

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

ผลกระทบของค่าความดันภายในเตาต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก

Effect of the Furnace Pressure on Energy Efficiency of a Reheating Furnace

จิตติน แดงเที่ยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ. พญาไท

เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 218 6590, โทรสาร: (662) 252 2889, E-mail: fmectt@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในประเทศไทยอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานมากที่สุดในลำดับต้นๆ แหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในเตาจะมาจากเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่น้ำมันเตาหรือก๊าซธรรมชาติ แนวทางหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาได้นั้นคือการปรับค่าความดันในเตาให้เหมาะสมซึ่งจะสามารถก่อให้เกิดการใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพได้ งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของค่าความดันภายในเตาที่มีต่อการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กโดยการศึกษาจากเตาจำนวนหนึ่งเตา ในการดำเนินงานจะประกอบด้วยการตรวจวัดการใช้พลังงานของเตาที่ค่าความดันภายในเตาต่าง ๆ โดยการปรับแอมเปอร์ที่ท่อไอเสีย จากนั้นนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตา จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อปรับตำแหน่งของแอมเปอร์ที่ท่อไอเสียให้กว้างขึ้น ค่าความดันภายในเตาให้ลดลงจาก 1.4 mm H₂O ไปเป็น 0.8 และ 0.6 mm H₂O จะทำให้อัตราไหลของอากาศที่รั่วจากภายนอกเข้าสู่เตามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.0022 ไปเป็น 0.0701 และ 0.117 kg/s ตามลำดับ เนื่องจากความดันภายในเตาที่ระดับ hearth มีค่าที่เป็นลบเพิ่มขึ้น ในขณะที่ตัวกันอัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาไปยัง recuperator ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งคิดเป็นความร้อนที่ไอเสียนำเข้าสู่ recuperator เท่ากับ 1,682, 1,906 และ 2,140 kW ตามลำดับ เมื่อปริมาณความร้อนที่ไอเสียนำเข้าสู่ recuperator มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ recuperator สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ได้มากขึ้น ผลที่ได้ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เมื่อผ่าน recuperator แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งคิดเป็นความร้อนที่สามารถอุ่นอากาศในการเผาไหม้เท่ากับ 759, 864 และ 901 kW ตามลำดับ และทำให้ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าลดลงเท่ากับ 7,366, 7,346 และ 7,193 kW ตามลำดับ อย่างไรก็ตามผลกระทบของค่าความดันภายในเตาดังกล่าวที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์จึงเป็นประเด็นสำหรับการศึกษาต่อไปในอนาคต

คำหลัก: ความดันภายในเตา เตาเผาเหล็ก สมดุลความร้อน ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

Abstract

In Thailand, the iron and steel industry is one of the top-ranked energy-consumption industries. The heat source for a reheating furnace used in the iron and steel industry is generally fossil fuel, such as natural gas or fuel oil. Therefore, the energy efficiency of the reheating furnace plays a major role to reduce the overall energy consumption of the plant. The aim of this research is to improve the reheating-furnace energy efficiency by the proper adjustment of the furnace pressure. The research is conducted at

an iron and steel plant by performing energy audit at the reheating furnace and its recuperator. The different values of the furnace pressure are chosen by adjusting the position of the flue gas damper. The field data from the energy audit will be used to analyze the mass and heat balance of the furnace. The analysis indicates that after the reduction of the furnace pressure from 1.4 mm H₂O to 0.8 and 0.6 mm H₂O, the flow rate of the leak air into the furnace is increased from 0.0022 kg/s to 0.0701 and 0.117 kg/s, respectively, because of the higher negative value of the furnace pressure at the hearth level. On the other hand, the flow rate of the flue gas leaving the reheating furnace to the recuperator is increased leading to the higher sensible heat of the flue gas entering the recuperator of 1,682, 1,906 and 2,140 kW, respectively. As a result, the preheat air temperature is increased with the higher heat recovering from the recuperator of 759, 864 and 901 kW, respectively, and the reduction of the heat of combustion of 7,366, 7,346 and 7,193 kW, respectively. Nonetheless, the effect of the furnace pressure on the product quality is considered to be a future study.

Keywords: furnace pressure, reheating furnace, heat balance, energy efficiency.

