุปกรณ์การวัด โดยนำค่าการวัดที่ได้ เช่น อัตราการไหลของน้ำภายในท่อ อุณหภูมิของน้ำภายในท่อ และความดันไอน้ำ มาเข้าสมการสมดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 และ 2 ตามสมการ (3.10) และ (3.12) เพื่อหาตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมแต่ละตัวที่เหมาะสมต่อการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เมื่อส่งข้อมูลไปยังวาล์วควบคุมให้ไปตามคำสั่งแล้วนั้น วาล์วควบคุมจะส่งสัญญาณว่า ณ ขณะนั้นวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งควบคุมใดกลับเข้ามายังอุปกรณ์รับสัญญาณและทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ว่าตรงตามที่ต้องการ และอยู่ในช่วงค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้หรือไม่ และจากนั้นจะทำการบันทึกค่าการวัด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 5.10




ภาพที่ 5.10 ผังงานของระบบ

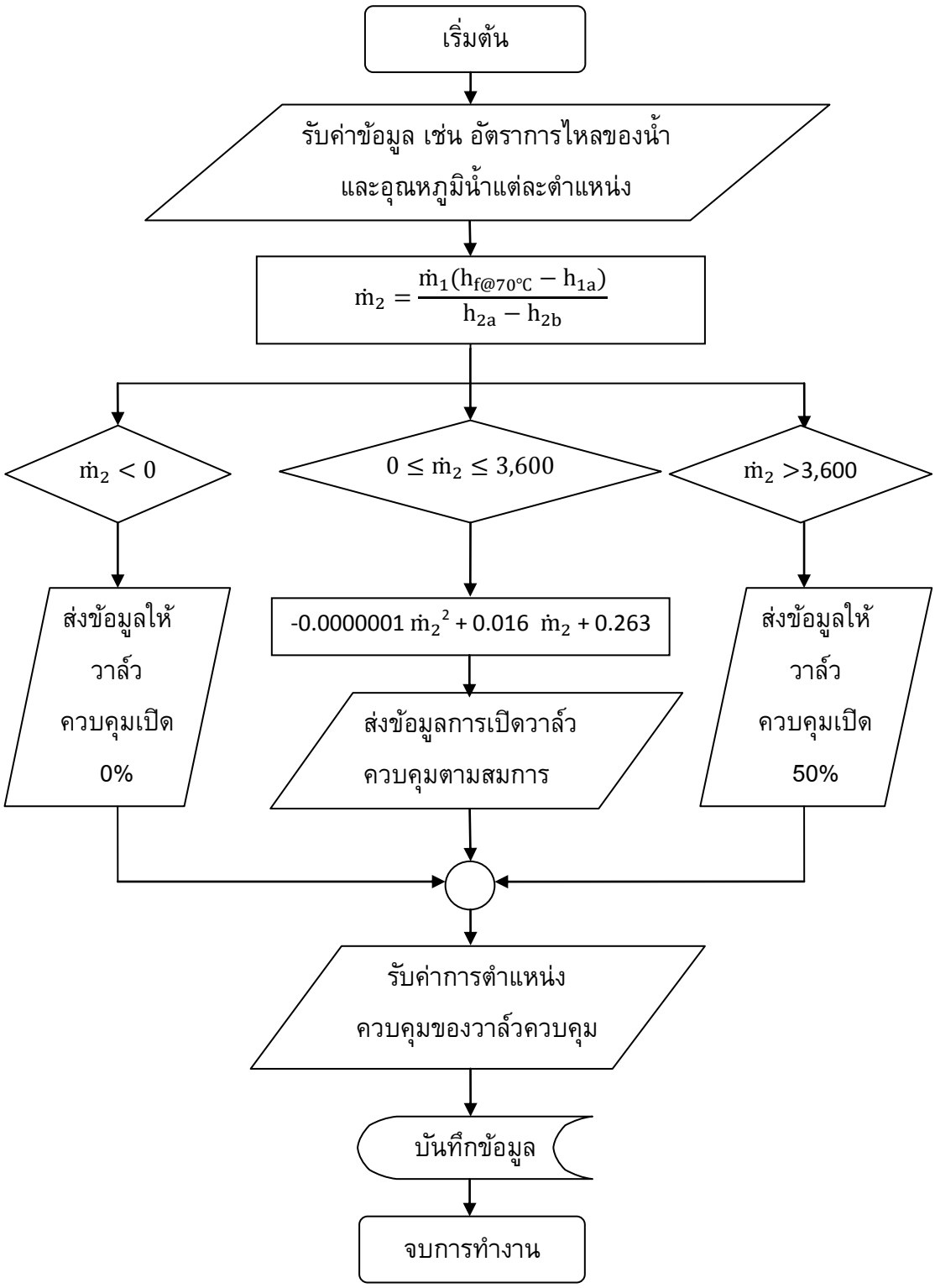
**5.4.2 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)**

ในการบันทึกค่าและการควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 นั้น มีขั้นตอนในการทำงานโดยเริ่มจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะรับสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA และ สัญญาณ RTD จากสายส่งสัญญาณของอุปกรณ์การวัด โดยนำค่าการวัดที่ได้ เช่น อัตราการไหลของน้ำภายในท่อหลังออกจากปั๊ม อุณหภูมิของน้ำภายในท่อหลังออกจากปั๊ม ก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 อุณหภูมิของน้ำภายในท่อหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ และอุณหภูมิของน้ำภายในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนไหลกลับเข้าถึงคอนเดนเสต โดยใช้สมการสมดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 เพื่อหาตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมแต่ละตัวที่เหมาะสมต่อการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ และเมื่อส่งข้อมูลไปยังวาล์วควบคุมให้ไปตามคำสั่งแล้วนั้น วาล์วควบคุมจะส่งสัญญาณการว่า ณ ขณะนั้นวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งควบคุมใดกลับเข้ามายังอุปกรณ์รับสัญญาณ และจากนั้นจะทำการบันทึกค่าการวัด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 5.11

จากภาพที่ 3.3 สมการสมดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{m}_1(h_{1b} - h_{1a}) = \dot{m}_2(h_{2a} - h_{2b}) \quad (3.10)$$

สามารถอธิบายการทำงาน การบันทึกค่าและการควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 เป็นแผนภาพได้ดังนี้




ภาพที่ 5.11 ผังงานการควบคุมน้ำผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1

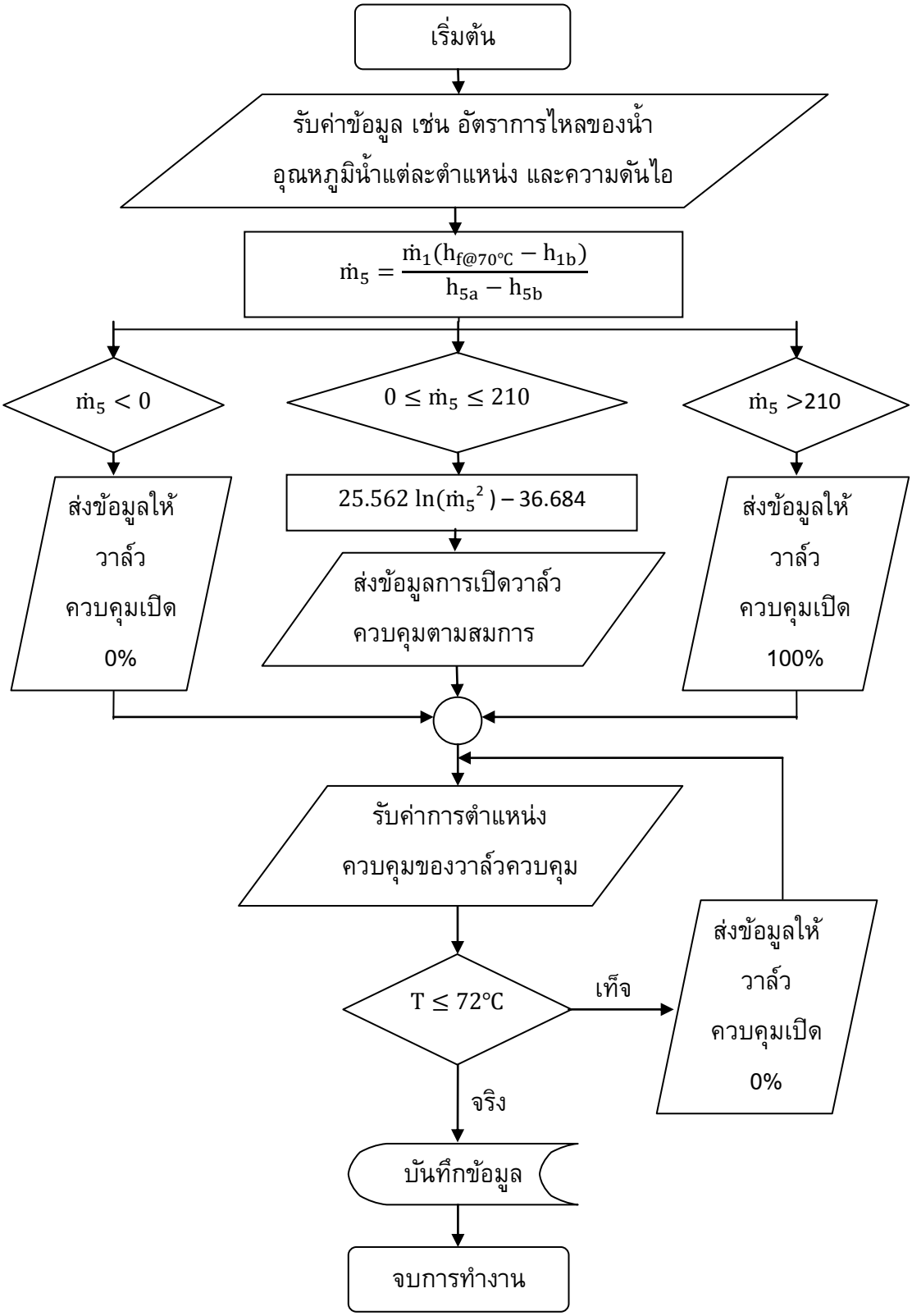
### 5.4.3 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)

ในการบันทึกค่าและการควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 นั้น มีขั้นตอนในการทำงานโดยเริ่มจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะรับสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA และ สัญญาณ RTD จากสายส่งสัญญาณของอุปกรณ์การวัด โดยนำค่าการวัดที่ได้ เช่น อัตราการไหลของน้ำภายในท่อหลังออกจากปั๊ม ความดันไอน้ำสำหรับนำมาใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 อุณหภูมิของน้ำภายในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 อุณหภูมิของน้ำภายในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนไหลกลับเข้าสู่ถังคอนเดนเสต และอุณหภูมิของน้ำภายในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ มาเข้าสมการสมดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อหาตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำที่เหมาะสมต่อการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ และเมื่อส่งข้อมูลไปยังวาล์วควบคุมให้ไปตามคำสั่งแล้วนั้น วาล์วควบคุมจะส่งสัญญาณว่า ณ ขณะนั้นวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งควบคุมใดกลับเข้ามายังอุปกรณ์รับสัญญาณ และทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ว่าตรงตามที่ต้องการ โดยอยู่ในช่วงค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งถ้าน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ โปรแกรมจะส่งค่าให้วาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งควบคุมเปิด 0% และจากนั้นจะทำการบันทึกค่าการวัด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 5.12

จากภาพที่ 3.4 สมการสมดุลพลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{m}_1(h_{1c} - h_{1b}) = \dot{m}_5(h_{5b} - h_{5a}) \qquad (3.12)$$

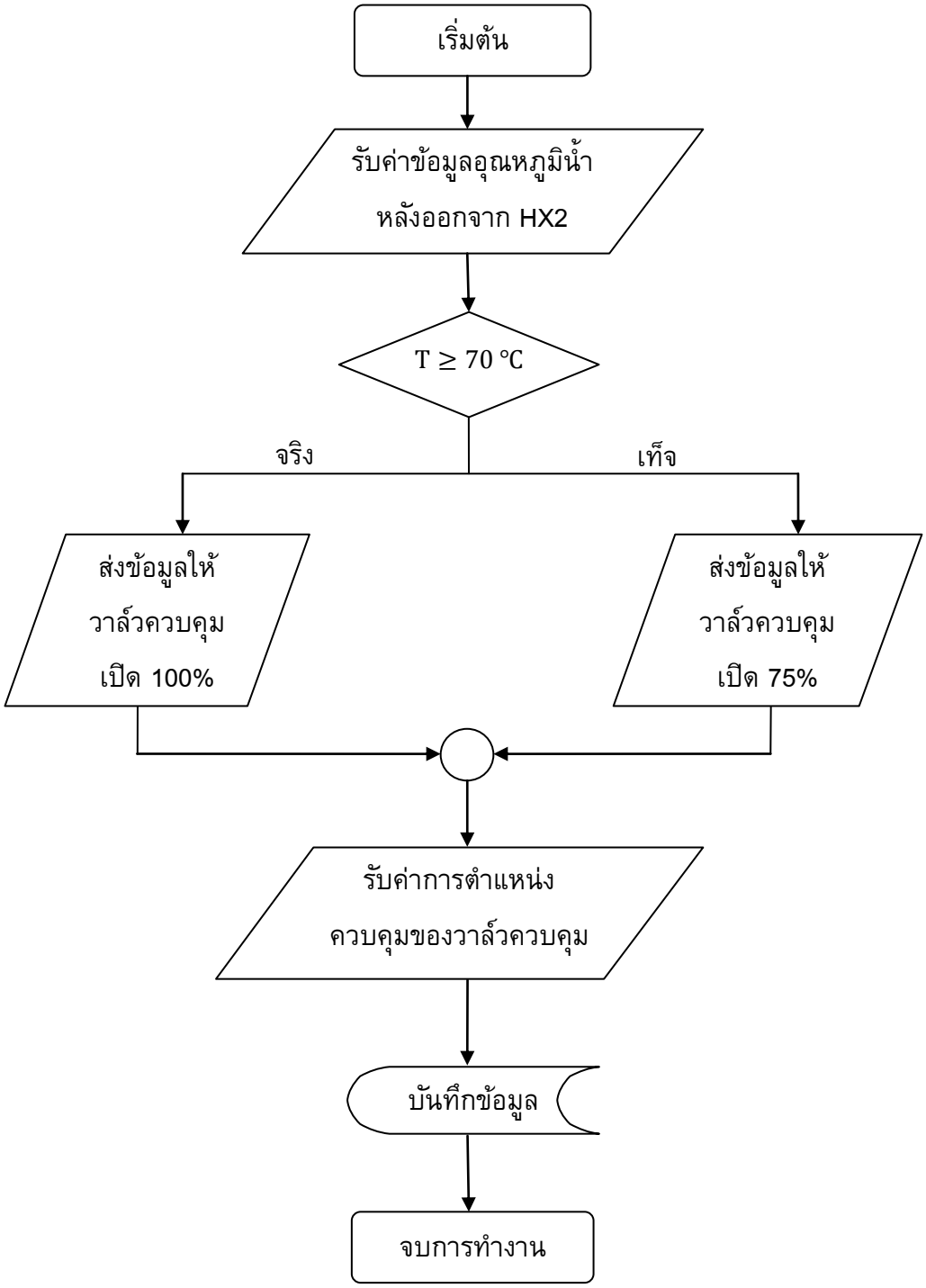
สามารถอธิบายการทำงาน การบันทึกค่าและการควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำเป็นแผนภาพได้ดังนี้




ภาพที่ 5.12 ผังงานการควบคุมไอน้ำผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ

### 5.4.4 การเขียนผังงานเพื่อควบคุมวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)

ในการบันทึกค่าและการควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้น มีขั้นตอนในการทำงานโดยเริ่มจากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณ RTD จากสายส่งสัญญาณของอุปกรณ์การวัดอุณหภูมิ จะนำค่าอุณหภูมิของน้ำภายในท่อหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้นเป็นค่าการวัดสำหรับการตัดสินให้วาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งควบคุมใด โดยถ้าอุณหภูมิของน้ำสูงกว่า 70 ℃ (อุณหภูมิที่ต้องการ) วาล์วควบคุมจะเปิด 100% แต่ถ้าอุณหภูมิของน้ำต่ำว่า 70 ℃ วาล์วควบคุมจะเปิดเพียงแค่ 75% เนื่องจากเป็นการทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ใช้เวลาในการอุ่นน้ำนานขึ้น เมื่อส่งข้อมูลไปยังวาล์วควบคุมให้ไปตามคำสั่งแล้วนั้น วาล์วควบคุมจะส่งสัญญาณว่า ณ ขณะนั้นวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งควบคุมใดกลับเข้ามายังอุปกรณ์รับสัญญาณ และจากนั้นจะทำการบันทึกค่าการวัด โดยสามารถอธิบายการทำงานของการบันทึกค่าและการควบคุมอัตราการไหลของน้ำโดยผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เป็นแผนภาพได้ดังนี้




ภาพที่ 5.13 ผังงานการควบคุมน้ำผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

**5.4.5 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์**

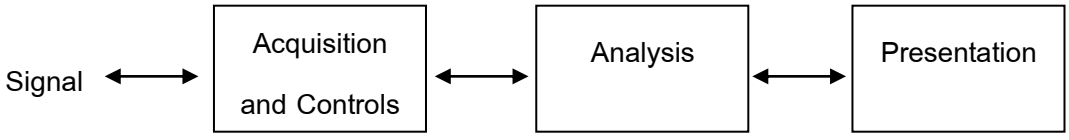
การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้น ในการศึกษาวิจัยได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดย LabVIEW นั้นจะเรียกว่า VI ย่อมาจาก Virtual Instrument จะประกอบด้วยส่วนควบคุม และส่วนแสดงผล คล้ายคลึงกับเครื่องมือวัดโดยทั่วไป เช่น มีปุ่มปรับค่า ปุ่มเปิดปิด กราฟแสดงผล และหน้าจอแสดงตัวเลข เป็นต้น

LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุมทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามที่ผู้ใช้ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1) Acquisition เป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบ ในที่นี้คือ คอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจาก การ์ด DAQ (สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า) การ์ด IMAQ (สำหรับข้อมูลประเภทรูป) หรือ GPIB (สำหรับควบคุมเครื่องมือวัด)

2) หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้วจะผ่านฟังก์ชันในการ Analysis หรือ วิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสื่อที่วัดได้และใช้งานได้

3) Presentation คือ การแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ แสดงดังภาพที่ 5.14

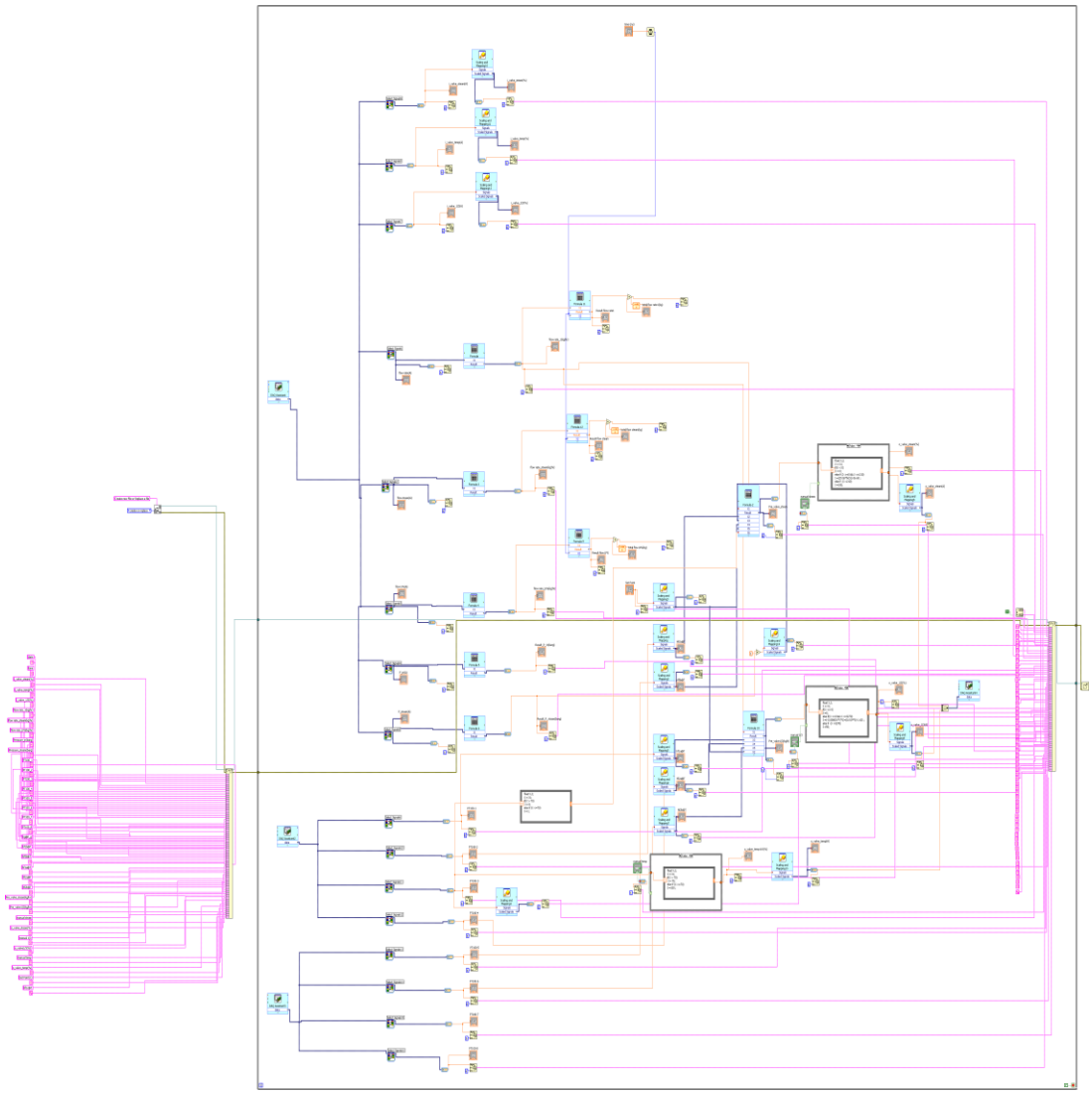



ภาพที่ 5.14 หลักการทำงานของ LabVIEW

ซึ่งในการศึกษาวิจัยได้ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการสร้างระบบการวัด การทดสอบ และการควบคุมอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำผ่านวาล์วควบคุม โดยใช้การเขียน

โปรแกรมด้วยภาษาโด้ดรูปภาพร่วมกับภาษาซีและมีการต่อสายส่งค่าข้อมูลคล้ายกับการเขียนผังงาน (Flow chart) ซึ่งในการสร้างไฟล์ของ LabVIEW ในไฟล์เดียวจะประกอบด้วยหน้าต่าง 2 หน้าต่าง คือ หน้าต่างพื้นที่สีขาว เรียกว่า Block Diagram และหน้าต่างพื้นที่ตารางสีเทา เรียกว่า Front Panel

