

## การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของ Economizer เพื่อการประหยัดพลังงานของหม้อไอน้ำ Study of Economizer-Efficiency Enhancement for Energy Conservation

เอกาทิตย์ ปรางมะณี<sup>1</sup>, จำลอง ปราบแก้ว<sup>2</sup>, มนต์ศักดิ์ พิมสาร<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง  
เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

\* E-mail: [ekathit21@thaimail.com](mailto:ekathit21@thaimail.com) , เบอร์โทรศัพท์ 087-401-6635

### **บทคัดย่อ**

บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยจากการตรวจวัดหม้อไอน้ำ (Boiler) พบว่ามีความร้อนจากก๊าซเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศถึง 12.2 เปอร์เซ็นต์ จึงได้ติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำความร้อนกลับมาใช้ ทำให้ได้อุณหภูมิน้ำป้อนหม้อไอน้ำสูงขึ้น สามารถประหยัดพลังงานได้ 0.0683 ktoeต่อปี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์(SolidWorks Flow Simulation) โดยทำการสร้างแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกลม(ติดตั้งจริง) แบบท่อสี่เหลี่ยม และแบบท่อสามเหลี่ยม ซึ่งจากการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าท่อรูปทรงสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ยดีที่สุด ได้น้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำมีอุณหภูมิเฉลี่ยถึง 112.3 องศาเซลเซียส คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานมากกว่า 21 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับท่อกลมที่ได้น้ำอุณหภูมิเฉลี่ย 109.8 องศาเซลเซียส

### **Abstract**

This research is to study heat exchanger efficiency by computer simulation model. For measurement of the boiler found that has the heat from the waste gases released into the atmosphere 12.2 percent. After install a heat exchanger for waste gas come recovery found that has water entered. Can energy saving 0.0683 ktoe per year. Which in this research study as design the heat exchangers by using computer model (Solidworks Flow Simulation) by model the round tube(installed) rectangular tube and triangular tube. The analysis of the model triangular tube has a heat exchanger efficiency the best average . Water before entering the boiler with an average temperature 112.3 celsius as a energy saving percentage over 21 percent compared to a round tube has an average water temperature is 109.8 celsius.

**Keywords:** boiler, energy saving, heat exchanger

## 1. บทนำ

การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Economizer) เกิดจากการดำเนินการอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน โดยการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ ซึ่งพบว่าการสูญเสียความร้อนจากก๊าซเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศ จึงมีแนวคิดในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในการอุ่นน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ

สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษาการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากมาย เช่น ปี 2552 วิชาดา เจษฎารัตนชัย [1] ได้ศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อจตุรัสโดยการสอดใส่แผ่นดัดครีบริบตัวดับเบิลวีพบว่าท่อที่มีแผ่นดัดครีบริบรูปดับเบิลวีทำมุม 30 องศาให้ค่าการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด ปี 2543 พลเดช ทองขุนดำ [2] ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบฮีโคโนไมเซอร์แบบท่อความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป และปี 2549 ณรงค์ ทรัพย์พุทธิวิรัช [3] ได้ทำการศึกษการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องที่มีครีบริบสามเหลี่ยมและการไหลหมุนวน พบว่าท่อที่มีครีบริบรูปสามเหลี่ยมมุมฉากให้ผลการถ่ายเทความร้อนดีที่สุด สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาวิเคราะห์การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะศึกษาการวิเคราะห์แบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำ โดยนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดหม้อไอน้ำของบริษัท ไทยอาซาฮี เคมีภัณฑ์ จำกัด ขนาด 6 ตันต่อชั่วโมง แรงดันไอน้ำ 13 บาร์เกจ ใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ (NG) รวมถึงโครงสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจริงมาสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SolidWorks Flow Simulation ด้วยวิธี large eddy simulation (LES) เพื่อหาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยข้อดีของการใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ทำให้สามารถนำข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองไปหาผลประหยัดพลังงานเพื่อหาจุดคุ้มทุนในการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนข้อเสียของการใช้แบบจำลองคือ ผลที่ได้จากแบบจำลองนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนจากผลการติดตั้งจริง อัน

