

การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อุ่นอากาศด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม A STUDY AND DEVELOPMENT OF RECUPERATOR FOR HEATING FURNACE

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

โทร 0-2218-6637 โทรสาร 0-2252-2889 E-mail : munsakul@yahoo.com

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ (recuperator) เพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของก๊าซไอเสียจากปล่องไอเสียของเตาเผาสปริงแผ่นที่มีอุณหภูมิสูง (ประมาณ 665°C) กับอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ โดยทำการศึกษ ออกแบบ สร้างและติดตั้งใช้งานจริงที่บริษัททางกลสปริง 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 และเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อต่างๆกัน 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 66 ท่อ วาง 11 แถว แถวละ 6 ท่อ ได้ค่า Effective heat transfer coefficient เท่ากับ $24.87 \text{ W/m}^2\text{K}$ และความดันสูญเสียภายในเท่ากับ 0.371 kPa จากผลลัพธ์ที่ได้ พบว่าสามารถประหยัดน้ำมันเตาที่ใช้สำหรับเตาเผาได้ประมาณ 8.6%

บทนำ

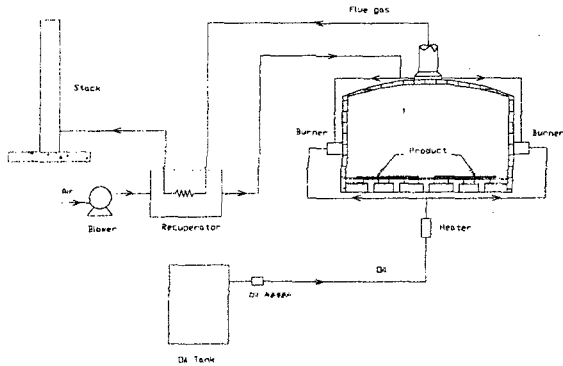
โรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทยมีอยู่จำนวนมากไม่น้อยที่พลังงานในการบวนการผลิตมาจากการใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งในสถานการณ์ปัจจุบันราคาน้ำมันที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศได้มีราคาสูงขึ้นและยังมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเรื่อยๆเนื่องจากประเทศผู้ค้าน้ำมันได้รวมตัวกันเพื่อเพิ่มหรือลดกำลังการผลิตในแต่ละวัน ทำให้มีผลต่อราคาน้ำมันในตลาดโลกเป็นอย่างมาก ดังนั้นการประหยัดน้ำมันเชื้อเพลิงจึงเป็นแนวทางสำคัญในการช่วยเศรษฐกิจของประเทศซึ่งกำลังอยู่สภาวะวิกฤติให้มีแนวโน้มที่ดีขึ้น

ในการวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อใช้สำหรับเตาเผาสปริงแผ่นในบริษัท บางกอกสปริงอินดัสเทรียล จำกัด ซึ่งในจำนวนอุปกรณ์ทั้งหมดของบริษัท เตาเผาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้น้ำมันเตามากที่สุด โดยจะนำเหล็กแผ่นมาทำการเผาที่อุณหภูมิ 960°C ก่อนที่จะนำไปตัดขึ้นรูปและอบพ่นสีต่อไป จากการศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาเผาพบว่า อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่มีค่า 665°C ซึ่งเป็นค่าที่สูงพอควร สามารถที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยนำเอาไอเสียที่บริเวณปล่องไอเสียมาเข้าอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่ออุ่นอากาศที่จะเข้าเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น (แผนผังของเตาเผาและอุปกรณ์อุ่นอากาศถูกแสดงในรูปที่ 1) เนื่องจากในปัจจุบันอุปกรณ์ชนิดนี้ต้องสั่งนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น จึงได้ทำการวิจัย ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศขึ้นมาใช้งานเอง โดยใช้ความรู้และเทคโนโลยีภายในประเทศ ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดรายจ่ายของประเทศ และลดต้นทุนในการผลิต

