

การศึกษาและออกแบบอีโคโนไมเซอร์โดยใช้ความร้อนปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ

นายประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร

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.

STUDY AND DESIGN OF ECONOMIZER BY HEAT RECOVERY FROM BOILER

Mr. Prasit Kiewsunton

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 | การศึกษาและออกแบบบิโอโคโนไมเซอร์โดยใช้ความร้อน ปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ |
| โดย | นายประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์)

ประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร : การศึกษาและออกแบบอีโคโนไมเซอร์โดยใช้ความร้อนปล่อย
ทิ้งจากหม้อไอน้ำ. (STUDY AND DESIGN OF ECONOMIZER BY HEAT
RECOVERY FROM BOILER) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. มิ่งศักดิ์
ตั้งตระกูล, 171 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เสนอผลการศึกษาดำเนินการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ที่มีประสิทธิภาพ
และเหมาะสมสำหรับหม้อไอน้ำ หม้อไอน้ำที่ทำการศึกษา มีขนาด 3 ตันต่อชั่วโมง เชื้อเพลิง
ที่ใช้เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เพื่อนำก๊าซเสียจากปล่องของหม้อไอน้ำมาอุ่นน้ำป้อน
ก่อนเข้าหม้อไอน้ำ โดยทำการออกแบบ สร้างและติดตั้งทดลองจนใช้งานจริงที่โรงพยาบาล
ปทุมธานี ลักษณะของอีโคโนไมเซอร์ มีการจัดเรียงท่อแบบแนวเอียงกัน (Staggered) เพื่อ
เปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ ประสิทธิภาพของอีโคโนไมเซอร์ที่สร้างกับการออกแบบ
และผลการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

จากผลการทดลองหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์กับปล่องของหม้อไอน้ำ พบว่า อีโคโน
ไมเซอร์สามารถอุ่นน้ำป้อนได้จาก 103 °C เป็น 110 °C ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้น
จาก 81% เป็น 86% ประสิทธิภาพของอีโคโนไมเซอร์เท่ากับ 0.423 สามารถประหยัดพลังงาน
เชื้อเพลิงได้ 13 % โดยประโยชน์ของงานวิจัยนี้สามารถนำไปออกแบบอีโคโนไมเซอร์หรือ
นำไปประยุกต์ใช้งานกับโรงพยาบาลหรืออุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิของก๊าซเสีย
สูงและมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำความร้อนสูญเสียมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำให้มี
อุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อประหยัดพลังงานการใช้เชื้อเพลิงของโรงพยาบาลหรืออุตสาหกรรมต่อไป

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา..... 2555.....

5270833521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : DESIGN OF ECONOMIZER / ENERGY SAVING / EFFECTIVENESS

PRASIT KEAWSUNTORN : STUDY AND DESIGN OF ECONOMIZER BY
HEAT RECOVERY FROM BOILER . ADVISOR : ASST.PROF. MINGSAK
TANGTRAKUL, 171 pp.

This thesis presents experimental result of designing an effective and suitable economizer for a 3 ton-per-hour boiler and use LPG as fuel, by bringing exhaust gas from boiler stack to preheat feed water before entering the boiler. This economizer was being installed and practically used at Pathumthani hospital. The economizer is a cross flow heat exchanger with staggered tube. The study is carry out to compare boiler efficiency, economizer effectiveness of design value with measurement value and energy saving result after the economizer was installed.

The experimental result after installing the economizer to exhaust gas tube of boiler found that it could preheat feed water from 103^oC to 110^oC. The boiler efficiency increased from 81% to 86%. The effectiveness of the economizer was about 0.423. As a result, the consumption of fuel could be reduced by 13%.

The study can be used to design the economizer for hospitals' boiler or similar industrial sectors. Flue gas loss should have large amount of high temperature exhaust gas which is enough for preheating water before entering to the boiler. As a consequence, this thesis will support energy saving for hospitals or similar industrial sectors.

Department : Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สถาบันวิจัยพลังงานจูปาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของบุคคลหลายท่านดังนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ชี้แนะหัวข้อและแนวทางวิจัยตลอดจนคำปรึกษามากมายที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย พร้อมทั้งสนับสนุนเครื่องมือวัดต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง กรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณโรงพยาบาลปทุมธานี ที่อนุญาตให้ทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย และบริษัท เรโน เทค จำกัด ที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในงานวิจัยครั้งนี้ ขอกราบขอบพระคุณหน่วยวิจัยพลังงานจูปาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้โอกาสในการศึกษาค้นคว้า สะสมประสบการณ์ และเอื้ออำนวยอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นอย่างสูงในการวิจัย รวมทั้ง คุณแมนพงศ์ ตั้งตระกูล คุณจตุรงค์ อินทรศร และเพื่อนๆนิสิตปริญญาโท ที่ช่วยให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยทั้งด้านค่าใช้จ่าย และเป็นกำลังใจที่สำคัญตลอดมา ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อันคุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้อกำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญภาพ..... | ฐ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | ด |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 9 |
| 3.1 ข้อมูลทั่วไปของหม้อไอน้ำ (Boiler)..... | 9 |
| 3.2 ข้อมูลทั่วไปของอีโคโนไมเซอร์ (Economizer)..... | 9 |
| 3.3 การถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์..... | 10 |
| 3.4.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)..... | 11 |
| 3.4.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)..... | 12 |
| 3.4.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)..... | 14 |
| 3.4 สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน (Mass and Energy balance)..... | 15 |
| 3.4.1 สมดุลมวลของหม้อไอน้ำ..... | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.2 สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์..... | 18 |
| 3.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้..... | 28 |
| 3.6 ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ (Boiler efficiency)..... | 30 |
| 3.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน..... | 30 |
| 3.7.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่าย..... | 30 |
| 3.7.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกัน (cross-flow heat exchanger)..... | 31 |
| 3.7.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell-and-tube heat exchanger)..... | 32 |
| 3.8 วิธีการคำนวณและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน..... | 33 |
| 3.9 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธี Effectiveness-NTU Method..... | 34 |
| 3.9.1 พื้นที่ถ่ายเทความร้อน..... | 41 |
| 3.9.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)..... | 42 |
| 3.9.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลผ่านกลุ่มท่อ... | 43 |
| 3.9.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลในท่อ..... | 50 |
| 3.9.5 ความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่านกลุ่มท่อ..... | 52 |
| 3.9.6 ความดันสูญเสียของการไหลในท่อ..... | 54 |
| บทที่ 4 อีโคโนไมเซอร์และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน..... | 56 |
| 4.1 การออกแบบอีโคโนไมเซอร์..... | 56 |
| 4.1.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบอีโคโนไมเซอร์..... | 57 |
| 4.2 การคำนวณหาขนาดอีโคโนไมเซอร์..... | 59 |
| 4.3 การสร้างอีโคโนไมเซอร์..... | 66 |
| 4.4 การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน..... | 70 |
| บทที่ 5 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 73 |
| 5.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของหม้อไอน้ำ..... | 73 |
| 5.1.1 สภาพหม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 73 |
| 5.1.2 สภาพหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 74 |
| 5.2 วิธีการทดลองหม้อไอน้ำและชุดอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน..... | 75 |

| | | |
|---|---|------------|
| 5.2.1 | ขั้นตอนการทดลองหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 75 |
| 5.2.2 | ขั้นตอนการทดลองหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 76 |
| 5.3 | รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องตรวจวัด..... | 77 |
| 5.3.1 | หม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 77 |
| 5.3.2 | หม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 78 |
| 5.4 | เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดและอุปกรณ์ควบคุม..... | 80 |
| 5.6.1 | เครื่องมือที่ใช้วัดค่า..... | 80 |
| 5.6.2 | อุปกรณ์ควบคุม..... | 85 |
| บทที่ 6 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการวิจัย..... | | 86 |
| 6.1 | ข้อมูลการตรวจวัดจากการทดลอง..... | 86 |
| 6.2 | สมดุลพลังงาน (Energy balance)..... | 96 |
| 6.2.1 | สมดุลของหม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 96 |
| 6.2.2 | สมดุลของหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 99 |
| 6.2.3 | สมดุลของอีโคโนไมเซอร์..... | 104 |
| 6.2.4 | สมดุลความร้อนรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์..... | 108 |
| 6.3 | อุณหภูมิของน้ำที่อุ่นได้และก๊าซเสีย..... | 114 |
| 6.4 | การเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (Specific Energy consumption)..... | 117 |
| 6.5 | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (Boiler Efficiency)..... | 120 |
| 6.6 | การเปรียบเทียบประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์ (Effectiveness)..... | 121 |
| บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | | 122 |
| 7.1 | สรุปผลการวิจัย..... | 122 |
| 7.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 123 |
| รายการอ้างอิง..... | | 125 |
| ภาคผนวก..... | | 126 |
| ภาคผนวก ก ข้อมูลการออกแบบอีโคโนไมเซอร์..... | | 127 |
| ภาคผนวก ข ข้อมูลตรวจวัดหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | | 138 |

| | |
|---|------------|
| ภาคผนวก ค ข้อมูลตรวจวัดหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 143 |
| ภาคผนวก ง การคำนวณความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียที่ออกจากปล่องของ หม้อไอน้ำ..... | 159 |
| ภาคผนวก จ การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนของหม้อไอน้ำ และอีโคโนไมเซอร์..... | 163 |
| ภาคผนวก ฉ ข้อมูลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Plate Heat Exchanger)..... | 168 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 171 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 3.1 | ค่าความสัมพันธ์ของค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้กับอุณหภูมิของก๊าซเสีย..... | 26 |
| 3.2 | องค์ประกอบของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG)..... | 27 |
| 3.3 | คุณสมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG)..... | 27 |
| 3.4 | ค่าความสัมพันธ์ effectiveness สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน..... | 39 |
| 3.5 | ค่าความสัมพันธ์ของค่า NTU ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน..... | 40 |
| 3.6 | ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม..... | 43 |
| 3.7 | ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ..... | 44 |
| 3.8 | ค่า Fouling Factor ของของไหลชนิดต่าง ๆ..... | 44 |
| 3.9 | ค่าคงที่สำหรับการไหลผ่านชั้นท่อตั้งแต่ 10 แถวหรือมากกว่า..... | 48 |
| 3.10 | ค่าตัวประกอบแก้ไข C ₂ สำหรับการไหลผ่านชั้นท่อน้อยกว่า 10 แถว..... | 48 |
| 3.11 | ค่าคงที่สำหรับการไหลท่อหลายชั้น..... | 49 |
| 3.12 | ค่าตัวประกอบแก้ไข C ₂ สำหรับการไหลผ่านชั้นท่อน้อยกว่า 20 แถว..... | 49 |
| 3.13 | ค่าความขรุขระของท่อที่เป็นวัสดุชนิดต่าง ๆ..... | 55 |
| 4.1 | ข้อมูลการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ทางทฤษฎี..... | 56 |
| 4.2 | เปรียบเทียบการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ..... | 62 |
| 5.1 | ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 78 |
| 5.2 | ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 79 |
| 6.1 | ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 87 |
| 6.2 | ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณ CO, O ₂ , SO ₂ ของก๊าซเสีย อุณหภูมิ น้ำป้อน อุณหภูมิ ก๊าซเสีย และความดันไอน้ำของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 87 |
| 6.3 | ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 88 |
| 6.4 | ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 88 |
| 6.5 | ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณ CO, O ₂ , SO ₂ ของก๊าซเสียของหม้อไอน้ำและความดันไอน้ำที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 89 |

| ตารางที่ | หน้า | |
|----------|--|-----|
| 6.6 | ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณ CO, O ₂ , SO ₂ ของก๊าซเสียของหม้อไอน้ำและความดันไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 89 |
| 6.7 | ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิน้ำและก๊าซเสียที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 90 |
| 6.8 | ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิน้ำและก๊าซเสียที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 90 |
| 6.9 | ข้อมูลตรวจวัดความดันของน้ำเข้าและออกของอีโคโนไมเซอร์..... | 91 |
| 6.10 | สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 96 |
| 6.11 | สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 97 |
| 6.12 | สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 100 |
| 6.13 | สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 101 |
| 6.14 | สมดุลความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 105 |
| 6.15 | สมดุลความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ปริมาณไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 106 |
| 6.16 | สมดุลความร้อนรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 109 |
| 6.17 | สมดุลความร้อนรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ช่วง High fire ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 111 |
| 6.18 | อัตราไอน้ำผลิตได้ทางทฤษฎีและปฏิบัติ..... | 117 |
| 6.19 | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการอุ่นน้ำป้อนและมีการอุ่นน้ำป้อนด้วยการใช้อีโคโนไมเซอร์ในทางทฤษฎีและปฏิบัติ... | 118 |
| 6.20 | อัตราการผลิตไอน้ำต่อเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ..... | 118 |
| 6.21 | ผลการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง..... | 119 |
| 6.22 | ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ..... | 120 |
| 6.23 | ประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์..... | 121 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1.1 | ไดอะแกรมของระบบอุ่นน้ำร้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ..... | 2 |
| 2.1 | การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 5 |
| 2.2 | โรงไฟฟ้าก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 6 |
| 2.3 | โรงไฟฟ้าหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 6 |
| 2.4 | ลักษณะการไหลอีโคโนไมเซอร์..... | 8 |
| 2.5 | อุปกรณ์อุ่นอากาศ..... | 8 |
| 3.1 | ลักษณะอีโคโนไมเซอร์..... | 10 |
| 3.2 | การถ่ายเทความร้อนโดยการนำแบบ 1 มิติ..... | 11 |
| 3.3 | เครื่องหมายแสดงทิศทางการไหลของความร้อนในกฎของ Fourier | 12 |
| 3.4 | การถ่ายเทความร้อนโดยการพา..... | 12 |
| 3.5 | สมมูลมวลในปริมาตรควบคุมของหม้อไอน้ำ..... | 16 |
| 3.6 | สมมูลพลังงานในปริมาตรควบคุมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์..... | 18 |
| 3.7 | อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ซ้อนร่วมจุดศูนย์กลาง..... | 30 |
| 3.8 | อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกัน..... | 31 |
| 3.9 | การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและก๊าซเสียของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง..... | 31 |
| 3.10 | อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกกลับเดียวและท่อกลับเดียว..... | 32 |
| 3.11 | อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ..... | 32 |
| 3.12 | ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกัน..... | 36 |
| 3.13 | ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน..... | 36 |
| 3.14 | ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube โดยของไหลชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในเปลือกหนึ่งครั้ง และของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในท่อสองครั้ง..... | 37 |
| 3.15 | ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube โดยของไหลชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในเปลือกสองครั้ง และของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในท่อสี่ครั้ง..... | 37 |
| 3.16 | ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลตั้งฉากกัน ซึ่งของไหลทั้งสองชนิดไม่ผสมกัน..... | 38 |

| ภาพที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 3.17 | ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลตั้งฉากกัน ซึ่งของไหลชนิดหนึ่งผสมกัน ส่วนอีกชนิดหนึ่งไม่ผสมผสานกัน..... | 38 |
| 3.18 | การไหลของของไหลผ่านกลุ่มท่อในลักษณะไหลขวางกัน..... | 45 |
| 3.19 | การจัดท่อหลายชั้น..... | 45 |
| 3.20 | กราฟตัวประกอบความเสียดทาน และค่าปรับแก้ไขสำหรับกลุ่มท่อที่จัดเรียงแบบแนวเดียวกัน..... | 53 |
| 3.21 | กราฟตัวประกอบความเสียดทาน และปรับแก้ไขสำหรับกลุ่มท่อที่จัดเรียงแบบเอียงกัน..... | 53 |
| 3.22 | moody chart แสดงตัวประกอบความเสียดทานภายในท่อ..... | 55 |
| 4.1 | ท่อ Stainless Steel 316..... | 66 |
| 4.2 | การเจาะหน้าผั่ง..... | 67 |
| 4.3 | เชื่อมท่อกับหน้าผั่ง..... | 67 |
| 4.4 | ท่อด้านเข้าและออกอีโคโนไมเซอร์ของก๊าซเสีย..... | 68 |
| 4.5 | ท่อด้านเข้าและออกอีโคโนไมเซอร์ของน้ำป้อน..... | 68 |
| 4.6 | ด้านหน้าของอีโคโนไมเซอร์..... | 69 |
| 4.7 | การทดสอบท่อด้วยวิธีความดันอุทกสถิต (Hydrostatic Test)..... | 69 |
| 4.8 | ตำแหน่งการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 70 |
| 4.9 | การใช้รอกโซ่ ยกขึ้นไปตรงตำแหน่งที่ติดตั้ง..... | 71 |
| 4.10 | แสดงการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 71 |
| 4.11 | หม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 71 |
| 4.12 | ระบบท่อและอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Plate Heat Exchanger)..... | 72 |
| 5.1 | หม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 75 |
| 5.2 | หม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 75 |
| 5.3 | ตำแหน่งตรวจวัดข้อมูล..... | 77 |
| 5.4 | อุปกรณ์วัดอุณหภูมิและไอเสีย..... | 80 |
| 5.5 | เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซเสีย (flue gas analyzer)..... | 81 |
| 5.6 | เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (Infrared thermometer)..... | 81 |
| 5.7 | อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (NI Lab VIEW)..... | 82 |
| 5.8 | อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (data logger)..... | 82 |
| 5.9 | อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure transmitter)..... | 83 |
| 5.10 | อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Vortex flow meter)..... | 84 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.11 มิเตอร์น้ำ (Flow meter)..... | 84 |
| 5.12 วาล์วควบคุมแรงดัน (Pressure Relief valve)..... | 85 |
| 5.13 วาล์วไล่อากาศออกจากระบบ (Air vent)..... | 85 |
| 6.1 อุณหภูมิของน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง | 92 |
| 6.2 อุณหภูมิของน้ำออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 92 |
| 6.3 อุณหภูมิของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 93 |
| 6.4 อุณหภูมิของก๊าซเสียออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 93 |
| 6.5 อุณหภูมิของน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง | 94 |
| 6.6 อุณหภูมิของน้ำออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 94 |
| 6.7 อุณหภูมิของน้ำออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 95 |
| 6.8 อุณหภูมิของก๊าซเสียออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 95 |
| 6.9 แชนจ์ที่ไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 98 |
| 6.10 แชนจ์ที่ไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 98 |
| 6.11 สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 102 |
| 6.12 แชนจ์ที่ไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100 °C..... | 103 |
| 6.13 สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ช่วงปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 103 |
| 6.14 แชนจ์ที่ไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100 °C..... | 104 |

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 6.15 | สมมูลพลังงานของอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง | 107 |
| 6.16 | สมมูลพลังงานของอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง | 108 |
| 6.17 | สมมูลพลังงานรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์..... | 108 |
| 6.18 | แข่งก๊าดอะแกรมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ช่วงปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100°C..... | 113 |
| 6.19 | แข่งก๊าดอะแกรมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ช่วงปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100°C..... | 113 |
| 6.20 | อุณหภูมิของน้ำป้อน เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 114 |
| 6.21 | อุณหภูมิของน้ำป้อน เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 115 |
| 6.22 | อุณหภูมิของก๊าซเสีย เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง..... | 116 |
| 6.23 | อุณหภูมิของก๊าซเสีย เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง..... | 116 |
| 6.24 | เปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ..... | 119 |
| 6.25 | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์..... | 120 |
| 6.26 | การเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพของอีโคโนไมเซอร์จริงและค่าที่ออกแบบไว้..... | 121 |

สัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|----------------------------------|--|--|
| a_{th} | อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อของเชื้อเพลิง | $\text{kmol}_{\text{O}_2} / \text{kmol}_{\text{fuel}}$ |
| A_{conv} | พื้นที่ของการพาความร้อนของหม้อไอน้ำ | m^2 |
| A_S | พื้นที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน | m^2 |
| $A_{surface,b}, A_{surface,eco}$ | พื้นที่ผิวด้านนอกของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ | m^2 |
| A | พื้นที่ถ่ายเทความร้อน | m^2 |
| A_o, A_i | พื้นที่ผิวภายนอกท่อและภายในท่อ | m^2 |
| $C_{p,f}$ | ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| $C_{p,water}$ | ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| $C_{p,fg}$ | ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซเสีย | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| V_{water} | ปริมาณการใช้น้ำของหม้อไอน้ำ | L |
| ρ_{water} | ความหนาแน่นของน้ำ | kg/m^3 |
| ρ_{fuel} | ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง | kg/m^3 |
| ρ_{fg} | ความหนาแน่นของก๊าซเสีย | kg/m^3 |
| Ra_L | Rayleigh number | - |
| AF_{actual} | อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ | $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ |
| AF_{stoic} | อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี | $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ |
| \bar{c}_{p,CO_2} | ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| \bar{c}_{p,H_2O} | ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| \bar{c}_{p,O_2} | ค่าความร้อนจำเพาะของออกซิเจน | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| \bar{c}_{p,N_2} | ค่าความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| $c_{p,steel}$ | ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก | $\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| h_m | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย | $\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| h_o, h_i | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวภายนอก และภายในท่อ | $\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ |
| L | ความยาวท่อ | m |

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---------------------------------------|--|------------------------|
| k | ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน | $W/m \cdot ^\circ C$ |
| $R_{f,o}, R_{f,i}$ | แฟลคเตอร์ตะกัณฑ์ผิวภายนอกท่อและภายในท่อ | $m^2 \cdot ^\circ C/W$ |
| R | ความต้านทานความร้อนรวมจากของไหลภายในถึงของไหลภายนอกท่อ | $^\circ C/W$ |
| D_o, D_i | เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน | mm |
| m_{fuel} | มวลของเชื้อเพลิงที่เข้าหม้อไอน้ำ | kg |
| m_{water} | มวลของน้ำป้อนที่เข้าหม้อไอน้ำ | kg |
| $m_{air,comb}$ | มวลของออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ | kg |
| m_{flue} | มวลของก๊าซเสียที่ออกจากปล่องหม้อไอน้ำ | kg |
| $m_{CO_2,flue}$ | มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสีย | kg |
| $m_{H_2O,flue}$ | มวลของไอน้ำในก๊าซเสีย | kg |
| $m_{O_2,flue}$ | มวลของก๊าซออกซิเจนในก๊าซเสีย | kg |
| $m_{N_2,flue}$ | มวลของก๊าซไนโตรเจนในก๊าซเสีย | kg |
| LHV | ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง | MJ/kg |
| $Q_{surface,boiler}$ | ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของผนังหม้อไอน้ำ | kJ |
| $Q_{surface,economizer}$ | ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของผนังอีโคโนไมเซอร์ | kJ |
| $Q_{feedwater}$ | ความร้อนน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ | kJ |
| $Q_{water,in}$ | ความร้อนน้ำป้อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ | kJ |
| Q_{flue} | ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย | kJ |
| Q_{stream} | ความร้อนไอน้ำที่ออกจากหม้อไอน้ำ | kJ |
| Q_{other} | ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | kJ |
| \dot{Q} | อัตราการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริง | W |
| \dot{Q}_{max} | อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ | W |
| C_c, C_h | อัตราความจุความร้อน | $kW/^\circ C$ |
| T_{amb} | อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม | $^\circ C$ |
| $T_{water,in,eco}, T_{water,out,eco}$ | อุณหภูมิของน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ | $^\circ C$ |

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|----------------------------------|--|----------------------------------|
| $T_{surface,b}, T_{surface,eco}$ | อุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำและอีโคไมเซอร์ | °C |
| $T_{c,in}, T_{c,out}$ | อุณหภูมิของไหลเย็นเข้าและออก | °C |
| $T_{h,in}, T_{h,out}$ | อุณหภูมิของไหลร้อนเข้าและออก | °C |
| $T_{fluegas}$ | อุณหภูมิของก๊าซเสีย | °C |
| U | สัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อนรวม | W/m ² °C |
| β | coefficient of volume expansion | K ⁻¹ |
| Re _{D,max} | ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของการไหลด้านนอกท่อ | - |
| Pr | ตัวเลขแพรนเดิล | - |
| N _L | จำนวนท่อต่อแถว | - |
| N _T | จำนวนแถวของท่อ | - |
| μ | ความหนืดของของไหลด้านนอกท่อ | kg/m-s |
| ϵ_s | emissivity | - |
| f | ตัวประกอบความเสียดทาน | - |
| ϵ | ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน | - |
| NTU | ตัวเลขหน่วยการถ่ายเท | - |
| σ | ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ | W/m ² ·k ⁴ |
| λ | ปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ | - |
| η_{boiler} | ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ | - |
| ΔP | ค่าความดันสูญเสีย | Pa |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

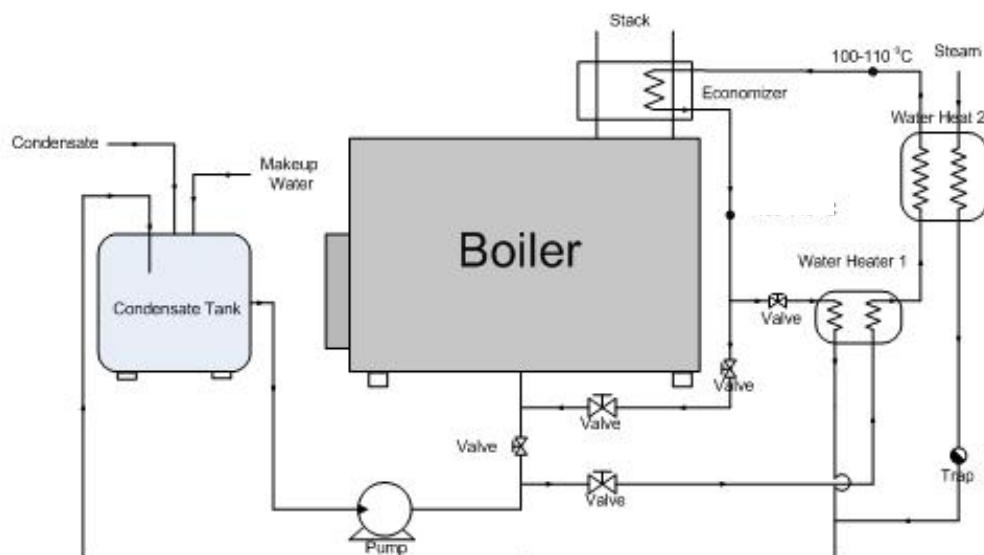
เนื่องจากโรงพยาบาลมีความจำเป็นต้องใช้ไอน้ำในการให้ความร้อนแก่การฆ่าเชื้อของอุปกรณ์ต่างๆ ไอน้ำเหล่านี้ ได้จากหม้อไอน้ำที่ใช้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมซึ่งมีราคาสูง ไอน้ำได้จากน้ำป้อนที่ได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง หากได้น้ำป้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงน้อยลง โดยความร้อนของก๊าซเสียที่ทิ้งผ่านปล่องขึ้นอยู่กัองค์ประกอบคือ การออกแบบของหม้อไอน้ำให้มีพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนเหมาะสมเพียงใด ขึ้นอยู่กับการใช้งานของหม้อไอน้ำ กล่าวคือการรักษาความสะอาดของผิวถ่ายเทความร้อน หากผิวถ่ายเทความร้อนสะอาดมากความร้อนจะถ่ายเทได้ดี ความร้อนปล่องทิ้งก็มีไม่มากเกินไป นอกจากนี้ความร้อนที่ปล่องทิ้งทางปล่องยังขึ้นอยู่กับการใช้งานของหม้อไอน้ำอีกด้วย กล่าวคือการรักษาระดับของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงให้เหมาะสมเพียงใด หากใช้อากาศน้อยเกินไปจะทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์แต่ถ้าใช้อากาศมากเกินไปจะทำให้อากาศส่วนเกินนี้พาความร้อนปล่องทิ้งผ่านปล่องมากขึ้น

การนำความร้อนจากปล่องมาใช้ประโยชน์ ต้องพยายามทำให้ประสิทธิภาพการใช้หม้อไอน้ำดีขึ้นก่อนเพื่อลดการสูญเสียต่างๆให้น้อยลง ก่อนที่จะนำความร้อนปล่องทิ้งไปใช้ประโยชน์ โดยพิจารณาจาก ออกซิเจนในก๊าซเสียไม่เกินร้อยละ 5 อุณหภูมิก๊าซเสียสูงไม่เกินอุณหภูมิไอน้ำ 60°C ในกรณีที่ผลิตไอน้ำที่ 7 บาร์(เกจ) จะมีอุณหภูมิไอน้ำ 170°C อุณหภูมิของก๊าซเสียไม่ควรเกิน 230°C ปริมาณ CO ไม่ควรเกิน 250 ppm อัตราส่วนการผลิตไอน้ำต่อเชื้อเพลิงอยู่ประมาณ 13-15 กิโลกรัมไอน้ำต่อกิโลกรัมเชื้อเพลิง การนำความร้อนจากก๊าซเสียคาดว่าอุณหภูมิก๊าซเสียจะลดลงจาก 230°C ลงเหลือ 150°C

หม้อไอน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ผลิตไอน้ำโดยได้รับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ น้ำเข้าหม้อไอน้ำรับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง น้ำจะเปลี่ยนไปเป็นไอน้ำที่ความดันหนึ่ง หากได้น้ำที่เข้าหม้อไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะใช้เชื้อเพลิงน้อยลง ประมาณว่าหากน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น 6°C จะทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงลงได้ 1% หม้อไอน้ำที่ผลิตไอน้ำที่ความดัน 7 บาร์(เกจ) ไอน้ำมีอุณหภูมิ 170°C ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิประมาณ 230°C ตามปกติแล้วก๊าซไอเสียจะปล่องทิ้งสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามเราสามารถนำความร้อนจากก๊าซเสียมาใช้ประโยชน์ได้อีก ด้วยการนำไปอุ่นน้ำจะทำให้น้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30°C เป็น 60°C จะสามารถประหยัดพลังงานเชื้อได้ประมาณ 5%

อีโคโนไมเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำงานโดยรับความร้อนจากแหล่งความร้อน (ก๊าซเสียจากกระบวนการผลิตหรือหม้อไอน้ำ) และถ่ายเทให้กับน้ำที่ต้องใช้ในอุปกรณ์หรือกระบวนการผลิต สำหรับระบบหม้อไอน้ำนั้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลวทำงานโดยรับความร้อนจากก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำโดยส่วนใหญ่และถ่ายเทให้กับน้ำ ก่อนเข้าหม้อไอน้ำ การแลกเปลี่ยนความร้อนนี้อาศัยหลักการนำความร้อนและพาความร้อนผ่านตัวกลางวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง

ก๊าซเสียปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำจะมีอุณหภูมิประมาณ 200-250°C ถ้ามีการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ที่ปล่อย บางส่วนของความร้อนในก๊าซเสียจะถูกนำกลับคืนมา เพื่ออุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ โดยการประหยัดจะได้อधिकที่สุดก็ต่อเมื่ออุณหภูมิก๊าซเสียสูงและไม่มีการเก็บคืนคอนเดนเสทกลับเข้าไปในหม้อไอน้ำหรือก็มีน้อยมาก



ภาพที่ 1.1 ไดอะแกรมของระบบอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ [16]

ประกอบด้วยอีโคโนไมเซอร์เป็นอุปกรณ์อุ่นน้ำด้วยก๊าซเสียปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ ทำด้วยวัสดุ Stainless Steel 316 เพื่อทนต่อการกัดกร่อนของกรด Water Heater 1 เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ไปยังน้ำที่เข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อให้ อุณหภูมิของน้ำสูงพอที่ไม่ให้กรดกลั่นตัว และ Water Heater 2 เป็นอุปกรณ์อุ่นน้ำให้ร้อนด้วยไอน้ำในช่วงเริ่มต้น หรือเสริมความร้อนให้น้ำมีอุณหภูมิสูงมากพอ และอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ สำหรับการเดินเครื่องหม้อไอน้ำ โดยใช้ปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อทำการศึกษาสมรรถนะการทำงานและการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำเดิมที่ใช้งานจริงในโรงพยาบาลที่ทำการศึกษา โดยเฉพาะการประเมินความร้อนพลอยทิ้งของก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำ
2. เพื่อพัฒนาต้นแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม สร้าง และติดตั้งอีโคโนไมเซอร์โดยใช้ความร้อนพลอยทิ้งจากก๊าซเสียของหม้อไอน้ำในโรงพยาบาลปทุมธานี
3. เพื่อทำการศึกษาสมรรถนะการทำงานและการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำที่ติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ เพื่อหาผลประหยัดในการใช้พลังงานและผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของหม้อไอน้ำ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับภาวะการถ่ายเทความร้อนของก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำและน้ำป้อน
2. ติดตั้งอีโคโนไมเซอร์และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน
3. เก็บข้อมูล ประเมินผลการเปรียบเทียบของการประหยัดพลังงานและผลกระทบต่อการทำงานจริง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ติดต่อประสานงานกับโรงพยาบาลที่ทำการศึกษา
2. รวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบไอน้ำและหม้อไอน้ำที่ใช้งานในปัจจุบัน
3. ตรวจสอบและบันทึกข้อมูลการทำงานในสภาพปัจจุบันของระบบไอน้ำและหม้อไอน้ำ
4. วิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของหม้อไอน้ำในสภาพปัจจุบันในแง่ของการใช้พลังงาน
5. ออกแบบอีโคโนไมเซอร์โดยใช้ก๊าซเสียพลอยทิ้งจากหม้อไอน้ำและอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน บนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและการวิเคราะห์ข้างต้น

6. สร้างและติดตั้งอีโคโนไมเซอร์และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน เพื่อใช้กับหม้อไอน้ำของโรงพยาบาลที่ทำการศึกษา

7. ตรวจสอบและบันทึกข้อมูลการทำงานของหม้อไอน้ำที่ติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ และวิเคราะห์ผลการประหยัดพลังงานที่ได้จากการติดตั้งระบบอีโคโนไมเซอร์โดยความร้อนป้อนทิ้ง ในแง่ของการใช้พลังงาน

8. วิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดบันทึกและสรุปผลการศึกษาวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ต้นแบบระบบอุ่นน้ำป้อนด้วยก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบผลิตไอน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2. สามารถนำผลการออกแบบและทดลองที่ได้ไปเผยแพร่ ขยายผลให้มีการนำไปใช้งานในหม้อไอน้ำโรงพยาบาลที่เหมาะสม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

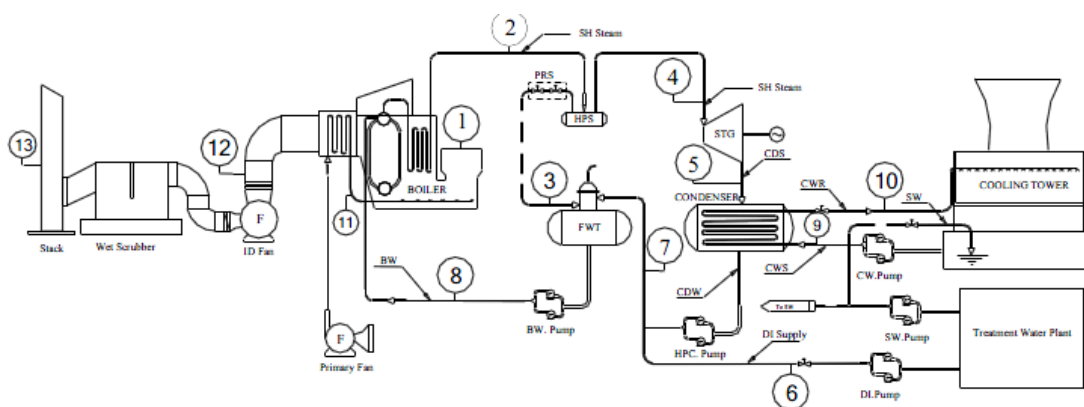
คุณชนกร ณ พัทลุง [1] ทำการศึกษาแนวทางการประเมินพลังงานความร้อนที่มีในก๊าซร้อนทิ้งและแนวทางการนำกลับมาใช้โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซเสียกับของเหลว โดยออกแบบระบบท่อน้ำเข้าฮีโคโนไมเซอร์ มีลักษณะเป็นท่อครีบและขดเป็นรูปตัว U สลับกัน เพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อนระหว่างก๊าซเสียกับของเหลว โดยหม้อไอน้ำขนาด 2 ตันต่อชั่วโมง ใช้เชื้อเพลิง LPG มีก๊าซเสียของจากหม้อไอน้ำ 220°C อัตราการไหลที่ 2998.8 kg/hr และอุณหภูมิก๊าซเสียหลังผ่านฮีโคโนไมเซอร์เท่ากับ 100 °C ซึ่งสามารถทำให้อุณหภูมิของน้ำป้อนสูงขึ้นจาก 85°C เป็น 114°C ปริมาณความร้อนที่นำกลับไปใช้ 241,823 kJ/hr โดยวัสดุที่ใช้ผลิตฮีโคโนไมเซอร์คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)



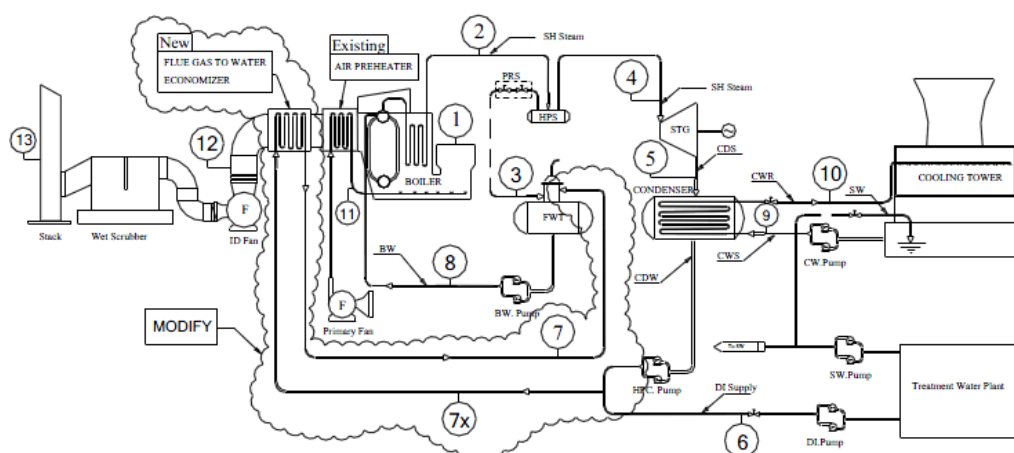
ภาพที่ 2.1 การติดตั้งฮีโคโนไมเซอร์ [1]

Su Thet Men Thun และคณะ [2] ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะการออกแบบที่ขึ้นกับพื้นที่การถ่ายเทความร้อนและความดันสูญเสีย โดยโปรแกรม MatLAB และ AutoCAD บทความนี้จะเน้นการนำเสนอการคำนวณในการออกแบบ โดยมีตัวแปรสำคัญต่างๆ ทั้งตัวแปรรู้ค่าและตัวแปรไม่รู้ค่า เช่น อัตราการไหล ช่วงอุณหภูมิ ความยาวท่อและการจัดเรียงท่อ ซึ่งค่าพวกนี้สามารถนำไปคำนวณหาค่า จำนวนของท่อทั้งหมด อัตราการถ่ายเทความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม และค่าความดันสูญเสียของท่อ ทำให้โปรแกรม MatLAB มีประโยชน์มากในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

Somkiat Boonnasa [3] ศึกษาการนำความร้อนสูญเสียที่ปล่อยของก๊าซเสียกลับมาใช้ประโยชน์โดยติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ โดยใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์สำหรับการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ส่งผลดีต่อระบบโดยรวม และลดการสูญเสียพลังงานความร้อนก๊าซเสีย ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิต โดยต้องคำนึงถึงจุดที่สำคัญคือ อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ และค่าประสิทธิภาพพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 2.2 โรงไฟฟ้าก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ [3]



ภาพที่ 2.3 โรงไฟฟ้าหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ [3]

จากการวิเคราะห์ผลพบว่าอีโคโนไมเซอร์ขนาดใหญ่ สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ได้มาก ส่งผลให้ระยะเวลาคืนทุนเร็ว ถึงแม้ว่าราคาการลงทุนสำหรับอีโคโนไมเซอร์จะสูงขึ้นก็ตาม สรุปว่าการปรับปรุงระบบโดยการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ สามารถนำความร้อนสูญเสียกลับมาอุ่นน้ำป้อนได้ ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าลงได้ 0.197 bath/kWh ลดความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียสู่บรรยากาศลงได้ 48.3% และมีระยะเวลาคืนทุนเร็วประมาณ 7 เดือน

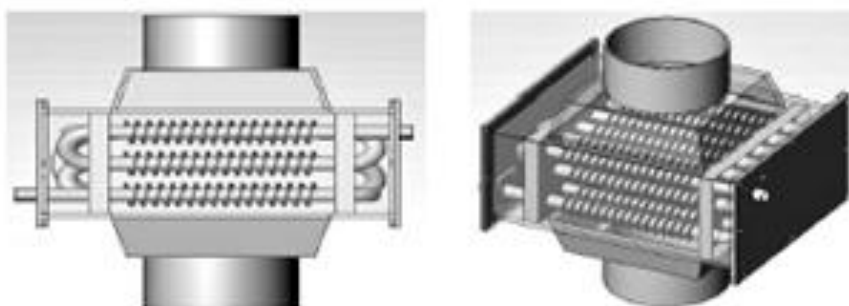
Tanongkiat Kiatsiroat [4] ศึกษาการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง พบว่าท่อครีบกเกลียวมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดีกว่าท่อครีบกกลม และลักษณะการไหลหลายกลับ ทำให้เกิดผลกระทบต่อความดันสูญเสียภายในท่อสูงและการบำรุงรักษาที่ซับซ้อนสำหรับท่อแบบครีบก ทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนลดลง

Isares Dhuchakallaya [5] เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของไหลระหว่างน้ำร้อนและอากาศ โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะดังกล่าว โดยที่ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการทำงานที่เหมาะสม ได้แก่ อัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลของน้ำร้อน ส่วนตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ ที่เหมาะสม ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ จำนวนแถวของท่อ จำนวนท่อต่อแถว ระยะห่างของครีบก ความหนาของครีบก และระยะห่างระหว่างแถว โดยค่าใช้จ่ายได้แบ่งออกเป็นค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ราคาของวัสดุที่ใช้สร้าง และค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ ค่าใช้จ่ายทางด้านความดันลด และค่าใช้จ่ายทางด้านการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ จะเป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้ นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ๆ

Soylemez [6] ศึกษาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับการนำความร้อนสูญเสียมาใช้ประโยชน์ โดยใช้วิธี P_1-P_2 และ Effectiveness-NTU ซึ่งวิธี P_1-P_2 ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ และวิธี Effectiveness-NTU ใช้สำหรับการวิเคราะห์ทางความร้อน จากการวิเคราะห์ผลราคาในการสร้างและราคาที่ใช้ในการดำเนินการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย โดยวิธี P_1-P_2 สามารถนำมาคำนวณร่วมกับวิธี Effectiveness-NTU ได้เป็นอย่างดี

Aegalux และคณะ [7] ศึกษาการประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำขนาดเล็ก โดยเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบกลุ่มท่อ และผลของตัวแปรทางด้านอัตราการไหลของน้ำป้อน อุณหภูมิทางเข้าของก๊าซเสียและน้ำป้อน ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อติดครีบกกลมกับแบบท่อติดครีบกเป็นเกลียว โดยท่อและครีบกทำจากเหล็ก สแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.0254 เมตร ความหนาของผนังท่อ 0.001 เมตร ความยาวของท่อในส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อน 5 เมตร จัดทำเป็นกลุ่มท่อได้ 17 ท่อ 3 แถว ความยาวท่อละ 0.3 เมตร น้ำไหลในท่อแบบอนุกรม ก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำขนาด 30 กิโลกรัม/ชั่วโมง ไหลตั้งฉากกับกลุ่มท่อ ผลการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำป้อน 20 L/hr อุณหภูมิทางเข้าก๊าซเสียและน้ำป้อน 180 และ 50 °C ตามลำดับ เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อติดครีบกกลม

จะได้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากับ 2.406 กิโลวัตต์ ค่าประสิทธิผลเท่ากับ 42.13% ในขณะที่เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อติดครีบขดเป็นเกลียว เท่ากับ 2.574 กิโลวัตต์ และ 45.09% วิเคราะห์ผลเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อติดครีบขดเป็นเกลียว มีสมรรถนะที่ดีกว่าจึงสามารถประหยัดพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องอุ่นน้ำป้อนและหม้อไอน้ำได้ดีกว่าเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อติดครีบกกลม



ภาพที่ 2.4 ลักษณะการไหลอีโคโนไมเซอร์

วรวิมล มั่นสกุล, สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และพงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ [8] ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม พบว่าหลังจากติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ สามารถนำความร้อนสูญเสียในก๊าซเสียมาใช้ได้ประมาณ 24 % ประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้ประมาณ 9 % ของการใช้ น้ำมันเตาของเตาเผา โดยใช้วิธี NTU-Method ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศที่สะดวกและเหมาะสมในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 2.5 อุปกรณ์อุ่นอากาศ

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

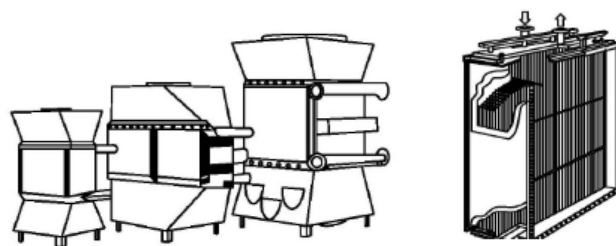
3.1 ข้อมูลทั่วไปของหม้อไอน้ำ (Boiler)

หม้อไอน้ำเป็นเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไอน้ำโดยการถ่ายเทความร้อน ซึ่งได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงให้แก่ น้ำ ซึ่งอยู่ในภาชนะปิดมิดชิดให้ได้ไอน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้ตามต้องการ ซึ่งหม้อไอน้ำที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นหม้อไอน้ำขนาด 3 ตันต่อชั่วโมง โดยหม้อไอน้ำนี้จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ท่อน้ำป้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก 38 มิลลิเมตร ขนาดปล่องไอเสียมีเส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก 0.508 เมตร ความสูงตามแนวตั้งฉาก 1.6 เมตร ความยาวตามแนวนอน 4.3 เมตร

หม้อไอน้ำเป็นส่วนได้รับความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้และส่งถ่ายความร้อนให้กับน้ำ ซึ่งอยู่ภายในหม้อไอน้ำทำให้น้ำกลายเป็นไอ ซึ่งหม้อไอน้ำประกอบด้วยท่อทรงกระบอก (Drum) และท่อน้ำ (Water Tube) หรือท่อไฟ (Fire Tube) โดยตัวหม้อไอน้ำเป็นภาชนะทนความร้อนได้สูงที่บรรจุน้ำและไอน้ำอิมตัว น้ำจะบรรจุอยู่ประมาณ 2 ใน 3 หรือ 3 ใน 4 ของปริมาตรของหม้อไอน้ำ

3.2 ข้อมูลทั่วไปของอีโคโนไมเซอร์ (Economizer)

ความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการผลิตหรืออุปกรณ์ที่ใช้ผลิตความร้อนในหม้อไอน้ำ สามารถที่จะนำความร้อนกลับมาใช้ได้ โดยใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซเสียดกับน้ำป้อนหม้อไอน้ำ สมรรถนะการทำงานของอีโคโนไมเซอร์ ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของพื้นผิวภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความปั่นป่วนการไหล และพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อน การเพิ่มพื้นที่ผิว และความปั่นป่วนการไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเพิ่มสมรรถนะการทำงานให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แสดงดังภาพที่ 3.1