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทย นั้น เนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็กต้นน้ำได้แก่โรงงาน ถลุงแร่เหล็กจากสินแร่ยังอยู่ในระหว่างการผลิต ดังนั้นเหล็กแท่ง (billet) เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นเหล็ก รูปร่างต่างๆ ที่ใช้อยู่ในประเทศจึงมาจากสองแหล่ง ด้วยกันคือจากเตาหลอมเศษเหล็กด้วยไฟฟ้า (electric arc furnace) และจากการนำเข้าเหล็กแท่งมาจาก ต่างประเทศ หลังจากที่ได้เหล็กแท่งมาแล้วเพื่อ สามารถที่จะขึ้นรูปเหล็กแท่งให้เป็นรูปร่างต่างๆ ตาม ต้องการ ตัวเหล็กแท่งจะได้รับความร้อนจากเตาเผา เหล็ก (reheating furnace) เพื่อให้ได้อุณหภูมิ ประมาณ 1,100 – 1,250 °C ก่อนที่จะถูกส่งไปยังโรง รีด โดยทั่วไปแล้วแหล่งความร้อนสำหรับใช้ในเตาจะ มาจากเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่น้ำมันเตาหรือก๊าซธรรมชาติ ดังนั้นเตาเผาเหล็กจึงเป็นอุปกรณ์หลักที่สำคัญอันหนึ่ง ในกระบวนการผลิตเหล็กที่มีสัดส่วนในการใช้พลังงาน สูง จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณความร้อนต่อ ผลผลิตของเตาเผาเหล็กในประเทศมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ ประมาณ 1,700 MJ/tonne ในขณะที่ค่าดังกล่าวของ ประเทศที่พัฒนาแล้วอยู่ที่ประมาณ 1,200 MJ/tonne [1] ซึ่งส่วนต่างของค่าทั้งสองนั้นมาจากการปริมาณ

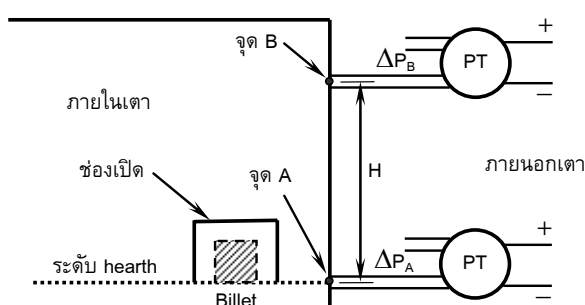
ความร้อนสูญเสียในรูปแบบต่างๆ เป็นผลให้ ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของเตามีค่าต่ำลง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของความดัน ภายในเตาที่มีต่อการใช้พลังงานนั้น ส่วนมากจะเน้น ไปที่ระบบควบคุมเป็นหลัก [2] หรือไม่ก็เป็นการศึกษา ในเชิงกว้างเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ พลังงานภายในเตาโดยมีการควบคุมความดันเป็น ปัจจัยหนึ่งเท่านั้น [3,4] ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้เป็น การศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผา เหล็กโดยการเปลี่ยนค่าความดันภายในเตาโดยจะ ทำการศึกษาเตาในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กจำนวน หนึ่งโรง ในการดำเนินงานจะประกอบด้วยการเข้า เยี่ยมชมโรงงานเบื้องต้น การเก็บข้อมูลและการ ตรวจวัด การติดตั้งและทดสอบระบบควบคุมความดัน ภายในเตา โดยมีจำนวนเข้าทำงานในโรงงานทั้งสิ้น แปดครั้ง จากนั้นก็นำผลการเก็บข้อมูลและการ ตรวจวัดที่ได้ไปวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความ ร้อนของเตา [5,6] เพื่อเป็นการจำแนกมวลและความ ร้อนในรูปแบบต่างๆที่ผ่านเข้าและออกจากเตาและ recuperator และเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบของค่า ความดันภายในเตาที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ของเตา

2. การวัดค่าความดันภายในเตา

ความดันภายในเตาเป็นค่าผลต่างของความดันระหว่างความดันสัมบูรณ์ของไอเสียที่อยู่ภายในเตากับความดันบรรยากาศภายนอกเตา หากความดันภายในเตามีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศภายนอกเตา จะเรียกว่าความดันภายในเตามีค่าเป็นบวก ซึ่งจะทำให้ไอเสียบางส่วนไหลออกจากเตาผ่านทางช่องเปิด เกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานบริเวณใกล้เคียงช่องเปิดและลดอายุของผนังและประตูเตา ในทางตรงกันข้ามหากความดันภายในเตามีค่าต่ำกว่าความดันบรรยากาศภายนอกเตา จะเรียกว่าความดันภายในเตามีค่าเป็นลบ ซึ่งจะทำให้อากาศเย็นจากภายนอกไหลเข้าสู่ภายในเตาผ่านทางช่องเปิด เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานและผลเสียต่อผลิตภัณฑ์

