

ETM-0001

การประยุกต์ใช้ความร้อนทิ้งจากเตาเผาที่ใช้ก๊าซ LPG สำหรับการอบแห้งเศษทองเหลืองรีไซเคิล ในโรงงานผลิตหัวเตาแก๊สครัวเรือน

Application of Waste Heat Recovery from LPG Burner Exhausted Gas for Drying Recycled Brass Scrap in a Gas Stove Burner Factory

รสรินทร์ คัมเชตร¹ และ ไชยณรงค์ จักรธรานนท์^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: cchainar@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำความร้อนทิ้งจากไอเสียของเตาเผาที่ใช้ก๊าซ LPG มาใช้ประโยชน์ในการอบแห้งเศษทองเหลืองรีไซเคิลซึ่งปนเปื้อนน้ำยาหล่อเย็นจากกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตหัวเตาแก๊สที่ใช้ในครัวเรือนก่อนนำกลับเข้าสู่กระบวนการหลอมใหม่เพื่อลดการใช้พลังงานและเพิ่มคุณภาพการผลิต เตาอบที่พัฒนาขึ้นมีขนาด 890 cm (ยาว) x 120 cm (กว้าง) x 41.5 cm (สูง) และติดตั้งใกล้เตาเผา ความร้อนจากไอเสียของเตาเผาไหลผ่านท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 31 cm ซึ่งติดตั้งบริเวณด้านล่างของเตาอบ เตาเผาทำงานเฉลี่ยวันละ 12 ชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาไว้ที่ประมาณ 770°C ตัวแปรที่ทำการศึกษได้แก่ (1) ขนาดช่องเปิด ($x = 0 - 170$ cm) ของบานเลื่อนที่ด้านข้างเตาอบเพื่อระบายอากาศร้อนและ (2) ระยะเวลาในการอบแห้งที่ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การอบแห้ง

จากการวิเคราะห์ผลทดลองพบว่าขนาดช่องเปิด (x) ที่แคบเกินไปส่งผลทำให้อัตราการใช้ LPG มากขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิในเตาเผาซึ่งเป็นผลจากความดันสถิตและความเสียดทานการไหลของอากาศร้อนภายในเตาเผา ท่อและเตาอบ ในทางกลับกันที่ x มากเกินไปทำให้อัตราการความร้อนไหลออกจากเตาอบสูง ส่งผลทำให้ระยะเวลาในการอบนานขึ้น หากปริมาณความชื้นคงเหลือสูงยังส่งผลทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมไฟฟ้าสูงขึ้น และยังทำให้สแลก (Slag) จากกระบวนการหลอมเกิดมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าที่ขนาดช่องเปิดที่ 150 cm เป็นตำแหน่งการเปิดที่เหมาะสมที่สุด ที่สภาวะนี้อัตราการใช้ LPG ของเตาเผาไม่แตกต่างจากกรณีไม่ใช้ความร้อนทิ้งมากนัก และให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียบรรณ 4% ที่ระยะเวลาการอบแห้ง 11 ชั่วโมง ที่เปอร์เซ็นต์นี้ยังส่งผลทำให้ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมต่ำสุดและเกิดสแลกน้อยที่สุด

คำหลัก: การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่, การอบแห้งเศษทองเหลืองรีไซเคิล, โรงงานผลิตหัวเตาทองเหลืองใช้ในครัวเรือน

Abstract

This research aimed to utilize waste heat rejected from flue gas of an LPG-fired burner for drying recycled brass scrap contaminated with coolant from the machining processes in a gas stove burner factory, prior to its return to melting process, with the objectives of reducing energy consumption and improving the production quality. The drying oven developed in this study had dimensions of 890 cm (long) x 120 cm (wide) x 41.5 cm (high) and was installed adjacent to the burner. Exhaust gas heat from the burner was transferred through a steel pipe with an inner diameter of 31 cm, connected to the bottom of the oven. The oven was operated 12 hours per day, maintaining an inside temperature of approximately 770°C. The investigated parameters included: (1) the opening size ($x = 0 - 170$ cm) of the sliding door, which was used for releasing hot air; and (2) the drying time affecting the percentage of weight loss.

