

การออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม

A DESIGN OF RECUPERATOR FOR HEATING FURNACE

สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ พงษ์ธร จริญญากรณ์ และ วรวิทย์ มั่นสกุล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปทุมวัน กรุงเทพฯ

โทร 0-2218-6637 โทรสาร 0-2252-2889 E-mail : fmespt@eng.chula.ac.th

Sompong Putivisutisak, Pongtorn Charunyakorn and Worrawut Munsakul
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand
Tel : 0-2218-6637 Fax : 0-2252-2889

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ (Recuperator) เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซไอเสียจากปล่องไอเสียของเตาเผาสปริงแผ่นที่มีอุณหภูมิค่อนข้างสูง (ประมาณ 665°C) กับอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ โดยทำการศึกษา ออกแบบ สร้างและติดตั้งใช้งานจริงที่บริษัท บางกอกสปริง อินดัสเทรียล จำกัด จังหวัดสมุทรปราการ วิธีที่ใช้ในการออกแบบคือ วิธี Effective NTU method เนื่องจากไม่ทราบอุณหภูมิของอากาศและก๊าซไอเสียที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศ โดยลักษณะการไหลที่เลือกเป็นแบบ Cross flow ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการใช้ความสัมพันธ์ของ NTU และ ε ของการไหล พบว่า ค่า NTU ของ Cross-parallel flow มีค่ามากที่สุด โดยทำการกำหนดความยาวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าคงที่เท่ากับ 1.2 เมตร และเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่างๆ กัน คือ $d = 0.019, 0.0217, 0.0254, 0.0272, 0.0318$ และ 0.0340 เมตร พบว่าค่า d ขนาดต่างๆ กันนี้ จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้ $d = 0.0318$ เมตร ทั้งนี้โดยมีจำนวนท่อที่ใช้ 78 ท่อ วาง 13 แถว แถวละ 6 ท่อ สามารถอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้จากเฉลี่ย 48°C เป็น 200°C สามารถประหยัดน้ำมันเตาที่ใช้สำหรับเตาเผาได้ประมาณ 9% ความดันสูญเสียภายในเท่ากับ 0.343 kPa ระยะเวลาการคืนทุนประมาณ 8 เดือน และอัตราผลตอบแทนการลงทุนประมาณ 151% ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบเตาในอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ ที่มีอุณหภูมิของก๊าซไอเสียสูงและมีปริมาณมากเพียงพอที่จะนำมอุ่นอากาศเข้าเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานแล้ว ยังเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

Abstract

The aim of this research is to systematically design and fabricate a recuperator for a leaf spring furnace with moderate flue gas temperature

(665°C) at Bangkok Spring Industrial Co., Ltd. The recuperator is used for increasing the combustion air temperature and thus reducing the heavy oil consumption of the furnace. The Effectiveness-NTU method is chosen for the design process because the inlet and outlet temperatures of the device are not known initially. By using the cross-flow two-pass heat-exchanger type, which has highest NTU value compared to others, with a fixed tube length of 1.2 m and various diameter sizes, and considering the heat-exchanging effect, pressure losses, the cost and the size of the device, it is found that the suitable recuperator for the present work consists of 78 staggered tubes with 0.0318-m diameter and 0.002-m tube thickness. After installing the recuperator at the exhaust of the furnace, it is found that the combustion air is preheated from 48°C to 200°C . As a result, the usage of heavy oil is reduced by 9% of the overall amount. The pressure drop is 0.343 kPa . The payback period is 8 months and the internal rate of return is 151%. The recuperator design process of the present work can be applied to similar industrial furnaces with large amount of moderate-temperature exhaust gas. This, in a way, will promote energy conservation and clean technology in Thai industries.

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีอยู่จำนวนไม่น้อยที่พลังงานในกระบวนการผลิตมาจากการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งในสถานการณ์ปัจจุบันราคาน้ำมันที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศได้มีราคาสูงขึ้น และยังมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากประเทศผู้ค้าน้ำมันได้รวมตัวกันเพื่อเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตในแต่ละวัน ทำให้มีผลต่อราคาน้ำมันในตลาดโลกเป็นอย่างมาก ดังนั้นการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงจึงเป็นแนวทาง

RECEIVED 7 April, 2003

ACCEPTED 23 March, 2004

สำคัญในการช่วยเศรษฐกิจของประเทศซึ่งกำลังอยู่สภาวะวิกฤติให้มีแนวโน้มที่ดีขึ้น

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อใช้สำหรับเตาเผาสปริงแผ่นในบริษัท บางกอกสปริง อินดัสเทรียล จำกัด ซึ่งในจำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดของบริษัท เตาเผาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้น้ำมันเตามากที่สุด โดยจะนำเหล็กแผ่นมาทำการเผาที่อุณหภูมิ 950 °C ก่อนที่จะนำออกไปดัดขึ้นรูปและอบพ่นสีต่อไป จากการศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาเผาพบว่า อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่มีค่า 665 °C ซึ่งเป็นค่าที่สูงพอควร สามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยนำเอาไอเสียที่บริเวณปล่องไอเสียมาเข้าอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่ออุ่นอากาศที่จะเข้าเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น (แผนผังของเตาเผาและหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศแสดงในรูปที่ 1 และ 2) เนื่องจากในปัจจุบันอุปกรณ์ชนิดนี้ต้องสั่งนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น จึงได้ทำการวิจัย ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศขึ้นมาใช้งานเอง โดยใช้ความรู้และเทคโนโลยีภายในประเทศ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดรายจ่ายของประเทศ และลดต้นทุนในการผลิต

