

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้ หัวเผาจีเอนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์

A Study of Energy Utilization Efficiency in Reheating Furnace using Regenerative burners combined with Recuperator

คณิต มานะธระ^{1*} และ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล²

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 034-281075, โทรสาร: 034-355310,

E-mail: fengknm@ku.ac.th, kanitman@hotmail.com

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีการใช้พลังงานสูงเป็นลำดับต้นๆ ของประเทศ เนื่องจากอุตสาหกรรมประเภทนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานจำนวนมาก โดยเฉพาะกระบวนการรีดเหล็กให้ความร้อนแก่เหล็กให้มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,100 - 1,250 °C ดังนั้น ความเข้าใจถึงการใช้พลังงานจำนวนมากของเตาเผาสามารถนำไปสู่การปรับปรุงพัฒนาเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงานของเตาเผา งานวิจัยนี้กล่าวถึงการใช้พลังงานของเตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผาจีเอนเนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์ร่วมกันเพื่อนำความร้อนปล่อยทิ้งจากเตาเผาเหล็กมาอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยเตาเผามีขนาด 30 ตัน/ชั่วโมง แบบ pusher type และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง เพื่อให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งขนาด 120 มม. x 120 มม. ยาว 4000 มม. ข้อมูลจากการตรวจวัดและการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน แสดงให้เห็นว่า เตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผาจีเอนเนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์ร่วมกันมีประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์ เท่ากับ 93% ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการใช้พลังงานความร้อนได้เป็นอย่างดี และสามารถประหยัดพลังงานมากกว่าเตาเผาตัวอย่างเดิมที่ติดตั้งเพียงรีคูเพอเรเตอร์เพียงอย่างเดียว 43% โดยการศึกษาวิจัยในอนาคตสามารถศึกษาการประหยัดพลังงานในรีคูเพอเรเตอร์ต่อไป

คำหลัก: เตาเผา / ประสิทธิภาพกฎข้อที่สอง / หัวเผาจีเอนเนอเรทีฟ / รีคูเพอเรเตอร์ / สมดุลพลังงาน

Abstract

The iron and steel industry is one of the industries that use a high level of energy. In order to shape the iron and steel, it is heated to 1,100 - 1,250 °C. Thus, understanding how to efficiently utilize energy can lead to a higher performance of the furnace. The objective of this work is to investigate energy utilization in reheating furnace using regenerative burners combined with a recuperator in order that reuse

waste gas from reheating furnace to preheat combustion air . The furnace capacity is 30 tonne per hour, pusher type and the natural gas is used as a fuel. Billets size 120mm x 120mm x 4000mm are used for reheating. The results from measurements, second-law efficiency and energy balance analysis indicate that regenerative burners combined with recuperator shows second-law efficiency about 93% and can reduce in energy consumption approximately 43% compare with the case study of conventional recuperative system. Future work is going to investigate energy conservation in recuperator

Keywords: Reheating furnace / Second-law Efficiency / Regenerative burner / Recuperator / Energy balance

1. บทนำ

จากสภาวะปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงที่นำมาใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนมีราคาที่สูงขึ้นเรื่อยๆ โดยไม่มีทีท่าว่าจะหยุดหรือลดลง โดยประเทศต่างๆ ทั่วโลกต่างให้ความสำคัญของราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น เพราะจะเป็นต้นทุนการผลิต ทำให้ราคาของสินค้าสูงขึ้น ไม่สามารถแข่งขันทางการค้าได้ ซึ่งอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้พลังงานความร้อนในปริมาณที่มากคืออุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานหลักในการพัฒนาอุตสาหกรรมปลายน้ำต่างๆ ที่เป็นอุตสาหกรรมยุทธศาสตร์หลักของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น เตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊สหรือเหล็กแท่งยาว หรือเหล็กแท่งแบน ที่ใช้ในประเศไทยนั้น มีการนำแก๊สร้อนปล่อยทิ้งมาใช้ในการอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ให้ร้อนขึ้นโดยผ่านรีคูเพอเรเตอร์ ซึ่งได้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 300 °C หรือมีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ เพียง 30%