Experimental results indicated that when the opening size (x) was too narrow, LPG consumption increased in order to maintain the burner temperature, due to the static pressure and friction of hot air flowing through the burn, pipe, and oven. Conversely, when x was excessively large, a high rate of heat loss from the oven observed, resulting in prolonged drying time. Furthermore, a higher residual moisture content in the brass

scrap led to increase energy consumption in the electric melting furnace and promoted greater slag formation during the melting. Moreover, the finding revealed that the optimal opening size was at $x = 150$ cm. Under this condition, the LPG consumption rate was comparable to that of the baseline case without waste heat utilization, while the residual moisture content was reduced to approximately 4% after 11 hours of drying. This percentage resulted in the lowest energy consumption in melting furnace and low slag.

Keywords: Heat recovery, Recycled brass scrap drying, Gas stove burner factory.

1 บทนำ

ด้วยวิกฤตความต้องการใช้พลังงาน และราคาพลังงานที่เพิ่มขึ้น รวมถึงปัญหาโลกร้อนจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้ทั่วโลกให้ความสนใจเป็นอย่างมากทั้งในภาคอาคารและภาคอุตสาหกรรมเพื่อพัฒนาวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยกลยุทธ์หนึ่งที่สำคัญคือการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งหรือสูญเสียจากกระบวนการในอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ [1] การสูญเสียความร้อนจากเครื่องจักรอุปกรณ์ให้แก่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นทางการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวอุปกรณ์ด้วยการพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อน หรือการปล่อยความร้อนทิ้งโดยตรง เช่น ไอเสียจากเตาเผา ความร้อนทิ้งสามารถนำไปใช้ทั้งแบบไม่สัมผัสโดยตรงซึ่งแหล่งความร้อนทิ้งจะถ่ายเทความร้อนผ่านตัวแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ให้แก่ตัวรับความร้อน เช่น น้ำ อากาศ หรือเชื้อเพลิง ทำให้ไม่เกิดการปนเปื้อนจากแหล่งให้ความร้อน เช่น ก๊าซไอเสียผ่านอีโคโนไมเซอร์ (Economizer) [2] และแบบสัมผัสโดยตรงซึ่งความร้อนทิ้งถูกผสมหรือสัมผัสกับตัวรับความร้อน เช่น การใช้ก๊าซไอเสียจากเตาเผาผ่านถ่านหินลิกไนต์เพื่อไล่ความชื้น [3, 4]

Arink และ Hassan [5] ชี้ว่าก๊าซไอเสียเป็นส่วนที่สูญเสียความร้อนมากที่สุดของความร้อนทั้งหมดที่สูญเสียจากเตาทำความร้อนซ้ำ (Reheat furnace) ซึ่งใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (~30%) นอกจากนี้ได้นำก๊าซไอเสียซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 815°C จากเตาทำความร้อนเริ่มต้น (Preheating furnace) ให้แก่บิลเลต (Billet) ที่มีอุณหภูมิ 315°C ก่อนเข้าเตาทำความร้อนซ้ำในโรงงานผลิตเหล็ก ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานสำหรับเตาทำความร้อนซ้ำได้ 23.6%

Li และคณะ [6] ศึกษาการนำเศษเหล็กกลับมาหลอมใหม่พบว่าการอัดเศษเหล็กให้เป็นก้อน (Iron scrap cake) ก่อนการหลอมจะทำให้ได้อัตราเหล็กที่หลอมได้ (Material yield rate) สูงขึ้น ($> 90\%$) และสูงกว่าการนำเศษเหล็กชิ้นเล็ก ๆ (Dispersion iron) (~ 82%) ไปหลอมโดยตรง