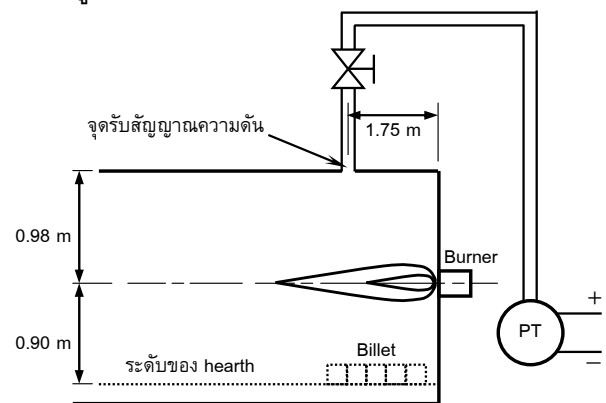
ค่าความดันภายในเตาโดยมากมักจะวัดที่ระดับเดียวกับ hearth ซึ่งเป็นระดับเดียวกับช่องเปิดหรือจุด A ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ในทางปฏิบัตินั้นเพื่อสามารถที่จะควบคุมความดันภายในเตาไม่ให้มีค่าเป็นลบซึ่งก่อให้เกิดผลเสียที่ร้ายแรงกว่า จึงนิยมตั้งค่าความดันภายในเตาที่ระดับ hearth ให้มีค่าเป็นบวกเพียงเล็กน้อยอยู่ที่ประมาณ $0.5 \text{ mm H}_2\text{O}$ [7]



รูปที่ 1 ค่าความดันภายในเตาที่ระดับความสูงต่างกัน หากจุดรับสัญญาณความดันมีความสูงจากระดับ hearth เป็นระยะทาง H หรือจุด B ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ค่าความดันที่รับได้จากอุปกรณ์รับสัญญาณความดันหรือที่เรียกว่า pressure transmitter (PT) จะต้องทำการปรับแก้เนื่องจากผลของแรงลอยตัวของไอเสียภายในเตาคือ

$$\Delta P_B = \Delta P_A + (\rho_a - \rho_g) g H \quad (1)$$

สำหรับเตาที่ทำการศึกษาเป็นเตาแบบ pusher ขนาดเล็กที่มีอัตราการผลิตที่ประมาณ 12 ตัน/ชั่วโมง โดยใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง หัวเผาทั้งหมด 2 หัว วัดอุณหภูมิที่ป้อนเข้าเป็นเหล็กแท่งขนาด ตั้งแต่ $100 \times 100 \text{ mm}$ จนถึง $120 \times 120 \text{ mm}$ และมีความยาวตั้งแต่ 2 ถึง 2.4 m อุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ $1,250^\circ\text{C}$ จุดรับสัญญาณความดันวางอยู่ที่บนหลังคาเตาดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 จุดรับสัญญาณความดันของเตาที่ศึกษา

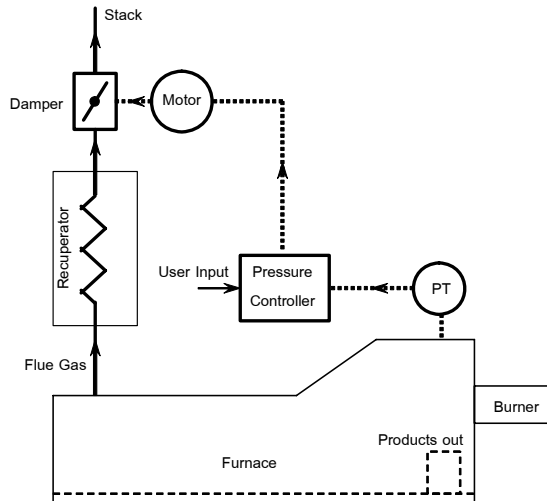
หากนำค่าความสูงของจุดรับสัญญาณความดันที่ระยะ 1.88 m เหนือกว่าระดับ hearth รวมทั้งใช้กฎของก๊าซอุดมคติเพื่อหาค่าความหนาแน่นของไอเสียภายในเตาและอากาศภายนอกเตาที่อุณหภูมิ $1,250^\circ\text{C}$ และ 33°C ตามลำดับ ไปแทนลงในสมการที่ (1) จะได้ว่า

$$\Delta P_B = \Delta P_A + 1.73 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (2)$$

จะเห็นได้ว่าความดันที่วัดได้จากจุดรับสัญญาณความดันจะสูงกว่าความดันภายในเตาที่ระดับ hearth อยู่ที่ประมาณ $1.73 \text{ mm H}_2\text{O}$ ดังนั้นหากต้องการให้ความดันภายในเตาที่ระดับ hearth มีค่าเป็นบวกเล็กน้อยเท่ากับ $0.5 \text{ mm H}_2\text{O}$ จะต้องตั้งค่า set point ของความดันภายในเตาที่ได้จาก pressure transmitter ให้สูงถึงประมาณ $2.23 \text{ mm H}_2\text{O}$ เลยทีเดียว ซึ่งค่าดังกล่าวในทางปฏิบัตินั้นอาจทำได้ยาก ดังนั้นค่าความดันภายในเตาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นค่าที่สามารถใช้จริงในทางปฏิบัติและจะกล่าวในส่วนถัดไป