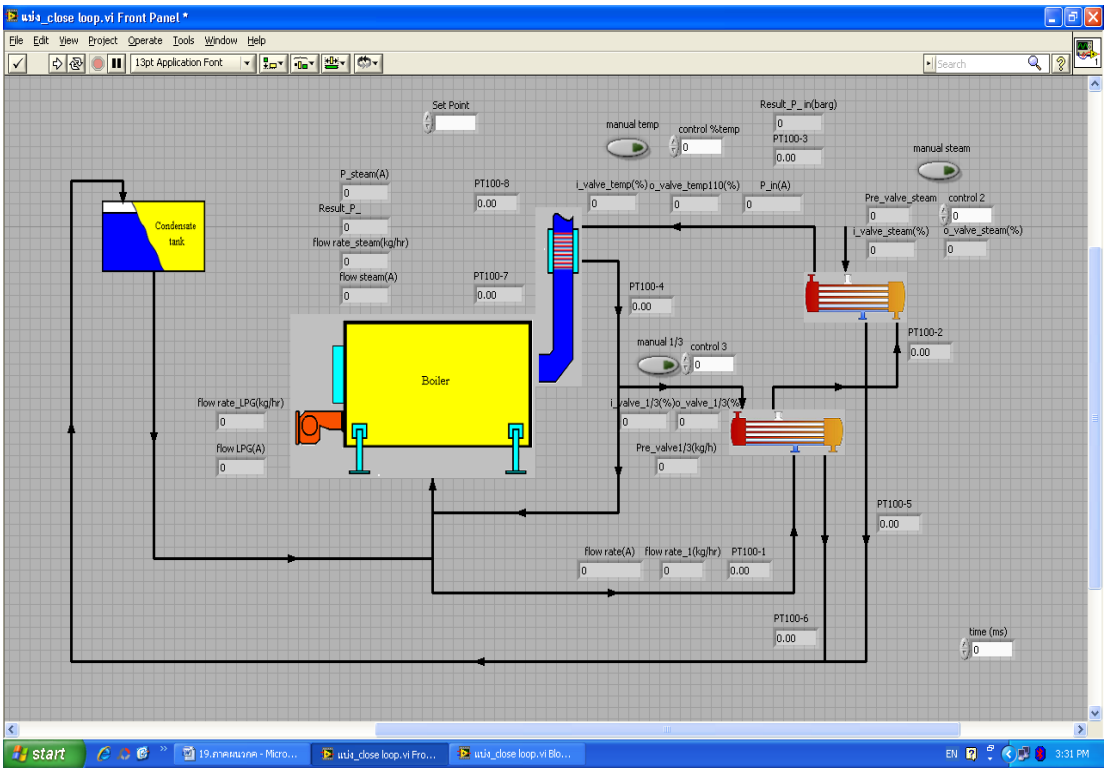
Block Diagram เป็นส่วนที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม เปรียบเสมือนกับฮาร์ดแวร์ภายในเครื่องมือวัด โดย LabVIEW จะเขียนโปรแกรมโดยอาศัยรูปภาพ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้เป็นการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ โดยมี Block Diagram ของระบบแสดงดังภาพที่ 5.15



ภาพที่ 5.15 Block Diagram ของระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

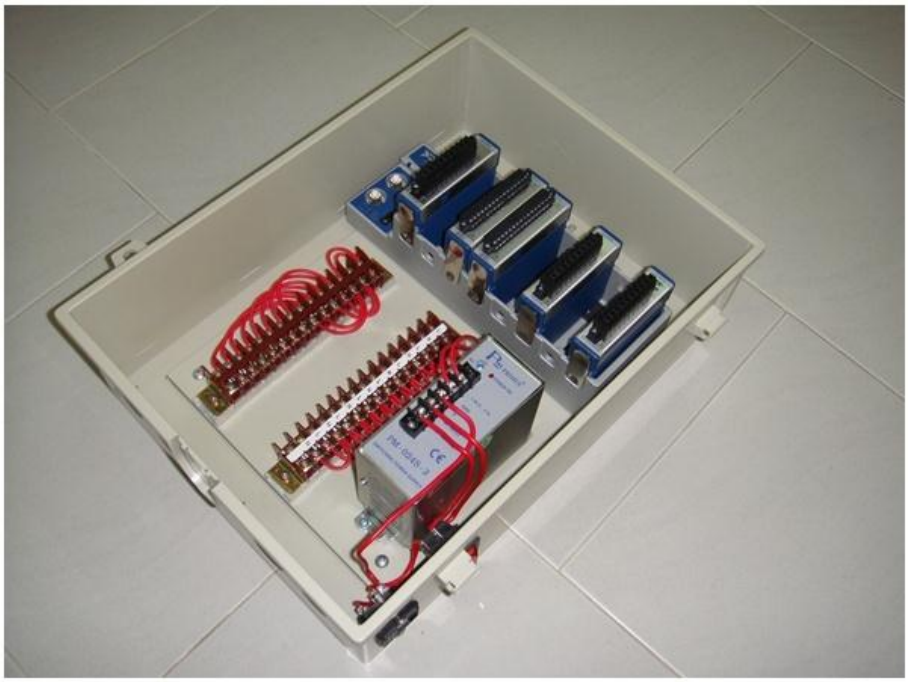
Front Panel เป็นส่วนสำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบด้วยส่วนที่ควบคุม โดยจะรับข้อมูลจากผู้ใช้งานและส่วนแสดงผล โดยจะแสดงผลให้ผู้ใช้งานเห็นในรูปกราฟและตัวเลข เป็นต้น

สำหรับในการศึกษาวิจัยนี้หน้าต่าง Front Panel จะแสดงผลการวัดออกทางจอคอมพิวเตอร์ นอกจากนั้นในส่วนของการควบคุมตำแหน่งของวาล์วควบคุมนั้น ผู้ใช้สามารถเลือกที่จะควบคุมตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมได้เองเมื่อเกิดปัญหาข้อขัดข้องกับระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ หรือเมื่อต้องการที่จะบังคับตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมแต่ละตัวโดยคลิ๊กที่ปุ่ม manual temp, manual steam หรือ manual 1/3 ตามต้องการ




ภาพที่ 5.16 Front Panel ของระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำอัตโนมัติก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

ในการควบคุมการทำงานของระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น ได้มีกล่องควบคุมในการใช้สำหรับรับ – ส่ง สัญญาณ



ภาพที่ 5.17 กล่องควบคุม

ภาพที่ 5.17 เป็นภาพกล่องควบคุมที่ใช้ในการเก็บผลการทดลองและใช้ในการควบคุมระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดที่เกิดจากก๊าซเสียกลั่นตัว โดยภายในกล่องควบคุมจะประกอบด้วย

1) ชุดระบบรับ – ส่ง สัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยโมดูล ดังนี้

1.1) NI 9217 เป็นโมดูลสำหรับรับค่าอุณหภูมิของน้ำภายในท่อ โดยจะรับสัญญาณ RTD จำนวน 2 โมดูล สามารถเชื่อมต่อช่องสัญญาณได้ทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ

1.2) NI 9203 เป็นโมดูลสำหรับรับค่าอัตราการไหล ความดัน และสัญญาณการตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม โดยจะรับสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA จำนวน 1 โมดูล สามารถเชื่อมต่อช่องสัญญาณได้ทั้งหมด 8 ช่องสัญญาณ

1.3) NI 9265 เป็นโมดูลสำหรับส่งสัญญาณ เพื่อควบคุมการตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม โดยจะส่งสัญญาณอนาล็อก 4 – 20 mA จำนวน 1 โมดูล สามารถเชื่อมต่อช่องสัญญาณได้ทั้งหมด 4 ช่องสัญญาณ

2) แหล่งจ่ายไฟ DC 24 V แบบ Switching สามารถรับสัญญาณ AC ได้ตั้งแต่ 110 – 264 V โดยมีกระแสเอาต์พุต 2 A เพื่อใช้ในการจ่ายกระแสไฟให้กับอุปกรณ์วัดอัตราการไหล อุปกรณ์วัดความดัน และชุดระบบรับ – ส่ง สัญญาณ

3) แผงต่อสายไฟ (Terminal Block) ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายไฟระหว่างแหล่งจ่ายไฟ อุปกรณ์การวัด และชุดระบบรับ – ส่ง สัญญาณ

# บทที่ 6

## การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ในการทำงานของระบบควบคุมนั้นต้องมีการตรวจสอบก่อนว่าระบบมีการทำงานที่ถูกต้องตามที่ได้ออกแบบไว้จริง

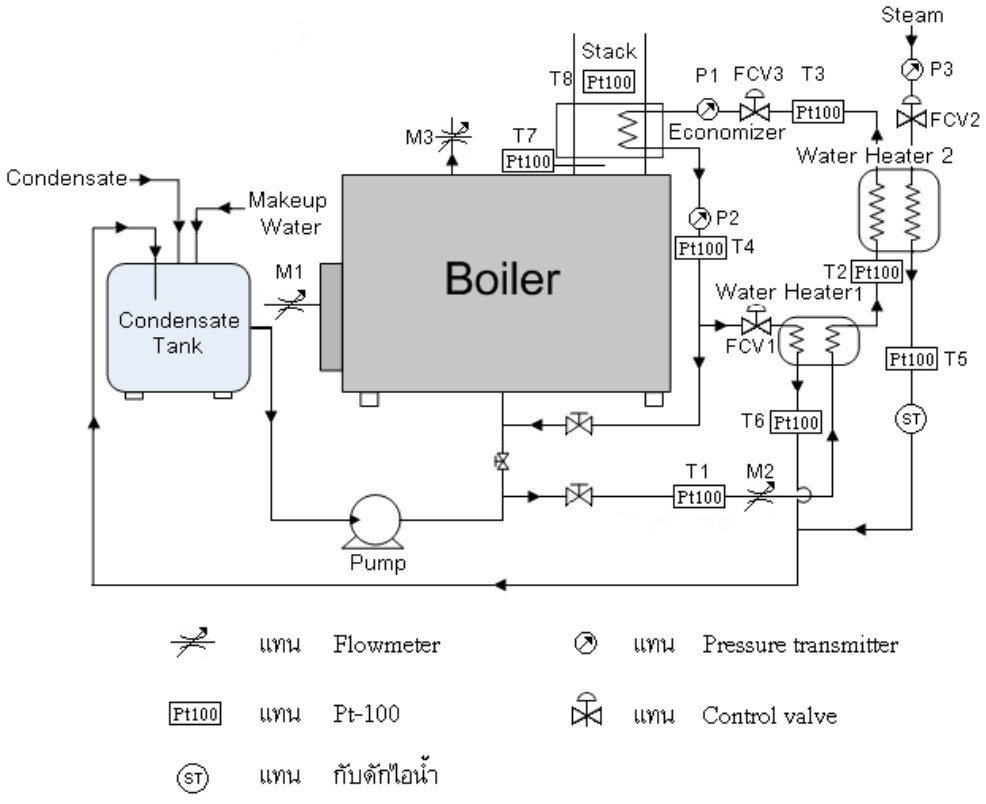
การออกแบบวิธีการกระบวนการทำงานของวาล์วควบคุมนั้นจะออกแบบ 3 วิธี คือ

1) ใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด

2) ใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด

3) ใช้การควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดต่างๆ ได้แสดงดังภาพที่ 6.1




ภาพที่ 6.1 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์การวัดต่างๆ

**6.1 การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด**

สำหรับการตรวจสอบการทำงานของวาล์วควบคุมปริมาณไอน้ำสำหรับนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อตรวจว่าวาล์วควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่ได้คำนวณไว้ และได้อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ตามที่กำหนดไว้หรือไม่นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยยกตัวอย่างที่เวลา 15.53 – 15.55 น. ซึ่งได้ทำการจัดเก็บข้อมูลทุก ๆ 10 วินาที โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลการสำหรับการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด

| เวลา | น้ำที่ออกจากปั๊ม (kg/h) | ความดันไอน้ำ (บาร์) | อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ($^{o}$C) | | | | | | ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุม (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | PT100_1 | PT100_2 | PT100_3 | PT100_4 | PT100_5 | PT100_6 | $S_{o,1}$ | $S_{o,2}$ | $S_{o,3}$ | $S_{i,1}$ | $S_{i,2}$ | $S_{i,3}$ |
| 15:53:00 | 6,420.36 | 5.76 | 40.5 | 62.4 | 82.6 | 84.9 | 56.6 | 46.2 | 50 | 77.66 | 100 | 52.27 | 81.55 | 100 |
| 15:53:10 | 6,226.67 | 5.73 | 40.6 | 62.5 | 82.6 | 85.0 | 56.7 | 46.4 | 50 | 76.41 | 100 | 52.18 | 81.62 | 100 |
| 15:53:20 | 6,342.10 | 5.84 | 40.8 | 62.6 | 82.4 | 85.0 | 56.8 | 46.6 | 50 | 76.58 | 100 | 52.04 | 82.23 | 100 |
| 15:53:30 | 6,275.89 | 5.90 | 40.9 | 62.7 | 82.4 | 85.1 | 56.9 | 46.7 | 50 | 76.06 | 100 | 52.04 | 80.79 | 100 |
| 15:53:40 | 6,178.67 | 5.68 | 41.0 | 62.8 | 82.3 | 85.1 | 57.0 | 46.9 | 50 | 75.41 | 100 | 51.98 | 80.98 | 100 |
| 15:53:50 | 6,551.05 | 5.81 | 41.2 | 62.9 | 82.2 | 85.1 | 57.0 | 47.0 | 50 | 76.60 | 100 | 52.18 | 79.52 | 100 |
| 15:54:00 | 6,378.52 | 5.72 | 41.3 | 62.9 | 82.0 | 85.1 | 57.1 | 47.1 | 50 | 75.78 | 100 | 51.56 | 81.49 | 100 |
| 15:54:10 | 6,224.94 | 5.64 | 41.4 | 62.9 | 82.0 | 85.1 | 57.2 | 47.3 | 50 | 75.13 | 100 | 51.93 | 80.76 | 100 |
| 15:54:20 | 6,253.74 | 5.72 | 41.5 | 63.0 | 82.0 | 85.1 | 57.3 | 47.4 | 50 | 75.10 | 100 | 52.04 | 79.26 | 100 |
| 15:54:30 | 6,226.17 | 5.81 | 41.7 | 63.0 | 82.0 | 85.0 | 57.3 | 47.5 | 50 | 74.87 | 100 | 52.15 | 79.24 | 100 |
| 15:54:40 | 6,326.10 | 5.69 | 41.8 | 63.0 | 81.9 | 85.0 | 57.4 | 47.6 | 50 | 75.13 | 100 | 51.77 | 79.91 | 100 |
| 15:54:50 | 6,343.08 | 5.81 | 41.9 | 63.1 | 81.8 | 85.0 | 57.4 | 47.7 | 50 | 74.95 | 100 | 51.57 | 79.05 | 100 |
| 15:55:00 | 6,197.62 | 5.87 | 42.0 | 63.2 | 81.8 | 84.9 | 57.5 | 47.9 | 50 | 74.02 | 100 | 52.04 | 79.11 | 100 |

**6.1.1 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)**

เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ เพื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ที่เวลา 15:53:00 น. ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 6.1 สามารถหาตำแหน่งวาล์วควบคุมที่เหมาะสมที่ควบคุมให้น้ำมีอุณหภูมิตามที่กำหนดคือ 70 °C ได้โดยอาศัยกฎอนุรักษ์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ดังนี้

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_1 (h_{1b} - h_{1a})}{(h_{1d} - h_{2a})} \tag{3.11}$$

เมื่อข้อมูลที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูล

$\dot{m}_1$ = 6,420.36 kg/h

$h_{1a}$ = 191.66 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_1 = 40.5 °C)

$h_{1b}$ = 292.98 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 70 °C)

$h_{1d}$ = 355.35 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_4 = 84.9 °C)

$h_{2a}$ = 193.66 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_6 = 46.3 °C)

โดยนำค่าที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูลแทนในสมการ (3.11) ดังนี้

$$\dot{m}_2 = \frac{6{,}420.36(292.98 - 191.66)}{(355.35 - 193.66)}$$

$$\dot{m}_2 = 4{,}900.41 \text{ kg/h}$$

จาก $\dot{m}_2 = 4{,}900.41$ kg/h ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ต้องการน้ำร้อนปริมาณทั้งหมด 4,900.41 kg/h ในการอุ่นน้ำที่ออกจากปั๊ม เพื่อให้มีอุณหภูมิ 70 °C

จากการทดลองในเบื้องต้น พบว่าน้ำร้อนสำหรับนำมาอุ่นน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ปริมาณมากที่สุดคือ 3,600 kg/h ที่ตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุม 50% ซึ่งถ้านำน้ำร้อนมาใช้ในปริมาณที่มากกว่านี้จะทำให้ระดับน้ำในหม้อไอน้ำลดลง

จากตารางที่ 6.1 พบว่า FCV1 จะถูกสั่งให้เปิดที่ 50% โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งการเปิด 50% จริง

เมื่อวาล์วควบคุมเปิดที่ตำแหน่ง 50% แล้ว พบว่าน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 มีอุณหภูมิ 62.4 °C ซึ่งน้อยกว่าที่ได้กำหนดไว้คือ 70 °C ดังนั้นน้ำจึงไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ต่อไป โดยอาศัยความร้อนจากไอน้ำบางส่วนที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ

### 6.1.2 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)

เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำสำหรับนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ที่เวลา 15:53:00 น. สามารถหาตำแหน่งวาล์วควบคุมที่เหมาะสมที่ควบคุมให้น้ำมีอุณหภูมิตามที่กำหนดคือ 70 °C ได้โดยอาศัยกฎอนุรักษ์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ดังนี้

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{m}_1 (h_{1c} - h_{1b})}{(h_{5a} - h_{5b})} \qquad (3.13)$$

เมื่อข้อมูลที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูล

$\dot{m}_1$ = 6,420.36 kg/h

$h_{1b}$ = 261.19 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_2 = 62.4 °C)

$h_{1c}$ = 292.98 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 70 °C)

$h_{5a}$ = 2,565.54 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ ความดันไอน้ำ = 5.76 บาร์)

$h_{5b}$ = 236.96 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_5 = 56.6 °C)

โดยนำค่าที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูลแทนในสมการ (3.13) ดังนี้

$$\dot{m}_5 = \frac{6{,}420.36(292.98 - 261.19)}{(2{,}565.54 - 236.96)}$$

$$\dot{m}_5 = 87.64 \text{ kg/h}$$

จาก $\dot{m}_5 = 87.64$ kg/h ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าต้องการปริมาณไอน้ำทั้งหมด 87.64 kg/h ในการให้ความร้อนกับน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อให้มีอุณหภูมิ 70 °C โดยในการหาตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อให้ได้ปริมาณไอน้ำเพียงพอต่อการให้ความร้อนแก่น้ำนั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$S_{o,2} = 25.56 \ln(\dot{m}_5) - 36.68 \quad (6.1)$$

ซึ่งจากสมการพบว่าตำแหน่งวาล์วควบคุมควรอยู่ที่ตำแหน่งเปิด 77.66% และจากการทดลองพบว่าวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งเปิด 81.55% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อวาล์วควบคุมไปตำแหน่งต่างๆ ซึ่งในช่วงเวลานี้ (15.53 น.) พบว่าอุณหภูมิน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 จะอยู่ที่ 82.6 °C

**6.1.3 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)**

จากที่พบว่าอุณหภูมิน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 จะอยู่ที่ 82.6 °C นั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีคำสั่งให้ FCV3 อยู่ที่ตำแหน่ง 100% เนื่องจากน้ำมีอุณหภูมิมากกว่าตามที่ได้กำหนดไว้คือ 70 °C โดยจากการทดลองพบว่าวาล์วควบคุมน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง 100% จริง

**6.2 การควบคุมโดยการใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด**

สำหรับการตรวจสอบการทำงานของวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว เพื่อตรวจว่าวาล์วควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่ได้คำนวณไว้ และได้อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ตามที่กำหนดไว้หรือไม่นั้น สามารถตรวจสอบได้โดยยกตัวอย่างที่เวลา 14.50 - 14.52 น. ซึ่งได้ทำการจัดเก็บข้อมูลทุกๆ 10 วินาที โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลสำหรับการควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำแบบเปิด

| เวลา | น้ำที่ออกจากปั๊ม (kg/h) | ความดันไอน้ำ (บาร์) | อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ (°C) | | | | | | ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุม (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | PT100_1 | PT100_2 | PT100_3 | PT100_4 | PT100_5 | PT100_6 | $S_{o,1}$ | $S_{o,2}$ | $S_{o,3}$ | $S_{i,1}$ | $S_{i,2}$ | $S_{i,3}$ |
| 14:50:00 | 6,273.68 | 6.07 | 45.6 | 62.5 | 74.3 | 79.3 | 57.0 | 50.1 | 50 | 53.90 | 100 | 52.16 | 57.19 | 100 |
| 14:50:10 | 6,183.84 | 6.06 | 45.7 | 62.5 | 74.1 | 79.2 | 57.0 | 50.3 | 50 | 53.05 | 100 | 52.41 | 55.751 | 100 |
| 14:50:20 | 6,161.44 | 6.21 | 45.8 | 62.6 | 73.9 | 79.1 | 57.0 | 50.4 | 50 | 52.69 | 100 | 52.254 | 57.028 | 100 |
| 14:50:30 | 6,281.06 | 5.82 | 46.0 | 62.5 | 73.9 | 78.9 | 57.1 | 50.6 | 50 | 53.78 | 100 | 51.421 | 58.192 | 100 |
| 14:50:40 | 6,294.10 | 6.24 | 46.1 | 62.5 | 73.8 | 78.7 | 57.1 | 50.7 | 50 | 54.12 | 100 | 52.047 | 56.676 | 100 |
| 14:50:50 | 6,284.26 | 6.11 | 46.2 | 62.5 | 73.7 | 78.6 | 57.2 | 50.8 | 50 | 54.11 | 100 | 51.858 | 56.78 | 100 |
| 14:51:00 | 6,195.16 | 6.24 | 46.3 | 62.5 | 73.6 | 78.4 | 57.2 | 50.9 | 50 | 53.45 | 100 | 52.492 | 57.249 | 100 |
| 14:51:10 | 6,332.50 | 6.15 | 46.4 | 62.5 | 73.6 | 78.3 | 57.3 | 51.0 | 50 | 54.40 | 100 | 51.083 | 58.375 | 100 |
| 14:51:20 | 6,159.97 | 6.20 | 46.5 | 62.5 | 73.6 | 78.2 | 57.3 | 51.1 | 50 | 53.19 | 100 | 51.895 | 56.891 | 100 |
| 14:51:30 | 6,214.61 | 6.23 | 46.6 | 62.5 | 73.6 | 78.1 | 57.3 | 51.1 | 50 | 53.30 | 100 | 52.057 | 57.047 | 100 |
| 14:51:40 | 6,425.29 | 6.00 | 46.7 | 62.6 | 73.6 | 78.0 | 57.4 | 51.2 | 50 | 54.56 | 100 | 51.686 | 53.796 | 100 |
| 14:51:50 | 6,216.58 | 6.12 | 46.8 | 62.6 | 73.6 | 77.9 | 57.4 | 51.3 | 50 | 52.80 | 100 | 52.186 | 57.485 | 100 |
| 14:52:00 | 6,179.41 | 6.03 | 46.9 | 62.7 | 73.6 | 77.8 | 57.4 | 51.4 | 50 | 52.25 | 100 | 51.885 | 54.745 | 100 |