งานวิจัยนี้สร้างเตาอบเศษทองเหลือง (Drying oven) โดยนำความร้อนทิ้งจากไอเสียของเตาเผาไปอบไล่ความชื้นออกจากเศษทองเหลืองที่ปนเปื้อนด้วยน้ำยาหล่อเย็นจากกระบวนการกลึงก่อนนำกลับไปหลอมใหม่ในเตาหลอมไฟฟ้า (Electric induction furnace) และมุ่งเน้นที่จะศึกษาผลของขนาดช่องเปิดของเตาอบที่ส่งผลต่ออัตราการใช้ก๊าซ LPG ของเตาเผา (LPG-fired burner) และระยะเวลาในการอบแห้งเศษทองเหลือง รวมถึงผลของปริมาณความชื้นคงเหลือในเศษทองเหลืองที่ส่งผลต่อการเกิดสแลก (Slag) หรือของเสีย และการใช้พลังงานของเตาหลอมไฟฟ้า

2 วิธีการทดสอบ

ดังรูปที่ 1 เศษทองเหลืองซึ่งปนน้ำยาหล่อเย็นจากกระบวนการกลึงชิ้นงานถูกนำมาอัดเป็นก้อนทรงกระบอก (Brass scrap cake) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm ยาว 5 cm ก่อนเข้าเตาอบเศษทองเหลืองที่สร้างขึ้น หลังถูกอัดแล้วก้อนเศษทองเหลืองจะถูกบรรจุลงในถังเหล็ก แต่ละถังมีน้ำหนักรวม 1,008 kg (น้ำหนักทองเหลือง 1,000 kg และน้ำหนักถัง 8 kg) จำนวนทั้งหมด 8 ถัง เตาอบ (Drying oven) มีขนาด 890 cm (ยาว) $\times$ 120 cm (กว้าง) $\times$ 41.5 cm (สูง) ก๊าซไอเสียจากเตาเผาไหลผ่านท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 31 cm และท่อต่อเข้าที่ด้านล่างของเตาอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 21 cm ดังแสดงในรูปที่ 2 บานเลื่อนทั้งสองบานถูกเปิดเมื่อนำเศษทองเหลืองเข้าออกเตาอบ และจะถูกปิดตลอดเวลาขณะอบแห้ง ยกเว้นบานเลื่อนด้านขวาจะถูกเลื่อนเปิดบางส่วนตามขนาดช่องเปิด (x) ที่ทดสอบ อุณหภูมิของอากาศภายในเตาอบถูกวัดผ่านเทอร์โมคัปเปิล Type K (resolution $\pm 1^{\circ}\text{C}$) ซึ่งตำแหน่งติดตั้งแสดงด้วยหมายเลขในรูปที่ 2 โดยปลายจุดวัดห่างจากผนังด้านบนและผนังด้านล่าง 30 และ 80 cm ตามลำดับ แต่ละจุดวัดติดตั้งห่างกัน 250 cm และวัดค่าทุก ๆ 60 นาที ในระหว่างการอบแห้งจะนำเศษทองเหลืองออกมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก (resolution ± 0.5 kg) 60 นาทีเพื่อหาปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลง

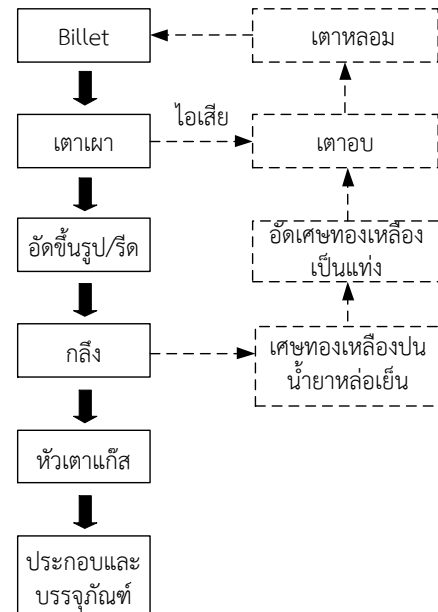
ส่วนเตาเผาใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง (LPG-fired burner) และทำงานประมาณวันละ 12 ชั่วโมง หัวเผาจะถูก