2. งานวิจัยที่ผ่านมา

สมเกียรติ บุญณะ [1] ได้ศึกษาพารามิเตอร์และทำการทดลองระบบการนำความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาหลอมซิลิกาไปกับก๊าซไอเสียกลับมาใช้ใหม่ สรุปว่า ประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้นที่ใช้กับเตาหลอมซิลิกาจะแปรผกผันกับอัตราการไหลของอากาศ และแปรผันตรงกับอัตราการไหลของก๊าซไอเสียที่เข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สมศักดิ์ จีระวุโรจน์ [2] ได้ศึกษาการนำความร้อนทิ้งของเตาไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิของก๊าซไอเสียประมาณ 700 – 900 °C กลับมาใช้ใหม่ โดยติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศชนิด Multitube type ซึ่งท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทำจากท่อเหล็กคาร์บอน พบว่า สามารถอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ได้ 223 °C และสามารถประหยัดการใช้ถ่านโค้กได้ประมาณ 11%

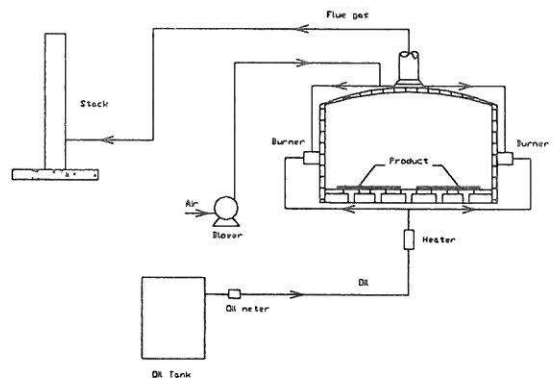
Tomic [3] ได้ศึกษาและพัฒนาการออกแบบเตาเผาแก้ว สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแก้วในเขตโคสโลวาเกีย โดยติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศกับเตาเผาแก้ว สามารถลดปริมาณความร้อนที่ใช้จาก 29.3 MJ/kg เป็น 16.4 MJ/kg และยังทำให้เตาเผามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนมากถึง 35%

Pignotti and Shah [4] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของ Effective Number of Transfer Unit กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน สรุปว่า การทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น ขนาดและอัตราการไหลมีความสัมพันธ์กันในเทอมของ Heat Exchanger Effectiveness (ϵ), Number of Transfer Unit (NTU) และ Heat Capacity Rate Ratio (C_r)

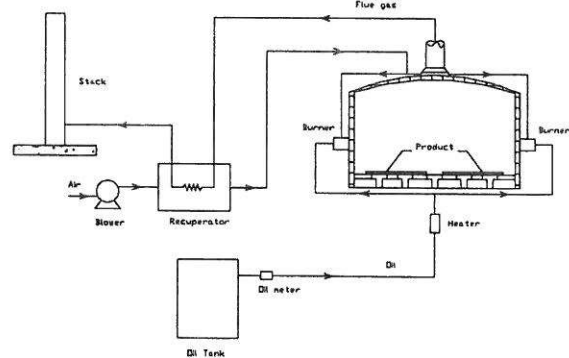
McDonald [5] ได้ศึกษาการสร้าง Recuperator แบบง่ายและราคาถูกที่ใช้สำหรับ Gas Turbine ขนาดเล็ก สรุปว่า สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณา คือ

จำนวนชิ้นส่วนที่เหมาะสมในการประกอบ รูปร่าง อุปกรณ์ที่หุ้มฉนวน ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน และการบำรุงรักษา

D'Agostini et al. [6] ได้ศึกษาการกักความร้อนและการสะสมของกรดที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์อุ่นอากาศ พบว่า อัตราการเกิดกรดจะขึ้นกับ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าอุปกรณ์อุ่นอากาศ ปริมาณความชื้นของอากาศ และความเข้มข้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในก๊าซไอเสีย