การประเมินประสิทธิภาพของเตาเผา

- เก็บรวบรวมข้อมูลของเตาเผา ซึ่งเตาเผาแต่ละตัวในกระบวนการผลิตสปริงแผ่น ประกอบด้วยอิฐทนไฟ โดยบริเวณทางเข้าและออกของเตามีช่องเปิด เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เข้าและออกจากเตาเผา
- ตรวจวัดข้อมูล เพื่อทำการตรวจวัดสภาพเตาเผา โดยค่าที่ต้องทำการวัด ได้แก่
 - อุณหภูมิและองค์ประกอบก๊าซไอเสีย เช่น ปริมาณออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น
 - อุณหภูมิภายในเตาเผา และอุณหภูมิที่ผิวรอบเตา
 - ปริมาณการใช้น้ำมันเตาและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เข้าสู่เตาเผา
 - อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก่อนเข้าและออกจากเตาเผา
- คำนวณสมมูลมวลและสมมูลพลังงานของเตาเผา ซึ่งจากการตรวจวัดข้อมูลต่างๆ สามารถนำไปคำนวณสมมูลมวลและสมมูลพลังงาน เพื่อให้ทราบสภาพของเตาเผาและปริมาณความร้อน

สูญเสียต่างๆ แล้วนำไปวิเคราะห์และปรับปรุงให้เตาเผาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศต่อไป



รูปที่ 1 แผนผังของเตาเผาและอุปกรณ์อุณหอากาศ

การออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศ

การออกแบบอุปกรณ์อุณหอากาศที่ใช้ในการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าคุณสมบัติของของไหล

1.1. สมมติค่า Effectiveness แล้วแทนค่าในสมการ

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

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

$C_{p,fg} = m_{fg} c_{p,fg}$ เมื่อ m_{fg} คือมวลของก๊าซไอเสีย

$C_{min} \cdot C_{max}$ คือ ค่าที่น้อยและมากกว่าระหว่าง $C_{p,a}$ และ $C_{p,fg}$

$T_{f,i}$ คือ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ทางเข้า

$T_{f,o}$ คือ อุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ทางออก

$T_{a,i}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า

$T_{a,o}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ทางออก

2. กำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ความสัมพันธ์ของ NTU ,

ε และ C_r

เลือกลักษณะการไหลของของไหล

(a) Cross flow (single pass)

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

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

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

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

(b) Cross flow (Two pass)

Cross – Counter flow

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

(c) Cross-parallel flow

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

3. กำหนดพื้นที่ถ่ายเทความร้อน

3.1 ใช้ความสัมพันธ์ของ NTU หาค่าพื้นที่การถ่ายเทความร้อน

(A) โดยสมมติค่า U ที่เหมาะสมขึ้นมาแทนในสมการต่อไปนี้

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

3.2. หาจำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (n)

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

โดยที่ NTU = Number of Transfer Unit

U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม

A_o = พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อ

n = จำนวนท่อ

4. ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)

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

4.1 หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนผ่านกลุ่มท่อ (h_o)

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

($N_L > 10$, $2000 < Re_D < 40,000$, $Pr > 0.7$)

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

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

N_L คือ จำนวนแถวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

χ คือ ตัวคูณปรับแก้ (Correction factor)

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

5.2 ความดันสูญเสียภายในท่อ (Δp_i)

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

โดยที่ Δp_i คือ ค่าความดันสูญเสียของการไหลภายในท่อ

f คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

L คือ ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

N_i คือ จำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในท่อ

D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ

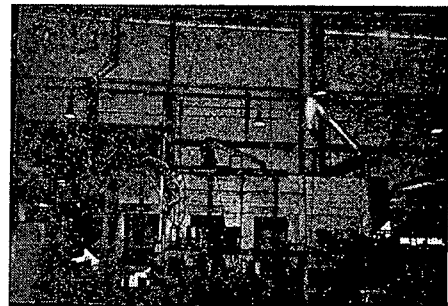
- พิจารณาเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศ
- กำหนดรายละเอียด เขียนแบบ เพื่อนำไปสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศ
- ประเมินราคาและวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์

ผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ

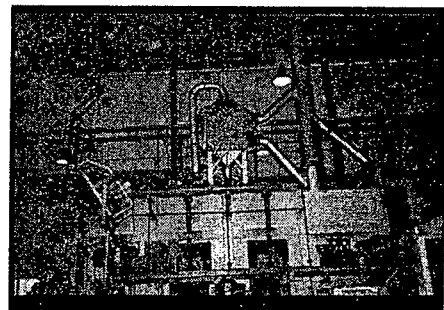
จากการวิเคราะห์และออกแบบ ได้ผลลัพธ์ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเตาเผาก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศถูกแสดงในรูปที่ 2 และ 3