ETM-0001

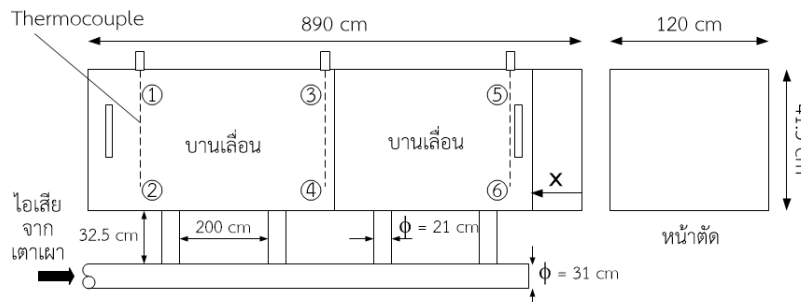
ติดตั้งที่ 3 ตำแหน่งตามความยาวของเตา แต่ละตำแหน่งจะประกอบด้วย 2 หัวเผา (ด้านซ้ายและขวาในระนาบหน้าตัด) เพื่อให้บิลเลต (Billet) มีอุณหภูมิตามที่กำหนดก่อนนำไปรีดอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในเตาเผาจะต้องรักษาไว้ดังนี้ ตำแหน่งใกล้ทางเข้าเตาที่ $800 - 840^{\circ}\text{C}$ ตำแหน่งตรงกลางเตาที่ $760 - 780^{\circ}\text{C}$ และตำแหน่งใกล้ทางออกเตาที่ $720 - 740^{\circ}\text{C}$ หากอุณหภูมิต่ำกว่าที่กำหนดจำเป็นต้องเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซ LPG และอากาศให้แก่หัวเผาที่ตำแหน่งนั้น ๆ ปริมาณการใช้ LPG ทราบค่าได้จากมิเตอร์แก๊ส (resolution 0.01 m^3 , Landis+Gry, 750 HP model, Australia) ในแต่ละวันบิลเลตจะถูกป้อนเข้าเตาเผาประมาณ 240 ครั้ง การนำบิลเลตเข้าเตาเผาแต่ละครั้งช่องบานเปิดที่ทางเข้าเตาจะเปิดนานประมาณ 1 นาที

หลังผ่านการอบเศษทองเหลืองจะถูกนำเข้าเตาหลอมไฟฟ้าเพื่อหลอมให้เป็นบิลเลต การปรับค่ากำลังไฟฟ้าของเตาหลอมจะปรับเพิ่มลดตามอุณหภูมิของน้ำเศษทองเหลืองโดยผู้ควบคุมเตาหลอมจะสังเกตจากสีของน้ำเศษทองเหลืองขณะหลอม และจะหลอมจนกว่าค่าองค์ประกอบต่าง ๆ ได้ตาม

เกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตหัวเตาแก๊ส



รูปที่ 2 แผนภาพเตาอบ

งานวิจัยนี้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่สูญเสียของเศษทองเหลือง (Weight loss) หรือปริมาณความชื้นที่ระเหยคำนวณจากสมการที่ (1) ซึ่งเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังการอบเศษทองเหลือง และเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยที่คำนวณจากสมการที่ (2)

$$\Delta w = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i,before} - \sum_{i=1}^n w_{i,after}}{n} \quad (1)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n w_{i,before} - \sum_{i=1}^n w_{i,after}}{\sum_{i=1}^n w_{i,before}} \times 100\% \quad (2)$$

ที่ซึ่ง n คือ จำนวนถังใส่เศษทองเหลือง ($n = 8$)

ประสิทธิภาพการใช้พลังงานจากการหลอมกรรมนี้ต่าง ๆ ประเมินจากค่าพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC) ซึ่งคำนวณจากปริมาณการใช้พลังงาน

ไฟฟ้าของเตาหลอมต่อน้ำหนักทองเหลืองที่หลอมได้

$$SEC = \frac{\text{Energy consumption by induction furnace}}{\text{Total mass of melted brass}}$$

(3)