3. ระบบควบคุมความดันภายในเตา

ในการควบคุมความดันภายในเตานั้น จะมีอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับระบบควบคุมความดันภายในเตาดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับระบบควบคุมความดันภายในเตา

สัญญาณความดันที่เข้าสู่ PT จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและส่งต่อเข้าสู่ pressure controller ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวกลางในการประมวลผลรับข้อมูลป้อนเข้าโดยตรงจากผู้ใช้ และส่งสัญญาณควบคุมไปยังมอเตอร์ควบคุม จากนั้นมอเตอร์ควบคุมก็จะส่งแรงขับต่อไปยังแฉมเปอร์เพื่อเปิดปิดและควบคุมอัตราไหลของไอเสีย เป็นผลให้ค่าความดันภายในเตาเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการ

สำหรับเตาที่ใช้ในการศึกษานั้นแต่เดิมไม่มีระบบควบคุมความดันภายในเตาอยู่ แฉมเปอร์ที่ท่อไอเสียมีการควบคุมเป็นแบบใช้มือบังคับ และทางโรงงานได้ปรับตำแหน่งของแฉมเปอร์ไว้ที่ตำแหน่งคงที่อยู่ตลอดเวลาเป็นผลให้ความดันภายในเตาไม่ได้มีการควบคุม ต่อมาทางผู้วิจัยได้ช่วยเหลือในการติดตั้งระบบควบคุมความดันภายในเตาให้แก่ทางโรงงาน และดำเนินการตรวจวัดการใช้พลังงานของเตาที่ความดันต่างๆทั้งหมดสามค่าได้แก่ 0.6, 0.8 และ 1.4 mm H₂O และหลังจากนั้นก็นำข้อมูลที่ได้ไปทำการ

วิเคราะห์หาสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาต่อไป

4. การเก็บข้อมูลและการตรวจวัด

ในการเก็บข้อมูลและการตรวจวัดเพื่อนำข้อมูลไปคำนวณหาสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตานั้นประกอบด้วยค่าต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ได้จากการเก็บและตรวจวัด

ชุดข้อมูล	ค่าที่เก็บ	วิธีการ
1) ข้อมูลการผลิต	- น้ำหนักเหล็กแท่ง - อัตราการผลิต - ปริมาณสเกล	- สอบถามจากทางโรงงาน - บันทึกจำนวนเหล็กแท่ง - สอบถามจากทางโรงงาน
2) ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง	- อัตราการใช้เชื้อเพลิง - อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตา	- บันทึกค่าจากมิเตอร์วัดปริมาณการใช้แก๊ส - บันทึกค่าจากห้องควบคุม
3) ข้อมูลการทำงานของเตา	- สถานะของการทำงานของเตา - ช่วงเวลาการเปิดปิดประตูถังเหล็ก	- บันทึกจากพนักงานโดยตรง - บันทึกจากพนักงานโดยตรง
4) ข้อมูลของไอเสีย	- อุณหภูมิไอเสียภายในเตา - อุณหภูมิไอเสียออกจากเตาก่อนเข้า recuperator - อุณหภูมิไอเสียหลังจากผ่าน recuperator - ความเร็วของไอเสียที่ออกจากเตา - องค์ประกอบของไอเสียหลังจากผ่าน recuperator	- บันทึกค่าจากห้องควบคุม - บันทึกค่าจากห้องควบคุม - ตรวจวัดโดยใช้ thermocouple - ตรวจวัดโดยใช้ Pitot tube และ manometer - ตรวจวัดโดยใช้เครื่องวัดองค์ประกอบของไอเสีย
5) ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	- อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม - อุณหภูมิของอากาศหลังจากผ่าน recuperator	- ตรวจวัดโดยใช้ thermocouple - บันทึกค่าจากห้องควบคุม
6) มิติของส่วนต่างๆของเตา	ขนาดของส่วนต่างๆ เช่น ช่องเปิดท่อไอเสีย ฯลฯ	อ่านจากแบบของเตา
7) ข้อมูลของอุณหภูมิผิวเตา	อุณหภูมิที่ผิวเตาโดยรอบ	ตรวจวัดโดยใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน

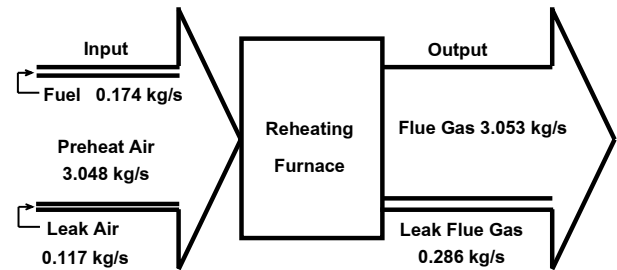
เนื่องการเก็บข้อมูลนั้นจะกระทำทุกทุก 15 นาที เป็นเวลาทั้งสิ้น 3 ชั่วโมงต่อค่าความดันเตาหนึ่งค่าที่เลือกไว้ ทั้งนี้สิ่งที่ควรจะต้องหลีกเลี่ยงคือการเก็บข้อมูลในระหว่างช่วงที่เกิดปัญหาขึ้นในระหว่างการผลิตซึ่งทำให้กระบวนการผลิตหยุดชะงัก เพราะจะทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้ข้อมูลดังกล่าวมีความคลาดเคลื่อน

5. การวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อน

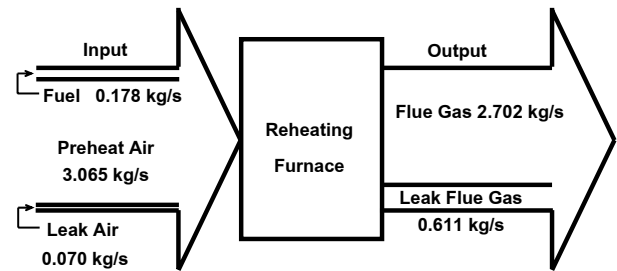
ในการคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตานั้นทำตามรายละเอียดที่แสดงในเอกสารอ้างอิง [8] โดยมีข้อสมมติฐานหลักๆ คือ (1) เตาทำงานอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) นั่นคือไม่มีการสะสมความร้อนในตัวเตา (2) การเดินเตาเป็นแบบเต็มที (full load) (3) เหล็กแท่งที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีขนาดคงเดิม โดยที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างกระบวนการผลิต (4) อัตราไหลของอากาศที่รั่วจากภายนอกเข้าสู่ภายในเตาเป็นค่าเฉลี่ยตามสัดส่วนเวลาของการเปิดปิดประตูเหล็ก และ (5) ความร้อนสูญเสียที่ผ่านผนังเกิดจากการพาความร้อนแบบอิสระและการแผ่รังสีความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม จากสมมติฐานที่กล่าวมาทั้งหมด ผลการคำนวณที่ได้เป็นดังนี้

5.1 สมดุลมวล

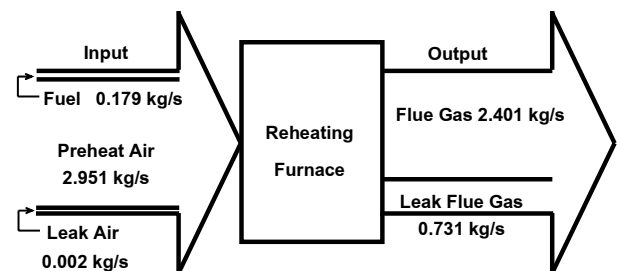
ในการหาสมดุลมวลนั้นหลักการสำคัญคือการตรวจวัดหาปริมาณออกซิเจนในไอเสียเพื่อนำมาหาอัตราส่วนอากาศและเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติได้ เมื่อนำมาประกอบกับอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ตรวจวัดโดยตรง ก็จะสามารถทราบอัตราไหลของอากาศที่จริงได้เช่นกัน นอกจากนี้เนื่องจากค่าความดันภายในเตาซึ่งวัดจาก PT ถูกตั้งไว้ที่ 0.6, 0.8 และ 1.4 mm H₂O จากสมการที่ (2) จะพบว่าความดันภายในเตาที่ระดับ hearth จะยังคงมีค่าเป็นลบ ดังนั้นอากาศจากภายนอกก็จะรั่วเข้าสู่ภายในเตาตรงช่องเปิดที่เหล็กแท่งถูกดันออกจากเตา สำหรับช่องเปิดด้านที่เหล็กแท่งถูกดันเข้าสู่เตาจะพบว่ามีไอเสียรั่วออกซึ่งเป็นไปตามทิศทางการไหลของไอเสีย โดยสรุปแล้วสมดุลมวลของเตาที่ความดันค่าต่างๆ จะสามารถแสดงอยู่ในรูปที่ 4



(a) ความดันภายในเตาที่ 0.6 mm H₂O



(b) ความดันภายในเตาที่ 0.8 mm H₂O



(c) ความดันภายในเตาที่ 1.4 mm H₂O

รูปที่ 4 สมดุลมวลของเตาที่ความดันภายในเตาค่าต่างๆ

5.2 สมดุลความร้อน

ในการคำนวณสมดุลความร้อนนั้น มีรายละเอียดของความร้อนที่เข้าสู่และออกจากเตาดังต่อไปนี้

- พลังงานความร้อนเข้าสู่เตา
 - 1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
 - 2) ความร้อนสัมผัสจากเชื้อเพลิงขาเข้า
 - 3) ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล
 - 4) ความร้อนสัมผัสจากการอุ่นอากาศที่ผ่าน recuperator
 - 5) ความร้อนจากอากาศที่รั่วจากภายนอกเข้าสู่เตา
- พลังงานความร้อนออกจากเตา
 - 1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
 - 2) ความร้อนจากไอเสียที่ออกจากเตาเผา
 - 3) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล
 - 4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสี
 - 5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา
 - 6) ความร้อนสูญเสียจากไอเสียที่ออกจากเตาผ่านช่องเปิด
 - 7) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

