

การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิก STUDY AND DEVELOPMENT OF RECUPERATOR FOR CERAMIC KILN

ปิยะภัทร คุ่มปรีดี และ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปทุมวัน กรุงเทพฯ
โทร 0-2218-6642 โทรสาร 0-2218-6642 E-mail: nuttapat@navy.mi.th

Piyapat Coompreedee and Mingsak Tangtakul

Department of Mechanical Engineering , Faculty of Engineering , Chulalongkorn University , Pathumwan , Bangkok 10330 , Thailand
Tel : 0-2218-6642 Fax 0-2218-6642 E-mail: nuttapat@navy.mi.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีสำคัญในกระบวนการผลิตเซรามิกที่ต้องการความร้อนสูงจากเชื้อเพลิงโดยตรงเป็นเวลานานในกระบวนการเผา ทำให้มีพลังงานที่ถูกปล่อยทิ้งโดยเฉลี่ยราว 35-50% ในรูปของความร้อนที่ปล่อยทิ้งทางปล่องควันซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 600-800 องศาเซลเซียส

จากการเก็บข้อมูลเตาเผาเซรามิกขนาดความจุ 0.5 ลบ.ม. พบว่าอุณหภูมิปล่อยทิ้งทางปล่องประมาณ 800 องศาเซลเซียส คิดเป็นพลังงานที่ถูกปล่อยทิ้ง 59.5 % ใช้ก๊าซ LPG ในการเผา 13.7 กิโลกรัม หลังจากการออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศแบบ Recuperator โดยวิธีความแตกต่างของอุณหภูมิแบบล็อกมีน (logarithmic mean temperature difference, LMTD) ซึ่งการออกแบบคำนึงถึงค่าความร้อนในการเก็บกลับคืนจากก๊าซเสีย ความดันสูญเสียในระบบ ความเหมาะสมในการลงทุน ความสะดวกในการติดตั้ง สามารถสร้าง Recuperator แบบ Cross-Flow Four-Pass Heat Exchanger มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวน 22 ท่อ ก๊าซเสียไหลในท่อ 1 ท่อ และอากาศไหลในเซลล์ 4 ท่อ

ผลการทดลองหลังติดตั้งกับปล่องควันของเตาเผาเซรามิกพบว่าสามารถอุ่นอากาศจากอุณหภูมิ 49 เป็น 394 องศาเซลเซียส สามารถประหยัดก๊าซ LPG ลง 23% ต่อการเผา 1 ครั้ง คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ประมาณ 14,533 บาท/ปี ระยะเวลาในการคืนทุน 2 ปี 2 เดือน อัตราผลตอบแทนการลงทุน 49.5 % ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเตาเผาเซรามิกขนาดอื่นๆ และตัว Recuperator มีประสิทธิภาพ 47% และความดันสูญเสียในระบบ 124 Pa

Abstract

The aim of this research is to study on the application of energy conservation in ceramic kiln. This involve the design

construction and testing of a recuperator which has been used to reclaim heat from the exhaust of ceramic kiln.

The result of energy audit performed on the ceramic kiln size 0.5 m³ showed that the combustion flue gas released to the atmosphere has a relatively high temperature that is around 800 °C or 59.5 % of energy input . The fuel (LPG) consumption are 13.7 kg / batch

The recuperator was design by logarithmic mean temperature difference method (LMTD) and the recuperator constructed was of cross-flow four-pass heat exchanger type, and made of 22 stainless steel tubes by the flue gas flow in tubes and preheat air flow in shells.

The result of testing after recuperator was install at the chimney of the kiln, the recuperator can be preheat the combustion air from 49 to 394 °C, the usage of LPG is reduced by 23 % of the overall amount. This amount of saving was found to be equivalent to 14,533 Bath per year, with the payback period 2.2 years, or give an internal rate of return 49.5 % . The kiln after install recuperator had efficiency being 2.3 % . The effectiveness of the recuperator is about 47 % . The pressure drop is 124 Pa.

