

การวิเคราะห์การใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ
ร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์
**Analysis on energy consumption of reheating furnace using
Regenerative burners combined with recuperator**

คณิต มานะธรร¹ และ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการใช้พลังงานของเตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์และหัวเผาธรรมดาเพื่อนำความร้อนปล่อยทิ้งจากเตาเผาเหล็กมาอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยเตาเผาที่มีขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง แบบ pusher type และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เพื่อให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งขนาด 120 มม. x 120 มม. ยาว 4000 มม. ข้อมูลจากการตรวจวัดและการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน พบว่า ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ คิดเป็น 47.4% ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา คิดเป็น 37.0% ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์ คิดเป็น 7.4% และความร้อนของอากาศภายนอกและสเกลประมาณ 8.3% เท่านั้น นอกจากนี้เตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์ร่วมกันสามารถประหยัดพลังงานมากกว่าเตาเผาตัวอย่างเดิมที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์เพียงอย่างเดียวถึง 43%

คำสำคัญ : สมดุลความร้อน, สมดุลมวล, เตาเผาเหล็ก, การประหยัดพลังงาน, หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

¹ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. บทนำ

จากสภาวะปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงที่นำมาใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนมีราคาที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่มีทีท่าว่าจะหยุดหรือลดลง โดยประเทศต่างๆทั่วโลกต่างให้ความสำคัญของราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น เพราะจะเป็นต้นทุนการผลิต ทำให้ราคาของสินค้าสูงขึ้น ไม่สามารถแข่งขันทางเศรษฐกิจได้ อุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้พลังงานความร้อนในปริมาณที่มาก คือ อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักในการพัฒนาอุตสาหกรรมปลายน้ำต่างๆ ที่เป็นอุตสาหกรรมยุทธศาสตร์หลักของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น เตาเผาที่ใช้อบเหล็กแท่งยาว (billet) หรือเหล็กแท่งแบน (slab) ที่ใช้ในประเทศไทยนั้น มีการนำไอเสียร้อนที่ปล่อยทิ้งมาใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ให้ร้อนขึ้นโดยผ่านรีคูเพอเรเตอร์ ซึ่งได้อากาศสำหรับการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 300 °C หรือมีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิเพียง 30%

การนำเทคโนโลยี regenerative burner มาใช้แทนหัวเผาและรีคูเพอเรเตอร์เดิม สามารถอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ได้สูงถึง 1,000 °C โดยมีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิสูงถึง 90% สามารถช่วยประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้รีคูเพอเรเตอร์ได้ 10 - 20 % [1] ในขบวนการการเผาเหล็ก (reheating)

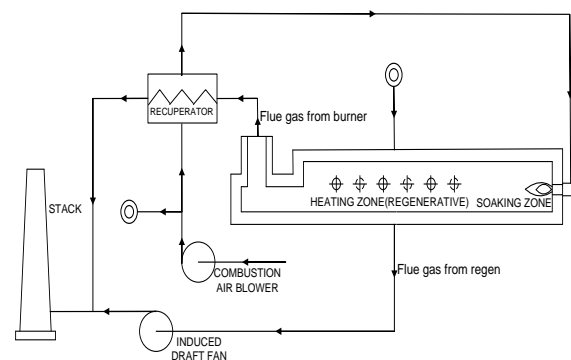
โดยทั่วไป regenerative burner ประกอบด้วยรีเจนเนอเรเตอร์ ทำหน้าที่สะสมความร้อนโดยมีวัสดุบรรจุอยู่ภายใน เช่น alumina ball และ switching valves สำหรับเปลี่ยนโหมดการเผาไหม้เป็นโหมดการสะสมความร้อน หลักการทำงานของ regenerative burner คือ เมื่อไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของหัวเผาตัวหนึ่งออกมาจะถูกดูดผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ให้หัวเผาคือตัวหนึ่ง ก๊าซไอเสียดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนสัมผัสให้แก่ ceramic และความร้อนที่ถูกสะสมไว้จะถ่ายเทให้แก่อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในเวลาต่อมา [2] โดยทั่วไป regenerative burner จะเหมาะสำหรับการติดตั้งในเตาที่มีการใช้พลังงานตั้งแต่ 500 kW ขึ้นไป สำหรับเตาที่มีการใช้พลังงานน้อยจะมีปัญหาสำคัญอยู่สองอย่างคือ ปัญหาเรื่องการหาพื้นที่ในการติดตั้งเข้ากับเตาและราคาในการติดตั้งค่อนข้างสูงทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนช้า แต่ในปัจจุบันได้มีการ