สำหรับในส่วนของ recuperator นั้น รายละเอียด
ของความร้อนที่เข้าสู่และออกจาก recuperator คือ

- พลังงานความร้อนเข้าสู่ recuperator
 - 1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาเข้า
 - 2) ความร้อนสัมผัสจากอากาศขาเข้า
- พลังงานความร้อนออกจาก recuperator
 - 1) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาออก
 - 2) ความร้อนสัมผัสจากไอเสียขาออก
 - 3) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

โดยมีสมการสำคัญที่ใช้สำหรับหาค่าความร้อนคือ

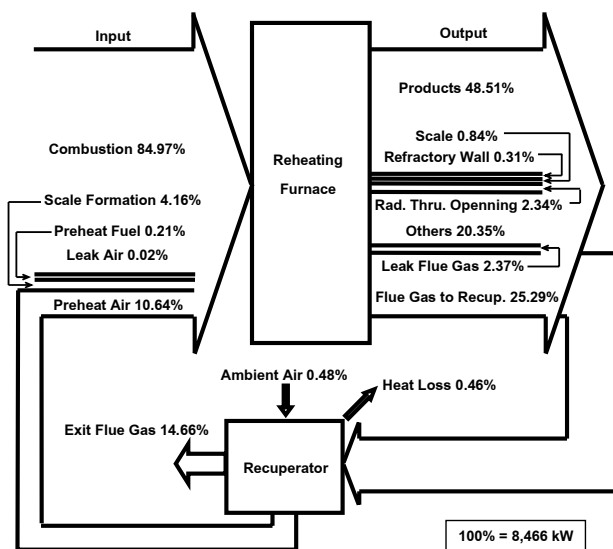
$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f \text{LHV}_f \quad (3)$$

โดยที่ $\dot{m}_f$ อัตราไหลเชิงมวลของเชื้อเพลิง LHV_f คือ
ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ และ $\dot{Q}_f$ คือความร้อนจาก
การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

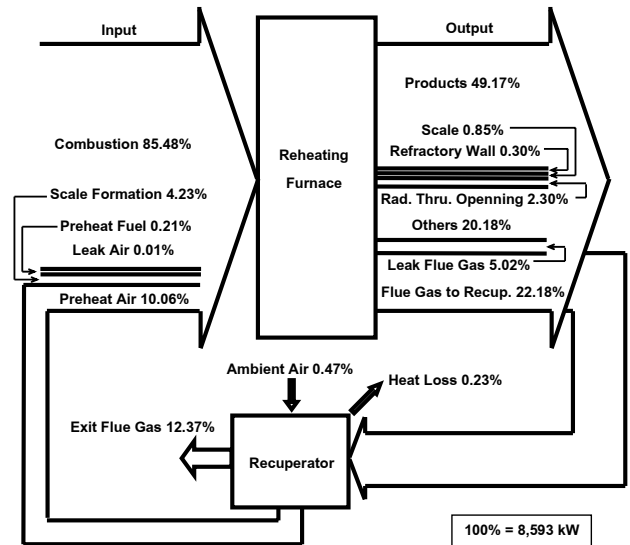
$$\dot{Q}_i = \dot{m}_i (h_i - h_o) \quad (4)$$

โดยที่ $\dot{m}_i$ อัตราไหลเชิงมวลของไอเสียหรืออากาศ h_i
คือค่าเอนทาลปีของไอเสียหรืออากาศที่สถานะนั้นๆ
 h_o คือค่าเอนทาลปีของไอเสียหรืออากาศที่สถานะ
อ้างอิงที่ 25°C และ $\dot{Q}_i$ คือความร้อนสัมผัสของไอเสีย
หรืออากาศดังกล่าว

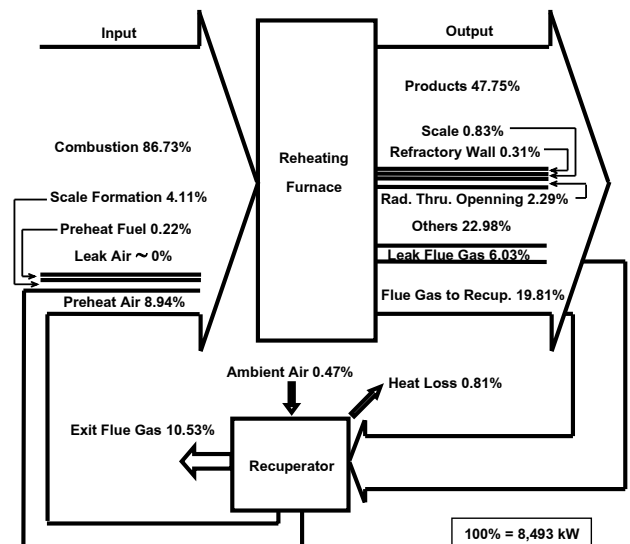
เนื่องจากมีความร้อนบางส่วนจะถูกนำกลับมาใช้
ใหม่ผ่าน recuperator ดังนั้นเพื่อให้เกิดความชัดเจน
จึงนิยมที่จะแสดงผลของสมดุลความร้อนในรูปของ
Sankey Diagram [9] ดังที่ปรากฏในรูปที่ 5