การนำเทคโนโลยี regenerative burner มาใช้แทนหัวเผาและรีคูเพอเรเตอร์เดิม สามารถอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ได้สูงถึง 1,000 °C โดยมีประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิสูงถึง 90% จะช่วยประหยัดพลังงานเมื่อเทียบกับการใช้รีคูเพอเรเตอร์ได้ 10 - 20 % [1] ในขบวนการการเผาเหล็ก

โดยทั่วไป regenerative burner ประกอบด้วยรีเจนเนอเรเตอร์ ทำหน้าที่สะสมความร้อนโดยมีวัสดุบรรจุอยู่ภายใน เช่น alumina ball และ switching valves หลักการทำงานของ regenerative burner คือ

เมื่อแก๊สเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของหัวเผาดังหนึ่ง ออกมาผ่านรีเจนเนอเรเตอร์ในหัวเผ่อีกตัวหนึ่ง แก๊สเสียดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนสัมผัสให้แก่ alumina ball และความร้อนที่ถูกสะสมไว้จะถ่ายเทให้แก่อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในเวลาต่อมา [2] โดยทั่วไป regenerative burner จะเหมาะสำหรับการติดตั้งในเตาที่มีการใช้พลังงานตั้งแต่ 500 kW ขึ้นไป สำหรับเตาที่มีการใช้พลังงานน้อยจะมีปัญหาสำคัญอยู่สองอย่างคือ ปัญหาเรื่องการหาพื้นที่ในการติดตั้งและราคาในการติดตั้งค่อนข้างสูงทำให้ระยะเวลาในการคืนทุนช้า แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนา regenerative burner ที่สามารถใช้กับเตาเผาขนาดเล็กได้แล้ว ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 35% หรือมากกว่า [3-5]

2. เตาเผา (Reheating furnace)

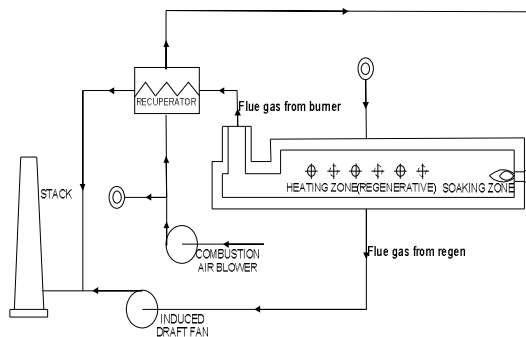
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา

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 ติดตั้งหัวเผารธรรมดา จำนวน 4 หัว แต่ละหัวมีขนาด 870 kW โดยให้ความร้อนแก่เหล็กแท่งยาว ขนาด 120 mm x 120 mm ยาว 4000 mm แต่ละชิ้นมีน้ำหนัก 440 kg เตาเผาดังกล่าวใช้แก๊สธรรมชาติเป็น

เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ แผนผังของระบบเตาเผา ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1

2.2 ลักษณะการทำงานของเตาเผา

เตาเผา มีสภาวะการทำงานแบบปกติ ตั้งแต่ 22.00 – 9.00 น. ของทุกวัน โดยคิดอัตราค่าไฟฟ้าเป็นแบบ TOU ซึ่งจะอยู่ในช่วง Off Peak และ Partial Peak หลังจากนั้นจะทำการหยุดเตาในช่วงเวลา ตั้งแต่ 9.00 – 21.00 น. เนื่องจากช่วงเวลานี้จะคิดอัตราค่าไฟฟ้าในช่วง On Peak และจะเร่งเตา ตั้งแต่เวลา 21.00 - 22.00 น. เพื่อให้ได้อุณหภูมิภายในเตาเผาตามต้องการ ซึ่งหากต้องการเปลี่ยนลูกรีดจะทำการเปลี่ยนในช่วงนี้ด้วย เมื่อพิจารณาลักษณะการทำงานทั้งหมดของเตา จะเห็นได้ว่าลักษณะการทำงานของเตาเผาส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสภาวะการทำงานแบบปกติและต่อเนื่อง



รูปที่ 1 แผนผังระบบเตาเผา

3. องค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง

องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในรูปปริมาณร้อยละโดยปริมาตร ส่วนผสมของก๊าซธรรมชาตินั้นจะแปรเปลี่ยนตามแหล่งที่มา ในที่นี้เป็นการอ้างอิงค่าเฉลี่ยของส่วนผสมจากสถานีก๊าซธรรมชาติราชบุรีดังตารางที่ 1 [6]