**6.2.1 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนบางส่วนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)**

เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ เพื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ที่เวลา 14:50:00 น. ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 6.2 สามารถหาตำแหน่งวาล์วควบคุมที่เหมาะสมที่ควบคุมให้น้ำมีอุณหภูมิตามที่กำหนดคือ 70 °C ได้โดยอาศัยกฎอนุรักษ์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ดังนี้

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_1 \, (h_{1b} - h_{1a})}{(h_{1d} - h_{2a})} \tag{3.11}$$

เมื่อข้อมูลที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูล

$\dot{m}_1$ = 6,273.68 kg/h

$h_{1a}$ = 190.96 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_1 = 45.6 °C)

$h_{1b}$ = 292.98 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 70 °C)

$h_{1d}$ = 332.05 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_4 = 79.3 °C)

$h_{2a}$ = 209.83 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_6 = 50.1 °C)

โดยนำค่าที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูลแทนในสมการ (3.11) ดังนี้

$$\dot{m}_2 = \frac{6{,}273.68(292.98 - 190.96)}{(332.05 - 209.83)}$$

$$\dot{m}_2 = 5{,}236.64 \text{ kg/h}$$

จาก $\dot{m}_2 = 5{,}236.64$ kg/h ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ต้องการน้ำร้อนปริมาณทั้งหมด 5,236.64 kg/h ในการอุ่นน้ำที่ออกจากปั๊ม เพื่อให้มีอุณหภูมิ 70 °C

จากการทดลองในเบื้องต้น พบว่าน้ำร้อนสำหรับนำมาอุ่นน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ปริมาณมากที่สุดคือ 3,600 kg/h ที่ตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุม 50% ซึ่งถ้านำน้ำร้อนมาใช้ในปริมาณที่มากกว่านี้จะทำให้ระดับน้ำในหม้อไอน้ำลดลง

จากตารางที่ 6.2 พบว่า FCV1 จะถูกสั่งให้เปิดที่ 50% โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งการเปิด 50% จริง

เมื่อวาล์วควบคุมเปิดที่ตำแหน่ง 50% แล้ว พบว่าน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 มีอุณหภูมิ 62.5 °C ซึ่งน้อยกว่าที่ได้กำหนดไว้คือ 70 °C ดังนั้น น้ำจึงไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ต่อไป โดยอาศัยความร้อนจากไอน้ำบางส่วนที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ

### 6.2.2 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)

เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำสำหรับนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ที่เวลา 14:53:00 น. สามารถหาตำแหน่งวาล์วควบคุมที่เหมาะสมที่ควบคุมให้น้ำมีอุณหภูมิตามที่กำหนดคือ 70 °C ได้โดยอาศัยกฎอนุรักษ์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ดังนี้

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{m}_1 (h_{1c} - h_{1b})}{(h_{5a} - h_{5b})} \qquad (3.13)$$

เมื่อข้อมูลที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูล

$\dot{m}_1$ = 6,273.68 kg/h

$h_{1b}$ = 261.54 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_2 = 62.5 °C)

$h_{1c}$ = 292.98 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 70 °C)

$h_{5a}$ = 2,567.21 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ ความดันไอน้ำ = 6.07 บาร์)

$h_{5b}$ = 238.43 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_5 = 57 °C)

โดยนำค่าที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูลแทนในสมการ (3.13) ดังนี้

$$\dot{m}_5 = \frac{6{,}273.68(292.98 - 261.54)}{(2{,}567.21 - 238.43)}$$

$$\dot{m}_5 = 84.7 \text{ kg/h}$$

จาก $\dot{m}_5 = 84.7$ kg/h ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าต้องการปริมาณไอน้ำทั้งหมด 84.7 kg/h ในการให้ความร้อนกับน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อให้มีอุณหภูมิ 70 °C โดยในการหาตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อให้ได้ปริมาณไอน้ำเพียงพอต่อการให้ความร้อนแก่น้ำนั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$S_{o,2} = -0.001(\dot{m}_5^2) + 0.701(\dot{m}_5) + 1.695 \quad (6.2)$$

ซึ่งจากสมการพบว่าตำแหน่งวาล์วควบคุมควรอยู่ที่ตำแหน่งเปิด 53.9% และจากการทดลองพบว่าวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งเปิด 57.19% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อวาล์วควบคุมไปยังตำแหน่งควบคุมต่างๆ ซึ่งในช่วงเวลานี้ (14.50 น.) พบว่าอุณหภูมิน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 จะอยู่ที่ 74.3 °C

**6.2.3 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)**

จากที่พบว่าอุณหภูมิน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 จะอยู่ที่ 74.3 °C นั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีคำสั่งให้ FCV3 อยู่ที่ตำแหน่ง 100% เนื่องจากน้ำมีอุณหภูมิมากกว่าตามที่ได้กำหนดไว้คือ 70 °C โดยจากการทดลองพบว่าวาล์วควบคุมน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง 100% จริง

**6.3 การควบคุมโดยควบคุมแบบปิด มีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์**

สำหรับการตรวจสอบการทำงานของวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว เพื่อตรวจว่าวาล์วควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่ได้คำนวณไว้ และได้อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ตามที่กำหนดไว้หรือไม่นั้น ส ามารถตรวจสอบได้โดยยกตัวอย่างที่เวลา 14.37 - 14.39 น. ซึ่งได้ทำการจัดเก็บข้อมูลทุกๆ 10 วินาที โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลสำหรับการควบคุมโดยควบคุมแบบปิด มีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

| เวลา | น้ำที่ออกจากปั๊ม (kg/h) | ความดันไอน้ำ (บาร์) | อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ($^{\circ}$C) | | | | | | ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุม (%) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | PT100_1 | PT100_2 | PT100_3 | PT100_4 | PT100_5 | PT100_6 | $S_{o,1}$ | $S_{o,2}$ | $S_{o,3}$ | $S_{i,1}$ | $S_{i,2}$ | $S_{i,3}$ |
| 14:37:00 | 6,032.72 | 6.32 | 45.8 | 62.4 | 69.0 | 80.5 | 57.9 | 51.3 | 50 | 76.13 | 75 | 52.04 | 60.04 | 78.87 |
| 14:37:10 | 5,782.91 | 6.06 | 45.9 | 62.3 | 70.0 | 79.6 | 57.8 | 51.4 | 50 | 75.33 | 75 | 51.78 | 79.47 | 77.34 |
| 14:37:20 | 5,864.62 | 6.33 | 46.0 | 62.1 | 71.8 | 78.6 | 57.7 | 51.4 | 50 | 76.43 | 100 | 52.15 | 78.96 | 78.27 |
| 14:37:30 | 6,117.63 | 6.08 | 46.1 | 61.6 | 73.8 | 77.9 | 57.7 | 51.4 | 50 | 0 | 100 | 52.34 | 79.36 | 94.16 |
| 14:37:40 | 6,199.59 | 6.21 | 46.2 | 61.3 | 75.1 | 77.3 | 57.6 | 51.3 | 50 | 0 | 100 | 51.80 | 59.14 | 100 |
| 14:37:50 | 6,039.12 | 6.04 | 46.3 | 61.5 | 74.9 | 77.0 | 57.6 | 51.3 | 50 | 0 | 100 | 52.44 | 39.38 | 100 |
| 14:38:00 | 6,176.95 | 6.42 | 46.4 | 61.9 | 73.9 | 77.0 | 57.5 | 51.4 | 50 | 0 | 100 | 52.28 | 19.18 | 100 |
| 14:38:10 | 6,141.26 | 6.31 | 46.4 | 62.2 | 72.4 | 77.3 | 57.5 | 51.3 | 50 | 0 | 100 | 52.05 | 2.63 | 100 |
| 14:38:20 | 6,180.89 | 6.16 | 46.3 | 62.3 | 70.8 | 77.8 | 57.4 | 51.1 | 50 | 77.07 | 100 | 51.76 | 0.76 | 100 |
| 14:38:30 | 6,156.52 | 6.36 | 46.1 | 62.1 | 69.5 | 78.0 | 57.3 | 50.9 | 50 | 77.54 | 75 | 51.97 | 19.41 | 100 |
| 14:38:40 | 6,176.70 | 6.25 | 45.9 | 61.5 | 68.7 | 77.9 | 57.2 | 50.6 | 50 | 79.54 | 75 | 52.18 | 39.27 | 94.73 |
| 14:38:50 | 5,873.73 | 6.24 | 45.7 | 60.5 | 68.4 | 77.5 | 57.0 | 50.2 | 50 | 81.05 | 75 | 51.97 | 59.28 | 78.47 |
| 14:39:00 | 5,678.80 | 5.86 | 45.5 | 60.0 | 69.1 | 77.0 | 56.9 | 49.8 | 50 | 81.65 | 75 | 52.24 | 79.44 | 77.67 |

**6.3.1 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ (FCV1)**

เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำร้อนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์เพื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ที่เวลา 14:37:00 น. ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 6.3 สามารถหาตำแหน่งวาล์วควบคุมที่เหมาะสมที่ควบคุมให้น้ำมีอุณหภูมิตามที่กำหนดคือ 70 °C ได้โดยอาศัยกฎอนุรักษ์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ดังนี้

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_1 (h_{1b} - h_{1a})}{(h_{1d} - h_{2a})} \tag{3.11}$$

เมื่อข้อมูลที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูล

$\dot{m}_1$ = 6,032.72 kg/h

$h_{1a}$ = 191.66 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_1 = 45.8 °C)

$h_{1b}$ = 292.98 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 70 °C)

$h_{1d}$ = 337.02 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_4 = 80.5 °C)

$h_{2a}$ = 214.95 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_6 = 51.4 °C)

โดยนำค่าที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูลแทนในสมการ (3.11) ดังนี้

$$\dot{m}_2 = \frac{6{,}032.72(292.98 - 191.66)}{(337.02 - 214.95)}$$

$$\dot{m}_2 = 5{,}007.25 \text{ kg/h}$$

จาก $\dot{m}_2 = 5{,}007.25$ kg/h ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ต้องการน้ำร้อนปริมาณทั้งหมด 5,007.25 kg/h ในการอุ่นน้ำที่ออกจากปั๊ม เพื่อให้มีอุณหภูมิ 70 °C

จากการทดลองในเบื้องต้น พบว่าน้ำร้อนสำหรับนำมาอุ่นน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ปริมาณมากที่สุดคือ 3,600 kg/h ที่ตำแหน่งการเปิดของวาล์วควบคุม 50% ซึ่งถ้านำน้ำร้อนมาใช้ในปริมาณที่มากกว่านี้จะทำให้ระดับน้ำในหม้อไอน้ำลดลง

จากตารางที่ 6.2 พบว่า FCV1 จะถูกสั่งให้เปิดที่ 50% โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งการเปิด 50% จริง

เมื่อวาล์วควบคุมเปิดที่ตำแหน่ง 50% แล้ว พบว่าน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 มีอุณหภูมิ 62.4 °C ซึ่งน้อยกว่าที่ได้กำหนดไว้คือ 70 °C ดังนั้น น้ำจึงไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ต่อไป โดยอาศัยความร้อนจากไอน้ำบางส่วนที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ

### 6.3.2 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2)

เมื่อพิจารณาที่วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำสำหรับนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ที่เวลา 14:37:00 น. สามารถหาตำแหน่งวาล์วควบคุมที่เหมาะสมที่ควบคุมให้น้ำมีอุณหภูมิตามที่กำหนดคือ 70 °C ได้โดยอาศัยกฎอนุรักษ์พลังงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 ดังนี้

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{m}_1 (h_{1c} - h_{1b})}{(h_{5a} - h_{5b})} \qquad (3.13)$$

เมื่อข้อมูลที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูล

$\dot{m}_1$ = 6,032.72 kg/h

$h_{1b}$ = 261.14 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_2 = 62.4 °C)

$h_{1c}$ = 292.98 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่กำหนดเท่ากับ 70 °C)

$h_{5a}$ = 2,568.51 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ ความดันไอน้ำ = 6.32 บาร์)

$h_{5b}$ = 214.95 kJ/kg (สามารถหาได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง PT100_5 = 57.9 °C)

โดยนำค่าที่อ่านได้จากการบันทึกข้อมูลแทนในสมการ (3.13) ดังนี้

$$\dot{m}_5 = \frac{6{,}032.72(292.98 - 261.14)}{(2{,}568.51 - 214.95)}$$

$$\dot{m}_5 = 82.57 \text{ kg/h}$$

จาก $\dot{m}_5 = 82.57$ kg/h ที่ได้ แสดงให้เห็นว่าต้องการปริมาณไอน้ำทั้งหมด 82.57 kg/h ในการให้ความร้อนกับน้ำภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 เพื่อให้มีอุณหภูมิ 70 °C โดยในการหาตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อให้ได้ปริมาณไอน้ำเพียงพอต่อการให้ความร้อนแก่น้ำนั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$S_{o,2} = 25.56 \ln(\dot{m}_5) - 36.68 \quad (6.1)$$

ซึ่งจากสมการพบว่าตำแหน่งวาล์วควบคุมควรอยู่ที่ตำแหน่งเปิด 76.13% และจากการทดลองพบว่าวาล์วควบคุมอยู่ที่ตำแหน่งเปิด 60.04% แต่ถ้าพิจารณาในช่วงเวลาต่อๆ ไป จะพบว่าตำแหน่งวาล์วควบคุมจะมายังตำแหน่งเปิดที่เพิ่มมากขึ้นเพื่อมายังตำแหน่งเปิด 76.13% ซึ่งในช่วงเวลานี้ (14.37 น.) พบว่าอุณหภูมิน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 จะอยู่ที่ 69 °C

นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงเวลา 14:37:30 - 14:38:10 น. วาล์วควบคุมตัวที่ 2 จะปิด 0% เนื่องจากน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์มีอุณหภูมิตามที่ได้กำหนด ( 70 °C) และในช่วงเวลา 14:38:20 - 14:39:00 น. น้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เริ่มมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ FCV2 เริ่มเปิดต่อไป

**6.3.3 การตรวจสอบวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (FCV3)**

จากที่พบว่าอุณหภูมิน้ำหลังออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 จะอยู่ที่ 69 °C นั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีคำสั่งให้ FCV3 อยู่ที่ตำแหน่ง 75% เนื่องจากน้ำมีอุณหภูมิน้อยกว่าตามที่ได้กำหนดไว้คือ 70 °C โดยจากการทดลองพบว่าวาล์วควบคุมน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง 75% จริง

# บทที่ 7

# ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

สำหรับบทนี้จะนำเสนออุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ อุณหภูมิของน้ำภายในท่อก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์ ตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว และเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ด้วยวิธีต่างๆ ที่ได้ทำการทดลอง

โดยในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งวิธีการควบคุมระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ทั้งหมด 3 วิธี ประกอบด้วย

1) การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด

2) การควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด

3) การควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบปิด ซึ่งมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

## 7.1 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

จากการศึกษาอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัว พบว่าเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวต่างกัน โดยในที่นี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของเชื้อเพลิงต่างๆ ดังนี้

1) น้ำมันเตา

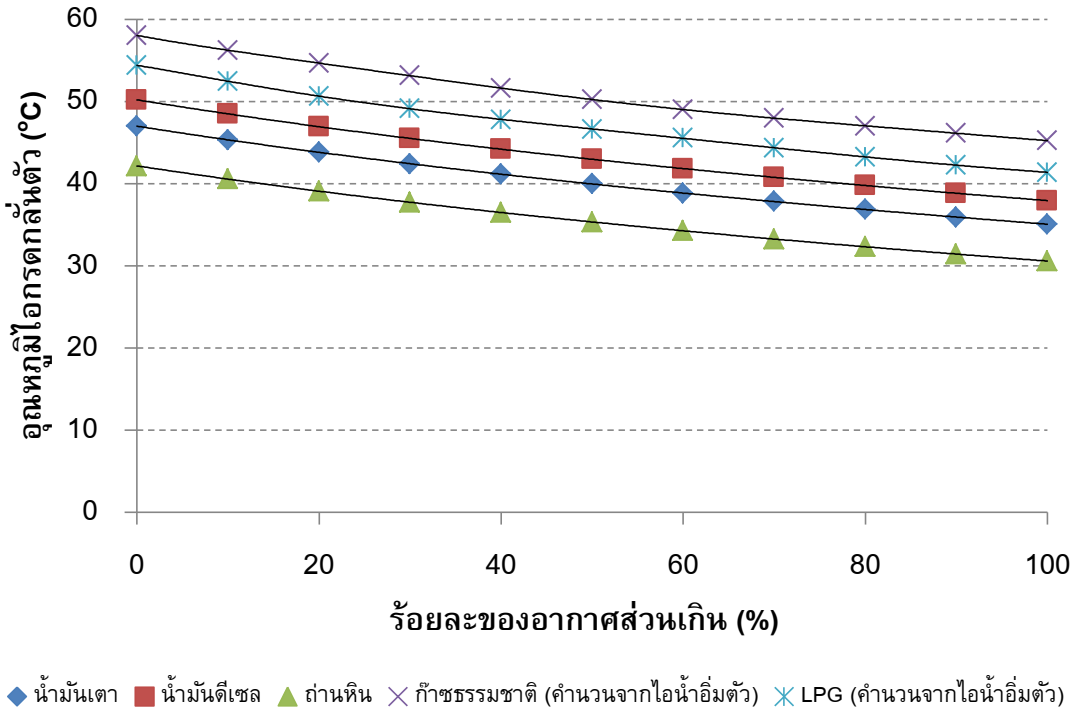
2) น้ำมันดีเซล

3) ถ่านหิน

4) ก๊าซธรรมชาติ

5) ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

เมื่อการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้หมดพอดี (ร้อยละของอากาศส่วนเกินเป็นศูนย์) เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซปิโตรเลียมเหลว น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา และถ่านหิน จะมีอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวที่ 59.6 °C, 54.4 °C, 50.2 °C, 47.0 °C และ 42.2 °C ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 7.1




ภาพที่ 7.1 อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวสำหรับเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

สำหรับท่อภายในอีโคโนไมเซอร์นั้นประกอบด้วย 18 ท่อ 22 แถว โดยในการแสดงผลอุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์นั้น ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ (เทอร์มอคัปเปิลชนิด K) จำนวน 4 ตัว ประกอบด้วย

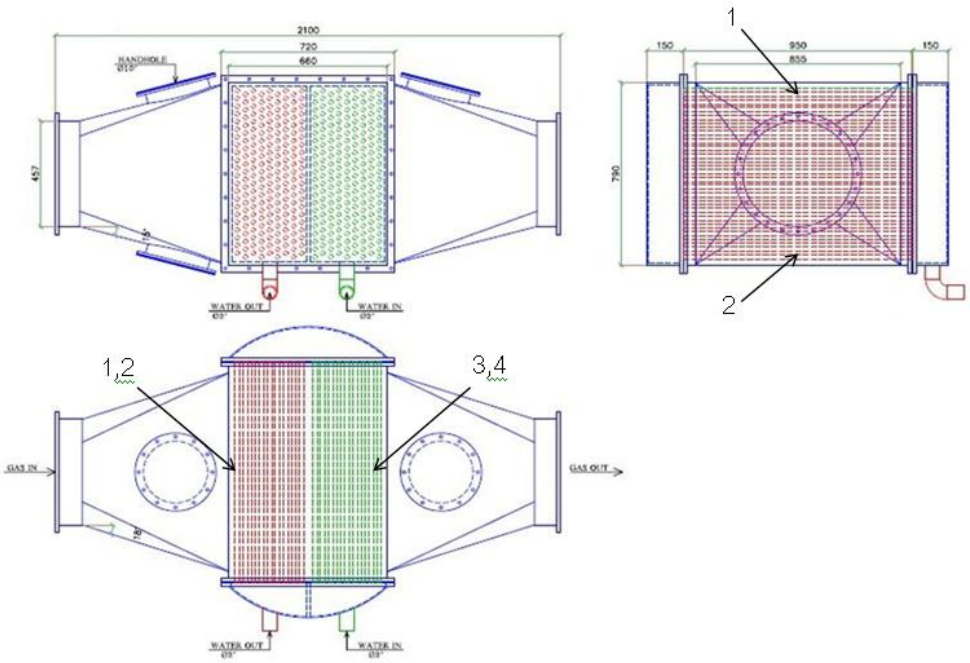
1) เทอร์มอคัปเปิลตัวที่ 1 จะติดตั้งบริเวณผิวท่อบริเวณทางออกของน้ำและบริเวณทางเข้าของก๊าซไอเสีย ที่ตำแหน่งท่อที่ 1 แถวที่ 21

2) เทอร์มอคัปเปิลตัวที่ 2 จะติดตั้งบริเวณผิวท่อบริเวณทางออกของน้ำและบริเวณทางเข้าของก๊าซไอเสีย ที่ตำแหน่งท่อที่ 1 แถวที่ 2

3) เทอร์มอคัปเปิลตัวที่ 3 จะติดตั้งบริเวณผิวท่อบริเวณทางเข้าของน้ำและบริเวณทางออกของก๊าซไอเสีย ที่ตำแหน่งท่อที่ 17 แถวที่ 2

4) เทอร์มอคัปเปิลตัวที่ 4 จะติดตั้งบริเวณผิวท่อบริเวณทางเข้าของน้ำและบริเวณทางออกของก๊าซไอเสีย ที่ตำแหน่งท่อที่ 17 แถวที่ 21

โดยตำแหน่งการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลชนิด K ทั้ง 4 ตัว บริเวรผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์แสดงดังภาพที่ 7.2