(a) ความดันภายในเตาที่ 0.6 mm H₂O



(b) ความดันภายในเตาที่ 0.8 mm H₂O



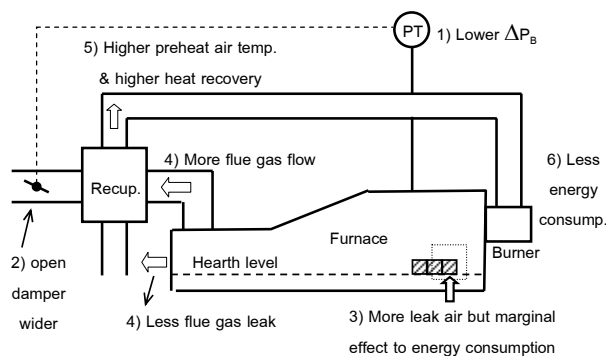
(c) ความดันภายในเตาที่ 1.4 mm H₂O

รูปที่ 5 สมดุลความร้อนของเตา
ที่ความดันภายในเตาต่าง ๆ

จากสมดุลมวลที่ได้จะเห็นได้ว่า เมื่อปรับค่าความ
ดันภายในเตาให้ลดลงจาก 1.4 mm H₂O ไปเป็น 0.8
และ 0.6 mm H₂O ตามลำดับ ส่งผลให้แอมเปอร์ที่ท่อ
ไอเสียให้เปิดกว้างมากขึ้น จะพบว่าอัตราไหลขาเข้า
ของอากาศและเชื้อเพลิงมีค่าเกือบคงที่เนื่องจากการ
เปลี่ยนแปลงปริมาณส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิง
ค่อนข้างน้อย แต่จะเห็นได้ว่าอัตราไหลของอากาศที่
รั่วจากภายนอกเข้าสู่เตามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.002 kg/s

ไปเป็น 0.070 และ 0.117 kg/s ตามลำดับ ทั้งนี้หากพิจารณาจากสมการที่ (2) จะพบว่าค่าความดันภายในเตาที่วัดได้จาก PT ที่ 1.4, 0.8 และ 0.6 mm H₂O จะทำให้ความดันภายในเตาที่ระดับ hearth มีค่าเป็นลบเท่ากับ -0.33, -0.93 และ -1.13 mm H₂O ตามลำดับ เป็นผลให้ค่าความดันภายในเตาที่ระดับ hearth มีค่าติดลบที่สูงขึ้นและทำให้อากาศจากภายนอกรั่วเข้าสู่ภายในเตาได้มากขึ้น ในขณะที่เดียวกันจากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเมื่อแอดมเปอร์ถูกเปิดให้กว้างขึ้น อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาไปยัง recuperator มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลโดยตรงจากตัวแอดมเปอร์เอง ในขณะที่อัตราไหลของไอเสียที่รั่วออกจากเตาด้านที่เหล็กแท่งถูกดันเข้าไปในเตามีค่าลดลงเนื่องจากไอเสียส่วนใหญ่ได้ถูกดูดผ่าน recuperator ผ่านไปยังปล่องแล้วนั่นเอง

ในส่วนของสมดุลความร้อนที่แสดงในรูปที่ 5 นั้น ผลของการเปลี่ยนความดันภายในเตาให้ลดลงคือ 1.4, 0.8 และ 0.6 mm H₂O โดยการเปิดแอดมเปอร์ให้กว้างขึ้นจะสามารถสรุปให้เห็นได้ในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ผลของความดันภายในเตาที่มีต่อสมดุลความร้อนของเตา

หากพิจารณาถึงผลของอากาศที่รั่วเข้าสู่ภายในเตาผ่านทางช่องเปิดนั้น จะพบว่าเนื่องจากอัตราไหลของอากาศที่รั่วจากภายนอกเข้าสู่เตามีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราไหลรวมทั้งหมด จึงทำให้ผลกระทบดังกล่าวที่มีต่อสมดุลความร้อนของเตามีค่าน้อยมาก ซึ่งคิดเป็นประมาณไม่เกินร้อยละ 0.02 อย่างไรก็ตามผลของอากาศที่รั่วจากภายนอกเข้าสู่เตา

จะมีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์มากกว่าเนื่องจากจะทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเหล็กแท่งมีค่าไม่สม่ำเสมอ ในทางตรงกันข้ามผลของไอเสียที่ออกจากเตาไปยัง recuperator จะมีผลต่อการใช้พลังงานค่อนข้างมาก เนื่องจากอัตราไหลของไอเสียที่ผ่าน recuperator เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และส่งผลให้ปริมาณความร้อนของไอเสียที่นำเข้าสู่ recuperator ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4) มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1,682, 1,906 และ 2,140 kW ตามลำดับ ในขณะที่ความร้อนดังกล่าวที่เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ recuperator สามารถนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่เพื่อไปอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้จากการตรวจวัดพบว่าอุณหภูมิของอากาศที่อุ่นผ่าน recuperator จะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 302, 328 และ 342°C ตามลำดับ และสามารถคิดเป็นความร้อนที่สามารถอุ่นอากาศในการเผาไหม้ได้เพิ่มขึ้นเท่ากับ 759, 864 และ 901 kW ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วยังสามารถลดความร้อนสูญเสียของไอเสียที่รั่วออกจากเตาได้เป็น 512, 431 และ 201 kW ตามลำดับ เนื่องจากอัตราไหลของไอเสียที่รั่วออกจากเตามีค่าลดลงด้วยเช่นกัน จากผลดังกล่าวทำให้อัตราการบริโภคน้ำมันลดลงคือ 669, 667 และ 653 ลิตรต่อชม. ซึ่งเทียบเท่ากับความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จากสมการที่ (3) ที่ลดลงเท่ากับ 7,366, 7,346 และ 7,193 kW ตามลำดับ อย่างไรก็ตามนอกจากผลการใช้พลังงานที่ลดลงนี้จะต้องพิจารณาถึงผลของความดันภายในเตาที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ด้วยเช่นกัน ซึ่งผลดังกล่าวจะเป็นประเด็นที่ใช้สำหรับในการศึกษาต่อไปในอนาคต

6. สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลและตรวจวัดการใช้พลังงานของเตาของโรงงานจำนวนหนึ่งเตา จากการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน พบว่าเมื่อค่าความดันภายในเตา ลดลงจากการเปิดแอดมเปอร์ที่ท่อไอเสียให้กว้างขึ้น จะพบว่าอัตราไหลของอากาศที่รั่วจากภายนอกเข้าสู่เตา

มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาไปยัง recuperator มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ จะพบว่าผลกระทบของอัตราไหลของอากาศที่รั่วจากภายนอกเข้าสู่เตาที่มีต่อการใช้พลังงานของเตาจะมีค่าน้อยมาก ในขณะที่เมื่ออัตราไหลของไอเสียที่ออกจากเตาไปยัง recuperator มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ความร้อนที่เข้าสู่ recuperator เพิ่มขึ้นและสามารถนำความร้อนกลับมาใหม่ได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่งผลให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงมาคาลดลงด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะเป็นประเด็นที่ใช้สำหรับในการศึกษาต่อไปในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยที่ได้เอื้อเฟื้อสนับสนุนทุนสำหรับในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (2549). รายงานฉบับสุดท้าย, โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่าง ๆ (SEC), (โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก) เสนอต่อกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

[2] Riccardi, R. C., (1984). Application of new microprocessor based controls to improve furnace efficiency and save energy, *Industrial Heating*, vol. 51(7), 1984, pp. 19-21.

[3] Gaydos, K., (2006). Energy saving through furnace efficiency, *Industrial Heating*, vol. 73(12), 2006, pp. 14.

[4] Shay, M. A., (1989). Optimizing reheat furnace combustion systems, *Iron and Steel Engineer*, vol. 66(5), 1989, pp. 35-37.

[5] Chen, Y. S., (1983). Energy Saving in Slab Reheating Furnace, *SEAISI Quarterly*, vol. 12(3), 1983, pp. 19-29.

[6] Vereshchagin, A. V., Yakupov, R. S. and Kul'dyakin S. V., (2007). Reducing heat loss in pusher-type continuous reheating furnaces, *Metallurgist*, vol. 51(9-10), 2007, pp. 505-506.

[7] Trinks, W et al (2004). *Industrial Furnaces (6th edition)*, John Wiley & Sons, New York, pp. 272.

[8] คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2550). รายงานฉบับสุดท้าย, โครงการการศึกษาวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็ก โดยการควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหมาะสม เสนอต่อสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, หน้า 53-67.

[9] Janjai, W.H., Chena, Y.C. and Chung, J.L. Liu, (2005). Analysis on energy consumption and performance of reheating furnace in a hot strip mill, *International Communications in Heat and Mass transfer*, vol. 32(5), 2005, pp. 695-706.