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบของก๊าซธรรมชาติโดยเฉลี่ย

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

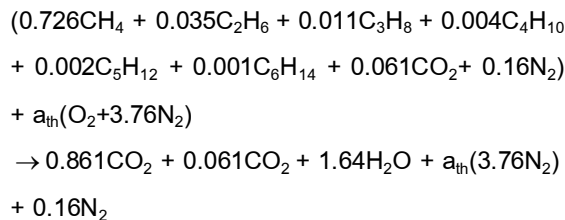
การพิจารณาค่าความร้อนเชื้อเพลิง โดยทั่วไปมักจะนำค่าความร้อนเชื้อเพลิงสูงมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้น หมายถึงการหาค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่สถานะอ้างอิงมาตรฐานอยู่ที่ 25 °C, 1 atm ซึ่ง ณ อุณหภูมิและความดันดังกล่าวไอน้ำที่อยู่ในก๊าซเสียจะกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ ทำให้เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากก๊าซเป็นของเหลว แต่ในความเป็นจริงอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนั้นมีค่าสูงประมาณ 500 - 800 °C ส่งผลให้ไอน้ำที่อยู่ภายในก๊าซเสียยังคงมีสถานะเป็นก๊าซเหมือนเดิม จึงไม่เกิดค่าความร้อนแฝงที่ได้จากการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคำนวณจึงควรเป็นค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 [6]

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ

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

4. การวิเคราะห์อัตราส่วนเชื้อเพลิงกับอากาศ สำหรับการเผาไหม้

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

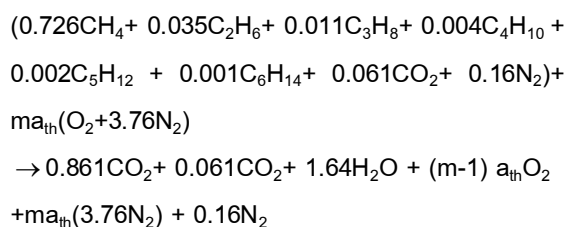


ค่า a_{th} คือ อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของก๊าซธรรมชาติทางทฤษฎี จากสมดุลจำนวนโมลของออกซิเจน จะได้ $a_{\text{th}} = 1.68 \text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_{\text{fuel}}$

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

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

ในทางปฏิบัติปริมาณอากาศที่ใช้จะมีปริมาณสูงกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี เมื่อพิจารณาปริมาณอากาศส่วนเกินจะสามารถเขียนสมการการเผาไหม้ได้ ดังสมการ



เมื่อ m คือตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วนของปริมาณอากาศส่วนเกิน

จากสมการการเผาไหม้ข้างต้น พบว่า ปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมา กับผลิตภัณฑ์ (ก๊าซไอเสีย) มีค่าเท่ากับ $(m-1)a_{\text{th}}\text{O}_2$ ในกรณีตรวจวัดจริงสามารถวัดปริมาณออกซิเจนดังกล่าวด้วยเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไอเสีย (Flue gas analyzer) ค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของอัตราส่วนร้อยละโดยปริมาตร

แห้ง (dry-basis) ซึ่งหมายถึง ก๊าซไอเสียจะถูกดูดเอาไอน้ำและความชื้นออกทำให้มีปริมาตรแห้งก่อนที่เครื่องมือจะทำการวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่วัดได้จะต้องแปลงไปเป็นตัวคูณสำหรับการปรับแก้ในส่วน of ปริมาณอากาศส่วนเกิน ดังสมการ

$$\frac{\% \text{O}_2}{100} = \frac{(m-1)a_{\text{th}}}{0.861 + 0.061 + (m-1)a_{\text{th}} + 3.76ma_{\text{th}} + 0.16} \quad (2)$$

สามารถจัดรูปเพื่อหาค่า m ได้ดังนี้

$$m = \frac{1.68 - 0.6 \left(\frac{\% \text{O}_2}{100} \right)}{1.68 - 8 \left(\frac{\% \text{O}_2}{100} \right)} \quad (3)$$