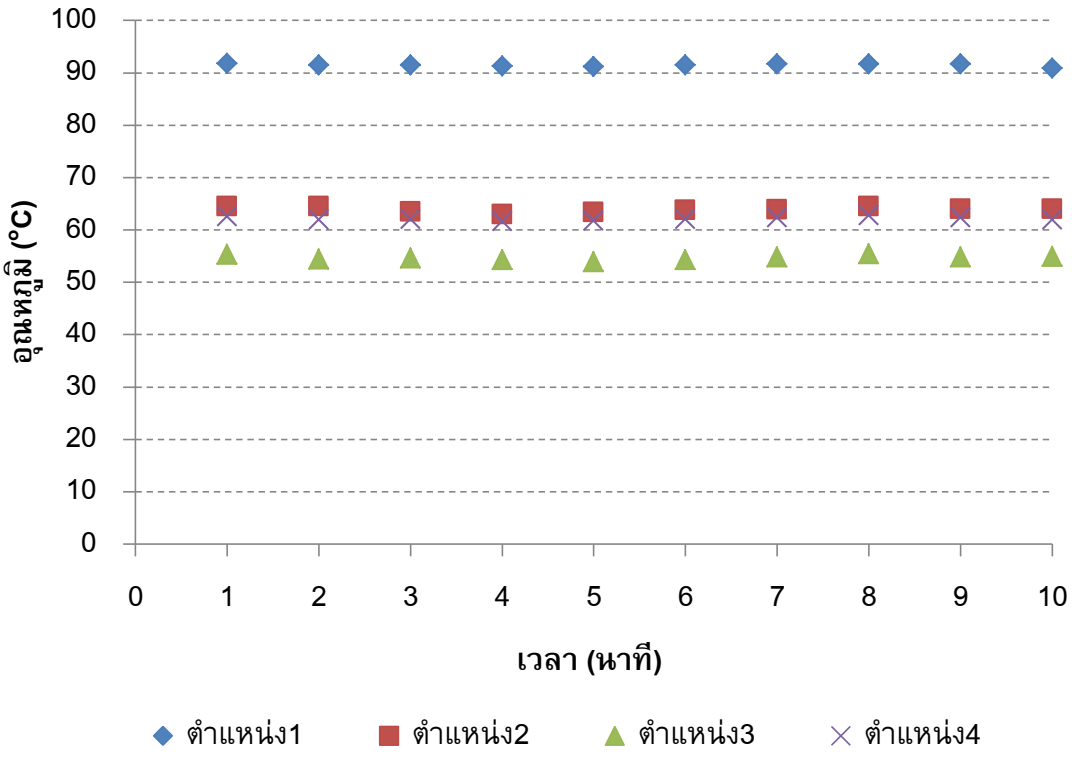



ภาพที่ 7.2 การติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลชนิด K บริเวณตำแหน่งต่างๆ

**7.2 อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์ เมื่อไม่มีการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์**

จากการทดลองการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว กรณีศึกษาที่โรงพยาบาลปทุมธานี

โดยหม้อไอน้ำที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนั้น มีอุณหภูมิก๊าซเสียประมาณ 170 $^{\circ}$C และก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์น้ำมีอุณหภูมิประมาณ 40 - 45 $^{\circ}$C เมื่อไม่มีการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ พบว่าอุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์บริเวณตำแหน่งต่างๆ แสดงดังภาพที่ 7.3



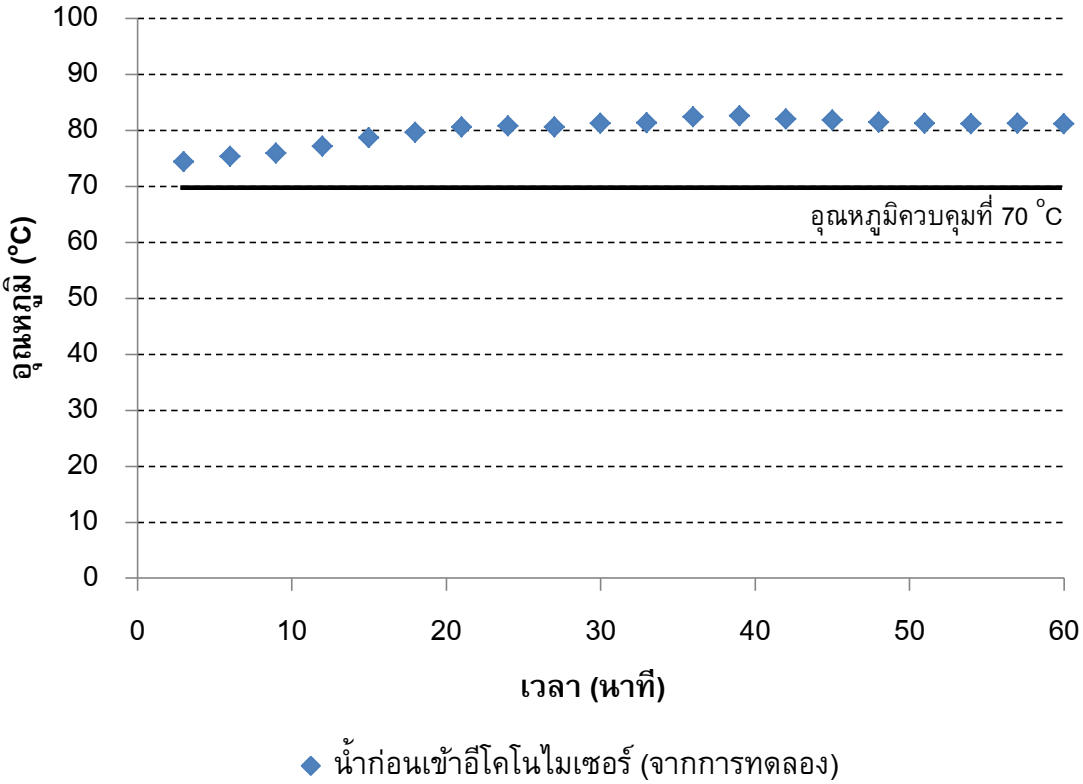

ภาพที่ 7.3 อุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์บริเวณตำแหน่งต่างๆ

จากภาพที่ 7.3 ก่อนที่จะมีการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น ผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์จะมีอุณหภูมิในบริเวณตำแหน่งที่ 3 ต่ำสุด 53.9 $^{\circ}$C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงบางชนิด เมื่อมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงหมดพอดี (ร้อยละของอากาศที่มากเกินพอเป็นศูนย์) เช่น ก๊าซธรรมชาติและก๊าซปิโตรเลียมเหลว เป็นต้น ซึ่งการที่อุณหภูมิผิวท่อต่ำกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดนั้น ก่อให้เกิดปัญหาการผุกร่อนของอุปกรณ์ภายในอีโคโนไมเซอร์ เนื่องไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำและรวมตัวกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเช่นกัน กลายเป็น sulfurous acid ($H_2SO_3$) ซึ่งมีฤทธิ์ในการกัดกร่อนสูง ซึ่งปัญหานี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม

ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้มีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ให้สูงกว่าอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยในที่นี้ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

**7.3 การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม ซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด**

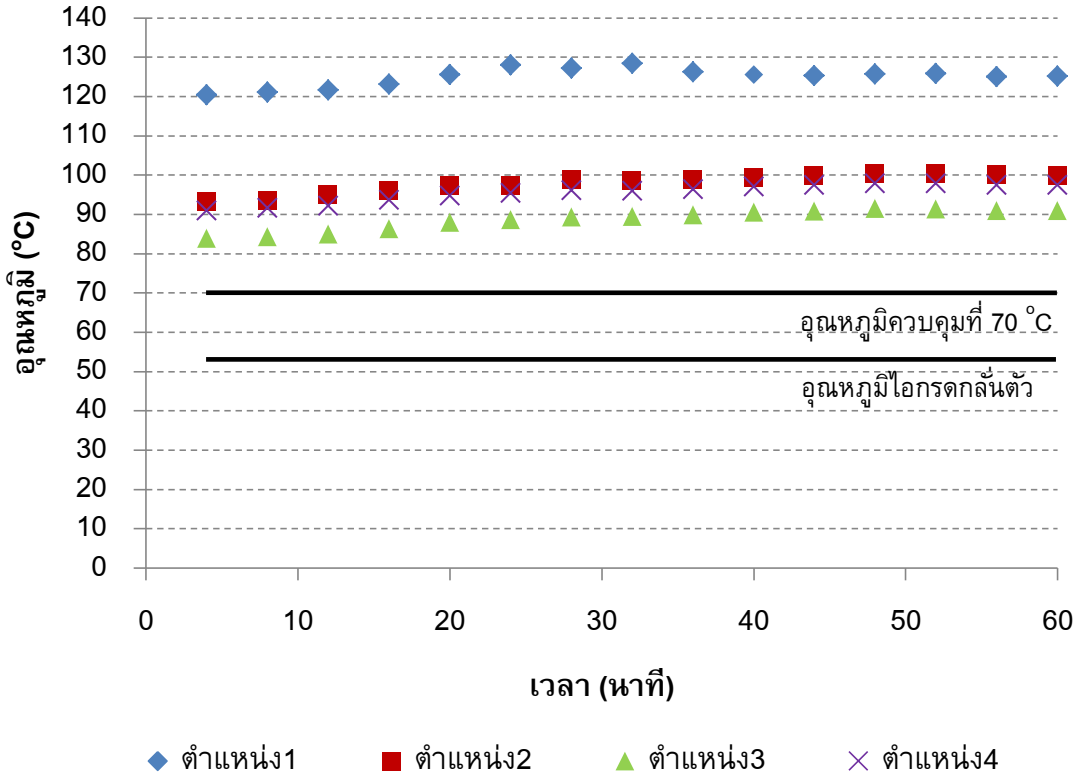
ในการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น ได้กำหนดอุณหภูมิให้น้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์สูงกว่า 70 °C เพื่อป้องกันกรดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดการกลั่นตัว โดยในการควบคุมนั้นเป็นการควบคุมแบบเปิด ซึ่งแสดงอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ได้ดังภาพที่ 7.4




ภาพที่ 7.4 อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ปรับตามสมการของวาล์วควบคุม

จากภาพที่ 7.4 เมื่อใช้สมการของวาล์วควบคุมในการควบคุมระบบ พบว่าเมื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ 70 °C ผลที่ได้คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์จะอยู่ระหว่าง 74 °C - 82 °C ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนจากที่ได้กำหนดไว้ 5.71- 17.14%

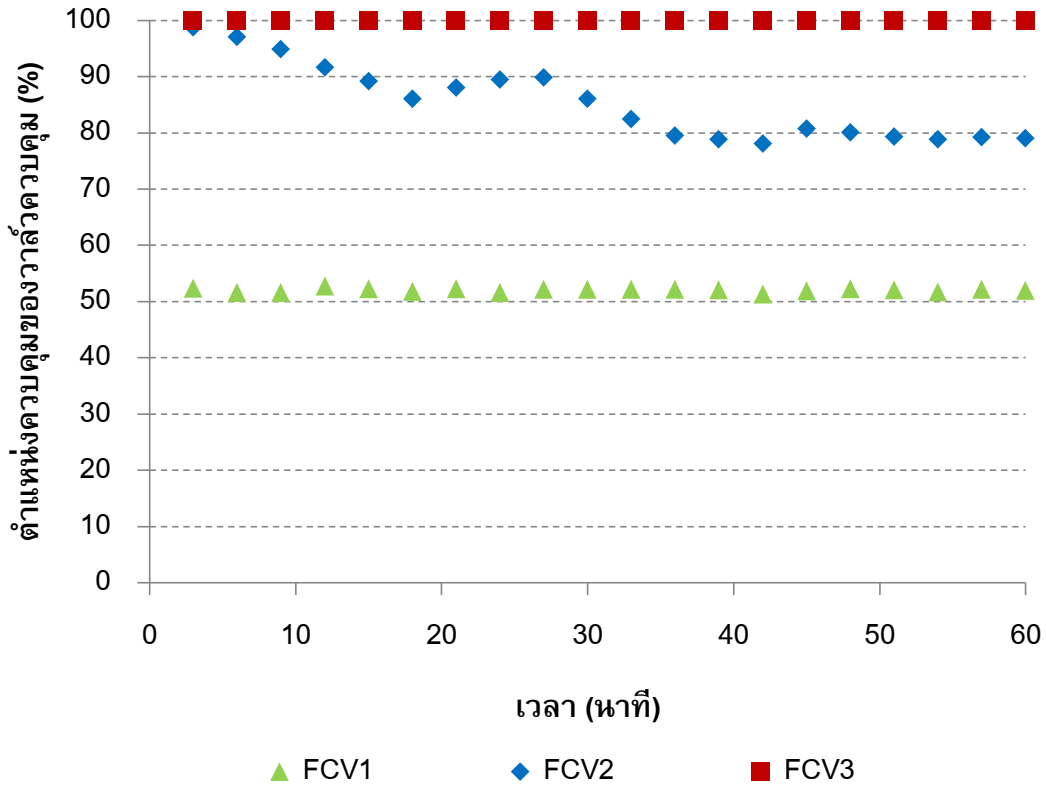
สำหรับอุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังภาพที่ 7.5




ภาพที่ 7.5 อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์ตามสมการวาล์วควบคุม

จากภาพที่ 7.5 พบว่าอุณภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอณ์ตำแหน่งที่ 3 จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากเป็นตำแหน่งทางเข้าของน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิผิวท่อต่ำสุดจะประมาณ 84 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของก๊าซซิโตรเลียมเหลว จึงไม่ทำเกิดการผุกร่อนของท่อภายในอีโคโนไมเซอร์

นอกจากนี้ยังได้มีการแสดงตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว เมื่อมีการควบคุมระบบโดยการใช้สมการของวาล์วควบคุม แสดงดังภาพ



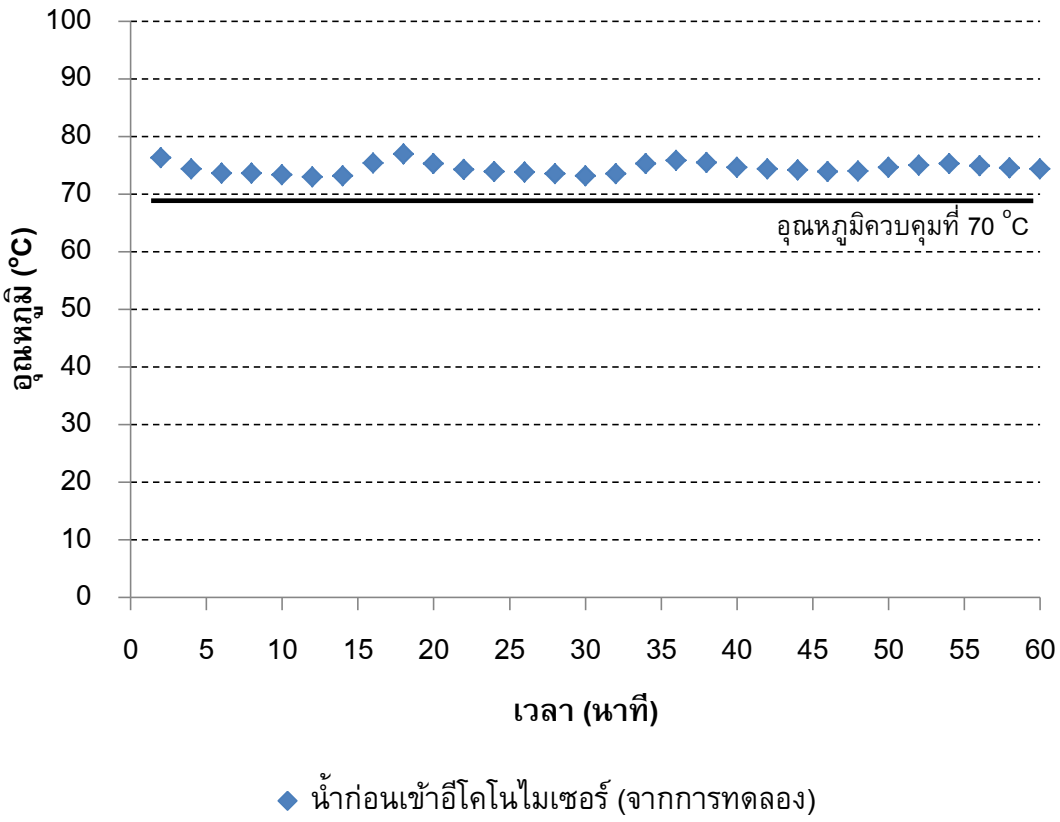

ภาพที่ 7.6 ตำแหน่งควบคุมสำหรับการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม

ภาพที่ 7.6 เป็นการแสดงตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมซึ่งพบว่าวาล์วควบคุมทุกตัวมีการเปิดตลอดเวลา ทำให้มีการนำไอน้ำบางส่วนที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำมาใช้ในการอุ่นน้ำตลอดเวลา คิดเป็นปริมาณไอน้ำ 144.65 kg/h

สำหรับการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุมนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมินั้นยังมีอยู่มาก และวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2) ยังคงมีการเปิดตลอด ทำให้มีการนำไอน้ำมาใช้ในปริมาณที่มากกว่าวิธีการควบคุมแบบอื่นๆ

**7.4 การควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด**

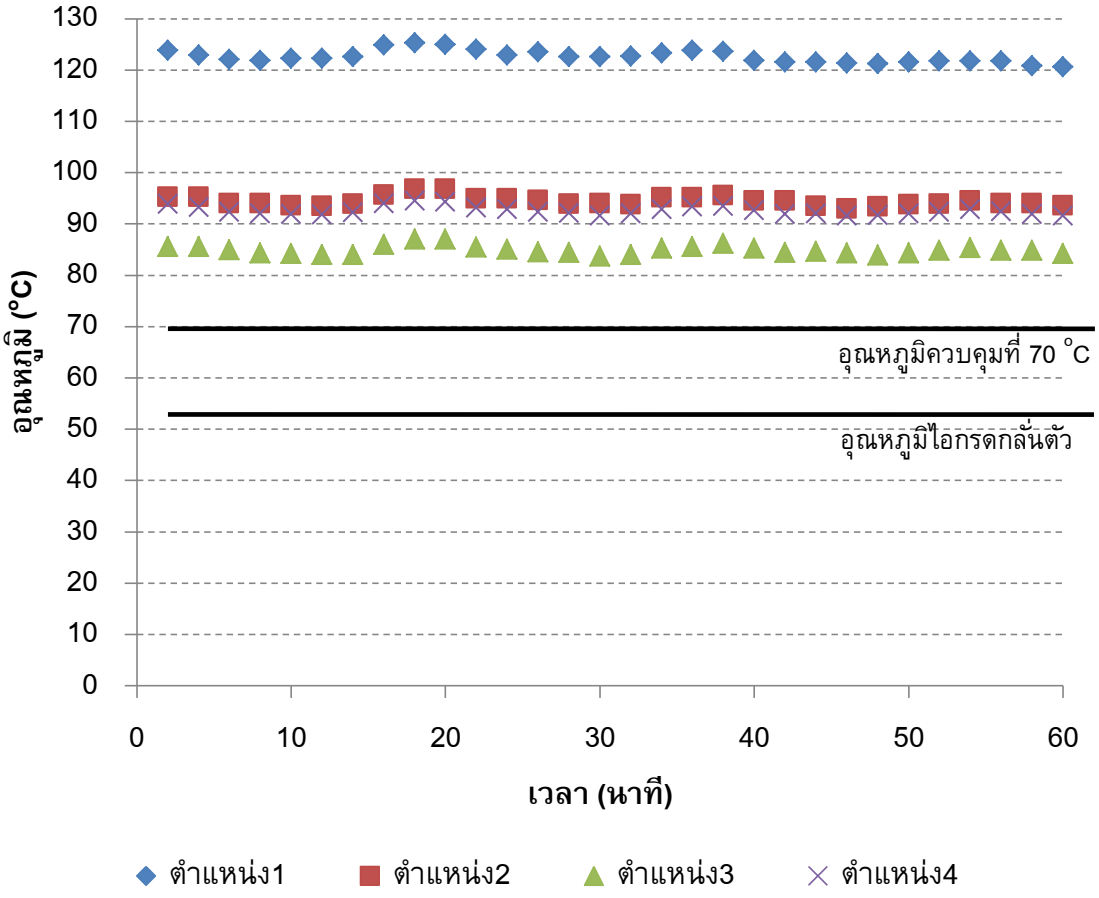
ในการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น ได้กำหนดอุณหภูมิให้น้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์สูงกว่า 70 °C เพื่อป้องกันกรดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดการกลั่นตัว โดยในการควบคุมนั้นเป็นการควบคุมแบบเปิด ซึ่งแสดงอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ได้ดังภาพที่ 7.7




ภาพที่ 7.7 อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์จากสมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ

จากภาพที่ 7.7 เมื่อใช้สมการของวาล์วควบคุมในการควบคุมระบบ พบว่าเมื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ 70 °C ผลที่ได้คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์จะอยู่ระหว่าง 72 °C - 76 °C ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนจากที่ได้กำหนดไว้ 2.86 - 8.57%

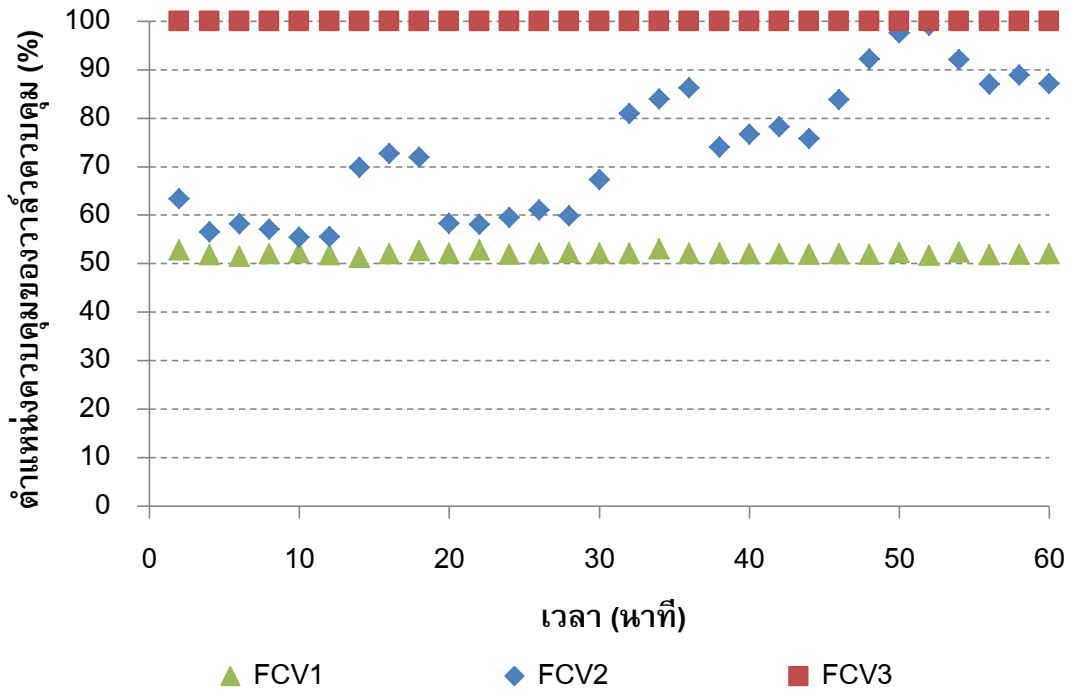
สำหรับอุณหภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังภาพที่ 7.8