พัฒนา regenerative burner ซึ่งเรียกว่า self regenerative burner ที่สามารถใช้กับเตาเผาขนาดเล็กได้แล้ว ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 35% หรือมากกว่า [3-5, 9]

2. เตาเผา (Reheating furnace)

2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา

เตาเผาขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง แบบ pusher type ภายในเตาเผาประกอบด้วย 3 โซน คือ preheating zone, heating zone และ soaking zone บริเวณ heating zone ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ จำนวน 3 คู่ แต่ละคู่มีขนาด 2 MW โดยมี switching time ในการเปลี่ยนจากโหมดการเผาไหม้เป็นโหมดสะสมความร้อนคือ 30 วินาที ส่วนบริเวณ soaking zone ติดตั้งหัวเผาธรรมดา จำนวน 4 หัว แต่ละหัวมีขนาด 870 kW โดยให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งยาว ขนาด 120 mm x 120 mm ยาว 4000 mm แต่ละชิ้นมีน้ำหนัก 440 kg เตาเผาดังกล่าวใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ แผนผังของระบบเตาเผาดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังระบบเตาเผา

2.2 ลักษณะการทำงานของเตาเผา

เตาเผาที่มีสภาวะการทำงานแบบปกติตั้งแต่ 22.00 – 9.00 น. ของทุกวัน โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้าเป็นแบบ TOU ซึ่งจะอยู่ในช่วง Off Peak หลังจากนั้นจะทำการหยุดเตาในช่วงเวลา ตั้งแต่ 9.00 – 21.00 น. เนื่องจากช่วงเวลานี้จะคิดอัตราค่าไฟฟ้าในช่วง On Peak และจะเร่งเตา ตั้งแต่เวลา 21.00 - 22.00 น. เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาตามต้องการ ซึ่งหากต้องการเปลี่ยนอุณหภูมิจะทำการเปลี่ยนในช่วงนี้ด้วย เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานทั้งหมดของเตา จะเห็นได้ว่า

ลักษณะการทำงานของเตาเผาส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสภาวะการทำงานแบบปกติและต่อเนื่อง

3. องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงในรูปปริมาณร้อยละโดยปริมาตร ซึ่งส่วนผสมของก๊าซธรรมชาตินั้นจะแปรเปลี่ยนตามแหล่งที่มา ในที่นี้เป็นการอ้างอิงค่าเฉลี่ยส่วนผสมของก๊าซธรรมชาติจากสถานีก๊าซธรรมชาติราชบุรีดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติโดยเฉลี่ย [6]

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยปริมาตร
CH ₄	72.6
C ₂ H ₆	3.5
C ₃ H ₈	1.1
C ₄ H ₁₀	0.4
C ₅ H ₁₂	0.2
C ₆ H ₁₄	0.1
CO ₂	6.1
N ₂	16

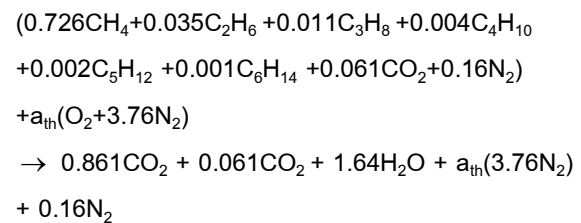
การพิจารณาค่าความร้อนเชื้อเพลิง โดยทั่วไปมักจะนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้น หมายถึงการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สถานะอ้างอิงมาตรฐานอยู่ที่ 25 °C, 1 atm ซึ่ง ณ อุณหภูมิและความดันดังกล่าวไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ทำให้เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากก๊าซเป็นของเหลว แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นมีค่าสูงประมาณ 500 - 800 °C ส่งผลให้ไอน้ำที่อยู่ภายในก๊าซเสียยังคงมีสถานะเป็นก๊าซเหมือนเดิม จึงไม่เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณจึงควรเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ [6]