เนื่องมาจากแฟลคเตอร์ต่างๆ ได้แก่ คราบเขม่าและตะกอนภายใน แรงดันตกคร่อม รวมถึงสภาพแวดล้อมขณะตรวจวัด และงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงให้ระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำหน้าที่ดึงความร้อนที่มากับไอเสียของหม้อไอน้ำ มาส่งให้กับน้ำที่จะป้อนเข้าหม้อไอน้ำเพื่อให้ น้ำดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงขึ้น การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อน สามารถคำนวณได้ตามสมการความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบลอการิทึม (Log Mean Temperature Difference, LMTD)

$$Q_{\text{cold}} = m_c C_{pc} (T_{c,\text{out}} - T_{c,\text{in}}) \quad (1)$$

$$Q_{\text{hot}} = m_h C_{ph} (T_{h,\text{out}} - T_{h,\text{in}}) \quad (2)$$

$$q = UA \Delta T_{\text{lm}} \quad (3)$$

โดยที่ U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม  
A = พื้นผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน  
 $\Delta T_{\text{lm}}$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ย

$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2}) / (T_{h1} - T_{c1})]} \quad (4)$$

วิธีของ LMTD มีสมมุติฐานคือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล ( $c_p$ ) คงที่ไม่แปรตามอุณหภูมิ และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมคงที่

ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ( $\epsilon$ ) เป็นอัตราส่วนของความร้อนที่ถูกถ่ายเทจริงต่อความร้อนที่ควรจะถูกถ่ายเทสูงสุด

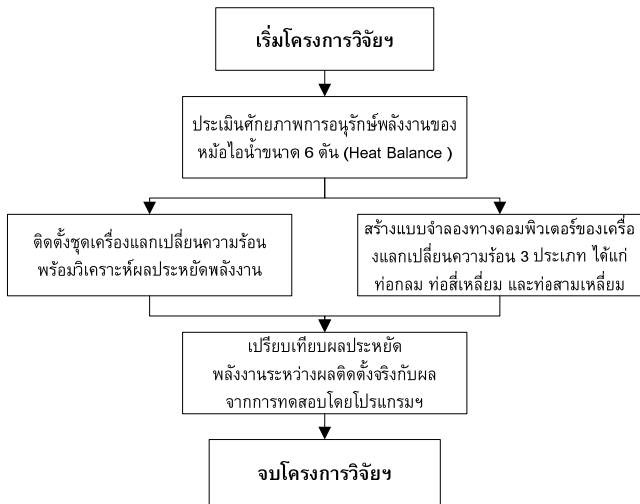
$$\text{effectiveness} = \epsilon = \frac{q}{q_{\text{max}}} \quad (5)$$

จำนวนของหน่วยถ่ายเทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (number of transfer units, NTU)

$$NTU = -\ln[1 + (1/C_r) \ln(1 - \epsilon C_r)] \quad (6)$$

### 3. การดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์หม้อไอน้ำและติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนที่สอง เป็นการวิจัยเพิ่มเติมในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 4. การประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ (Fire Tube Boiler) โรงงานได้นำ Condensate กลับเข้ามาสู่ระบบประมาณ 95 % ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 104 °C ขณะตรวจวัดหม้อไอน้ำเดินเครื่องที่ 55 เปอร์เซ็นต์ เวลาในการตรวจวัด 13.30 น. เดือนมิถุนายน โดยสามารถสรุปข้อมูลจากการตรวจวัดได้ตามตารางที่ 1 ตารางที่ 1 ข้อมูลของระบบหม้อไอน้ำ

หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ		หน่วย
<b>a. น้ำ</b>		
1. ปริมาณน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	3.32	m <sup>3</sup> /hr
2. อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำ	98	°C
3. อัตราการ Blow Down	16.6	kg/hr
<b>b. ไอน้ำ</b>		
1. อัตราการไหลของไอน้ำ	3,320	kg/hr
2. แรงดันใช้งานไอน้ำ	1,300	kPa
3. ความชื้นของไอน้ำ (Dryness)	100	%

<b>c. เชื้อเพลิง</b>		
1. ประเภทเชื้อเพลิง	NG	
2. อัตราการใช้เชื้อเพลิง	160.5	CFM
3. อุณหภูมิของเชื้อเพลิง	34	°C
4. ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	1.055	kJ/BTU
<b>d. อากาศในการเผาไหม้</b>		
1. อัตราการไหลของอากาศ	4,010	m <sup>3</sup> /hr
2. อุณหภูมิของอากาศ	34.2	°C
<b>e. ไอเสีย</b>		
1. อัตราการไหลของก๊าซเสีย	4,150	m <sup>3</sup> /hr
2. อุณหภูมิของก๊าซเสีย	226.8	°C
3. ปริมาณออกซิเจน	3.4	%