ภาพที่ 7.8 อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์สำหรับการควบคุมแบบปิดเมื่อใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ

จากภาพที่ 7.8 พบว่าอุณภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอณ์ตำแหน่งที่ 3 จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากเป็นตำแหน่งทางเข้าของน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิผิวท่อต่ำสุดจะประมาณ 84 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของก๊าซปิโตรเลียมเหลว จึงไม่ทำให้เกิดการผุกร่อนของท่อภายในอีโคโนไมเซอร์

นอกจากนี้ยังได้มีการแสดงตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว เมื่อมีการควบคุมระบบโดยการใช้สมการของวาล์วควบคุม แสดงดังภาพ




ภาพที่ 7.9 ตำแหน่งควบคุมสำหรับการควบคุมแบบปิดเมื่อใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ

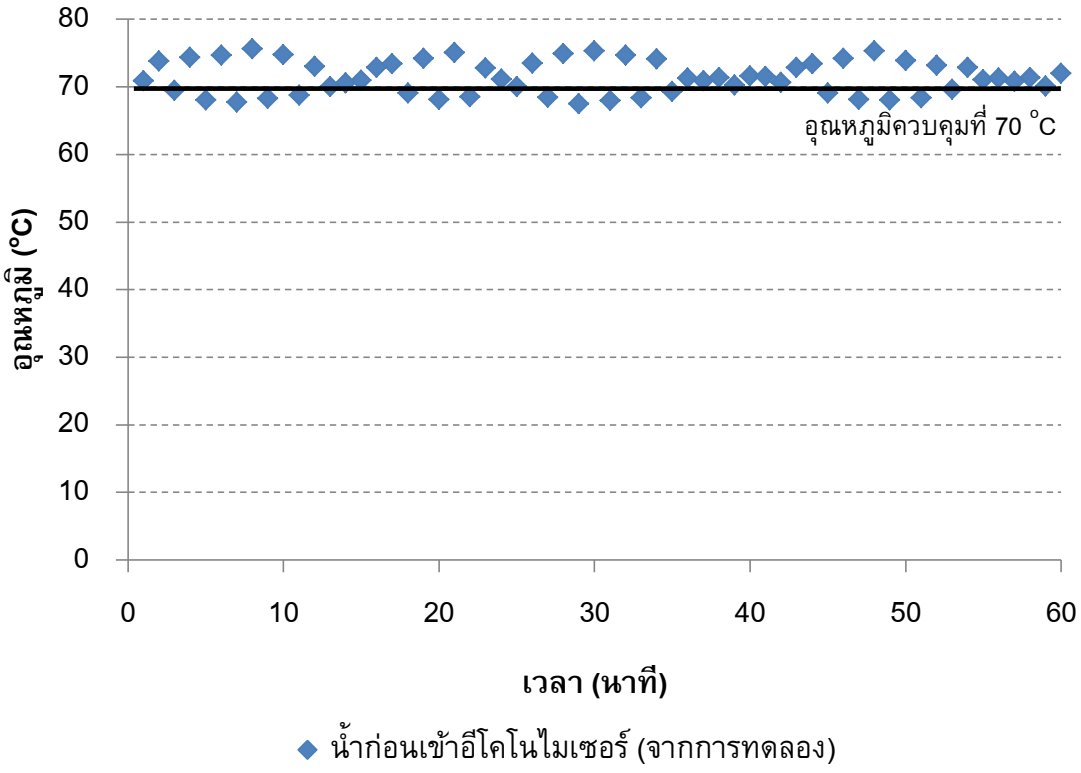
ภาพที่ 7.9 เป็นการแสดงตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมซึ่งพบว่าวาล์วควบคุมทุกตัวมีการเปิดตลอดเวลา ทำให้มีการนำไอน้ำบางส่วนที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำมาใช้ในการอุ่นน้ำตลอดเวลา คิดเป็นปริมาณไอน้ำ 136.89 kg/h

สำหรับการควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมินั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย เมื่อเทียบกับวิธีการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม แต่วิธีนี้วาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2) ยังคงมีการเปิดตลอด ทำให้มีการนำไอน้ำมาใช้ตลอดเวลา แต่ปริมาณไอน้ำที่นำมาใช้นั้น จะน้อยกว่าการควบคุมโดยวิธีที่ 1

## 7.5 การควบคุมโดยใช้การควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

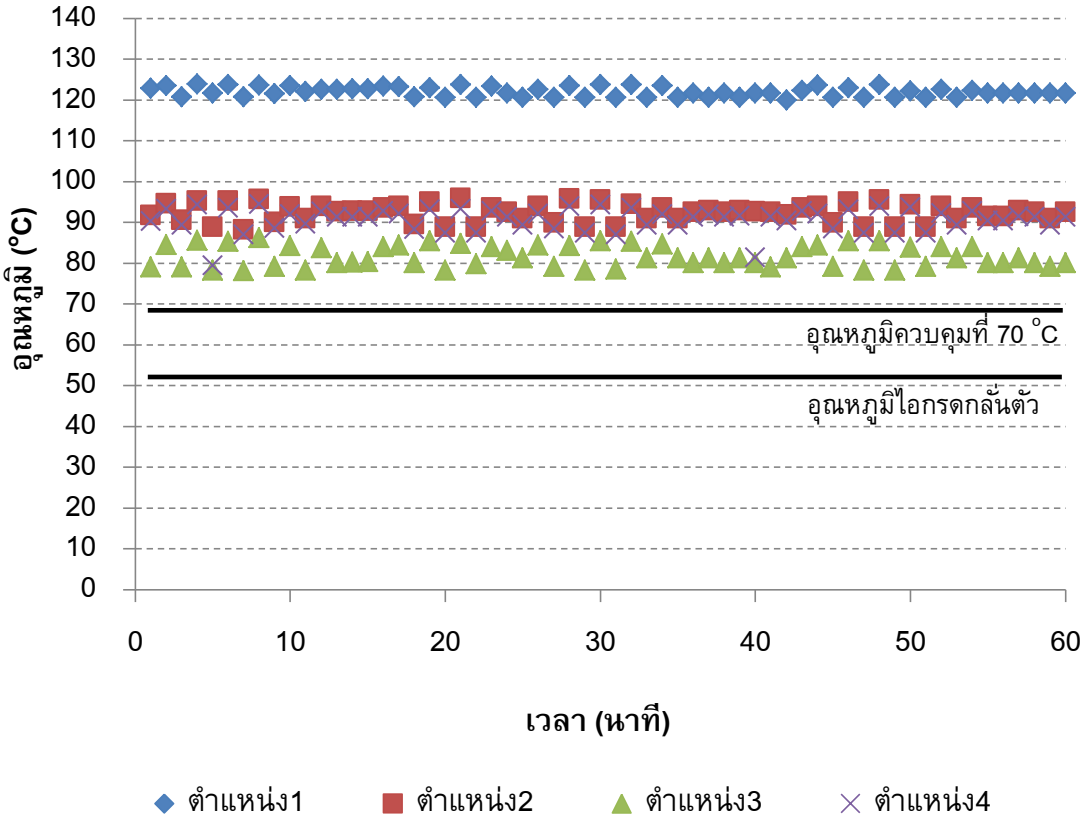
จากที่ทราบมาแล้วว่า การควบคุมแบบปิด คือ การควบคุมที่มีการเปรียบเทียบระหว่างสิ่งที่ได้กับสิ่งที่ได้กำหนดไว้ โดยมีการส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุมเพื่อที่จะแก้ไขให้สิ่งที่ได้ให้เข้าใกล้กับสิ่งที่ได้กำหนดไว้ให้มากที่สุด โดยในระบบการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนี้ ได้กำหนดสิ่งที่กำหนดไว้ คือ อุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโค

โนไมเซอร์ ซึ่งมีค่าความคลาดไม่เกิน 2.86% (กำหนดอุณหภูมิไว้ที่ 70 °C อุณหภูมิคลาดเคลื่อนต้องไม่เกิน 72 °C) ซึ่งแสดงอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ได้ดังภาพที่ 7.10




ภาพที่ 7.10 อุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์การควบคุมเป็นแบบปิด

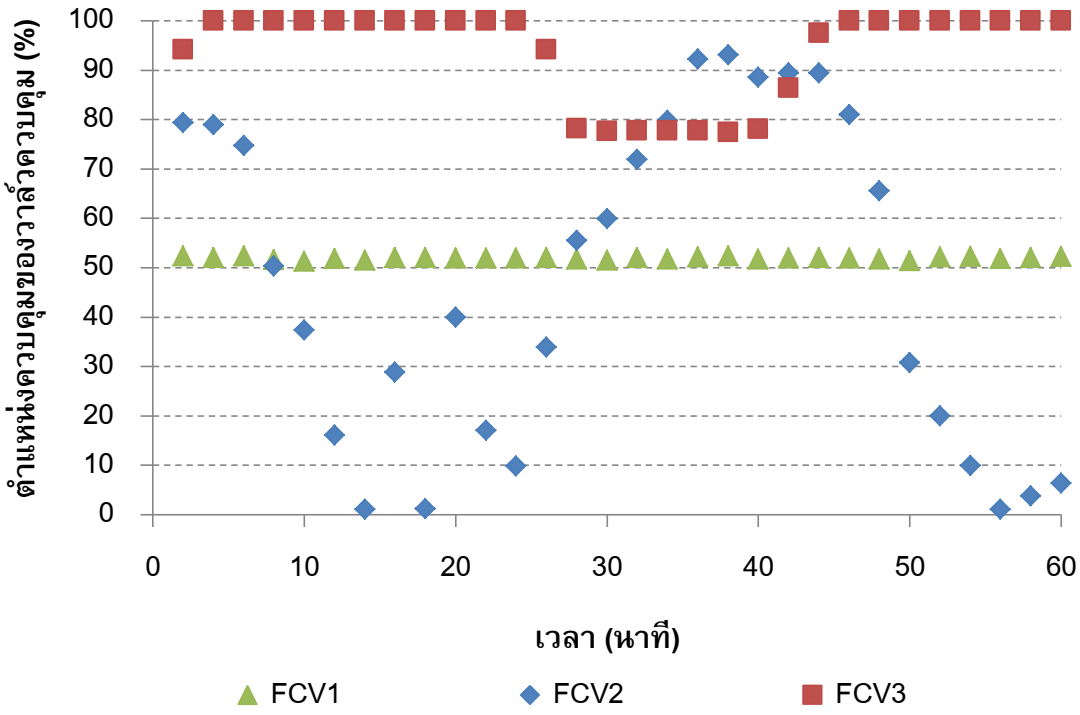
จากภาพที่ 7.10 พบว่าน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์จะมีอุณหภูมิ 67.5 - 75.8 °C ซึ่งค่าอุณหภูมิที่ได้นั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนจากที่ได้กำหนดไว้ 3.57 – 8.29%




ภาพที่ 7.11 อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์เมื่อเป็นการควบคุมแบบปิด

จากภาพที่ 7.11 พบว่าอุณภูมิผิวท่อด้านนอกภายในอีโคโนไมเซอณ์ตำแหน่งที่ 3 จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากเป็นตำแหน่งทางเข้าของน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยอุณหภูมิผิวท่อต่ำสุดจะประมาณ 78 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของก๊าซปิโตรเลียมเหลว จึงไม่ทำให้กรดเกิดการกลั่นตัวและไม่ทำให้เกิดการผุกร่อนของท่อภายในอีโคโนไมเซอร์

นอกจากนี้ยังได้มีการแสดงตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมทั้ง 3 ตัว เมื่อมีการควบคุมระบบโดยการใช้สมการของวาล์วควบคุม แสดงดังภาพ




ภาพที่ 7.12 ตำแหน่งควบคุมเมื่อเป็นการควบคุมแบบปิด

ภาพที่ 7.12 เป็นการแสดงตำแหน่งการควบคุมของวาล์วควบคุมซึ่งพบว่าวาล์วควบคุมที่ควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ เพื่อนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 2 นั้น บางช่วงเวลาอยู่ที่ตำแหน่งปิด 0% ทำให้ใช้ปริมาณไอน้ำในการอุ่นน้ำน้อยลง คิดเป็นปริมาณไอน้ำ 55.33 kg/h

สำหรับการควบคุมโดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้น ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมินั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย เมื่อเทียบกับวิธีการควบคุมทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมา โดยวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2) ในบางช่วงเวลามีการปิด 0% ทำให้การควบคุมด้วยวิธีนี้นำไอน้ำมาใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าวิธีอื่นๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่า FCV2 จะมีตำแหน่งควบคุมที่ไม่หยุดนิ่งมีการสลับตำแหน่งควบคุมตลอดเวลา อาจทำให้กลไกของวาล์วควบคุมเสียหาย เมื่อมีการใช้งานไปเป็นเวลานาน

## 7.6 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ด้วยวิธีต่าง ๆ

การอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้น ในการทดลองได้ควบคุมการทำงานของวาล์วควบคุม 3 วิธี คือ กรณีที่ใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด กรณีที่ใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ

โดยการควบคุมแบบเปิด และกรณีที่ใช้การควบคุมแบบปิดคือมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ทั้ง 3 วิธี สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ด้วยวิธีต่างๆ

| รายการ | ก่อนอุ่นน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ | ใช้สมการของวาล์วควบคุม (แบบเปิด) | ใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ (แบบเปิด) | การควบคุมแบบปิด |
|---|---|---|---|---|
| 1. อุณหภูมิน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ($^{\circ}$C) | 41 - 46 | 77 - 86 | 77 - 80 | 74 - 82 |
| 2. ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (kg/h) | 82.59 | 102.40 | 103.27 | 103.43 |
| 3. ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ (ton/h) | 0.93 | 1.31 | 1.34 | 1.29 |
| 4. ปริมาณไอน้ำที่นำกลับมาใช้ในการอุ่นน้ำ (ton/h) | - | 0.145 | 0.137 | 0.055 |
| 5. ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้สุทธิ (ton/h) | 0.93 | 1.17 | 1.20 | 1.23 |
| 6. อัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ต่อ ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้สุทธิ (kg-fuel / ton-steam) | 88.99 | 87.73 | 86.04 | 83.85 |
| 7. ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่ลดลง (%) | - | 1.41 | 3.32 | 5.77 |

จากตารางที่ 7.1 พบว่า ในเริ่มแรกก่อนที่จะทำการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้น จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ต่อ ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้สุทธิ 88.99 $kg_{fuel}$ / $ton_{steam}$

เมื่อมีการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวด้วยวิธีการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมแบบเปิด จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ต่อ ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้สุทธิ 88.99 $kg_{fuel}$ / $ton_{steam}$ และสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 1.41% เมื่อเทียบกับช่วงแรกก่อนที่จะมีการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

เมื่อมีการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ด้วยวิธีการใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อ ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้สุทธิ 86.04 $kg_{fuel}$ / $ton_{steam}$ และสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 3.32% เมื่อเทียบกับช่วงแรกก่อนที่จะมีการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

และเมื่อใช้การควบคุมโดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณการใช้เชื้อเพลิง ต่อ ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้สุทธิ 83.85 $kg_{fuel}$ / $ton_{steam}$ และจะสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 5.77% เมื่อเทียบกับช่วงแรกก่อนที่มีการอุ่นน้ำ ซึ่งวิธีนี้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าวิธีการควบคุมแบบอื่นๆ

# บทที่ 8

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเกิดการกลั่นตัว สำหรับการควบคุมอุณหภูมิน้ำนั้น ได้ใช้กฎอนุรักษ์มวลและกฎอนุรักษ์พลังงานในการปรับอัตราการไหลของน้ำและไอน้ำผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปที่ได้จากงานวิจัย และข้อเสนอแนะต่างๆ

## 8.1 สรุปผลการวิจัย

8.1.1 ในการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น อุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของก๊าซปิโตรเลียมเหลวประมาณ 54 $^{\circ}$C ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้มีการกำหนดให้น้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์มีอุณหภูมิ 70 $^{\circ}$C ผลที่ได้คืออุณหภูมิผิวด้านนอกของท่อภายในอีโคโนไมเซอร์นั้น ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำสุดคือ ตำแหน่งบริเวณผิวท่อบริเวณทางเข้าของน้ำและบริเวณทางออกของก๊าซเสีย ที่ตำแหน่งท่อที่ 17 แถวที่ 2 มีอุณหภูมิประมาณ 84 $^{\circ}$C ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าอุณหภูมิไอกรดกลั่นตัวของก๊าซปิโตรเลียมเหลว

8.1.2 จากการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ในแต่ละวิธี ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม การควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ และการควบคุมโดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์นั้น พบว่า

1) การควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมินั้นยังมีอยู่มาก และมีการนำไอน้ำมาใช้ในปริมาณที่มากกว่าวิธีการควบคุมแบบอื่นๆ

2) การควบคุมโดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุม เพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำ ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมินั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย เมื่อเทียบกับวิธีการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม นอกจากนี้ยังมีการนำไอน้ำมาใช้ตลอดเวลา แต่ปริมาณไอน้ำที่นำมาใช้นั้น จะน้อยกว่าวิธีการควบคุมโดยใช้สมการของวาล์วควบคุม

3) การควบคุมโดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมอุณหภูมินั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อย เมื่อเทียบกับวิธีการควบคุมทั้ง 2 วิธีที่กล่าวมา โดยการควบคุมด้วยวิธีนี้มีการนำไอน้ำมาใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าวิธีอื่นๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่าวาล์วควบคุมอัตราการไหลของไอน้ำ (FCV2) จะมีตำแหน่งควบคุมที่ไม่หยุดนิ่งมีการสลับตำแหน่งควบคุมตลอดเวลา อาจทำให้กลไกของวาล์วควบคุมเสียหาย เมื่อมีการใช้งานไปเป็นเวลานาน

8.1.3 ในระบบการควบคุมอุณหภูมิของน้ำผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้น พบว่าระบบการทำงานของวาล์วควบคุมในการเปลี่ยนไปยังตำแหน่งควบคุมต่างๆ นั้น มีการตอบสนองที่ช้ากว่าค่าตำแหน่งควบคุมที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต้องการ ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำภายในท่อคลาดเคลื่อนจากที่ต้องการ

**8.2 ข้อเสนอแนะ**

8.2.1 ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เป็นการทดลองยังไม่ถึงที่ภาระสูงสุด (full load) ของหม้อไอน้ำ ดังนั้น ถ้าหม้อไอน้ำมีการทำงานที่ภาระสูงสุดอาจทำให้ข้อมูลต่างๆ ที่ได้เปลี่ยนแปลงไป

8.2.2 การเลือกอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิ ต้องเหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ช่วงของอุณหภูมิ ขนาด ซึ่งต้องให้แน่ใจว่าสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุหณภูมิที่แตกต่างกันมากๆ ได้ โดยที่อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิยังอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้

8.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดและอุปกรณ์สำหรับการควบคุมระบบ ต้องให้แน่ใจว่าอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่ เพราะถ้าหากว่าตำแหน่งติดตั้งคลาดเคลื่อนไป จะทำให้เมื่อระบบทำงานค่าบางค่าอาจจะขาดหายไปหรือไม่ถูกต้อง

8.2.4 ในการเคลื่อนที่ของวาล์วควบคุมไปแต่ละตำแหน่งนั้น จะมีค่าความคลาดเคลื่อนด้วยเสมอ ควรคำนึงถึงค่าความคลาดเคลื่อนนี้ด้วย

# รายการอ้างอิง


[1] Somkiat, B. The effect of waste heat recovery efficiency on the cost reduction of the electric generation fueled by a paddy hush. King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. Thailand.

[2] ธนกร ณ พัทลุง. ข้อพิจารณาศักยภาพความร้อนทิ้งสำหรับติดตั้ง Economizer [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/p34-39.pdf [22 กันยายน 2553]

[3] Mobin, M., Malik, A. U., and Al-Hajri, M. Investigations on the failure of economizer tubes in a high-pressure boiler. ASM International 8 (2008) : 69-74.

[4] Pena, F. and Blanco, J.M.. Evaluation of the physical dew point in the economizer of a combined cycle burning natural gas. Sciencedirect 27 (2007) : 2153-2158.

[5] Felix, B. and Jorge, B. Behavior of a high-capacity steam boiler using heavy fuel oil Part II: cold-end corrosion. Elsevier 86 (2004) : 107-121.

[6] Heng, Z., Stijn, H. and Goris, K. Energy balance of winding process. Master's thesis, Department of Industrial Sciences, Faculty of Engineering, Leuven Engineering College, 2010.

[7] Nina F., Thornhill, Sachin C., Patwardhan and Sirish L., Shah. A continuous stirred tank heater simulation model with applications. Sciencedirect 18 (2008) : 347-360.

[8] สมคิด สลัดยะนันท์. หม้อไอน้ำ. โลกพลังงาน 5 (ตุลาคม – ธันวาคม 2542) : 10-15.

[9] Yunus A. Cengel and Michael A. Boles. Thermodynamics, 4th edition. Singapore: McGraw-Hill, 2002.

[10] Acid dew point [Online]. 2010. Available from:
http://en.citizendium.org/wiki/Acid_dew_point [2011, December]

[11] Huijbregts, W.M.M. and Leferink, R. Latest Advances in the Understanding of Acid Dewpoint Corrosion: Corrosion and Stress Corrosion Cracking in Combustion Gas Condensates. Anti-Corrosion Methods and Materials 51 (2004) : 173-188.

[12] Spirax Sarco. Flow characteristics [Online]. 2012. Available from:
http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/control-hardware-el-pn-actuation/control-valve-characteristics.asp [2012, March]

[13] ศุภณัฐ เจริญ. การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[14] ทวิช ชูเมือง, การออกแบบระบบเครื่องมือวัดและควบคุมทางอุตสาหกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : ดวงกมลสมัย, 2549.