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
มวลโมเลกุล	20.7	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ	0.7	-
ค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูง	31.7	MJ/Nm ³
ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ	26.4	MJ/Nm ³

4. การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศสำหรับการเผาไหม้

องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถนำมาเขียนสมการเผาไหม้ทางทฤษฎี (stoichiometry combustion equation) ได้ดังต่อไปนี้ [7,8]

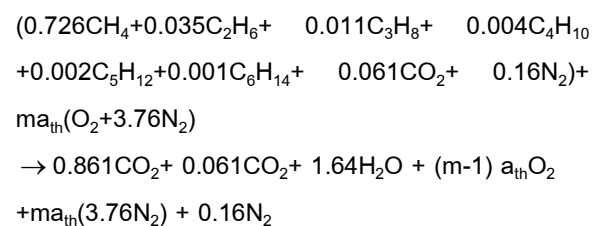


ค่า a_{th} คือ อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่ง โมลของก๊าซธรรมชาติทางทฤษฎี จากสมดุลจำนวนโมลของออกซิเจน จะได้ $a_{\text{th}} = 1.68 \text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_{\text{fuel}}$

ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (stoichiometric air-fuel ratio, AF_{stoic}) จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$AF_{\text{stoic}} = \dot{m}_{\text{air}}/\dot{m}_{\text{fuel}} = 16.96 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}} \quad (1)$$

ในทางปฏิบัติปริมาณอากาศที่ใช้จะมีปริมาณสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินจะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ ดังสมการ



เมื่อ m คือตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน

จากสมการการเผาไหม้ข้างต้น พบว่า ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมาที่ผลิตภัณฑ์ (ก๊าซไอเสีย) มีค่าเท่ากับ $(m-1)a_{th}O_2$ ในกรณีตรวจวัดจริงสามารถวัดปริมาณออกซิเจนดังกล่าวด้วยเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย (Flue gas analyzer) ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยปริมาตรแห้ง (dry-basis) ซึ่งหมายถึง ก๊าซไอเสียจะถูกดูดเอาไอน้ำและความชื้นออกทำให้มีปริมาตรแห้งก่อนที่เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงไปเป็นตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน ดังสมการ

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{(m-1)a_{th}}{0.861+0.061+(m-1)a_{th} + 3.76ma_{th} + 0.16} \quad (2)$$

สามารถจัดรูปเพื่อหาค่า m ได้ดังนี้

$$m = \frac{1.68 - 0.6 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{1.68 - 8 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3)$$

เมื่อทราบค่า m จากสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงจริง(actual air-fuel ratio, AF_{actual}) ได้ดังสมการ

$$AF_{actual} = m \cdot AF_{stoic} \quad (4)$$

5.การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผา

การวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเป็นการวิเคราะห์ สมดุลมวลและสมดุลความร้อนในรูปแบบต่างๆ ที่เข้าสู่เตาเผาและออกจากเตาเผา ในการวิจัยนี้กำหนดให้เตาเผาทำงานแบบปกติ และต่อเนื่อง กล่าวคือ ความร้อนที่เข้าสู่ตัวเตาเผาจะกลายเป็นความร้อนที่ออกจากตัวเตาเผาทั้งหมดโดยที่ไม่มีการสะสมอยู่ภายในเตา การวิเคราะห์สมดุลพลังงานทำให้ทราบถึงอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงประสิทธิภาพของเตาเผาและพารามิเตอร์เชิงประสิทธิภาพอื่นๆ

5.1 สมดุลมวลของเตาเผา

พิจารณาเตาเผาเป็นปริมาตรควบคุม โดยความดันภายในเตาเผาเป็นค่าคงที่และการทำงานของเตาเผาเป็นการทำงานอย่างต่อเนื่อง ในสภาวะคงที่ (Steady state) รายละเอียดของสมดุลมวลที่เข้าและออกจากเตาเผา [4] มีดังนี้