บทนำ

อุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อนสูงจากเชื้อเพลิงโดยตรงและใช้เวลานาน ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากโดยประมาณว่า 35% ของต้นทุนทั้งหมดมาจากการใช้เชื้อเพลิง (ก๊าซ LPG) แต่ถ้าสามารถช่วยให้ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมนี้ประหยัดพลังงานลงได้ โดยไม่มีผลเสียใดๆ ต่อการผลิตและยังได้ผลดีกว่าเดิม นอกจากจะเป็นการลดต้นทุนแล้ว พลังงานที่ประหยัดได้จาก

อุตสาหกรรมนี้ย่อมเป็นแหล่งพลังงานสำคัญอีกแห่งสำหรับการใช้ใน
อนาคต

เตาเผาเซรามิกเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอันหนึ่งในกระบวนการผลิต
เตาเผาเซรามิกที่ใช้ไฟเบอร์เป็นฉนวนจะมีประสิทธิภาพที่สูง อีกทั้งยัง
ช่วยลดระยะเวลาในการเผาทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงและมีการกระจาย
ตัวของอุณหภูมิภายในเตาที่ดีทำให้เกิดความเสียหายกับผลิตภัณฑ์น้อย
มากเมื่อเทียบกับเตาเผาแบบอิฐทนไฟ แต่จากการประเมินผลในการ
ตรวจสอบประสิทธิภาพของเตาเผาเซรามิกไฟเบอร์โดย มุลนิธิสถาบัน
ประสิทธิภาพพลังงาน(ประเทศไทย)พบว่า พลังงานที่ถูกปล่อยทิ้งโดย
เฉลี่ยจะอยู่ในราว 35-50% ในรูปของความร้อนที่ปล่อยทิ้งทางปล่องซึ่ง
มีอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ออกจากปล่องประมาณ 700-1000°C นับว่า
พลังงานยังถูกปล่อยทิ้งอย่างเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมาก ซึ่งการนำ
ความร้อนที่ปล่อยทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่จึงน่าจะมีความเหมาะสม
ในการดำเนินการต่อไป ดังนั้นโครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นที่จะ
ทำการศึกษานำความร้อนที่ปล่อยทิ้งจากเตาเผาเซรามิกที่ใช้ไฟ
เบอร์เป็นฉนวนกลับมาใช้ประโยชน์ให้ได้มากที่สุด โดยผ่านอุปกรณ์
แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเครื่องอุ่นอากาศแบบ Recuperator

การประเมินประสิทธิภาพของเตาเผา

1. ขั้นตอนการศึกษารวบรวมเตาเผาเซรามิกที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
ศึกษาถึงลักษณะของเตาเผาเซรามิกแบบต่างๆที่ใช้ในปัจจุบัน
เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในแต่ละแบบสำหรับ
พิจารณาในการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
2. ตรวจวัดค่าตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องเช่น อุณหภูมิภายในเตาของ
เตาเผาเซรามิกที่เลือกไว้ในกาติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ
ร้อน
3. ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เข้าเตาเผา
4. ทำการสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของเตาเผาและหา
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเซรามิก

การออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศ

การออกแบบอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ใช้ในการวิจัย แบ่งออกเป็น
ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดคุณสมบัติของของไหลและหาอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss} \quad (1)$$

$$M_a c_{p,a} (T_{a,o} - T_{a,i}) = M_g c_{p,g} (T_{g,i} - T_{g,o}) + 0.15 Q_{out} \quad (2)$$

โดยที่ $Q_{loss} = 15\%$ ของ Q_{out}

เมื่อ M_a = มวลอากาศเข้า

M_g = มวลก๊าซเสียออก

$c_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ

$c_{p,g}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซเสีย

$T_{a,i}$ = อุณหภูมิอากาศเข้า

$T_{a,o}$ = อุณหภูมิอากาศออก

$T_{g,i}$ = อุณหภูมิก๊าซเสียเข้า

$T_{g,o}$ = อุณหภูมิก๊าซเสียออก

2. คำนวณผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิซึม Logarithmic
Mean Temperature Difference และตัวคูณชดเชยสำหรับหา
ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย Mean Temperature Difference(LMTD)

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left[\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right]} \quad (3)$$

เมื่อ $\Delta T_1 = T_{g,i} - T_{a,o}$

$\Delta T_2 = T_{g,o} - T_{a,i}$

3. กำหนดพื้นที่การถ่ายเทความร้อน เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้ง
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีจำกัดจึงกำหนดขนาดของอุปกรณ์
แลกเปลี่ยนความร้อน และสมมติจำนวนและขนาดของท่อแลกเปลี่ยน
ความร้อนขึ้น

$$A = N \pi D h \quad (4)$$

สามารถหาค่า U ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการ

$$U = \frac{Q}{AF(LMTD)} \quad (5)$$

เมื่อ F = correction factor ของ LMTD ซึ่งจะมีค่าไม่เกิน 1

N = จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

H = ความสูงของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

4. คำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

4.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มภายในท่อ (h_i)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มภายในท่อ สำหรับ