จากข้อมูลสามารถนำมาคำนวณหาค่าความร้อนที่สูญเสีย (Heat Balance) ผลที่ได้คือ มีความร้อนสูญเสียจากก๊าซเสียถึง 12.2% และมีอุณหภูมิที่ปล่อยสู่บรรยากาศสูงถึง 226.8 °C ตามตารางที่ 2

### ตารางที่ 2 การทำสมดุลความร้อนของหม้อไอน้ำ

ค่าความร้อนที่ป้อนเข้าหม้อไอน้ำ (MJ/h)		%
(1) ความร้อนจากการเผาไหม้	9,048	84.9
(2) ความร้อนสัมผัสจากน้ำป้อน	1,363	12.8
(3) ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิง	63	0.6
(4) จากอากาศเผาไหม้	178	1.7
<b>รวม</b>	<b>10,652</b>	<b>100</b>
ค่าความร้อนที่ออกจากหม้อไอน้ำ (MJ/h)		%
(5) ความร้อนจากไอน้ำที่ผลิต	9,255	86.9
(6) ความร้อนจากก๊าซเสีย	1,299	12.2
(7) การสูญเสียความร้อนที่ผิว	7	0.06
(8) จากการ Blow Down	46	0.43
(9) การสูญเสียความร้อนอื่นๆ	45	0.41
<b>รวม</b>	<b>10,652</b>	<b>100</b>

### 5. การติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากการประเมินศักยภาพการอนุรักษ์พลังงาน จึงทำการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบริเวณปล่อง ก๊าซเสียของหม้อไอน้ำ มีหลักการทำงานคือ ท่อน้ำจะวิ่ง เข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะขดเป็นรูปตัว ยูสลับกันไปมา เพื่อเพิ่มพื้นที่การถ่ายเทความร้อน ระหว่างก๊าซเสียกับของเหลว ตามรูปที่ 2 ซึ่งเป็นเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนของ Cleaver Brooks รุ่น CRE-42E แบบท่อกลมขนาด 2 นิ้ว จำนวนภายใน 18 ท่อ มี ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งประมาณ 1,070,000 บาท



รูปที่ 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้ง

หลังจากการติดตั้ง ได้ทำการตรวจวัดเครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล ประสิทธิภาพพลังงาน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลจากการตรวจวัดหลังการติดตั้ง

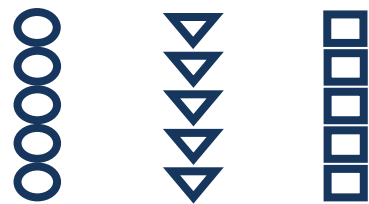
Economizer		หน่วย
1. อัตราการไหลของน้ำเข้า	3.32	m <sup>3</sup> /hr
2. อุณหภูมิน้ำเข้า	98	°C
3. อุณหภูมิน้ำออก	117	°C
4. อัตราการไหลของก๊าซร้อนเข้า	4,150	m <sup>3</sup> /hr
5. อุณหภูมิก๊าซร้อนเข้า	226.8	°C
6. อุณหภูมิก๊าซร้อนออก	190	°C

ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติรวมทั้งปีของทาง โรงงาน 80,892 mmBTU/ปี ราคาก๊าซธรรมชาติ 280 บาท/mmBTU

จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำนวณคิดเป็น พลังงานที่สามารถประหยัดได้ 2,735 mmBTU/ปี คิด เป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ 765,769 บาท/ปี เทียบเท่า ต้นน้ำมันดิบ 0.0683 ktoe/ปี ระยะเวลาคืนทุน 1.4 ปี

### 6. การพัฒนาประสิทธิภาพเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

จากผลประหยัดพลังงานที่ได้ จึงมีแนวคิดที่ว่าถ้าทำ การเปลี่ยนโครงสร้างท่อให้มีลักษณะที่แตกต่างกันจะทำให้ การไหลของก๊าซร้อนที่สัมผัสผิวท่อมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งจะส่งผลถึงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อน ด้วย โดยได้สร้างแบบจำลองท่อกลม(ติดตั้งจริง) แบบจำลองท่อสามเหลี่ยม และแบบจำลองท่อสี่เหลี่ยม ซึ่งท่อ 3 ประเภทนี้มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากัน กันคือ 9.5082 m<sup>2</sup> (จำนวนท่อทั้งหมด 18 ท่อ) มาทำ การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อ เปรียบเทียบผลประหยัด ถึงแม้ในการผลิตท่อทรง สามเหลี่ยมและทรงสี่เหลี่ยมจะมีต้นทุนสูง แต่ก็สามารถ นำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการปรับปรุงพัฒนาให้เครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นใน อนาคต โดยลักษณะการวางของท่อทั้ง 3 ประเภทแสดง ดังรูปที่ 3