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

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

5. ประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางอุณหพลศาสตร์

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ได้ใช้ประโยชน์ต่อความร้อนทั้งหมดที่ให้แก่ระบบ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพดังกล่าวยังไม่เพียงพอ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเปรียบเทียบประสิทธิภาพดังกล่าวกับระบบกลจักรความร้อนในอุดมคติ โดยประสิทธิภาพกฎข้อที่สอง คือ อัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพทางความร้อนจริงต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของกลจักรความร้อนย้อนกลับได้ที่ทำงานภายใต้แหล่งความร้อนเดียวกัน

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\eta_{\text{th}}}{\eta_{\text{rev}}} \quad (5)$$

โดย η_{th} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของกลจักรความร้อน

η_{rev} คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของกลจักรความร้อนย้อนกลับได้

กำหนดให้ระบบกลจักรความร้อนจริงในงานวิจัยนี้ คือ ระบบของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผาไร้เจนนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ร่วมกัน

6. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาเผา

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเตาเผา ในงานวิจัยนี้อาศัยกฎข้อที่หนึ่งและสองทางอุณหพลศาสตร์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพทางความร้อน โดยจะเน้นที่การวิเคราะห์ประสิทธิภาพข้อที่สอง คือ ประสิทธิภาพความร้อนที่ระบบทำได้จริงเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพทางความร้อนของกลจักรความร้อนย้อนกลับได้ที่ทำงานภายใต้แหล่งความร้อนเดียวกัน ในงานวิจัยนี้กำหนดให้เตาเผามีสภาวะการทำงานแบบปกติ และต่อเนื่อง กล่าวคือ ความร้อนที่เข้าสู่ตัวเตาเผาจะกลายไปเป็นความร้อนที่ออกจากตัวเตาเผาทั้งหมดโดยที่ไม่มีการสะสมอยู่ภายในเตา การวิเคราะห์ประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทำให้ทราบถึงศักยภาพที่แท้จริงของระบบ ในการทำงานสูงสุดให้เป็นความร้อนที่ใช้ประโยชน์สูงสุดได้ในระดับเท่าใด

6.1 ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเป็นค่าเฉลี่ยเพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาประสิทธิภาพของเตาเผา ภายใต้การทำงานของกระบวนการรีดเหล็กที่มีความต่อเนื่อง ไม่มีการหยุดระหว่างช่วงทำการตรวจวัด

ตารางที่ 3 ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด

ตัวแปร	ค่า	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
$V_{\text{fuel,reg}}$	0.192	$V_{\text{fuel,burner}}$	0.15	m^3/s
$O_{2,\text{reg}}$	5.93	$O_{2,\text{recup}}$	6.2	%
$T_{\text{preheat,RG}}$	931.77	$T_{\text{preheat,recup}}$	262.57	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{flue,fur,RG}}$	1003.7	$T_{\text{flue,recup}}$	625.63	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{flue,reg,stack}}$	145.79	T_{furnace}	1085.23	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{billet,in}}$	39.08	$T_{\text{billet,out}}$	1035.38	$^{\circ}\text{C}$

โดย $V_{\text{fuel,reg}}, V_{\text{fuel,burner}}$ คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิงเข้าหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟและหัวเผาธรรมดาตามลำดับ, m^3/s

$\%O_{2,\text{reg}}, O_{2,\text{recup}}$ คือ เปอร์เซ็นต์ของก๊าซออกซิเจนภายในก๊าซเสียที่อยู่ในหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์ ตามลำดับ

$T_{\text{preheat,RG}}, T_{\text{preheat,recup}}$ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ได้รับการอุ่นจากหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์ ตามลำดับ, $^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{flue,fur,RG}}, T_{\text{flue,recup}}$ คือ อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากเตาเผาเข้าหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟและรีคูเพอเรเตอร์ ตามลำดับ, $^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{flue,reg,stack}}$ คือ อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากหัวเผาไร้เจนนอเรทีฟปล่องควัน, $^{\circ}\text{C}$

T_{furnace} คือ อุณหภูมิภายในของเตาเผา, $^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{billet,in}}, T_{\text{billet,out}}$ คือ อุณหภูมิของเหล็กแท่งที่เข้าและออกจากเตาเผา ตามลำดับ, $^{\circ}\text{C}$