(ก) ลักษณะภายนอก

(ข) ลักษณะภายใน

ภาพที่ 3.1 ลักษณะอีโคโนไมเซอร์

โดยทั่วไปการนำความร้อนของก๊าซเสียทิ้งจากหม้อไอน้ำกลับไปใช้อุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นประมาณ 1% ทุก 30°C ของอุณหภูมิก๊าซเสียที่สามารถลดลงได้ ทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ ก๊าซเสียของหม้อไอน้ำอาจมีอุณหภูมิประมาณ 200-250°C ที่ภาระเต็มพิกัด (Full Load) ในกรณีนี้ ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซเสียอาจสูงถึง 20% ดังนั้น การติดตั้งใช้งานอีโคโนไมเซอร์ จึงเป็นวิธีการประหยัดพลังงานที่มีประสิทธิภาพมากวิธีหนึ่ง อย่างไรก็ตาม การใช้อีโคโนไมเซอร์จะต้องไม่ทำให้อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ผ่านออกมามีอุณหภูมิต่ำลงจนเกินไป เพราะทำให้ห้องค้ประกอบในก๊าซเสียรวมตัวกับไอน้ำเกิดเป็นกรดกัดกร่อนโลหะที่ก๊าซเสียวิ่งผ่าน

เนื่องจากอีโคโนไมเซอร์จะต้องสัมผัสกับก๊าซเสียตลอดเวลา จึงสกปรกอย่างรวดเร็ว ทำให้สมรรถนะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง แสดงให้เห็นได้จาก การที่ผลต่างอุณหภูมิระหว่างก๊าซเสียก่อนเข้า และออกมาจากอีโคโนไมเซอร์ลดลง ทำให้อุณหภูมิน้ำป้อนที่ผ่านออกมาจากอีโคโนไมเซอร์ลดลง ส่งผลถึงประสิทธิภาพการทำงานของหม้อไอน้ำ การทำความสะอาดสามารถทำได้โดยการใช้ น้ำจืดและใช้แปรงขัดทำความสะอาด

3.3 การถ่ายเทความร้อนในหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์

การถ่ายเทความร้อนอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้งภายในและภายนอกตัวหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ดังนั้นการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 แบบ สามารถพิจารณาได้ดังนี้

3.3.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่ง หรือจากส่วนหนึ่งของวัตถุไปยังส่วนอื่น ๆ ของวัตถุ โดยการแลกเปลี่ยนพลังงานเกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน หรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนนั้น ความร้อนจะไหลจากโมเลกุลของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่โมเลกุลของวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่วัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในวัสดุที่เป็นของแข็ง ส่วนวัสดุที่เป็นของเหลวหรือก๊าซจะมีการนำความร้อนเกิดขึ้นพร้อมกันกับการพาความร้อน ซึ่งการแก้ปัญหาชนิดนี้จะมีความยุ่งยากมากกว่าการแก้ปัญหาที่มีการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว การนำความร้อนภายในวัสดุจะเป็นไปตามกฎของ Fourier ซึ่งกล่าวว่า อัตราการไหลของความร้อนโดยการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนด จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกับระยะทาง dT/dn และพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน (A) โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนในทิศทาง n (ภาพที่ 3.2 และ 3.3) สามารถเขียนได้ดังนี้

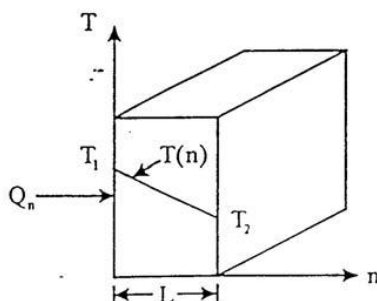
$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dn} \quad (3.1)$$

โดยที่ Q_{cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบนำความร้อน

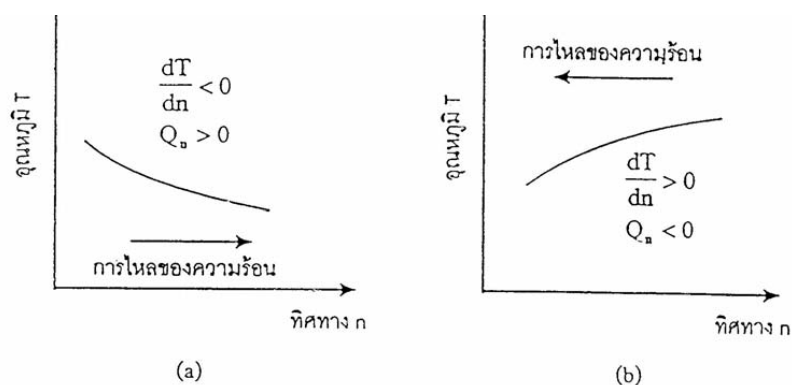
k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal Conductivity) (W/m-K)

A คือ พื้นที่ผิวการนำความร้อน (m^2)

$\frac{dT}{dn}$ คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิภายในผนัง (K/m)



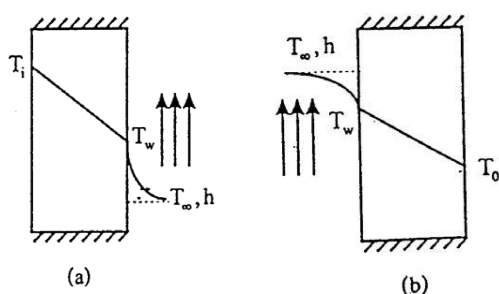
ภาพที่ 3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำแบบ 1 มิติ [8]



ภาพที่ 3.3 เครื่องหมายแสดงทิศทางของการไหลของความร้อนในกฎของ Fourier [8]

3.3.2 การพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การพาความร้อนเกิดขึ้นในของไหลโดยการผสมกันระหว่างส่วนหนึ่งของของไหลกับส่วนอื่นๆ อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของมวลของของไหลนั้น กระบวนการที่แท้จริงของการถ่ายเทพลังงานจากโมเลกุลของของไหลหนึ่งไปยังโมเลกุลอื่นๆยังคงเป็นการนำความร้อน พลังงานอาจเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังจุดอื่นๆได้โดยการเคลื่อนที่ของของไหลเอง การเคลื่อนที่ของของไหลอาจเกิดจากเครื่องมือกลภายนอก เช่น พัดลม ปัม ซึ่งกระบวนการพาความร้อนแบบนี้เรียกว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) หรือถ้าการเคลื่อนที่ของของไหลเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของไหลอันเนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่มีอยู่ในมวลของของไหล กระบวนการพาความร้อนนั้นถูกเรียกว่า การพาความร้อนอิสระ หรือการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) ซึ่งสามารถคำนวณหาอัตราการพาความร้อน (ภาพที่ 3.4) ได้จากสมการการพาความร้อนดังนี้



ภาพที่ 3.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา (a) $T_w > T_{\infty}$ (b) $T_{\infty} < T_w$ [8]

$$Q_{conv} = h_m A_{conv} (T_s - T_{amb}) \quad (3.2)$$

โดยที่ Q_{conv} คือ การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (W)

h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$)

A_{conv} คือ พื้นที่ของการพาความร้อน (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิผิวด้านนอก (K)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย (h_m)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ยนั้น สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของ average Nusselt number (\overline{NU}) ที่ได้จากการทดลอง (Cengel, 2006) ดังนั้นจึงได้ความสัมพันธ์ของค่า average Nusselt number ดังสมการ

$$h = \frac{k}{L_c} \overline{NU} \quad (3.3)$$

กรณีหม้อไอน้ำ

ลักษณะของพื้นที่ผิวเพื่อนำไปใช้หา \overline{NU} โดยที่หม้อไอน้ำมีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอก ดังนั้นสมการที่นำมาใช้เพื่อหาค่า \overline{NU} นั้นสามารถใช้สมการที่ใช้กับ Horizontal cylinder ตามสมการ

$$\overline{NU} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.4)$$

กรณีอีโคโนไมเซอร์

ลักษณะของพื้นที่ผิวอีโคโนไมเซอร์มีลักษณะเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยม ดังนั้นสมการที่นำมาใช้เพื่อหาค่า \overline{NU} นั้นสามารถใช้สมการที่ใช้กับ vertical plate ดังนี้

$$\overline{NU} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.5)$$

โดย Ra_L'' คือ ค่า Rayleigh number โดยค่า Ra_L'' มีความสัมพันธ์กับค่า Prandtl number (Pr) ดังสมการ

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\nu^2} Pr \quad (3.6)$$

โดยที่ ν คือ ค่า kinematics viscosity ของของไหล (m^2/s)

L_C คือ ค่าความยาวของหม้อไอน้ำหรืออีโคโนไมเซอร์ (m)

β คือ ค่า volume expansion coefficient ($1/K$)

C คือ ค่าคงที่ในรูปทรงเลขาคณิตของพื้นที่ผิวและระบบการไหลซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงของค่า Rayleigh number โดยปกติแล้วจะมีค่าน้อยกว่า 1

N คือ ค่าคงที่ในรูปทรงเลขาคณิตของพื้นที่ผิวและระบบการไหลซึ่งมีความสัมพันธ์กับช่วงของค่า Rayleigh number โดยปกติแล้วจะมีค่า 1/4 เมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และมีค่าเท่ากับ 1/3 เมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)

Gr_L คือ ค่า Grashof number โดยสามารถตรวจสอบชนิดของการไหลได้จากค่า Gr ถ้า Gr มีค่าไม่เกิน 10^9 ถือว่าเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)

Pr คือ Prandtl number หาค่าได้จากตารางคุณสมบัติ

3.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 0 K จะเปล่งพลังงาน (Energy Emission) ออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุหรือสสาร พลังงานที่เปล่งออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุหรือสสารนี้เรียกว่า รังสีความร้อน (Thermal Radiation) พลังงานรังสีที่ตกลงบนผิวของวัตถุหนึ่ง ๆ จะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของวัตถุซึ่งจะดูดกลืนเอาไว้ ถ้าพลังงานรังสีที่เปล่งออกมาจากระยะทางสั้น ๆ จากผิว หรือรังสีถูกดูดกลืนไว้ที่ระยะทางสั้น ๆ จากผิว กระบวนการแผ่รังสีแบบนี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อนที่ผิว (Surface Radiation)

รังสีความร้อนเคลื่อนที่โดยอาศัยกลไกของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัตถุหนึ่งมาตกลงบนอีกวัตถุหนึ่ง รังสีความร้อนสูงสุดที่เปล่งออกมาจากวัตถุหนึ่งที่มีอุณหภูมิ T จะถูกกำหนดโดยกฎของ Stefan-Boltzmann law ดังนี้

$$Q_{rad} = \varepsilon_s \sigma A_s (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (3.7)$$

| | | |
|--------|-----------------|--|
| โดยที่ | Q_{rad} | คือ การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อน (W) |
| | A_s | คือ พื้นที่ของการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวด้านนอก (m^2) |
| | T_s | คือ อุณหภูมิที่ผิวด้านนอก (K) |
| | T_{amb} | คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K) |
| | ε_s | คือ ค่า emissivity ผิวนอกของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์มีค่าประมาณ 0.8 และ 0.44 ตามลำดับ |
| | σ | คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzman มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ |

3.4 สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน (Mass and Energy balance)

ในหัวข้อนี้พิจารณาในส่วนของสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ สมดุลมวลของน้ำจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม เนื่องจากไม่มีการปล่อยน้ำออกจากหม้อไอน้ำ (Blow down) และมีความร้อนสะสมอยู่ การพิจารณาสมดุลพลังงานจึงต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในปริมาตรควบคุม

3.4.1 สมดุลมวลของหม้อไอน้ำ

สมดุลมวลของหม้อไอน้ำ สามารถเขียนสมดุลมวลได้จากกฎการอนุรักษ์มวล ดังนี้

$$\sum m_{in} - \sum m_{out} = \Delta m_{CV} \quad (3.8)$$

โดยที่ $\sum m_{in}$ คือ มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ภายในปริมาตรควบคุม (kg)

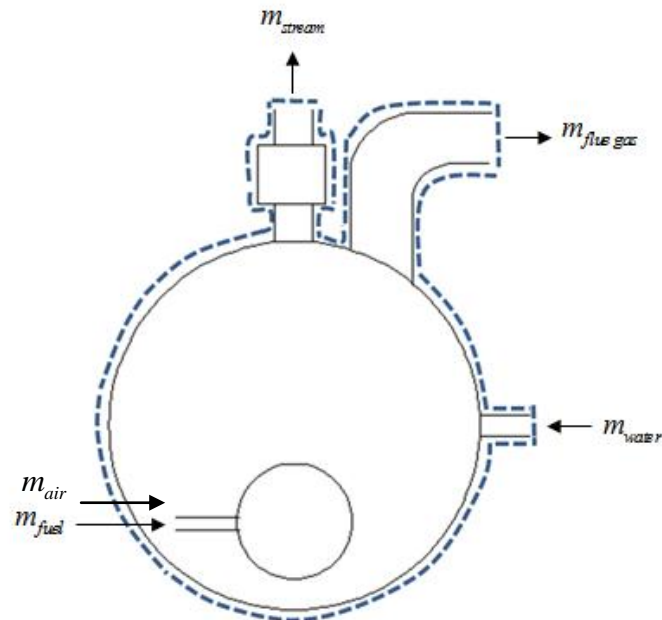
$\sum m_{out}$ คือ มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม (kg)

Δm_{CV} คือ การเปลี่ยนแปลงของมวลภายในปริมาตรควบคุม (kg)

สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาระบบที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงมวลภายใน ดังนั้น $\Delta m_{CV} = 0$ จึงสามารถเขียนสมการสมดุลมวลได้ดังนี้

มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม = มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม

$$\sum m_{in} = \sum m_{out} \quad (3.9)$$



ภาพที่ 3.5 สมดุลมวลในปริมาตรควบคุมของหม้อไอน้ำ

1) มวลทั้งหมดที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม ($\sum m_{in}$)

1.1 มวลของเชื้อเพลิง (m_{fuel})

มวลของเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมด ซึ่งคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$m_{fuel} = \rho_{fuel} V_{fuel} \quad (3.10)$$

โดยที่ ρ_{fuel} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/l)

V_{fuel} คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ใช้ (l)

เนื่องจากเชื้อเพลิงเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว สามารถหาความหนาแน่นของก๊าซจากค่าความถ่วงจำเพาะในตารางที่ 3.5 ดังสมการต่อไปนี้

$$SG = \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{air @ 25^\circ C}} \quad (3.11)$$

โดยที่ SG คือ ความถ่วงจำเพาะ

ρ_{fuel} คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง

$\rho_{air@0^{\circ}C}$ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ 1 atm

จากตารางที่ 3.3 สามารถหาความหนาแน่นของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\rho_{fuel} = SG \times \rho_{air@0^{\circ}C} = 0.546 \times 1.293 = 0.7060 \text{ kg/m}^3$$

1.2 มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($m_{air,comb}$)

มวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ หาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย จากนั้นนำปริมาณออกซิเจนที่ตรวจวัดได้มาคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง (AF_{actual}) โดยรายละเอียดแสดงไว้ในหัวข้อการวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศของการเผาไหม้ เมื่อทราบค่า AF_{actual} จะสามารถคำนวณหามวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังสมการ

$$m_{air,comb} = AF_{actual} \times m_{fuel} \quad (3.12)$$

โดยที่ AF_{actual} คือ อัตราส่วนที่แท้จริงของอากาศต่อเชื้อเพลิง ($\text{kg}_{air}/\text{kg}_{fuel}$)

1.3 มวลของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (m_{water})

มวลของน้ำป้อนเข้าไอน้ำสามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของปริมาณการใช้ไอน้ำซึ่งคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$m_{water} = \rho_{water} V_{water} \quad (3.13)$$

โดยที่ ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/l)

V_{water} คือ ปริมาตรน้ำที่ใช้ (l)

2) มวลทั้งหมดที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($\sum m_{out}$)

2.1 มวลของก๊าซเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำ ($m_{flue\ gas}$)

เมื่อแทนค่ามวลที่เข้าและออกจากหม้อไอน้ำในสมการ (3.9) แล้วจัดรูปสมการ สมดุลมวลใหม่ได้ดังนี้

$$m_{flue\ gas} = m_{fuel} + m_{air,comb} \quad (3.14)$$

2.2 มวลของไอน้ำที่ได้จากหม้อไอน้ำ (m_{stream})

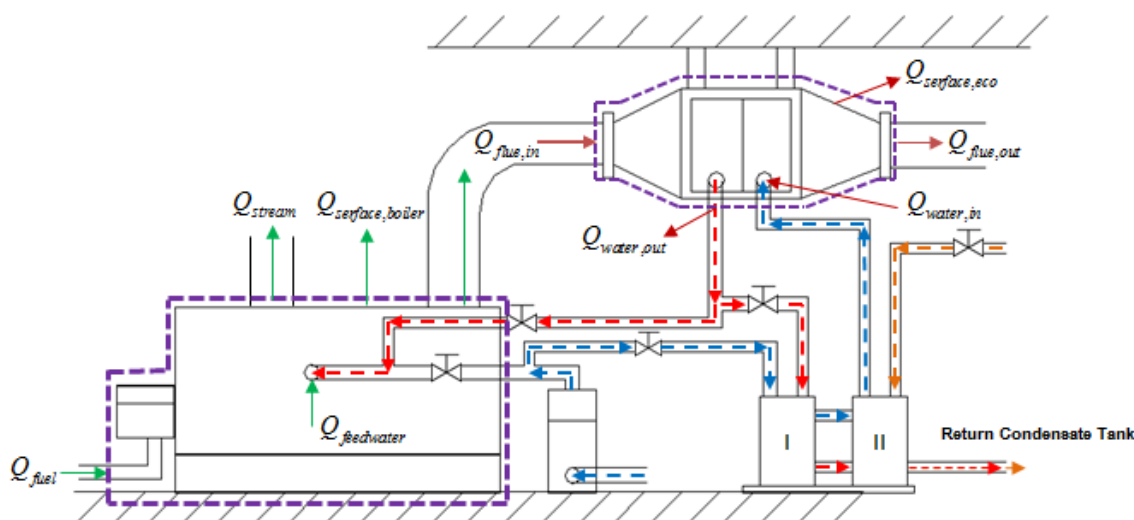
มวลของไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ สามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลของ ปริมาณการใช้ไอน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$m_{water} = \rho_{water} V_{water} \quad (3.15)$$

โดยที่ ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของไอน้ำ (kg/m^3)

V_{water} คือ ปริมาตรไอน้ำที่ใช้ (m^3)

3.4.2 สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ 3.6 สมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์

จากภาพที่ 3.6 จะพิจารณาปริมาตรควบคุม 2 ส่วนคือ หม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ที่มีการถ่ายเทระหว่างมวลกับสิ่งแวดล้อม ทำให้พลังงานส่วนหนึ่งไหลเข้าและออกไปพร้อม

กับการถ่ายเทของมวล โดยไม่มีพลังงานที่หลงเหลืออยู่ในระบบ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากกฎเทอร์โมไดนามิกส์ ข้อที่ 1 โดยอาศัยหลักการของกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{CV} - W_{CV} + \sum E_{in} - \sum E_{out} = \frac{\Delta E_{CV}}{\Delta T} \quad (3.16)$$

โดยที่ Q_{CV} คือ การถ่ายเทความร้อนจากปริมาตรควบคุมไปยังสิ่งแวดล้อม

W_{CV} คือ งานทั้งหมดที่ได้และให้กับปริมาตรควบคุม

$\sum E_{in}$ คือ พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม

$\sum E_{out}$ คือ พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุมไปยังสิ่งแวดล้อม

$\frac{\Delta E_{CV}}{\Delta T}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในปริมาตรควบคุม

จากสมการ 3.16 เขียนจัดรูปสมการ ได้ดังนี้

$$Q_{CV} - W_{CV} + \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \Delta E_{CV} \quad (3.17)$$

จากสมการ 3.17 เนื่องจากไม่มีงานเกิดจากระบบในปริมาตรควบคุม $W_{CV} = 0$ ความแตกต่างของพลังงานศักย์ (gz) และพลังงานจลน์ ($\frac{V^2}{2}$) ของระบบมีน้อยมาก สามารถพิจารณาให้เป็นศูนย์ โดยระบบที่ทำการศึกษายู่ในสภาวะคงตัว (Steady state), $\frac{\Delta E_{CV}}{\Delta T} = 0$ จะสามารถหาสมดุลพลังงาน (Energy Balance) ของหม้อไอน้ำ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$Q_{CV} + \sum m_i h_i = \sum m_e h_e \quad (3.18)$$

จากสมการ 3.18 สามารถจำแนกรายละเอียดของความร้อนที่เข้าและออก ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม (Q_{CV})

กรณีหม้อไอน้ำ

1.1 การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังหม้อไอน้ำไปยังสิ่งแวดล้อม ($Q_{surface,boiler}$)

กรณีอีโคโนไมเซอร์

1.2 การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังอีโคโนไมเซอร์ไปยังสิ่งแวดล้อม ($Q_{surface,eco}$)

2. พลังงานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม ($\sum m_i h_i$)

กรณีหม้อไอน้ำ

2.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

2.2 ความร้อนจากน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ ($Q_{feedwater}$)

กรณีอีโคโนไมเซอร์

2.3 ความร้อนจากน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{water,in}$)

2.4 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{flue,in}$)

3. พลังงานที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($\sum m_e h_e$)

กรณีหม้อไอน้ำ

3.1 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียของหม้อไอน้ำ (Q_{flue})

3.2 ความร้อนจากไอน้ำที่ผลิตได้ของหม้อไอน้ำ (Q_{stream})

กรณีอีโคโนไมเซอร์

3.3 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียออกจากอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{flue,out}$)

3.4 ความร้อนจากน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{water,out}$)

4. พลังงานสูญเสียอื่นๆ (Q_{other})

1. การถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม (Q_{CV})

1.1 การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังหม้อไอน้ำไปยังสิ่งแวดล้อม ($Q_{surface,boiler}$)

$$Q_{surface,boiler} = \left[h_{m,b} A_{surface,b} (T_{surface,b} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface,b} \sigma A_{surface,b} (T_{surface,b}^4 - T_{amb}^4) \right] \quad (3.19)$$

1.2 การถ่ายเทความร้อนจากผิวของผนังอีโคโนไมเซอร์ไปยังสิ่งแวดล้อม ($Q_{surface,eco}$)

$$Q_{surface,economizer} = \left[h_{m,eco} A_{surface,eco} (T_{surface,eco} - T_{amb}) + \varepsilon_{surface,eco} \sigma A_{surface,eco} (T_{surface,eco}^4 - T_{amb}^4) \right] \quad (3.20)$$

| | | |
|--------|--|--|
| โดยที่ | $Q_{surface,boiler}$ | คือ ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของผนังหม้อไอน้ำ (J) |
| | $Q_{surface,economizer}$ | คือ ความร้อนสูญเสียผ่านผิวของผนังอีโคโนไมเซอร์ (J) |
| | h_m | คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$) |
| | $A_{surface,b}, A_{surface,eco}$ | คือ พื้นที่ผิวด้านนอกของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ (m^2) |
| | $T_{surface,b}, T_{surface,eco}$ | คือ อุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ (K) |
| | T_{amb} | คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K) |
| | $\varepsilon_{surface,b}, \varepsilon_{surface,eco}$ | คือ ค่า emissivity ของผนังหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ มีค่าประมาณ 0.78 และ 0.44 ตามลำดับ |
| | σ | คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzman มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$) |

2. พลังงานความร้อนที่เข้า ($\sum m_i h_i$)

2.1 ความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Q_{fuel})

$$Q_{fuel} = m_{fuel} \times LHV \quad (3.21)$$

โดยที่ m_{fuel} คือ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (kg)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/kg)

2.2 ความร้อนจากน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ ($Q_{feedwater}$)

$$Q_{feedwater} = \rho_{water} \times V_{water} \times C_{p,water} (T_{feedwater} - T_{amb}) \quad (3.22)$$

โดยที่ $Q_{feedwater}$ คือ ความร้อนน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (kJ)

ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำป้อน (kg/l)

V_{water} คือ ปริมาณการใช้น้ำของหม้อไอน้ำ (l)

$C_{p,water}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำป้อนมีค่าประมาณ 4.181 (kJ/kg·°C)

$T_{feedwater}$ คือ อุณหภูมิของน้ำป้อน (°C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

2.3 ความร้อนจากน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{water,in}$)

$$Q_{water,in} = \rho_{water,in} \times V_{water} \times C_{p,water,in} (T_{water,in} - T_{amb}) \quad (3.23)$$

โดยที่ $Q_{water,in}$ คือ ความร้อนน้ำป้อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (kJ)

$\rho_{water,in}$ คือ ความหนาแน่นของน้ำป้อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ (kg/l)

V_{water} คือ ปริมาณการใช้น้ำของหม้อไอน้ำ (l)

$C_{p,water,in}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำป้อน (kJ/kg·°C)

$T_{water,in}$ คือ อุณหภูมิของน้ำป้อน (°C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

2.4 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{flue,in}$)

$$Q_{flue,in} = m_{CO_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,CO_2} dT \right) + m_{H_2O,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,H_2O} dT \right) + m_{O_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,O_2} dT \right) \\ + m_{SO_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,SO_2} dT \right) + m_{N_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,N_2} dT \right) \quad (3.24)$$

โดยที่ $Q_{flue,in}$ คือ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ (kJ)

$m_{CO_2,flue}$ คือ มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)

- $m_{H_2O, flue}$ คือ มวลของไอน้ำในก๊าซเสีย (kg)
- $m_{O_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซออกซิเจนในก๊าซเสีย (kg)
- $m_{SO_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)
- $m_{N_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซไนโตรเจนในก๊าซเสีย (kg)
- c_{p, CO_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kJ/kg·K)
- c_{p, H_2O} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg·K)
- c_{p, O_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของออกซิเจน (kJ/kg·K)
- c_{p, SO_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (kJ/kg·K)
- c_{p, N_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน (kJ/kg·K)

3. พลังงานความร้อนที่ออก ($\sum m_e h_e$)

3.1 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียของหม้อไอน้ำ (Q_{flue})

$$Q_{flue} = m_{CO_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, CO_2} dT \right) + m_{H_2O, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, H_2O} dT \right) + m_{O_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, O_2} dT \right) + m_{SO_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, SO_2} dT \right) + m_{N_2, flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p, N_2} dT \right) \quad (3.25)$$

โดยที่ Q_{flue} คือ ความร้อนสูญเสียของก๊าซไอเสียออกจากหม้อไอน้ำ (kJ)

- $m_{CO_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)
- $m_{H_2O, flue}$ คือ มวลของไอน้ำในก๊าซเสีย (kg)
- $m_{O_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซออกซิเจนในก๊าซเสีย (kg)
- $m_{SO_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)
- $m_{N_2, flue}$ คือ มวลของก๊าซไนโตรเจนในก๊าซเสีย (kg)

c_{p,CO_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kJ/kg·K)

c_{p,H_2O} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg·K)

c_{p,O_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของออกซิเจน (kJ/kg·K)

c_{p,SO_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (kJ/kg·K)

c_{p,N_2} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน (kJ/kg·K)

3.2 ความร้อนจากไอน้ำที่ผลิตได้ของหม้อไอน้ำ (Q_{stream})

$$Q_{stream} = m_{stream} (h_g - h_f) \quad (3.26)$$

โดยที่ Q_{stream} คือ ความร้อนไอน้ำที่ออกจากหม้อไอน้ำ (kJ)

m_{stream} คือ ปริมาณการใช้ไอน้ำ (kg)

h_g คือ ค่าเอนทาลปีของไอน้ำ (kJ/kg)

h_f คือ ค่าเอนทาลปีของน้ำป้อน (kJ/kg)

3.3 ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียออกจากอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{flue,out}$)

$$Q_{flue,out} = m_{CO_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,CO_2} dT \right) + m_{H_2O,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,H_2O} dT \right) + m_{O_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,O_2} dT \right) \\ + m_{SO_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,SO_2} dT \right) + m_{N_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,N_2} dT \right) \quad (3.27)$$

โดยที่ $Q_{flue,out}$ คือ ความร้อนสูญเสียของก๊าซไอเสียออกจากอีโคโนไมเซอร์ (kJ)

$m_{CO_2,flue}$ คือ มวลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)

$m_{H_2O,flue}$ คือ มวลของไอน้ำในก๊าซเสีย (kg)

$m_{O_2,flue}$ คือ มวลของก๊าซออกซิเจนในก๊าซเสีย (kg)

$m_{SO_2,flue}$ คือ มวลของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซเสีย (kg)

| | |
|----------------|--|
| $m_{N_2,flue}$ | คือ มวลของก๊าซไนโตรเจนในก๊าซเสีย (kg) |
| c_{p,CO_2} | คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (kJ/kg·K) |
| c_{p,H_2O} | คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (kJ/kg·K) |
| c_{p,O_2} | คือ ค่าความร้อนจำเพาะของออกซิเจน (kJ/kg·K) |
| c_{p,SO_2} | คือ ค่าความร้อนจำเพาะของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (kJ/kg·K) |
| c_{p,N_2} | คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน (kJ/kg·K) |

3.4 ความร้อนจากน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ ($Q_{water,out}$)

$$Q_{water,out} = \rho_{water,out} \times V_{water} \times C_{p,water,out} (T_{water,out} - T_{amb}) \quad (3.28)$$

โดยที่ $Q_{water,out}$ คือ ความร้อนน้ำป้อนออกจากอีโคโนไมเซอร์ (kJ)

$\rho_{water,out}$ คือ ความหนาแน่นของน้ำป้อนออกจากอีโคโนไมเซอร์ (kg/l)

V_{water} คือ ปริมาณการใช้น้ำของหม้อไอน้ำ (l)

$C_{p,water,out}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำป้อน (kJ/kg·°C)

$T_{water,out}$ คือ อุณหภูมิของน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ (°C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ของค่าความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้กับอุณหภูมิก๊าซเสีย (Van Wylen, 2003)[15]

| ค่าความร้อนจำเพาะ (kJ/kg-K) |
|--|
| $\bar{c}_{p,O_2} = (0.88 - 0.0001(\frac{T}{1000}) + 0.54(\frac{T}{1000})^2 - 0.33(\frac{T}{1000})^3)$ |
| $\bar{c}_{p,CO_2} = (0.45 + 1.67(\frac{T}{1000}) - 1.27(\frac{T}{1000})^2 + 0.39(\frac{T}{1000})^3)$ |
| $\bar{c}_{p,H_2O} = (1.79 + 0.107(\frac{T}{1000}) + 0.586(\frac{T}{1000})^2 - 0.20(\frac{T}{1000})^3)$ |
| $\bar{c}_{p,N_2} = (1.11 - 0.48(\frac{T}{1000}) + 0.96(\frac{T}{1000})^2 - 0.42(\frac{T}{1000})^3)$ |
| $\bar{c}_{p,SO_2} = (0.37 + 1.05(\frac{T}{1000}) - 0.77(\frac{T}{1000})^2 + 0.21(\frac{T}{1000})^3)$ |

4. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

ความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Q_{other}) เป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้ เช่น ความร้อนสูญเสียจากอากาศภายนอก เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานเพื่อหาค่า ดังสมการ

กรณีหม้อไอน้ำ

$$Q_{other,boiler} = (Q_{fuel} + Q_{feedwater}) - (Q_{surface,boiler} + Q_{flue} + Q_{stream}) \quad (3.29)$$

กรณีอีโคโนไมเซอร์

$$Q_{other,economizer} = (Q_{flue,in} + Q_{water,in}) - (Q_{surface,eco} + Q_{flue,out} + Q_{water,out}) \quad (3.30)$$

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG)

| องค์ประกอบ | ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร |
|-------------|------------------------|
| C_3H_8 | 50 |
| C_4H_{10} | 50 |

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG)

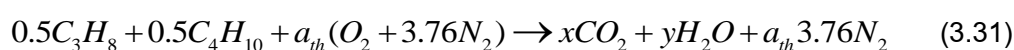
| คุณสมบัติ | แก๊สปิโตรเลียมเหลว | หน่วย |
|-----------------------|--------------------|---------|
| มวลโมเลกุล | 51 | kg/kmol |
| ความถ่วงจำเพาะ | 0.546 | - |
| ความร้อนเชื้อเพลิงสูง | 50.7 | MJ/kg |
| ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ | 46.6 | MJ/kg |

3.5 การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

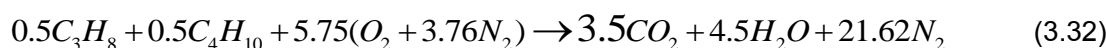
การพิจารณาค่าความร้อนของเชื้อเพลิง การคำนวณโดยทั่วไปจะใช้ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง ซึ่งอ้างอิงที่ 0 °C, 1 atm ณ สถานะดังกล่าวไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ก่อให้เกิดค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นของไอน้ำเป็นของเหลว ความเป็นจริง อุณหภูมิของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิก่อนข้างสูง ทำให้ไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียมีสถานะเป็นก๊าซเช่นเดิม ดังนั้น ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสมในการคำนวณจึงเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ

สมการการเผาไหม้ของแก๊สปิโตรเลียมเหลว

ในทางทฤษฎีสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



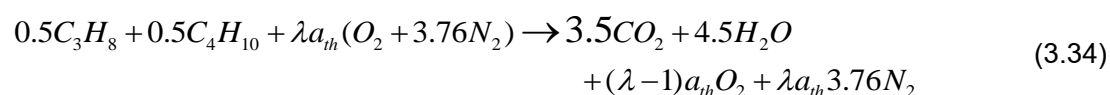
สมดุลสมการ $x = 3.5$, $y = 4.5$, $a_{th} = 5.75$ ดังนั้น สมการการเผาไหม้ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวทางทฤษฎีเป็น



จะได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

$$AF_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{5.75 \times [31.998 + (3.76 \times 28.014)]}{51} = 15.483 \quad (3.33)$$

เนื่องจากสมการ (3.33) เป็นสมการการเผาไหม้ทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงจะสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกิน จะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ของแก๊สปิโตรเลียมเหลวทางปฏิบัติ ได้ดังนี้



เมื่อ λ คือ ปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ $(\lambda - 1)a_{th}O_2$ ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าอากาศส่วนเกินได้จากเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซเสีย (flue gas analyzer) ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปอัตราส่วนร้อยละโดยโมลและ dry basis

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซเสีย จะวัดปริมาณออกซิเจนในลักษณะ dry basis ซึ่งหมายถึง ก๊าซเสียจะถูกดึงเอาไอน้ำและความชื้นออกไปก่อนจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงเป็นปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ ดังสมการ

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{3.5 + 0 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}} \quad (3.35)$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการของ λ จะได้

$$\lambda = \frac{a_{th} + \left[(3.5 - a_{th}) \left(\frac{\%O_2}{100} \right) \right]}{a_{th} - 4.76a_{th} \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.36)$$

โดย $a_{th} = 5.75$ และแทนค่าเข้าไปในสมการ (3.36)

$$\lambda = \frac{5.75 + (3.5 - 5.75) \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{5.75 - (27.37) \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.37)$$

เมื่อหาค่า λ ได้แล้ว เราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ (actual air-fuel ratio) ดังต่อไปนี้

$$AF_{actual} = \lambda AF_{stoic} \quad (3.38)$$

โดยที่ AF_{actual} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ

AF_{stoic} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี

3.6 ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ (Boiler efficiency)

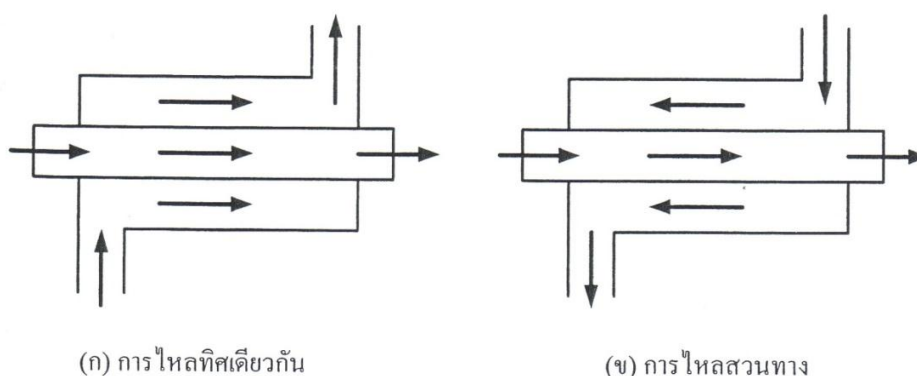
ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างความร้อนของไอน้ำกับความร้อนเข้าทั้งหมดของหม้อไอน้ำ ดังนั้นสามารถเขียนสมการประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{boiler} = \frac{Q_{stream}}{Q_{input}} \times 100\% \quad (3.39)$$

3.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

3.7.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่าย

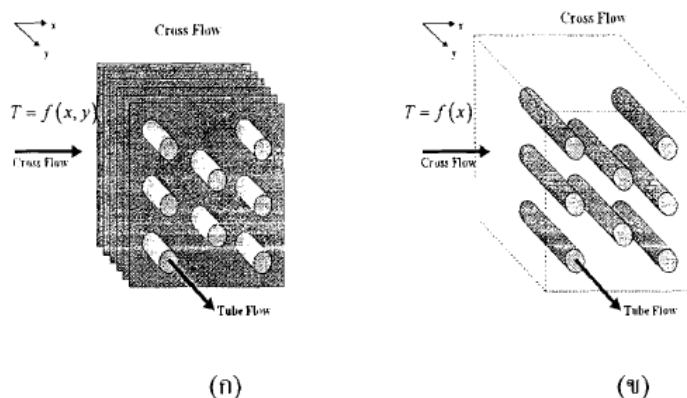
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยทั่วไปจะแบ่งแยกตามการจัดเรียงการไหล และตามชนิดของโครงสร้าง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีโครงสร้างแบบง่ายที่สุดได้แก่แบบท่อคู่ซ้อนร่วมจุดศูนย์กลาง (concentric tube) ของไหลร้อนจะไหลอยู่ภายในท่อในสุดและของไหลเย็นจะไหลในท่อวงแหวน ซึ่งการไหลอาจไหลไปในทิศเดียวกันหรือสวนทางกัน สำหรับการไหลแบบไหลทิศเดียวกัน ทั้งของไหลร้อนและเย็นไหลเข้าที่ปลายด้านเดียวกันในทิศเดียวกัน และไหลออกที่ปลายด้านเดียวกัน ส่วนแบบไหลสวนทาง ของไหลทั้งสองจะไหลเข้าที่ปลายด้านตรงกันข้าม ส่วนทางกัน และไหลออกที่ปลายด้านตรงข้ามกัน



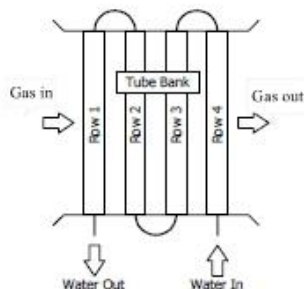
ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่ซ้อนร่วมจุดศูนย์กลาง

3.7.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกัน (cross-flow heat exchanger)

ภาพที่ 3.8 (ก) แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกัน แบบติดครีบริบและของไหลไม่ผสมกัน โดยมีแผ่นครีบริบป้องกันการไหลในทิศทางผสม (ทิศแกน y) เพื่อไม่ให้เกิดการไหลขวางทิศกับการไหลหลัก (ทิศแกน x) ในกรณีนี้อุณหภูมิของของไหลจะเป็นฟังก์ชันกับพิกัด x และ y นั่นคือ $T = f(x, y)$ ส่วนภาพที่ 3.8 (ข) แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกันแบบไม่ติดครีบริบ ของไหลที่ไหลภายนอกท่อจะไหลผสมกัน ส่วนของไหลที่ไหลภายในท่อจะไหลไม่ผสมกัน โดยของไหลในท่อนั้นมีการไหลในทิศทาง y ซึ่งไหลขวางตั้งฉากกับทิศทางการไหลหลักในทิศแกน x ทำให้อุณหภูมิของของไหลนอกกลุ่มท่อเป็นฟังก์ชันกับทิศทางการไหลหลักเท่านั้น $T = f(x)$



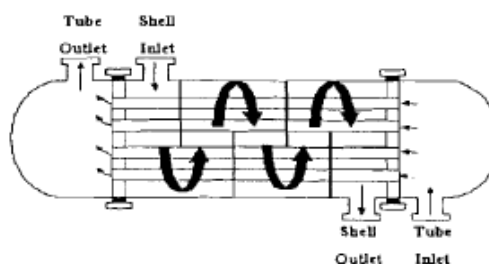
ภาพที่ 3.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกัน (ก) ติดครีบริบและของไหลไม่ผสมกัน
(ข) ไม่ติดครีบริบและของไหลไหลผสมนอกท่อ



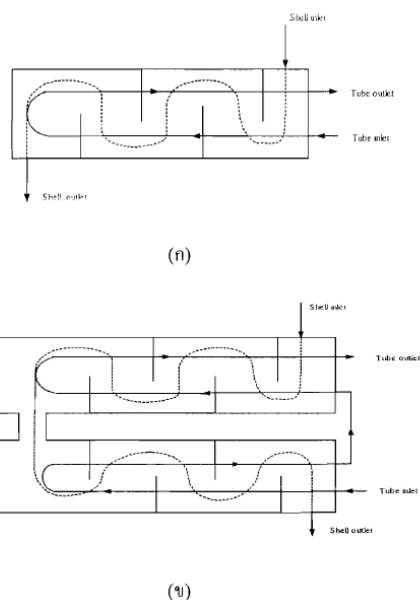
ภาพที่ 3.9 การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและก๊าซเสียของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง

3.7.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell-and-tube heat exchanger)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ มีอยู่หลายแบบด้วยกันโดยขึ้นอยู่กับจำนวนกลับ (pass) ในเปลือกและท่อ ในภาพที่ 3.10 คือ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ ชนิดเปลือกกลับเดียวและท่อกลับเดียว โดยแผ่นกั้นบังค้ำการไหล (baffle) ที่ติดตั้งในเปลือกนั้นจะช่วยทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวภายนอกท่อ



ภาพที่ 3.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกกลับเดียวและท่อกลับเดียว



ภาพที่ 3.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ (ก) เปลือกกลับเดียวและท่อ 2 กลับ (ข) เปลือก 2 กลับและท่อ 4 กลับ

3.8 วิธีการคำนวณและออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีที่นิยมใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน มี 2 วิธี คือ

1. Log-Mean Temperature Difference method (LMTD)
2. Effectiveness-NTU method

พิจารณาวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสองวิธีซึ่งได้แก่ วิธี LMTD และวิธี NTU พบว่าวิธีทั้งสองสามารถใช้หาผลลัพธ์ได้เช่นเดียวกันโดยการใช้วิธี LMTD นั้นเราจำเป็นต้องรู้อุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ทางเข้าและทางออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งอุณหภูมิเหล่านี้นำไปใช้ในการหา Log-Mean Temperature Difference (ΔT_m) ปัญหาที่กำหนดอุณหภูมิดังกล่าวมาให้มีชื่อเรียกว่าปัญหาการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Design Problems) ที่เรียกเช่นนี้เพราะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเลือกชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน รวมทั้งการคำนวณพื้นที่ผิวของเครื่องเพื่อให้ได้มาซึ่งอุณหภูมิและอัตราการไหลตามที่กำหนด ตัวอย่างเช่น เรารู้อัตราการไหลของของไหลเย็นและร้อน (m_c , m_h) อุณหภูมิของของไหลเย็นและร้อนที่เข้าสู่อุปกรณ์ (T_{ci} , T_{hi}) แล้วต้องการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่จะทำให้ได้อุณหภูมิของไหลเย็นออกจากอุปกรณ์ (T_{co}) ที่ต้องการ ในกรณีนี้เราสามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (q) และอุณหภูมิของไหลร้อนที่ออกจากอุปกรณ์ (T_{ho}) จากนั้นก็สามารถคำนวณหา ΔT_m เมื่อได้ค่าเหล่านี้ก็สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (A) ได้สำหรับอีกวิธีหนึ่ง คือ วิธี NTU การคำนวณหา A ทำได้โดยเริ่มจากการคำนวณ ϵ และ C_r จากนั้นก็สามารถใช้กราฟ หรือสมการที่เหมาะสมเพื่อหาค่า NTU ซึ่งสามารถนำไปใช้หา A ได้จากนิยามของ NTU

ปัญหาอีกชนิดหนึ่งเป็นปัญหาที่เรารู้ประเภทและขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วและต้องการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ทางออกเมื่อกำหนดอัตราการไหลและอุณหภูมิของของไหลที่ทางเข้า ปัญหานี้มีชื่อเรียกว่าปัญหาการคำนวณสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Performance Calculation) แม้ว่าปัญหานี้สามารถคำนวณได้โดยใช้วิธี LMTD แต่การคำนวณจะมีความยุ่งยากกว่า คือต้องสมมติค่าจนกว่าจะได้คำตอบที่ถูกต้องโดยใช้กระบวนการทำซ้ำ (Iterative Procedure) ตัวอย่างเช่นเราอาจเดาอุณหภูมิ และหา q และ T_{ho} ได้ จากนั้นก็สามารถคำนวณหาค่า ΔT_m และนำไปใช้ในการหา q ถ้าค่า q ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าเราได้คำตอบต่างๆที่ถูกต้องตามต้องการ แต่ถ้าไม่ใกล้เคียงก็สมมติ T_{co} จนกว่าจะได้ q ที่ใกล้เคียงกัน ปัญหาดังกล่าวจะหมดไปถ้าเราใช้วิธี NTU

ในการศึกษานี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีใช้ในการวิจัยออกแบบอีโคโนไมเซอร์ คือ Effectiveness-NTU method ซึ่งในที่นี้เป็นวิธีที่มีความสามารถในการออกแบบมากกว่า เนื่องจากเราไม่ทราบอุณหภูมิของก๊าซเสียและน้ำป้อนที่ออกจากอุปกรณ์ ซึ่งถ้าใช้วิธี Log-Mean Temperature Difference method (LMTD) การคำนวณจะมีความยุ่งยากเกิดขึ้นเนื่องจากต้องใช้กระบวนการ Iterative Procedure

3.9 การวิเคราะห์ห่ออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธี Effectiveness-NTU Method

แนวความคิดของการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ค่า effectiveness ซึ่งเกี่ยวข้องกับ NTU (number of transfer units) ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย nusselt และปรับปรุงโดย kays and london [10]

อัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถหาจากสมดุลพลังงานของของไหลร้อนหรือของไหลเย็นดังนั้นจะได้

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,out} - T_{c,in}) = C_h(T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (3.40)$$

จากผลลัพธ์ข้างต้นสามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{Q}_{\max} = C_{\min}(T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (3.41)$$

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (3.42)$$

แทนค่าลงในสมการ จะได้

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (3.43)$$

หรือ

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,out} - T_{c,in})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (3.44)$$

โดยที่ \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริง (W)

\dot{Q}_{\max} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ (W)

C_c, C_h คือ อัตราความจุความร้อนของของไหลเย็นและของไหลร้อน (kW/°C)

$T_{c,in}, T_{c,out}$ คือ อุณหภูมิของไหลเย็นเข้าและออก ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{h,in}, T_{h,out}$ คือ อุณหภูมิของไหลร้อนเข้าและออก ($^{\circ}\text{C}$)

C_{\min} คือ ค่าน้อยที่สุดระหว่าง C_c และ C_h

ε คือ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริงได้จาก

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{\max} = \varepsilon C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (3.45)$$

และสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่ว่าแบบใด สามารถพิสูจน์ได้ว่า

$$\varepsilon = f\left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad (3.46)$$