รูปที่ 1 แผนผังของเตาเผาก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

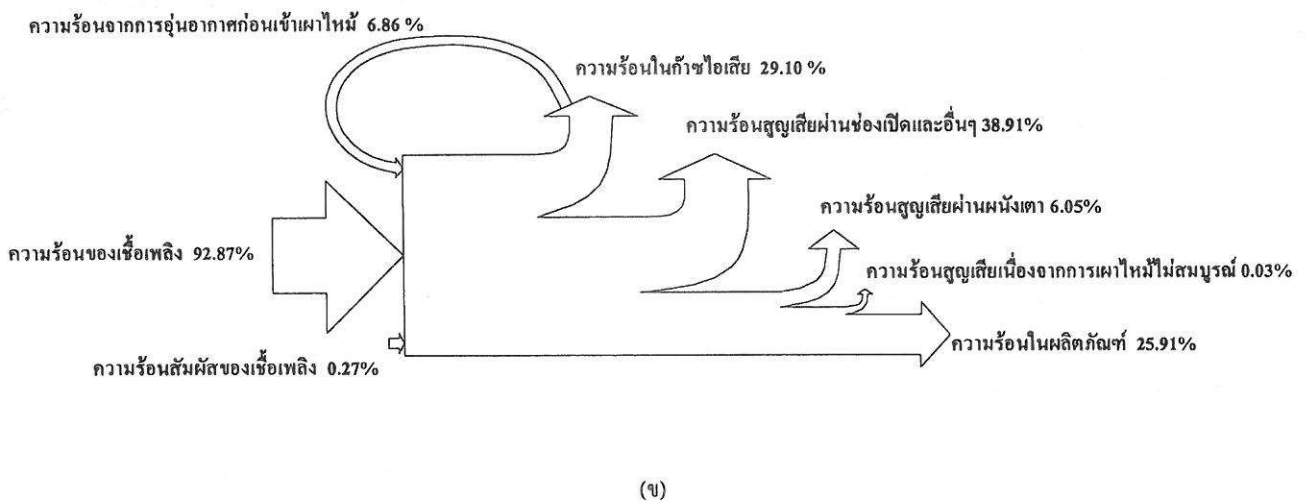
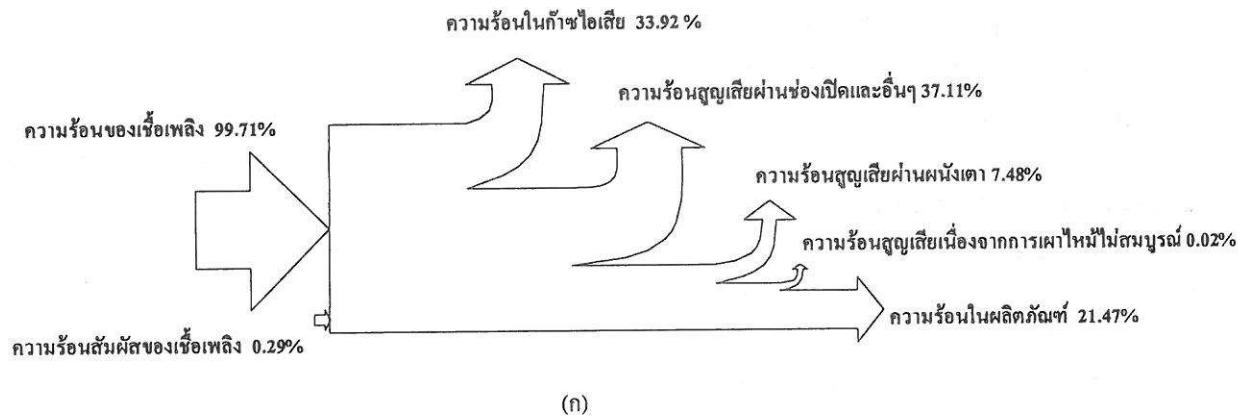


รูปที่ 2 แผนผังของเตาเผาหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

3. การประเมินประสิทธิภาพของเตาเผา

ขั้นตอนในการประเมินประสิทธิภาพของเตาเผา มีดังนี้

1. เก็บรวบรวมข้อมูลของเตาเผา ซึ่งเตาเผาแต่ละตัวในกระบวนการผลิตสปริงแผ่น ประกอบด้วยอิฐทนไฟ โดยบริเวณทางเข้าและออกของเตามีช่องเปิด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เข้าและออกจากเตาเผา
2. ตรวจสอบข้อมูล เพื่อทำการตรวจวัดสภาพเตาเผา โดยค่าที่ต้องทำการวัด ได้แก่
 - 2.1 อุณหภูมิและองค์ประกอบก๊าซไอเสีย เช่น ปริมาณออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น



รูปที่ 3 Sankey diagram แสดงสมดุลพลังงานของเตาเผา (ก) ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (ข) หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

- 2.2 อุณหภูมิภายในเตาเผา และอุณหภูมิที่ผิวรอบเตา
- 2.3 ปริมาณการใช้น้ำมันเตาและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่เตาเผา
- 2.4 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนเข้าและออกจากเตาเผา
3. คำนวณสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของเตาเผา ซึ่งจากการตรวจวัดข้อมูลต่างๆ สามารถนำไปคำนวณสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน เพื่อให้ทราบสภาพของเตาเผาและปริมาณความร้อนสูญเสียต่างๆ (Sankey diagram ในรูปที่ 3ก) แล้วนำไปวิเคราะห์และปรับปรุงให้เตาเผาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศต่อไป

4. การออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศ

การออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศที่ใช้ในการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ (Flow chart ของการออกแบบแสดงในรูปที่ 4)

1. กำหนดค่าคุณสมบัติของของไหล

1.1 สมบัติค่า Effectiveness ($\mathcal{E}$) แล้วแทนค่าในสมการ

$$\mathcal{E} = \frac{C_{p,a}(T_{a,o} - T_{a,i})}{C_{\min}(T_{f,i} - T_{a,i})} \quad (1)$$

1.2 หาค่า Heat Capacity ratio, C_r

$$C_r = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2)$$

โดยที่ $C_{p,a} = m_a c_{p,a}$ เมื่อ m_a คือมวลของอากาศ

$C_{p,f} = m_f c_{p,f}$ เมื่อ m_f คือมวลของก๊าซไอเสีย

$C_{\min}, C_{\max}$ คือ ค่าที่น้อยและมากระหว่าง $C_{p,a}$ และ $C_{p,f}$

$T_{f,i}$ คือ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ทางเข้า

$T_{a,i}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า

$T_{a,o}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางออก

2. กำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ความสัมพันธ์ของ NTU

(Number of Transfer Unit), $\mathcal{E}$ และ C_r

เลือกลักษณะการไหลของของไหล

(a) Cross flow (single pass)