# ภาคผนวก

# ภาคผนวก ก

# การคำนวณอุณหภูมิกลั่นตัวของกรด

การคำนวนอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดนั้น สามารถคำนวณได้ดังนี้

**ก.1 น้ำมันเตา**

**1. องค์ประกอบของน้ำมันเตา**

ตารางที่ ก.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเตา [13]

| ธาตุองค์ประกอบ | มวลโมเลกุล (kg/kmol) | ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก |
|---|---|---|
| C | 12.0110 | 86.4 |
| H | 1.0079 | 11.6 |
| S | 32.0600 | 1.99 |

**2. สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา**

การหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเตา โดยในที่นี้ได้สมมติให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละของอากาศที่มากเกินพอเท่ากับ 0%) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย $CO_2$, $H_2O$, $N_2$ และ $SO_2$ ที่ไม่ได้ถูกใช้

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_{7.193}H_{11.509} + 0.062S + a\,(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 7.193CO_2 + 5.7545H_2O + 0.062SO_2 + (3.76a)N_2$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a ได้โดยการทำการดุล O ดังนี้

$$O : 2a = (7.193 \times 2) + 5.7545 + (0.062 \times 2)$$

$$a = 10.13$$

แทนค่า a = 10.13 ในสมการการเผาไหม้ จะได้ดังนี้

$$C_{7.193}H_{11.509} + 0.062S + 10.13\,(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 7.193CO_2 + 5.7545H_2O + 0.062SO_2 + 38.09N_2$$

**3. อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเตา**

ในการหาอุณหภูมิกลั่นตัวของ sulfurous acid ($H_2SO_3$) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตามสมการของ Kiang นั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{1000}{\mathrm{T}} = 3.9526 - 0.1863\log_e(\mathrm{P_{H_2O}}) + 0.000867\log_e(\mathrm{P_{SO_2}}) + 0.000913\log_e(\mathrm{P_{H_2O}})\log_e(\mathrm{P_{SO_2}})$$

เมื่อ $T_{acid}$ แทน อุณหภูมิกลั่นตัวของกรด (K)

P แทน ความดันย่อย (atm)

สมมติให้ค่าความดันย่อยของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีค่า 1 atm

ดังนั้นค่าความดันย่อยของไอน้ำ ($\mathrm{P_{H_2O}}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$\mathrm{P_{H_2O}} = \left(\frac{\mathrm{N_{H_2O}}}{\mathrm{N_{prod}}}\right)(\mathrm{P_{prod}})$$

เมื่อ N แทน จำนวนโมล (โมล)

$$\mathrm{P_{H_2O}} = \left(\frac{5.7545}{51.1}\right)(1)$$

$$\mathrm{P_{H_2O}} = 0.113 \text{ atm}$$

ค่าความดันย่อยของ Sulfur dioxide ($\mathrm{P_{SO_2}}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$\mathrm{P_{SO_2}} = \left(\frac{\mathrm{N_{SO_2}}}{\mathrm{N_{prod}}}\right)(\mathrm{P_{prod}})$$

$$= \left(\frac{0.062}{51.1}\right)(1)$$

$$\mathrm{P_{SO_2}} = 0.00121 \text{ atm}$$

นำค่า $\mathrm{P_{H_2O}}$ และ $\mathrm{P_{SO_2}}$ ที่ได้ไปหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\frac{1000}{\mathrm{T}} = 3.9526 - 0.1863\log_e(0.113 \times 760) + 0.000867\log_e(0.00121 \times 760) + 0.000913\log_e(0.113 \times 760)\log_e(0.00121 \times 760)$$

$T_{acid}$ = 320.18 K หรือ 47 $^{o}$C

ดังนั้น อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเตาคือ 47 $^{o}$C

**ก.2 น้ำมันดีเซล**

**1. องค์ประกอบของน้ำมันดีเซล**

ตารางที่ ก.2 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันดีเซล

| ธาตุองค์ประกอบ | มวลโมเลกุล (kg/kmol) | ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก |
|---|---|---|
| C | 12.0110 | 86.6 |
| H | 1.0079 | 13.3 |
| S | 32.0600 | 0.14 |

**2. สมการการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล**

การหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล โดยในที่นี้ได้สมมติให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละของอากาศที่มากเกินพอเท่ากับ 0%) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย $CO_2$, $H_2O$, $N_2$ และ $SO_2$ ที่ไม่ได้ถูกใช้

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_{7.21}H_{13.195} + 0.0044S + a\,(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 7.21CO_2 + 6.5975H_2O + 0.0044SO_2 + 3.76a\,N_2$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a ได้โดยการทำการดุล O ดังนี้

O : $2a = (7.21 \times 2) + 6.5975 + (0.0044 \times 2)$

$a = 10.51$

แทนค่า a = 10.51 ในสมการการเผาไหม้ จะได้ดังนี้

$C_{7.21}H_{13.195}$ + 0.0044S + a ($O_2$ + 3.76$N_2$)

$\rightarrow$ 7.21$CO_2$ + 6.5975$H_2O$ + 0.0044$SO_2$ + 39.5176 $N_2$

**3. อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล**

ในการหาอุณหภูมิกลั่นตัวของ sulfurous acid ($H_2SO_3$) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตามสมการของ Kiang นั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{1000}{\mathrm{T}} = 3.9526 - 0.1863 \log_e\left(\mathrm{P}_{\mathrm{H_2O}}\right) + 0.000867 \log_e\left(\mathrm{P}_{\mathrm{SO_2}}\right) + 0.000913 \log_e\left(\mathrm{P}_{\mathrm{H_2O}}\right) \log_e\left(\mathrm{P}_{\mathrm{SO_2}}\right)$$

สมมติให้ค่าความดันย่อยของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีค่า 1 atm

ดังนั้นค่าความดันย่อยของไอน้ำ ($\mathrm{P}_{\mathrm{H_2O}}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$\mathrm{P}_{\mathrm{H_2O}} = \left(\frac{\mathrm{N}_{\mathrm{H_2O}}}{\mathrm{N}_{\mathrm{prod}}}\right)\left(\mathrm{P}_{\mathrm{prod}}\right)$$

$$\mathrm{P}_{\mathrm{H_2O}} = \left(\frac{6.5975}{53.33}\right)(1)$$

$$\mathrm{P}_{\mathrm{H_2O}} = 0.124 \text{ atm}$$

ค่าความดันย่อยของ Sulfur dioxide ($\mathrm{P}_{\mathrm{SO_2}}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$\mathrm{P}_{\mathrm{SO_2}} = \left(\frac{\mathrm{N}_{\mathrm{SO_2}}}{\mathrm{N}_{\mathrm{prod}}}\right)\left(\mathrm{P}_{\mathrm{prod}}\right)$$

$$= \left(\frac{0.0044}{53.33}\right)(1)$$

$$\mathrm{P}_{\mathrm{SO_2}} = 0.00008251 \text{ atm}$$

นำค่า $\mathrm{P}_{\mathrm{H_2O}}$ และ $\mathrm{P}_{\mathrm{SO_2}}$ ที่ได้ไปหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\frac{1000}{\mathrm{T}} = 3.9526 - 0.1863 \log_e(0.124 \times 760) + 0.000867 \log_e(0.00008251 \times 760) + 0.000913 \log_e(0.124 \times 760) \log_e(0.00008251 \times 760)$$

$T_{acid}$ = 323.39 K หรือ 50.2 $^{\circ}$C

ดังนั้น อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลคือ 50.2 $^{o}$C

**ก.3 ถ่านหิน**

**1. องค์ประกอบของถ่านหิน**

ถ่านหินที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นถ่านหินเกรดดีชนิด ซับ-บิทูมินัส ตารางที่ ก.3 แสดงองค์ประกอบของถ่านหิน

| ธาตุองค์ประกอบ | มวลโมเลกุล (kg/kmol) | ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก |
|---|---|---|
| C | 12.0110 | 73.5 |
| H | 1.0079 | 6.3 |
| O | 15.9994 | 18 |
| S | 32.0600 | 1 |
| N | 14.0067 | 1.2 |

**2. สมการการเผาไหม้ของถ่านหิน**

การหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหิน โดยในที่นี้ได้สมมติให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละของอากาศที่มากเกินพอเท่ากับ 0%) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย $CO_2$, $H_2O$, $N_2$ และ $SO_2$ ที่ไม่ได้ถูกใช้

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_{6.119}H_{6.251} + 0.086N + 0.563O_2 + 0.031S + a\,(O_2 + 3.76N_2)$$

$$\rightarrow 6.119CO_2 + 3.1255H_2O + 0.031SO_2 + (0.043 + 3.76a)\,N_2$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a ได้โดยการทำการดุล O ดังนี้

$$O : (0.563 \times 2) + 2a = (6.119 \times 2) + 3.1255 + (0.031 \times 2)$$

$$a = 7.15$$

แทนค่า a = 7.15 ในสมการการเผาไหม้ จะได้ดังนี้

$C_{6.119}H_{6.251} + 0.086N + 0.563O_2 + 0.031S + 7.15\ (O_2 + 3.76N_2)$

$$\rightarrow\ 6.119CO_2 + 3.1255H_2O + 0.031SO_2 + 26.93N_2$$

**3. อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหิน**

ในการหาอุณหภูมิกลั่นตัวของ sulfurous acid ($H_2SO_3$) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงตามสมการของ Kiang นั้นสามารถหาได้ดังนี้

$$\frac{1000}{\mathrm{T}} = 3.9526 - 0.1863\log_e(\mathrm{P_{H_2O}}) + 0.000867\log_e(\mathrm{P_{SO_2}}) + 0.000913\log_e(\mathrm{P_{H_2O}})\log_e(\mathrm{P_{SO_2}})$$

สมมติให้ค่าความดันย่อยของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีค่า 1 atm

ดังนั้นค่าความดันย่อยของไอน้ำ ($\mathrm{P_{H_2O}}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$\mathrm{P_{H_2O}} = \left(\frac{\mathrm{N_{H_2O}}}{\mathrm{N_{prod}}}\right)(\mathrm{P_{prod}})$$

$$\mathrm{P_{H_2O}} = \left(\frac{3.1255}{36.2}\right)(1)$$

$$\mathrm{P_{H_2O}} = 0.086\ \text{atm}$$

ค่าความดันย่อยของ Sulfur dioxide ($\mathrm{P_{SO_2}}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$\mathrm{P_{SO_2}} = \left(\frac{\mathrm{N_{SO_2}}}{\mathrm{N_{prod}}}\right)(\mathrm{P_{prod}})$$

$$= \left(\frac{0.031}{36.2}\right)(1)$$

$$\mathrm{P_{SO_2}} = 0.000856\ \text{atm}$$

นำค่า $\mathrm{P_{H_2O}}$ และ $\mathrm{P_{SO_2}}$ ที่ได้ไปหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\frac{1000}{\mathrm{T}} = 3.9526 - 0.1863\log_e(0.086 \times 760) + 0.000867\log_e(0.000856 \times 760) + 0.000913\log_e(0.086 \times 760)\log_e(0.000856 \times 760)$$

$T_{acid}$ = 315.34 K หรือ 42.2 $^{\circ}$C

ดังนั้น อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินคือ 42.2 $^{o}$C

**ก.4 ก๊าซธรรมชาติ**

**1. องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ**

ตารางที่ ก.4 แสดงองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ

| ธาตุองค์ประกอบ | ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร |
|---|---|
| $CH_4$ | 72.75 |
| $C_2H_6$ | 3.71 |
| $C_3H_8$ | 1.11 |
| $C_4H_{10}$ | 0.48 |
| $C_5H_{12}$ | 0.15 |
| $C_6H_{14}$ | 0.074 |
| $CO_2$ | 6.58 |
| $N_2$ | 15.14 |

**2. สมการการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติ**

การหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติ โดยในที่นี้ได้สมมติให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละของอากาศที่มากเกินพอเท่ากับ 0%) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย $CO_2$, $H_2O$, $N_2$ และ $SO_2$ ที่ไม่ได้ถูกใช้

สมการการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$0.7275CH_4 + 0.0371C_2H_6 + 0.0111C_3H_8 + 0.0048C_4H_{10} + 0.0015C_5H_{12} + 0.00074C_6H_{14} +$$

$$0.0658CO_2 + 0.1514N_2 + a\,(O_2 + 3.76N_2)$$

$$\rightarrow 0.9319CO_2 + 1.6489H_2O + a\,(0.1514 + 3.76a)\,N_2$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a ได้โดยการทำการดุล O ดังนี้

O : $(0.0658 \times 2) + 2a = (0.9319 \times 2) + 1.6489$

$$a = 1.6906$$

แทนค่า a = 1.6906 ในสมการการเผาไหม้ จะได้ดังนี้

$$0.7275CH_4 + 0.0371C_2H_6 + 0.0111C_3H_8 + 0.0048C_4H_{10} + 0.0015C_5H_{12} + 0.00074C_6H_{14} +$$

$$0.0658CO_2 + 0.1514N_2 + 1.6906\ (O_2 + 3.76N_2)$$

$$\rightarrow 0.9319CO_2 + 1.6489H_2O + 6.5081N_2$$

**3. อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติ**

สมมติให้ค่าความดันย่อยของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีค่า 101.325 kPa

ดังนั้นค่าความดันย่อยของไอน้ำ ($P_{H_2O}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{H_2O} = \left(\frac{N_{H_2O}}{N_{prod}}\right)\left(P_{prod}\right)$$

$$= \left(\frac{6.51}{9.09}\right)\left(101.325\right)$$

$$P_{H_2O} = 18.38 \text{ kPa}$$

สามารถหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติได้ดังนี้

$$T_{acid} = T_{sat\ @\ P_{H_2O}}$$

$$= T_{sat\ @\ 18.38\ kPa}$$

$$T_{acid} = 59.6\ ℃$$

ดังนั้น อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซธรรมชาติ คือ 59.6 $^{\circ}$C

**ก.5 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว**

**1. องค์ประกอบของก๊าซปิโตรเลียมเหลว**

ตารางที่ ก.5 แสดงองค์ประกอบของก๊าซปิโตรเลียมเหลว

| ธาตุองค์ประกอบ | ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร |
|---|---|
| $C_3H_8$ | 50 |
| $C_4H_{10}$ | 50 |

**2. สมการการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว**

การหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยในที่นี้ได้สมมติให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (ร้อยละของอากาศที่มากเกินพอเท่ากับ 0%) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย $CO_2$, $H_2O$, $N_2$ และ $SO_2$ ที่ไม่ได้ถูกใช้

สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตาในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$0.5C_3H_8 + 0.5C_4H_{10} + a\,(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3.5CO_2 + 4.5H_2O + (3.76a)N_2$$

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ a ได้โดยการทำการดุล O ดังนี้

$$O : 2a = (3.5 \times 2) + 4.5$$

$$a = 5.75$$

แทนค่า a = 5.75 ในสมการการเผาไหม้ จะได้ดังนี้

$$0.5C_3H_8 + 0.5C_4H_{10} + a\,(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 3.5CO_2 + 4.5H_2O + 21.62N_2$$

**3. อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว**

สมมติให้ค่าความดันย่อยของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีค่า 101.325 kPa

ดังนั้นค่าความดันย่อยของไอน้ำ ($P_{H_2O}$) สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{H_2O} = \left(\frac{N_{H_2O}}{N_{prod}}\right)\left(P_{prod}\right)$$

$$= \left(\frac{4.5}{29.62}\right)\left(101.325\right)$$

$$P_{H_2O} = 15.39 \text{ kPa}$$

สามารถหาอุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ได้ดังนี้

$$T_{acid} = T_{sat\,@\,P_{H_2O}}$$

$$= T_{sat\,@\,15.39\text{ kPa}}$$

$$T_{acid} = 54.5\ ℃$$

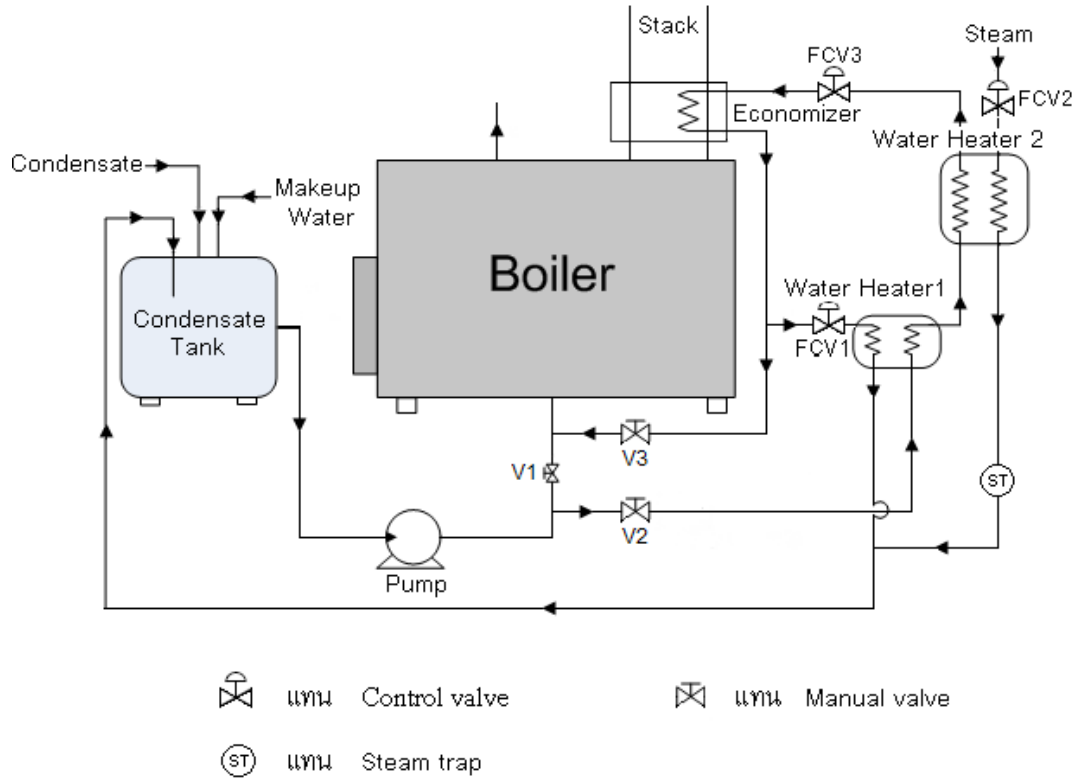
ดังนั้น อุณหภูมิกลั่นตัวของกรดที่เกิดจากการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว คือ 54.5 $^{\circ}$C

# ภาคผนวก ข

## ขั้นตอนการใช้งานระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

**การเปิด – ปิด วาล์ว ในระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์**

ในการใช้งานระบบควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้นมีขั้นตอนการเปิด – ปิด ระบบ ดังนี้




ภาพที่ ค.1 ผังระบบอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

ในช่วงแรกจะทำการเปิดน้ำจากถังคอนเดนเสตให้ถูกปั๊มเข้าสู่หม้อไอน้ำโดยตรง ดังนี้

1. เปิด V1

2. ปิด V2 และ V3

เมื่อหม้อไอน้ำสามารถผลิตไอน้ำได้แล้วจะดำเนินการต่อไป ดังนี้

3. เปิด V3

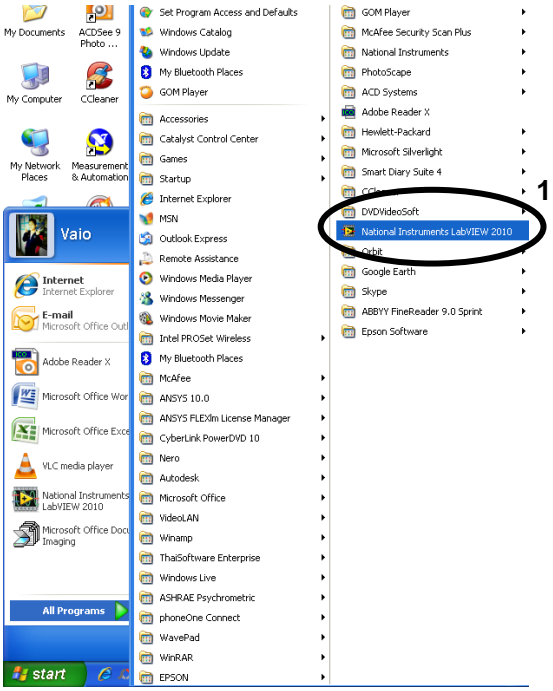
4. เปิด V2

5. ปิด V1

## การเปิดโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนอีโคโนไมเซอร์

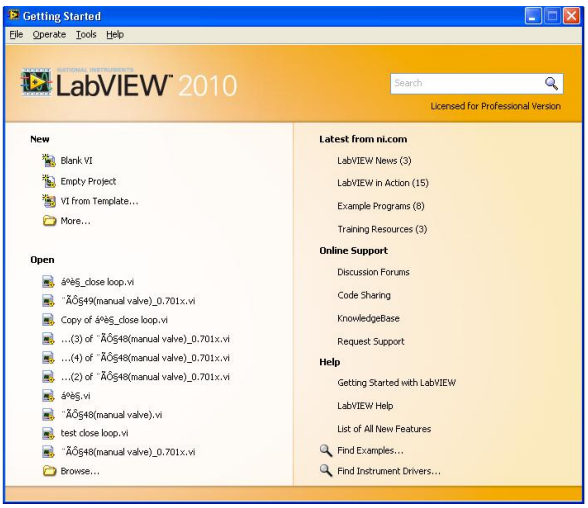
ในการใช้งานโปรแกรม LabVIEW สำหรับควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัวนั้นมีขั้นตอนในการใช้งาน ดังนี้

1. เปิดโปรแกรม LabVIEW จาก Start > All Programs > National Instrument LabVIEW 2010