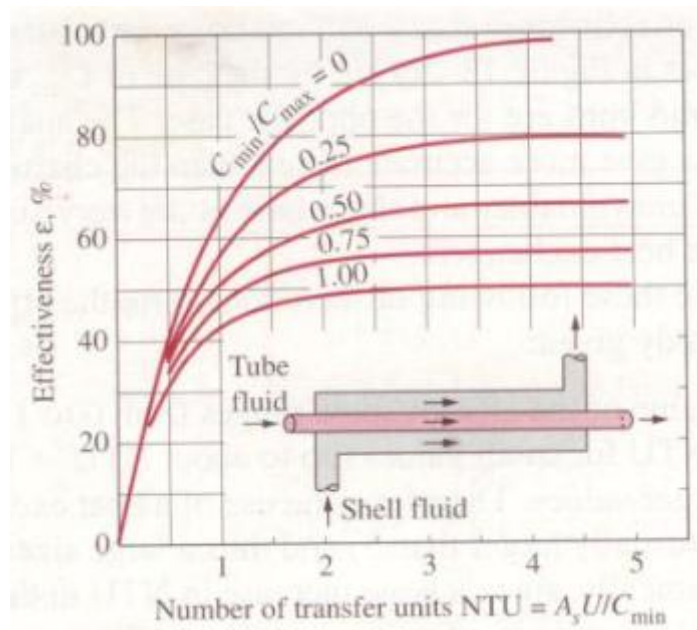
โดย $\frac{C_{\min}}{C_{\max}}$ มีค่าเป็น $\frac{C_c}{C_h}$ และ $\frac{C_h}{C_c}$ ขึ้นอยู่กับค่าของ C_c และ C_h และสามารถนิยามได้ว่า

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{\min}} = \frac{UA_s}{\left(\dot{m}C_p\right)_{\min}} \quad (3.47)$$

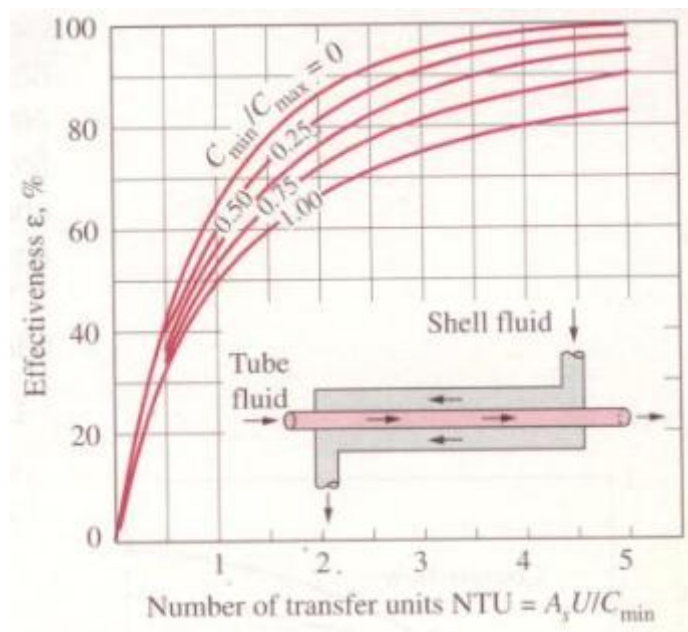
โดยที่ NTU คือ ตัวเลขหน่วยการถ่ายเท (Number of transfer unit)

A_s คือ พื้นที่ผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, m^2

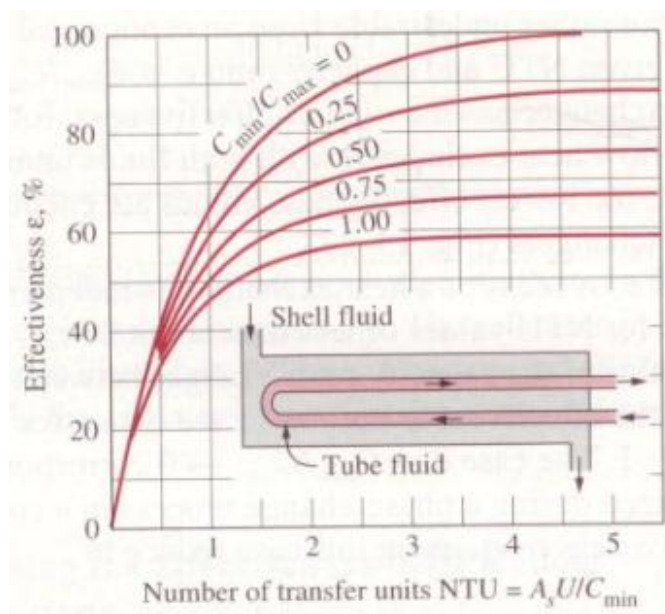
โดยสามารถนำมาพล็อตได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 3.12 ถึง 3.17 และสามารถแสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ



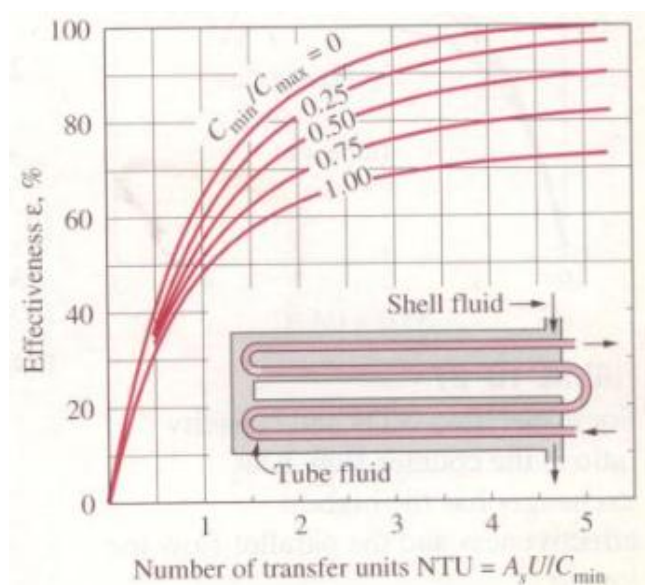
ภาพที่ 3.12 ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกัน
(Parallel-flow)[10]



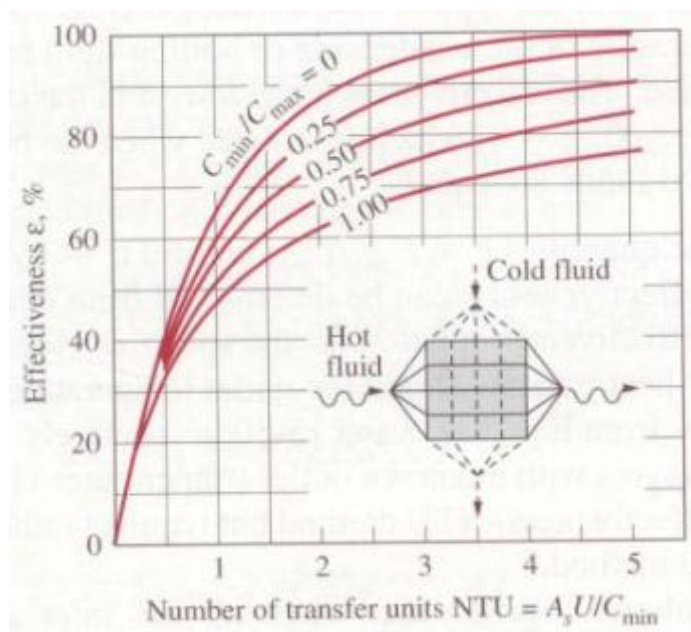
ภาพที่ 3.13 ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกัน
(Counter-flow)[10]



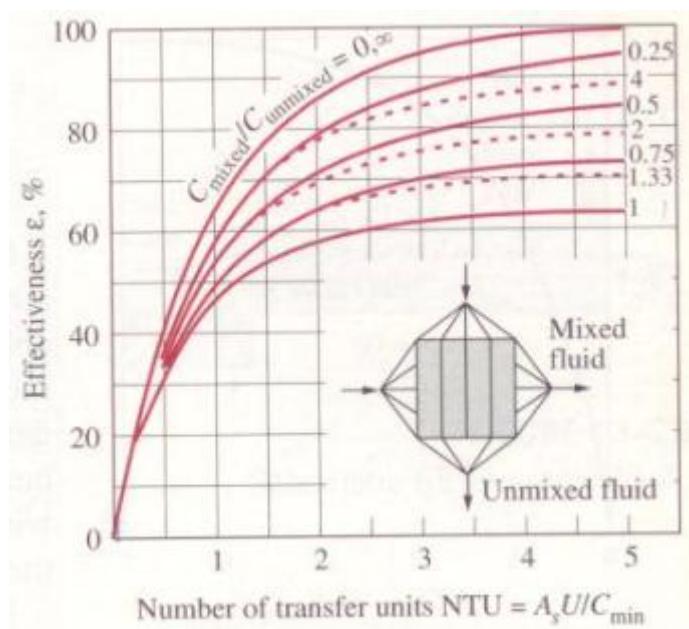
ภาพที่ 3.14 ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube โดยของไหลชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในเปลือกหนึ่งครั้ง และของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในท่อสองครั้งหรือเท่ากับผลคูณของสองกับเลขจำนวนเต็ม (One-shell pass and 2,4,6,... tube passes)[10]



ภาพที่ 3.15 ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube โดยของไหลชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในเปลือกสองครั้ง และของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลผ่านภายในท่อสี่ครั้งหรือเท่ากับผลคูณของสี่กับเลขจำนวนเต็ม (Two-shell passes and 4,8,12,... tube passes) [10]



ภาพที่ 3.16 ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลตั้งฉากกัน ซึ่งของไหลทั้งสองชนิดไม่ผสมกัน (Cross-flow with both fluids unmixed) [10]



ภาพที่ 3.17 ค่า effectiveness ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลตั้งฉากกัน ซึ่งของไหลชนิดหนึ่งผสมกัน ส่วนอีกชนิดหนึ่งไม่ผสมผสานกัน (Cross-flow with one fluid mixed and the other unmixed)[10]

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของ effectiveness สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยที่ $NTU = UA_s / C_{\min}$ และ $c = C_{\min} / C_{\max}$ [10]

| Heat exchanger type | Effectiveness relation |
|---|---|
| Double pipe: | |
| Parallel Flow | $\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+c)]}{1+c}$ |
| Counter Flow | $\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - c \exp[-NTU(1-c)]}$ |
| Shell and Tube One Shell Pass (2,4,...Tube Passes) | $\varepsilon = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1+c^2} \times \frac{1 + \exp\left[-\frac{NTU\sqrt{1+c^2}}{1+c}\right]}{1 - \exp\left[-\frac{NTU\sqrt{1+c^2}}{1+c}\right]} \right\}^{-1}$ |
| Cross Flow (Single Pass) Both Fluids Unmixed | $\varepsilon = 1 - \exp\left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} \left[\exp(-cNTU^{0.78}) - 1 \right] \right\}$ |
| C_{\max} mixed, C_{\min} unmixed | $\varepsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp\{1 - c[1 - \exp(-NTU)]\})$ |
| C_{\min} mixed, C_{\max} unmixed | $\varepsilon = 1 - \exp\left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-cNTU)] \right\}$ |
| All heat exchangers with $c = 0$ | $\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$ |

เมื่อทราบอัตราการไหล ความร้อนจำเพาะ และอุณหภูมิที่บริเวณทางเข้าและทางออกของก๊าซเสีย สามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ จากนั้นกำหนดทิศทางการไหลของอากาศและก๊าซเสีย จำนวนเที่ยวการไหล แล้วทำการคำนวณหาค่า Number of Transfer Unit (NTU) โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่า NTU , C และ ε ในแต่ละชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและลักษณะการไหลของของไหล ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของค่า NTU ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [12]

โดยที่ $NTU = UA_s / C_{\min}$ และ $c = C_{\min} / C_{\max}$

| Flow Arrangement | Relation |
|--------------------------------------|---|
| Parallel Flow | $NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + c)]}{1 + c}$ |
| Counter Flow | $NTU = \frac{1}{c - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon c - 1}\right)$ |
| Cross Flow (Single Pass) | |
| C_{\max} mixed, C_{\min} unmixed | $NTU = -\ln\left[1 + \frac{\ln(1 - \varepsilon c)}{c}\right]$ |
| C_{\min} mixed, C_{\max} unmixed | $NTU = -\frac{\ln[c \ln(1 - \varepsilon) + 1]}{c}$ |
| Cross flow (Two pass) | |
| Parallel Cross Flow (2 Pass) | $\varepsilon = 1 - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) + \nu^2 \left[1 + \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) \right] \right\}$ |
| Counter Cross Flow (2 Pass) | $\varepsilon = 1 - \frac{2}{\left\{ 1 - \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) + \left[1 + \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) \right] / \nu^2 \right\}}$ |
| | $\nu = \exp\left[\frac{1 - \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right)}{-C_r}\right]$ |
| All heat exchangers with $c = 0$ | $NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$ |

โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่จะทำการออกแบบจะพิจารณาเป็นแบบ Cross flow ดังนั้นสมการที่เลือกใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากตารางที่ 3.5 เมื่อทราบค่า ε และ C จะสามารถหาค่า NTU เพื่อนำไปใช้ในการหาขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.9.1 พื้นที่ถ่ายเทความร้อน

ในการกำหนดพื้นที่ถ่ายเทความร้อนจะทำให้โดยอ้างอิงประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและลักษณะการไหลของของไหล คุณสมบัติของของไหลในท่อและของไหลที่ไหลผ่านภายนอกท่อ โดยสมมติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) ที่เหมาะสมขึ้น จากนั้นจึงทำการคำนวณพื้นที่การถ่ายเทความร้อนที่ต้องใช้จากอัตราแลกเปลี่ยนความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่สมมติไว้ เมื่อได้ค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อนสามารถที่จะหาจำนวนท่อถ่ายเทความร้อนได้ โดยกำหนดความยาวของท่อถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ที่มีอยู่ในการติดตั้งขึ้นและทำการเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยอ้างอิงจากตารางต่อมาตราฐาน จากนั้นกำหนดรูปแบบการจัดวางท่อและระยะห่างระหว่างท่อ เพื่อให้ได้จำนวนท่อในแต่ละแถวและจำนวนแถวที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนความร้อน ค่าพื้นที่ถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากการสมมติค่า U โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$NTU = \frac{UA_y}{C_{\min}} \quad (3.48)$$

จากสมการ (3.48) สามารถหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด (A) ได้และเมื่อทราบพื้นที่การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด จะสามารถหาจำนวนท่อที่ต้องใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยกำหนดความยาวของท่อ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$A_o = n\pi D_o L \quad (3.49)$$

จะได้จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมกับชนิดการถ่ายเทความร้อนภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (n) คือ

$$n = \frac{A_o}{D_o \pi L} \quad (3.50)$$

3.9.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)

ขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสมมติไว้ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของค่า U ที่สมมติไว้กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่หาได้ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมผ่านฟิล์มภายในท่อ และนอกท่อจากขนาดท่อที่หาได้ สามารถออกแบบการจัดวางท่อ ระยะห่างระหว่างท่อ และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความสกปรก (Fouling Factor) ที่เหมาะสมขึ้น ทำการตรวจสอบขนาดของท่อที่เลือกไว้ว่าถูกต้องหรือไม่ โดยหาค่า U ว่าใกล้เคียงกับค่าที่สมมติขึ้นในตอนแรกหรือไม่ โดยพิจารณาจากความต้านทานความร้อนรวมที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน R_{tot} ซึ่งแสดงไว้ในสมการ (3.51) โดยประกอบด้วยความต้านทานต่างๆดังนี้

R_{tot} = (ความต้านทานความร้อนที่ผิวท่อด้านใน) + (ความต้านทานของคราบ fouling ที่พื้นผิวภายในของท่อ) + (ความต้านทานความร้อนของตัวท่อ) + (ความต้านทานของคราบ fouling ที่พื้นผิวภายนอกของท่อ) + (ความต้านทานความร้อนที่ผิวท่อด้านนอก)

$$R_{tot} = R_{hi} + R_{fi} + R_k + R_{fo} + R_{ho} \quad (3.51)$$

โดยที่ R_{hi} คือ ความต้านทานของชั้นฟิล์มบนพื้นผิวภายในท่อ, $R_{hi} = \frac{1}{h_i A_i}$

R_{fi} คือ ความต้านทานของคราบ Fouling ที่พื้นผิวภายในท่อ, $R_{fi} = \frac{R_{f,i}}{A_i}$

R_k คือ ความต้านทานของผนังท่อ, $R_k = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL}$

R_{fo} คือ ความต้านทานของคราบ Fouling ที่พื้นผิวภายนอกท่อ, $R_{fo} = \frac{R_{f,o}}{A_o}$

R_{ho} คือ ความต้านทานของชั้นฟิล์มบนพื้นผิวภายนอกท่อ, $R_{ho} = \frac{1}{h_o A_o}$

จะได้
$$R_{tot} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (3.52)$$

โดยที่ A_o, A_i คือ พื้นที่ผิวภายนอกท่อและภายในท่อ (m^2)

h_o, h_i คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวภายนอกและภายในท่อ ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

L คือ ความยาวท่อ (m)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของท่อ ($W/m \cdot ^\circ C$)

$R_{f,o}, R_{f,i}$ คือ แฟคเตอร์ที่กระทำที่ผิวภายนอกท่อและภายในท่อ ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)

R_{tot} คือ ความต้านทานความร้อนรวมจากของไหลภายในถึงของไหลภายนอกท่อ ($^\circ C/W$)

D_o, D_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน (mm)

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient, U_o) สามารถหาได้จาก

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{R_{f,i} D_o}{D_i} + \frac{D_o \ln(D_o / D_i)}{2k} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o}} \quad (3.53)$$

ตารางที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม [11]

| Type of heat exchanger | U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) |
|---|--------------------------------|
| Water-to-water | 850-1700 |
| Water-to-oil | 100-350 |
| Water-to-gasoline or kerosene | 300-1000 |
| Feed water heaters | 1000-8500 |
| Steam-to-light fuel oil | 200-400 |
| Steam-to-heavy fuel oil | 50-200 |
| Steam condenser | 1000-6000 |
| Freon condenser (water cooled) | 300-1000 |
| Ammonia condenser (water cooled) | 800-1400 |
| Alcohol condensers (water cooled) | 250-700 |
| Gas-to-gas | 10-40 |
| Water-to-air in finned tubes (water in tubes) | 30-60, 400-850 |
| Steam-to-air in finned tubes (steam in tubes) | 30-300, 400-4000 |

ตารางที่ 3.7 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆ [11]

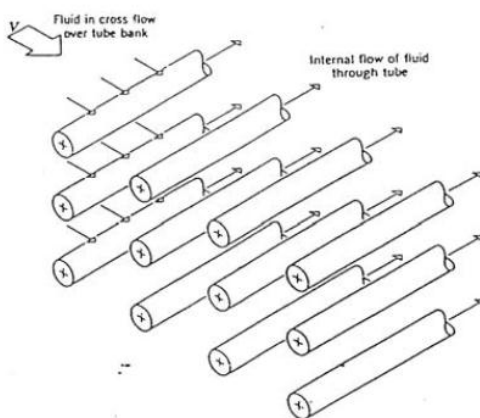
| Material | k (W/m-°C) |
|----------------------|------------|
| Diamond | 2300 |
| Silver | 429 |
| Copper | 401 |
| Gold | 317 |
| Aluminum | 237 |
| Iron | 80.2 |
| Mercury (l) | 8.54 |
| Glass | 0.78 |
| Brick | 0.72 |
| Water (l) | 0.613 |
| Human skin | 0.37 |
| Wood (oak) | 0.17 |
| Helium (g) | 0.152 |
| Soft rubber | 0.13 |
| Glass fiber | 0.043 |
| Air (g) | 0.026 |
| Urethane, rigid foam | 0.026 |

ตารางที่ 3.8 ค่า Fouling Factor ของของไหลชนิดต่างๆ [11]

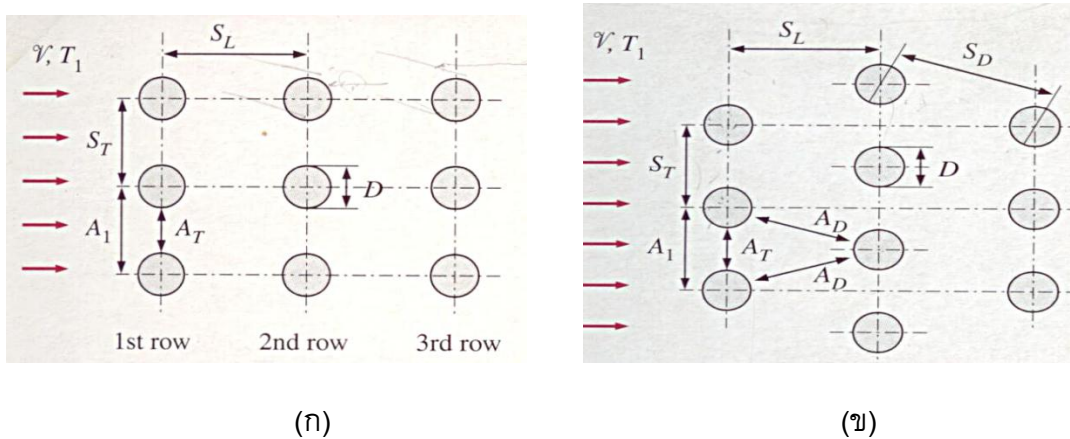
| Type of Fluid | Fouling factor (m ² - °C/W) |
|--|--|
| Distilled water, sea, water, river water, Boiler feed water: | |
| Below 50 °C | 0.0001 |
| Above 50 °C | 0.0002 |
| Fuel oil | 0.0009 |
| Steam (oil-free) | 0.0001 |
| Refrigerants (liquid) | 0.0002 |
| Refrigerants (vapor) | 0.0004 |
| Alcohol vapors | 0.0001 |
| Air | 0.0004 |

3.9.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลผ่านกลุ่มท่อ

ลักษณะการไหลผ่านท่อ โดยที่ของไหลชนิดหนึ่งไหลภายในท่อในขณะที่อีกชนิดหนึ่งอุณหภูมิต่างกันไหลในทางขวางไหลตัดภายนอกท่อ การจัดเรียงแถวท่อทำได้ 2 แบบ คือแบบวางในแนวเดียวกัน (aligned) และแบบวางสลับหรือเยื้องกัน (staggered) ภาพรูปที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 การไหลของของไหลผ่านกลุ่มท่อในลักษณะไหลขวางกัน (cross flow) [11]



ภาพที่ 3.19 การจัดท่อหลายชั้น ก) แนวเดียวกัน (aligned) ข) แนวเยื้องกัน (staggered) [11]

ค่า h สำหรับการไหลผ่านกลุ่มท่อ จะคำนวณตามตำแหน่งที่วางท่อ ค่า h สำหรับท่อแถวแรกสามารถประมาณว่าเท่ากับการไหลผ่านท่อเดี่ยว ส่วนค่า h สำหรับท่อแถวที่ 2 และ 3 จะมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นที่ท่อแถวหลังจากนี้ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นจนถึงท่อแถวที่ 4 และ 5 ซึ่งท่อหลังจากนี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อย ดังนั้นโดยทั่วไปเรามักสนใจค่าเฉลี่ย \bar{h} สำหรับท่อทั้งระบบมากกว่า

สำหรับอากาศไหลผ่านชั้นท่อที่มีแถว 10 ชั้น หรือมากกว่าขึ้นไป ($N_L \geq 10$)
 Grimison [11] ได้ให้สมการ Correlation อยู่ในรูปของ

$$\overline{Nu}_D = C_1 Re_{D,\max}^m \quad ; \quad \left[\begin{array}{l} N_L \geq 10 \\ 2000 < Re_{D,\max} < 40,000 \\ Pr = 0.7 \end{array} \right] \quad (3.54)$$

โดยที่ C_1 และ m หาได้จากตารางที่ 3.9

สำหรับของไหลอื่นๆ ให้คูณด้วยแฟคเตอร์ $1.13 Pr^{1/3}$ ซึ่งจะได้สมการ
 ความสัมพันธ์เป็น

$$\overline{Nu}_D = 1.13 C_1 Re_{D,\max}^m Pr^{1/3} \quad ; \quad \left[\begin{array}{l} N_L \geq 10 \\ 2000 < Re_{D,\max} < 40,000 \\ Pr = 0.7 \end{array} \right] \quad (3.55)$$

โดยคุณสมบัติต่างๆ หาที่อุณหภูมิมวล T_f ถ้า $N_L < 10$ ให้ใช้ตัวประกอบ
 แก้ไข, C_2 ดังนี้

$$\overline{Nu}_D|_{(N_L < 10)} = C_2 \overline{Nu}_D|_{(N_L \geq 10)} \quad (3.56)$$

ซึ่งค่า C_2 หาได้จากตารางที่ 3.10

$$Re_{D,\max} = \frac{\rho V_{\max} D}{\mu} \quad (3.57)$$

โดยที่ \overline{Nu}_D คือ ตัวเลขนัสเซิล (Nusselt Number)

$Re_{D,\max}$ คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลด้านนอกท่อ (Reynolds Number)

Pr คือ ตัวเลขพรานเติล (Prandtl Number)

N_L คือ จำนวนท่อต่อแถว

N_T คือ จำนวนแถวของท่อ

μ คือ ความหนืดของของไหลด้านนอกท่อ (kg/m-s)

V_{\max} คือ ความเร็วสูงสุดที่ไหลผ่านท่อ (m/s)

สำหรับการจัดวางท่อในแนวเดียวกัน (aligned arrangement) V_{\max} เกิดที่ ระบายขวาง A_1 ของภาพที่ 3.19 (ก) และมีค่า

$$V_{\max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (3.58)$$

สำหรับการจัดวางแบบเยื้องกัน (staggered) ค่า V_{\max} อาจเกิดที่ระบายขวาง A_1 เหมือนแบบวางแนวเดียวกันก็ได้ หรืออาจเกิดที่ระบายทแยง A_2 ตามภาพที่ 3.19 (ข) ก็ได้ และ V_{\max} เกิดที่ A_2 เมื่อช่องว่างระหว่างแถวเป็นไปตามเงื่อนไข

$$2(S_D - D) < (S_T - D) \quad (3.59)$$

โดยเลข 2 ที่เป็นตัวคูณนั้นเป็นผลมาจากการที่ของไหลแยกออกเป็นสองทางในการไหลจากหน้าตัด A_1 ไปยัง A_2 ดังนั้นความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นที่ A_2 เมื่อ

$$S_D = \left[S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{1/2} < \frac{S_T + D}{2} \quad (3.60)$$

ซึ่งในกรณีนี้

$$V_{\max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad (3.61)$$

โดยที่

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกท่อ (m)

S_T คือ ระยะในแนวตั้งระหว่างจุดศูนย์กลางของท่อ 2 ท่อ (m)

S_L คือ ระยะในแนวนอนระหว่างจุดศูนย์กลางท่อ 2 ท่อ (m)

S_D คือ ระยะในแนวทแยง (m)

V คือ ความเร็วที่ไหลผ่านท่อ (m/s)

แต่ถ้า V_{\max} เกิดที่ A_1 สำหรับการจัดวางแบบทแยงนี้ สามารถคำนวณ V_{\max} ได้จากสมการที่ 3.58

ตารางที่ 3.9 ค่าคงที่สำหรับการไหลผ่านชั้นท่อตั้งแต่ 10 แถวหรือมากกว่า [11]

| S_L / D | S_T / D | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | 1.25 | | 1.5 | | 2.0 | | 3.0 | |
| | C_1 | m | C_1 | m | C_1 | m | C_1 | m |
| Aligned | | | | | | | | |
| 1.25 | 0.348 | 0.592 | 0.275 | 0.608 | 0.100 | 0.704 | 0.0633 | 0.752 |
| 1.50 | 0.367 | 0.586 | 0.250 | 0.620 | 0.101 | 0.702 | 0.0678 | 0.744 |
| 2.00 | 0.418 | 0.570 | 0.299 | 0.602 | 0.229 | 0.632 | 0.198 | 0.648 |
| 3.00 | 0.290 | 0.601 | 0.357 | 0.584 | 0.374 | 0.581 | 0.286 | 0.608 |
| Staggered | | | | | | | | |
| 0.600 | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0.213 | 0.636 |
| 0.900 | --- | --- | --- | --- | 0.446 | 0.571 | 0.401 | 0.581 |
| 1.000 | --- | --- | 0.497 | 0.558 | --- | --- | --- | --- |
| 1.125 | --- | --- | --- | --- | 0.478 | 0.565 | 0.518 | 0.560 |
| 1.250 | 0.518 | 0.556 | 0.505 | 0.554 | 0.519 | 0.556 | 0.522 | 0.562 |
| 1.500 | 0.451 | 0.568 | 0.460 | 0.562 | 0.452 | 0.568 | 0.488 | 0.568 |
| 2.000 | 0.404 | 0.572 | 0.416 | 0.568 | 0.482 | 0.556 | 0.449 | 0.570 |
| 3.000 | 0.310 | 0.592 | 0.356 | 0.580 | 0.440 | 0.562 | 0.428 | 0.574 |

ตารางที่ 3.10 ค่าตัวประกอบแก้ไข C_2 สำหรับการไหลผ่านชั้นท่อน้อยกว่า 10 แถว [11]

| N_L | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Aligned | 0.64 | 0.80 | 0.87 | 0.90 | 0.92 | 0.94 | 0.96 | 0.98 | 0.99 |
| Staggered | 0.68 | 0.75 | 0.83 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.97 | 0.98 | 0.99 |

ต่อมา zhukauskas [11] ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ เป็น

$$\overline{Nu}_D = C Re_{D,\max}^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^n ; \quad \left[\begin{array}{l} NL \geq 20 \\ 0.7 < Pr < 500 \\ 1000 < Re_{D,\max}^m < 2 \times 10^6 \end{array} \right] \quad (3.62)$$

เมื่อ $n=0$ สำหรับก๊าซ

$n=1/4$ สำหรับของเหลว

โดยที่ค่าคุณสมบัติทั้งหมด (ยกเว้น Pr_s) คัดที่ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทางเข้าและออก ส่วนค่าคงที่ C และ m กำหนดไว้ในตารางที่ 3.11 และเมื่อ $N_L < 20$ จำเป็นต้องใช้ตัวประกอบแก้ไข (correction factor) เข้าช่วย ซึ่ง C_2 หาได้จากตารางที่ 3.12

$$\overline{Nu}_D|_{(N_L < 20)} = C_2 \overline{Nu}_D|_{(N_L \geq 20)} \quad (3.63)$$

ตารางที่ 3.11 ค่าคงที่สำหรับการไหลผ่านท่อหลายชั้น [11]

| Configuration | $Re_{D,\max}$ | C | m |
|------------------------------------|---------------------------------|--|------|
| Aligned | $10-10^2$ | 0.80 | 0.40 |
| Staggered | $10-10^2$ | 0.90 | 0.40 |
| Aligned | 10^2-10^3 | Approximate as a single (isolated) cylinder | |
| Staggered | 10^2-10^3 | | |
| Aligned | $10^3-2 \times 10^5$ | 0.27 | 0.63 |
| $(S_T / S_L > 0.7)^*$ Staggered | $10^3-2 \times 10^5$ | $0.35(S_T / S_L)^{1/5}$ | 0.60 |
| | | | |
| $(S_T / S_L < 2)$ Staggered | $10^3-2 \times 10^5$ | 0.40 | 0.60 |
| | | | |
| $(S_T / S_L < 2)$ Aligned | $2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$ | 0.021 | 0.84 |
| | | | |
| Staggered | $2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$ | 0.022 | 0.84 |

สำหรับ $S_T / S_L < 0.7$ การถ่ายเทความร้อนไม่เพียงพอจึงไม่ควรใช้ท่อแบบ aligned

ตารางที่ 3.12 ค่าตัวประกอบแก้ไข C_2 สำหรับการไหลผ่านชั้นท่อน้อยกว่า 20 แถว [11]

| N_L | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Aligned | 0.70 | 0.80 | 0.86 | 0.90 | 0.92 | 0.95 | 0.97 | 0.98 | 0.99 |
| Staggered | 0.64 | 0.76 | 0.84 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.97 | 0.98 | 0.99 |

จากสมการตั้งที่ได้กล่าวมา สามารถหาค่า \overline{Nu}_D ได้และเมื่อทราบ \overline{Nu}_D แล้วก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ h_o ได้จากความสัมพันธ์

$$\overline{Nu}_D = \frac{hD}{k} \quad (3.64)$$

เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ สามารถหาได้ดังนี้

$$h_o = \frac{\overline{Nu}_D k}{D_o} \quad (3.65)$$

โดยที่ h_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ (W/m^2-K)

k คือ ค่าการนำความร้อน ($W/m-K$)

D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกท่อ (m)

3.9.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลในท่อ, h_i

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของการไหลในท่อ วิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปคือหาจาก ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในรูปของตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า ตัวเลขนัสเซลท์ (nusselt number) ซึ่งสมการดังกล่าวได้มาจากการทดลอง สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของการไหลในท่อ (h_i) นั้นสามารถหาได้จากค่า Nu_D ดังนี้

สำหรับท่อผิวเรียบ (smooth circular tube)

สมการของ Dittus-Boelter [11] ใช้ในกรณีที่ผลต่างของอุณหภูมิ ($T_s - T_m$) มีค่าน้อยและคุณสมบัติของของไหลพิจารณาที่อุณหภูมิ T_m

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad ; \quad \left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10,000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right] \quad (3.66)$$

โดยที่ $n = 0.4$ สำหรับการทำให้ร้อน ($T_s > T_m$)

$n = 0.3$ สำหรับการทำให้เย็น ($T_s < T_m$)

สมการของ sieder and tate [11] ใช้ในกรณีที่ผลต่างของอุณหภูมิ ($T_s - T_m$) มีค่ามาก ๆ

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} ; \left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 16,700 \\ Re_D \geq 10,000 \\ \frac{L}{D} \geq 10 \end{array} \right] \quad (3.67)$$

คุณสมบัติต่างๆ ยกเว้นค่า μ_s หาที่ T_m โดยที่ μ_s คัดที่ T_s

โดยที่ T_s คือ อุณหภูมิของผิวท่อ ($^{\circ}\text{C}$)

T_m คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิทางเข้าและออกในท่อ ($^{\circ}\text{C}$)

สมการทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นนี้ใช้ได้ดีทั้งในกรณีที่ทราบค่า surface temperature (T_s คงที่) หรือ heat flux (q'' คงที่) แต่ข้อเสียคือจะเกิดความคลาดเคลื่อนประมาณ 25 % ถ้าท่อมีความขรุขระ

สมการของ petukhov [11]

$$Nu_D = \frac{(f/8) Re_D Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} ; \left[\begin{array}{l} 0.5 < Pr < 2000 \\ 10^4 < Re_D \leq 5 \times 10^6 \end{array} \right] \quad (3.68)$$

สมการของ gnielinski [11] จะใช้แทนสมการของ petukhov เมื่อค่า Re_D น้อย

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000) Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} ; \left[\begin{array}{l} 0.5 < Pr < 2000 \\ 3000 < Re_D \leq 5 \times 10^6 \end{array} \right] \quad (3.69)$$

ทั้งสมการของ petukhov และ gnielinski ค่า friction factor หาได้จากกราฟ moody diagram หรือ $f = (0.790 \ln Re_D - 1.64)^{-2}$ เมื่อ $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$ สำหรับท่อผิวเรียบสมการที่กล่าวมาข้างต้นนี้ใช้ได้ดีทั้งในกรณีที่ทราบค่า surface temperature (T_s คงที่) หรือ heat flux (q'' คงที่) และคุณสมบัติของของไหล พิจารณาที่อุณหภูมิ T_m

สมการของ Gnielinski [11] ใช้เมื่อการไหลอยู่ในช่วง Transition Region

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}, \left[\begin{array}{l} 0.5 < Pr < 2000 \\ 2300 < Re_D \leq 10^4 \end{array} \right] \quad (3.70)$$

เมื่อ $f = (1.58 \ln Re_D - 3.28)^{-2}$

โดยที่ $Re_D = \frac{\rho V_{\max} D}{\mu}$

เพราะฉะนั้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ หาได้จาก

$$h_i = \frac{Nu_D k}{D_i} \quad (3.71)$$

โดยที่ h_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ ($W/m^2 \cdot K$)

f คือ ตัวประกอบความเสียดทาน หาได้จาก moody diagram (ภาพที่ 3.22)

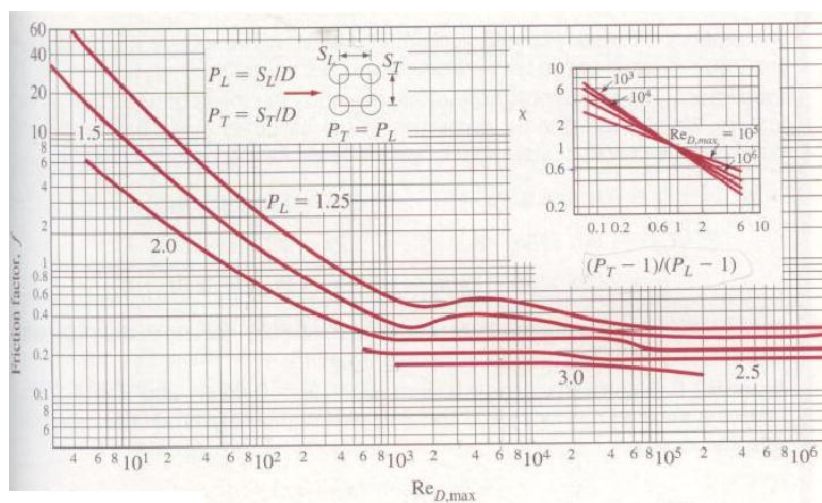
3.9.5 ความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่านกลุ่มท่อ, ΔP_o

การไหลภายนอก (external flow) เป็นการไหลที่ boundary layer ที่เกิดขึ้น จะเป็นอิสระจากผิวอื่นๆ คือสามารถเพิ่มความหนาชั้นในทิศทางของการไหล โดยไม่ได้รับผลกระทบจากพื้นผิวอื่นเหมือนกับการไหลภายใน (internal flow) ดังนั้นในการไหลชนิดนี้จะต้องมียานการไหลนอก boundary layer ซึ่งความเร็ว และอุณหภูมิของไหลเป็นค่าคงที่

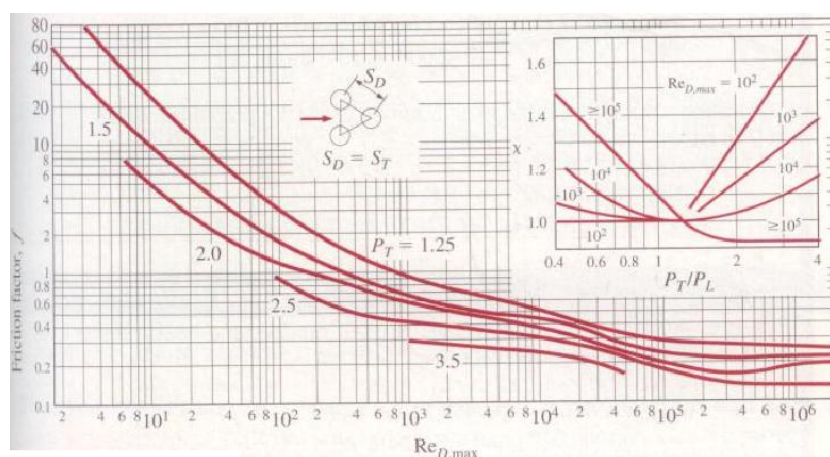
การไหลของของไหลผ่านกลุ่มท่อนั้นจำเป็นต้องพิจารณาค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากจะต้องใช้พลังงานในการขับให้ของไหลเคลื่อนที่ไปได้ ถ้าความดันสูญเสียของการไหลผ่านกลุ่มท่อมีค่ามาก ก็จะทำให้เสียพลังงานในการขับของไหลมาก ค่าความดันสูญเสียของการไหลผ่านกลุ่มท่อ สามารถหาได้ดังนี้

$$\Delta P_o = N_L x \left(\frac{\rho V_{\max, o}^2}{2} \right) f_o \quad (3.72)$$

- โดยที่ ΔP_o คือ ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่านกลุ่มท่อ (Pa)
- N_L คือ จำนวนแถวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนตามแนวยาว (longitudinal)
- $V_{\max,o}$ คือ ความเร็วสูงสุดที่ไหลผ่านหน้าตัดของท่อภายนอก (m/s)
- x คือ ตัวคูณแก้ไข (correction factor) หาได้จากกราฟ (ภาพที่ 3.20 – 3.21)
- f_o คือ ตัวประกอบความเสียดทาน หาได้จากกราฟ (ภาพที่ 3.20 – 3.21)



ภาพที่ 3.20 กราฟตัวประกอบความเสียดทาน และค่าปรับแก้ไขสำหรับกลุ่มท่อ
ที่จัดเรียงแบบแนวเดียวกัน[11]



ภาพที่ 3.21 กราฟตัวประกอบความเสียดทาน และปรับแก้ไขสำหรับกลุ่มท่อที่
จัดเรียงแบบเยื้องกัน [11]

3.9.6 ความดันสูญเสียของการไหลในท่อ, ΔP_i

การไหลภายใน เช่น การไหลภายในท่อ หรือช่องทางเปิด จะแตกต่างกับการไหลภายนอก คือ ของไหลจะถูกจำกัดด้วยพื้นผิวโดยผนัง ดังนั้น boundary layer ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้จะไม่สามารถเพิ่มความหนาขึ้นโดยไม่มีขีดจำกัดได้ และที่ระยะหนึ่ง boundary layer จะมาบรรจบกัน

สูตรการหาค่าความดันสูญเสีย (pressure drop) ในท่อ ดังนี้ [8]

$$\Delta P_i = 2f_i \rho V_{\max}^2 L \frac{N}{D_i} \quad (3.73)$$

โดยที่ ΔP_i คือ ความดันสูญเสียของการไหลภายในท่อ (Pa)

f_i คือ ตัวประกอบความเสียดทานซึ่งหาได้จาก moody chart (ภาพที่ 3.22)

V_{\max} คือ ความเร็วของของไหลผ่านท่อด้านใน (m/s)

L คือ ความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (m)

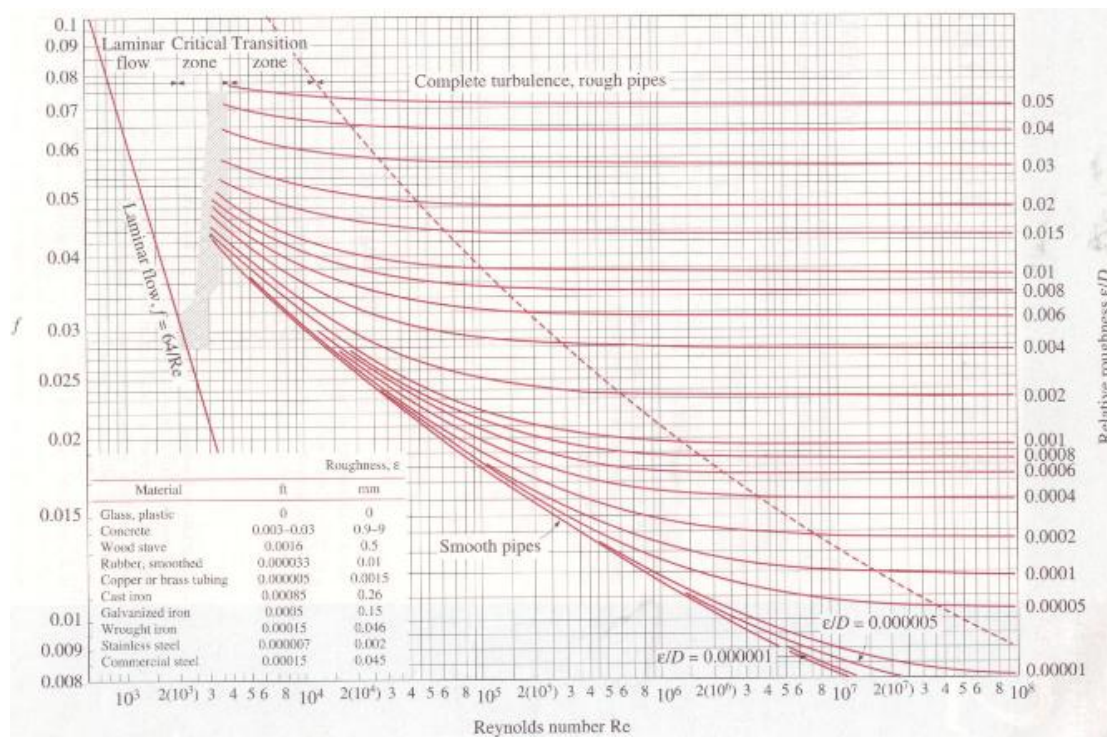
N คือ จำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในท่อ

D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ (m)

โดย f_i จะขึ้นอยู่กับค่าความขรุขระของผนังท่อ (roughness, e) เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ และค่า reynolds number

$$f = \frac{64\mu}{\rho DV} = \frac{64}{Re} \quad (3.74)$$

ผลกระทบเนื่องมาจากความขรุขระของผนังท่อนี้จะมีผลกระทบน้อยเมื่อการไหลเป็นแบบ laminar แต่สำหรับการไหลแบบ turbulent แล้วความขรุขระของผนังท่อจะมีผลอย่างมาก ซึ่งค่าความขรุขระของท่อ (e) แสดงไว้ในตารางที่ 3.13



ภาพที่ 3.22 moody chart แสดงตัวประกอบความเสียดทานภายในท่อ [13]

ตารางที่ 3.13 ค่าความขรุขระของท่อที่เป็นวัสดุชนิดต่างๆ [13]

| Pipe | Roughness (e) | |
|----------------------------------|-------------------|--------------|
| | ft | mm |
| Riveted steel | 0.003-0.03 | 0.9-9.0 |
| Concrete | 0.001-0.01 | 0.3-3.0 |
| Wood stave | 0.0006-0.003 | 0.18-0.9 |
| Cast iron | 0.00085 | 0.26 |
| Galvanized iron | 0.0005 | 0.15 |
| Commercial steel or wrought iron | 0.0015 | 0.046 |
| Drawn tubing | 0.000005 | 0.0015 |
| Plastic, Glass | 0.0 (Smooth) | 0.0 (Smooth) |

รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆของอีโคโนไมเซอร์ที่ออกแบบ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างอีโคโนไมเซอร์ แสดงไว้ในภาคผนวก ก

บทที่ 4

อีโคโนไมเซอร์และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

4.1 การออกแบบอีโคโนไมเซอร์

ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลทางทฤษฎีที่นำไปใช้ในการคำนวณขนาดของอีโคโนไมเซอร์ โดยอาศัยทฤษฎีการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะต้องทราบค่าคุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อน และ ความหนืดของของไหล เป็นต้น แต่เนื่องจากค่าคุณสมบัติต่างๆ ของของไหลที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของของไหลที่บริเวณทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิของน้ำป้อนและก๊าซเสียทางเข้าและทางออกนั้นก่อน จากข้อมูลการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ เราสามารถหาค่าเหล่านี้ได้โดยสมมติค่าอุณหภูมิของน้ำป้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ขึ้น เพื่อใช้ในการหาค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness) โดยข้อมูลการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ แสดงดังตารางที่ 4.1 ตลอดจนสรุปขั้นตอนการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการออกแบบอีโคโนไมเซอร์

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|---------------------------------|-----------------|--------|-------|
| ก๊าซเสีย | | | |
| อัตราการไหลก๊าซเสีย | \dot{m}_f | kg/s | 0.67 |
| อุณหภูมิก๊าซเสีย | $T_{f,i}$ | °C | 230 |
| ความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียเฉลี่ย | $C_{p_{flue}}$ | J/kg-K | 1052 |
| น้ำป้อน | | | |
| อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า | $T_{w,i}$ | °C | 110 |
| อุณหภูมิน้ำป้อนที่ต้องการ | $T_{w,o}$ | °C | 125 |
| อัตราการไหล | \dot{m}_w | kg/s | 0.957 |
| ความร้อนจำเพาะของน้ำป้อน | $C_{p_{water}}$ | J/kg-K | 4235 |

ส่วนข้อมูลคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าการนำความร้อนและความหนืดของของไหล แสดงไว้ในภาคผนวก ก