3 ผลการทดสอบและวิเคราะห์

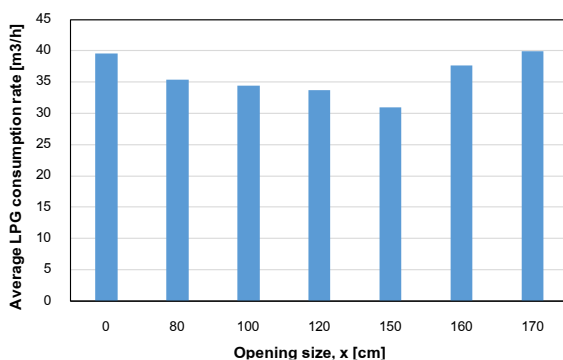
การทดสอบและเก็บผลทำในโรงงานผลิตหัวแก๊สทองเหลืองสำหรับครัวเรือนแห่งหนึ่ง ก๊าซไอเสียจากเตาเผาถูกนำเข้าเตาอบที่สร้างขึ้นโดยไหลผ่านท่อที่ต่อเพิ่มเติมจากปล่องไอเสียของเตาเผา เตาเผาทำงานวันละ 12 ชั่วโมง และการทดสอบการอบเริ่มต้นพร้อมกับการใช้งานเตาเผา ในงานวิจัยนี้ทำการปรับขนาดช่องเปิด (x) ที่ 0, 80, 100, 120, 150, 160, และ 170 cm ซึ่งทำโดยการปรับตำแหน่งบานเลื่อนด้านขวาของเตาอบให้เปิดมากขึ้น และสังเกตผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ดังนี้

3.1 อัตราการใช้ LPG

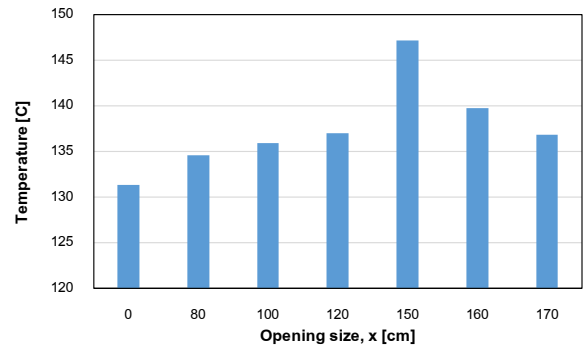
เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ในเตาเผามีผลต่ออุณหภูมิของทองเหลืองบิลเลตซึ่งจะถูกนำไปรีดต่อไป ดังนั้นผู้ควบคุมเตาเผาจะควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาให้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดโดยการปรับอัตราการป้อนก๊าซ LPG (และอากาศ) สำหรับการเผาไหม้ จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าขนาดของช่องเปิด (x) ของเตาอบมีผลต่ออัตราการใช้ LPG ของเตาเผา

กรณีช่องเปิดมีขนาดแคบอัตราการใช้ LPG สูง ทั้งนี้เนื่องจากการต่อท่อไอเสียไปยังเตาอบทำให้ความเสียหายนการไหลในระบบมากขึ้น ส่งผลทำให้ก๊าซไอเสียไหลออกจากเตาเผาได้ยากขึ้น นอกจากนี้หากช่องเปิดที่บริเวณปลายเตาอบถูกปิดสนิท หรือเปิดเพียงเล็กน้อยแล้วผลของการป้อน LPG (และอากาศ) และการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจะทำให้ความสติดซึ่งด้านการไหลของก๊าซร้อนในเตาเผา ท่อและเตาอบเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ก๊าซเผาไหม้เคลื่อนที่จากหัวเผาเคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น ๆ ได้ยากขึ้น ด้วยเหตุนี้การเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซ LPG จะทำให้ความดันสำหรับการไหลเพิ่มขึ้น ก๊าซร้อนจะเคลื่อนที่ในเตาเผาได้ดีขึ้น และการพาความร้อนเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อช่องเปิดมีขนาดกว้างขึ้นความดันสติดที่ด้านการไหลจะลดลง ดังสังเกตได้จากอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 2 (ในรูปที่ 2) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับท่อทางออกของไอเสียของเตาเผามากที่สุดดังรูปที่ 4 มีค่าสูงขึ้น