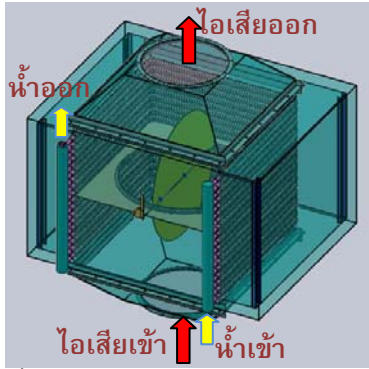


ท่อกลม      ท่อสามเหลี่ยม      ท่อสี่เหลี่ยม

รูปที่ 3 แสดงการวางตำแหน่งของท่อทั้ง 3 ประเภท

#### 6.1 การเปิด Bypass Damper

มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ออก จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นการรักษา อุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ปล่อยสู่บรรยากาศ ป้องกันการ เกิดไอกรดกำมะถันเพื่อหลีกเลี่ยงการกัดกร่อนของกรดที่ จะทำให้ท่อภายในหม้อกร้อนอันเนื่องมาจากอุณหภูมิก๊าซ ร้อนทิ้งต่ำ ซึ่งจะวิเคราะห์โดยการเปิด Bypass Damper เพิ่มขึ้นทีละ 10 องศา เริ่มที่มุม 0 องศา ถึงมุม 90 องศา ทั้งหมด 10 ช่วง เพื่อเป็นการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการ แลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดในแต่ละช่วง



รูปที่ 4 แสดงการเปิด Bypass Damper

## 6.2 ขอบเขตเงื่อนไขในการวิเคราะห์

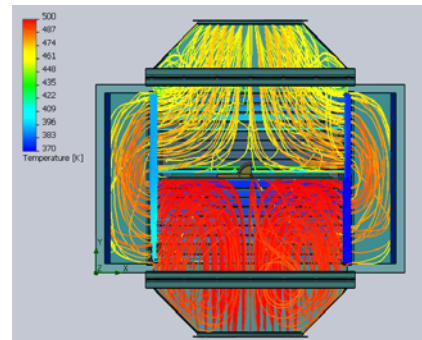
สมการควบคุมในการวิเคราะห์ คือน้ำเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการพาแบบบังคับสำหรับการไหลภายในท่อ (Forced Convection for Flow inside Ducts) เมื่อน้ำไหลเข้าไปในท่อที่อุณหภูมิสม่ำเสมอซึ่งมีค่าแตกต่างจากอุณหภูมิที่ผิวแล้ว การพาความร้อนจะเกิดขึ้นและบาวนด์รีเลย์เออร์ของความร้อนจะเริ่มตันก่อตัวขึ้น โดยมีสถานะอุณหภูมิผิวต่อคงที่ ( $T_s = \text{คงที่}$ ) หรือฟลักซ์ความร้อนที่ผิวคงที่ ( $q_s = \text{คงที่}$ ) สภาวะที่ปรับตัวคงที่แล้วของความร้อน (thermally fully developed condition) ก็จะเกิดขึ้น ในที่สุดรูปร่างของอุณหภูมิที่ปรับตัวเต็มที่แล้วจะแตกต่างกันตามเงื่อนไข ส่วนไอเสียนั้นจะไหลผ่านจากด้านล่างขึ้นด้านบน เป็นการพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) เกิดจากแรงลอยตัวของก๊าซเสีย การถ่ายเทโมเมนตัมและพลังงานในการพาแบบอิสระได้จากกฎการอนุรักษ์ ซึ่งแรงจากความเฉื่อยและแรงจากความหนืดมีความสำคัญต่อการถ่ายเทพลังงาน

ในการวิจัยนี้มีปัจจัยควบคุม คือ

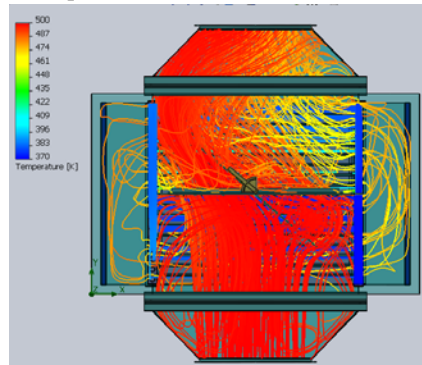
1. การไหลเป็นแบบ unsteady flow
2. การไหลของน้ำเป็นแบบอัดตัวไม่ได้
3. อุณหภูมิภายนอก 34.2 °C
4. อุณหภูมิของน้ำเข้า 98 °C
5. อัตราการไหลของน้ำเข้า 3.32 m<sup>3</sup>/hr
6. อุณหภูมิของก๊าซร้อนเข้า 226.8 °C
7. อัตราการไหลของก๊าซร้อนเข้า 4,150 m<sup>3</sup>/hr
8. ความเข้มข้นในการไหลปั่นป่วนมีค่า 2 %
9. Thermal Conductivity 19 W/(m.K)
10. Overall heat transfer coefficient 50 W/(m<sup>2</sup>.K)