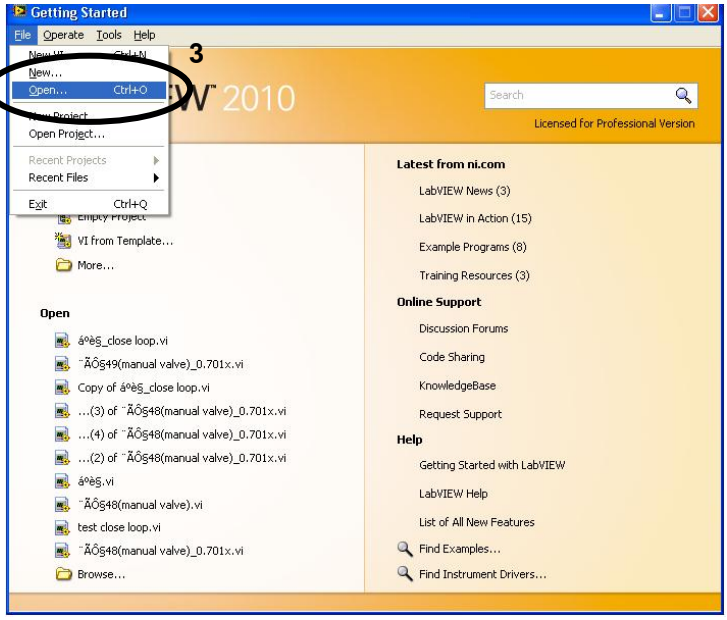

ภาพที่ ค.2 ข้อ 1

2. จะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นมาดังภาพ




ภาพที่ ค.3 ข้อ 2

3. เลือก File > Open

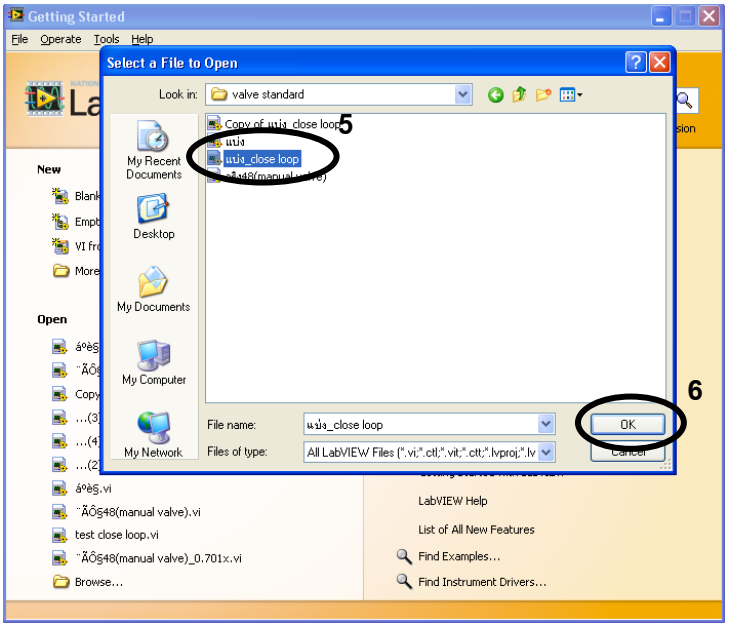



ภาพที่ ค.4 ข้อ 3

4. จะมีหน้าต่างปรากฏขึ้นมาดังภาพที่ ค.5

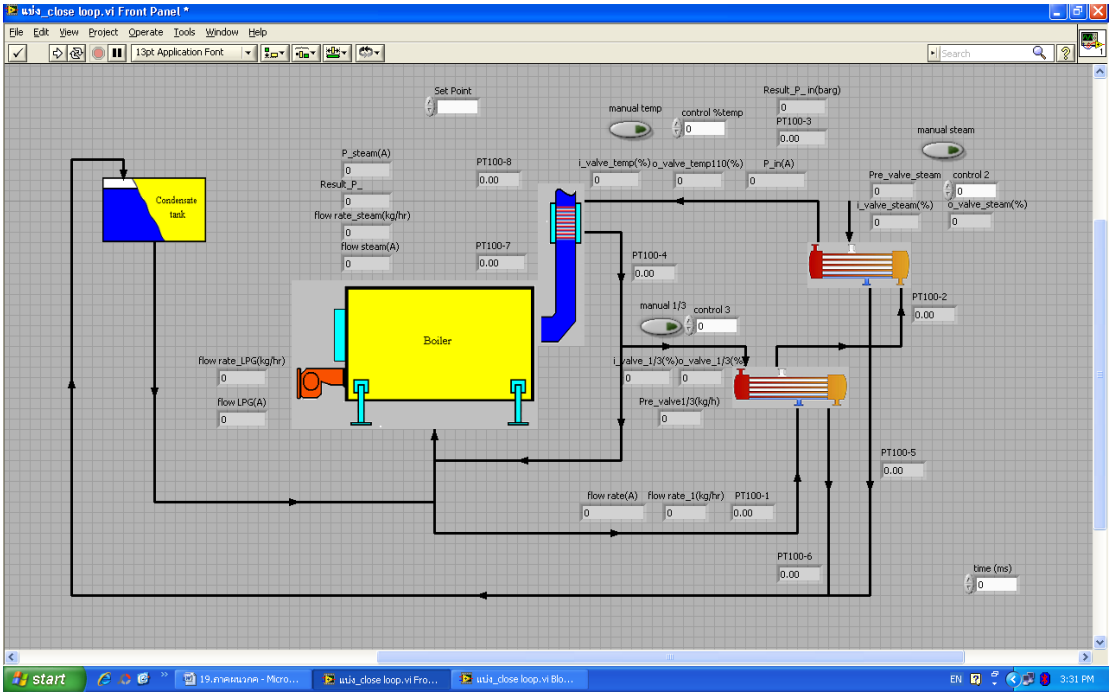
5. เลือกไฟล์โปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ทำการจัดเก็บไว้

6. เลือก OK




ภาพที่ ค.5 ข้อ 4 ข้อ 5 และ ข้อ 6

7. จะมีหน้าต่างพร้อมใช้งานปรากฏขึ้นมาดังภาพ



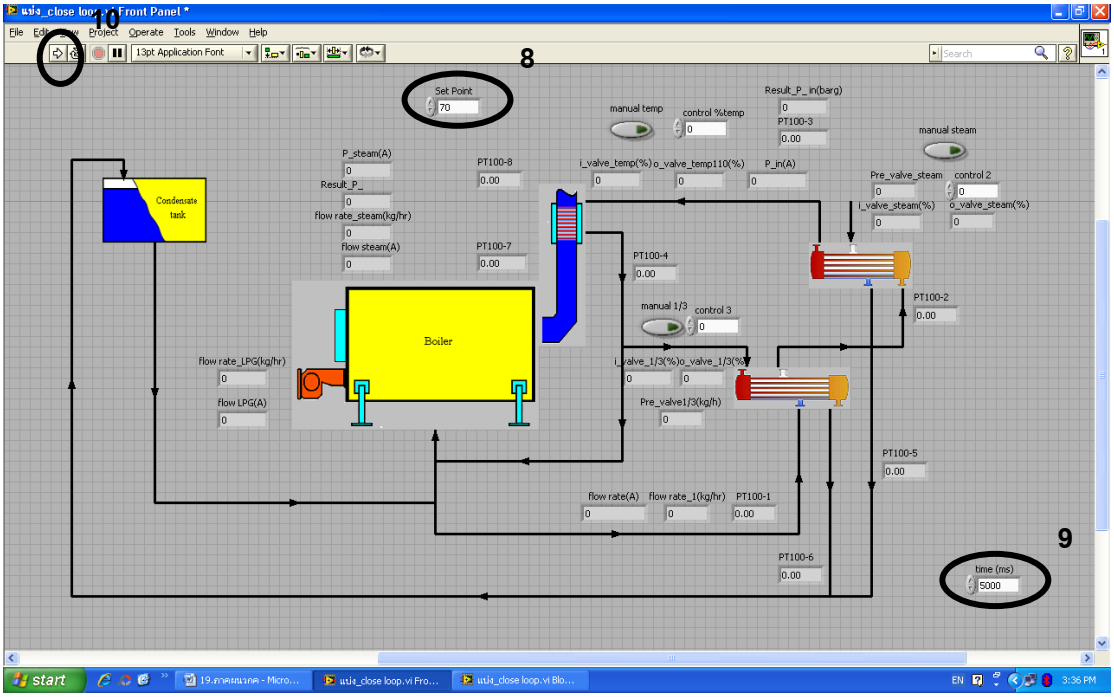

ภาพที่ ค.6 ข้อ 7

**การใช้งานโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนอีโคโนไมเซอร์แบบอัตโนมัติ**

8. ใส่ค่าอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ต้องการ โดยใช้หน่วย °C ในช่อง Set Point

9. ใส่ค่าเวลาในการแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล โดยใช้หน่วยมิลลิวินาทีในช่อง time (ms)

10. เลือก Run



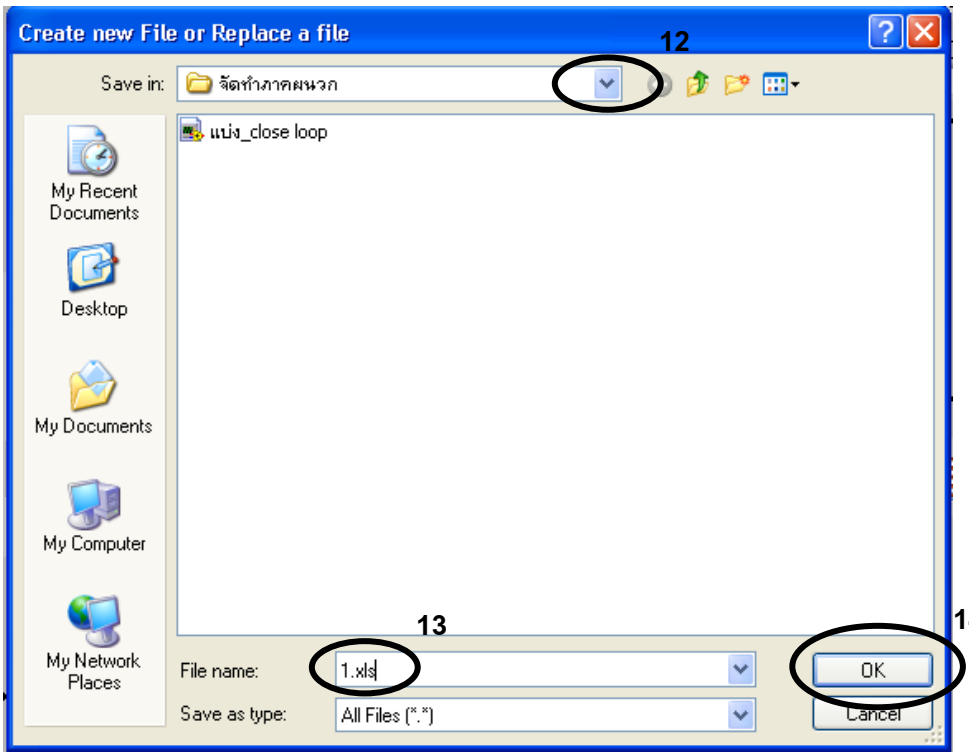

ภาพที่ ค.7 ข้อ 8 ข้อ 9 และ ข้อ 10

11. จะมีหน้าต่างสำหรับการจัดเก็บข้อมูลปรากฏขึ้นมาดังภาพที่ ค.8

12. เลือกการจัดเก็บไฟล์

13. ให้จัดเก็บไฟล์ข้อมูลในรูปไฟล์นามสกุล .xls

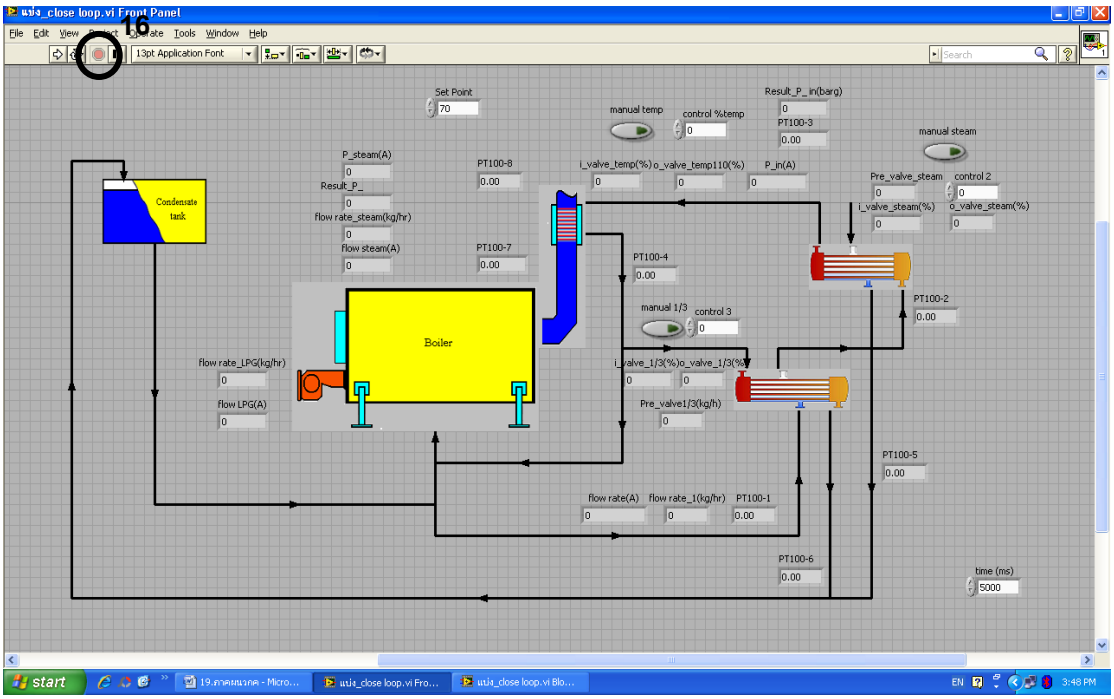
14. เลือก OK




ภาพที่ ค.8 ข้อ 11 ข้อ 12 ข้อ 13 และ ข้อ 14

15. หน้าต่างการแสดงผลจะปรากฏทางหน้าจอ ดังภาพที่ ค.9

16. เมื่อต้องการหยุดโปรแกรมให้เลือก Stop



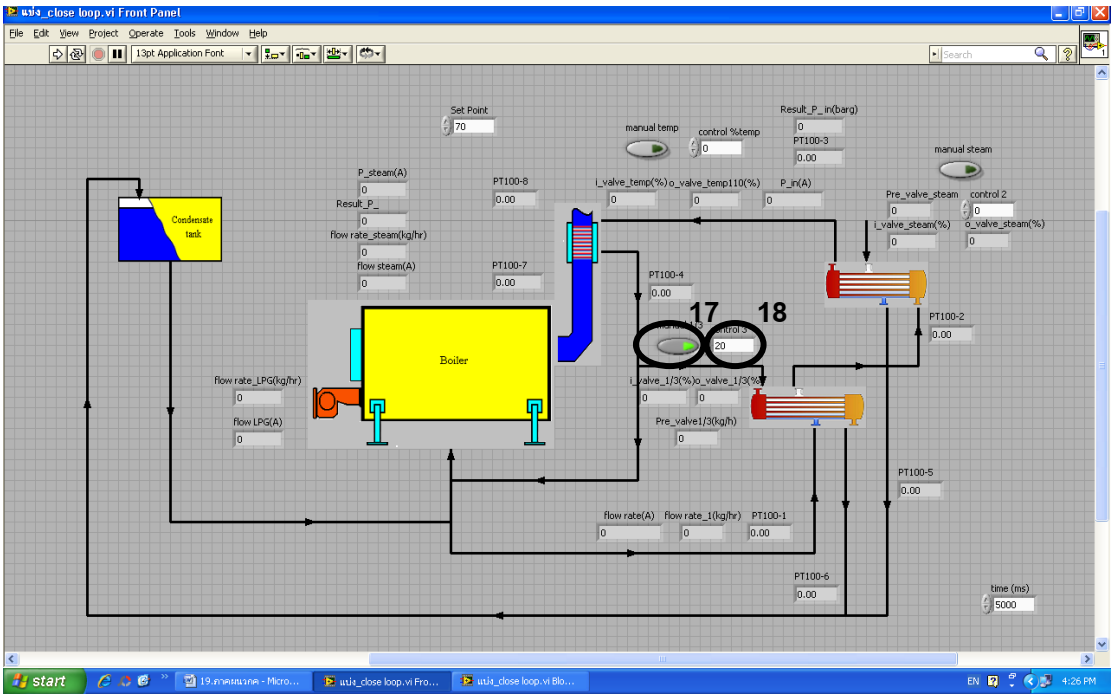

ภาพที่ ค.9 ข้อ 15 และ ข้อ 16

**การใช้งานโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนอีโคโนไมเซอร์แบบกำหนดเองผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์**

สำหรับการใช้งานโปรแกรมการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนอีโคโนไมเซอร์แบบกำหนดเองผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์นี้ ใช้ในกรณีที่ต้องการควบคุมตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมแต่ละตัวเอง โดยไม่ปล่อยให้วาล์วควบคุมมีการตำแหน่งควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถกระทำได้ดังนี้

17. เมื่อต้องการกำหนดตำแหน่งการควบคุมของวาล์วควบคุมปริมาณน้ำร้อนหลังออกจากอีโคโนไมเซอร์ก่อนเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตัวที่ 1 ให้เลือกที่ manual 1/3

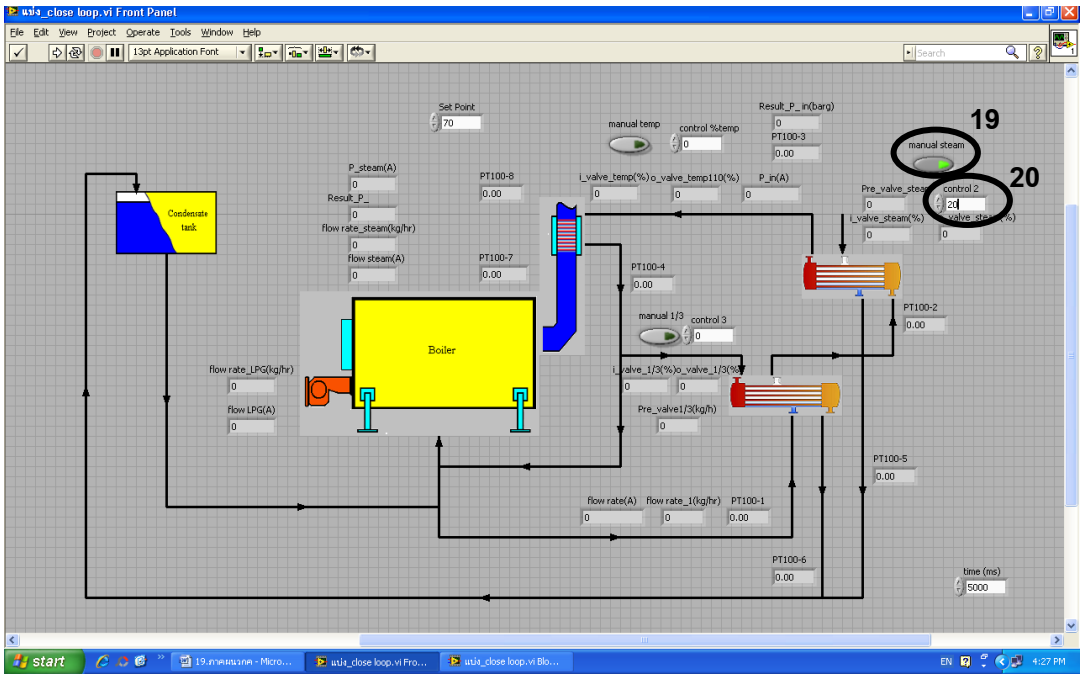
18. ใส่ค่าตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมที่ต้องการ ในช่อง control 3 ซึ่งตัวเลขที่กรอกมีค่าระหว่าง 0 ถึง 100 โดย 0 คือ ปิดสนิท 100 คือ เปิดเต็มที่




ภาพที่ ค.10 ข้อ 17 และ ข้อ 18

19. เมื่อต้องการกำหนดตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมปริมาณไอน้ำที่นำมาใช้ ให้เลือกที่ manual steam

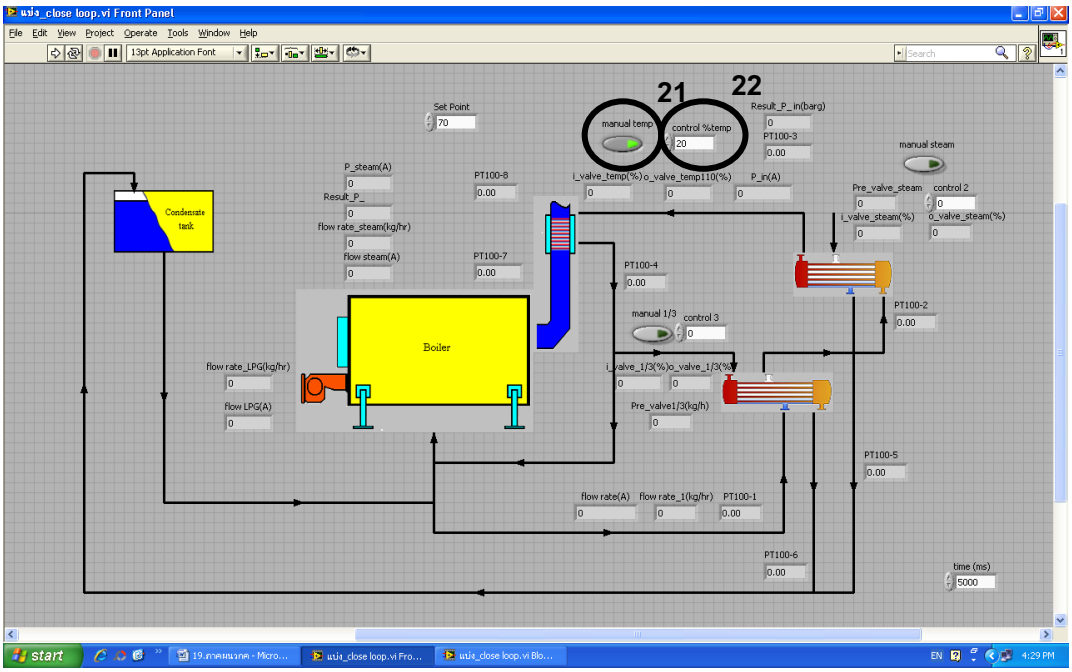
20. ใส่ค่าตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมที่ต้องการ ในช่อง control 2




ภาพที่ ค.11 ข้อ 19 และ ข้อ 20

21. เมื่อต้องการกำหนดตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมปริมาณไอน้ำที่นำมาใช้ ให้เลือกที่ manual temp

22. ใส่ค่าตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุมที่ต้องการ ในช่อง control %temp




ภาพที่ ค.12 ข้อ 21 และ ข้อ 22

# ภาคผนวก ค

# ข้อมูลการตรวจวัด

## ค.1 ข้อมูลในช่วงก่อนทำการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อป้องกันกรดกลั่นตัว

ตารางที่ ค.1 อุณหภูมิผิวท่อภายในอีโคโนไมเซอร์ในช่วงก่อนที่จะทำการอุ่นน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

| เวลา | $T_{sur,1}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,2}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,3}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,4}$ ($^{o}$C) |
|---|---|---|---|---|
| 12:01 | 91.8 | 64.5 | 55.3 | 62.6 |
| 12:02 | 91.5 | 64.5 | 54.4 | 61.9 |
| 12:03 | 91.5 | 63.5 | 54.6 | 62.0 |
| 12:04 | 91.3 | 63.0 | 54.3 | 61.6 |
| 12:05 | 91.2 | 63.4 | 53.9 | 61.7 |
| 12:06 | 91.5 | 63.8 | 54.3 | 62.0 |
| 12:07 | 91.7 | 63.9 | 54.8 | 62.3 |
| 12:08 | 91.7 | 64.5 | 55.4 | 62.8 |
| 12:09 | 91.7 | 64.0 | 54.8 | 62.4 |
| 12:10 | 90.8 | 64.0 | 54.9 | 61.9 |