$C_{\max}(\text{mixed}), C_{\min}(\text{unmixed})$

$$NTU = \ln \left[1 + \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln(1 - \mathcal{E} C_r) \right] \quad (3)$$

$C_{\max}(\text{unmixed}), C_{\min}(\text{mixed})$

$$NTU = - \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln [C_r \ln(1 - \mathcal{E}) + 1] \quad (4)$$

(b) Cross flow (Two-pass)

Cross - Counter flow

$$\mathcal{E} = 1 - 2 \div \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{C_r \times NTU}{2} \right) + \left[1 + \exp \left(- \frac{C_r \times NTU}{2} \right) \right] / U^2 \right\} \quad (5)$$

Cross-parallel flow

$$\mathcal{E} = 1 - \frac{1}{2} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{C_r \times NTU}{2} \right) + U^2 \left[1 + \exp \left(- \frac{C_r \times NTU}{2} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } U^2 = \exp \left(- \frac{1 - \exp(-C_r \times NTU/2)}{C_r} \right)$$

3. กำหนดพื้นที่ถ่ายเทความร้อน

3.1 ใช้ความสัมพันธ์ของ NTU หาค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (A)

โดยสมบัติค่า U ที่เหมาะสมขึ้นมาแทนในสมการต่อไปนี้

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (7)$$

3.2 หาจำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (n)

$$n = \frac{A_o}{D_o \pi L} \quad (8)$$

โดยที่ U คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A_o คือ พื้นผิวการถ่ายเทความร้อน

D_o คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ

n คือ จำนวนท่อ

4. ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U_r)

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{D_o}{D_i f_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{f_o} + \frac{D_o}{h_i D_i}} \quad (9)$$

4.1 หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผ่านกลุ่มท่อ (h_o)

$$Nu_D = 1.13 C_1 Re_{D,max}^m Pr^{1/3} \quad (10)$$

สำหรับ $N_L > 10$, $2000 < Re_D < 40,000$ และ $Pr > 0.7$ เมื่อ N_L คือ จำนวนแถวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, Nu_D คือ Nusselt number, Re_D คือ Reynolds number, Pr คือ Prandtl number, และ C_1 และ m คือ ค่าคงที่ ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับระยะห่างของท่อในแนวตรงและแนวขวาง [7]

$$h_o = \frac{Nu_D k}{D_o} \quad (11)$$

4.2 หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลภายในท่อ (h_i)

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} \quad (12)$$

[turbulent, fully developed, $0.6 < Pr < 160$, $Re_D > 10,000$, $L/D > 10$]

$$h_i = \frac{Nu_D k}{D_i} \quad (13)$$

4.3 กำหนดค่า fouling factor และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

5. หาค่าความดันสูญเสีย (Δp)

5.1 ความดันสูญเสียภายนอกท่อ (Δp_o)

$$\Delta p_o = N_L \chi \left(\frac{\rho V_{max}^2}{2} \right) f \quad (14)$$

โดยที่ Δp_o คือ ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลผ่านกลุ่มท่อ

χ คือ ตัวคูณปรับแก้ (Correction factor)

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

V_{max} คือ ค่าความเร็วสูงสุด

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล

5.2 ความดันสูญเสียภายในท่อ (Δp_i)

$$\Delta p_i = 2 f \rho V_{max}^2 L \frac{N_L}{D_i} \quad (15)$$

โดยที่ Δp_i คือ ค่าความดันสูญเสียของการไหลภายในท่อ

L คือ ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

N_L คือ จำนวนที่เกี่ยวกับการไหลของของไหลในท่อ

D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

- พิจารณาเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์อุณหอากาศ
- กำหนดรายละเอียด เขียนแบบ เพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์อุณหอากาศ
- ประเมินราคาและวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์

5. ผลการออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศ

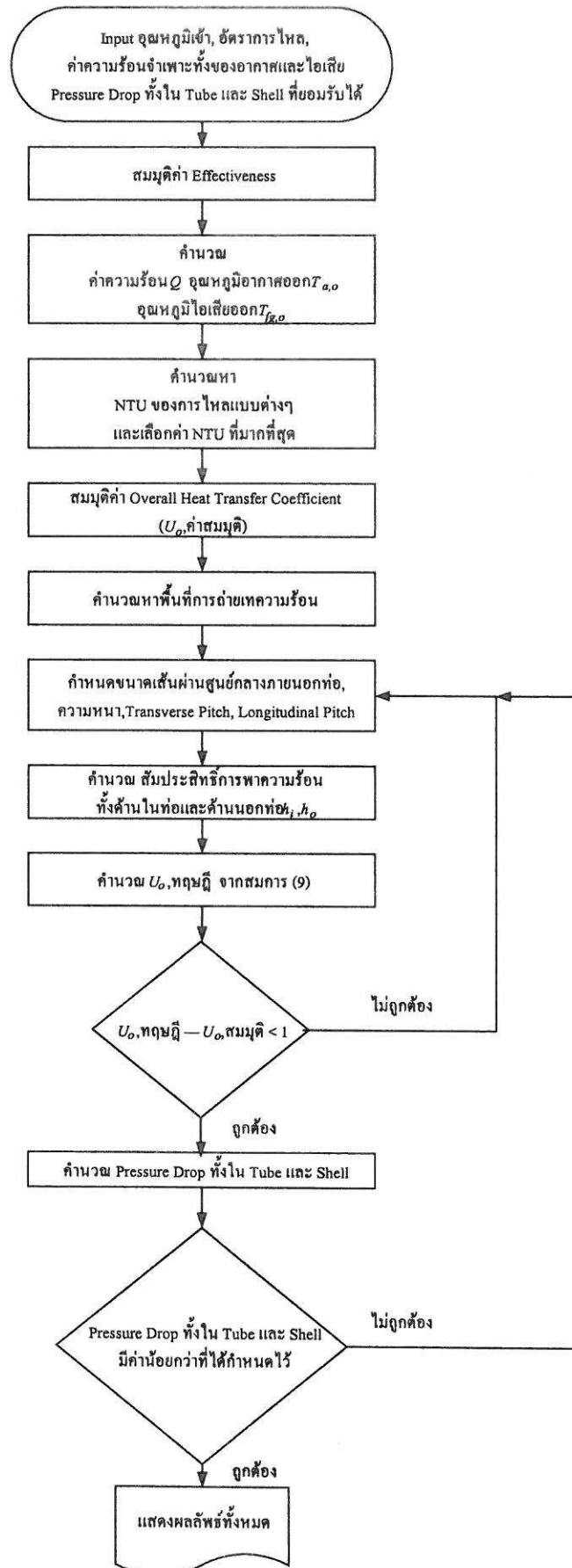
จากการวิเคราะห์และออกแบบ (รายละเอียดดูได้จาก [8]) ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยรายละเอียดของรูปร่างและขนาดของอุปกรณ์อุณหอากาศถูกแสดงในภาพ Orthographic ในรูปที่ 5 และภาพถ่ายของเตาเผา ก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์อุณหอากาศถูกแสดงในรูปที่ 6 - 8

6. การทดลองหลังติดตั้งอุปกรณ์อุณหอากาศ

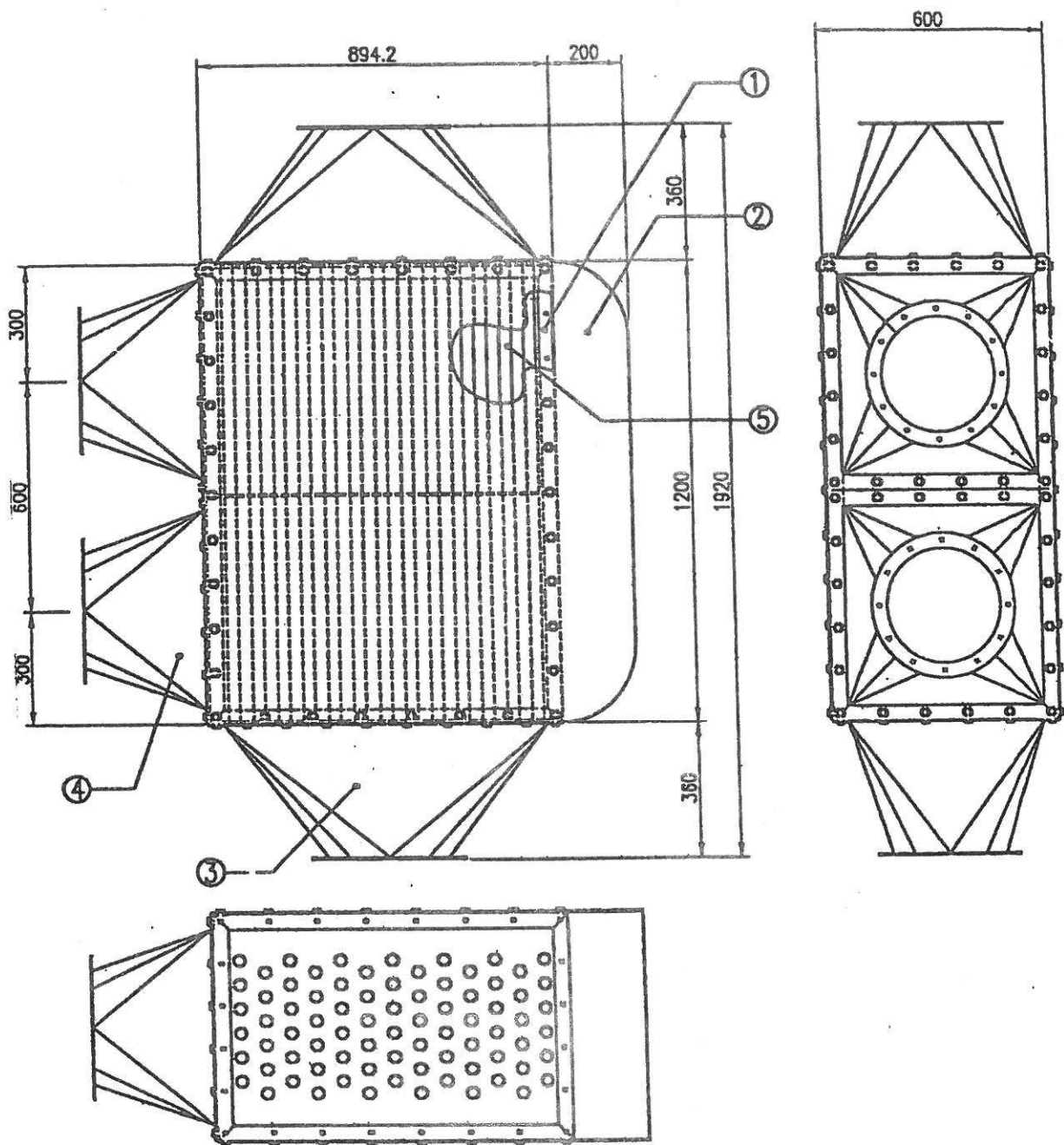
การทดลองหลังจากติดตั้งอุปกรณ์อุณหอากาศเข้ากับปล่องไอเสียของเตาเผาแล้ว แบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการทดลองเก็บข้อมูลของเตาเผาและอุปกรณ์อุณหอากาศก่อนหุ้มฉนวน และส่วนที่สองเป็นการทดลองหลังหุ้มฉนวนอุปกรณ์อุณหอากาศจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ซึ่งประกอบไปด้วย การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุณหอากาศจริงกับการออกแบบทางทฤษฎี การเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์อุณหอากาศ และการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยแสดงไว้ในตารางที่ 2 - 4