## 6.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

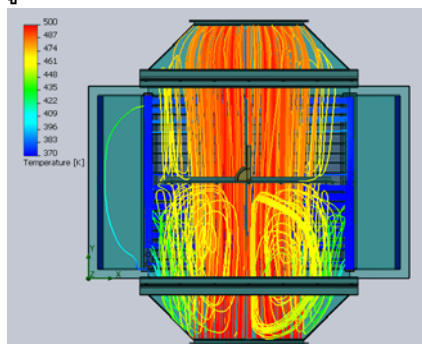
เป็นการไหลแบบปั่นป่วนใน 3 มิติ ด้วยวิธี large eddy simulation (LES) การไหลเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว (unsteady flow) โดยช่วงเวลา (time step) ของการคำนวณแต่ละช่วงถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ โดยที่เวลาเริ่มต้นวิเคราะห์จะไม่มีของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากการคำนวณเป็นแบบสภาวะไม่คงตัว ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จึงเป็นข้อมูลขณะใดขณะหนึ่ง ดังนั้นข้อมูลต่างๆ (T, v, u และ P) จึงถูกเก็บสะสม และนำมาหาค่าเฉลี่ยเทียบกับเวลา (time averaged data) และใช้สมการวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธี Effectiveness- NTU Method ช่วยในการวิเคราะห์



รูปที่ 5 Bypass Damper ปิด



รูปที่ 6 Bypass Damper เปิด 30 องศา



รูปที่ 7 Bypass Damper เปิด 90 องศา

รูปที่ 5 แสดงการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง Bypass Damper ปิดสนิท ทำให้ไอเสียไม่สามารถไหลผ่านไปได้โดยตรง ในช่วงแรกไอเสียมีการไหลแบบลามินาร์ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่ไม่สูง แต่เมื่อไอเสียไหลไปชน Bypass Damper ที่ปิดอยู่ทำให้ไอเสียต้องหาทางออกโดยการไหลผ่านช่องระหว่างท่อด้านข้างทั้ง 3 ด้าน ซึ่งช่วงนี้ทำให้การพาที่มีทั้งแบบลามินาร์และเทอร์บูเลนต์ คือเข้าสู่ช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition) เมื่อไอเสียไหลผ่านท่อในส่วนล่างแล้วจะเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ซึ่งทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงมาก แล้วไอเสียก็จะไหลผ่านช่องระหว่างท่อในส่วนของด้านบนเพื่อออกไปทางปล่อง ซึ่งการปิด Bypass Damper ทำให้ไอเสียมีการไหลแบบปั่นป่วนเป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและเป็นการเพิ่มพื้นที่สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย

รูปที่ 6 แสดงการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง Bypass Damper เปิด 30 องศา ทำให้ไอเสียส่วนหนึ่งไหลผ่าน Bypass Damper โดยตรงเลยแต่ก็ยังมียไอเสียอีกส่วนหนึ่งที่ยังคงมีการไหลผ่านช่องระหว่างท่ออยู่ จากรูปจะเห็นไอเสียซึ่งส่วนหนึ่งเป็นการไหลแบบลามินาร์และส่วนที่เหลือเป็นการไหลแบบเทอร์บูเลนต์ โดยยิ่งเปิด Bypass Damper มากเท่าไรก็จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนน้อยลง และไอเสียก็จะไหลผ่านท่อด้านนอกทั้ง 3 ด้านน้อยลงด้วย