6.2 สมดุลความร้อนของเตาเผา

เมื่อพิจารณาระบบการทำงานของเตาเผาแบบต่อเนื่องที่มีสภาวะการทำงานแบบปกติ หรือระบบอยู่ในสภาวะสมดุลทางความร้อน ซึ่งจะถือว่าอุณหภูมิภายในเตามีค่าเฉลี่ยที่คงที่หรือทั้งเตามีอุณหภูมิเดียวกันทั้งหมด และพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ตัวเตาจะกลายไปเป็นพลังงานความร้อนที่ออกจากตัวเตาทั้งหมดโดยที่ไม่มีการสะสมอยู่ภายใน ซึ่งในกรณีที่ความดันภายในเตาเผามีค่าเป็นลบ จะสามารถแสดงรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผา ดังนี้

ความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาไร้เจนนอเรทีฟ
- 2) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาธรรมดา
- 3) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์

- 4) ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าสู่หัวเผา
รีเจนเนอเรทีฟ
- 5) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล
ความร้อนนอกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย
 - 1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
 - 2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผา
รีเจนเนอเรทีฟ
 - 3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไป
ยังรีคูเพอเรเตอร์
 - 4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา
 - 5) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด
 - 6) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล
 - 7) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

โดยกำหนดอุณหภูมิอ้างอิง (T_0) และความดัน
อ้างอิง (P_0) ไว้ที่ 25°C และ 1 atm ตามลำดับ เพื่อให้
เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล โดย
รายละเอียดของพลังงานความร้อนที่เข้าและออกจาก
เตาที่ได้จากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4 และ 5

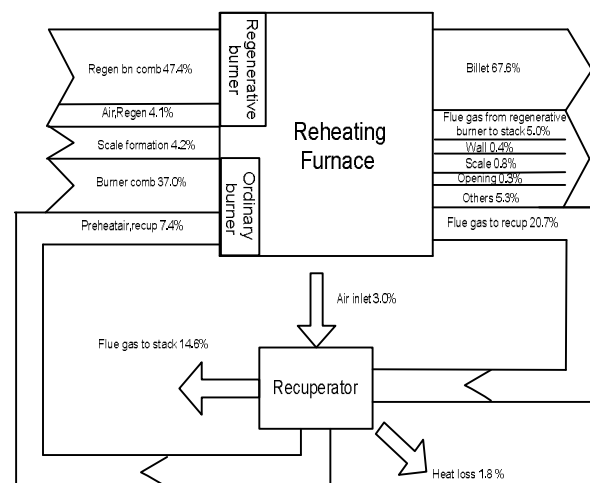
ตารางที่ 4 พลังงานความร้อนทั้งหมดที่เข้าเตาเผา

Input zone	kW	%
1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	5055	47.4
2) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผา	3948.7	37
3) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์	784.9	7.4
4) ความร้อนสัมผัสของอากาศภายนอกเข้าสู่หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	439	4.1
5) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล	445.9	4.2
Total heat input	10673.5	100

ตารางที่ 5 พลังงานความร้อนทั้งหมดที่ออกจากเตาเผา

Output zone	kW	%
1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	6227.8	67.6
2) ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ออกจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ	528.8	5
3) ความร้อนสัมผัสของไอเสียออกจากเตาเผาไปยังรีคูเพอเรเตอร์	2210.7	20.7
4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา	42.8	0.4
5) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	28.5	0.3
6) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	83.2	0.8
7) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	566.3	5.3
Total heat output	10673.5	100

ข้อมูลจากตารางที่ 4 และ 5 สามารถนำมาเขียน
ไดอะแกรมดังรูปที่ 2 เพื่อความสะดวกในการพิจารณา
ภาพรวมของพลังงานที่เข้าและออกจากเตาเผา



รูปที่ 2 Sankey diagram ของเตาเผา

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงความร้อนทั้งหมดที่เข้า
สู่เตาเผาและออกจากเตาเผา โดยความร้อนที่เข้าสู่

เตาเผาประกอบด้วย ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟซึ่งถือเป็นความร้อนหลัก มีค่าสูงถึง 47.4% โดยความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาธรรมชาติมีค่ารองลงมา คือ 37.0% นอกจากนี้ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่รีคูเพอเรเตอร์ ความร้อนจากอากาศภายนอกเข้าสู่หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ และความร้อนจากการก่อตัวของสเกลมีค่า 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 ความร้อนสูญเสียของไอเสียจากหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด ความร้อนสูญเสียผ่านสเกลและความร้อนสูญเสียอื่นๆ