ตารางที่ 1 ผลการออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศ

รายการ	ค่า	หน่วย
1. อัตราการไหลของอากาศ	0.45	kg/s
2. อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย	0.472	kg/s
3. อุณหภูมิอากาศที่เข้า	30	°C
4. อุณหภูมิไอเสียที่เข้า	640.6	°C
5. อุณหภูมิอากาศที่ออก	220.7	°C
6. อุณหภูมิไอเสียที่ออก	507.7	°C
7. ขนาดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	0.0318	m
8. ความหนาของท่อ	0.002	m
9. จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	78	ท่อ
10. จำนวนแถว	13	แถว
11. จำนวนท่อในแต่ละแถว	6	ท่อ
12. ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	1.2	m
13. วัสดุที่ใช้ทำท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	Stainless 316	



รูปที่ 4 Flow Chart แสดงขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ

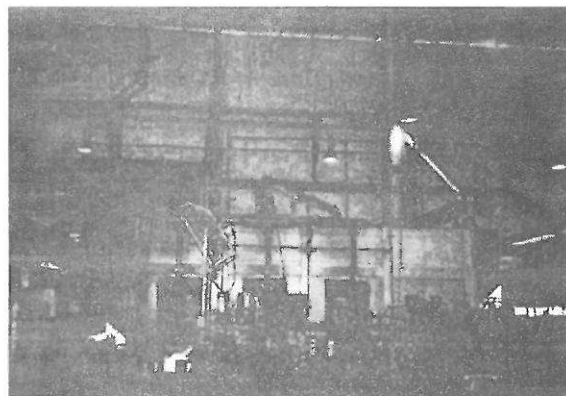


5	PIPE OD (31.8x2x1195 mm.	78	SUS316	-
4	HOOD	2	SUS316	-
3	HOOD	2	SUS316	-
2	SLIDE COVER	1	SUS316	-
1	FRAME	1	SUS316	-
TYPE	DESCRIPTION	Q.TY	MATERIAL	REMARKS

รูปที่ 5 รูป Orthographic ของอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ตารางที่ 2 ผลการทดลองหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

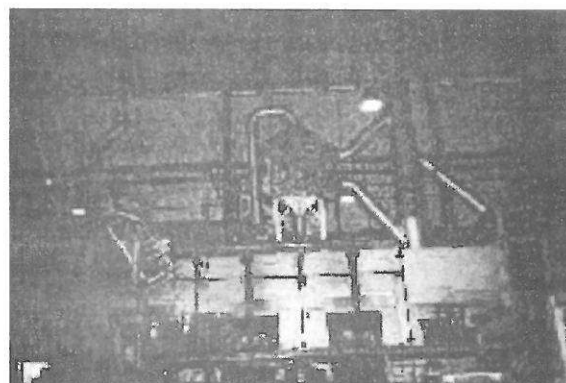
รายการ	หน่วย	ก่อนหุ้มฉนวน	หลังหุ้มฉนวน
1. อุณหภูมิของอากาศที่เข้า	°C	47	47
2. อุณหภูมิของไอเสียที่เข้า	°C	611.9	640.3
3. อุณหภูมิของอากาศที่ออก	°C	148.7	200.5
4. อุณหภูมิของไอเสียที่ออก	°C	520.6	485.2



รูปที่ 6 เตาเผาก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ตารางที่ 3 ผลการออกแบบทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

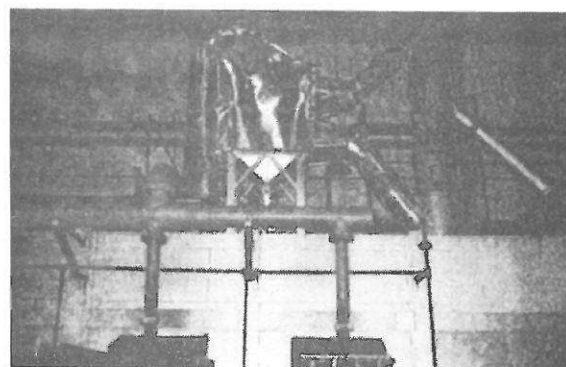
รายการ	หน่วย	ก่อนติดตั้ง	หลังติดตั้ง
1. อัตราการไหลของอากาศ	kg/s	0.45	0.49
2. อัตราการไหลของก๊าซไอเสีย	kg/s	0.472	0.51
3. อุณหภูมิของอากาศที่เข้า	°C	30	47
4. อุณหภูมิของไอเสียที่เข้า	°C	665.8	640.3
5. อุณหภูมิของอากาศที่ออก	°C	220.7	200.5
6. อุณหภูมิของไอเสียที่ออก	°C	507.7	485.2
7. ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นอากาศ	%	30	25.9
8. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	W/m ² K	22.93	24.32
9. Number of Transfer Unit (NTU)	-	0.4348	0.458
10. ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น	kPa	0.274	0.343