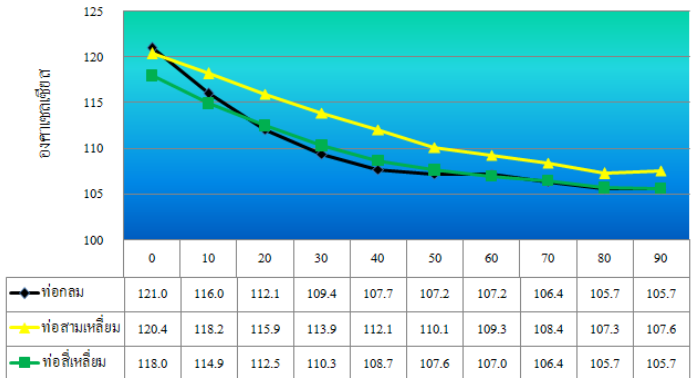
รูปที่ 7 แสดงการวิเคราะห์ที่ตำแหน่ง Bypass Damper เปิด 90 องศา (เปิดสุด) ทำให้ไอเสียไหลผ่านไปทางปล่องจนเกือบหมด มีการแลกเปลี่ยนความร้อนไม่สูงเนื่องจากไอเสียสัมผัสกับพื้นที่ผิวของท่อน้อย

#### 6.4 ผลของอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์

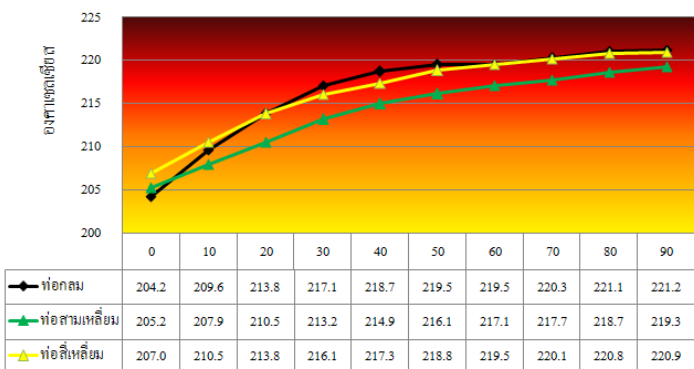
จากการวิเคราะห์ทำให้ได้อุณหภูมิของน้ำป้อนที่แลกเปลี่ยนกับก๊าซร้อน ตามช่วงการเปิด Bypass Damper ซึ่งจากรูปที่ 8 อุณหภูมิของน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อทั้ง 3 ประเภท ซึ่งเมื่อเปิด Bypass Damper มากขึ้นอุณหภูมิของน้ำออกจะยิ่งลดลง และจะเห็นว่าท่อกลมมีอุณหภูมิของน้ำออกสูงสุดเท่ากับ 121 °C ท่อสามเหลี่ยมมีอุณหภูมิของน้ำออก

สูงสุดเท่ากับ 120.4 °C และท่อสี่เหลี่ยมมีอุณหภูมิของน้ำออกสูงสุดเท่ากับ 118 °C แต่จากรูปจะเห็นว่าถึงแม้ท่อกลมจะมีอุณหภูมิของน้ำออกสูงสุดก็จริงแต่ขณะเปิด Bypass Damper อุณหภูมิจะลดลงอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับท่อสามเหลี่ยมแล้ว ถึงแม้จะมีการเปิด Bypass Damper อุณหภูมิจะลดลงไม่มากโดยเฉลี่ยยังคงสูงอยู่ ส่วนท่อสี่เหลี่ยมจะมีอุณหภูมิของน้ำออกที่น้อยกว่าขณะปิด Bypass Damper แต่จะเห็นว่าในช่วงการเปิดที่ 20 องศา ถึง 50 องศา น้ำออกของท่อสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าท่อวงกลมแต่หลังจากนั้นอุณหภูมิของน้ำออกจะมีค่าใกล้เคียงกัน

และจากผลการวิเคราะห์จะได้อุณหภูมิก๊าซเสียเมื่อเปิด Bypass Damper อุณหภูมิจะมากขึ้น เนื่องจากไอเสียจะไหลผ่านโดยไม่สัมผัสท่อทำให้ไอเสียยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ขณะที่ปล่อยสู่บรรยากาศ ซึ่งจากรูปที่ 9 จะเห็นว่า ท่อสามเหลี่ยมมีอุณหภูมิก๊าซเสียที่ปล่อยน้อยที่สุดเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำออกเป็นตัวแปรต่ออุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยสู่บรรยากาศ



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำออกกับช่วงการเปิด Bypass Damper



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไอเสียออกกับช่วงการเปิด Bypass Damper

### 6.5 ความดันขั้วก๊าซเสียที่ได้จากการวิเคราะห์

ความดันขั้วก๊าซเสียที่ลดลงเป็นผลจากลักษณะโครงสร้างของท่อที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 10 แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างความดันขั้วก๊าซเสีย( $\Delta P$ )ของท่อทั้ง 3 ประเภท จะมีค่าลดลงขณะเปิด Bypass Damper ซึ่งท่อสามเหลี่ยมมีความดันขั้วก๊าซเสียลดลงเฉลี่ยสูงสุดซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิของน้ำที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยสามารถหาได้โดยสมการที่ 7