ค่า $Re < 2100$

$$\frac{h_i D}{K} = 1.86 \left(\frac{DG}{\mu} \right)^{1/3} \left(\frac{C\mu}{K} \right)^{1/3} \left(\frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (6)$$

- 4.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มภายนอกท่อ (h_o)

$$h_o = \frac{0.8c (T_a)^{1/3} (G_e)^{(0.6+0.08 \log d)}}{D^{0.53}} \quad (7)$$

เมื่อ h_o = outside film coefficient (Btu)

c = constant of air (usually = 1)

T_a = average gas temperature (R)

G_e = gas mass flow rate (pps / sq ft)

D = outside diameters tube (in)

4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม(U_o)

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_{fo} + \frac{L_w}{K} + R_{fi} + \frac{1}{h_i}} \quad (8)$$

5. คำนวณค่าความดันสูญเสีย

5.1 ค่าความดันสูญเสียภายในท่อ ในกรณีที่ต้องการคำนวณค่าความดันสูญเสียในทางอุตสาหกรรมที่เกิดขึ้นระหว่างที่ของไหลไหลไปในท่อสำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีการดังนี้

$$\Delta P_i = 2500 \left(\frac{NL}{d_i} \right) \left(\frac{G_i^2}{\rho} \right) \left[\left(\frac{f_i}{\phi_i} \right) + 0.001 \left(\frac{d_i}{L} \right) \right] \quad (9)$$

5.2 ค่าความดันสูญเสียภายในเซลล์

$$\Delta P_o = [\Delta P_o \times (\text{จำนวนการไหลตั้งฉาก}) + \Delta P_o \times (\text{จำนวนแผ่นกั้น})] \times \text{สัมประสิทธิ์ความปลอดภัย} \quad (10)$$

1. ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลที่ตั้งฉากกับมัดท่อ

$$\Delta p_c = \frac{2fN_{row}(G_c^2)}{\rho} \quad (11)$$

2. ค่าความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลที่ขนานกับมัดท่อ

$$\Delta P_b = 1.02 \left(\frac{G_b^2}{\rho} \right) \quad (12)$$

ผลการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

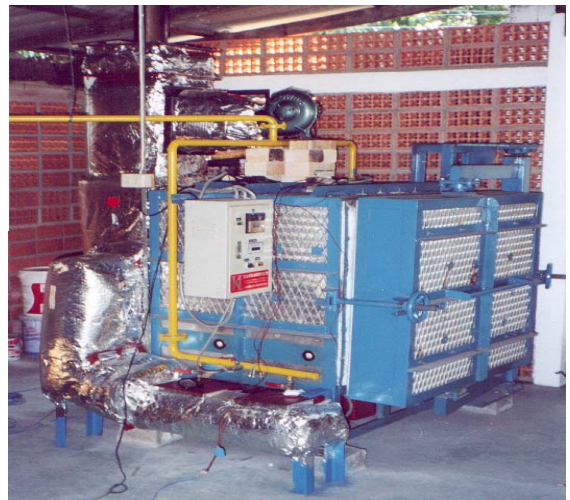
จากการวิเคราะห์ออกแบบ ได้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีคุณลักษณะดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ผลการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

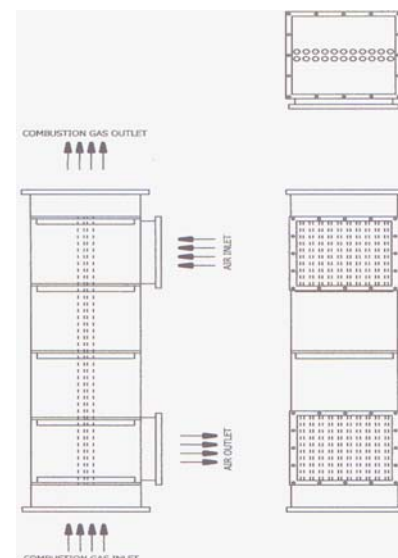
รายการ	ค่า	หน่วย
ขนาดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	19.05	มิลลิเมตร
จำนวนท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	22	ท่อ
จำนวนแถว	2	แถว
จำนวนท่อในแต่ละแถว	11	ท่อ
ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	1.2	เมตร
วัสดุที่ใช้ผลิตท่อแลกเปลี่ยนความร้อน	Stainless steel 304	