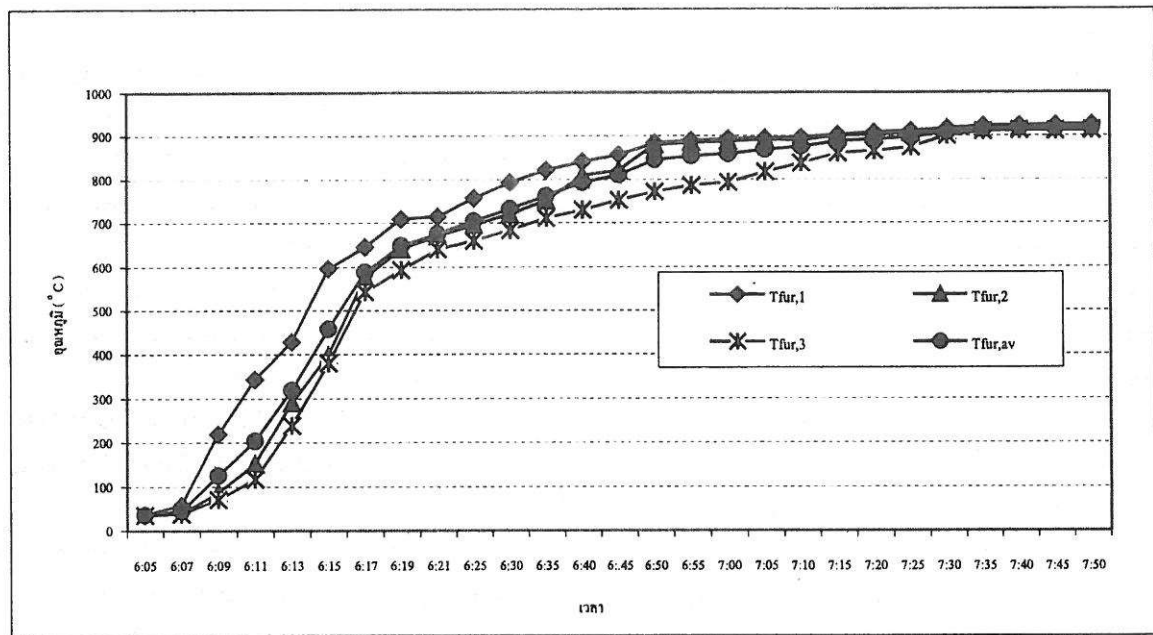
รูปที่ 7 เตาเผาหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

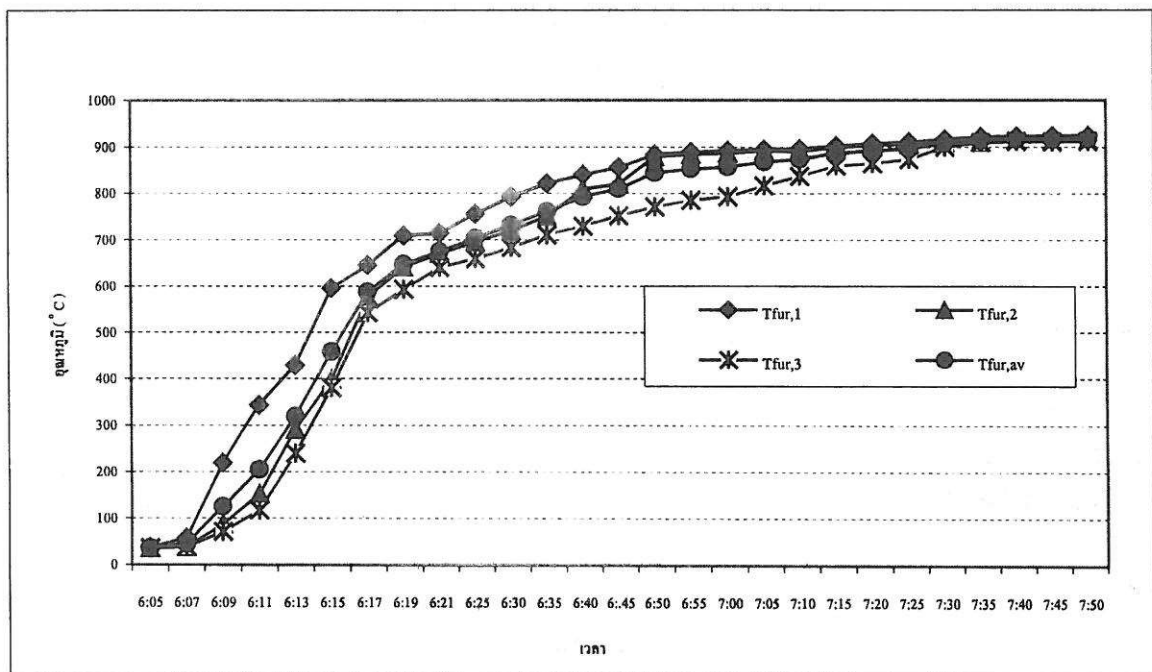
รายการ	หน่วย	ก่อนติดตั้ง	หลังติดตั้ง
1. ความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่	MJ/hr	312.98	274.83
2. การประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิง	L/yr	46748	43975
3. การประหยัดค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิง	baht/yr	441770	415571
4. ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์	baht	200000	230000
5. ระยะเวลาคืนทุน	month	6.08	7.56
6. อัตราผลตอบแทนการลงทุน	%	195	151