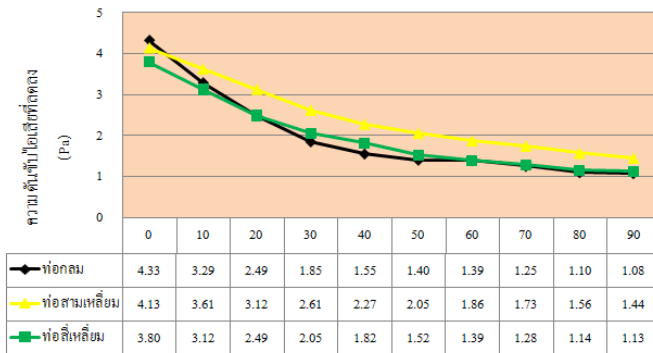
$$\Delta P = (\rho_a - \rho_s)Hg \quad (7)$$

$\rho_a$  = ความหนาแน่นของอากาศภายนอก

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของก๊าซเสีย

H = ความสูงของปล่องไอเสีย

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

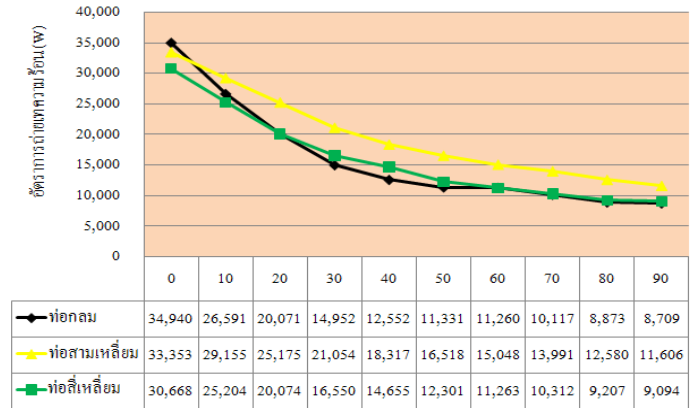


รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันขั้วไอเสียที่ลดลง( $\Delta P$ )กับช่วงการเปิด Bypass Damper

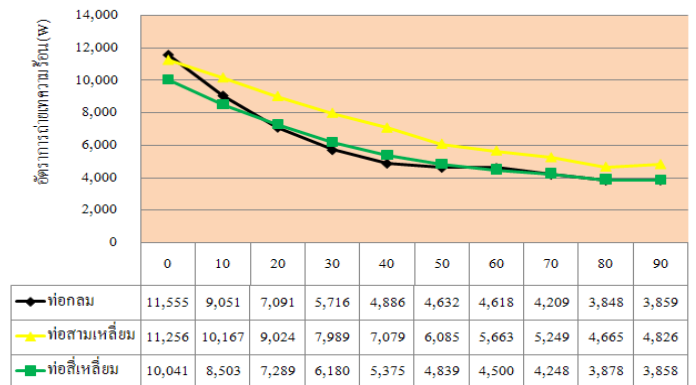
### 6.6 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์พบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ได้เมื่อเปิด Bypass Damper มากขึ้นจะทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อน ( $Q_h$ ) และค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ ( $Q_c$ ) ลดลงทั้งนี้ก็เพราะว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวแปรผันตามการเปิด Bypass Damper ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากหลักการถ่ายเทความร้อนพบว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อน ( $Q_h$ ) มีค่าสูงกว่าค่าอัตราการความร้อนที่ได้รับจากน้ำ ( $Q_c$ ) ซึ่งจะสอดคล้องทุกเงื่อนไขของอัตราการไหล ความ

แตกต่างของอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องมาจากการสูญเสียความร้อนผ่านผนังของเครื่องแลกเปลี่ยนสู่บรรยากาศภายนอก

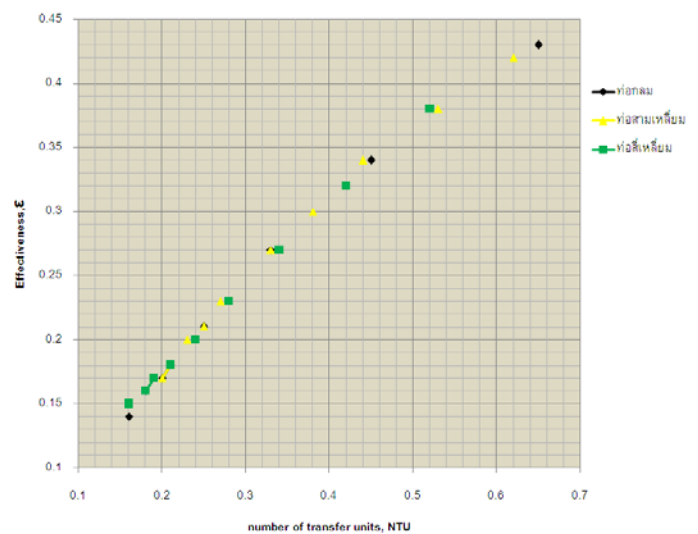


รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของไอเสียกับช่วงการเปิด Bypass Damper