ตารางที่ 1 ผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ

รายการ	ค่า	หน่วย
อุณหภูมิอากาศที่เข้า	50.2	°C
อุณหภูมิอากาศที่ออก	149.4	°C
อุณหภูมิไอเสียที่เข้า	611.8	°C
อุณหภูมิไอเสียที่ออก	522	°C
ขนาดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	0.0318	m
จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	66	m
จำนวนแถว	11	แถว
จำนวนท่อในแต่ละแถว	6	ท่อ
ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	1.2	m
วัสดุที่ใช้ทำท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	Stainless	
	316	



รูปที่ 2 เตาเผาก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ



รูปที่ 3 เตาเผาหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลที่ได้พบว่า หลังจากการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (recuperator) เข้ากับปล่องไอเสียของเตาเผาแล้วสามารถเพิ่มอุณหภูมิของอากาศที่เข้าเผาไหม้จาก 48 °C เป็น 150 °C ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นอากาศ 18% (ก่อนหุ้มฉนวน) ทำให้สามารถลดปริมาณน้ำมันเตาที่ใช้ได้ประมาณ 62 ลิตรต่อหนึ่งกะการทำงาน (8 ชั่วโมง) โดย

ก่อนติดอุปกรณ์อุ่นอากาศ ปริมาณการผลิตต่อปริมาณการใช้ไอน้ำมีค่า 13.06 kg/L และหลังติดอุปกรณ์อุ่นอากาศกับเตาเผา ปริมาณการผลิตต่อปริมาณการใช้ไอน้ำมีค่า 14.34 kg/L คิดเป็นจำนวนปริมาณการผลิตต่อปริมาณการใช้ไอน้ำมีค่าที่เพิ่มขึ้น หรือในอีกนัยหนึ่งคิดเป็นจำนวนไอน้ำมีค่าที่ใช้ลดลง 8.6% สำหรับผลผลิตจำนวนเท่ากัน ซึ่งเมื่อคำนวณ ทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถประหยัดเงินค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงกว่าสามแสนบาทต่อปี ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลง เป็นการนำพลังงานมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมโดยลดอุณหภูมิของไอเสียก่อนที่จะปล่อยไปในอากาศอีกด้วย

สำหรับข้อเสนอแนะในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป สามารถทำได้โดยศึกษาเรื่องการติดครีป (fin) บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น รวมทั้งยังสามารถลดขนาดของอุปกรณ์อุ่นอากาศลงได้ และควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อุ่นอากาศ ซึ่งนอกจากจะเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ ยังทำให้ยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้นานขึ้นอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และ บริษัท บางกอก สปริง อินดัสเทรียล จำกัด ที่ให้เงินทุนสนับสนุนการวิจัยนี้ พร้อมทั้งให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย และขอขอบคุณ สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานซึ่งทำให้งานลุล่วงไปได้ด้วยดี

บรรณานุกรม

- [1] แมคท้าวเวอร์, เครื่องอุ่นอากาศและอีโคโนไมเซอร์, Technology Journal, ปีที่ 25 ฉบับที่ 143 หน้า 135-138, กุมภาพันธ์ - มีนาคม 2542.
- [2] สมศักดิ์ จรีเวรุไวโรจน์, การนำความร้อนทิ้งของเตาคิวโปลากลับมาใช้ใหม่, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า, 2537.
- [3] Cengel, Y.A. and Boles, M.A., Thermodynamics: An Engineering Approach, Second edition, McGraw-Hill, 1998.
- [4] Girdstick, R., Principles of Waste Heat Recovery, Fairmont Press, 1986.
- [5] Holman, J.P., Heat Transfer, Eighth edition McGraw-Hill, 1997.
- [6] Incropera, F.P. and David, P.D., Fundamentals of Heat Transfer, Third edition, New York, John Wiley & Sons, 1990.
- [7] Kays, W.M., Convective Heat and Mass Transfer, Third edition, McGraw-Hill, 1993.
- [8] Macdonald, C.F., Low Cost Compact Primary Surface Recuperator Concept for Microturbines, Applied Thermal Engineering, Vol. 20, No. 5, p. 471-497, 2000.
- [9] Ozisik, M.N., Heat Transfer A Basic Approach, International edition, McGraw-Hill, 1985.
- [10] White, F.M., Fluid Mechanics, Third edition, McGraw-Hill, 1994.