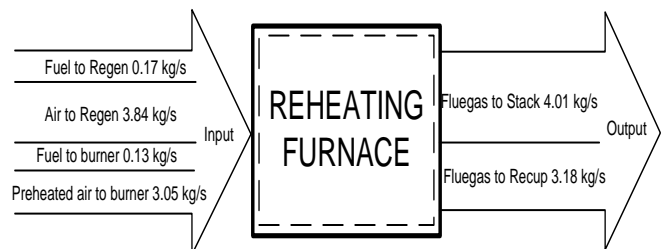
ตารางที่ 3 รายละเอียดของมวลที่ไหลเข้าสู่เตาเผา

Input	kg/s	%
1) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ	0.17	2.31
2) อัตราไหลของอากาศภายนอกเข้าหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ	3.84	53.43
3) อัตราไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผาธรรมดา	0.13	1.80
4) อัตราไหลของอากาศที่ได้รับการอุ่นก่อนเข้าหัวเผา	3.05	42.45
Total mass input	7.19	100

ตารางที่ 4 รายละเอียดของมวลที่ไหลออกจากเตาเผา

Output	kg/s	%
1) อัตราไหลของไอเสียจากเตาเผาเข้าสู่รีคูเพอเรเตอร์	3.18	44.26
2) อัตราไหลของไอเสียจากหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟไปสู่ปล่อง	4.01	55.74
Total mass output	7.19	100

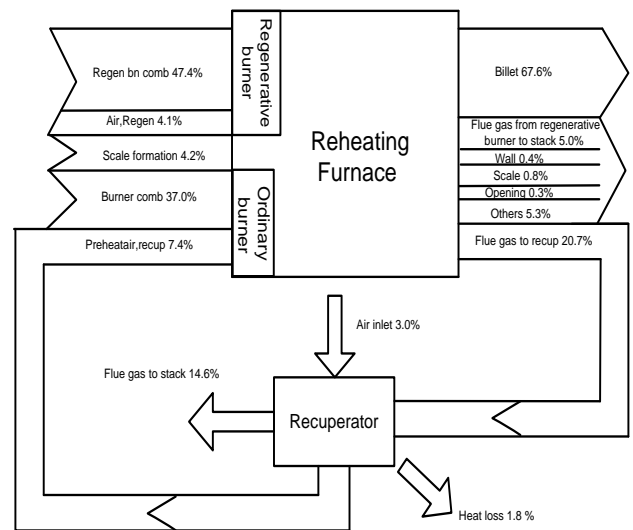
จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้น สามารถนำมาเขียน Diagram แสดงมวลที่เข้าเตาเผาและออกจากเตาเผาที่ใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟได้ ดังแสดงใน รูปที่ 2



รูปที่ 2 สมดุลมวลของเตาเผา

5.2 สมดุลความร้อนของเตาเผา

เมื่อพิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาแบบต่อเนื่องที่มีสภาวะการทำงานแบบปกติ หรือระบบอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งจะถือว่าอุณหภูมิภายในเตามีค่าเฉลี่ยที่คงที่หรือทั้งเตามีอุณหภูมิเดียวกันทั้งหมด และพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ตัวเตาจะกลายเป็นพลังงานความร้อนที่ออกจากตัวเตาทั้งหมดโดยไม่มีการสะสมอยู่ภายในเตา โดยกำหนดให้กรณีที่มีความดันภายในเตาเผาเป็นลบ และเตาเผาเหล็กที่ติดตั้งหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ คือ ปริมาตรควบคุม จะสามารถแสดงรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผา ดังนี้



รูปที่ 3 Sankey diagram ของเตาเผา

ความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ หัวเผาไร้เจนนอเรทีฟ
- 2) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา
- 3) ความร้อนจากการอุ่นอากาศเผาไหม้ที่รีคูเพอเรเตอร์
- 4) ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าสู่หัวเผาไร้เจนนอเรทีฟ
- 5) ความร้อนจากการก่อดังของสเกล

ความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
- 2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟ
- 3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์
- 4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา
- 5) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด
- 6) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล
- 7) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) และความดันอ้างอิง (P_0) ไว้ที่ 25°C และ 1 atm ตามลำดับ เพื่อให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล โดยรายละเอียดของพลังงานความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผาที่ได้จากการคำนวณ แสดงไว้ดังรูปที่ 3 ดังนี้