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำกับช่วงการเปิด Bypass Damper

### 6.7 ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Effectiveness กับ NTU

เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E) กับจำนวนของหน่วยถ่ายเทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (NTU) โดยใช้สมการที่ 5 และ 6 ในการคำนวณหา จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของท่อทั้ง 3 ประเภทมีค่ากระจายใกล้เคียงกัน

### 6.8 ผลการประหยัดพลังงานจากการวิเคราะห์ตามแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาผลการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงสูงสุดได้ ดังสรุปได้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง

ผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน		
	ท่อกลม	ท่อสามเหลี่ยม	ท่อสี่เหลี่ยม
อุณหภูมิน้ำออกสูงสุด (°C)	121	120.4	118
ผลประหยัดสูงสุด (mmBTU/ปี)	3,313	3,226	2,880
ผลประหยัดสูงสุด (บาท/ปี)	927,723	903,386	806,248
ผลประหยัดสูงสุด (ktoe/ปี)	0.0827	0.0806	0.0719
อุณหภูมิน้ำออกเฉลี่ย (°C)	109.8	112.3	109.7
ผลประหยัดเฉลี่ย (mmBTU/ปี)	1,696	2,058	1,682
ผลประหยัดเฉลี่ย (บาท/ปี)	474,982	576,170	470,961
ผลประหยัดเฉลี่ย (ktoe/ปี)	0.04237	0.0514	0.0420

### 7. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบทำให้สรุปได้ว่า ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าใกล้เคียงกับ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งจริง (ท่อทรงกลม) โดยมีค่าอุณหภูมิน้ำออกสูงสุดคลาดเคลื่อนประมาณ 3.4 % เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งจริงนั้นจะมีแฟคเตอร์ ได้แก่ คราบเขม่าและตะกอนภายในแรงดันตกคร่อม รวมถึงสภาพแวดล้อมขณะตรวจวัด ทำให้ได้อุณหภูมิน้ำป้อนน้อยกว่าจากแบบจำลอง

โดยจากการวิจัยเพิ่มเติมทำให้ได้ผลในช่วงของการปิด Bypass Damper สนิท ท่อทรงกลมมีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากเมื่อก๊าซร้อนไหลผ่านช่องระหว่างท่อกลมมีการสัมผัสพื้นที่ผิวมากกว่าท่อทรงสามเหลี่ยมและทรงสี่เหลี่ยม แต่เมื่อเปิด Bypass Damper แต่ละช่วง ท่อกลมกลับมีประสิทธิภาพน้อยลงโดยมีอุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ยประมาณ 109.8 °C แต่ท่อสามเหลี่ยมกลับมามีประสิทธิภาพที่สูงกว่าโดยมีอุณหภูมิน้ำป้อนเฉลี่ยประมาณ 112.3 °C อันเนื่องมาจากขณะเปิด Bypass Damper ก๊าซร้อนไหลผ่านช่องว่างระหว่างท่อสามเหลี่ยมได้ดีกว่าท่อกลม ทำให้มีการสัมผัสกับพื้นที่ผิวได้มากกว่า สรุปได้ว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสามเหลี่ยมมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนเฉลี่ยดีที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงานมากกว่า 21 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับท่อกลม และประหยัดพลังงานมากกว่า 22 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับท่อสี่เหลี่ยม

### 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] วิฑาดา เจษฎารัตนชัย (2552) ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในท่อจตุรัสโดยการสอดใส่แผ่นติดครีบทัวตบเบิลวี
- [2] พลเดช ทองขุนดำ (2543) ทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบอีโคโนไมเซอร์แบบท่อความร้อนสำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป
- [3] ณรงค์ ทรัพย์พิศิรินทร์ (2549) ทำการศึกษาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในช่องที่มีครีบบสามเหลี่ยมและการไหลหมุนวน
- [4] พงษ์เจต พรหมวงศ์ “การถ่ายเทความร้อน” ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2534 หน้า 167-253