4.1.1 สรุปขั้นตอนการออกแบบอีโคโนไมเซอร์

1. กำหนดคุณสมบัติของของไหล

1.1 สมมติค่าอุณหภูมิน้ำป้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ ($T_{w,o}$) แทนในสมการดังนี้

$$\varepsilon = \frac{C_h (T_{h,in} - T_{h,out})}{C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})}$$

จะได้ Effectiveness (ε)

1.2 หาค่า Heat capacity ratio, C

$$C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

2. กำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ความสัมพันธ์ของ NTU , ε และ C

เลือกลักษณะการไหลของของไหล

Cross Flow (Single Pass)

$$\begin{aligned} C_{\max} \text{ mixed, } C_{\min} \text{ unmixed} & : NTU = -\ln \left[1 + \frac{\ln(1-\varepsilon)}{c} \right] \\ C_{\min} \text{ mixed, } C_{\max} \text{ unmixed} & : NTU = -\frac{\ln[c \ln(1-\varepsilon) + 1]}{c} \end{aligned}$$

Cross flow (Two pass)

Parallel Cross Flow (2 Pass) :

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) + \nu^2 \left[1 + \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) \right] \right\}$$

Counter Cross Flow (2 Pass) :

$$\varepsilon = 1 - \frac{2}{\left\{ 1 - \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) + \left[1 + \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right) \right] / \nu^2 \right\}}$$

โดยที่

$$\nu = \exp \left[\frac{1 - \exp\left(\frac{-C_r \times NTU}{2}\right)}{-C_r} \right]$$

3. กำหนดพื้นที่ถ่ายเทความร้อน

3.1 ใช้ความสัมพันธ์ของ NTU หาค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (A) สมมติค่า U ที่เหมาะสมขึ้นมาแทนในสมการดังต่อไปนี้

$$NTU = \frac{UA_s}{C_{\min}}$$

3.2 หาจำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (n)

$$n = \frac{A_o}{D_o \pi L}$$

4. ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U)

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{R_{f,i} D_o}{D_i} + \frac{D_o \ln(D_o / D_i)}{2k} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o}}$$

4.1 หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผ่านกลุ่มท่อ (h_o)

$$\overline{Nu}_D = 1.13 C_1 Re_{D,\max}^m Pr^{1/3} ; \left[\begin{array}{l} N_L \geq 10 \\ 2000 < Re_{D,\max} < 40,000 \\ Pr = 0.7 \end{array} \right]$$

$$h_o = \frac{\overline{Nu}_D k}{D_o}$$

4.2 หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลภายในท่อ (h_i)

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} ; \left[\begin{array}{l} 0.5 < Pr < 2000 \\ 3000 < Re_D \leq 5 \times 10^6 \end{array} \right]$$

$$h_i = \frac{Nu_D k}{D_i}$$

4.3 กำหนดค่า Fouling Factor และ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)

5. การหาค่าความดันสูญเสีย (ΔP)

5.1 ความดันสูญเสียภายนอกท่อ

$$\Delta P_o = N_L x \left(\frac{\rho V_{\max,o}^2}{2} \right) f_o$$

5.2 ความดันสูญเสียภายในท่อ

$$\Delta P_i = 2 f_i \rho V_{\max}^2 L \frac{N}{D_i}$$

จากการสรุปขั้นตอนการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ในข้างต้น เราสามารถนำข้อมูลการออกแบบ ดังตารางที่ 4.1 เพื่อคำนวณหาขนาดและประสิทธิภาพของอีโคโนไมเซอร์ ดังนี้

4.2 การคำนวณหาขนาดอีโคโนไมเซอร์

จากข้อมูลตารางที่ 4.1 สามารถนำข้อมูลมาออกแบบขนาดของอีโคโนไมเซอร์ และสรุปขั้นตอนการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ข้างต้น เราจะแสดงขั้นตอนการคำนวณการออกแบบขนาดอีโคโนไมเซอร์โดยละเอียดและขั้นตอนการสร้างรวมถึงการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์บริเวณปล่องไอเสีย เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ต่อไป

ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดอีโคโนไมเซอร์

1. กำหนดคุณสมบัติของของไหล

$$\text{อัตราการไหลของก๊าซเสีย, } m_{fg} = 0.67 \text{ kg/s}$$

$$\text{อัตราการไหลของน้ำ, } m_w = 0.957 \text{ kg/s}$$

น้ำ : อุณหภูมิของน้ำที่เข้าอีโคโนไมเซอร์, $T_{w,i} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{เปิดตารางได้ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ, } C_{p,w} = 4229 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$$

ก๊าซเสีย : อุณหภูมิของก๊าซเสียที่เข้าอีโคโนไมเซอร์, $T_{fg,i} = 230 \text{ }^{\circ}\text{C}$

สามารถหาค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียจากค่าความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย จะได้

$$C_{p,fg} = 1052 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{ค่าของ } C_{\min} = m_{fg} \times C_{p,fg} = 0.67 \times 1052 = 689.6 \text{ W/K}$$

$$\text{ค่าของ } C_{\max} = m_w \times C_{p,w} = 0.957 \times 4229 = 4052.9 \text{ W/K}$$

$$\text{ดังนั้นค่า Heat Capacity Ratio, } C = C_{\min} / C_{\max} = 0.1699$$

หาอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์

$$\varepsilon = \frac{Q_a}{Q_{\max}} = \frac{m_w \cdot C_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i})}{C_{\min} (T_{fg,i} - T_{w,i})}$$

โดยสมมติค่าอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์, $T_{w,o} = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$

จะได้ effectiveness, $\varepsilon = 0.7$

$$Q = m_w \cdot C_{p,w} (T_{w,o} - T_{w,i}) = m_{fg} \cdot C_{p,fg} (T_{fg,i} - T_{fg,o})$$

แทนค่า จะได้ อัตราการถ่ายเทความร้อน, $Q = 60.79 \text{ kW}$

จะได้ อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์, $T_{fg,o} = 141 \text{ }^{\circ}\text{C}$

หาอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล

อุณหภูมิน้ำเฉลี่ย, $T_{w,av} = 117.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

อุณหภูมิก๊าซเสีย, $T_{fg,av} = 186.85 \text{ }^{\circ}\text{C}$

นำอุณหภูมิเฉลี่ยไปเปิดตารางเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่างๆของของไหล

$$C_{p,w} = 4235 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$C_{p,fg} = 1051.3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{ค่าของ } C_{\min} = m_{fg} \times C_{p,fg} = 0.67 \times 1051.3 = 689 \text{ W/K}$$

$$\text{ค่าของ } C_{\max} = m_w \times C_{p,w} = 0.957 \times 4235 = 4052.9 \text{ W/K}$$

$$\text{ดังนั้นค่า Heat Capacity Ratio, } C = C_{\min} / C_{\max} = 0.16998$$

หาอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์

$$\text{จะได้ อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์, } T_{w,o} = 125 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{แทนค่า จะได้ อัตราการถ่ายเทความร้อน, } Q = 60.79 \text{ kW}$$

$$\text{จะได้ อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์, } T_{fg,o} = 141 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2. กำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อน

คำนวณค่า Number of Transfer Unit สำหรับ Cross-Counter Flow with two pass

$$\varepsilon = 1 - \frac{2}{\left\{ 1 - \exp\left(-\frac{C \times NTU}{2}\right) + \left[1 + \exp\left(-\frac{C \times NTU}{2}\right) \right] / v^2 \right\}}$$

$$v = \exp\left[-\frac{1 - \exp\left(\frac{-C \times NTU}{2}\right)}{C_r} \right]$$

$$\text{จะได้ค่า } NTU = 1.397$$

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่างๆ

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | เส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายนอก (m) | | |
|--------------------------------------|--------------|-----------|--------------------------------|--------|--------|
| | | | 0.019 | 0.0217 | 0.0254 |
| ความหนาของท่อ | t | m | 0.0015 | 0.0015 | 0.0015 |
| จำนวนท่อต่อแถว | N_L | | 18 | 18 | 19 |
| จำนวนแถว | N_T | | 22 | 20 | 18 |
| ความยาวท่อ | L | m | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน | n | tubes | 396 | 360 | 342 |
| ขนาดปล่องก๊าซเสีย | | m | 0.4572 | 0.4572 | 0.4572 |
| พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมด | A | m^2 | 18.91 | 19.63 | 21.83 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนน้ำในท่อ | h_i | W/m^2-K | 612.5 | 488.5 | 347.7 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนก๊าซเสียนอกท่อ | h_o | W/m^2-K | 62.2 | 59.3 | 55.4 |
| สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม | U | W/m^2-K | 53.5 | 50.1 | 45.3 |
| Transverse Pitch (1.75 x OD) | S_T | m | 0.033 | 0.038 | 0.044 |
| Longitudinal Pitch (1.75 x OD) | S_L | m | 0.033 | 0.038 | 0.044 |
| Diagonal Pitch | S_D | m | 0.037 | 0.042 | 0.049 |
| ความดันตกของน้ำในท่อ | ΔP_i | kPa | 0.005 | 0.003 | 0.002 |

จากตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ โดยเราจะพิจารณาที่สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อภายนอก 0.019 เมตร มีค่าสัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม เท่ากับ $53.5 W/m^2-K$ ซึ่งมากกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.0217 และ 0.0254 เมตร ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.019 เมตร

3. การคำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนรวม

ผลการคำนวณ ค่า Overall heat transfer coefficient, $U_{guss} = 53.5 W/m^2-K$

$$\text{จากสมการ} \quad NTU = \frac{U_{guss} A}{C_{min}}$$

สามารถคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่คาดไว้

$$A = 1.397 \times 704.37 / 53.5 = 18.5 \text{ m}^2$$

เลือกใช้ท่อขนาด $D_o = 19 \text{ mm}$, $L = 0.8 \text{ m}$

เลือกใช้จำนวนท่อต่อแถว $n_L = 18$

1 แถวจะมีพื้นที่

$$A_b = \pi D_o n_L L = 3.1416 \times 0.019 \times 18 \times 0.8 = 0.859$$

จำนวนแถว $n_T = \frac{A}{A_b} = \frac{18.393}{0.764} = 20.92$

ให้จำนวนแถวเป็นจำนวนเต็มเลขคู่ $n_T = 22$

ดังนั้นพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนรวมจริง

$$A = A_b \times n_T = 0.859 \times 22 = 18.91 \text{ m}^2$$

จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

$$n = \frac{18.91}{0.019 \times \pi \times 0.8} = 396 \text{ ท่อ}$$

วางท่อแถวละ 18 ท่อ จำนวน 22 แถว โดยที่ระยะ S_T , S_L เท่ากับ 1.75 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน คือ 33.25 mm และ S_D จะมีค่าเท่ากับ 37.17 mm

4. การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, U_o ทางทฤษฎี

U_o คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่พื้นที่ผิวภายในและภายนอกของท่อตามลำดับ ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) ดังนั้น

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{R_{f,i} D_o}{D_i} + \frac{D_o \ln(D_o / D_i)}{2k} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o}}$$

4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของน้ำป้อนภายในท่อ, h_i

$T_{w,av} = 118^\circ\text{C}$ จากตารางจะได้

$\rho = 944.84 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.0002366 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$, $k = 0.6828 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $\text{Pr} = 1.468$

$$V_w = \frac{0.957 / (18 \times 22 / 2)}{944.84 \times \frac{\pi}{4} \times 0.016^2} = 0.0254 \text{ m/s}$$

$$\text{Re } D = \left(\frac{944.84 \times 0.0254 \times 0.016}{0.0002366} \right) \times 2 = 3251$$

$$\text{Nu}_D = \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} = 14.36$$

$$f = (0.790 \ln \text{Re}_D - 1.64)^{-2} = (0.790 \ln(3251) - 1.64)^{-2} = 0.044$$

$$h_i = 613 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของก๊าซเสียไหลผ่านนอกกลุ่มท่อ h_o

$$T_{fg,av} = 185^\circ \text{C} \text{ จากตารางหาค่า}$$

$$\rho = 0.9453 \text{ kg/m}^3, \mu = 0.000023545 \text{ kg/m} \cdot \text{s}, k = 0.0355 \text{ W/m} \cdot \text{K}, \text{Pr} = 0.7353$$

$$V_\infty = \frac{0.67}{0.9453 \times 0.8 \times 0.78} = 1.136 \text{ m/s}$$

$$V_{\max} = V_\infty \frac{S_t}{S_t - D_o} = 1.136 \frac{33.25}{33.25 - 19} = 2.65 \text{ m/s}$$

$$\text{Re } D = \frac{0.9453 \times 2.65 \times 0.019}{0.000023545} = 2021.72$$

$$\overline{\text{Nu}}_D = 1.13 C_1 \text{Re}_{D,\max}^m \text{Pr}^{1/3}$$

$$\text{Nu}D = 1.13 \times 0.4525 \times 2021.72^{0.5635} \times 0.7353^{1/3} = 33.645$$

$$h_o = 63 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{แทนค่าจะได้ } U_o = 53.82 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\left| \frac{U_{old} - U_{new}}{U_{old}} \right| = \left| \frac{53.5 - 53.82}{53.5} \right| \times 100 = 0.58\% < 1\% \text{ การคำนวณด้านบนจะเป็นจริง}$$

5. การหาค่าความดันสูญเสีย (ΔP)

5.1 การคำนวณความดันสูญเสียภายในท่อ

$$\Delta P_i = 2f_i \rho V_{\max}^2 L \frac{N}{D_i}$$

หาค่า f จาก Moody Chart โดยกำหนดให้ Roughness ของผิวภายในท่อเหล็ก

$$\varepsilon = 0.046 \text{ mm} = 0.000046 \text{ m}, D_i = 0.016 \text{ m} \text{ จะได้ } \frac{\varepsilon}{D_i} = 0.029, \text{Re}_D = 3251$$

จะได้ $f = 0.046$

$$\Delta P_i = 2 \times 0.046 \times 0.024219^2 \times 0.8 \times \frac{944.84 \times 2}{0.016} = 10.098 \text{ Pa} = 0.01 \text{ kPa}$$

5.2 การคำนวณความดันสูญเสียภายนอกท่อ

$$\Delta P_o = N_L \chi \left[\frac{\rho V^2}{2} \right] f_o$$

จำนวนท่อต่อแถว $N_L = 18$

ความหนาแน่นของก๊าซเสียนอกท่อ $\rho = 0.9453 \text{ kg/m}^3$

ความเร็วสูงสุดที่ไหลผ่านท่อ $V_{\max} = 2.65 \text{ m/s}$

ตัวคูณแก้ไข $\chi = 1$

ตัวประกอบความเสียดทาน $f_o = 0.35$

$$\Delta P_o = 18 \times 1 \times \left[\frac{0.9453 \times 2.65^2}{2} \right] \times 0.35 = 23.23 \text{ Pa} = 0.023 \text{ kPa}$$

4.3 การสร้างอีโคโนไมเซอร์

ขั้นตอนการสร้างอีโคโนไมเซอร์

ในการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง คือ การเลือกวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์ วัสดุนั้นต้องมีความเหมาะสมกับความดัน อุณหภูมิ ตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติเชิงเคมีของของไหลที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีอายุการใช้งานได้นานที่สุด โดยพิจารณาจากอุณหภูมิ และองค์ประกอบของก๊าซเสียที่ปล่อยออกจากปล่องของหม้อไอน้ำ เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซเสียนั้นสูงและปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ของก๊าซเสียจะเป็นตัวแปรสำคัญในการทำให้เกิดการกัดกร่อนบริเวณผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในอีโคโนไมเซอร์ สำหรับหม้อไอน้ำที่ทำการศึกษา ที่อุณหภูมิมีก๊าซเสียที่ออกจากปล่องไอเสียประมาณ $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ จึงจำเป็นต้องเลือกวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและทนต่อความร้อนได้สูง ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเลือกเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel 316) ในการสร้างอีโคโนไมเซอร์ เพื่อให้อีโคโนไมเซอร์มีอายุการใช้งานนานที่สุด โดยขั้นตอนในการสร้างอีโคโนไมเซอร์ มีดังนี้

ขั้นตอนการสร้างอีโคโนไมเซอร์

1. ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนใช้วัสดุ Stainless Steel 316 ขนาดท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm ความยาว 0.8 m ความหนาของผนังท่อ 1.5 mm ลักษณะการวางท่อจัดเรียงท่อแบบเยื้องกัน (Staggered) แถวละ 18 ท่อ 22 แถว โดยมีระยะห่างระหว่างท่อในแนวตั้งฉาก (Transverse Pitch, S_T) และระยะห่างระหว่างท่อในแนวขนานกับการไหล (Longitudinal Pitch, S_L) เท่ากับ 1.75 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน คือ 33.25 mm ระยะห่างระหว่างท่อในแนวทแยง (Diagonal Pitch, S_D) คือ 37.17 mm



ภาพที่ 4.1 ท่อ Stainless Steel 316

2. แผ่นยึดท่อ ใช้วัสดุ Stainless Steel 304 หนา 20 mm กว้าง 72 cm และยาว 79 cm ซึ่งเจาะรูหน้าผนังทั้งหมด 396 รูเท่ากับจำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน จากนั้นเชื่อมท่อทั้งหมดตรงบริเวณรูที่เตรียมไว้



ภาพที่ 4.2 การเจาะหน้าผนัง



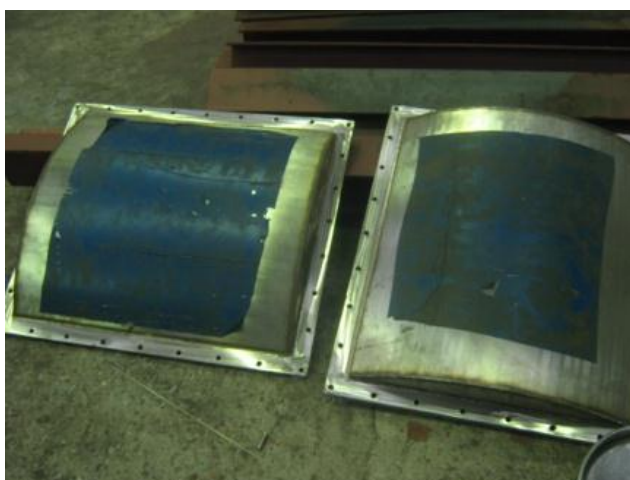
ภาพที่ 4.3 เชื่อมท่อกับหน้าผนัง

3. ท่อต่อเข้ากับอีโคโนไมเซอร์ของก๊าซเสียทั้งด้านทางเข้าและทางออก ใช้วัสดุ Stainless Steel 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้ว บริเวณท่อทางเข้าและออกของอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งจะติดตั้งจุดอุปรกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อวัดอุณหภูมิของก๊าซเสีย



ภาพที่ 4.4 ท่อด้านเข้าและออกอีโคโนไมเซอร์ของก๊าซเสีย

4. ท่อที่ต่อเข้ากับอีโคโนไมเซอร์ของน้ำป้อนเป็นแบบ 2 กลีบ สร้างจากวัสดุ Stainless Steel 304



ภาพที่ 4.5 ท่อด้านเข้าและออกอีโคโนไมเซอร์ของน้ำป้อน

5. ทดสอบท่อด้วยวิธีความดันอุทกสถิต (Hydrostatic Test) ขนาด 1.5 เท่าเพื่อทดสอบความแข็งแรงและความสามารถในการรับความดันน้ำของระบบท่อ



ภาพที่ 4.6 ด้านหน้าของอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ 4.7 การทดสอบท่อด้วยวิธีความดันอุทกสถิต (Hydrostatic Test)

4.4 การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์เข้ากับปล่องของหม้อไอน้ำ เริ่มจากการวัดระยะห่างต่างๆกับปล่องไอเสีย เช่น ระยะห่างผนัง ระยะห่างเพดาน ความสูงของพื้นถึงปล่อง และนำมาเปรียบเทียบกับระยะต่างๆกับอีโคโนไมเซอร์ จากนั้นตัดปล่องไอเสียให้เท่ากับขนาดอีโคโนไมเซอร์ แล้วนำอีโคโนไมเซอร์มาวางไว้บนตัวรองรับ และทำจุด support บริเวณเพดานเพื่อรับแรงทั้ง 4 จุด ของอีโคโนไมเซอร์ จากนั้นใช้รอกโซ่ ยกขึ้นไปตรงตำแหน่งปล่องไอเสียที่จะติดตั้ง จากนั้นทำการเชื่อม ประกอบที่ระหว่างอีโคโนไมเซอร์กับปล่องไอเสียของหม้อไอน้ำ และติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Plate Heat Exchanger) จากนั้นเดินระบบท่อน้ำ โดยท่อน้ำป้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์จะต่อต่อแบบ By pass เข้ากับท่อน้ำป้อนเดิม ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันเวลาเกิดปัญหาขึ้นกับอีโคโนไมเซอร์หรือระบบอุ่นน้ำป้อน จนไม่สามารถใช้งานได้ ก็ยังสามารถทำงานได้อย่างปกติเพียงแต่ไม่มีการอุ่นน้ำป้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าหม้อไอน้ำเท่านั้น และท่อน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำต้องต่อแบบ By pass เข้ากับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน 1 เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำร้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ไปยังน้ำที่เข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำสูงพอที่ไม่ให้เกิดครดกลั่นตัว จึงต้องต่อท่อผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน 2 เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากไอน้ำในช่วงเริ่มต้น หรือเสริมความร้อนให้น้ำมีอุณหภูมิสูงมากพอ เมื่อติดตั้งอีโคโนไมเซอร์และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการติดตั้ง RTD PT 100 ใช้วัดอุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิก๊าซเสียเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ Pressure Gage เพื่อใช้วัดความดันน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ และ Pressure Relief valve เพื่อระบายความดันออกจากระบบ เมื่อระบบมีความดันสูงเกินกว่าความดันที่กำหนด (กำหนดความดันสูงสุดเท่ากับ 8 บาร์) โดยการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์เข้ากับปล่องไอเสียและอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำ แสดงดังรูป



ภาพที่ 4.8 ตำแหน่งการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ 4.9 การใช้รอกโซ่ ยกขึ้นไปตรงตำแหน่งที่ติดตั้ง



ภาพที่ 4.10 แสดงการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ 4.11 หม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ 4.12 ระบบท่อและอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Plate Heat Exchanger)

ข้อมูลการตรวจสอบการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ที่สร้างจริง แสดงไว้ในภาคผนวก ก เพื่อตรวจสอบขนาดของอีโคโนไมเซอร์จริงเปรียบเทียบกับขนาดของอีโคโนไมเซอร์ทางทฤษฎี

บทที่ 5

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำทั้งก่อนและหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ และใช้ความร้อนปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ต่อไป

การตรวจวัดการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำ ทางโรงพยาบาลที่ทำการศึกษามีการติดตั้งหม้อไอน้ำขนาด 3 ตันต่อชั่วโมง โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว สำหรับบทนี้จะนำเสนอข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของหม้อไอน้ำ ขั้นตอนการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ รายละเอียดข้อมูลที่ต้องตรวจวัด รวมทั้งผลการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ เครื่องมือที่ใช้วัดค่าและอุปกรณ์ควบคุม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ข้อมูลเบื้องต้นและการทำงานของหม้อไอน้ำ

ข้อมูลที่ต้องการทราบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

5.1.1 สภาพหม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

5.1.2 สภาพหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

5.1.1 สภาพหม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

1. ปริมาณ CO, O₂, SO₂ และอุณหภูมิในก๊าซเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำ
2. อุณหภูมิน้ำจากถังคอนเดนเสท และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
3. ปริมาณน้ำป้อนและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ
4. อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังของหม้อไอน้ำ
5. ปริมาณไอน้ำและความดันของไอน้ำ

5.1.2 สภาพหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

การวัดข้อมูลของหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. อุปกรณ์อีโคโนไมเซอร์
2. หม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

1. อุปกรณ์อีโคโนไมเซอร์

1. อุณหภูมิของน้ำป้อนที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์
2. อุณหภูมิของก๊าซเสียที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์
3. อัตราการไหลของน้ำป้อนและก๊าซเสีย
4. อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังของอีโคโนไมเซอร์
5. ตรวจวัดความดันของน้ำที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์

2. หม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

1. ปริมาณ CO, O₂ และ SO₂ ในก๊าซเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำ
2. อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
3. อุณหภูมิของก๊าซเสียบริเวณปล่องไอเสีย
4. อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าของหม้อไอน้ำ
5. ปริมาณน้ำป้อน ปริมาณไอน้ำและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ
6. อุณหภูมิที่ผนังของหม้อไอน้ำ และตรวจวัดความดันไอน้ำ



ภาพที่ 5.1 หม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ 5.2 หม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

5.2 วิธีการทดลองหม้อไอน้ำและชุดอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

5.2.1 ขั้นตอนการทดลองหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

การทดลองโดยใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เริ่มต้นการทำงานของหม้อไอน้ำด้วยโหมดอัตโนมัติ จากนั้นปรับการทำงานของหม้อไอน้ำเป็นการเผาไหม้ไฟต่ำ (Low fire) เมื่อได้ความดันไอน้ำที่ 5 บาร์ จนสามารถผลิตไอน้ำได้ และเก็บข้อมูลช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟต่ำ (Low fire) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนการทดลองส่วนที่ 2 และ 3 จะเป็นการทดลองช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟสูง (High fire) ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง ตามลำดับ โดยขั้นตอนการเก็บข้อมูลก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ดังนี้

ขั้นตอนการทดลองก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

1. อ่านค่าปริมาณน้ำป้อนจากมิเตอร์น้ำ บันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที
2. บันทึกค่าอุณหภูมิน้ำจากถังคอนเดนเสทและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที
3. ตรวจวัดปริมาณ CO, O₂, SO₂ และอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำโดยบันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที
4. ตรวจวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังของหม้อไอน้ำ และตรวจวัดความดันไอน้ำ บันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที
5. บันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและปริมาณไอน้ำ บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที

5.2.2 ขั้นตอนการทดลองหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

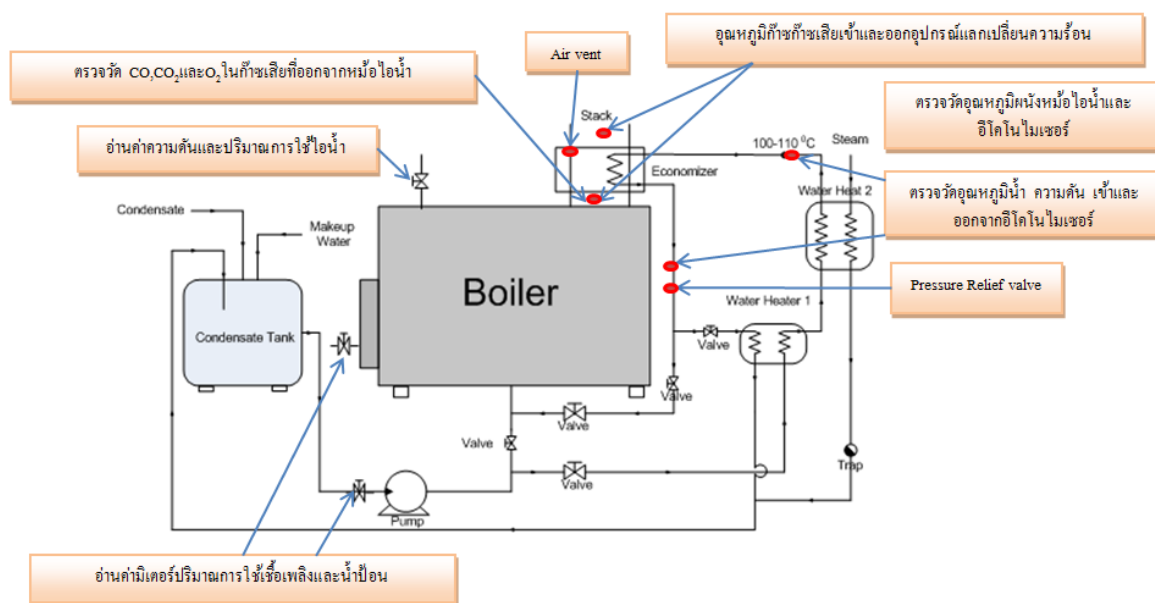
การทดลองหลังจากติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ จะไม่มีช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟต่ำ (Low fire) เพราะปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้น้อย ดังตารางที่ 5.3 จึงไม่เหมาะที่จะนำไอน้ำมาทดลองหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ทำให้การทดลองมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การทดลองช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟสูง (High fire) ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง และส่วนที่ 2 การทดลองช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟสูง (High fire) ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง โดยเก็บข้อมูลหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ดังนี้

ขั้นตอนการทดลองหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

1. อ่านค่าปริมาณน้ำป้อนจากมิเตอร์น้ำ บันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที
2. บันทึกค่าอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที
3. ตรวจวัดปริมาณ CO, O₂ และ SO₂ ของก๊าซเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำ บันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที
4. อุณหภูมิก๊าซเสียเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที
5. ตรวจวัดอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผนังของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ บันทึกข้อมูลทุกๆ 15 นาที

6. บันทึกปริมาณการใช้เชื้อเพลิง และปริมาณไอน้ำ บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที
7. ตรวจสอบวัดความดันไอน้ำและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที
8. ตรวจสอบวัดความดันน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ บันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที

5.3 รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องตรวจวัด



ภาพที่ 5.3 ตำแหน่งตรวจวัดข้อมูล

5.3.1 หม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| ลำดับ | ข้อมูลในการตรวจวัด | วิธีการเก็บข้อมูล | สัญลักษณ์ |
|-------|--|---|----------------------|
| 1 | อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ | ใช้เทอร์โมมิเตอร์ บันทึกข้อมูลอุณหภูมิในถังคอนเดนเสท | $T_{w,i}$ |
| 2 | อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ปล่องของหม้อไอน้ำ | ติดตั้ง RTD PT100 บริเวณปล่องไอเสีย จากนั้นต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล | T_{flue} |
| 3 | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ | อ่านค่าจาก flow meter | m_{fuel} |
| 4 | ปริมาณการใช้น้ำของหม้อไอน้ำ | อ่านค่าจาก flow meter | m_{water} |
| 5 | ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ | อ่านค่าจาก flow meter | m_{stream} |
| 6 | อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำ | ตรวจวัดด้วยเครื่อง infrared thermometer | $T_{surface,boiler}$ |
| 7 | อุณหภูมิของอากาศภายนอก | ตรวจวัดด้วยเครื่อง Data Logger | T_{amb} |
| 8 | ปริมาณ CO, SO ₂ และ O ₂ ในก๊าซเสียของหม้อไอน้ำ | ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดก๊าซเสีย (flue gas analyzer) | |

5.3.2 หม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลที่ต้องตรวจวัดหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| ลำดับ | ข้อมูลในการตรวจวัด | วิธีการเก็บข้อมูล | สัญลักษณ์ |
|-------|--|---|--|
| 1 | อุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ | ติดตั้ง RTD PT100 และต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล | $T_{w,i}$, $T_{w,o}$ |
| 2 | อุณหภูมิของก๊าซเสียที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ | ติดตั้ง RTD PT100 ที่ทางเข้าและออกจาก อีโคโนไมเซอร์ จากนั้นต่อสายสัญญาณเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล | $T_{flue,i}$, $T_{flue,o}$ |
| 3 | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ | อ่านค่าจาก flow meter | m_{fuel} |
| 4 | ปริมาณการใช้น้ำของหม้อไอน้ำ | อ่านค่าจาก flow meter | m_{water} |
| 5 | ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ | อ่านค่าจาก flow meter | m_{stream} |
| 6 | อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ | ตรวจวัดด้วยเครื่อง infrared thermometer | $T_{surface,boiler}$, $T_{surface,eco}$ |
| 7 | อุณหภูมิของอากาศภายนอก | ตรวจวัดด้วยเครื่อง Data Logger | T_{amb} |
| 8 | ตรวจวัดความดันน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ | ตรวจวัดด้วย Pressure transmitter | P_i , P_o |
| 9 | ปริมาณ CO, SO ₂ และ O ₂ ในก๊าซเสียของหม้อไอน้ำ | ตรวจวัดด้วยเครื่องวัดก๊าซเสีย (flue gas analyzer) | |

จากข้อมูลที่ต้องตรวจวัดของหม้อไอน้ำก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2 เราสามารถเก็บข้อมูลทางทดลองของหม้อไอน้ำที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ ช่วงต่างๆ โดยรายละเอียดข้อมูลการตรวจวัดต่างๆ แสดงไว้ในภาคผนวก ก

5.4 เครื่องมือที่ใช้วัดค่าและอุปกรณ์ควบคุม

5.4.1 เครื่องมือที่ใช้วัดค่า

1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำและไอเสีย (RTD PT 100)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำและไอเสีย ชนิดของไส้ คือ Pt 100 มีลักษณะเป็นโพรบหุ้มด้วย ceramic จำนวน 8 ตัว ซึ่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 6 ตัว ใช้วัดอุณหภูมิของน้ำ ส่วนอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 2 ตัว ใช้วัดอุณหภูมิของไอเสีย และช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 600 °C โดยมีสายส่งสัญญาณถึงอุปกรณ์บันทึกข้อมูล



ภาพที่ 5.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิน้ำและไอเสีย

2 เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซเสีย (flue gas analyzer)

เป็นเครื่องวัดปริมาณ O_2 , CO , CO_2 , NO , NO_2 , NO_x , SO_2 รวมทั้งประสิทธิภาพการเผาไหม้แสดงในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยโมลแบบแห้ง (Dry basis) และสามารถติดตั้งเซ็นเซอร์วัดก๊าซได้ พร้อมกัน 6 เซนเซอร์



ภาพที่ 5.5 เครื่องวัดองค์ประกอบของก๊าซเสีย (flue gas analyzer)

3 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (IR thermometer)

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ ทู อิน วัน วัดได้ทั้งแบบไม่สัมผัสด้วยอินฟราเรดและการวัดแบบสัมผัสด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และ probe สามารถปรับค่า emissivity ได้ 3 ระดับ low (0.3), medium (0.7) และ high (0.95) มีเลเซอร์ชี้ตำแหน่งเพื่อเล็งจุดศูนย์กลางของพื้นที่วัด ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -40 ถึง 550 °C และมีความละเอียดในการแสดงผลของอุณหภูมิอยู่ที่ 0.1 °C



ภาพที่ 5.6 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด (Infrared thermometer)

4 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (NI LabVIEW)

LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้พัฒนา Application โดยหลักการคล้ายกับ Visual Basic โดยต่างกันตรงที่เขียนโปรแกรมโดย Graphic ซึ่ง Function ที่ใช้งานมีลักษณะเป็น Module ความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ Wiring สายต่อกันเหมือนเป็นการต่อวงจรไฟฟ้า ซึ่งทำให้เขียนโปรแกรมได้อย่างรวดเร็ว และสามารถเก็บข้อมูลต่างๆและควบคุมระบบ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับโปรแกรม window อื่นๆ เช่น MS Office



ภาพที่ 5.7 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (NI Lab VIEW)

5 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger)

อุปกรณ์บันทึกข้อมูล ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลที่ได้จากการวัด ที่ทั้งแบบ Analog และ Digital สามารถใช้ร่วมกับ sensor หลากรูปแบบ เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ น้ำ อุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิผิวท่อ (Thermocouple) ลักษณะสำคัญคือ มีช่องรับสัญญาณ Analog และ Digital จำนวน 8 และ 4 ช่อง สามารถอ่านค่าข้อมูลทาง PC computer ผ่าน Modem โดยมี software ช่วยในการอ่าน ซึ่งสามารถนำไปใช้กับโปรแกรม window อื่นๆ เช่น MS Excel, MS Word



ภาพที่ 5.8 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (data logger)

6 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure transmitter)

อุปกรณ์วัดความดันแตกต่างที่ใช้คือ ยี่ห้อ Trafag สำหรับใช้ในงานตรวจวัดความดันน้ำที่ระดับความดันไม่เกิน 16 บาร์ ใช้กับตัวกลางที่อุณหภูมิ $-25 - 125^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $-20^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ โดยมีสายส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล



ภาพที่ 5.9 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure transmitter)

7. อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Vortex flow meter)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหล สามารถวัดอัตราการไหลได้ทั้งของน้ำ ใอน้ำ และก๊าซ ใช้หลักการของกลศาสตร์ของไหล เมื่อวัตถุขวางการไหลจะสร้างกระแสนวน ซึ่งจำนวนวงของกระแสนวนจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของของไหลในระบบเครื่องจะทำการวัดจำนวนกระแสนวนและส่งสัญญาณ อนุพัลส์ 4-20 mA โดยมีสายส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล อุปกรณ์วัดอัตราการไหลนี้สามารถใช้กับตัวกลางที่มีอุณหภูมิ $-40^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$ ความดันไม่เกิน 2.5 MPa และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม $-20^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 5.10 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Vortex flow meter)

8 อุปกรณ์บันทึกอัตราการไหลของน้ำ (Flow meter)

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำหรือมาตรวัดน้ำ ขับเคลื่อนด้วยระบบใบพัดแบบแม่เหล็ก 2 ชั้น ตัวเลขบอกปริมาตรน้ำถูกจัดเรียงเป็นแถวตรง สามารถอ่านได้อย่างสะดวกและชัดเจนมีหน้าจอที่แห่งสนิทตลอดอายุการใช้งาน ระบบบันทึกตัวเลขถูกผนึกอยู่ในกะเปาะแบบสุญญากาศ และทำงานด้วยระบบแม่เหล็ก การหมุนใบพัดจะส่งถ่ายกำลังตรงไปยังระบบบันทึกตัวเลข ซึ่งเชื่อมโยงการขับเคลื่อนด้วยแม่เหล็ก ส่งผลให้การวัดความแม่นยำ แม้ในขณะอัตราการไหลต่ำ



ภาพที่ 5.11 มิเตอร์น้ำ (Flow meter)

5.4.2 อุปกรณ์ควบคุม

1 วาล์วควบคุมแรงดัน (Pressure Relief valve)

อุปกรณ์ความปลอดภัยของระบบ มีหน้าที่คือระบายแรงดันภายในระบบออก ซึ่งจะทำงานเองโดยอัตโนมัติเมื่อมีแรงดันเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ (กำหนดความดันสูงสุดเท่ากับ 8 บาร์)



รูปที่ 5.12 วาล์วควบคุมแรงดัน (Pressure Relief valve)

2 วาล์วไล่อากาศออกจากระบบ (Air vent)

วาล์วไล่อากาศออกจากระบบ มีหน้าที่ ระบายอากาศออกจากระบบของเหลว หรือ ระบบไอน้ำ สำหรับระบบของเหลว air vent มีลักษณะเป็นลูกกลอย ซึ่งเมื่อเริ่มระบบ อากาศ จะถูกระบายออกทาง Orifice ด้านบน เมื่ออากาศระบายออกหมด ระดับน้ำจะยกลูกกลอยมาปิดรู Orifice ที่อยู่ด้านบน ซึ่งติดตั้งบริเวณด้านบนของอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ 5.13 วาล์วไล่อากาศออกจากระบบ (Air vent)

บทที่ 6

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาออกแบบอีโคโนไมเซอร์สร้าง และติดตั้งบริเวณปล่องไอเสียของหม้อไอน้ำจริง โดยใช้ความร้อนปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำอุ่นน้ำป้อน หลังจากนั้นได้ทำการทดลองอุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำขนาด 3 ตัน ซึ่งการทดลองจะเป็นการเก็บข้อมูลช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟสูง (High fire) ที่ผลิตปริมาณไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ของหม้อไอน้ำ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ การเปรียบเทียบประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์จริงและการออกแบบทางทฤษฎี ตลอดจนเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำ

6.1 ข้อมูลการตรวจวัดจากการทดลอง

จากขั้นตอนการทดลองหม้อไอน้ำก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ เราจะแบ่งข้อมูลเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ข้อมูลการตรวจวัดก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ประกอบด้วย ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำ อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำและปริมาณ CO_2 และอุณหภูมิในก๊าซเสียของหม้อไอน้ำ ส่วนที่ 2 ข้อมูลการตรวจวัดหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ โดยแบ่งช่วงอุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ที่ $70^{\circ}C$, $80^{\circ}C$, $90^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ เพื่อเปรียบเทียบผลการประหยัดเชื้อเพลิงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำประกอบด้วย ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำ อุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ปริมาณ CO_2 , SO_2 และอุณหภูมิก๊าซเสียเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์อุณหภูมิน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ และความดันน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ดังนี้

ข้อมูลตรวจวัดก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้ง อีโคโนไมเซอร์

| อัตราการเผาไหม้ | ปริมาณน้ำป้อนที่ใช้ (kg/h) | ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ (kg/h) | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (kg/h) |
|--|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| อัตราการเผาไหม้ไฟต่ำ | 400.1 | 400.1 | 53.4 |
| อัตราการเผาไหม้ไฟสูงที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง | 1370.4 | 1370.5 | 95.2 |
| อัตราการเผาไหม้ไฟสูงที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง | 1762.7 | 1761.7 | 121.3 |

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณ CO, O₂, SO₂ ของก๊าซเสีย อุณหภูมิน้ำป้อน อุณหภูมิก๊าซเสียและความดันไอน้ำของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| อัตราการเผาไหม้ | อุณหภูมิ น้ำป้อน (°C) | อุณหภูมิ ก๊าซเสีย (°C) | CO (ppm) | O ₂ (%) | SO ₂ (%) | ความดันไอน้ำ (bar _g) |
|--|-----------------------|------------------------|----------|--------------------|---------------------|----------------------------------|
| อัตราการเผาไหม้ไฟต่ำ | 37.7 | 165.5 | 318.8 | 14.4 | 0 | 5.9 |
| อัตราการเผาไหม้ไฟสูงที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง | 40.8 | 169.2 | 235.2 | 10.7 | 0.8 | 5.8 |
| อัตราการเผาไหม้ไฟสูงที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง | 47.9 | 170.2 | 28.2 | 10.3 | 0 | 6.0 |

จากตารางที่ 6.1 และ 6.2 แสดงข้อมูลก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ รายละเอียดข้อมูลส่วนอื่นๆ เช่น อุณหภูมิผิวหม้อไอน้ำและความดันไอน้ำ แสดงไว้ในภาคผนวก ข สามารถนำข้อมูลข้างต้นคำนวณหาสมดุลพลังงานความร้อนและประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำต่อไป

ข้อมูลตรวจวัดหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง

| อุณหภูมิหน้าเข้า อีโคโนไมเซอร์ เฉลี่ย (°C) | ปริมาณน้ำ ป้อนที่ใช้ (kg/h) | ปริมาณน้ำที่อุ่น ได้เข้า HE1 (kg/h) | ปริมาณไอน้ำที่ ผลิตได้ (kg/h) | ปริมาณการใช้ เชื้อเพลิง (kg/h) |
|--|-----------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 70 | 1549.8 | 158.9 | 1390.9 | 91.2 |
| 80 | 1549.9 | 139.9 | 1410.0 | 90.7 |
| 90 | 1662.4 | 241.0 | 1421.5 | 89.0 |
| 100 | 1738.0 | 287.0 | 1450.9 | 87.2 |

ตารางที่ 6.4 ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง

| อุณหภูมิหน้าเข้า อีโคโนไมเซอร์ เฉลี่ย (°C) | ปริมาณน้ำ ป้อนที่ใช้ (kg/h) | ปริมาณน้ำที่อุ่น ได้เข้า HE1 (kg/h) | ปริมาณไอน้ำ ที่ผลิตได้ (kg/h) | ปริมาณการใช้ เชื้อเพลิง (kg/h) |
|--|-----------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 70 | 2011.9 | 373.0 | 1638.8 | 103.4 |
| 80 | 2049.7 | 392.5 | 1657.2 | 103.2 |
| 90 | 2006.6 | 316.9 | 1689.7 | 103.9 |
| 100 | 2151.6 | 401.6 | 1750.0 | 103.2 |

ตารางที่ 6.5 ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณ CO, O₂, SO₂ ของก๊าซเสียของหม้อไอน้ำและความดันไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง

| อุณหภูมิน้ำเข้า อีโคโนไมเซอร์ เฉลี่ย | CO (ppm) | O ₂ (%) | SO ₂ (%) | ความดันไอน้ำ (bar _g) |
|--|-------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 70 | 3.1 | 5.2 | 0.0 | 6.1 |
| 80 | 3.0 | 5.1 | 0.0 | 6.2 |
| 90 | 3.0 | 4.9 | 0.0 | 5.3 |
| 100 | 3.2 | 4.8 | 0.0 | 5.7 |

ตารางที่ 6.6 ข้อมูลการตรวจวัดปริมาณ CO, O₂, SO₂ ของก๊าซเสียของหม้อไอน้ำและความดันไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง

| อุณหภูมิน้ำเข้า อีโคโนไมเซอร์ เฉลี่ย | CO (ppm) | O ₂ (%) | SO ₂ (%) | ความดันไอน้ำ (bar _g) |
|--|-------------|-----------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 70 | 8.8 | 5.2 | 0.0 | 5.1 |
| 80 | 7.0 | 5.2 | 0.0 | 5.9 |
| 90 | 7.8 | 5.1 | 0.0 | 5.8 |
| 100 | 36.4 | 4.6 | 0.0 | 6.1 |

ตารางที่ 6.7 ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิน้ำและก๊าซเสียที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 ตันต่อชั่วโมง

| อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย (°C) | อีโคโนไมเซอร์ | | | |
|---|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | อุณหภูมิ น้ำเข้า (°C) | อุณหภูมิ น้ำ ออก (°C) | อุณหภูมิ ก๊าซ เสียเข้า (°C) | อุณหภูมิ ก๊าซ เสียออก (°C) |
| 70 | 69.7 | 75.8 | 168.9 | 89.5 |
| 80 | 78.5 | 85.4 | 168.6 | 96.3 |
| 90 | 87.4 | 93.6 | 171.6 | 102.5 |
| 100 | 109.4 | 115.6 | 174.2 | 123.4 |

ตารางที่ 6.8 ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิน้ำและก๊าซเสียที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 2 ตันต่อชั่วโมง

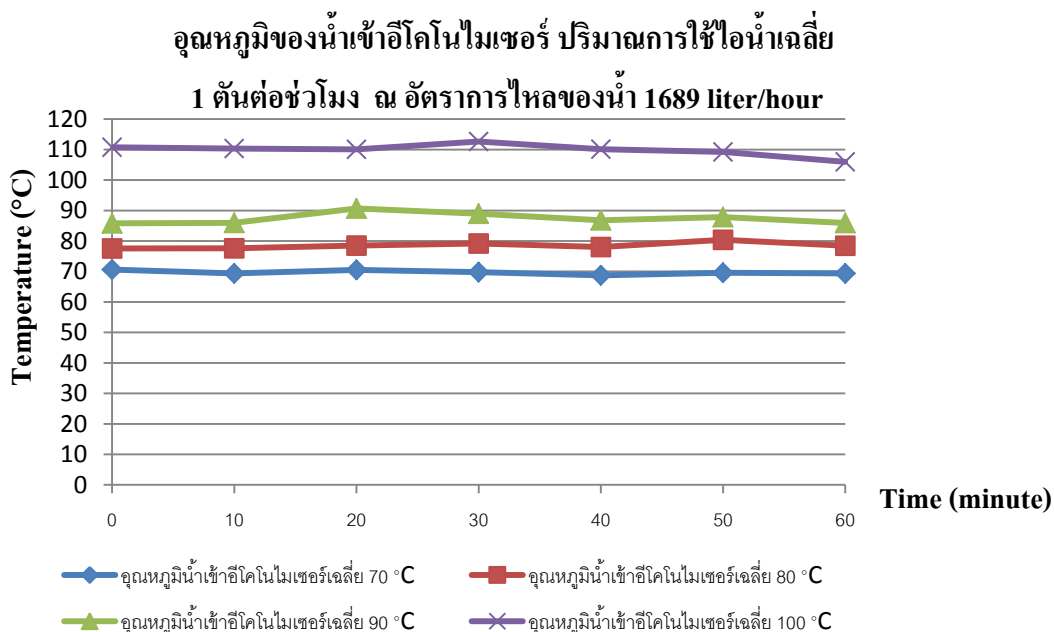
| อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย (°C) | อีโคโนไมเซอร์ | | | |
|---|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | อุณหภูมิ น้ำเข้า (°C) | อุณหภูมิ น้ำ ออก (°C) | อุณหภูมิ ก๊าซ เสียเข้า (°C) | อุณหภูมิ ก๊าซ เสียออก (°C) |
| 70 | 71.3 | 77.4 | 168.9 | 89.8 |
| 80 | 79.6 | 86.2 | 169.5 | 95.8 |
| 90 | 85.3 | 91.7 | 173.2 | 101.9 |
| 100 | 103.3 | 109.8 | 174.3 | 124.8 |