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผาและออกจากเตาเผา โดยความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาประกอบด้วย ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาไร้เจนนอเรทีฟซึ่งถือเป็นความร้อนหลัก มีค่าสูงถึง 47.4% โดยความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาธรรมดาที่มีค่ารองลงมา คือ 37.0% นอกจากนี้ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์ ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าสู่หัวเผาไร้เจนนอเรทีฟ และความร้อนจากการก่อดังของสเกลมีค่า 7.4%, 4.1% และ 4.2% ตามลำดับ

ส่วนความร้อนที่ออกจากเตาเผา ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ความร้อนที่ใช้ประโยชน์ซึ่งก็คือความร้อนที่ถูกถ่ายเทให้แก่เหล็กแท่งยาว(billets) มีค่าถึง 67.6% ความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่ คือ ความร้อนสูญเสียของไอเสียจากเตาเผาไปสู่รีคูเพอเรเตอร์ มีค่า 20.7% และความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่มีค่า 11.8% ซึ่งประกอบด้วย ความร้อนสูญเสียของไอเสียจากหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟ ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด ความร้อนสูญเสียผ่านสเกลและความร้อนสูญเสียอื่นๆ

5.3 การคำนวณและวิเคราะห์สมดุลพลังงานของ recuperator

จากการพิจารณา recuperator เป็นปริมาตรควบคุมและมีระบบการทำงานในสภาวะคงตัว (steady state) ด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of

Energy) โดยมีรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจาก recuperator มีดังนี้

พลังงานความร้อนเข้าสู่ recuperator

ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า
- 2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า

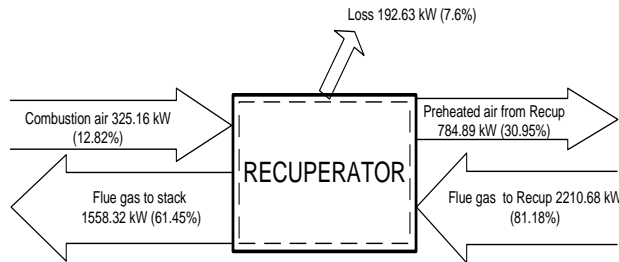
พลังงานความร้อนออกจาก recuperator

ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนสัมผัสของไอเสียขาออก
- 2) ความร้อนสัมผัสของอากาศขาออก
- 3) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

ในการคำนวณจะอาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศและไอเสียทั้งขาเข้าและออกจาก recuperator รวมถึงองค์ประกอบต่างๆของไอเสีย เพื่อทำการวิเคราะห์สมดุลความร้อนและประสิทธิภาพการนำความร้อนกลับมาใช้ (heat recovery) ของ recuperator โดยในรูปที่ 4 จะแสดงถึงรายละเอียดของสมดุลความร้อนและเปอร์เซ็นต์ของพลังงานความร้อนในแต่ละส่วน เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนของเตาเผา รวม จากนั้นพิจารณาอัตราการนำความร้อนกลับมาใช้ของ recuperator ดังสมการ

$$\eta_{re} (\%) = \frac{Q_{preheatair} - Q_{combair}}{Q_{flue,recup}} \times 100\% \quad (5)$$



รูปที่ 4 diagram สมดุลความร้อนของ recuperator

จากรูปที่ 4 พบว่า ความร้อนทั้งหมดที่เข้ารีคูเพอเรเตอร์ เท่ากับ 2535.84 kW ซึ่งประกอบด้วย ความร้อนสัมผัสของอากาศภายนอกเข้ารีคูเพอเรเตอร์ คิดเป็น 12.82% (โดยอุณหภูมิของอากาศภายนอกเท่ากับ 38.63 °C) ความร้อนสัมผัสของไอเสียเข้ารีคูเพอเรเตอร์ คิดเป็น 81.18% ส่วนความร้อนที่ออกจากรีคูเพอเรเตอร์ ประกอบด้วย ความร้อนสัมผัสของอากาศอุ่นที่รีคูเพอเรเตอร์เข้าเตาเผา คิดเป็น 30.95% ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากรีคูเพอเรเตอร์ไปสู่