6.3 ประสิทธิภาพของเตาเผา (Furnace efficiency)

ประสิทธิภาพของเตาเผา ($\eta_{furnace}$) คือ อัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์เทียบกับพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป ในกรณีนี้พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์คือความร้อนที่เข้าสู่เหล็ก ($\dot{Q}_{billet}$) เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปคือความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ($\dot{Q}_{comb}$) เท่ากับ ซึ่งได้จากความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงจากหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ ($\dot{Q}_{comb,regen}$) และหัวเผาธรรมชาติรวมกัน ($\dot{Q}_{comb,burner}$) โดยสามารถคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา ดังสมการ

$$\eta_{furnace} = \frac{\dot{Q}_{billet}}{\dot{Q}_{comb}} \times 100\% \quad (5)$$

จากการคำนวณประสิทธิภาพของเตาเผา มีค่าเท่ากับ 80.1% โดยความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งหมด คือ 9003.7 kW และพลังงานความร้อนที่อยู่ในเหล็กแท่งยาว คือ 6227.8 kW

6.4 ประสิทธิภาพกฎข้อที่สอง

ประสิทธิภาพกฎข้อที่สองของเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณจากกระบวนการจริงและค่าที่ได้จากกระบวนการอุดมคติทางอุณหพลศาสตร์

ตารางที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกลจักรย้อนกลับได้และกลจักรจริง

Actual Process	
Q_{billet} (kW)	6227.8
Q_{comb} (kW)	9003.7
η_{th}	69%
Reversible Process	
T_H (K)	1204.15
T_L (K)	312.51
η_{rev}	74%
Second-law Efficiency	
η_{II}	93%

จากตารางที่ 2 พบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนประสิทธิภาพของกลจักรย้อนกลับได้ มีค่าเท่ากับ 69% และ 74% ตามลำดับ ทำให้ประสิทธิภาพกฎข้อที่ 2 มีค่า 93%

7. วิเคราะห์ผลการศึกษา

ผลจากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาที่ติดตั้งหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์แสดงให้เห็น ความสามารถในการให้ความร้อนและการสะสมความร้อนของหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟจำนวน 3 คู่รวมกับหัวเผาธรรมชาติ คือ 9003.7 kW ซึ่งทำให้สามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงประมาณ 43.3% เมื่อเปรียบเทียบกับเตาเผาตัวอย่างเดิมที่ใช้เพียงระบบรีคูเพอเรเตอร์อย่างเดียว เมื่อพิจารณาเป็นปริมาณการใช้พลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์ (Specific

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

8. สรุปผลการวิจัย

เตาเผาที่มีการติดตั้งหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟร่วมกับหัวเผาชนิดธรรมดา สามารถประหยัดพลังงานต่อหน่วยผลิตภัณฑ์(Specific Energy Consumption) ได้ 43.3% เมื่อเทียบกับระบบเตาเผาตัวอย่างเดิมที่ใช้รีคูเพอเรเตอร์ โดยมีประสิทธิภาพของเตาเผา คือ 69%

9. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเตาเผาเหล็กใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์ โดยใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ ซึ่งงานวิจัยในอนาคตสามารถทำการศึกษาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นได้ เช่น น้ำมันเตา เป็นต้น

10. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สถาบันวิจัยพลังงานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

11. เอกสารอ้างอิง

[1] Hasegawa, T. (2000). Environmentally Compatible Regenerative Combustion Heating System, 2nd International Seminar on High Temperature air Combustion, Stockholm, Sweden.

[2] จิรชนม์ เสรีวิชยสวัสดิ์ (2543). การศึกษาวัฏจักรการถ่ายเทความร้อนที่เหมาะสมในรีเจเนอเรเตอร์แบบโครมอิฐทนไฟ, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, 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 มานะบุระ และมิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล (2552). การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์, 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). ข้อมูลก๊าซธรรมชาติ, [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://pttinternet.pttplc.com/csc_gas/csc_ind/online_gas/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.