รูปที่ 1 เตาเผาเซรามิกก่อนติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



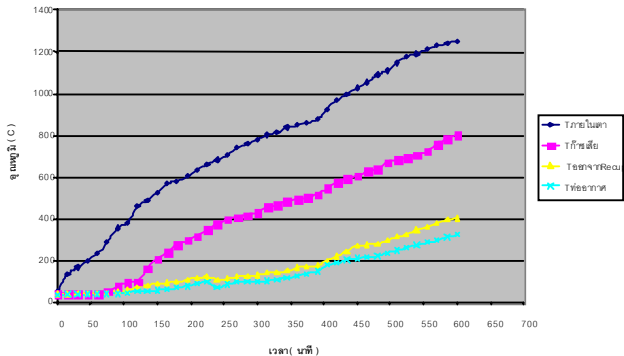
รูปที่ 2 เตาเผาเซรามิกหลังติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator ที่ทำการออกแบบ

ผลการทดลอง

จากการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จำนวนหลายครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยจากผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับเตาที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถประหยัดพลังงานลง 20 – 25 % จากเดิม



รูปที่ 4 กราฟแสดงอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ภายในเตาระหว่างการเผา

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยเรื่อง การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิกนั้นผู้วิจัยพบว่า หลังจากการติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Recuperator เข้ากับปล่องเตาเผาสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้จาก 49 °C เป็น 311 °C อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนสามารถนำความร้อนสูญเสียในก๊าซเสียกลับมาใช้ประโยชน์ได้ 50.4 % v ประหยัดเชื้อเพลิงก๊าซ LPG ได้ปีละ 1,040 กิโลกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้ 14,553 บาทต่อปี คิดเป็นเชื้อเพลิง LPG ที่ประหยัดได้จากเดิม 23 % มีระยะเวลาคืนทุน 2 ปี 2 เดือน และมีอัตราผลตอบแทนการลงทุน 49.5 % ซึ่งผลของการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการนำพลังงานกลับมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ต้นทุนในการผลิตลดลงและยังเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมโดยลดอุณหภูมิของไอเสียก่อนที่จะปล่อยไปในอากาศ

สำหรับข้อเสนอแนะในการออกแบบควรศึกษาพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเตาเผาเซรามิกที่มีใช้ในปัจุบันซึ่งมีขนาดความจุใหญ่กว่าที่ทำการทดลอง การศึกษาเกี่ยวกับการกัดกร่อนที่เกิดในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและศึกษาเรื่องการติดครีป (frit) บริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนให้มากขึ้นซึ่งจะส่งผลถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ดีขึ้น ขนาดที่ลดลง รวมถึงอายุการใช้งานที่นานขึ้นอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณ จรัส อินทร์มี และบริษัท อินเทอร์เน็ต จำกัด ที่เอื้อเฟื้อเตาเผาเซรามิกสำหรับการศึกษาวิจัยนี้ ตลอดจน คุณ ทรงธรรม อินทร์มี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับการวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Boyen John L. 1975. Practical Heat Recovery. New York: John Wiley.
- [2] D.a. Reay. 1971. Heat Exchangers for Waste Heat Recovery. Developments in Heat Exchanger Technology-1. London: Applied Science Publishers LTD.
- [3] Dangherty. R.L. Franzini. J.B. and Finnemore. E.J.. 1989. Fluid Mechanics with Engineering Applications. New York: McGraw-Hill, 596 pp.
- [4] Energy Conservation Application in Ceramic Industries. 1994. Technical Report, Bandung. Indonesian Institute of Sciences, 34 pp.
- [5] Ganapathy. V. 1991. Waste heat boiler deskbook. Atlanta. The Fairmont Press, 349-393.
- [6] Goldstick Robert. 1986. Principle of waste heat recovery. Atlanta : TFP.
- [7] G. Walker. 1980. Industrail Heat Exchanger : A Basic Guide, 2nd ed : Taylor & Francis.
- [8] HolMan. J.P. 1981. Heat Transfer, fifth edition. New York. McGraw-Hill, 434 pp.
- [9] Incropera, F.P. and David, P.D. 1981. Fundamentals of Heat Transfer. New York : John Wiley & Sons, 814 pp.
- [10] Japan External Trade Organization. 1994. Fuel Saving of Furnace by Recuperator. 25 pp.