ตารางที่ 6.9 ข้อมูลตรวจวัดความดันของน้ำเข้าและออกของอีโคโนไมเซอร์

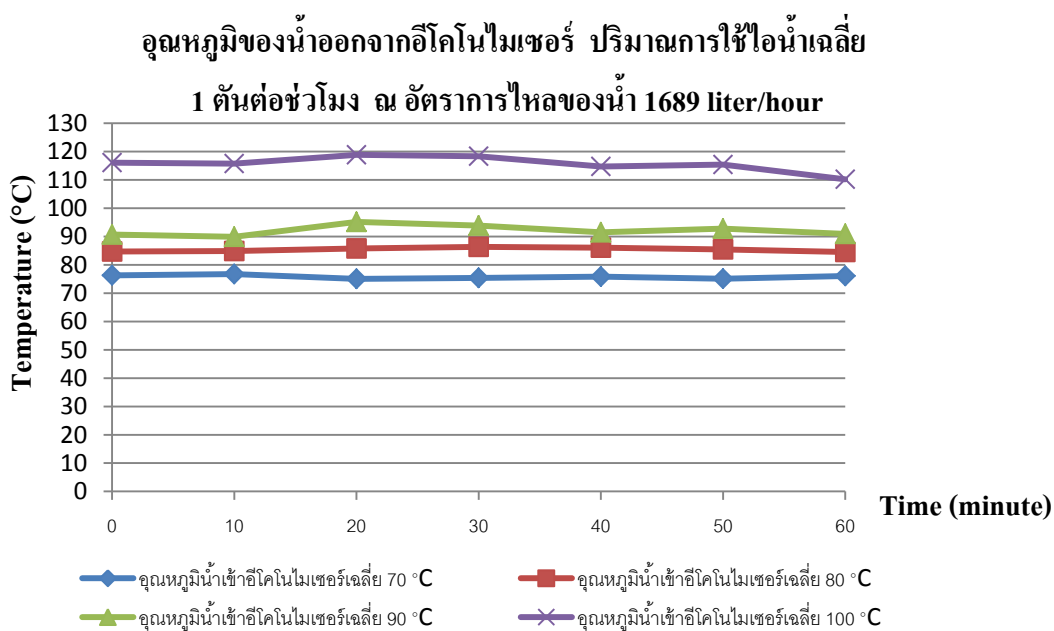
| อุณหภูมิน้ำเข้า อีโคโนไมเซอร์ เฉลี่ย (°C) | อีโคโนไมเซอร์ | | | |
|---|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ton/h | | ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ton/h | |
| | ความดันน้ำ เข้า (bar) | ความดันน้ำ ออก (bar) | ความดันน้ำ เข้า (bar) | ความดันน้ำ ออก (bar) |
| 70 | 6.5 | 6.4 | 5.5 | 5.4 |
| 80 | 6.5 | 6.4 | 5.2 | 5.1 |
| 90 | 5.8 | 5.7 | 5.2 | 5.1 |
| 100 | 5.3 | 5.2 | 6.2 | 6.0 |

จากตารางที่ 6.3 ถึง 6.9 เป็นผลการทดลองหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งเป็นข้อมูลเฉลี่ยที่สามารถนำไปคำนวณสมมูลพลังงานความร้อน ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำและประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์ได้ โดยข้อมูลบางส่วนที่ไม่ได้แสดงในตารางข้างต้น แสดงไว้ในภาคผนวก ค

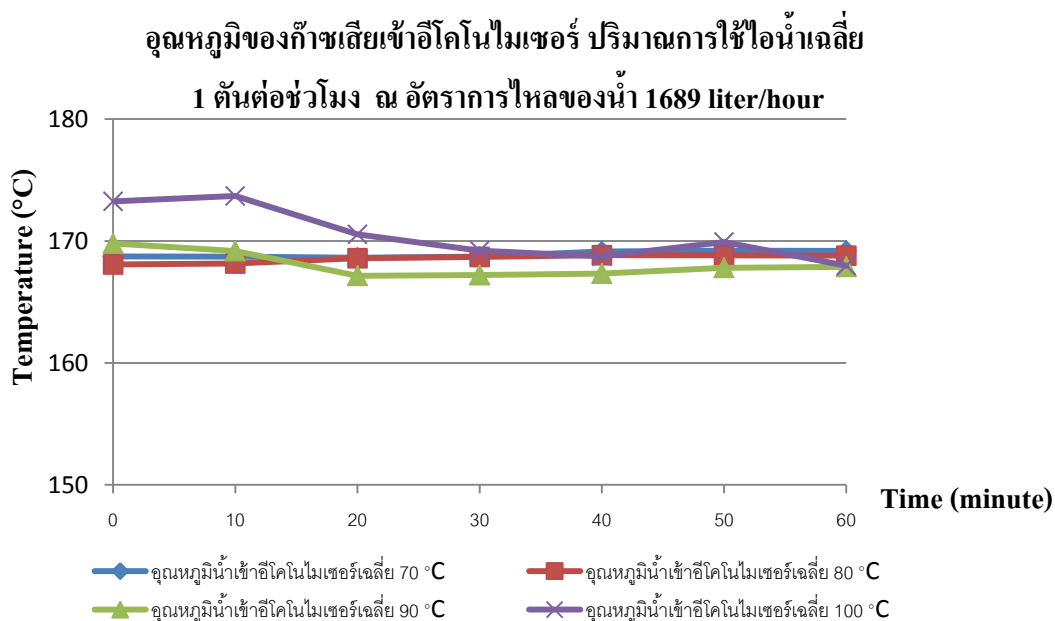
ภาพที่ 6.1 ถึง 6.8 เป็นผลการทดลองของการอุ่นน้ำป้อนด้วยอีโคโนไมเซอร์ ที่อัตราการเผาไหม้ไฟสูง ตลอดการทดลอง ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิก๊าซเสียเข้ามีค่าประมาณ 170 - 175°C ทั้งช่วงปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง ส่วนอุณหภูมิน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ โดยกำหนดอุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C จะเห็นว่า อีโคโนไมเซอร์สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนและเพิ่มอุณหภูมิน้ำได้เฉลี่ย 6 - 7 °C



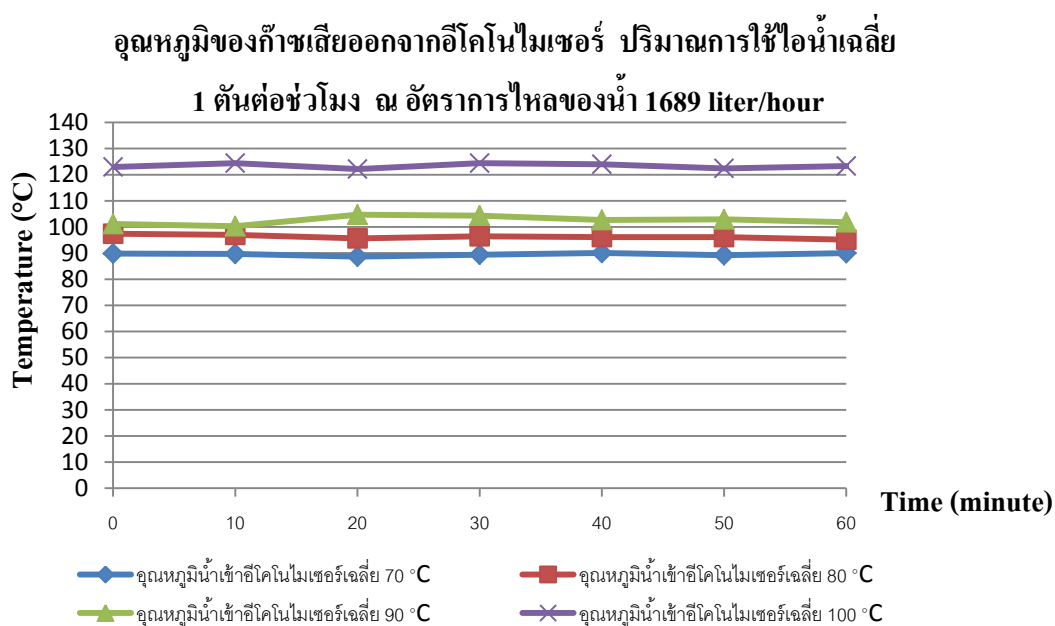
ภาพที่ 6.1 อุณหภูมิของน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง



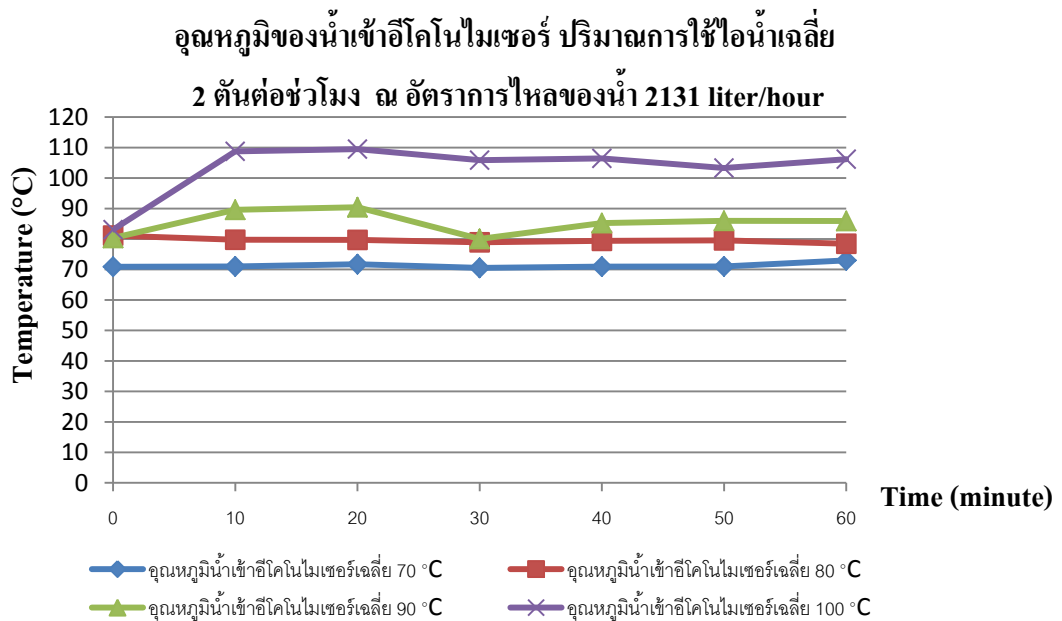
ภาพที่ 6.2 อุณหภูมิของน้ำออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง



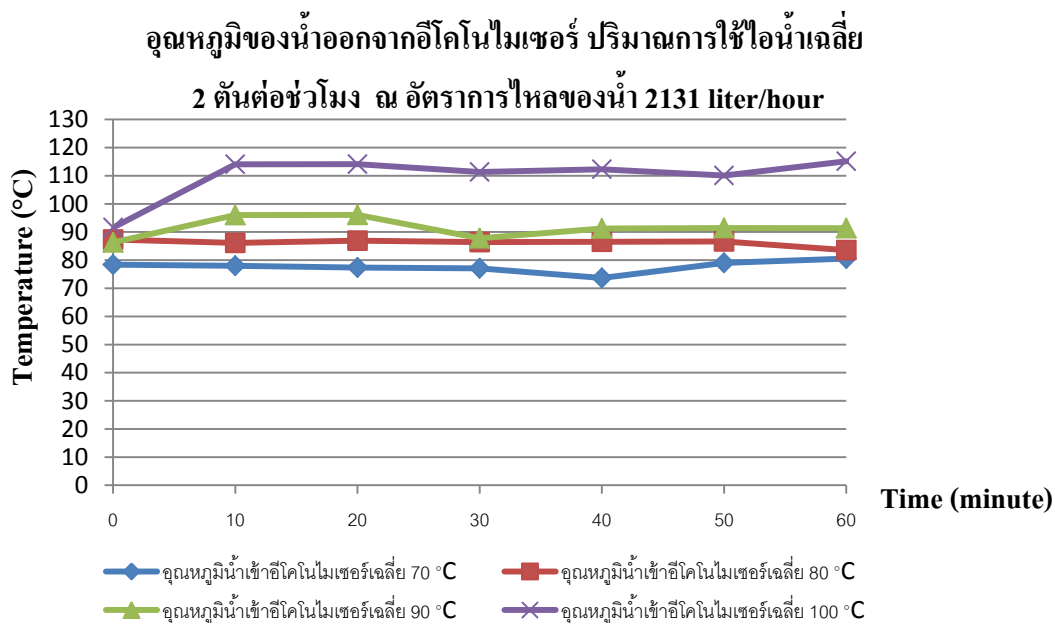
ภาพที่ 6.3 อุณหภูมิของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง



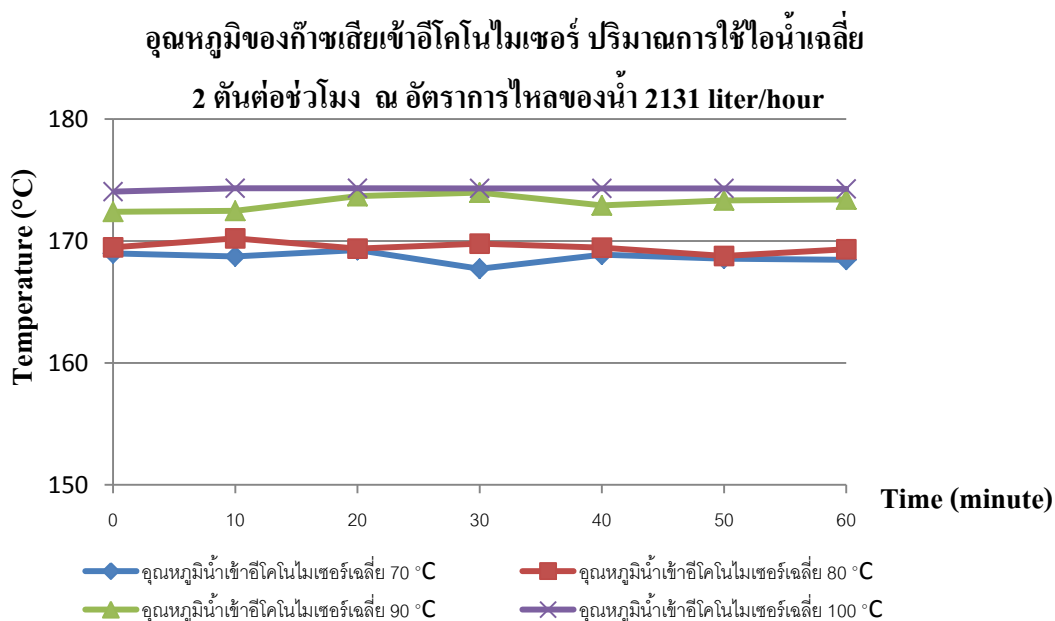
ภาพที่ 6.4 อุณหภูมิของก๊าซเสียออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง



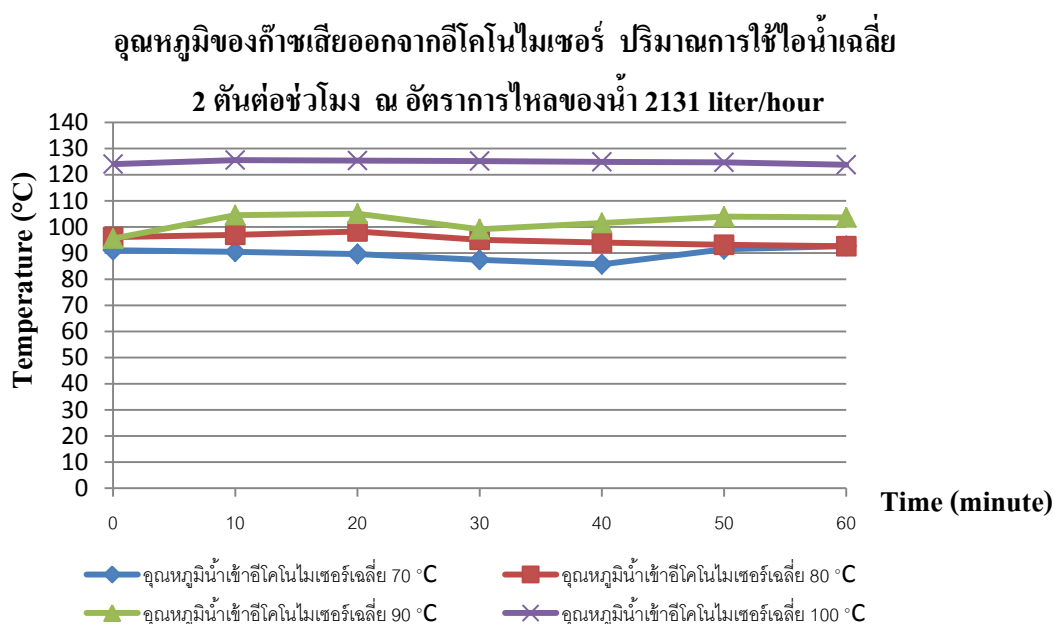
ภาพที่ 6.5 อุณหภูมิของน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 6.6 อุณหภูมิของน้ำออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 6.7 อุณหภูมิของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 6.8 อุณหภูมิของก๊าซเสียออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง

6.2 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

6.2.1 สมดุลของหม้อไอน้ำก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

การคำนวณสมดุลพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ ในแต่ละช่วงการทำงาน ของหม้อไอน้ำเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของหม้อไอน้ำก่อนการปรับปรุง ซึ่งพลังงานความร้อนเข้า ประกอบด้วย ความร้อนของเชื้อเพลิงและความร้อนของน้ำป้อน ส่วนพลังงานความร้อนออก ประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ ความร้อนสูญเสียของไอเสีย ความร้อนของไอน้ำ และความร้อนสูญเสียอื่นๆ โดยเราจะพิจารณาที่ความร้อนสูญเสียของไอเสียโดย ข้อมูลการตรวจวัดก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ แสดงไว้ในภาคผนวก ข

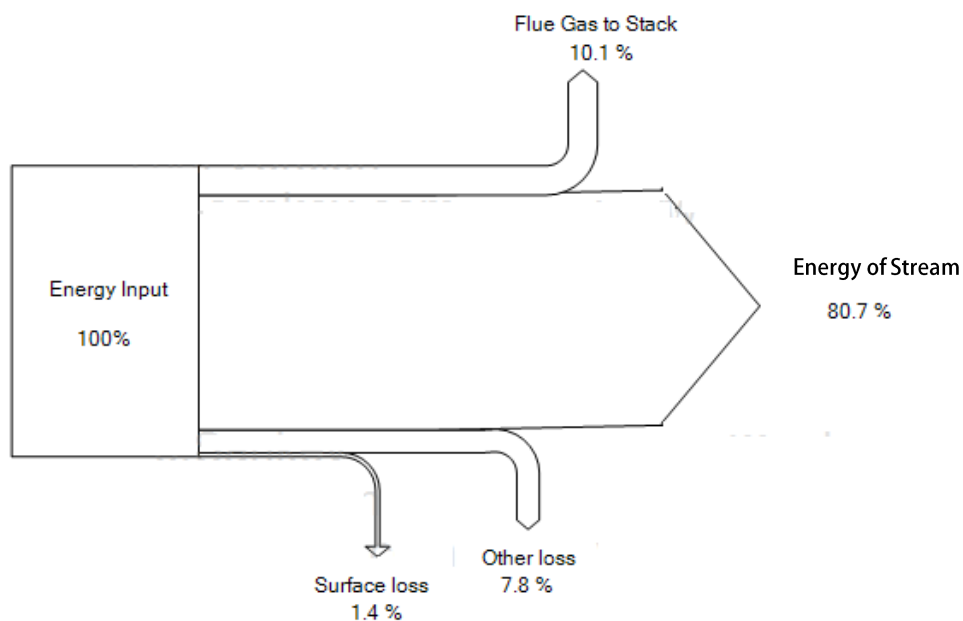
ตารางที่ 6.10 สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง

| พลังงาน | พลังงานความร้อน | คิดเป็น |
|---------------------------------|-----------------|------------|
| | kW/h | % |
| ความร้อนเข้า (Q in) | | |
| ความร้อนของเชื้อเพลิง | 1229.7 | 98.9 |
| ความร้อนของน้ำป้อน | 13.6 | 1.1 |
| รวมความร้อนเข้า | 1243.3 | 100 |
| ความร้อนออก (Q out) | | |
| ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ | 17.2 | 1.4 |
| ความร้อนสูญเสียของไอเสีย | 125.5 | 10.1 |
| ความร้อนของไอน้ำ | 1003.9 | 80.7 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 96.9 | 7.8 |
| รวมความร้อนออก | 1243.3 | 100 |

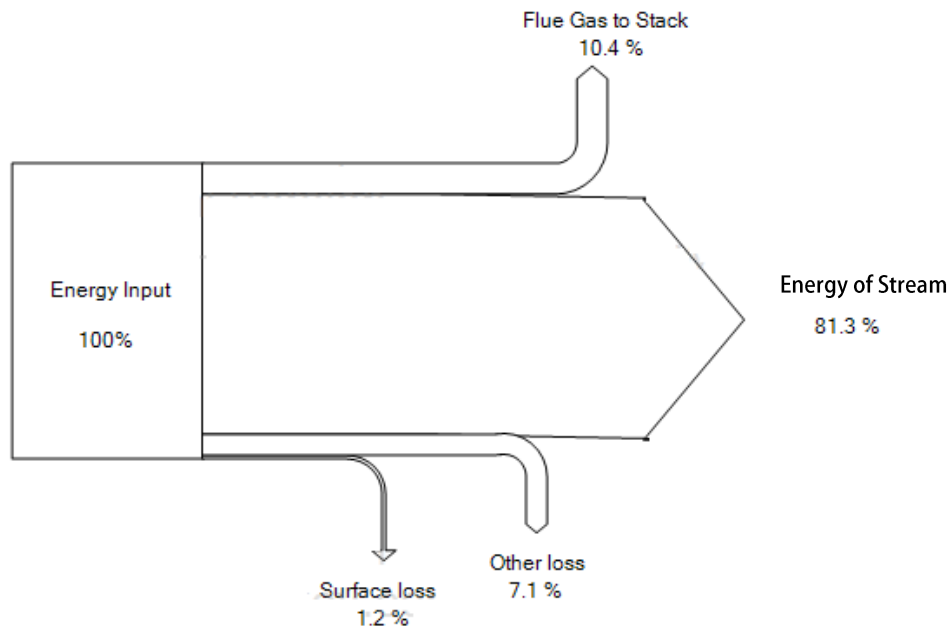
ตารางที่ 6.11 สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง

| พลังงาน | พลังงานความร้อน | คิดเป็น |
|---------------------------------|-----------------|------------|
| | kW/h | % |
| ความร้อนเข้า (Q in) | | |
| ความร้อนของเชื้อเพลิง | 1570.9 | 98.7 |
| ความร้อนของน้ำป้อน | 20.5 | 1.3 |
| รวมความร้อนเข้า | 1591.4 | 100 |
| ความร้อนออก (Q out) | | |
| ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ | 19 | 1.2 |
| ความร้อนสูญเสียของไอเสีย | 165.6 | 10.4 |
| ความร้อนของไอน้ำ | 1294.4 | 81.3 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 112.4 | 7.1 |
| รวมความร้อนออก | 1591.4 | 100 |

ข้อมูลจากตารางที่ 6.10 และ 6.11 สามารถนำมาเขียนในรูปแบบ Sankey diagram เพื่อสะดวกในการศึกษาสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ดังภาพที่ 6.9 ถึง 6.10



ภาพที่ 6.9 แชนจ์ที่ไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อ ชั่วโมง



ภาพที่ 6.10 แชนจ์ที่ไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อ ชั่วโมง

จากการทดลองก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟสูง (High fire) ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำ 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง มีพลังงานความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียประมาณ 10 % เมื่อพิจารณาพลังงานความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียช่วงปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน และพลังงานความของก๊าซเสียสามารถคำนวณได้จากปริมาณออกซิเจนที่ตรวจวัดจากเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซเสีย แสดงในภาคผนวก ข เมื่อแปลงปริมาณออกซิเจนเป็นปริมาณอากาศส่วนเกิน ซึ่งอธิบายการคำนวณไว้ในภาคผนวก ง ทำให้ทราบว่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่มากเกินไป จะทำให้อากาศส่วนที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จะนำพาความร้อนจากห้องเผาไหม้ปล่อยทิ้งทางปล่องก๊าซเสียมากขึ้นทำให้ก๊าซเสียที่ปล่อยทิ้งมีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 170°C) ซึ่งพอนำกลับมาใช้ได้ใหม่ โดยการนำไปเข้าอีโคโนไมเซอร์สำหรับอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อประหยัดพลังงานการใช้เชื้อเพลิงจากการเผาไหม้

6.2.2 สมดุลของหม้อไอน้ำหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

การทดลองมี 2 ครั้ง เราจะคำนวณสมดุลพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำ เพื่อเปรียบเทียบพลังงานความร้อนของหม้อไอน้ำหลังการปรับปรุงของช่วงการอัตราการเผาไหม้ไฟสูง (High fire) ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง โดยแบ่งช่วงอุณหภูมิน้ำที่เข้าอีโคโนไมเซอร์ให้มีการเปลี่ยนแปลงที่ ช่วงอุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C ตามลำดับโดยข้อมูลการตรวจวัดหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ แสดงไว้ในภาคผนวก ค

สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำ(หลังการปรับปรุง)

ตารางที่ 6.12 สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง

| พลังงาน | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % |
| ความร้อนเข้า (Q in) | | | | | | | | |
| ความร้อนของเชื้อเพลิง | 1180.0 | 95.4 | 1174.6 | 94.1 | 1152.5 | 93.0 | 1128.2 | 89.7 |
| ความร้อนของน้ำป้อน | 56.8 | 4.6 | 74.0 | 5.9 | 86.7 | 7.0 | 129.0 | 10.3 |
| รวมความร้อนเข้า | 1236.8 | 100 | 1248.6 | 100 | 1239.2 | 100 | 1257.2 | 100 |
| ความร้อนออก (Q out) | | | | | | | | |
| ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ | 10.6 | 0.9 | 10.1 | 0.8 | 9.2 | 0.7 | 7.3 | 0.6 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย | 85.0 | 6.9 | 84.1 | 6.7 | 81.6 | 6.6 | 77.8 | 6.2 |
| ความร้อนของไอน้ำ | 1018.4 | 82.3 | 1031.4 | 82.6 | 1036.3 | 83.6 | 1062.4 | 84.5 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 122.8 | 9.9 | 123.0 | 9.9 | 112 | 9.0 | 109.7 | 8.7 |
| รวมความร้อนออก | 1236.8 | 100 | 1248.6 | 100 | 1239.2 | 100 | 1257.2 | 100 |

เมื่อพิจารณาการทดลองครั้งที่ 1 ในช่วงอุณหภูมิน้ำเข้า อีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C พลังงานความร้อนเข้า ประกอบด้วย ความร้อนของเชื้อเพลิง มีค่าเป็น 95.4% 94.1% 93% และ 89.7% ตามลำดับ และพลังงานความร้อนของน้ำป้อน มีค่าเป็น 4.6% 5.9% 7% และ 10.3% ตามลำดับ ส่วนพลังงานความร้อนออก ประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ มีค่าเป็น 0.9% 0.8% 0.7% และ 0.6% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย มีค่าเป็น 6.9% 6.7% 6.6% และ 6.2% ตามลำดับ ความร้อนของไอน้ำ มีค่า 82.3% 82.6% 83.6% และ 84.5% ตามลำดับ และความร้อนสูญเสียอื่นๆ 9.9% 9.9% 9% และ 8.7% ตามลำดับดังตารางที่ 6.12

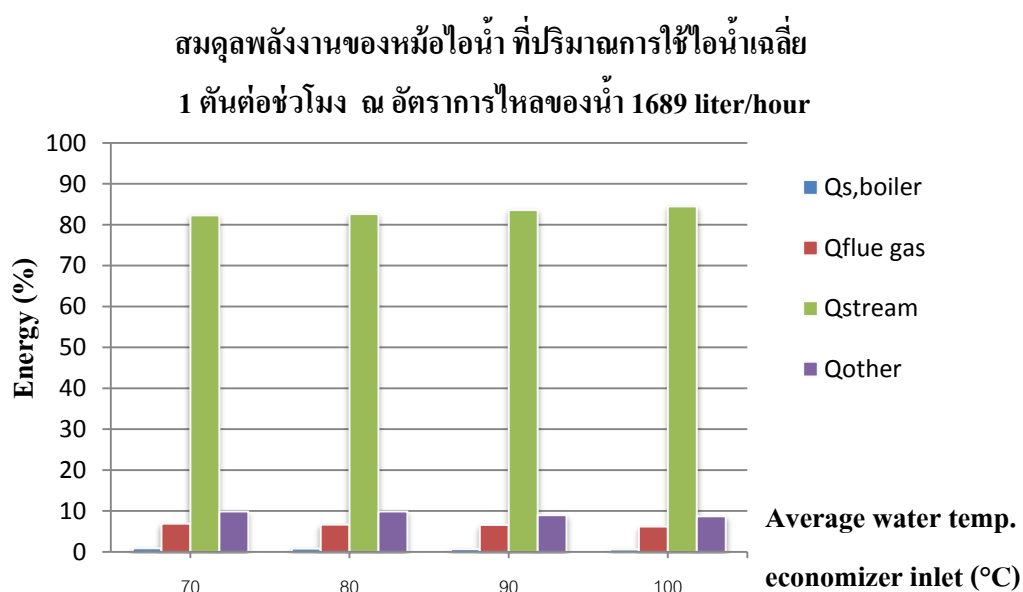
ตารางที่ 6.13 สมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง

| พลังงาน | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % |
| ความร้อนเข้า (Q in) | | | | | | | | |
| ความร้อนของเชื้อเพลิง | 1339.6 | 94.9 | 1336.7 | 93.9 | 1345.4 | 93.0 | 1343.0 | 90.3 |
| ความร้อนของน้ำป้อน | 71.9 | 5.1 | 86.3 | 6.1 | 101.6 | 7.0 | 144.0 | 9.7 |
| รวมความร้อนเข้า | 1411.5 | 100 | 1423.0 | 100 | 1447.0 | 100 | 1487.0 | 100 |
| ความร้อนออก (Q out) | | | | | | | | |
| ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ | 8.1 | 0.6 | 8.1 | 0.6 | 7.3 | 0.5 | 7.3 | 0.5 |
| ความร้อนสูญเสียของไอเสีย | 94.4 | 6.7 | 94.3 | 6.6 | 95.7 | 6.6 | 93.2 | 6.3 |
| ความร้อนของไอน้ำ | 1185.0 | 83.9 | 1197.0 | 84.1 | 1221.0 | 84.4 | 1280.1 | 86.1 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 124.0 | 8.8 | 123.6 | 8.7 | 123.0 | 8.5 | 106.4 | 7.2 |
| รวมความร้อนออก | 1411.5 | 100 | 1423.0 | 100 | 1447.0 | 100 | 1487.0 | 100 |

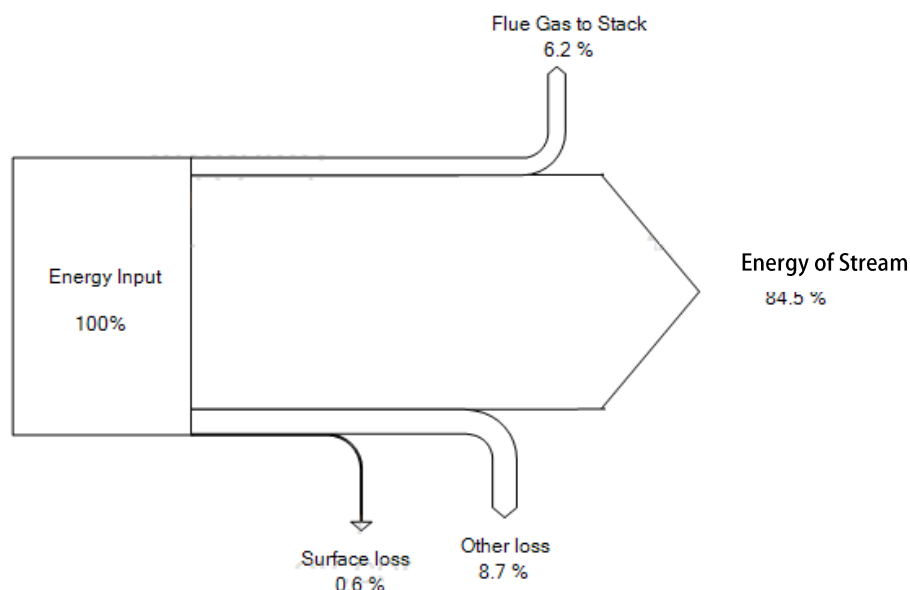
เมื่อพิจารณาการทดลองครั้งที่ 2 ในช่วงอุณหภูมิน้ำเข้า อีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C พลังงานความร้อนเข้า ประกอบด้วย ความร้อนของเชื้อเพลิง มีค่าเป็น 94.9% 93.9% 93% และ 90.3% ตามลำดับ และพลังงานความร้อนของน้ำป้อน มีค่าเป็น 5.1% 6.1% 7% และ 9.7% ตามลำดับ ส่วนพลังงานความร้อนออก ประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ มีค่าเป็น 0.6% 0.6% 0.5% และ 0.5% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย มีค่าเป็น 6.7% 6.6% 6.6% และ 6.3% ตามลำดับ ความร้อนของไอน้ำ มีค่าเป็น 83.9% 84.1% 84.4% และ 86.1% ตามลำดับ และความร้อนสูญเสียอื่นๆ 8.8% 8.7% 8.5% และ 7.2% ตามลำดับดังตารางที่ 6.13

พิจารณาทั้ง 2 การทดลอง จะเห็นว่าพลังงานเข้าทั้ง 2 ส่วนคือ ความร้อนของเชื้อเพลิงซึ่งเป็นพลังงานหลักและความร้อนของน้ำป้อน พบว่าสัดส่วนความร้อนของน้ำป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอุ่นน้ำป้อนให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ทำให้การใช้ความร้อนของเชื้อเพลิงน้อยลงส่วนพลังงานออก ความร้อนของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ส่งผลให้น้ำป้อนที่มีอุณหภูมิสูงใกล้จุดเดือดจะกลายเป็นไอน้ำเร็วขึ้น ทำให้อัตราการผลิตไอน้ำได้มากขึ้นและการใช้เชื้อเพลิงลดลง ตลอดจนความสูญเสียของก๊าซเสียและความร้อนสูญเสียอื่นๆ ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ข้อมูลจากตารางที่ 6.12 และ 6.13 สามารถนำมาเขียนในรูปแบบของแผนภูมิ และ Sankey diagram เพื่อสะดวกในการศึกษาสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ดังภาพที่ 6.11 ถึง 6.14

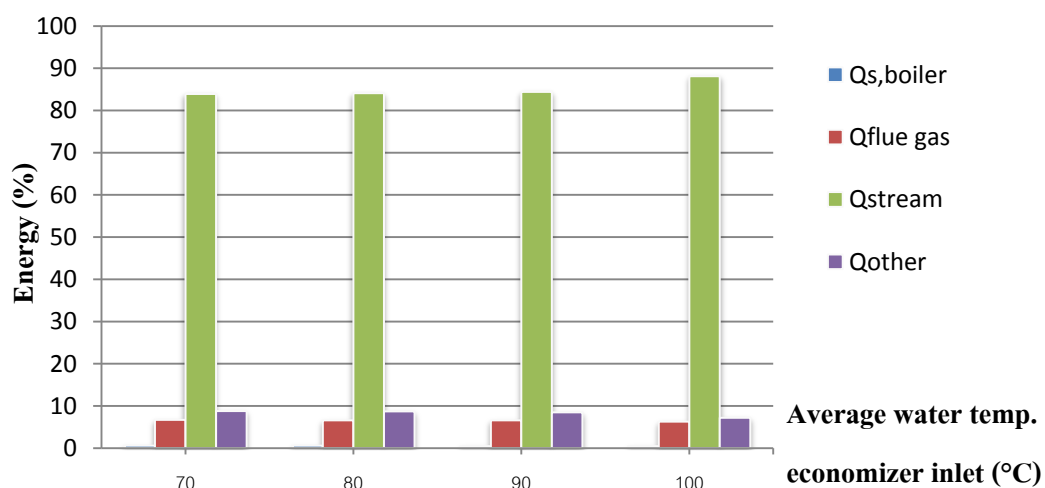


ภาพที่ 6.11 สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง

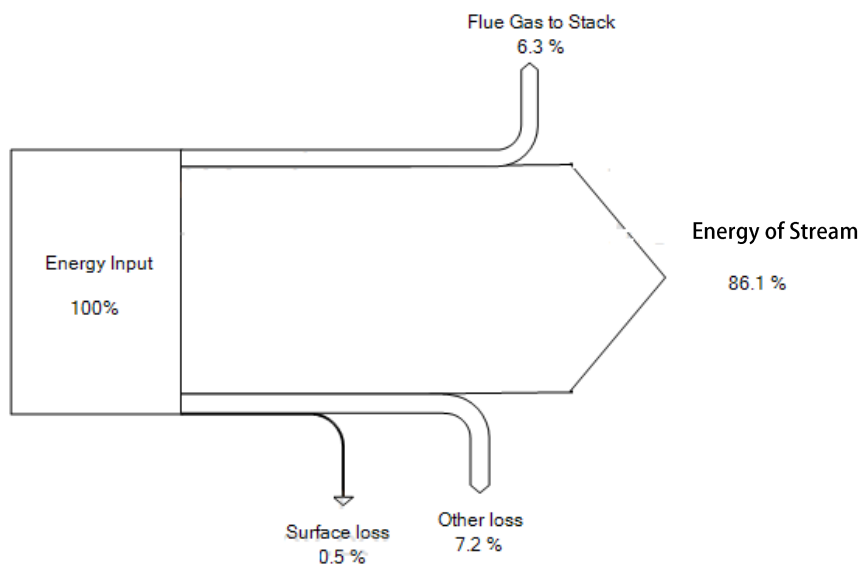


ภาพที่ 6.12 แชนจ์ที่ไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100 °C

สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย
2 ตันต่อชั่วโมง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2131 liter/hour



ภาพที่ 6.13 สมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 6.14 แสงกึ่งไดอะแกรมสมดุลพลังงานของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100 °C

6.2.3 สมดุลของอีโคโนไมเซอร์

การคำนวณสมดุลพลังงานความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ ในแต่ละช่วงการทำงานของหม้อไอน้ำซึ่งพลังงานความร้อนเข้า ประกอบด้วย ความร้อนของน้ำป้อนเข้าอีโคโนไมเซอร์และความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำ ส่วนพลังงานความร้อนออก ประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของผนังอีโคโนไมเซอร์ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียไปยังปล่อง ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ และความร้อนสูญเสียอื่นๆ โดยเราจะพิจารณาที่ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์โดยข้อมูลการตรวจวัดของอีโคโนไมเซอร์ แสดงไว้ในภาคผนวก ค

สมดุลความร้อนของอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ 6.14 สมดุลความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง

| พลังงาน | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
|--|------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % |
| ความร้อนเข้า (Q in) | | | | | | | | |
| ความร้อนของน้ำ | 71.8 | 45.8 | 88.0 | 51.1 | 112.2 | 57.9 | 163.8 | 69.8 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซ เสียจากหม้อไอน้ำ | 85.0 | 54.2 | 84.1 | 48.8 | 81.6 | 42.1 | 77.8 | 32.2 |
| รวมความร้อนเข้า | 156.8 | 100 | 172.1 | 100 | 193.8 | 100 | 241.7 | 100 |
| ความร้อนออก (Q out) | | | | | | | | |
| ความร้อนสูญเสียจากผนังอีโคโนไมเซอร์ | 1.0 | 0.6 | 1.0 | 0.6 | 1.1 | 0.5 | 0.2 | 0.1 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซ เสียไปยังปล่อง | 38.3 | 24.4 | 42.0 | 24.4 | 44.7 | 22.7 | 50.7 | 19.8 |
| ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ | 81.2 | 51.8 | 100.2 | 58.2 | 121.1 | 62.5 | 175.4 | 75.0 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 36.3 | 23.1 | 28.9 | 16.8 | 27.0 | 13.9 | 15.4 | 5.2 |
| รวมความร้อนออก | 156.8 | 100 | 172.1 | 100 | 193.8 | 100 | 241.7 | 100 |

เมื่อพิจารณาการทดลองครั้งที่ 1 พลังงานความร้อนเข้า ในช่วงอุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C ประกอบด้วย ความร้อนของน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ มีค่าเป็น 45.8% 51.1% 57.9% และ 69.8% ตามลำดับ และพลังงานความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำ มีค่าเป็น 46.4% 48.8% 42.1% และ 32.2% ตามลำดับ ส่วนพลังงานความร้อนออก ประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของผนังอีโคโนไมเซอร์ มีค่าเป็น 0.6% 0.6% 0.5% และ 0.1% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียไปยังปล่อง มีค่าเป็น 24.4% 24.4% 23.1% และ 19.8% ตามลำดับ ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ มีค่าเป็น 51.8% 58.2% 62.5% และ 75% ตามลำดับ และความร้อนสูญเสียอื่นๆ 23.1% 16.8% 13.9% และ 5.2% ตามลำดับดังตารางที่ 6.14

ตารางที่ 6.15 สมดุลความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ปริมาณไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อ ชั่วโมง

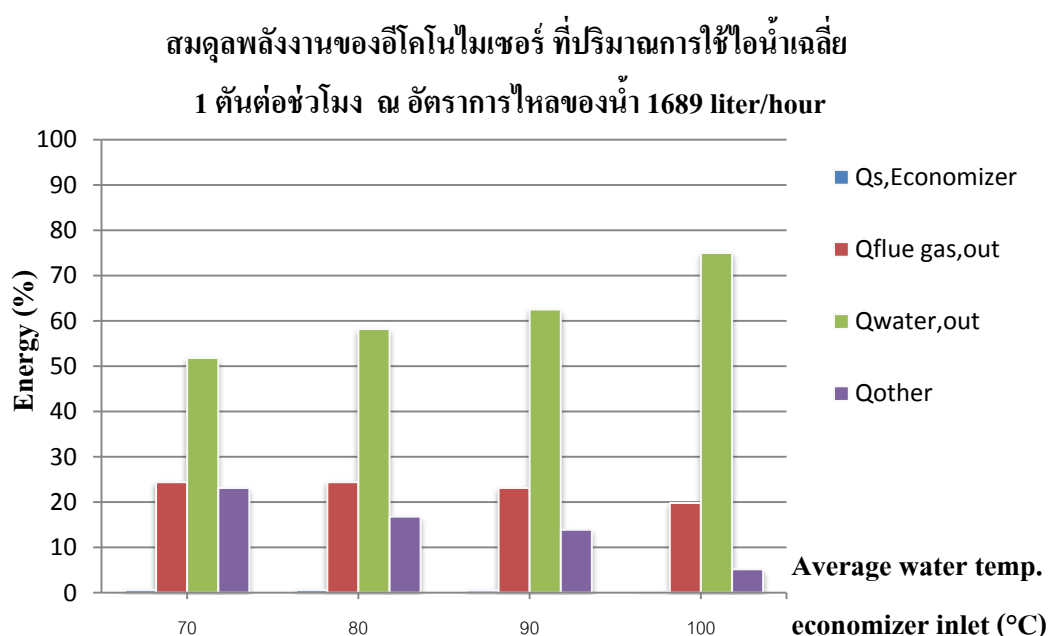
| พลังงาน | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
|--|------------------------------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % |
| ความร้อนเข้า (Q in) | | | | | | | | |
| ความร้อนของน้ำ | 102.7 | 52.1 | 121.9 | 56.4 | 136.1 | 58.7 | 186.3 | 66.7 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซ เสียจากหม้อไอน้ำ | 94.4 | 47.9 | 94.3 | 43.6 | 95.7 | 41.3 | 93.1 | 33.3 |
| รวมความร้อนเข้า | 197.1 | 100 | 216.2 | 100 | 231.8 | 100 | 279.4 | 100 |
| ความร้อนออก (Q out) | | | | | | | | |
| ความร้อนสูญเสียจากผนังอีโคโนไมเซอร์ | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.25 | 0.1 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซ เสียไปยังปล่อง | 42.8 | 21.7 | 46.4 | 21.5 | 52.75 | 22.8 | 60.6 | 21.7 |
| ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ | 111.7 | 56.7 | 130.7 | 60.5 | 144.0 | 62.1 | 201.8 | 72.3 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 42.1 | 21.4 | 38.7 | 17.9 | 35.0 | 14.9 | 16.6 | 6.0 |
| รวมความร้อนออก | 197.1 | 100 | 216.2 | 100 | 231.8 | 100 | 279.4 | 100 |

เมื่อพิจารณาการทดลองครั้งที่ 2 พลังงานความร้อนเข้า ในช่วงอุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C ประกอบด้วย ความร้อนของน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์ มีค่าเป็น 52.1% 56.4% 58.7% และ 66.7% ตามลำดับ และพลังงานความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำ มีค่าเป็น 47.9% 43.6% 41.3% และ 33.3% ตามลำดับ ส่วนพลังงานความร้อนออก ประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของผนังอีโคโนไมเซอร์ มีค่าเป็น 0.3% 0.2% 0.2% และ 0.1% ตามลำดับ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียไปยังปล่อง มีค่าเป็น 21.7% 21.5% 22.8% และ 21.7% ตามลำดับ ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ มีค่าเป็น 56.7% 60.5% 62.1% และ 72.3% ตามลำดับ และความร้อนสูญเสียอื่นๆ 21.4% 17.9% 15.1% และ 6% ตามลำดับดังตารางที่ 6.15

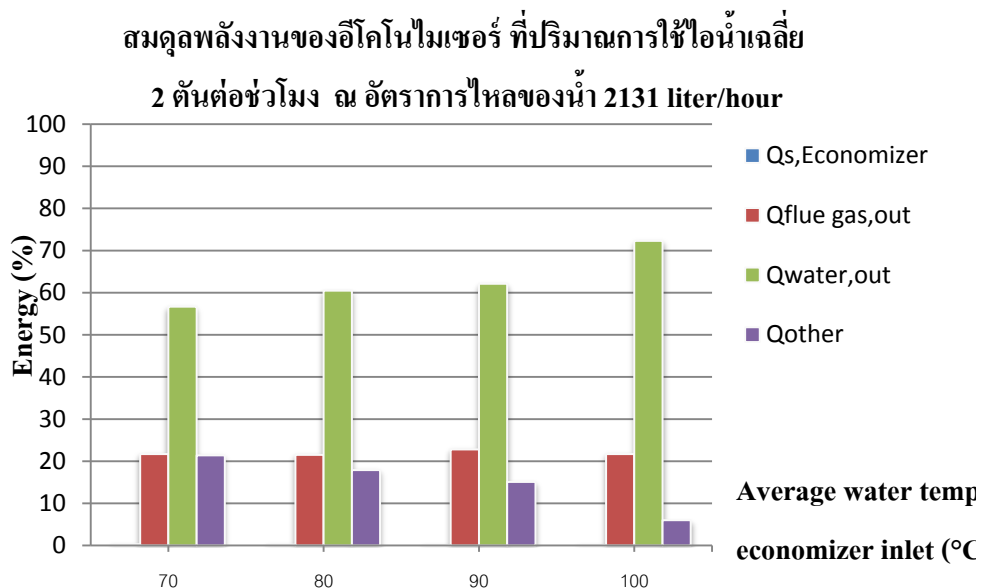
พิจารณาความร้อนเข้า ความร้อนของน้ำป้อนมีสัดส่วนมากกว่าความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจากหม้อไอน้ำ พบว่าอุณหภูมิน้ำป้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนให้สูงขึ้นก่อนเข้าหม้อไอน้ำ