## ค.2 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์โดยใช้สมการของวาล์วควบคุมแบบเปิด

ตารางที่ ค.2 อุณหภูมิผิวท่อสำหรับการควบคุม โดยใช้สมการของวาล์วควบคุมแบบเปิด

| เวลา | $T_{sur,1}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,2}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,3}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,4}$ ($^{o}$C) |
|---|---|---|---|---|
| 15:14 | 123.8 | 95.3 | 85.6 | 93.9 |
| 15:17 | 122.9 | 95.3 | 85.6 | 93.3 |
| 15:20 | 122.1 | 94.0 | 85.0 | 92.3 |
| 15:23 | 121.8 | 94.0 | 84.3 | 92.0 |
| 15:26 | 122.3 | 93.6 | 84.2 | 91.9 |
| 15:29 | 122.3 | 93.5 | 84.0 | 91.8 |
| 15:32 | 122.6 | 93.9 | 84.0 | 92.2 |
| 15:35 | 124.9 | 95.7 | 86.0 | 94.0 |
| 15:38 | 125.3 | 96.8 | 87.0 | 94.5 |
| 15:41 | 125.0 | 96.8 | 87.0 | 94.3 |
| 15:44 | 124.0 | 95.0 | 85.5 | 93.2 |
| 15:47 | 122.9 | 94.9 | 85.1 | 92.8 |
| 15:50 | 123.5 | 94.6 | 84.5 | 92.3 |
| 15:53 | 122.6 | 93.9 | 84.4 | 92.1 |
| 15:56 | 122.6 | 94.0 | 83.7 | 91.6 |
| 15:59 | 122.7 | 93.8 | 84.0 | 92.0 |
| 16:02 | 123.3 | 95.2 | 85.3 | 92.9 |
| 16:05 | 123.8 | 95.2 | 85.6 | 93.4 |
| 16:08 | 123.6 | 95.6 | 86.2 | 93.5 |
| 16:11 | 121.8 | 94.5 | 85.3 | 92.6 |

ตาราง ค.3 ข้อมูลสำหรับการควบคุม โดยใช้สมการของวาล์วควบคุมแบบเปิด

| เวลา | น้ำที่ออกจากปั๊ม (kg/h) | ปริมาณไอน้ำ (kg/h) | ปริมาณเชื้อเพลิง (kg/h) | ความดันไอน้ำ (บาร์) | อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ($^{\circ}$C) | | | | | | | | ตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | PT100_1 | PT100_2 | PT100_3 | PT100_4 | PT100_5 | PT100_6 | PT100_7 | PT100_8 | $S_{i,1}$ | $S_{i,2}$ | $S_{i,3}$ |
| 15:14 | 6,442.76 | 1,322.57 | 100.96 | 101.96 | 40.2 | 59.5 | 80.3 | 81.4 | 54.3 | 44.8 | 164.0 | 92.0 | 51.77 | 91.04 | 100 |
| 15:17 | 6,442.02 | 1,574.31 | 101.67 | 102.67 | 40.5 | 60.1 | 80.5 | 82.0 | 54.7 | 45.3 | 164.3 | 92.5 | 51.76 | 89.21 | 100 |
| 15:20 | 6,226.17 | 1,507.37 | 100.76 | 101.76 | 40.9 | 60.7 | 80.8 | 82.5 | 55.1 | 45.8 | 164.5 | 92.9 | 51.91 | 87.56 | 100 |
| 15:23 | 6,230.85 | 1,239.10 | 93.91 | 94.91 | 41.0 | 60.5 | 80.7 | 82.9 | 55.6 | 45.9 | 164.8 | 93.3 | 52.31 | 88.02 | 100 |
| 15:26 | 6,307.89 | 1,126.01 | 96.11 | 97.11 | 40.8 | 60.0 | 80.4 | 83.2 | 55.8 | 45.5 | 165.0 | 93.6 | 52.32 | 88.77 | 100 |
| 15:29 | 6,419.38 | 1,464.79 | 107.27 | 108.27 | 40.4 | 59.6 | 80.6 | 83.3 | 56.0 | 45.0 | 165.3 | 93.9 | 51.97 | 90.14 | 100 |
| 15:32 | 6,356.13 | 1,174.71 | 104.04 | 105.04 | 40.0 | 59.5 | 80.9 | 83.3 | 55.9 | 44.6 | 165.5 | 94.1 | 51.68 | 91.35 | 100 |
| 15:35 | 6,298.04 | 1,415.32 | 104.18 | 105.18 | 39.7 | 59.4 | 81.2 | 83.4 | 55.8 | 44.3 | 165.8 | 94.3 | 51.88 | 90.93 | 100 |
| 15:38 | 6,391.57 | 1,523.36 | 101.06 | 102.06 | 39.4 | 59.6 | 81.3 | 83.7 | 55.8 | 44.2 | 166.0 | 94.5 | 51.82 | 90.25 | 100 |
| 15:41 | 6,294.84 | 1,743.23 | 104.02 | 105.02 | 39.1 | 59.4 | 81.3 | 83.9 | 55.9 | 43.9 | 166.3 | 94.7 | 52.17 | 89.97 | 100 |
| 15:44 | 6,427.99 | 1,438.68 | 106.15 | 107.15 | 39.2 | 60.4 | 81.7 | 84.0 | 55.9 | 44.2 | 166.5 | 94.9 | 52.05 | 89.82 | 100 |
| 15:47 | 6,332.01 | 1,470.69 | 104.23 | 105.23 | 39.6 | 61.3 | 82.4 | 84.2 | 56.1 | 45.0 | 166.7 | 95.1 | 52.86 | 85.88 | 100 |
| 15:50 | 6,323.64 | 1,062.33 | 106.68 | 107.68 | 40.1 | 61.9 | 82.6 | 84.5 | 56.4 | 45.7 | 166.9 | 95.4 | 51.80 | 83.86 | 100 |
| 15:53 | 6,420.36 | 932.24 | 105.43 | 106.43 | 40.5 | 62.4 | 82.6 | 84.9 | 56.6 | 46.2 | 167.1 | 95.7 | 52.27 | 81.55 | 100 |
| 15:56 | 6,275.89 | 1,036.35 | 106.29 | 107.29 | 40.9 | 62.7 | 82.4 | 85.1 | 56.9 | 46.7 | 167.3 | 95.9 | 52.04 | 80.79 | 100 |
| 15:59 | 6,378.52 | 1,273.86 | 107.46 | 108.46 | 41.3 | 62.9 | 82.0 | 85.1 | 57.1 | 47.1 | 167.4 | 96.0 | 51.56 | 81.49 | 100 |
| 16:02 | 6,226.17 | 1,254.57 | 100.80 | 101.80 | 41.7 | 63.0 | 82.0 | 85.0 | 57.3 | 47.5 | 167.6 | 96.1 | 52.15 | 79.24 | 100 |
| 16:05 | 6,197.62 | 1,159.00 | 105.95 | 106.95 | 42.0 | 63.2 | 81.8 | 84.9 | 57.5 | 47.9 | 167.7 | 96.2 | 52.04 | 79.11 | 100 |
| 16:08 | 6,410.76 | 1,293.45 | 104.48 | 105.48 | 42.4 | 63.3 | 81.5 | 84.8 | 57.6 | 48.2 | 167.8 | 96.2 | 51.64 | 77.84 | 100 |
| 16:11 | 6,256.69 | 1,221.06 | 97.48 | 98.48 | 42.7 | 63.4 | 81.4 | 84.7 | 57.7 | 48.4 | 167.9 | 96.2 | 51.88 | 78.24 | 100 |

## ค.3 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ โดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด

ตารางที่ ค.4 อุณหภูมิผิวท่อสำหรับการควบคุม โดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด

| เวลา | $T_{sur,1}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,2}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,3}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,4}$ ($^{o}$C) |
|---|---|---|---|---|
| 14:47 | 123.8 | 95.2 | 85.6 | 93.9 |
| 14:50 | 122.9 | 95.2 | 85.6 | 93.3 |
| 14:53 | 122.1 | 93.9 | 85.0 | 92.3 |
| 14:56 | 121.8 | 93. | 84.3 | 92.0 |
| 14:59 | 122.3 | 93.5 | 84.2 | 91.8 |
| 15:02 | 122.3 | 93.4 | 84.0 | 91.7 |
| 15:05 | 122.6 | 93.8 | 84.0 | 92.2 |
| 15:08 | 124.9 | 95.6 | 86.0 | 94.0 |
| 15:11 | 125.3 | 96.7 | 87.0 | 94.5 |
| 15:14 | 125.0 | 96.7 | 87.0 | 94.3 |
| 15:17 | 124.0 | 94.9 | 85.5 | 93.2 |
| 15:20 | 122.9 | 94.8 | 85.1 | 92.8 |
| 15:23 | 123.5 | 94.5 | 84.5 | 92.3 |
| 15:26 | 122.6 | 93.8 | 84.4 | 92.1 |
| 15:29 | 122.6 | 93.9 | 83.7 | 91.5 |
| 15:32 | 122.7 | 93.7 | 84.0 | 92.0 |
| 15:35 | 123.3 | 95.1 | 85.3 | 92.9 |
| 15:38 | 123.8 | 95.1 | 85.6 | 93.4 |
| 15:41 | 123.6 | 95.5 | 86.2 | 93.5 |
| 15:44 | 121.8 | 94.4 | 85.3 | 92.6 |

ตาราง ค.5 ข้อมูลสำหรับการควบคุม โดยใช้สมการการปรับตำแหน่งวาล์วควบคุมเพื่อหาอัตราการไหลของไอน้ำโดยการควบคุมแบบเปิด

| เวลา | น้ำที่ออกจากปั๊ม (kg/h) | ปริมาณไอน้ำ (kg/h) | ปริมาณเชื้อเพลิง (kg/h) | ความดันไอน้ำ (บาร์) | อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ($^{\circ}$C) | | | | | | | | ตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | PT100_1 | PT100_2 | PT100_3 | PT100_4 | PT100_5 | PT100_6 | PT100_7 | PT100_8 | $S_{i,1}$ | $S_{i,2}$ | $S_{i,3}$ |
| 14:47 | 6,247.34 | 534.59 | 104.97 | 6.07 | 44.8 | 61.2 | 76.8 | 78.8 | 57.0 | 47.9 | 168.0 | 91.1 | 51.96 | 73.35 | 100 |
| 14:50 | 6,273.68 | 523.79 | 107.65 | 6.07 | 45.6 | 62.5 | 74.3 | 79.3 | 57.0 | 50.1 | 168.4 | 91.1 | 52.16 | 57.19 | 100 |
| 14:53 | 6,179.41 | 557.34 | 95.16 | 6.03 | 46.9 | 62.7 | 73.6 | 77.8 | 57.4 | 51.4 | 169.1 | 90.4 | 51.88 | 54.74 | 100 |
| 14:56 | 6,237.25 | 899.13 | 109.11 | 6.37 | 46.7 | 60.8 | 73.2 | 77.2 | 57.7 | 50.6 | 169.7 | 89.9 | 51.84 | 66.74 | 100 |
| 14:59 | 6,293.37 | 1,101.54 | 103.44 | 6.14 | 43.3 | 60.0 | 77.0 | 78.4 | 56.6 | 47.1 | 170.3 | 90.8 | 51.81 | 71.45 | 100 |
| 15:02 | 6,172.27 | 1,029.39 | 100.58 | 6.34 | 43.5 | 62.3 | 75.1 | 79.8 | 56.2 | 48.7 | 170.8 | 91.7 | 52.12 | 58.38 | 100 |
| 15:05 | 6,168.34 | 1,550.93 | 99.01 | 5.83 | 44.9 | 61.9 | 73.9 | 78.4 | 56.9 | 49.8 | 171.0 | 91.1 | 51.10 | 59.95 | 100 |
| 15:08 | 6,258.42 | 1,828.68 | 102.30 | 5.61 | 46.0 | 61.9 | 73.5 | 77.7 | 56.8 | 50.6 | 170.6 | 90.5 | 52.22 | 61.24 | 100 |
| 15:11 | 6,523.98 | 1,901.49 | 105.71 | 5.46 | 43.3 | 58.1 | 75.3 | 77.4 | 56.0 | 46.5 | 169.8 | 90.3 | 51.64 | 83.61 | 100 |
| 15:14 | 6,505.03 | 1,860.62 | 118.69 | 5.22 | 41.9 | 59.2 | 76.6 | 78.9 | 55.0 | 45.8 | 168.8 | 91.1 | 51.88 | 77.23 | 100 |
| 15:17 | 6,193.93 | 1,757.43 | 100.79 | 4.85 | 43.3 | 59.4 | 74.6 | 78.9 | 55.2 | 47.3 | 167.8 | 91.1 | 52.34 | 77.57 | 100 |
| 15:20 | 6,579.36 | 1,421.25 | 102.02 | 4.93 | 44.1 | 58.9 | 74.1 | 78.0 | 55.3 | 47.8 | 166.8 | 90.5 | 51.95 | 77.57 | 100 |
| 15:23 | 6,541.95 | 1,659.31 | 106.03 | 4.87 | 43.0 | 56.6 | 74.0 | 77.7 | 54.9 | 45.8 | 166.3 | 90.2 | 52.24 | 91.34 | 100 |
| 15:26 | 6,475.74 | 1,264.22 | 106.51 | 4.75 | 41.7 | 55.9 | 74.7 | 77.6 | 54.0 | 44.3 | 165.9 | 90.1 | 52.57 | 96.73 | 100 |
| 15:29 | 6,550.81 | 1,516.55 | 100.36 | 4.69 | 40.6 | 55.3 | 75.0 | 77.9 | 53.3 | 43.3 | 165.5 | 90.1 | 52.87 | 95.72 | 100 |
| 15:32 | 6,685.19 | 1,490.64 | 109.96 | 4.82 | 40.2 | 56.2 | 75.3 | 78.1 | 52.9 | 43.2 | 165.1 | 90.2 | 51.97 | 94.37 | 100 |
| 15:35 | 6,714.97 | 1,761.91 | 100.36 | 4.75 | 41.0 | 57.2 | 75.4 | 78.4 | 53.0 | 44.4 | 164.8 | 90.4 | 52.32 | 88.08 | 100 |
| 15:38 | 6,680.76 | 1,397.75 | 102.20 | 4.66 | 41.6 | 57.4 | 74.8 | 78.4 | 53.3 | 45.1 | 164.4 | 90.3 | 52.35 | 87.98 | 100 |
| 15:41 | 6,426.52 | 1,207.72 | 95.15 | 4.55 | 42.1 | 57.5 | 74.6 | 78.2 | 53.6 | 45.6 | 164.1 | 90.2 | 52.42 | 88.46 | 100 |
| 15:44 | 6,699.71 | 1,482.71 | 104.03 | 4.60 | 42.3 | 56.7 | 74.3 | 77.9 | 53.8 | 45.5 | 163.8 | 90.0 | 51.17 | 88.29 | 100 |

## ค.4 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ ค.6 อุณหภูมิผิวท่อสำหรับการควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

| เวลา | $T_{sur,1}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,2}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,3}$ ($^{o}$C) | $T_{sur,4}$ ($^{o}$C) |
|---|---|---|---|---|
| 14:37 | 122.8 | 91.6 | 79.0 | 90.3 |
| 14:40 | 123.9 | 95.2 | 85.6 | 94.3 |
| 14:43 | 120.8 | 88.1 | 78.1 | 87.0 |
| 14:46 | 123.5 | 93.7 | 84.3 | 92.0 |
| 14:49 | 122.5 | 92.6 | 80.1 | 91.3 |
| 14:52 | 123.3 | 93.4 | 84.0 | 92.8 |
| 14:55 | 123.0 | 94.9 | 85.5 | 93.2 |
| 14:58 | 120.6 | 88.9 | 79.7 | 87.4 |
| 15:01 | 120.6 | 90.9 | 81.2 | 89.4 |
| 15:04 | 123.5 | 95.7 | 84.3 | 94.0 |
| 15:07 | 120.6 | 88.9 | 78.5 | 87.0 |
| 15:10 | 123.5 | 93.4 | 84.6 | 92.0 |
| 15:13 | 120.6 | 92.9 | 81.2 | 91.7 |
| 15:16 | 121.7 | 92.6 | 80.1 | 81.3 |
| 15:19 | 122.3 | 93.4 | 84.0 | 92.8 |
| 15:22 | 123.0 | 94.9 | 85.5 | 93.2 |
| 15:25 | 120.6 | 88.9 | 78.2 | 87.4 |
| 15:28 | 122.6 | 93.8 | 84.0 | 92.2 |
| 15:31 | 121.7 | 91.5 | 80.1 | 90.3 |
| 15:34 | 121.7 | 92.5 | 80.1 | 91.3 |

ตาราง ค.7 ข้อมูลสำหรับการควบคุมแบบปิด โดยมีการตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์

| เวลา | น้ำที่ออกจากปั๊ม (kg/h) | ปริมาณไอน้ำ (kg/h) | ปริมาณเชื้อเพลิง (kg/h) | ความดันไอน้ำ (บาร์) | อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ($^{\circ}$C) | | | | | | | | ตำแหน่งควบคุมของวาล์วควบคุม (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | PT100_1 | PT100_2 | PT100_3 | PT100_4 | PT100_5 | PT100_6 | PT100_7 | PT100_8 | $S_{i,1}$ | $S_{i,2}$ | $S_{i,3}$ |
| 14:37 | 6,032.72 | 708.92 | 107.19 | 6.32 | 45.8 | 62.4 | 69.0 | 80.5 | 57.9 | 51.3 | 168.8 | 92.8 | 52.04 | 60.04 | 78.87 |
| 14:40 | 6,180.40 | 1,058.68 | 107.22 | 6.47 | 44.0 | 58.7 | 72.9 | 75.6 | 56.1 | 47.8 | 168.7 | 89.8 | 52.19 | 18.50 | 100.00 |
| 14:43 | 5,726.06 | 1,128.61 | 98.47 | 6.12 | 41.5 | 57.9 | 71.9 | 74.6 | 53.7 | 46.0 | 168.6 | 87.8 | 52.91 | 90.66 | 78.02 |
| 14:46 | 6,246.85 | 1,301.90 | 107.94 | 6.11 | 43.8 | 61.3 | 70.1 | 76.1 | 54.4 | 48.8 | 168.6 | 88.7 | 51.82 | 10.75 | 100.00 |
| 14:49 | 6,224.70 | 1,391.46 | 93.44 | 6.18 | 44.9 | 58.3 | 74.6 | 74.0 | 54.9 | 49.2 | 168.6 | 88.1 | 51.75 | 55.53 | 100.00 |
| 14:52 | 6,327.08 | 1,365.11 | 109.18 | 6.33 | 43.1 | 60.9 | 70.2 | 75.6 | 53.5 | 48.1 | 182.6 | 88.9 | 51.80 | 9.80 | 100.00 |
| 14:55 | 6,139.29 | 1,350.55 | 106.69 | 6.32 | 44.8 | 59.1 | 74.6 | 74.0 | 54.5 | 49.4 | 168.8 | 88.9 | 52.04 | 44.63 | 100.00 |
| 14:58 | 5,666.74 | 1,300.32 | 103.70 | 6.16 | 41.6 | 57.2 | 69.2 | 75.0 | 53.7 | 45.8 | 168.8 | 88.7 | 51.95 | 91.60 | 77.49 |
| 15:01 | 6,282.29 | 1,303.84 | 108.26 | 6.42 | 41.8 | 59.9 | 70.7 | 75.6 | 53.4 | 46.8 | 168.9 | 89.8 | 51.96 | 0.99 | 100.00 |
| 15:04 | 6,112.47 | 1,306.24 | 108.43 | 6.00 | 43.8 | 58.9 | 73.8 | 74.2 | 54.0 | 48.7 | 169.1 | 89.3 | 51.97 | 86.99 | 94.37 |
| 15:07 | 5,968.73 | 1,389.14 | 100.22 | 6.36 | 43.2 | 59.0 | 67.4 | 76.0 | 54.4 | 47.4 | 169.1 | 89.8 | 51.71 | 50.90 | 78.47 |
| 15:10 | 6,071.12 | 1,334.40 | 96.52 | 6.32 | 40.6 | 55.8 | 75.2 | 73.3 | 53.1 | 44.7 | 177.5 | 89.4 | 52.58 | 66.21 | 100.00 |
| 15:13 | 5,766.42 | 1,397.66 | 96.75 | 6.20 | 42.9 | 60.1 | 68.0 | 76.0 | 53.3 | 48.1 | 169.2 | 89.5 | 52.25 | 60.73 | 77.36 |
| 15:16 | 5,930.09 | 1,355.03 | 111.15 | 6.20 | 43.2 | 58.2 | 69.0 | 75.2 | 54.5 | 47.5 | 169.2 | 89.2 | 52.07 | 89.04 | 77.79 |
| 15:19 | 6,308.13 | 1,319.24 | 97.23 | 6.26 | 40.4 | 58.1 | 69.2 | 75.9 | 53.2 | 44.8 | 169.0 | 90.0 | 52.46 | 27.40 | 100.00 |
| 15:22 | 6,273.92 | 1,397.15 | 100.65 | 6.26 | 42.6 | 57.8 | 74.9 | 73.6 | 53.6 | 47.6 | 169.2 | 89.1 | 52.50 | 70.21 | 100.00 |
| 15:25 | 6,259.65 | 1,396.97 | 105.27 | 6.19 | 44.4 | 61.2 | 68.7 | 76.5 | 54.3 | 49.5 | 169.2 | 89.7 | 51.83 | 49.67 | 86.89 |
| 15:28 | 6,216.33 | 1,310.11 | 94.89 | 6.16 | 41.7 | 56.4 | 75.4 | 73.8 | 54.0 | 45.8 | 169.2 | 89.5 | 52.17 | 54.18 | 100.00 |
| 15:31 | 5,883.57 | 1,346.96 | 102.58 | 6.24 | 40.8 | 57.3 | 66.9 | 76.1 | 53.3 | 45.2 | 169.2 | 89.5 | 51.70 | 60.27 | 77.29 |
| 15:34 | 6,318.96 | 1,313.90 | 109.28 | 6.34 | 40.9 | 57.1 | 75.5 | 73.5 | 53.2 | 45.5 | 169.1 | 89.3 | 51.79 | 54.98 | 100.00 |

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธิติญาณ์ เปลี่ยนมณี เกิดเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี เมื่อปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 สำหรับผลงานวิจัย ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 และการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25