ในขณะที่ขนาดช่องเปิดกว้างมากจนเกินค่า ๆ หนึ่ง เช่น กรณีช่องเปิดมีขนาดกว้างมากกว่า 150 cm อัตราการใช้ก๊าซ LPG กลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่อุณหภูมิตำแหน่งที่ 2 มีค่าต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อช่องเปิดมีขนาดกว้างก๊าซร้อนจะไหลออกทางช่องเปิดนี้ในปริมาณมาก ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในปริมาณมาก อุณหภูมิในเตาเผาจึงตกลง ดังนั้นทำให้ต้องป้อน LPG ในอัตราที่มากขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผาให้ได้ตามเกณฑ์ที่กำหนด



รูปที่ 3 อัตราเฉลี่ยของการใช้ LPG ที่ x ต่าง ๆ



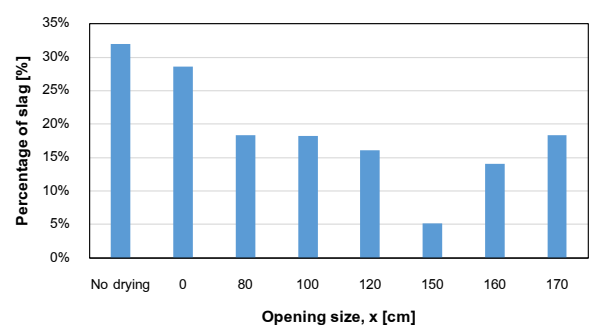
รูปที่ 4 อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซร้อนตำแหน่งที่ 2 ที่ x ต่าง ๆ

3.2 ระยะเวลาในการอบแห้ง

ก่อนการอบแห้งเศษทองเหลืองในแต่ละถังมีน้ำหนักเท่ากับ 1,000 kg เท่ากันทุกกรณีทดสอบ

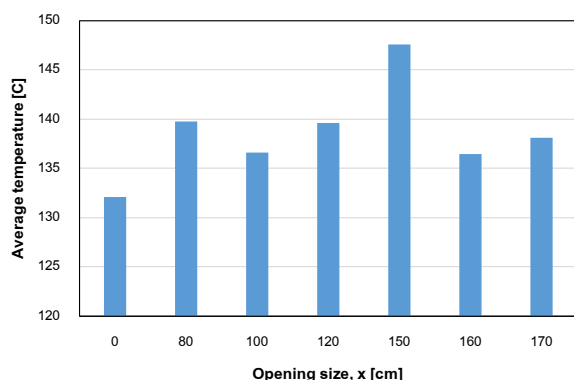
กรณีกำหนดให้ระยะเวลาในการอบ 12 ชั่วโมงเท่ากันสำหรับทุกขนาดช่องเปิด จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อช่องเปิด (x) มีขนาดกว้างขึ้น ก๊าซร้อนสามารถไหลผ่านทั้งเตาเผาและเตาอบได้ง่ายขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้น เมื่ออุณหภูมิภายในเตาอบสูงจะส่งผลทำให้ความชื้นระเหยออกจากเศษทองเหลืองได้มากขึ้น หรือเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่สูญเสีย (m) สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4 แต่เมื่อช่องเปิดมีขนาดมากกว่า 150 cm จะเกิดการสูญเสียความร้อนจากเตาอบมากขึ้น ทำให้ค่า m ลดลง ดังรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในเตาอบมีค่าลดลงอย่างมากที่กรณีนี้

กรณีกำหนดให้ทุกขนาดช่องเปิดต้องอบให้ได้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย $m = 4\%$ จากรูปที่ 7 พบว่า ที่ขนาดช่องเปิด 150 cm จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุดประมาณ 11 ชั่วโมง และมีอัตราการอบแห้งประมาณ 3.6 kg/h ดังรูปที่ 8 นอกจากนี้กรณีช่องเปิดขนาด 150 cm หากยังคงทำการอบต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 15 พบว่าน้ำหนักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากดังรูปที่ 9 เนื่องจากเตาเผาหยุดทำงานหลังชั่วโมงที่ 12 ดังนั้นหลังจากชั่วโมงที่ 12 อุณหภูมิของเตาอบจึงเริ่มลดลงตามการสูญเสียความร้อนที่ไหลออกจากช่องเปิด และผนังของเตาอบ