ส่วนพลังงานออก เราจะพิจารณาความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ จะเห็นว่าสัดส่วนความร้อนของน้ำที่อุ่นได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์กับความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียที่ปล่อยออกจากหม้อไอน้ำ

ข้อมูลจากตารางที่ 6.14 และ 6.15 สามารถนำมาเขียนในรูปแบบของแผนภูมิเพื่อสะดวกในการเปรียบเทียบสมดุลพลังงานของอีโคโนไมเซอร์ ดังภาพที่ 6.15 ถึง 6.16



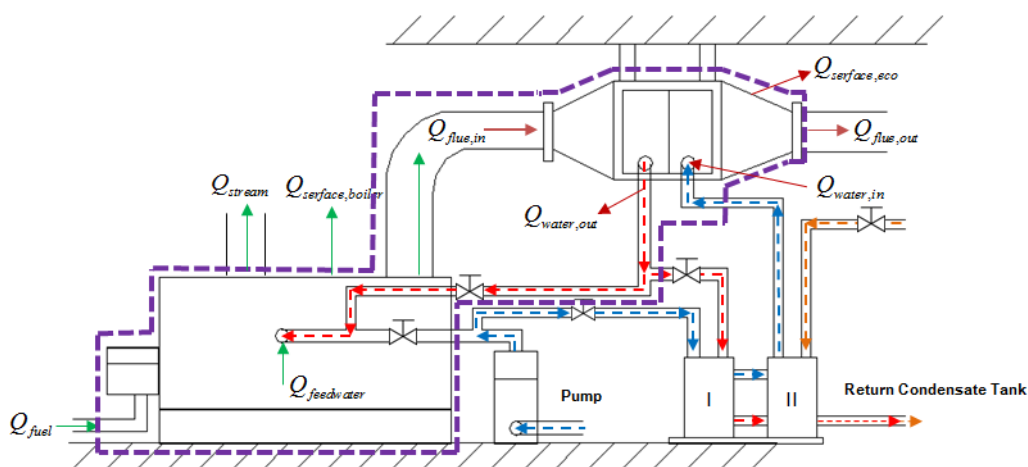
ภาพที่ 6.15 สมดุลพลังงานของอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง



ภาพที่ 6.16 สมดุลพลังงานของอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง

6.2.4 สมดุลความร้อนรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์

การอุ่นน้ำป้อนด้วยอีโคโนไมเซอร์ จะต้องใช้แหล่งพลังงานความร้อนเพื่อนำมาอุ่นน้ำป้อนด้วยกัน 3 แหล่ง คือ ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจากปล่องหม้อไอน้ำ ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์และความร้อนของไอน้ำที่นำมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ จากภาพที่ 6.17 แสดงปริมาณการควบคุมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ พิจารณาความร้อนของน้ำที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์และแบ่งไปอุ่นน้ำป้อนด้วยอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 (Plate Heat Exchanger I)



ภาพที่ 6.17 สมดุลพลังงานรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ 6.16 สมดุลความร้อนรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง

| พลังงาน | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
|---|------------------------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % |
| หม้อไอน้ำ | | | | | | | | |
| ความร้อนของเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำ | 1180.0 | 95.4 | 1174.6 | 94.1 | 1152.5 | 93.0 | 1128.2 | 89.7 |
| ความร้อนของน้ำป้อนเข้า | 56.8 | 4.6 | 74.0 | 5.9 | 86.7 | 7.0 | 129.0 | 10.3 |
| รวมความร้อนเข้า | 1236.8 | 100 | 1248.6 | 100 | 1239.2 | 100 | 1257.2 | 100 |
| ความร้อนสูญเสียของผนัง | 10.6 | 0.9 | 10.1 | 0.8 | 9.2 | 0.7 | 7.3 | 0.6 |
| ความร้อนของไอน้ำที่ผลิตได้ | 1018.4 | 82.3 | 1031.4 | 82.6 | 1036.3 | 83.6 | 1062.4 | 84.5 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียออกจากหม้อไอน้ำ | 85.0 | 6.9 | 84.1 | 6.7 | 81.6 | 6.6 | 77.8 | 6.2 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 122.8 | 9.9 | 123.0 | 9.9 | 112 | 9.0 | 109.7 | 8.7 |
| รวมความร้อนออก | 1236.8 | 100 | 1248.6 | 100 | 1239.2 | 100 | 1257.2 | 100 |
| อีโคโนไมเซอร์ | | | | | | | | |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ | 85.0 | 6.9 | 84.1 | 6.7 | 81.6 | 6.6 | 77.8 | 6.2 |
| น้ำป้อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ | 71.8 | 5.8 | 88.0 | 7.1 | 112.2 | 9.1 | 163.8 | 13.0 |
| รวมความร้อนเข้า | 156.8 | 12.7 | 172.1 | 13.8 | 193.8 | 15.6 | 241.7 | 19.2 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียไปยังปล่อง | 38.3 | 3.1 | 42.0 | 3.4 | 44.7 | 3.2 | 50.7 | 4.0 |
| ความร้อนสูญเสียของผนัง | 1.0 | 0.1 | 1.0 | 0.1 | 1.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 |
| ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ | 81.2 | 6.6 | 100.2 | 8.0 | 121.1 | 9.8 | 175.4 | 14.0 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 36.5 | 2.9 | 29.0 | 2.3 | 26.9 | 2.2 | 15.4 | 1.2 |
| รวมความร้อนออก | 156.8 | 12.7 | 172.1 | 13.8 | 193.8 | 15.6 | 241.7 | 19.2 |
| ความร้อนของน้ำที่เข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำตัวที่ 1 | 24.6 | 2.0 | 26.2 | 2.1 | 34.5 | 2.8 | 46.4 | 3.7 |

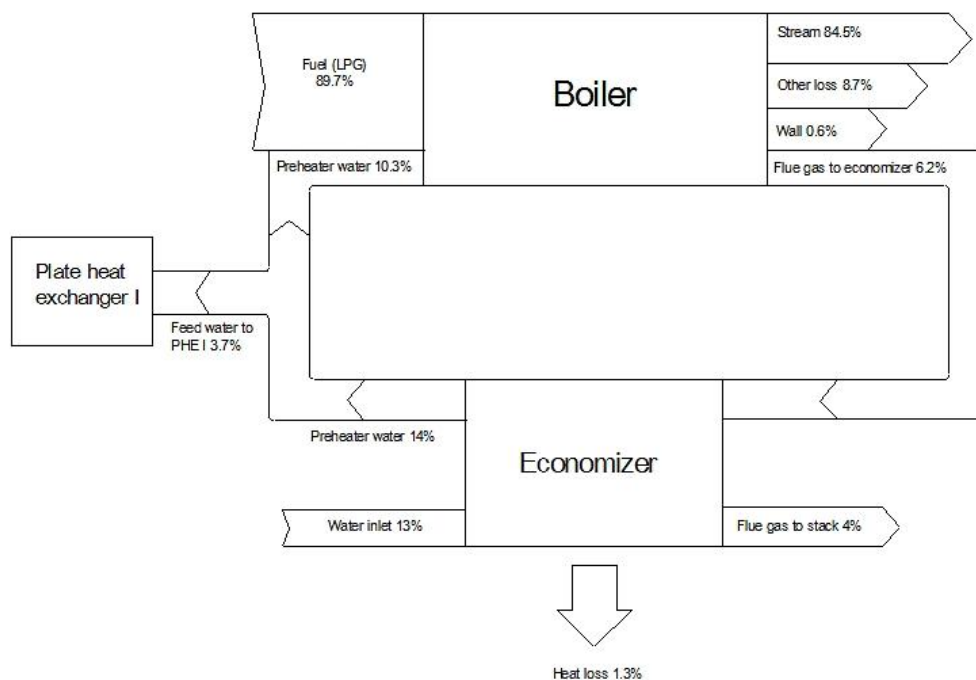
พิจารณาสมมูลพลังงานรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ช่วงปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100°C พบว่าความร้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1257.2 kW หรือคิดเป็น 100% ของความร้อนที่เข้าหม้อไอน้ำทั้งหมด โดยความร้อนที่เข้าหม้อไอน้ำประกอบด้วย 2 ส่วน คือความร้อนของเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 1128.2 kW คิดเป็น 89.7% และความร้อนของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 129 kW คิดเป็น 10.3% ส่วนความร้อนที่ออกจากหม้อไอน้ำ ประกอบด้วย 4 ส่วน คือความร้อนของไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 1062.4 kW คิดเป็น 84.5 % ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 7.3 kW คิดเป็น 0.6% ความร้อนสูญเสียอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 109.7 kW คิดเป็น 8.73% และความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย มีค่าเท่ากับ 77.8 kW คิดเป็น 6.2% เมื่อนำความร้อนของก๊าซเสียป้อนทิ้งไปอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำโดยใช้อีโคโนไมเซอร์ จะเห็นว่าความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจากอีโคโนไมเซอร์ไปยังปล่อง มีค่าเท่ากับ 50.7 kW คิดเป็น 4.0% ความร้อนของน้ำป้อนที่อุ่นได้ มีค่าเท่ากับ 175.4 kW คิดเป็น 14.0% และความร้อนของน้ำป้อนที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ไปยังอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 เพื่อถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำป้อนสูงพอที่ไม่ให้เกิดกรดกลั่นตัว มีค่าเท่ากับ 46.4 kW คิดเป็น 3.7% ส่วนพลังงานความร้อนช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 6.16

ตารางที่ 6.17 สมดุลความร้อนรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ช่วง High fire ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง

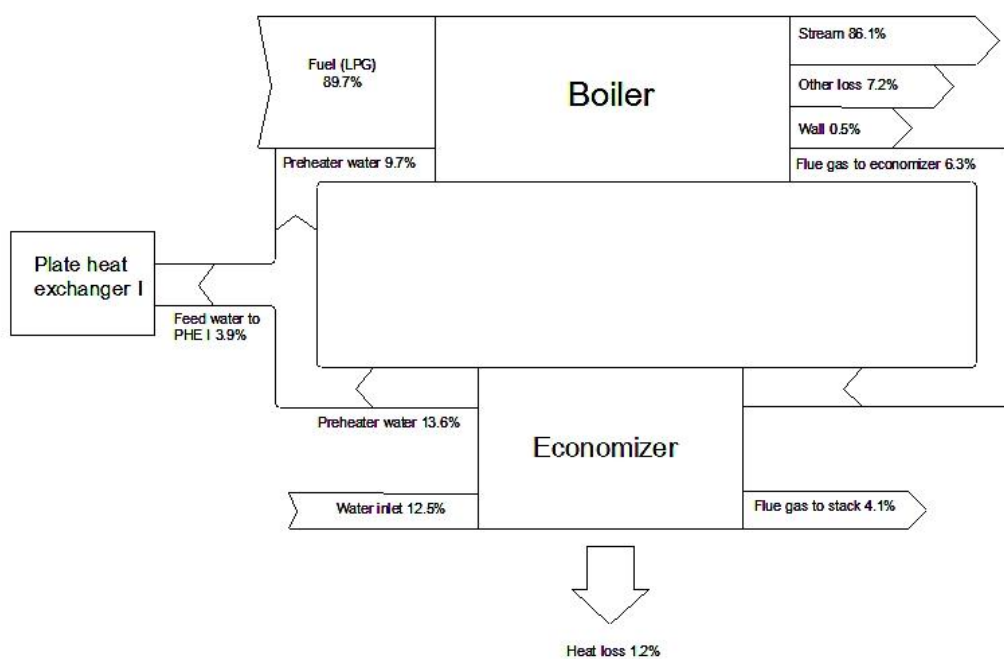
| พลังงาน | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
|---|------------------------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % | kW/h | % |
| หม้อไอน้ำ | | | | | | | | |
| ความร้อนของเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำ | 1339.6 | 94.9 | 1336.7 | 93.9 | 1345.4 | 93.0 | 1343.0 | 90.3 |
| ความร้อนของน้ำป้อนเข้า | 71.9 | 5.1 | 86.3 | 6.1 | 101.6 | 7.0 | 144.0 | 9.7 |
| รวมความร้อนเข้า | 1411.5 | 100 | 1423.0 | 100 | 1447.0 | 100 | 1487.0 | 100 |
| ความร้อนสูญเสียของผนัง | 8.1 | 0.6 | 8.1 | 0.6 | 7.3 | 0.5 | 7.3 | 0.5 |
| ความร้อนของไอน้ำที่ผลิตได้ | 1185.0 | 83.9 | 1197.0 | 84.1 | 1221.0 | 84.4 | 1280.1 | 86.1 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียออกจากหม้อไอน้ำ | 94.4 | 6.7 | 94.3 | 6.6 | 95.7 | 6.6 | 93.2 | 6.3 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 124.0 | 8.8 | 123.6 | 8.7 | 123.0 | 8.5 | 106.4 | 7.2 |
| รวมความร้อนออก | 1411.5 | 100 | 1423.0 | 100 | 1447.0 | 100 | 1487.0 | 100 |
| อีโคโนไมเซอร์ | | | | | | | | |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียเข้าอีโคโนไมเซอร์ | 94.4 | 6.7 | 94.3 | 6.6 | 95.7 | 6.6 | 93.1 | 6.3 |
| น้ำป้อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ | 102.7 | 7.3 | 122.0 | 8.6 | 136.1 | 9.4 | 186.3 | 12.5 |
| รวมความร้อนเข้า | 197.1 | 14.0 | 216.2 | 15.2 | 231.8 | 16.0 | 279.4 | 18.8 |
| ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียไปยังปล่อง | 42.8 | 3.0 | 46.4 | 3.3 | 38.9 | 3.7 | 60.6 | 4.1 |
| ความร้อนสูญเสียของผนัง | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.3 | 0.1 |
| ความร้อนของน้ำที่อุ่นได้ | 111.7 | 7.9 | 130.7 | 9.2 | 144.1 | 9.9 | 201.8 | 13.6 |
| ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 42.1 | 3.0 | 38.7 | 2.7 | 34.6 | 2.4 | 16.6 | 1.1 |
| รวมความร้อนออก | 197.1 | 14.0 | 216.2 | 15.2 | 231.8 | 16.0 | 279.4 | 18.8 |
| ความร้อนของน้ำที่เข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำตัวที่ 1 | 39.8 | 2.8 | 44.4 | 3.1 | 42.4 | 2.9 | 57.9 | 3.9 |

พิจารณาสมมูลพลังงานรวมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ช่วงปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง ที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100°C พบว่าความร้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1487 kWหรือคิดเป็น 100% ของความร้อนที่เข้าหม้อไอน้ำทั้งหมด โดยความร้อนที่เข้าหม้อไอน้ำประกอบด้วย 2 ส่วน คือความร้อนของเชื้อเพลิงเข้าหม้อไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 1343 kWคิดเป็น 90.3% และความร้อนของน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 144 kWคิดเป็น 9.7% ส่วนความร้อนที่ออกจากหม้อไอน้ำ ประกอบด้วย 4 ส่วน คือความร้อนของไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 1280.1 kWคิดเป็น 86.1 % ความร้อนสูญเสียของผนังหม้อไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 7.3 kWคิดเป็น 0.5% ความร้อนสูญเสียอื่นๆ มีค่าเท่ากับ 106.4 kWคิดเป็น 7.2% และความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย มีค่าเท่ากับ 93.2 kWคิดเป็น 6.3% เมื่อนำความร้อนของก๊าซเสียปล่อยทิ้งไปอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำโดยใช้อีโคโนไมเซอร์ จะเห็นว่าความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจากอีโคโนไมเซอร์ไปยังปล่อง มีค่าเท่ากับ 60.6 kWคิดเป็น 4.1% ความร้อนของน้ำป้อนที่อุ่นได้ มีค่าเท่ากับ 201.8 kWคิดเป็น 13.6% และความร้อนของน้ำป้อนที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ไปยังอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 มีค่าเท่ากับ 57.9 kWคิดเป็น 3.9% ส่วนพลังงานความร้อนช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยอื่นๆ มีค่าดังตารางที่ 6.17

จากการพิจารณาความร้อนของน้ำป้อนที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ที่แบ่งไปอุ่นน้ำป้อนด้วยอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 และนำไปอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ ทำให้ลดปริมาณการใช้ไอน้ำที่นำมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ พบว่าเมื่ออุณหภูมิของน้ำป้อนเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณการใช้ น้ำป้อนที่อุ่นได้จากอีโคโนไมเซอร์ที่แบ่งไปอุ่นน้ำป้อนด้วยอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 มากขึ้น และปริมาณการใช้ไอน้ำที่นำมาอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ลดลง



ภาพที่ 6.18 แชนจ์ที่ไดอะแกรมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมงที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100°C



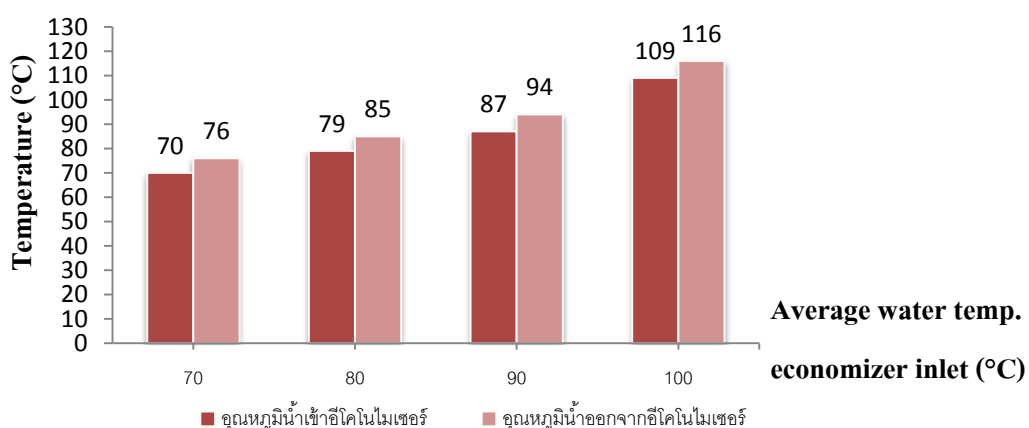
ภาพที่ 6.19 แชนจ์ที่ไดอะแกรมของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมงที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 100°C

6.3 อุณหภูมิของน้ำที่อุ่นได้และก๊าซเสีย

จากผลการทดลองของช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟต่ำ (Low fire) และช่วงอัตราการเผาไหม้ไฟสูง (High fire) ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง พบว่าอัตราไอน้ำที่ผลิตได้ช่วง Low fire มีปริมาณน้อย โดยแสดงข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำไว้ในภาคผนวก ข จึงไม่เหมาะกับการนำความร้อนของไอน้ำมาใช้หลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ดังนั้นในบทนี้ จะแสดงผลการทดลองอุณหภูมิของน้ำป้อนและก๊าซเสียทั้งเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาแสดงในรูปแบบของกราฟ เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำป้อนและก๊าซเสียที่เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ดังภาพที่ 6.1 ถึง 6.4

เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำ เข้า-ออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย

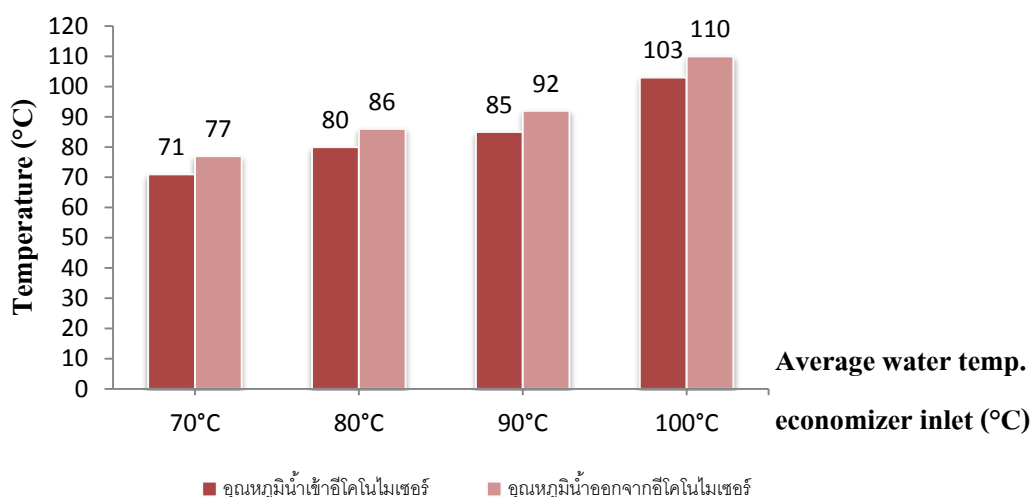
1 ตันต่อชั่วโมง ณ อัตราการไหลของน้ำ 1689 liter/hour



ภาพที่ 6.20 อุณหภูมิของน้ำป้อน เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง

เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำ เข้า-ออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย

2 ตันต่อชั่วโมง ณ อัตราการไหลของน้ำ 2131 liter/hour

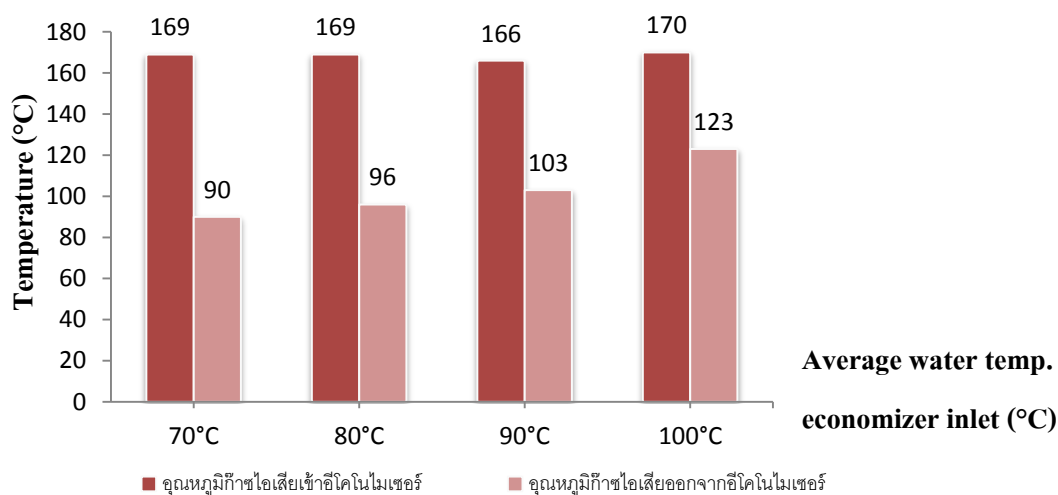


ภาพที่ 6.21 อุณหภูมิของน้ำป้อน เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง

พิจารณาภาพที่ 6.20 และ 6.21 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำเข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง โดยการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C พบว่าอีโคโนไมเซอร์สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนและสามารถเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำเท่ากับ 6°C, 6°C, 7°C และ 7°C ตามลำดับ สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง และ 6°C, 6°C, 7°C และ 7°C ตามลำดับ สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง จะเห็นว่าอีโคโนไมเซอร์สามารถอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำได้ประมาณ 6 - 7°C

เปรียบเทียบอุณหภูมิของก๊าซเสีย เข้า-ออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย

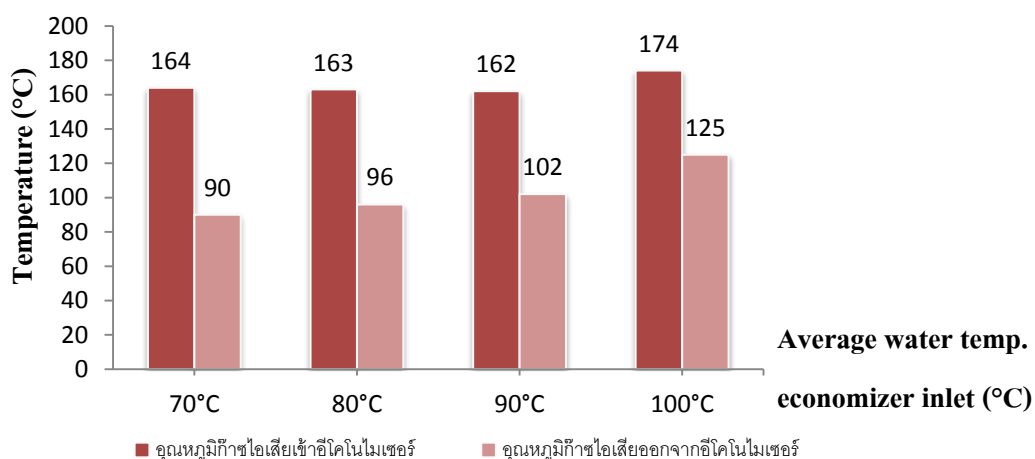
1 ตันต่อชั่วโมง ณ อัตราการไหลของก๊าซเสีย 1975 kg/hour



ภาพที่ 6.22 อุณหภูมิของก๊าซเสีย เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง

เปรียบเทียบอุณหภูมิของก๊าซเสีย เข้า-ออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย

2 ตันต่อชั่วโมง ณ อัตราการไหลของก๊าซเสีย 2169 kg/hour



ภาพที่ 6.23 อุณหภูมิของก๊าซเสีย เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง

พิจารณาภาพที่ 6.22 และ 6.23 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของก๊าซเสีย เข้าและออกจากอีโคโนไมเซอร์ ที่ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 และ 2 ตันต่อชั่วโมง โดยการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำ ที่อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C พบว่า หม้อไอน้ำปล่อยความร้อนก๊าซเสียที่อุณหภูมิเฉลี่ย 170 - 175°C เมื่อนำความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียกลับมาใช้และแลกเปลี่ยนความร้อนกับอีโคโนไมเซอร์ ทำให้อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ไปยังปล่อง เท่ากับ 90°C, 96°C, 103°C และ 123°C สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1 ตันต่อชั่วโมง และ 90°C, 96°C, 102°C และ 125°C ตามลำดับ สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 2 ตันต่อชั่วโมง จะเห็นว่า การอุ่นน้ำป้อนที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ไปยังปล่องลดลง ทำให้ความเสี่ยงของการเกิดกรดกลั่นตัวของก๊าซเสียบริเวณผิวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของ อีโคโนไมเซอร์มากขึ้น โดยอุณหภูมิของกรดกลั่นตัวของแก๊สปีโตรเลียมเหลว มีค่าเท่ากับ 54 °C

6.4 การเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง (Specific energy consumption)

จากผลการทดลองก่อนและหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ประกอบด้วยปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิง และน้ำป้อนโดยนำข้อมูลการตรวจวัดปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิง และน้ำป้อนข้อมูลตรวจวัดก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ แสดงไว้ในภาคผนวก ข และข้อมูลตรวจวัดหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ แสดงไว้ในภาคผนวก ค นำมาแสดงในรูปแบบของตารางเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยอัตราไอน้ำที่ผลิตได้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำ และอัตราการผลิตไอน้ำต่อเชื้อเพลิง แสดงไว้ดังตารางที่ 6.18 ถึง 6.20

ตารางที่ 6.18 อัตราไอน้ำผลิตได้สมมุทธ์และปฏิบัติ

| อัตราการ ใช้ไอน้ำ เฉลี่ย (ton/h) | อัตราการผลิตไอน้ำสมมุทธ์ (kg equivalent /h) และ อัตราไอน้ำผลิตได้จริง (kg/h) | | | | | | | | | |
|---|--|------|------------------------------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | ก่อนปรับปรุง | | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
| | สมมุทธ์ | จริง | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | | | สมมุทธ์ | จริง | สมมุทธ์ | จริง | สมมุทธ์ | จริง | สมมุทธ์ | จริง |
| 1 - 1.2 | 1249 | 1175 | 1347 | 1267 | 1367 | 1286 | 1368 | 1287 | 1383 | 1301 |
| 1.2 - 1.4 | 1457 | 1371 | 1478 | 1391 | 1499 | 1410 | 1511 | 1421 | 1542 | 1451 |
| 1.4 - 1.6 | 1665 | 1566 | 1610 | 1515 | 1630 | 1534 | 1653 | 1556 | 1701 | 1600 |
| 1.6 - 1.8 | 1873 | 1762 | 1742 | 1639 | 1761 | 1657 | 1796 | 1690 | 1860 | 1750 |

ตารางที่ 6.19 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำเปรียบเทียบระหว่างไม่มีการอุ่นน้ำป้อนและมีการอุ่นน้ำป้อนด้วยการใช้อิโคโนไมเซอร์ในทางทฤษฎีและปฏิบัติ

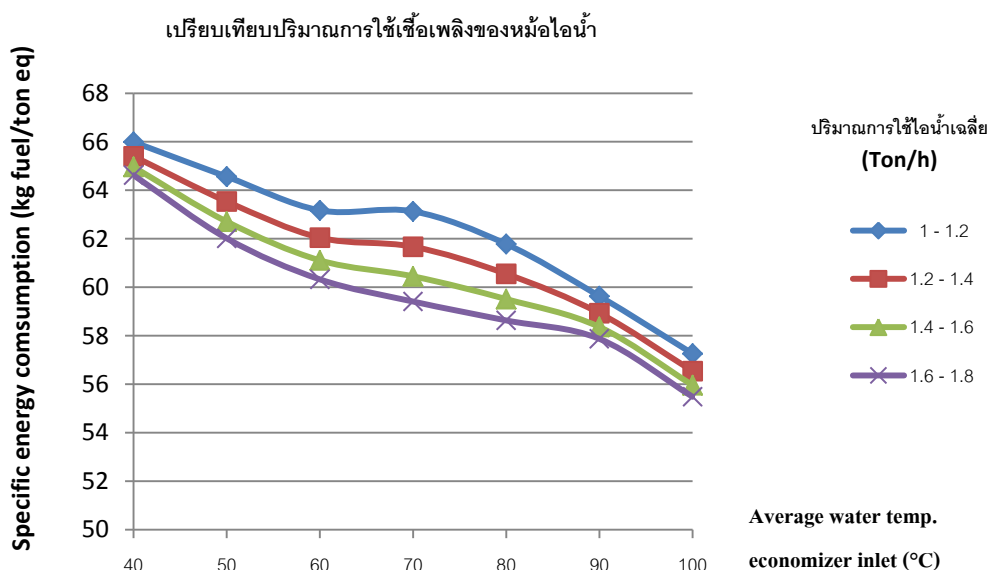
| ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย (Ton/h) | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำ (kg fuel /ton equivalent) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|---------|------------------------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| | ก่อนปรับปรุง | | อุณหภูมิน้ำเข้าอิโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
| | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | | | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | ทฤษฎี | ปฏิบัติ |
| 1 - 1.2 | 87.29 | 65.99 | 80.95 | 63.13 | 77.89 | 61.78 | 76.01 | 59.63 | 73.02 | 57.26 |
| 1.2 - 1.4 | 85.13 | 65.40 | 79.14 | 61.67 | 76.73 | 60.55 | 74.79 | 58.93 | 71.33 | 56.54 |
| 1.4 - 1.6 | 83.50 | 64.96 | 77.63 | 60.45 | 75.76 | 59.51 | 73.79 | 58.36 | 69.96 | 55.96 |
| 1.6 - 1.8 | 82.24 | 64.62 | 76.35 | 59.41 | 74.94 | 58.63 | 72.94 | 57.87 | 68.82 | 55.48 |

ตารางที่ 6.20 อัตราการผลิตไอน้ำต่อเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ

| ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย (Ton/h) | อัตราการผลิตไอน้ำต่อเชื้อเพลิง (kg equivalent /kg fuel) | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|---------|------------------------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| | ก่อนปรับปรุง | | อุณหภูมิน้ำเข้าอิโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | | | | | |
| | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | 70°C | | 80°C | | 90°C | | 100°C | |
| | | | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | ทฤษฎี | ปฏิบัติ | ทฤษฎี | ปฏิบัติ |
| 1 - 1.2 | 11.46 | 15.15 | 12.35 | 15.84 | 12.84 | 16.19 | 13.16 | 16.77 | 13.70 | 17.46 |
| 1.2 - 1.4 | 11.75 | 15.29 | 12.64 | 16.22 | 13.03 | 16.52 | 13.37 | 16.97 | 14.02 | 17.69 |
| 1.4 - 1.6 | 11.98 | 15.39 | 12.88 | 16.54 | 13.20 | 16.80 | 13.55 | 17.14 | 14.29 | 17.87 |
| 1.6 - 1.8 | 12.16 | 15.48 | 13.10 | 16.83 | 13.34 | 17.06 | 13.71 | 17.28 | 14.53 | 18.02 |

การอุ่นน้ำป้อนของหม้อไอน้ำ มีอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ไม่สม่ำเสมอและไม่มีการระบายน้ำออกจากหม้อไอน้ำ (Blow down) เราจะคำนวณปริมาณการใช้ไอน้ำเป็นปริมาณไอน้ำอิ่มตัวแห้งในหน่วยกิโลกรัมที่ผลิตขึ้นได้ใน 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 100°C โดยเรียกว่าอัตราการผลิตไอน้ำสมมูล ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 6.18 สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำระหว่างไม่มีการอุ่นน้ำป้อนและการอุ่นน้ำป้อนด้วยการใช้อิโคโนไมเซอร์ ดังตารางที่ 6.19 และอัตราการผลิตไอน้ำต่อเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำดังตารางที่ 6.20

พิจารณาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อตันไอน้ำดังตารางที่ 6.20 จะเห็นว่าปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจริง มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการใช้เชื้อเพลิงทางทฤษฎี หลังจากติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ทำให้ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก่อนการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำสามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำได้ดังภาพที่ 6.24



ภาพที่ 6.24 เปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ

จากการเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิงข้างต้น ดังตารางที่ 6.19 พบว่าการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยการใช้อีโคโนไมเซอร์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การประหยัดเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 6.21

ตารางที่ 6.21 ผลการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง

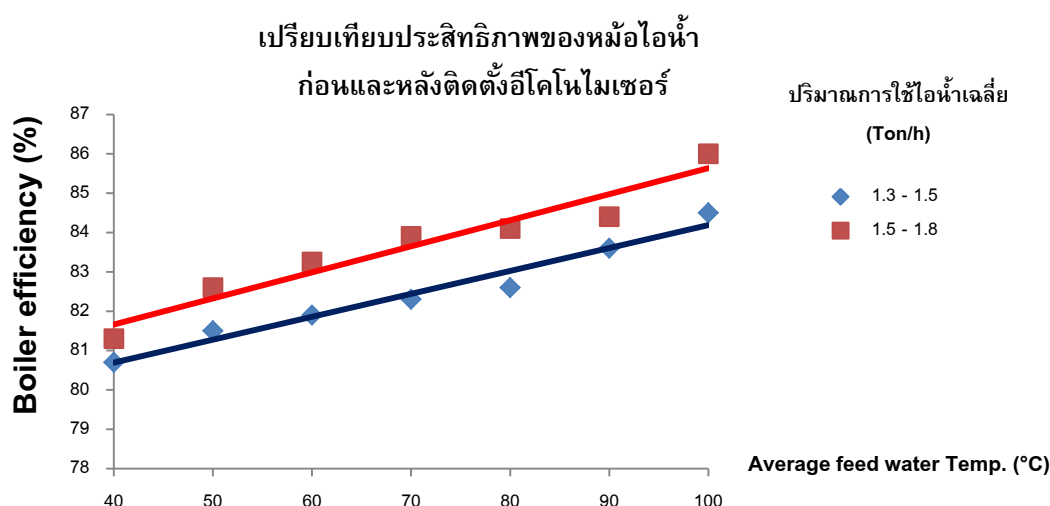
| ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย (Ton/h) | การประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง (%) | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------|------|-------|
| | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | |
| | 70°C | 80°C | 90°C | 100°C |
| 1 - 1.2 | 4.3 | 6.3 | 9.6 | 13.2 |
| 1.2 - 1.4 | 5.7 | 7.4 | 9.8 | 13.5 |
| 1.4 - 1.6 | 6.9 | 8.3 | 10.1 | 13.8 |
| 1.6 - 1.8 | 8.0 | 9.2 | 10.4 | 14.1 |

6.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (Boiler Efficiency)

จากการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์กับปล่องหม้อไอน้ำ เพื่ออุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำพบว่าประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์เท่ากับ 80.7% (ก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์) เป็น 82.3%, 82.6%, 83.6% และ 84.5% (หลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์) ตามลำดับ สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1.2–1.5 ตันต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเท่ากับ 81.3% (ก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์) เป็น 83.9%, 84.1%, 84.4% และ 86.0% (หลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์) ตามลำดับ สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1.5 – 1.8 ตันต่อชั่วโมง เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานความร้อนสูญเสียบางส่วนลดลงและส่งผลให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 6.22

ตารางที่ 6.22 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ

| ปริมาณการใช้ไอน้ำ (Ton/h) | Boiler Efficiency (%) | | | | |
|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------|------|-------|
| | ก่อนการ ปรับปรุง | อุณหภูมิน้ำเข้าหม้อไอน้ำเฉลี่ย | | | |
| | | 70°C | 80°C | 90°C | 100°C |
| 1.3 - 1.5 | 80.7 | 82.3 | 82.6 | 83.6 | 84.5 |
| 1.5 - 1.8 | 81.3 | 83.9 | 84.1 | 84.4 | 86.0 |



ภาพที่ 6.25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำก่อนและหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

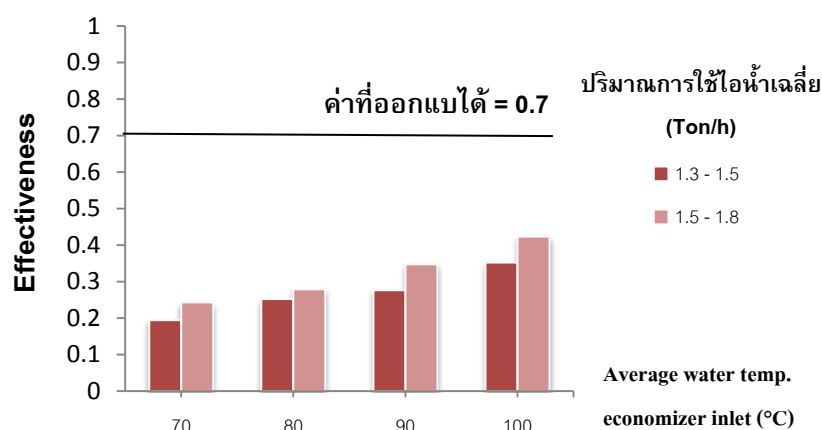
6.6 การเปรียบเทียบประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์ (Effectiveness)

จากผลการทดลองของอีโคโนไมเซอร์ที่ติดตั้งบริเวณปล่องไอเสียของหม้อไอน้ำ และคำนวณสมมูลพลังงานของอีโคโนไมเซอร์จะเห็นว่า การอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ สามารถเพิ่มประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์ เท่ากับ 0.194, 0.252, 0.276 และ 0.352 ตามลำดับ สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1.3 – 1.5 ตันต่อชั่วโมง และ 0.243, 0.279, 0.347 และ 0.423 สำหรับปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย 1.5 – 1.8 ตันต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิผลของการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ทางทฤษฎี มีค่าเท่ากับ 0.7 เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกแบบ มีค่าเท่ากับ 230°C แต่จากการเก็บข้อมูลของอุณหภูมิก๊าซเสียจริง มีค่าเท่ากับ 170°C ซึ่งคลาดเคลื่อนจากการค่าที่ออกแบบ ทำให้ประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์จริงคลาดเคลื่อนจากค่าที่ออกแบบ ดังตารางที่ 6.23

ตารางที่ 6.23 ประสิทธิภาพของอีโคโนไมเซอร์

| ปริมาณการใช้ไอน้ำเฉลี่ย (Ton/h) | Effectiveness | | | | |
|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|-------|-------|-------|
| | ค่าที่ออกแบบได้ | อุณหภูมิน้ำเข้าอีโคโนไมเซอร์เฉลี่ย | | | |
| | | 70°C | 80°C | 90°C | 100°C |
| 1.3 - 1.5 | 0.7 | 0.194 | 0.252 | 0.276 | 0.352 |
| 1.5-1.8 | | 0.243 | 0.279 | 0.347 | 0.423 |

เปรียบเทียบระหว่างประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์จริงและทฤษฎี



ภาพที่ 6.26 การเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์จริงและค่าที่ออกแบบได้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

ดังรายละเอียดที่กล่าวมาจากบทที่ 1-6 ได้อภิปรายพร้อมการแสดงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล สำหรับบทนี้จะเป็นการสรุปผล พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะสำหรับขยายผลการศึกษาในอนาคตต่อไป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและการออกแบบอีโคโนไมเซอร์โดยใช้ความร้อนปล่อยทิ้งจากหม้อไอน้ำ โดยหม้อไอน้ำมีขนาด 3 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งนำข้อมูลทางทฤษฎีมาใช้กับสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนหรืออีโคโนไมเซอร์และติดตั้งจริง จากนั้นวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลการใช้พลังงานและผลการประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำที่ติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

ผลสรุปจากงานวิจัย

1. การออกแบบอีโคโนไมเซอร์ ใช้วิธี NTU-Method ซึ่งผลการออกแบบคือ การออกแบบเป็นการไหลแบบสวนทางกันสองกลับ (Cross counter flow two pass heat exchanger) โดยให้ก๊าซเสียไหลภายนอกท่อแลกเปลี่ยนความร้อนและน้ำไหลตัดกันภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนสอง ที่มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 19 mm ความหนา 1.5 mm ความยาว 0.8 m จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมด 396 ท่อ วางแถวละ 18 ท่อจำนวน 22 แถว จัดเรียงท่อแบบแนวเอียงกัน (Staggered) โดยมีระยะห่างระหว่างท่อในแนวตั้งฉาก (Transverse Pitch, S_T) และระยะห่างระหว่างท่อในแนวขนานกับการไหล (Longitudinal Pitch, S_L) เท่ากับ 1.75 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เท่ากับ 33.25 mm ระยะห่างระหว่างท่อในแนวทแยง (Diagonal Pitch, S_D) เท่ากับ 37.17 mm วัสดุท่อใช้ Stainless steel 316 พบว่า ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ประมาณ 10% และอุณหภูมิก๊าซเสียเฉลี่ยประมาณ 170 °C หลังจากติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ ที่บริเวณปล่องไอเสีย สามารถลดความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียจาก 10% เป็น 6% และประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงได้ประมาณ 14 %

2. ผลการอุ่นน้ำป้อนของอีโคโนไมเซอร์ สามารถเพิ่มอุณหภูมิการอุ่นน้ำป้อนได้ 6 ถึง 7°C เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบอีโคโนไมเซอร์ทางทฤษฎี เท่ากับ 15°C

3. ผลของอัตราการผลิตไอน้ำต่อเชื้อเพลิงหลังการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์เพิ่มขึ้นเท่ากับ 18.02 เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ มีค่าเท่ากับ 15.48

4. การติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ที่บริเวณปล่องไอเสียเพื่อนำความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียกลับมาใช้ประโยชน์ซึ่งเป็นวิธีเพิ่มประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำและลดความร้อนสูญเสียได้ดี หลังจากการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์กับหม้อไอน้ำแล้ว ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 81% เป็น 86% และประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์เท่ากับ 0.423 แต่ค่าที่ออกแบบเท่ากับ 0.7 เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกแบบ มีค่าเท่ากับ 230°C แต่จากการเก็บข้อมูลอุณหภูมิก๊าซเสียของหม้อไอน้ำจากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 170°C ซึ่งคลาดเคลื่อนจากการค่าที่ออกแบบไว้ ทำให้ประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์จากการทดลองคลาดเคลื่อนจากค่าที่ออกแบบ

5. ผลของความดันสูญเสียภายในท่อหลังไหลผ่านอีโคโนไมเซอร์ เท่ากับ 10 KPa เมื่อเปรียบเทียบกับความดันสูญเสียภายในท่อที่ออกแบบไว้ เท่ากับ 0.01 KPa ซึ่งคลาดเคลื่อนกันมาก เนื่องจากเกิดความดันสูญเสียย่อยในท่อ (Minor losses) เช่น การไหลของของไหลที่ทางเข้าและทางออกของท่อที่มีการเปลี่ยนความเร็วอย่างรวดเร็วในท่อ การเปลี่ยนทิศทางการไหล และการไหลผ่านลิ้น (valve) มีการไหลเลี้ยวตัวผ่านกลไกของลิ้น ทำให้มีการเสียดสีมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความดันสูญเสียมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบ

6. การออกแบบอีโคโนไมเซอร์โดยวิธี NTU-Method เป็นวิธีที่เหมาะสมกับการออกแบบอีโคโนไมเซอร์เพื่อสร้างและใช้งานจริง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองไม่ใกล้เคียงกับผลที่ออกแบบ เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซเสียและอัตราการไหลของน้ำไม่ใกล้เคียงกันกับค่าที่ออกแบบไว้ พบว่าปัจจัยสำคัญของการออกแบบและสร้างอีโคโนไมเซอร์ คือ อัตราการไหล อุณหภูมิของน้ำและก๊าซเสียที่เข้าสู่อีโคโนไมเซอร์ อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน ขนาดของอีโคโนไมเซอร์ ระยะห่างระหว่างท่อ รวมถึงช่องว่างภายในอีโคโนไมเซอร์ วัสดุที่ใช้สร้าง และความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยต่อไป

1. ควรเก็บข้อมูลระยะเวลาการทำงานของหม้อไอน้ำให้นานมากขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้เก็บข้อมูลในช่วงระยะเวลาที่สั้น เนื่องจากหม้อไอน้ำของโรงพยาบาลที่ทำการศึกษายังไม่พร้อมสำหรับใช้งาน ทำให้ระยะเวลาการเก็บข้อมูลน้อย เนื่องจากค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างสูง

2. ควรศึกษาเพิ่มเติมกับการติดครีป (Fin) บริเวณรอบๆท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะช่วยให้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น

ประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์เพิ่มขึ้นและขนาดของอีโคโนไมเซอร์เล็กลง แต่ควรระมัดระวังค่าใช้จ่ายในการสร้างเนื่องจากท่อติดครีบน้ำขนาดเล็ก มีราคาสูง และการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว บริเวณร่องครีบน้ำ ซึ่งอาจทำให้อายุการใช้งานของอีโคโนไมเซอร์ลดลง

3. ควรศึกษาองค์ประกอบของก๊าซเสียที่ปล่อยทิ้ง ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ซึ่งผลการวิจัยพบว่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยมาก ทำให้การกัดกร่อนน้อยและอายุการใช้งานของอีโคโนไมเซอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูงกว่า เช่น น้ำมันเตา เป็นต้น

4. ข้อมูลจากงานวิจัย สามารถนำไปพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อสะดวกในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนหรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่ต้องการนำความร้อนของก๊าซเสียกลับมาใช้ เช่น โปรแกรม MATLAB เป็นต้น

5. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความร้อนของก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์และออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากอุณหภูมิที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ยังสูงอยู่ (ประมาณ 125°C) ซึ่งสามารถนำความร้อนปล่อยทิ้งนี้ไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้อีก

6. ควรศึกษาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนที่มีลักษณะรูปแบบการไหลชนิดต่างๆ เพื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยนี้และสามารถนำไปออกแบบและสร้างอีโคโนไมเซอร์ที่มีประสิทธิผลเพิ่มมากขึ้น

7. งานวิจัยนี้มีการอุ่นน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ด้วยความร้อนของไอน้ำที่แบ่งมาจากไอน้ำที่ผลิตได้จากหม้อไอน้ำ จากผลการวิจัยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าหม้อไอน้ำสามารถทำให้ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้งานวิจัยนี้การทดลองจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิของน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ โดยการใช้ไอน้ำเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำป้อนสูงกว่าอุณหภูมิกรดกลั่นตัวของก๊าซเสียก่อนไหลผ่านอีโคโนไมเซอร์ ทำให้ปริมาณไอน้ำที่นำมาอุ่นน้ำป้อนไม่มากเกินไป โดยอุณหภูมิกรดกลั่นตัวของก๊าซปิโตรเลียมเหลว เท่ากับ 54°C เพื่อลดความเสี่ยงของการเกิดกรดกลั่นตัวของก๊าซเสีย อุณหภูมิน้ำป้อนก่อนเข้าอีโคโนไมเซอร์ควรมากกว่าอุณหภูมิกรดกลั่นตัวของก๊าซเสียประมาณ 20°C

รายการอ้างอิง

- [1] ธนกร ณ พัทลุง (2009), แนวทางการประเมินพลังงานความร้อนที่มีในก๊าซร้อนทิ้งและแนวทางการนำกลับมาใช้โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลวหรืออีโคโนไมเซอร์.
- [2] Su Thet Mon Than, Khin Aung Lin, Mi Sandar Mon . Heat Exchanger Design 2008.
- [3] Somkiat Boonnasa, The effect of waste heat recovery efficiency on the cost reduction of the electric generation fueled by a paddy husk.
- [4] Tanongkiat Kiatsiriroat, Heat transfer characteristic of cross flow heat exchanger using crimped spiral fins a case study of staggered arrangement.
- [5] Isares Dhuchakallaya, Second-Law Based Thermodynamic Optimization of Cross Flow Heat Exchangers 2003.
- [6] Soylemez, On the Optimum Heat Exchanger Sizing for Heat Recovery, Energy Conversion & Management, Vol.41,pp.1419-1427. 2000.
- [7] Aegalux Supakpanyapong, Taveewat Suparos, Pichet Pinit, Energy Saving in Small Boiler by Tube Bank Feed Water Heater.
- [8] วรฤติ มั่นสกุล, สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และพงษ์ธร จรรย์ญากรณ์, การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม. 2544.
- [9] โอบัติ กกกำแหง, การคำนวณประสิทธิภาพทางความร้อนของหม้อไอน้ำ. จุลสารก๊าซไลน์ (PTT) ฉบับที่ 75, 2552.
- [10] Yunus A.Cengel, Heat Transfer A Practical Approach Second Edition in SI Unit. pp.389-393, 431-434, 667-697. 2004.
- [11] Frank P.Incropera, David P.Dewitt, Introduction to Heat Transfer 4th ed, pp. 392-401, 459-469 , 605-643. 2002.
- [12] Roshsenow, W.M., Harnett, J.P and Ganic, E.N., Handbook of Heat Transfer Applications. New York, McGraw-Hill, 1985.
- [13] Bruce R.Munson, Donald F.Young, Theodore H. Okiishi. Fundamental of Fluid Mechanics 5th ed. 2006.
- [14] สมศรี จรุงเรือง, ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยหน้า 1-389, 2542.
- [15] Wiriya Chotekhan, efficiency improvement of ladle preheating by using oxy burner.
- [16] Thitiya plianmanee, pilot development of water temperature control prior to entering the economizer to prevent acid condensation. 2012

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการออกแบบอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการออกแบบอีโคโนไมเซอร์ทางทฤษฎี

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--|--------------|-------------------|-------------------------|
| เชื้อเพลิง LPG | | | |
| โพรเพน | C_3H_8 | % | 50 |
| บิวเทน | C_4H_{10} | % | 50 |
| ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง LPG | LHV | MJ/kg | 46.607 |
| ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง LPG | HHV | MJ/kg | 50.152 |
| ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง | m_f | kg/hr | 114 |
| ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิง | ρ_{LPG} | kg/m ³ | 0.5463 |
| อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม | T_a | °C | 30 |
| ก๊าซเสีย | | | |
| ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ | CO | ppm | < 250 |
| อากาศส่วนเกิน | | % | 30 |
| อัตราการไหลก๊าซเสีย | \dot{m}_f | kg/s | 0.67 |
| อุณหภูมิก๊าซเสีย | $T_{f,i}$ | °C | 230 |
| อุณหภูมิก๊าซเสียหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ | $T_{f,o}$ | °C | 141 |
| ความร้อนจำเพาะของก๊าซเสียเฉลี่ย | Cp_{flue} | J/kg-K | 1052 |
| ค่าความหนาแน่น | ρ | kg/m ³ | 0.7569 |
| ค่าความหนืด | μ | kg/m-s | 2.3345×10^{-5} |
| ค่าการนำความร้อน | k | W/m-K | 0.0355 |
| Prandtl number | Pr | | 0.7353 |
| น้ำป้อน | | | |
| อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า | $T_{w,i}$ | °C | 110 |
| อุณหภูมิน้ำป้อนที่ต้องการ | $T_{w,o}$ | °C | 125 |
| อัตราการไหล | \dot{m}_w | kg/s | 0.957 |
| ความร้อนจำเพาะของน้ำป้อน | Cp_{water} | J/kg-K | 4235 |
| ค่าความหนาแน่น | ρ | kg/m ³ | 945 |
| ค่าความหนืด | μ | kg/m-s | 2.366×10^{-4} |
| ค่าการนำความร้อน | k | W/m-K | 0.6828 |
| Prandtl number | Pr | | 1.468 |

ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณและออกแบบอีโคโนไมเซอร์ทางทฤษฎี

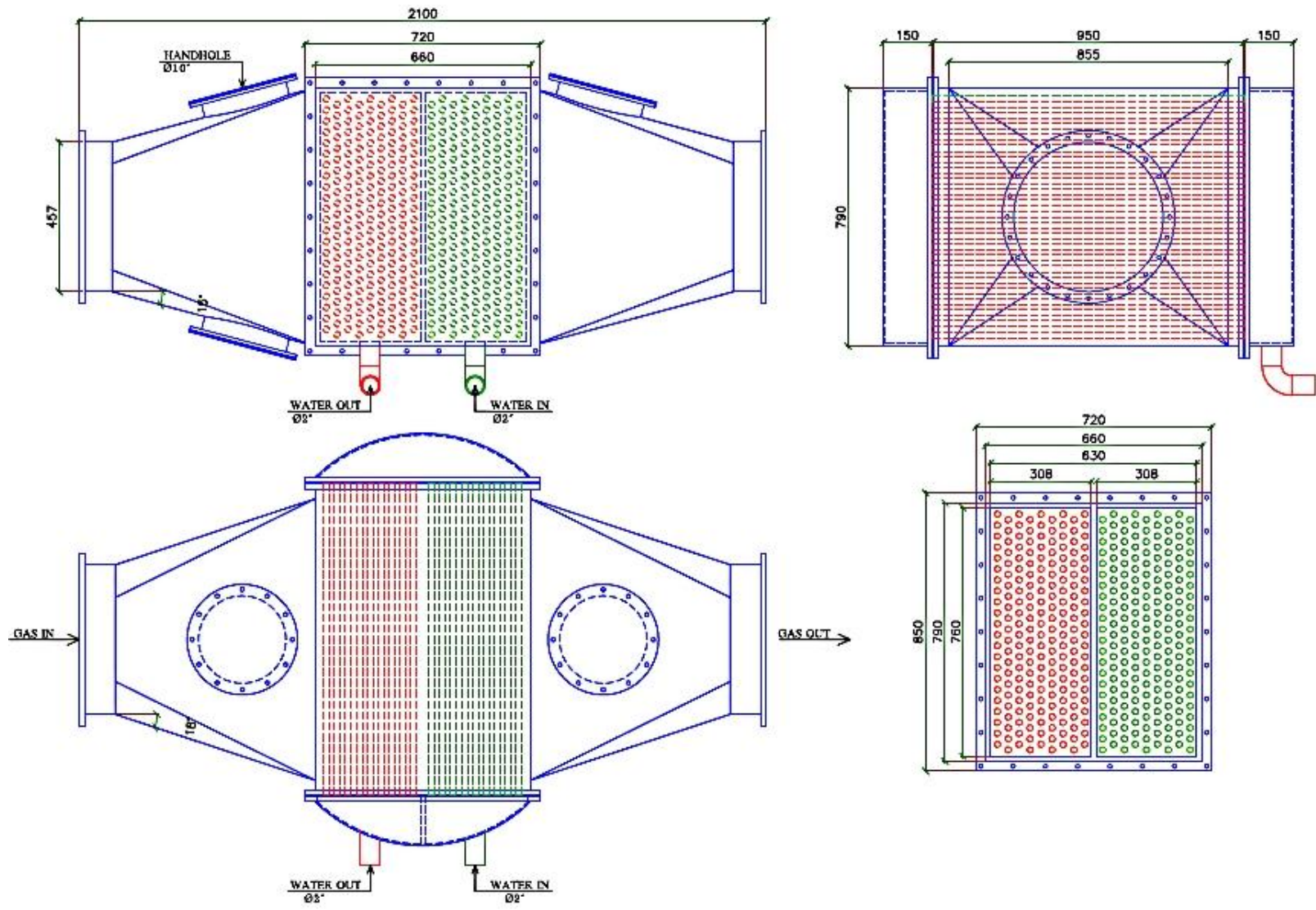
| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--|---------------|-----------|---------|
| อัตราการจุกความร้อนของไหลเย็น(น้ำป้อน) | C_c | W/K | 4053 |
| อัตราการจุกความร้อนของไหลร้อน(ก๊าซเสีย) | C_h | W/K | 689 |
| อัตราการจุกความร้อนน้อยสุด | C_{min} | W/K | 689 |
| อัตราการจุกความร้อนสูงสุด | C_{max} | W/K | 4053 |
| อัตราการถ่ายเทความร้อนที่แท้จริง | Q_a | W | 60790 |
| อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด | Q_{max} | W | 82651 |
| Cmin/Cmax | C | | 0.1699 |
| ประสิทธิภาพของเครื่อง | \mathcal{E} | % | 0.7 |
| ตัวเลขหน่วยการถ่ายเท | NTU | | 1.397 |
| ขนาดท่อ | OD | mm | 19 |
| ความหนาของท่อ | t | mm | 1.5 |
| จำนวนท่อต่อแถว | N_L | | 18 |
| จำนวนแถว | N_T | | 22 |
| ความยาวท่อ | L | m | 0.8 |
| ค่าความหยาบของผิวท่อ | e | mm | 0.046 |
| ขนาดปล่องก๊าซเสีย | | m | 0.4572 |
| ค่าการนำความร้อนของท่อ (stainless steel 316) | k | W/m-K | 16.3 |
| Fouling factor ด้านน้ำ | $R_{f,i}$ | m^2-K/W | 0.0002 |
| Fouling factor ด้านก๊าซเสีย | $R_{f,o}$ | m^2-K/W | 0.0004 |
| สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม | U | W/m^2-K | 53.5 |
| พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมด | A | m^2 | 18.91 |
| ความเร็วน้ำในท่อ | V_w | m/s | 0.02422 |
| ความเร็วก๊าซเสียนอกท่อ | V_{max} | m/s | 3.31 |
| Reynolds number น้ำในท่อ | Re_D | | 3251 |
| Reynolds number ก๊าซเสียนอกท่อ | Re_D | | 2022 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนน้ำในท่อ | h_i | W/m^2-K | 613 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนก๊าซเสียนอกท่อ | h_o | W/m^2-K | 63 |
| Transverse Pitch (1.75 x OD) | S_T | mm | 33.25 |
| Longitudinal Pitch (1.75 x OD) | S_L | mm | 33.25 |
| Diagonal Pitch | S_D | mm | 37.17 |
| ความดันตกของก๊าซเสียนอกท่อ | ΔP_o | kPa | 0.023 |
| ความดันตกของน้ำในท่อ | ΔP_i | kPa | 0.010 |

ตารางที่ ก.3 ผลการออกแบบฮีโคโนไมเซอร์ที่สร้างและติดตั้งบริเวณปล่องของหม้อไอน้ำ

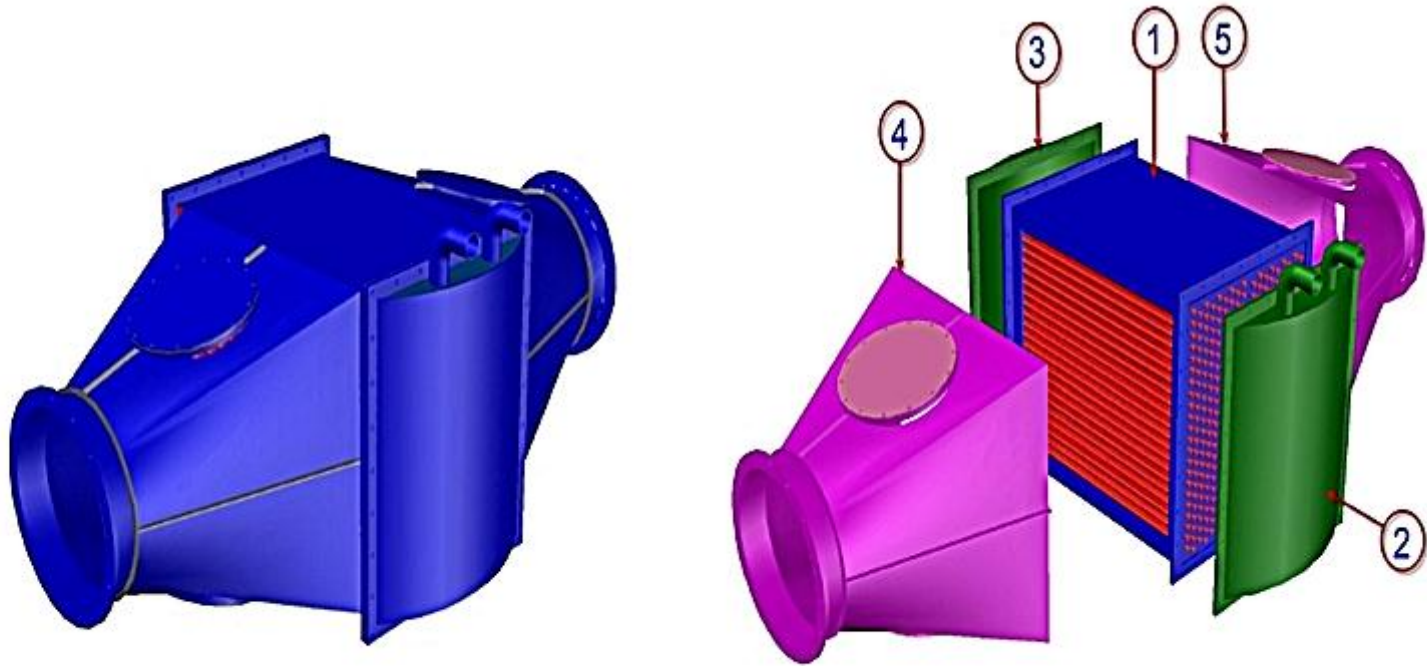
| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--|---------------|---------------------|--------|
| อัตราการไหลของน้ำป้อน | \dot{m}_w | kg/s | 0.953 |
| อัตราการไหลของก๊าซเสีย | \dot{m}_f | kg/s | 0.67 |
| อุณหภูมิน้ำที่เข้าฮีโคโนไมเซอร์ | $T_{w,i}$ | °C | 110 |
| อุณหภูมิก๊าซเสียที่เข้าฮีโคโนไมเซอร์ | $T_{f,i}$ | °C | 230 |
| อุณหภูมิน้ำที่ออกจากฮีโคโนไมเซอร์ | $T_{w,o}$ | °C | 125 |
| อุณหภูมิก๊าซเสียที่ออกจากฮีโคโนไมเซอร์ | $T_{f,o}$ | °C | 141 |
| ประสิทธิผลของฮีโคโนไมเซอร์ | ε | | 0.7 |
| ตัวเลขหน่วยการถ่ายเท | NTU | | 1.397 |
| ขนาดท่อ | OD | mm | 19 |
| ความหนาของท่อ | t | mm | 1.5 |
| จำนวนท่อต่อแถว | N_L | | 18 |
| จำนวนแถว | N_T | | 22 |
| ความยาวท่อ | L | m | 0.8 |
| จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน | n | tubes | 396 |
| ขนาดปล่องก๊าซเสีย | | m | 0.4572 |
| พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมด | A | m ² | 18.91 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนน้ำในท่อ | h_i | W/m ² -K | 613 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนก๊าซเสียนอกท่อ | h_o | W/m ² -K | 63 |
| สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม | U | W/m ² -K | 53.5 |
| Transverse Pitch (1.75 x OD) | S_T | mm | 33.25 |
| Longitudinal Pitch (1.75 x OD) | S_L | mm | 33.25 |
| Diagonal Pitch | S_D | mm | 37.17 |

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลทั่วไปของหม้อไอน้ำในการทดลอง

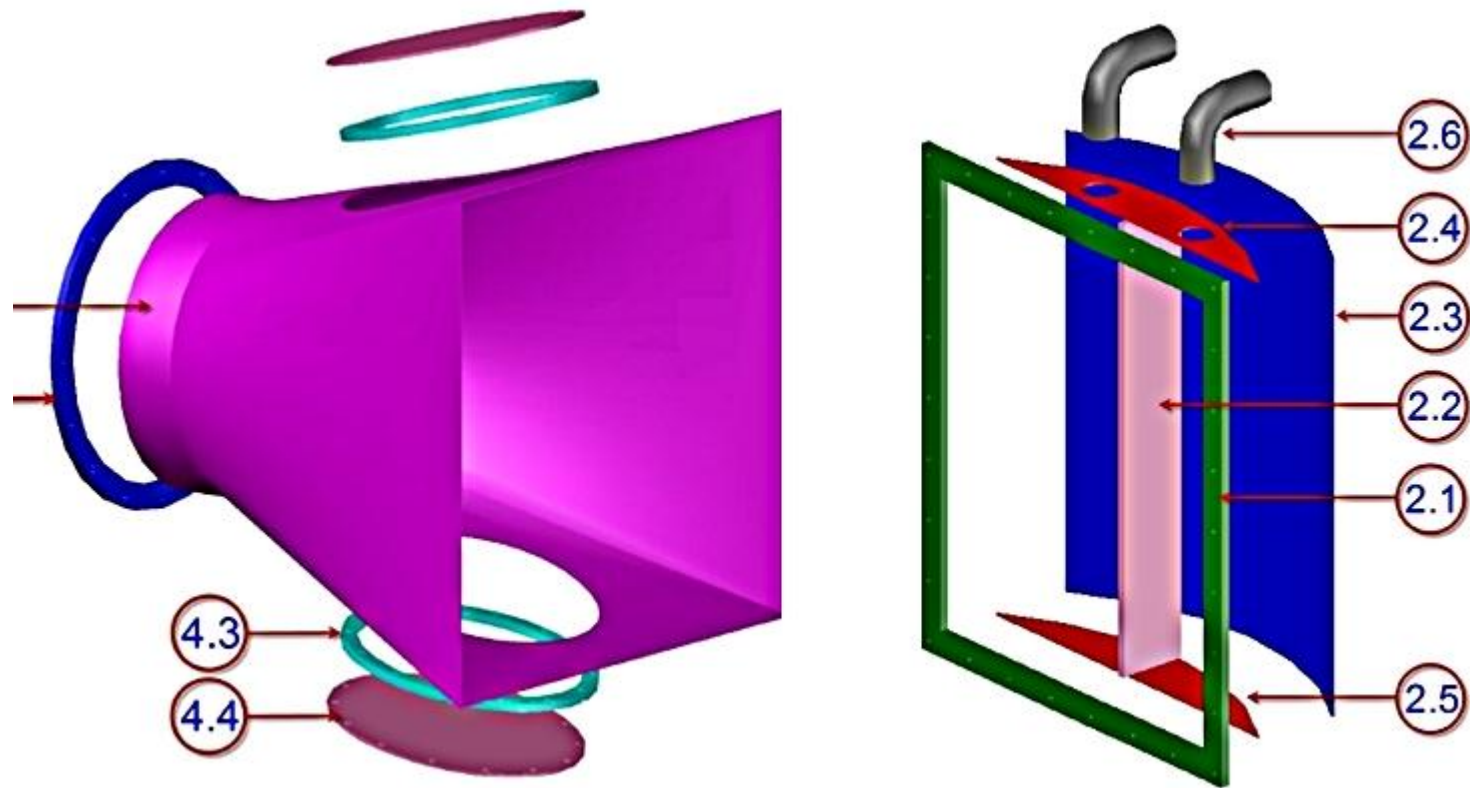
| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--|---------------|------------------|------|
| อุณหภูมิของก๊าซเสียเฉลี่ย | $T_{fluegas}$ | °C | 170 |
| อุณหภูมิอุณหภูมิมื้อนเชื้อเพลิงก่อนเข้าหม้อไอน้ำ | T_{fuel} | °C | 60 |
| ความดันน้ำเข้าหม้อไอน้ำ | P | bar _g | 7 |
| ความกว้างของหม้อไอน้ำ | X | m | 1.6 |
| ความยาวของหม้อไอน้ำ | Y | m | 4.3 |
| ความสูงของหม้อไอน้ำ | Z | m | 1.6 |
| Emissivity ของผิวนอกผนังหม้อไอน้ำ | | | 0.8 |
| Emissivity ของผิวนอกผนังฮีโรโนไมเซอร์ | | | 0.44 |
| อุณหภูมิอ้างอิง | T_{amb} | °C | 35 |



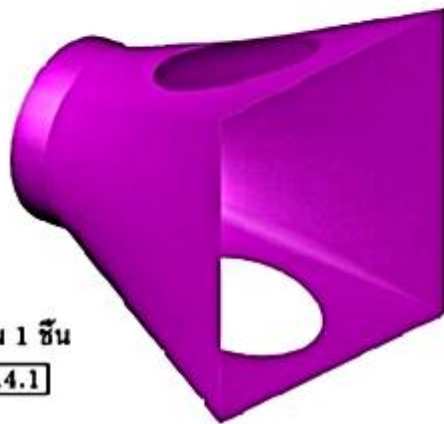
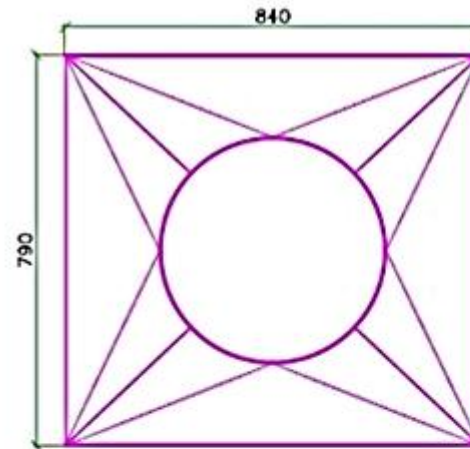
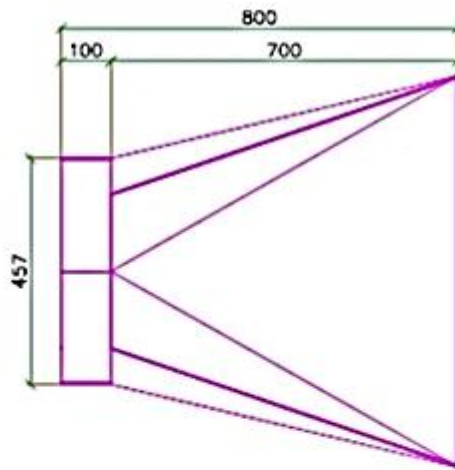
ภาพที่ ก.1 ภาพ Orthographic และท่อแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ ก.2 แบบ Model และส่วนประกอบต่างๆของอีโคโนไมเซอร์



ภาพที่ ก.3 แบบ Model ท่อทางเข้า - ออกของก๊าซเสียและน้ำป้อนของอีโคโนไมเซอร์

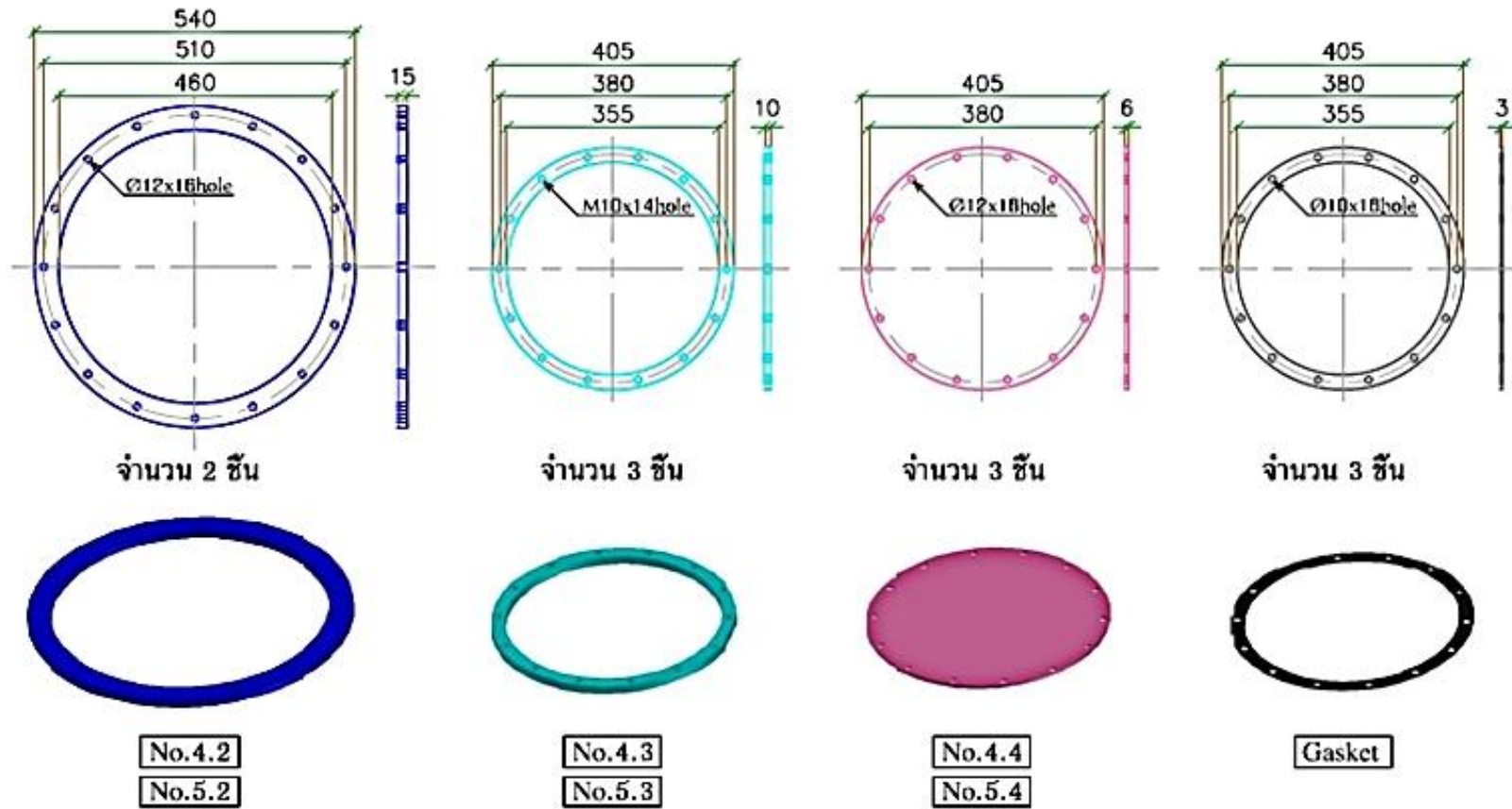


จำนวน 1 ชิ้น
No.4.1

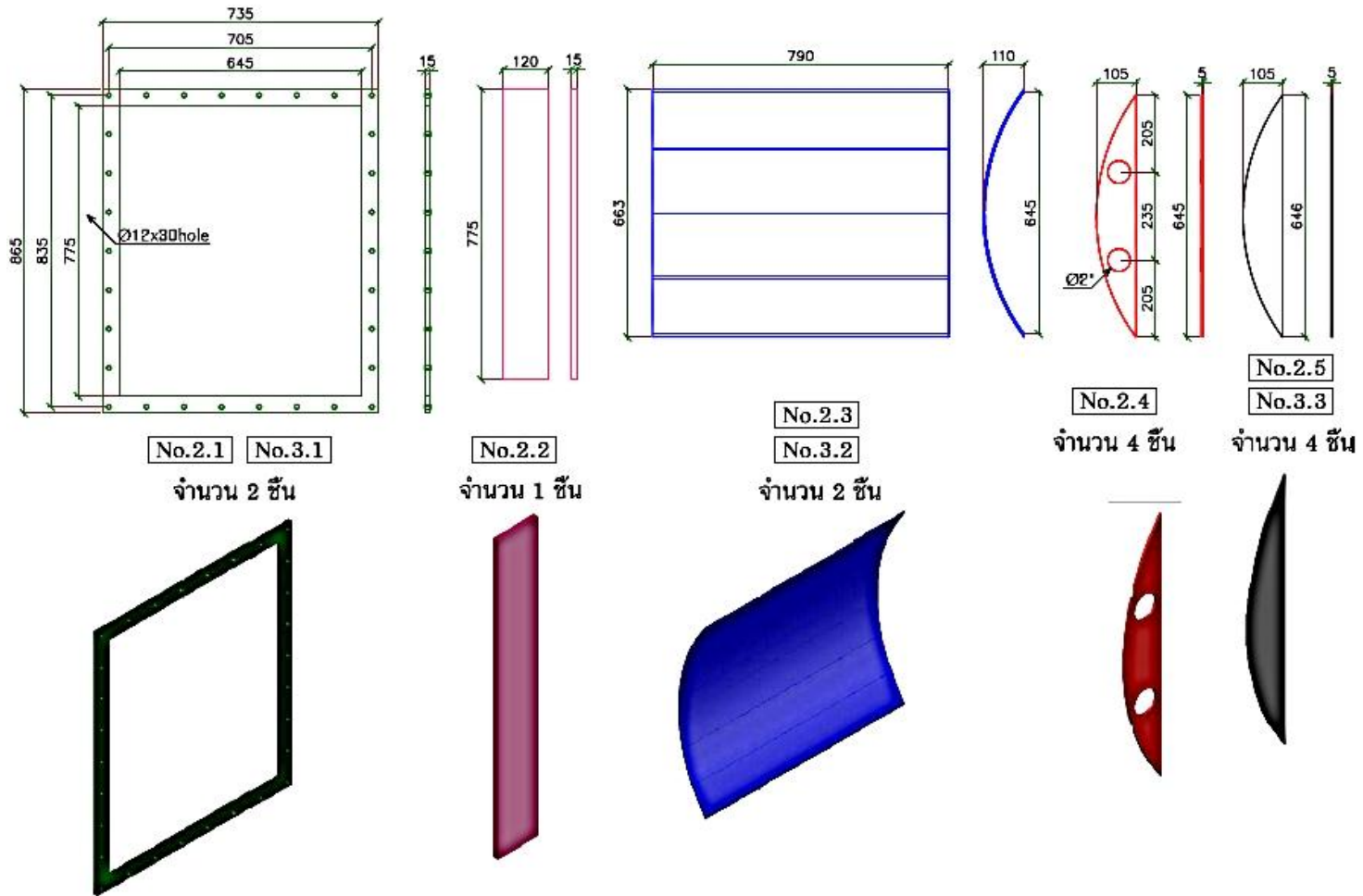


จำนวน 1 ชิ้น
No.5.1

ภาพที่ ก.3 ขนาดต่อทางเข้า - ออกอีโคโนไมเซอร์ของก๊าซเสีย



ภาพที่ ก.4 ขนาดหน้าแปลนท่อทางเข้า – ออกอีโคโนไมเซอร์ของก๊าซเสีย



ภาพที่ ก.5 ส่วนประกอบต่างๆของอีโคโนไมเซอร์

ภาคผนวก ข

ข้อมูลตรวจวัดหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ ข.1 ปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ปริมาณน้ำป้อนที่ใช้ | | ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง | ปริมาณไอน้ำต่อเชื้อเพลิง |
|--------------|-------|--------------------------|-------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | | ค่าที่อ่านจากมิเตอร์ (L) | L | kg | kg | kg/kg |
| 7/4/2555 | 12:30 | 1173012 | 114 | 87.70 | 16.68 | 5.26 |
| 7/4/2555 | 12:45 | 1173167 | 155 | 157.15 | 16.28 | 9.65 |
| 7/4/2555 | 13:00 | 1173303 | 136 | 155.28 | 20.46 | 7.59 |
| | | รวม | 405 | 400.1 | 53.4 | 7.49 |
| 7/4/2555 | 13:10 | 1166226 | 260 | 252.5 | 17.90 | 14.11 |
| 7/4/2555 | 13:20 | 1166413 | 225 | 240.0 | 17.16 | 13.99 |
| 7/4/2555 | 13:30 | 1166620 | 217 | 268.0 | 18.56 | 14.44 |
| 7/4/2555 | 13:40 | 1166620 | 230 | 220.0 | 15.70 | 14.02 |
| 7/4/2555 | 13:50 | 1166795 | 215 | 190.0 | 12.14 | 15.65 |
| 7/4/2555 | 14:00 | 1166970 | 240 | 200.0 | 13.81 | 14.48 |
| | | รวม | 1387 | 1370.5 | 95.2 | 14.39 |
| 2/7/2555 | 15:00 | 1226386 | 422 | 330.00 | 27.13 | 12.16 |
| 2/7/2555 | 15:15 | 1226717 | 341 | 507.86 | 32.63 | 15.56 |
| 2/7/2555 | 15:30 | 1227277 | 570 | 472.90 | 31.13 | 15.19 |
| 2/7/2555 | 15:45 | 1227718 | 451 | 451.00 | 30.41 | 14.83 |
| | | รวม | 1784 | 1761.7 | 121.3 | 14.52 |

ตารางที่ ข.2 องค์ประกอบของก๊าซเสีย ความดันไอน้ำและอุณหภูมิของไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | CO | O ₂ | NO ₂ | SO ₂ | Steam Pressure | Steam Temp. |
|------------------|-------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------|
| | | ppm | % | % | % | (bar _g) | (°C) |
| 7/4/2555 | 11:30 | 38 | 0.22 | 0 | 0 | 5.3 | 154.03 |
| 7/4/2555 | 11:45 | 1194 | 14.41 | 0 | 0 | 6.1 | 159.48 |
| 7/4/2555 | 12:00 | 296 | 13.50 | 0 | 0 | 6.1 | 159.48 |
| 7/4/2555 | 12:15 | 65 | 9.28 | 0.2 | 0 | 5.7 | 156.83 |
| 7/4/2555 | 12:30 | 1 | 14.44 | 0.2 | 0 | 6.2 | 160.11 |
| 7/4/2555 | 12:45 | 0 | 10.68 | 0.2 | 1 | 5.9 | 158.18 |
| 7/4/2555 | 13:00 | 0 | 6.48 | 0 | 1 | 5.9 | 158.18 |
| เฉลี่ย | | 227 | 9.85 | 0 | 0 | 5.88 | 158.18 |
| 7/4/2555 | 13:15 | 594 | 9.32 | 0 | 0 | 5.4 | 154.76 |
| 7/4/2555 | 13:30 | 63 | 10.20 | 0.2 | 2 | 5.6 | 156.15 |
| 7/4/2555 | 13:45 | 75 | 3.31 | 0.2 | 1 | 6.0 | 158.85 |
| 7/4/2555 | 14:00 | 679 | 7.14 | 0 | 0 | 5.7 | 156.83 |
| เฉลี่ย | | 352.75 | 7.50 | 0 | 0.75 | 5.68 | 156.65 |
| 2/7/2555 | 14:45 | 2 | 9.7 | 0 | 0 | 5.2 | 153.30 |
| 2/7/2555 | 15:00 | 134 | 10.5 | 0 | 0 | 5.2 | 153.30 |
| 2/7/2555 | 15:15 | 1 | 5.2 | 0 | 0 | 5.3 | 154.00 |
| 2/7/2555 | 15:30 | 2 | 9.30 | 0 | 0 | 5.3 | 154.00 |
| 2/7/2555 | 15:45 | 2 | 5.1 | 0 | 0 | 5.3 | 154.00 |
| เฉลี่ย | | 28.2 | 7.96 | 0 | 0 | 5.26 | 153.72 |

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำก่อนติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| วัน/ เดือน/ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | | ด้านซ้าย(°C) | | | | | ด้านขวา(°C) | | | | | ด้านหลัง(°C) | | | | |
|------------------|-------|---------------|-----|-----|-----|-----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E |
| 7/4/2555 | 11:30 | 65 | 70 | 94 | 69 | 70 | 70 | 63 | 68 | 70 | 61 | 68 | 70 | 72 | 70 | 68 | 98 | 104 | 106 | 109 | 127 |
| 7/4/2555 | 11:45 | 80 | 84 | 111 | 82 | 82 | 76 | 70 | 74 | 76 | 60 | 74 | 76 | 78 | 76 | 70 | 105 | 122 | 124 | 127 | 125 |
| 7/4/2555 | 12:00 | 81 | 85 | 116 | 83 | 85 | 80 | 72 | 79 | 81 | 61 | 74 | 76 | 78 | 75 | 70 | 112 | 120 | 122 | 119 | 122 |
| 7/4/2555 | 12:15 | 82 | 88 | 126 | 85 | 86 | 82 | 73 | 78 | 80 | 61 | 78 | 80 | 82 | 80 | 71 | 132 | 140 | 149 | 140 | 123 |
| 7/4/2555 | 12:30 | 85 | 90 | 143 | 85 | 86 | 81 | 70 | 79 | 81 | 62 | 73 | 75 | 77 | 75 | 70 | 133 | 138 | 140 | 135 | 125 |
| เฉลี่ย | | 89.04 | | | | | 72.72 | | | | | 74.67 | | | | | 124.44 | | | | |
| 7/4/2555 | 13:00 | 108 | 121 | 141 | 111 | 110 | 72 | 64 | 75 | 78 | 62 | 77 | 78 | 81 | 80 | 79 | 136 | 138 | 140 | 143 | 136 |
| 7/4/2555 | 13:15 | 108 | 122 | 144 | 109 | 108 | 71 | 65 | 75 | 76 | 64 | 82 | 84 | 86 | 79 | 80 | 150 | 152 | 155 | 158 | 138 |
| 7/4/2555 | 13:30 | 106 | 119 | 140 | 106 | 105 | 73 | 66 | 78 | 79 | 65 | 79 | 81 | 82 | 80 | 80 | 131 | 133 | 135 | 138 | 141 |
| 7/4/2555 | 13:45 | 103 | 126 | 148 | 112 | 110 | 72 | 64 | 76 | 78 | 64 | 87 | 89 | 91 | 90 | 81 | 143 | 144 | 146 | 151 | 140 |
| 7/4/2555 | 14:00 | 111 | 124 | 150 | 120 | 115 | 70 | 66 | 74 | 77 | 65 | 83 | 85 | 87 | 83 | 80 | 152 | 154 | 156 | 160 | 143 |
| เฉลี่ย | | 118.93 | | | | | 70.66 | | | | | 82.55 | | | | | 144.32 | | | | |
| 2/7/2555 | 14:45 | 111 | 121 | 151 | 112 | 105 | 82 | 74 | 85 | 76 | 77 | 87 | 88 | 91 | 90 | 89 | 146 | 148 | 150 | 153 | 146 |
| 2/7/2555 | 15:00 | 108 | 122 | 154 | 120 | 110 | 81 | 75 | 85 | 86 | 74 | 82 | 94 | 96 | 79 | 90 | 160 | 152 | 165 | 158 | 138 |

| วัน/ เดือน/ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | | ด้านซ้าย(°C) | | | | | ด้านขวา(°C) | | | | | ด้านหลัง(°C) | | | | |
|------------------|-------|--------------|-----|-----|-----|-----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E |
| 2/7/2555 | 15:15 | 106 | 119 | 160 | 106 | 116 | 83 | 76 | 88 | 79 | 75 | 89 | 81 | 92 | 80 | 90 | 141 | 143 | 145 | 148 | 141 |
| 2/7/2555 | 15:30 | 109 | 126 | 158 | 112 | 110 | 82 | 74 | 86 | 80 | 74 | 87 | 89 | 91 | 90 | 81 | 143 | 144 | 156 | 156 | 150 |
| 2/7/2555 | 15:45 | 111 | 124 | 160 | 120 | 115 | 80 | 76 | 84 | 77 | 75 | 90 | 89 | 87 | 83 | 80 | 162 | 164 | 156 | 164 | 143 |
| เฉลี่ย | | 122.5 | | | | | 79.26 | | | | | 87.39 | | | | | 150.68 | | | | |

ภาคผนวก ค

ข้อมูลตรวจวัดหม้อไอ้้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

ตารางที่ ค.1 ปริมาณการใช้ไอน้ำ เชื้อเพลิงและน้ำป้อนของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ปริมาณน้ำป้อนที่ใช้ | | ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง | ปริมาณไอน้ำต่อเชื้อเพลิง |
|--------------|-------|--------------------------|---------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | | ค่าที่อ่านจากมิเตอร์ (L) | L | kg | kg | kg/kg |
| 28/4/2555 | 14.00 | 1180271 | 489.3 | 434.00 | 25.48 | 17.03 |
| 28/4/2555 | 14.15 | 1182159 | 489 | 494.00 | 27.85 | 17.74 |
| 28/4/2555 | 14.30 | 1183703 | 450.7 | 400.00 | 25.00 | 16.00 |
| 28/4/2555 | 14.45 | 1185162 | 404 | 422.00 | 24.86 | 16.97 |
| | | รวม | 2264.9 | 1750.00 | 103.20 | 16.96 |
| 28/4/2555 | 15:15 | 1188619 | 417 | 434.77 | 24.19 | 17.98 |
| 28/4/2555 | 15:30 | 1189905 | 408 | 361.16 | 21.00 | 17.20 |
| 28/4/2555 | 15:45 | 1191485 | 358 | 338.00 | 21.97 | 15.38 |
| 28/4/2555 | 16:00 | 1192115 | 255 | 317.00 | 20.00 | 15.85 |
| | | รวม | 1837.0 | 1450.93 | 87.16 | 16.65 |
| 29/7/2555 | 12:45 | 1280121 | 453 | 323.47 | 20.19 | 16.02 |
| 29/7/2555 | 13:00 | 1281900 | 443.9 | 374.14 | 22.78 | 16.42 |
| 29/7/2555 | 13:15 | 1283530 | 424.1 | 366.87 | 22.61 | 16.23 |
| 29/7/2555 | 13:30 | 1285161 | 408 | 357.00 | 23.46 | 15.22 |
| | | รวม | 1729.0 | 1421.48 | 89.04 | 15.97 |
| 29/7/2555 | 13:45 | 1286631 | 381 | 350.00 | 20.00 | 17.50 |
| 29/7/2555 | 14:00 | 1288300 | 389 | 372.78 | 23.62 | 15.78 |
| 29/7/2555 | 14:15 | 1290000 | 424 | 360.25 | 23.41 | 15.39 |
| 29/7/2555 | 14:30 | 1291451 | 407 | 327.00 | 23.71 | 13.79 |
| | | รวม | 1601.0 | 1410.03 | 90.74 | 15.54 |
| 29/7/2555 | 14:45 | 1292981 | 373 | 320.00 | 20.72 | 15.44 |

| วัน/เดือน/ปี | เวลา | ปริมาณน้ำป้อนที่ใช้ | | ปริมาณไอน้ำที่ผลิตได้ | ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง | ปริมาณไอน้ำต่อเชื้อเพลิง |
|--------------|-------|--------------------------|---------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| | | ค่าที่อ่านจากมิเตอร์ (L) | L | kg | kg | kg/kg |
| 29/7/2555 | 15:00 | 1294652 | 400 | 351.40 | 22.86 | 15.37 |
| 29/7/2555 | 15:15 | 1296298 | 416 | 369.67 | 23.60 | 15.67 |
| 29/7/2555 | 15:30 | 1297811 | 401 | 349.82 | 23.99 | 14.58 |
| | | รวม | 1590.0 | 1390.89 | 91.17 | 15.26 |
| 2/7/2555 | 17:05 | 1235267 | 497.1 | 408.81 | 26.81 | 15.25 |
| 2/7/2555 | 17:20 | 1236571 | 430.4 | 421.05 | 25.51 | 16.50 |
| 2/7/2555 | 17:35 | 1238045 | 356.7 | 433.95 | 25.33 | 17.13 |
| 2/7/2555 | 17:50 | 1239654 | 359.9 | 393.40 | 25.62 | 15.36 |
| | | รวม | 2117.3 | 1657.21 | 103.27 | 16.05 |
| 3/7/2555 | 14:00 | 1246395 | 405.1 | 406.00 | 27.48 | 14.78 |
| 3/7/2555 | 14:15 | 1247935 | 408.9 | 358.00 | 23.31 | 15.36 |
| 3/7/2555 | 14:30 | 1249778 | 419.5 | 471.47 | 27.24 | 17.31 |
| 3/7/2555 | 14:45 | 1251443 | 427.3 | 454.25 | 25.91 | 17.53 |
| | | รวม | 2078.8 | 1689.72 | 103.94 | 16.26 |
| 3/7/2555 | 15:15 | 1254465 | 374.7 | 472.10 | 26.87 | 17.57 |
| 3/7/2555 | 15:30 | 1256164 | 403.9 | 374.89 | 25.44 | 14.74 |
| 3/7/2555 | 15:45 | 1257942 | 442 | 386.00 | 25.44 | 15.17 |
| 3/7/2555 | 16:00 | 1259775 | 459.3 | 405.90 | 25.74 | 15.77 |
| | | รวม | 2064.2 | 1638.89 | 103.49 | 15.84 |

ตารางที่ ค.2 องค์ประกอบของก๊าซเสีย ความดันไอน้ำและอุณหภูมิของไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | CO | O ₂ | NO ₂ | SO ₂ | Steam Pressure | Steam Temp. |
|------------------|-------|------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------|
| | | ppm | % | % | % | (bar _g) | (°C) |
| 28/4/2555 | 14.00 | 0 | 5.67 | 0 | 0 | 6.0 | 158.85 |
| 28/4/2555 | 14.15 | 0 | 4.52 | 0.2 | 0 | 6.2 | 160.11 |
| 28/4/2555 | 14.30 | 0 | 4.08 | 0 | 0 | 6.2 | 160.11 |
| 28/4/2555 | 14.45 | 0 | 5.18 | 0 | 0 | 6.3 | 160.75 |
| เฉลี่ย | | 0 | 4.86 | 0 | 0 | 6.17 | 159.95 |
| 28/4/2555 | 15:15 | 3 | 5.44 | 0 | 0 | 5.7 | 156.83 |
| 28/4/2555 | 15:30 | 4 | 5.05 | 0 | 0 | 5.9 | 158.18 |
| 28/4/2555 | 15:45 | 4 | 5.10 | 0 | 0 | 5.9 | 158.18 |
| 28/4/2555 | 16:00 | 3 | 4.22 | 0 | 0 | 5.4 | 154.76 |
| เฉลี่ย | | 3.5 | 4.95 | 0 | 0 | 5.72 | 156.98 |
| 29/7/2555 | 12.45 | 3 | 5.5 | 0 | 0 | 5.1 | 152.00 |
| 29/7/2555 | 13.00 | 3 | 5.1 | 0 | 0 | 5.6 | 156.16 |
| 29/7/2555 | 13.15 | 3 | 5.2 | 0 | 0 | 5.6 | 156.16 |
| 29/7/2555 | 13.30 | 3 | 5.3 | 0 | 0 | 5.8 | 157.50 |
| เฉลี่ย | | 3.0 | 5.27 | 0 | 0 | 5.52 | 155.45 |
| 29/7/2555 | 13:45 | 3 | 5.3 | 0 | 0 | 6.4 | 161.75 |
| 29/7/2555 | 14:00 | 3 | 5.4 | 0 | 0 | 6.1 | 159.48 |
| 29/7/2555 | 14:15 | 3 | 5.3 | 0 | 0 | 6.3 | 160.75 |
| 29/7/2555 | 14:30 | 3 | 5.1 | 0 | 0 | 6.3 | 160.75 |
| เฉลี่ย | | 3.0 | 5.27 | 0 | 0 | 6.27 | 160.68 |
| 29/7/2555 | 14:45 | 3 | 4.80 | 0 | 0 | 6.0 | 158.85 |
| 29/7/2555 | 15:00 | 4 | 4.9 | 0 | 0 | 6.1 | 159.48 |
| 29/7/2555 | 15:15 | 3 | 5.7 | 0 | 0 | 6.2 | 160.11 |