ปล่อง คิดเป็น 61.45% และความร้อนสูญเสียจากรีคูเพอเรเตอร์คิดเป็น 7.6% โดยมี อัตราการนำความร้อนมาใช้ใหม่ (Heat recovery rate) ของรีคูเพอเรเตอร์ มีค่าเพียง 20.8% หมายถึง ความร้อนจากไอเสียเข้าสู่ recuperator 100 ส่วน สามารถอุ่นอากาศเผาใหม่ได้เพียง 20 ส่วน ส่วนที่เหลือเป็นความร้อนของไอเสียที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศภายนอกโดยไม่มีมีการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ

6. ประสิทธิภาพของเตาเผา (Furnace efficiency)

ประสิทธิภาพของเตาเผา ($\eta_{furnace}$) คือ อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์เทียบกับพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป ในกรณีนี้พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์คือ ความร้อนที่เข้าสู่เหล็ก (\dot{Q}_{billet}) เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปคือความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (\dot{Q}_{comb}) ซึ่งได้จากความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ ($\dot{Q}_{comb,regen}$) และหัวเผาธรรมดา รวมกัน ($\dot{Q}_{comb,burner}$) โดยสามารถคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา ดังสมการ

$$\eta_{furnace} = \frac{\dot{Q}_{billet}}{\dot{Q}_{comb,regen} + \dot{Q}_{comb,burner}} \times 100\% \quad (6)$$

จากการคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา มีค่าเท่ากับ 80.1% โดยความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด คือ 9003.7 kW และพลังงานความร้อนที่อยู่ในเหล็กแท่งยาว คือ 7213.3 kW

7. วิเคราะห์ผลการศึกษา

ผลจากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาที่ติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์แสดงให้เห็นความสามารถในการให้ความร้อนและการสะสมความร้อนของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟจำนวน 3 คู่ รวมกับหัวเผาระธรรมดา คือ 9003.7 kW ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงประมาณ 43.3% เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาตัวอย่างเดิมที่ใช้เพียงระบบรีคูเพอเรเตอร์อย่างเดียว เมื่อพิจารณาเป็นปริมาณการใช้

พลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (Specific Energy Consumption) ค่าดังกล่าว คือ 1042 MJ/ton หรือ 26.2 litre/ton (น้ำมันเตา) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเตาเผาตัวอย่างเดิมที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์ คือ 1836.3 MJ/ton

8. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเตาเผาเหล็กใช้หัวเผา รีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ โดยใช้เชื้อเพลิง เป็นก๊าซธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำ การศึกษากับเตาเผาเหล็กที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นได้ เช่น น้ำมันเตา เป็นต้น

9. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัย พลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hasegawa, T. (2000). Environmentally Compatible Regenerative Combustion Heating System, 2nd International Seminar on High Temperature air Combustion, Stockholm, Sweden.
- [2] จิรชนม์ เสรีวิชัยสวัสดิ์ (2543). การศึกษาวัดจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในรีเจนเนอเรเตอร์แบบโครงอิฐทนไฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] O'Connor, S.J., Konziela J., Yoo In and Kim Byung Gi. (2006). Regenerative burner in the INI large structural mill furnace, AIS Tech 2005 proceeding, The Iron & Steel Technology, Seoul, South Korea.

- [4] คณิต มานะธูระ และมิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล (2552). การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผา รีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก
- [5] Manatura, K. and Tangtrakul, M. (2009). Energy Conservation in a Reheating Furnace Using Regenerative burners Combined with Recuperator, paper presented in the World Renewable Energy Congress 2009 – Asia the 3rd International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2009)”, Bangkok, Thailand.
- [6] บริษัท ปตท จำกัด (มหาชน) (2545). ข้อมูล ก๊าซธรรมชาติ, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://pttinternet.pttplc.com/csc_gas/csc_ind/onlinegas/9_3.asp
- [7] Turns, S. (2006). An Introduction to combustion (2nd edition), McGraw-Hill, Singapore.
- [8] Zengel, Y.A. and Boles, M.A., (2007). Thermodynamics, an Engineering Approach (6th edition), McGraw-Hill, Singapore.
- [9] คณิต มานะธูระ และมิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล (2552). การศึกษาการอนุรักษ์พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผา รีเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่