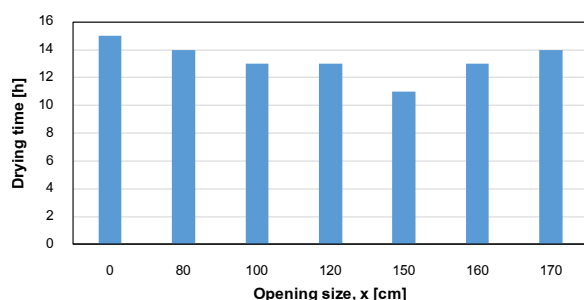


รูปที่ 5 เปอร์เซนต์น้ำหนักที่สูญเสียที่ x ต่าง ๆ

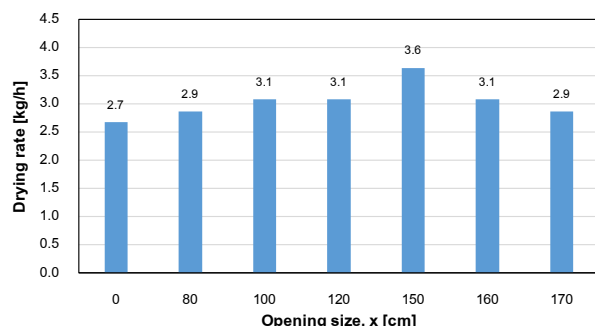
ETM-0001



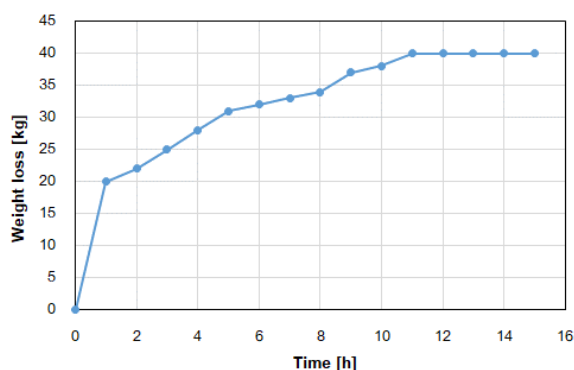
รูปที่ 6 อุณหภูมิเฉลี่ยในเตาอบที่ x ต่าง ๆ



รูปที่ 7 ระยะเวลาในการอบแห้งเพื่อให้ $m = 4\%$ ที่ x ต่าง ๆ



รูปที่ 8 อัตราการอบแห้งเฉลี่ยที่ x ต่าง ๆ



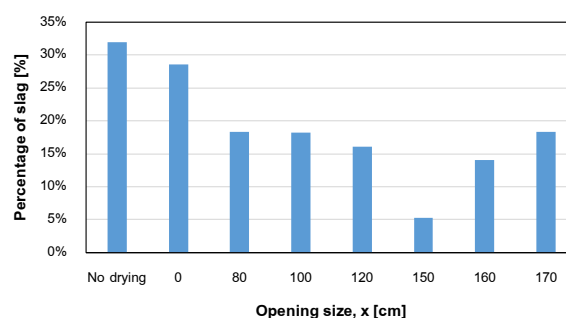
รูปที่ 9 ปริมาณความชื้นเฉลี่ยที่สูงสูญเสียจากเศษ
ทองเหลืองกรณี $x = 150$ cm

3.3 ปริมาณสแลกและการใช้พลังงานของเตาหลอม

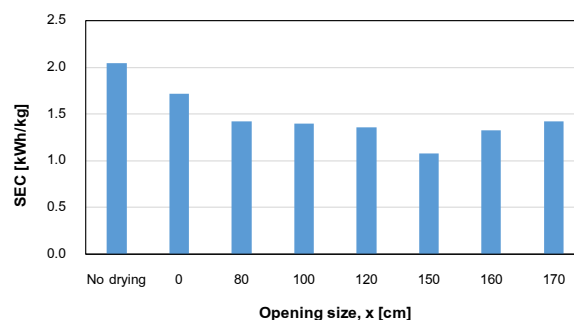
หลังผ่านการอบเศษทองเหลืองจะถูกนำไปพักไว้ 1 คืน ก่อนนำไปหลอมเป็นบิลเลตในเตาหลอมไฟฟ้า (Induction furnace) เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เมื่อพิจารณาช่วงเวลาการอบ