รูปที่ 8 อุปกรณ์อุ่นอากาศหลังหุ้มฉนวน



รูปที่ 8 กราฟแสดงอุณหภูมิในช่วงเวลาการจุดเตา ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (8/01/44)



รูปที่ 9 กราฟแสดงอุณหภูมิในช่วงเวลาการจุดเตา หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (14/08/44)

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลการทดลองที่ได้ พบว่าหลังจากที่ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศเข้ากับปล่องไอเสียของเตาเผาแล้ว สามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่เข้าเผาไหม้เฉลี่ยจาก 47°C เป็น 150°C ก่อนที่จะหุ้มฉนวน และเมื่อทำการหุ้มฉนวนอุปกรณ์อุ่นอากาศแล้ว สามารถอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ได้เฉลี่ย 200°C ซึ่งคิดเป็นพลังงานความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ประมาณ 275 MJ/hr (24% ของความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย หรือ 6% ของพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา) และอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นอากาศมีค่าเฉลี่ย 485°C ซึ่งสามารถประหยัดน้ำมันเตาได้เฉลี่ยประมาณ 67 ลิตรต่อการทำงาน 1 กะ (9 ชั่วโมง) หรืออีกนัยหนึ่งคิดเป็นจำนวนน้ำมันเตาที่ใช้ลดลง 9% สำหรับผลผลิตจำนวนเท่ากัน โดยหลังจากติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศแล้วสามารถเพิ่มอุณหภูมิในช่วงจุดเตาเพื่อให้ได้อุณหภูมิใช้งานเร็วกว่าก่อนติดตั้งประมาณ 15 นาที (กราฟแสดงอุณหภูมิในช่วงจุดเตาก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (วันที่ 8 ม.ค. 2544 และวันที่ 14 ส.ค. 2544) แสดงดังรูปที่ 7 และ 8 โดยที่ $T_{fur,1}$, $T_{fur,2}$ และ $T_{fur,3}$ คือ อุณหภูมิภายในเตาเผาที่จุดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และ $T_{fur,av}$ คือ อุณหภูมิภายในเตาเผาเฉลี่ย) และยังทำให้เตาเผามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 21% เป็น 26% (Sankey diagram ในรูปที่ 3ข) ซึ่งเมื่อคำนวณทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถประหยัดเงินค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงกว่าสี่แสนบาทต่อปี ซึ่งจะช่วยให้ต้นทุนในการผลิตลดลง เป็นการนำพลังงานมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมโดยลดอุณหภูมิของไอเสียก่อนที่จะปล่อยไปในบรรยากาศอีกด้วย สำหรับข้อเสนอแนะในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป สามารถทำได้โดยศึกษาเรื่องการติดครีป (craze) บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น รวมทั้งยังสามารถลดขนาดของอุปกรณ์อุ่นอากาศลงได้ และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อุ่นอากาศ ซึ่งนอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ยังทำให้ยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้นานขึ้นอีกด้วย

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ บริษัท บางกอกสปริง อินดัสเทรียล จำกัด ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ พร้อมทั้งให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณสถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานซึ่งทำให้งานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

9. รายการอ้างอิง

1. สมเกียรติ บุญณะ, การศึกษาพารามิเตอร์และการจำลองระบบการนำความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาหลอมซิลิกาากกลับมาใช้โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดท่อสองชั้น, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหา

บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2540.

2. สมศักดิ์ จริเวรุไวโรจน์, การนำความร้อนทิ้งของเตาผิวโปล่ากลับมาใช้ใหม่, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า, 2537.

3. Tomic, J., New Furnace Utilizes Glass Fiber Waste Glass Industry, Vol. 71 no. 4, pp. 23-24, 1990.

4. Pignotti, A. and Shah R.K., Effectiveness-Number of Transfer Unit Relationships for Heat Exchanger Complex Flow Arrangements, ASME, Conference no. 14414, Nov 1990.

5. McDonald, C.F., Low Cost Compact Primary Surface Recuperator Concept for Microturbines, Applied Thermal Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 471-497, 2000.

6. D'Agostini, M.D., Levy, E.K. and Willson, R.W., A Method for Calculating Acid Deposition Rate in Regenerative Air Preheater, Heat Transfer Equipment Fundamentals, Design and Applications and Operating problems, American Society of Mechanical Engineers, pp. 289-296, 1989

7. Incropera, F.P. and De Witt, D.P., Introduction to Heat Transfer, John Wiley & Sons, 2002.

8. วรวิทย์ มั่นสกุล, การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสีย, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.