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | CO | O2 | NO2 | SO2 | Steam Pressure | Steam Temp. |
|------------------|-------|-------------|-------------|----------|----------|---------------------|----------------|
| | | ppm | % | % | % | (bar _g) | (°C) |
| 29/7/2555 | 15:30 | 3 | 5.5 | 0 | 0 | 6.2 | 160.11 |
| เฉลี่ย | | 3.25 | 5.22 | 0 | 0 | 6.12 | 159.64 |
| 2/7/2555 | 17:05 | 1 | 5.20 | 0 | 0 | 5.5 | 155.48 |
| 2/7/2555 | 17:20 | 1 | 5.9 | 0 | 0 | 5.0 | 151.86 |
| 2/7/2555 | 17:35 | 1 | 5.1 | 0 | 0 | 4.7 | 149.00 |
| 2/7/2555 | 17:50 | 1 | 5.9 | 0 | 0 | 4.6 | 148.00 |
| เฉลี่ย | | 1 | 5.52 | 0 | 0 | 4.95 | 151.08 |
| 3/7/2555 | 13.45 | 0 | 5.2 | 0 | 0 | 3.9 | 145.01 |
| 3/7/2555 | 14.00 | 10 | 5.0 | 0 | 0 | 5.2 | 153.30 |
| 3/7/2555 | 14.15 | 10 | 5.1 | 0 | 0 | 4.8 | 150.30 |
| 3/7/2555 | 14.30 | 9 | 4.9 | 0 | 0 | 4.7 | 149.00 |
| 3/7/2555 | 14.45 | 10 | 5.0 | 0 | 0 | 5.7 | 156.83 |
| เฉลี่ย | | 7.8 | 5.04 | 0 | 0 | 4.86 | 150.88 |
| 3/7/2555 | 15:00 | 10 | 5.9 | 0 | 0 | 5.8 | 157.50 |
| 3/7/2555 | 15:15 | 10 | 5.2 | 0 | 0 | 4.8 | 150.30 |
| 3/7/2555 | 15:30 | 5 | 5.6 | 0 | 0 | 4.2 | 145.30 |
| 3/7/2555 | 15:45 | 9 | 5.9 | 0 | 0 | 5.1 | 152.00 |
| 3/7/2555 | 16:00 | 10 | 5.8 | 0 | 0 | 5.6 | 156.16 |
| เฉลี่ย | | 8.8 | 5.68 | 0 | 0 | 5.10 | 152.25 |

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิผิวของหม้อไอน้ำหลังติดตั้งอีโคโนไมเซอร์

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | | ด้านซ้าย(°C) | | | | | ด้านขวา(°C) | | | | | ด้านหลัง(°C) | | | | |
|------------------|-------|--------------|----|-----|----|----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|-----|-----|-----|
| | | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E |
| 28/4/2555 | 13.45 | 72 | 86 | 106 | 73 | 75 | 64 | 55 | 62 | 59 | 53 | 52 | 51 | 54 | 59 | 49 | 74 | 80 | 82 | 76 | 83 |
| 28/4/2555 | 14.00 | 75 | 83 | 108 | 79 | 77 | 65 | 55 | 61 | 65 | 53 | 53 | 52 | 56 | 56 | 49 | 74 | 81 | 85 | 78 | 85 |
| 28/4/2555 | 14.15 | 78 | 81 | 114 | 82 | 81 | 66 | 56 | 61 | 70 | 54 | 54 | 52 | 59 | 55 | 49 | 75 | 83 | 87 | 79 | 88 |
| 28/4/2555 | 14.30 | 80 | 84 | 113 | 82 | 82 | 66 | 56 | 61 | 69 | 54 | 54 | 53 | 56 | 52 | 50 | 76 | 83 | 90 | 80 | 90 |
| 28/4/2555 | 14.45 | 81 | 85 | 114 | 82 | 82 | 66 | 56 | 61 | 68 | 54 | 54 | 53 | 55 | 50 | 50 | 77 | 83 | 96 | 80 | 92 |
| ค่าเฉลี่ย | | 86.65 | | | | | 60.84 | | | | | 53.26 | | | | | 82.74 | | | | |
| 28/4/2555 | 15:00 | 82 | 86 | 114 | 83 | 82 | 67 | 57 | 61 | 69 | 55 | 54 | 53 | 55 | 51 | 51 | 78 | 83 | 77 | 80 | 93 |
| 28/4/2555 | 15:15 | 81 | 84 | 110 | 76 | 80 | 64 | 56 | 62 | 67 | 55 | 54 | 53 | 54 | 50 | 51 | 76 | 87 | 78 | 79 | 91 |
| 28/4/2555 | 15:30 | 81 | 89 | 109 | 75 | 77 | 68 | 57 | 65 | 70 | 54 | 53 | 51 | 53 | 50 | 51 | 75 | 89 | 91 | 78 | 84 |
| 28/4/2555 | 15:45 | 80 | 83 | 105 | 74 | 75 | 65 | 56 | 64 | 68 | 55 | 55 | 51 | 54 | 51 | 51 | 75 | 86 | 92 | 78 | 86 |
| 28/4/2555 | 16:00 | 78 | 85 | 101 | 73 | 76 | 64 | 56 | 61 | 69 | 55 | 55 | 51 | 56 | 52 | 50 | 75 | 81 | 92 | 78 | 86 |
| ค่าเฉลี่ย | | 85.45 | | | | | 61.5 | | | | | 52.28 | | | | | 82.6 | | | | |
| 29/7/2555 | 12.30 | 70 | 75 | 103 | 79 | 72 | 86 | 65 | 67 | 61 | 53 | 58 | 53 | 63 | 57 | 50 | 117 | 76 | 94 | 101 | 114 |
| 29/7/2555 | 12.45 | 73 | 80 | 107 | 83 | 72 | 84 | 55 | 66 | 60 | 54 | 56 | 54 | 64 | 57 | 50 | 120 | 76 | 100 | 89 | 117 |

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | | ด้านซ้าย(°C) | | | | | ด้านขวา(°C) | | | | | ด้านหลัง(°C) | | | | |
|------------------|-------|--------------|----|-----|-----|----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|----|---------------|----|-----|----|-----|
| | | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E |
| 29/7/2555 | 13.00 | 78 | 87 | 116 | 94 | 78 | 83 | 53 | 65 | 61 | 55 | 56 | 55 | 64 | 58 | 50 | 128 | 80 | 107 | 84 | 125 |
| 29/7/2555 | 13.15 | 80 | 86 | 117 | 94 | 79 | 80 | 50 | 64 | 60 | 55 | 58 | 56 | 69 | 55 | 50 | 129 | 75 | 110 | 85 | 125 |
| 29/7/2555 | 13.30 | 84 | 86 | 119 | 96 | 83 | 78 | 50 | 64 | 63 | 55 | 62 | 57 | 73 | 52 | 52 | 130 | 72 | 113 | 87 | 125 |
| ค่าเฉลี่ย | | 87.58 | | | | | 63.51 | | | | | 57.17 | | | | | 103.12 | | | | |
| 29/7/2555 | 13:45 | 83 | 86 | 118 | 96 | 83 | 74 | 60 | 63 | 63 | 55 | 57 | 55 | 65 | 59 | 51 | 130 | 75 | 112 | 87 | 125 |
| 29/7/2555 | 14:00 | 83 | 87 | 117 | 98 | 85 | 72 | 67 | 62 | 64 | 56 | 56 | 54 | 61 | 69 | 52 | 131 | 83 | 112 | 88 | 126 |
| 29/7/2555 | 14:15 | 84 | 88 | 119 | 97 | 85 | 73 | 67 | 61 | 62 | 55 | 60 | 54 | 60 | 55 | 51 | 131 | 83 | 114 | 90 | 126 |
| 29/7/2555 | 14:30 | 85 | 91 | 122 | 97 | 85 | 78 | 68 | 61 | 62 | 55 | 65 | 55 | 61 | 52 | 52 | 131 | 84 | 118 | 95 | 127 |
| ค่าเฉลี่ย | | 94.33 | | | | | 63.5 | | | | | 57.55 | | | | | 107.79 | | | | |
| 29/7/2555 | 14:45 | 85 | 92 | 120 | 99 | 85 | 77 | 70 | 59 | 60 | 55 | 60 | 54 | 61 | 60 | 51 | 132 | 84 | 117 | 90 | 127 |
| 29/7/2555 | 15:00 | 85 | 95 | 118 | 102 | 85 | 78 | 73 | 60 | 60 | 56 | 58 | 54 | 60 | 67 | 52 | 135 | 85 | 117 | 88 | 128 |
| 29/7/2555 | 15:15 | 84 | 94 | 120 | 100 | 85 | 77 | 68 | 59 | 61 | 55 | 57 | 53 | 65 | 60 | 52 | 134 | 85 | 119 | 89 | 127 |
| 29/7/2555 | 15:30 | 86 | 96 | 126 | 99 | 88 | 77 | 67 | 60 | 61 | 55 | 57 | 54 | 70 | 52 | 52 | 132 | 86 | 122 | 91 | 127 |
| ค่าเฉลี่ย | | 96.9 | | | | | 64.43 | | | | | 57.37 | | | | | 110.8 | | | | |
| 2/7/2555 | 16:50 | 80 | 81 | 102 | 79 | 79 | 53 | 51 | 55 | 50 | 50 | 65 | 55 | 53 | 54 | 52 | 109 | 70 | 88 | 75 | 108 |

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | | ด้านซ้าย(°C) | | | | | ด้านขวา(°C) | | | | | ด้านหลัง(°C) | | | | |
|------------------|-------|--------------|----|-----|----|----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|-----|
| | | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E |
| 2/7/2555 | 17:05 | 82 | 85 | 105 | 81 | 80 | 53 | 51 | 56 | 55 | 51 | 68 | 57 | 55 | 57 | 53 | 112 | 72 | 90 | 73 | 110 |
| 2/7/2555 | 17:20 | 83 | 90 | 108 | 83 | 83 | 54 | 53 | 58 | 60 | 52 | 71 | 58 | 59 | 61 | 58 | 116 | 74 | 92 | 70 | 115 |
| 2/7/2555 | 17:35 | 83 | 88 | 107 | 83 | 84 | 52 | 52 | 57 | 58 | 51 | 70 | 57 | 57 | 60 | 56 | 117 | 76 | 95 | 75 | 115 |
| 2/7/2555 | 17:50 | 83 | 88 | 109 | 83 | 85 | 53 | 52 | 58 | 58 | 51 | 71 | 57 | 56 | 59 | 54 | 117 | 80 | 96 | 81 | 115 |
| ค่าเฉลี่ย | | 87.76 | | | | | 53.72 | | | | | 58.94 | | | | | 93.64 | | | | |
| 3/7/2555 | 13:45 | 67 | 70 | 87 | 67 | 69 | 52 | 51 | 56 | 51 | 48 | 63 | 54 | 56 | 63 | 50 | 105 | 72 | 83 | 72 | 106 |
| 3/7/2555 | 14:00 | 70 | 74 | 93 | 71 | 72 | 52 | 51 | 55 | 51 | 48 | 65 | 54 | 55 | 63 | 51 | 108 | 74 | 83 | 72 | 108 |
| 3/7/2555 | 14:15 | 72 | 79 | 97 | 76 | 77 | 53 | 51 | 54 | 52 | 49 | 66 | 55 | 57 | 63 | 52 | 115 | 77 | 84 | 72 | 115 |
| 3/7/2555 | 14:30 | 75 | 79 | 98 | 77 | 79 | 54 | 52 | 55 | 52 | 50 | 66 | 55 | 56 | 64 | 52 | 117 | 78 | 90 | 73 | 117 |
| 3/7/2555 | 14:45 | 79 | 80 | 99 | 79 | 81 | 54 | 52 | 57 | 52 | 51 | 66 | 55 | 55 | 65 | 52 | 119 | 79 | 96 | 75 | 118 |
| ค่าเฉลี่ย | | 78.84 | | | | | 52.29 | | | | | 58.18 | | | | | 92.32 | | | | |
| 3/7/2555 | 15:00 | 79 | 80 | 99 | 79 | 82 | 55 | 53 | 57 | 53 | 51 | 66 | 55 | 55 | 66 | 52 | 119 | 79 | 96 | 75 | 118 |
| 3/7/2555 | 15:15 | 80 | 81 | 102 | 80 | 82 | 54 | 52 | 57 | 53 | 50 | 63 | 54 | 54 | 65 | 52 | 117 | 78 | 95 | 74 | 117 |
| 3/7/2555 | 15:30 | 83 | 83 | 108 | 81 | 83 | 54 | 52 | 58 | 55 | 51 | 63 | 55 | 54 | 65 | 52 | 116 | 77 | 93 | 74 | 115 |
| 3/7/2555 | 15:45 | 81 | 83 | 105 | 80 | 83 | 54 | 52 | 55 | 55 | 50 | 61 | 53 | 53 | 62 | 51 | 117 | 78 | 93 | 74 | 116 |

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | | ด้านซ้าย(°C) | | | | | ด้านขวา(°C) | | | | | ด้านหลัง(°C) | | | | |
|------------------|-------|--------------|----|-----|----|----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|----|--------------|----|----|----|-----|
| | | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E | A | B | C | D | E |
| 3/7/2555 | 16:00 | 80 | 87 | 103 | 82 | 84 | 54 | 52 | 56 | 57 | 50 | 62 | 54 | 53 | 59 | 52 | 118 | 79 | 93 | 75 | 117 |
| ค่าเฉลี่ย | | 85.95 | | | | | 53.53 | | | | | 57.22 | | | | | 96.13 | | | | |

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิผิวของอีโคโนไมเซอร์

| วันที่/ เดือน/ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | ด้านล่าง(°C) | | | | ด้านหลัง(°C) | | | |
|---------------------|-------|--------------|----|----|-----|--------------|----|----|-----|--------------|----|----|-----|
| | | A | B | C | D | A | B | C | D | A | B | C | D |
| 28/4/2555 | 13.15 | 54 | 61 | 50 | 47 | 53 | 42 | 41 | 41 | 62 | 55 | 55 | 50 |
| 28/4/2555 | 13.30 | 55 | 64 | 53 | 49 | 54 | 43 | 41 | 42 | 62 | 55 | 57 | 53 |
| 28/4/2555 | 13:45 | 56 | 65 | 55 | 50 | 55 | 45 | 42 | 43 | 62 | 54 | 60 | 54 |
| 28/4/2555 | 14:00 | 57 | 65 | 55 | 49 | 53 | 46 | 43 | 44 | 63 | 55 | 62 | 56 |
| 28/4/2555 | 14:15 | 57 | 65 | 54 | 49 | 54 | 49 | 45 | 46 | 63 | 55 | 63 | 59 |
| เฉลี่ย | | 54.50 | | | | 47.92 | | | | 57.17 | | | |
| 28/4/2555 | 15:00 | 53 | 58 | 50 | 46 | 53 | 42 | 42 | 40 | 60 | 54 | 53 | 48 |
| 28/4/2555 | 15:15 | 54 | 57 | 50 | 47 | 54 | 43 | 45 | 40 | 60 | 55 | 56 | 49 |
| 28/4/2555 | 15:30 | 55 | 57 | 50 | 48 | 55 | 45 | 45 | 40 | 60 | 55 | 54 | 50 |
| 28/4/2555 | 15:45 | 56 | 58 | 51 | 48 | 56 | 46 | 57 | 41 | 62 | 55 | 55 | 51 |
| 28/4/2555 | 16:00 | 57 | 57 | 51 | 49 | 56 | 47 | 48 | 42 | 61 | 56 | 55 | 49 |
| เฉลี่ย | | 52.60 | | | | 46.85 | | | | 55.01 | | | |
| 29/7/2555 | 12.30 | 80 | 79 | 94 | 95 | 63 | 60 | 64 | 97 | 70 | 80 | 92 | 101 |
| 29/7/2555 | 12.45 | 85 | 80 | 94 | 96 | 65 | 63 | 70 | 99 | 74 | 80 | 92 | 102 |
| 29/7/2555 | 13.00 | 89 | 83 | 97 | 100 | 67 | 67 | 76 | 102 | 80 | 82 | 94 | 103 |
| 29/7/2555 | 13.15 | 90 | 75 | 90 | 99 | 66 | 66 | 73 | 102 | 75 | 80 | 86 | 100 |
| เฉลี่ย | | 88.58 | | | | 75.31 | | | | 86.22 | | | |
| 29/7/2555 | 13.30 | 91 | 72 | 86 | 98 | 66 | 68 | 71 | 102 | 73 | 79 | 83 | 99 |
| 29/7/2555 | 13:45 | 85 | 75 | 86 | 97 | 65 | 67 | 72 | 104 | 72 | 77 | 83 | 95 |
| 29/7/2555 | 14:00 | 78 | 78 | 86 | 96 | 65 | 67 | 73 | 104 | 72 | 76 | 85 | 93 |
| 29/7/2555 | 14:15 | 83 | 75 | 85 | 96 | 64 | 67 | 73 | 103 | 71 | 70 | 86 | 95 |
| เฉลี่ย | | 85.55 | | | | 77.12 | | | | 81.74 | | | |
| 29/7/2555 | 14:30 | 87 | 72 | 84 | 96 | 64 | 67 | 73 | 102 | 71 | 66 | 87 | 97 |
| 29/7/2555 | 14:45 | 80 | 72 | 81 | 94 | 65 | 67 | 72 | 103 | 72 | 70 | 83 | 98 |
| 29/7/2555 | 15:00 | 77 | 73 | 80 | 93 | 66 | 69 | 73 | 104 | 76 | 75 | 78 | 99 |

| วันที่/ เดือน/ปี | เวลา | ด้านหน้า(°C) | | | | ด้านข้าง(°C) | | | | ด้านหลัง(°C) | | | |
|---------------------|-------|--------------|----|----|----|--------------|----|----|-----|--------------|----|----|-----|
| | | A | B | C | D | A | B | C | D | A | B | C | D |
| 29/7/2555 | 15:15 | 81 | 71 | 82 | 90 | 65 | 67 | 70 | 100 | 73 | 70 | 75 | 99 |
| 29/7/2555 | 15:30 | 87 | 70 | 84 | 90 | 64 | 68 | 70 | 98 | 70 | 68 | 74 | 100 |
| เฉลี่ย | | 82.24 | | | | 76.38 | | | | 80.15 | | | |
| 2/7/2555 | 16:50 | 55 | 55 | 74 | 72 | 53 | 47 | 60 | 82 | 59 | 55 | 57 | 78 |
| 2/7/2555 | 17:05 | 56 | 57 | 73 | 76 | 54 | 50 | 60 | 85 | 60 | 57 | 62 | 83 |
| 2/7/2555 | 17:20 | 58 | 59 | 72 | 81 | 56 | 55 | 62 | 87 | 63 | 60 | 65 | 87 |
| 2/7/2555 | 17:35 | 58 | 58 | 76 | 79 | 55 | 56 | 61 | 83 | 62 | 60 | 65 | 88 |
| 2/7/2555 | 17:50 | 58 | 57 | 78 | 79 | 55 | 58 | 61 | 80 | 62 | 59 | 65 | 90 |
| เฉลี่ย | | 66.6 | | | | 62.98 | | | | 66.84 | | | |
| 3/7/2555 | 13:45 | 56 | 60 | 79 | 71 | 51 | 51 | 56 | 76 | 61 | 62 | 69 | 84 |
| 3/7/2555 | 14:00 | 57 | 62 | 79 | 70 | 53 | 56 | 59 | 77 | 62 | 64 | 70 | 87 |
| 3/7/2555 | 14:15 | 58 | 64 | 80 | 73 | 55 | 58 | 63 | 81 | 64 | 66 | 72 | 90 |
| 3/7/2555 | 14:30 | 57 | 63 | 78 | 76 | 55 | 57 | 63 | 81 | 64 | 64 | 70 | 89 |
| 3/7/2555 | 14:45 | 55 | 58 | 74 | 88 | 55 | 59 | 63 | 82 | 65 | 63 | 69 | 88 |
| เฉลี่ย | | 68.04 | | | | 62.48 | | | | 71.14 | | | |
| 3/7/2555 | 15:00 | 55 | 58 | 74 | 88 | 55 | 59 | 63 | 82 | 65 | 63 | 69 | 88 |
| 3/7/2555 | 15:15 | 55 | 57 | 72 | 87 | 53 | 56 | 63 | 80 | 63 | 62 | 69 | 89 |
| 3/7/2555 | 15:30 | 55 | 57 | 71 | 87 | 53 | 55 | 61 | 79 | 63 | 62 | 69 | 90 |
| 3/7/2555 | 15:45 | 54 | 58 | 72 | 85 | 53 | 56 | 61 | 78 | 63 | 64 | 70 | 85 |
| 3/7/2555 | 16:00 | 55 | 60 | 74 | 84 | 55 | 58 | 62 | 80 | 65 | 66 | 70 | 82 |
| เฉลี่ย | | 67.94 | | | | 63.06 | | | | 70.88 | | | |

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลตรวจวัดอุณหภูมิของน้ำป้อน ก๊าซเสีย ความดันของน้ำป้อน เข้าและออก จากอีโคโนไมเซอร์

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | อุณหภูมิก๊าซ เสียเข้า | อุณหภูมิก๊าซ เสียออก | อุณหภูมิ น้ำเข้า | อุณหภูมิ น้ำออก | P _i | P _o |
|------------------|-------|--------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | | °C | °C | °C | °C | bar | bar |
| 28/4/2555 | 13:40 | 174.05 | 124.03 | 83.08 | 91.59 | 5.83 | 5.76 |
| 28/4/2555 | 13:50 | 174.33 | 125.56 | 108.74 | 114.05 | 5.80 | 5.61 |
| 28/4/2555 | 14:00 | 174.32 | 125.40 | 109.49 | 114.14 | 6.42 | 6.20 |
| 28/4/2555 | 14:10 | 174.32 | 125.25 | 105.87 | 111.30 | 5.91 | 5.55 |
| 28/4/2555 | 14:20 | 174.32 | 124.90 | 106.44 | 112.32 | 6.04 | 5.79 |
| 28/4/2555 | 14:30 | 174.31 | 124.71 | 103.31 | 110.09 | 6.19 | 5.68 |
| 28/4/2555 | 14:40 | 174.28 | 123.79 | 106.16 | 115.15 | 6.24 | 5.93 |
| เฉลี่ย | | 174 | 125 | 103 | 110 | 6.06 | 5.79 |
| 28/4/2555 | 14:50 | 173.45 | 123.67 | 108.42 | 115.34 | 6.10 | 5.69 |
| 28/4/2555 | 15:00 | 173.25 | 122.98 | 109.75 | 116.09 | 6.19 | 5.64 |
| 28/4/2555 | 15:10 | 173.70 | 124.44 | 109.34 | 115.74 | 6.62 | 6.11 |
| 28/4/2555 | 15:20 | 170.55 | 122.18 | 110.04 | 118.87 | 5.95 | 5.17 |
| 28/4/2555 | 15:30 | 175.21 | 124.44 | 111.63 | 118.37 | 4.90 | 4.70 |
| 28/4/2555 | 15:40 | 174.75 | 124.01 | 110.13 | 114.70 | 6.51 | 6.01 |
| 28/4/2555 | 15:50 | 174.92 | 122.41 | 109.20 | 115.42 | 5.67 | 5.44 |
| 28/4/2555 | 16:00 | 176.97 | 123.33 | 105.96 | 110.19 | 6.28 | 6.03 |
| เฉลี่ย | | 174 | 123 | 109 | 116 | 6.02 | 5.68 |
| 29/7/2555 | 12:30 | 169.79 | 101.14 | 85.80 | 92.68 | 5.10 | 5.03 |
| 29/7/2555 | 12:40 | 168.18 | 100.26 | 85.95 | 93.93 | 5.47 | 5.34 |
| 29/7/2555 | 12:50 | 169.15 | 104.68 | 90.66 | 95.18 | 5.78 | 5.53 |
| 29/7/2555 | 13:00 | 172.21 | 104.31 | 88.97 | 93.89 | 6.03 | 5.56 |
| 29/7/2555 | 13:10 | 174.32 | 102.66 | 86.80 | 93.51 | 6.20 | 5.88 |
| 29/7/2555 | 13:20 | 173.80 | 102.90 | 87.85 | 92.80 | 6.23 | 5.75 |

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | อุณหภูมิก๊าซ เสียเข้า | อุณหภูมิก๊าซ เสียออก | อุณหภูมิ น้ำเข้า | อุณหภูมิ น้ำออก | P _i | P _o |
|------------------|-------|--------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | | °C | °C | °C | °C | bar | bar |
| 29/7/2555 | 13:30 | 173.88 | 101.82 | 85.93 | 92.91 | 6.40 | 6.18 |
| เฉลี่ย | | 172 | 103 | 87 | 94 | 5.82 | 5.61 |
| 29/7/2555 | 13:40 | 168.15 | 97.00 | 77.62 | 84.86 | 6.53 | 6.34 |
| 29/7/2555 | 13:50 | 168.59 | 95.60 | 78.50 | 85.82 | 6.37 | 6.36 |
| 29/7/2555 | 14:00 | 168.69 | 96.44 | 79.16 | 86.37 | 6.57 | 6.15 |
| 29/7/2555 | 14:10 | 168.83 | 96.14 | 78.02 | 86.09 | 6.62 | 6.24 |
| 29/7/2555 | 14:20 | 168.83 | 96.11 | 80.40 | 85.47 | 6.42 | 6.06 |
| 29/7/2555 | 14:30 | 168.80 | 95.12 | 78.46 | 84.52 | 6.49 | 6.28 |
| เฉลี่ย | | 169 | 96 | 79 | 85 | 6.5 | 6.2 |
| 29/7/2555 | 14:40 | 168.72 | 89.70 | 69.35 | 76.72 | 6.71 | 6.25 |
| 29/7/2555 | 14:50 | 168.62 | 88.62 | 70.53 | 75.08 | 6.56 | 6.47 |
| 29/7/2555 | 15:00 | 168.72 | 89.40 | 69.81 | 75.42 | 6.57 | 6.23 |
| 29/7/2555 | 15:10 | 169.14 | 90.08 | 68.74 | 75.84 | 6.76 | 6.35 |
| 29/7/2555 | 15:20 | 169.20 | 89.21 | 69.58 | 75.13 | 6.46 | 6.32 |
| 29/7/2555 | 15:30 | 169.20 | 90.01 | 69.36 | 76.07 | 6.60 | 6.31 |
| เฉลี่ย | | 169 | 90 | 70 | 76 | 6.61 | 6.32 |
| 2/7/2555 | 16:50 | 169.48 | 96.14 | 81.14 | 87.33 | 5.12 | 4.92 |
| 2/7/2555 | 17:00 | 170.22 | 101.00 | 79.74 | 86.12 | 6.19 | 5.65 |
| 2/7/2555 | 17:10 | 169.38 | 98.28 | 79.72 | 86.91 | 5.53 | 5.06 |
| 2/7/2555 | 17:20 | 169.78 | 95.07 | 78.95 | 86.41 | 5.22 | 4.93 |
| 2/7/2555 | 17:30 | 169.45 | 94.04 | 79.42 | 86.50 | 4.89 | 4.71 |
| 2/7/2555 | 17:40 | 168.77 | 93.15 | 79.57 | 86.64 | 6.02 | 5.78 |
| 2/7/2555 | 17:50 | 169.32 | 92.61 | 78.42 | 83.57 | 5.24 | 5.03 |
| เฉลี่ย | | 169 | 96 | 80 | 86 | 5.45 | 5.16 |
| 3/7/2555 | 13:40 | 172.39 | 95.57 | 80.33 | 86.31 | 4.87 | 4.57 |

| วัน/เดือน/ ปี | เวลา | อุณหภูมิก๊าซ เสียเข้า | อุณหภูมิก๊าซ เสียออก | อุณหภูมิ น้ำเข้า | อุณหภูมิ น้ำออก | P _i | P _o |
|------------------|-------|--------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|----------------|----------------|
| | | °C | °C | °C | °C | bar | bar |
| 3/7/2555 | 13:50 | 172.47 | 104.50 | 89.58 | 96.01 | 5.32 | 5.23 |
| 3/7/2555 | 14:00 | 173.68 | 105.08 | 90.41 | 96.07 | 5.33 | 5.06 |
| 3/7/2555 | 14:10 | 173.98 | 99.09 | 80.02 | 87.75 | 5.39 | 5.32 |
| 3/7/2555 | 14:20 | 172.93 | 101.51 | 85.21 | 92.26 | 5.22 | 4.98 |
| 3/7/2555 | 14:30 | 173.32 | 103.98 | 85.94 | 92.40 | 5.11 | 4.94 |
| 3/7/2555 | 14:40 | 173.41 | 103.65 | 85.89 | 91.36 | 5.61 | 5.55 |
| 3/7/2555 | 14:50 | 171.45 | 100.76 | 86.32 | 90.14 | 6.43 | 6.27 |
| เฉลี่ย | | 173 | 102 | 85 | 92 | 5.48 | 5.33 |
| 3/7/2555 | 15:00 | 170.99 | 91.07 | 70.90 | 77.40 | 6.34 | 6.04 |
| 3/7/2555 | 15:10 | 166.73 | 90.46 | 70.99 | 78.02 | 5.34 | 5.07 |
| 3/7/2555 | 15:20 | 169.26 | 89.61 | 71.72 | 77.38 | 5.10 | 4.84 |
| 3/7/2555 | 15:30 | 169.73 | 87.39 | 70.50 | 77.09 | 4.72 | 4.40 |
| 3/7/2555 | 15:40 | 168.87 | 85.68 | 70.95 | 73.68 | 5.04 | 4.80 |
| 3/7/2555 | 15:50 | 168.54 | 91.43 | 70.99 | 79.02 | 6.08 | 5.92 |
| 3/7/2555 | 16:00 | 168.46 | 92.70 | 72.98 | 79.54 | 6.06 | 5.70 |
| เฉลี่ย | | 169 | 90 | 71 | 77 | 5.52 | 5.25 |

ตารางที่ ค.6 เปรียบเทียบระหว่างผลการติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ทางทฤษฎีและทดลองจริง

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ทฤษฎี | ทดลองจริง |
|--|---------------|---------------------|--------|-----------|
| อัตราการไหลของน้ำป้อน | \dot{m}_w | kg/s | 0.953 | 0.63 |
| อัตราการไหลของก๊าซเสีย | \dot{m}_f | kg/s | 0.67 | 0.6 |
| อุณหภูมิน้ำที่เข้าอีโคโนไมเซอร์ | $T_{w,i}$ | °C | 110 | 103 |
| อุณหภูมิก๊าซเสียที่เข้าอีโคโนไมเซอร์ | $T_{f,i}$ | °C | 230 | 174 |
| อุณหภูมิน้ำที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ | $T_{w,o}$ | °C | 125 | 110 |
| อุณหภูมิก๊าซเสียที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ | $T_{f,o}$ | °C | 144 | 125 |
| ประสิทธิผลของอีโคโนไมเซอร์ | ε | | 0.7 | 0.428 |
| ตัวเลขหน่วยการถ่ายเท | NTU | | 1.397 | 0.593 |
| ขนาดท่อ | OD | mm | 19 | 19 |
| ความหนาของท่อ | t | mm | 1.5 | 1.5 |
| จำนวนท่อต่อแถว | N_L | | 18 | 18 |
| จำนวนแถว | N_T | | 22 | 22 |
| ความยาวท่อ | L | m | 0.8 | 0.8 |
| จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน | n | tubes | 396 | 396 |
| ขนาดปล่องก๊าซเสีย | | m | 0.4572 | 0.508 |
| พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนทั้งหมด | A | m ² | 18.91 | 18.91 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนน้ำในท่อ | h_i | W/m ² -K | 612 | 299 |
| สัมประสิทธิ์พาความร้อนก๊าซเสียนอกท่อ | h_o | W/m ² -K | 62 | 56.32 |
| สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนรวม | U | W/m ² -K | 53.5 | 44.5 |
| Transverse Pitch (1.75 x OD) | S_T | mm | 33.25 | 33.25 |
| Longitudinal Pitch (1.75 x OD) | S_L | mm | 33.25 | 33.25 |
| Diagonal Pitch | S_D | mm | 37.17 | 37.17 |
| ความดันตกของน้ำในท่อ | ΔP_i | kPa | 0.010 | 10 |

ตารางที่ ค.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทางทฤษฎีและการทดลองจริง

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ทางทฤษฎี | หลังติดตั้ง |
|--|-----------|----------|----------|-------------|
| การทำงานของหม้อไอน้ำ | | hour/day | 8 | 8 |
| ประหยัดพลังงานเชื้อเพลิง | | kg/yr | 47304 | 30193 |
| ประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ | | % | 14.2 | 14.1 |
| ประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง | | Bath/yr | 1040688 | 664242 |
| ค่าใช้จ่ายการสร้างและติดตั้งอีโคโนไมเซอร์ | | Bath | 369800 | 369800 |
| ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ควบคุม | | Bath | 557874 | 557874 |
| ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด | | Bath | 927674 | 927674 |
| ระยะเวลาคืนทุนของค่าใช้จ่ายทั้งหมด | n | month | 8.2 | 19.3 |
| อัตราผลตอบแทนการลงทุน | IRR | % | 76.1 | 17.3 |

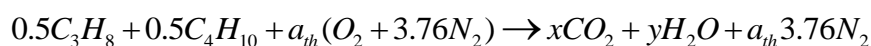
ภาคผนวก ง

การคำนวณความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียที่ออกจากปล่องของหม้อไอน้ำ

ตัวอย่าง การวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียของก๊าซเสียที่ออกจากปล่องของหม้อไอน้ำ

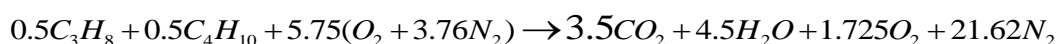
สมการการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว

สมการทางทฤษฎี



$$\text{สมดุลสมการ } x = 3.5, y = 4.5, a_{th} = 5.75$$

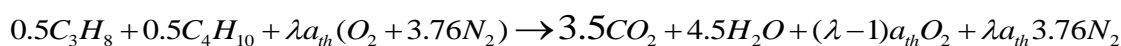
ดังนั้น สมการการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลวทางทฤษฎี คือ



หาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

$$AF_{stoic} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{5.75 \times [31.998 + (3.76 \times 28.014)]}{51} = 15.483$$

สมการทางปฏิบัติ



โดย λ คือ ปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ $(\lambda - 1)a_{th}O_2$ ในทางปฏิบัติสามารถวัดค่าอากาศส่วนเกินได้จากเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซเสีย (flue gas analyzer) ค่าที่วัดได้จะอยู่ในรูปอัตราส่วนร้อยละโดยโมล

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซเสีย จะวัดปริมาณออกซิเจนในลักษณะ dry basis หมายถึง ก๊าซเสียจะถูกดึงเอาไอน้ำและความชื้นออกไปก่อนจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงเป็นปริมาณอากาศส่วนเกินในทางปฏิบัติ ดังสมการ

$$\%O_2 = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{SO_2} + n_{O_2} + n_{N_2}} = \frac{(\lambda - 1)a_{th}}{3.5 + 0 + (\lambda - 1)a_{th} + 3.76\lambda a_{th}}$$

จัดรูปให้อยู่ในรูปสมการของ λ

$$\lambda = \frac{a_{th} + \left[(3.5 - a_{th}) \left(\frac{\%O_2}{100} \right) \right]}{a_{th} - 4.76a_{th} \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}$$

โดย $a_{th} = 5.75$ และ $\%O_2$ คือ ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จากก๊าซเสีย ที่ค่าเท่ากับ 5.38

แทนค่าเข้าไปในสมการ

$$\lambda = \frac{5.75 + (3.5 - 5.75) \left(\frac{5.38}{100} \right)}{5.75 - (27.37) \left(\frac{5.38}{100} \right)} = 1.33$$

โดยที่ $\%O_2$ คือ ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จากก๊าซเสีย ที่ค่าเท่ากับ 5.38

สามารถหาอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ (actual air-fuel ratio)

$$AF_{actual} = \lambda AF_{stoic}$$

โดยที่ AF_{actual} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ

AF_{stoic} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี

จะได้ $AF_{actual} = 1.33 \times 15.483 = 20.53$

สามารถคำนวณหามวลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

$$m_{air,comb} = AF_{actual} \times m_{fuel}$$

โดยที่ m_{fuel} สามารถหาได้จากการตรวจวัดการใช้เชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ มีค่าเท่ากับ 95 kg

$$m_{air,comb} = 1950 \text{ kg}$$

จากสมการสมดุลมวล

$$m_{flue\ gas} = m_{fuel} + m_{air,comb}$$

สามารถคำนวณมวลของก๊าซเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำ

$$m_{flue\ gas} = 95 + 1950 = 2045 \text{ kg}$$

จากนั้นแยกองค์ประกอบของก๊าซเสีย ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ง.1 การแยกองค์ประกอบของก๊าซเสีย

| องค์ประกอบของก๊าซเสีย | Mole fraction, X | Mass fraction, Y | Mass (kg) |
|-----------------------|------------------|------------------|-----------|
| CO ₂ | 0.0764 | 0.1188 | 242.91 |
| H ₂ O | 0.0982 | 0.0625 | 127.84 |
| O ₂ | 0.0123 | 0.0139 | 28.38 |
| SO ₂ | 0 | 0 | 0 |
| N ₂ | 0.8132 | 0.8049 | 1646.42 |

สามารถคำนวณความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย ดังสมการ

$$Q_{flue,out} = m_{CO_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,CO_2} dT \right) + m_{H_2O,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,H_2O} dT \right) + m_{O_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,O_2} dT \right) \\ + m_{SO_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,SO_2} dT \right) + m_{N_2,flue} \left(\int_{T_{amb}}^{T_{flue}} c_{p,N_2} dT \right)$$

โดยที่ c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะ ซึ่งคำนวณได้จากตารางที่ 3.1

T_{flue} คือ อุณหภูมิของก๊าซเสีย มีค่าเท่ากับ 170 °C

T_{amb} คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม มีค่าเท่ากับ 35 °C

จากนั้นนำมวลของก๊าซเสียที่แยกองค์ประกอบ คำนวณหาค่าความร้อนสูญเสียของก๊าซเสีย

$$Q_{flue,out} = 242.91(117.02) + 127.84(244.6) + 28.38(121.48) + 0 + 1646.42(134.58) \\ = 284,730 \text{ kJ or } 284.73 \text{ MJ}$$

ภาคผนวก จ

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนของหม้อไอน้ำและอีโคโนไมเซอร์

ตัวอย่าง การคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (Convection)

$$q_{conv} = h_m A_{conv} (T_s - T_{amb})$$

โดยที่ q_{conv} คือ การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (W)

h_m คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A_{conv} คือ พื้นที่ของการพาความร้อน (m^2)

T_s คือ อุณหภูมิผิวด้านนอก ($^\circ C$)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^\circ C$)

การคำนวณหาค่าการพาความร้อน (q_{conv}) ต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย (h_m) ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ยกับนัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)

$$\overline{NU} = \frac{hL_c}{k} \quad \text{หรือ} \quad h = \frac{k}{L_c} \overline{NU}$$

โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ (thermal conductivity, $W/m \cdot ^\circ C$)

L_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหม้อไอน้ำหรืออีโคโนไมเซอร์ (Characteristic length, m)

\overline{NU} คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nusselt number)

สามารถหาค่า k จากความสัมพันธ์กับอุณหภูมิฟิล์ม (T_{film}) ของอากาศที่อยู่ล้อมรอบ โดยอุณหภูมิฟิล์มหาได้จาก

$$T_{film} = \frac{T_s + T_{amb}}{2}$$

โดยที่ T_s คือ อุณหภูมิผิวที่วัดได้ และ T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม จากนั้นนำค่า T_{film} ที่คำนวณได้ไปเปิดตารางคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศ [12] หาค่า ν , k และ Pr

กรณีหม้อไอน้ำ

ลักษณะของพื้นที่ผิวเพื่อนำไปใช้หา \overline{NU} โดยที่หม้อไอน้ำมีลักษณะเป็นแบบทรงกระบอก ดังนั้นสมการที่นำมาใช้เพื่อหาค่า \overline{NU} นั้นสามารถใช้สมการที่ใช้กับ Horizontal cylinder ตามสมการ

$$\overline{NU} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

กรณีอีโคโนไมเซอร์

ลักษณะของพื้นที่ผิวอีโคโนไมเซอร์มีลักษณะเป็นแบบทรงสี่เหลี่ยม ดังนั้นสมการที่นำมาใช้เพื่อหาค่า \overline{NU} นั้นสามารถใช้สมการที่ใช้กับ vertical plate ดังนี้

$$\overline{NU} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

โดย ค่า Rayleigh number ของทั้ง 2 สมการ หาได้จากสมการ

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_C^3}{\nu^2} Pr$$

และ

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_C^3}{\nu^2}$$

โดยที่ ν คือ ค่า kinematics viscosity ของของไหล (m^2/s)

L_C คือ ค่าความยาวของอีโคโนไมเซอร์ (m)

β คือ ค่า coefficient of volume expansion ($1/K$)

g คือ แรงโน้มถ่วงโลก $9.81 (m/s^2)$

สรุปขั้นตอนการหา h เริ่มต้นด้วยการหาค่า ν β k และ Pr จาก T_{film} นำค่าคำนวณหา Ra_L จากนั้นนำ Ra_L และ Pr ไปคำนวณหา \overline{NU} จากนั้นนำ \overline{NU} และ k ไปคำนวณหา h จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย

ตัวอย่างการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย

กรณีอุณหภูมิด้านหน้าของหม้อไอน้ำ

$$\text{ให้ } T_{\text{surface}} = 117^{\circ}\text{C} \quad T_{\text{amb}} = 35^{\circ}\text{C} \quad L = 1.6 \text{ m}$$

$$\text{หาอุณหภูมิฟิล์ม } T_{\text{film}} = \frac{117 + 35}{2} = 76.5^{\circ}\text{C}$$

เปิดตารางคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศ หาค่า ν k และ Pr ดังนี้

$$\nu = 2.1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0.02953 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.7154$$

นำค่าไปแทนในสมการหาค่า Rayleigh number

$$\begin{aligned} Ra_L &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \text{Pr} \\ &= \frac{(9.81)(0.00286)(117 - 35)(1.6^3)}{(2.1 \times 10^{-5})^2} (0.7154) \\ &= 3.17 \times 10^5 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่า Rayleigh number แทนในสมการหาค่า \overline{NU}

$$\begin{aligned} \overline{NU} &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.559 / \text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= \left\{ 0.6 + \frac{0.387(3.18)^{1/6}}{[1 + (0.559 / 0.7154)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \\ &= 10.59 \end{aligned}$$

นำค่า Nusselt number ที่ได้ไปแทนในสมการหาค่า h

$$h = \frac{k}{L_c} \overline{NU} = \frac{(0.02953)}{1.6} (10.59) = 0.2 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

กรณีอุณหภูมิจาน้ำของอีโคโนไมเซอร์

$$\text{ให้ } T_{\text{surface}} = 54^{\circ}\text{C} \quad T_{\text{amb}} = 35^{\circ}\text{C} \quad L=2.1 \text{ m}$$

$$\text{หาอุณหภูมิฟิล์ม } T_{\text{film}} = \frac{54.5 + 35}{2} = 44.75^{\circ}\text{C}$$

$$\nu = 1.75 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0.02699 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$$

$$\text{Pr} = 0.724$$

นำค่าไปแทนในสมการหาค่า Rayleigh number

$$\begin{aligned} Ra_L &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \text{Pr} \\ &= \frac{(9.81)(0.00315)(54.5 - 35)(2.1^3)}{(1.75 \times 10^{-5})^2} (0.724) \\ &= 1.02 \times 10^5 \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่า Rayleigh number แทนในสมการหาค่า \overline{NU}

$$\begin{aligned} \overline{NU} &= \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / \text{Pr})^{8/27} \right]} \right\}^2 \\ &= \left\{ 0.825 + \frac{(0.387)(1.02 \times 10^5)^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / 0.724)^{8/27} \right]} \right\}^2 \\ &= 7.83 \end{aligned}$$

นำค่า Nusselt number ที่ได้ไปแทนในสมการหาค่า h

$$h = \frac{k}{L_c} \overline{NU} = \frac{(0.02699)}{2.1} (7.83) = 0.1 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Plate Heat Exchanger)



ภาพที่ ฉ.1 อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Plate Heat Exchanger)

ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 (Plate Heat Exchanger No.1)

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|---|-----------------|----------------|-------|
| น้ำป้อนที่ออกจากอีโคโนไมเซอร์ (Hot side water) | | | |
| อัตราการไหลน้ำ | $\dot{m}_{w,h}$ | kg/h | 930 |
| อุณหภูมิน้ำเข้า | $T_{w,i,h}$ | °C | 125 |
| อุณหภูมิน้ำออก | $T_{w,o,h}$ | °C | 69.76 |
| ความดันสูญเสีย | ΔP_h | kPa | 6 |
| น้ำป้อนจากคอนเดนเสท (Cold side water) | | | |
| อัตราการไหลน้ำ | $\dot{m}_{w,c}$ | kg/h | 3450 |
| อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า | $T_{w,i,c}$ | °C | 60 |
| อุณหภูมิน้ำป้อนออก | $T_{w,o,c}$ | °C | 75 |
| ความดันสูญเสีย | ΔP_c | kPa | 76 |
| จำนวนแผ่น | | plate | 32 |
| พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน | A | m ² | 1.32 |
| ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 | | % | 30 |

ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 2 (Plate Heat Exchanger No.2)

| รายการ | สัญลักษณ์ | หน่วย | ค่า |
|--|----------------------|----------------|------|
| ไอน้ำที่ออกจากหม้อไอน้ำ (Hot side Stream) | | | |
| อัตราการไหลน้ำ | $\dot{m}_{Stream,h}$ | kg/h | 240 |
| อุณหภูมิน้ำเข้า | $T_{Stream,i,h}$ | °C | 170 |
| อุณหภูมิน้ำออก | $T_{Stream,o,h}$ | °C | 110 |
| ความดันสูญเสีย | ΔP_h | kPa | 2 |
| น้ำป้อนจากคอนเดนเสท (Cold side water) | | | |
| อัตราการไหลน้ำ | $\dot{m}_{w,c}$ | kg/h | 3450 |
| อุณหภูมิน้ำป้อนเข้า | $T_{w,i,c}$ | °C | 75 |
| อุณหภูมิน้ำป้อนออก | $T_{w,o,c}$ | °C | 110 |
| ความดันสูญเสีย | ΔP_c | kPa | 37 |
| จำนวนแผ่น | | plate | 44 |
| พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน | A | m ² | 2.06 |
| ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 2 | | % | 42 |

หมายเหตุ อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนตัวที่ 1 และ 2 (Plate Heat Exchanger No.1, 2) วัสดุแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน คือ ทองแดง (copper)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประสิทธิ์ เกี้ยวสุนทร เกิดวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2529 จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพฯ เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเครื่องกลภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 งานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารและได้รับรางวัลบทความยอดเยี่ยม สาขาการอนุรักษ์พลังงาน จากการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 และตีพิมพ์ในวารสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25