12 ชั่วโมง พบว่าปริมาณความชื้นคงเหลือในเศษทองเหลืองมีความสัมพันธ์กับปริมาณการเกิดสแลก (Slag) หรือของเสียในขณะทำการหลอม กรณีเศษทองเหลืองไม่ผ่านการอบจะเกิดสแลกในปริมาณมาก โดยสูงถึง 32% ของน้ำหนักก่อนเข้าเตาหลอม ดังรูปที่ 10 กรณีช่องเปิดมีขนาด 150 cm จะเกิดสแลกต่ำที่สุด ประมาณ 5.2%

การควบคุมอุณหภูมิการหลอมทำได้โดยการปรับขนาดกำลังไฟฟ้าที่ให้แก่เตาหลอม โดยผู้ควบคุมเตาจะสังเกตสีของเศษทองเหลืองขณะหลอม (ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิ) จากการวิเคราะห์ข้อมูลกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงเวลาต่าง ๆ พบว่า ในกรณีที่เศษทองเหลืองมีความชื้นสูงจะเตาหลอมจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย เช่น กรณีเศษทองเหลืองไม่ผ่านการอบจะใช้กำลังไฟฟ้าสูงถึง 1,390 kWh ต่อการหลอมหนึ่งครั้ง และกรณีขนาดช่องเปิด 150 cm ค่าพลังงานจำเพาะ (SEC) ของการหลอมจะต่ำสุด $SEC \sim 1.08$ kWh/kg ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 เปอร์เซนต์ของสแลกที่เกิดขึ้นขณะหลอมที่ x ต่าง ๆ



รูปที่ 11 ค่า SEC ที่ x ต่าง ๆ

4 สรุป

งานวิจัยนี้สร้างเตาอบเพื่อนำก๊าซไอเสียที่ปล่อยทิ้งจากเตาเผาที่ใช้ก๊าซ LPG มาอบแห้งเศษทองเหลืองรีไซเคิลที่เหลือนทิ้งจากกระบวนการ แล้วนำทองเหลืองที่อบกลับมาหลอมใช้ใหม่ในโรงงานผลิตหัวเตาแก๊สทองเหลืองสำหรับครัวเรือนหนึ่ง และทำการศึกษผลของการปรับขนาดช่องเปิด (x) ของบานเลื่อนเตาอบ โดยพบว่าที่ช่องเปิดขนาด 150 cm เป็นขนาดที่เหมาะสมที่สุด และมีผลสรุปอื่น ๆ ดังต่อไปนี้

1. การท่อต่อเพื่อนำก๊าซไอเสียร้อนจากเตาเผาไปใช้สำหรับเตาอบ และขนาดช่องเปิดที่แคบเกินไป ทำให้ก๊าซร้อนไหลผ่านในเตาเผาและเตาอบไหลได้ยากขึ้น ส่งผลทำให้ความร้อนจากการเผาไหม้ถ่ายโอนจากหัวเผาไปยังส่วนอื่น ๆ ในเตาเผาได้ยากขึ้น นอกจากนี้ในกรณีช่องเปิดมีขนาดกว้างมากเกินไปจะเกิดการสูญเสียความร้อนปริมาณมากจากก๊าซร้อนที่ไหลออกทางช่องเปิด ทำให้ทั้งสองกรณีต้องเพิ่มอัตราการใช้ LPG มากขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผาให้ได้ตามที่กำหนดสำหรับการผลิต โดยช่องเปิดขนาด 150 cm ทำให้อัตราการใช้ LPG ต่ำสุด ($\sim 31 \text{ m}^3/\text{h}$) และยังคงรักษาอุณหภูมิภายในเตาอบให้สูงได้ตามเกณฑ์ที่โรงงานกำหนด
2. เมื่อก๊าซร้อนไหลได้สะดวกขึ้นส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในเตาอบสูงขึ้นด้วย จะส่งผลทำให้ระยะเวลาในการอบจะสั้นลง รวมถึงปริมาณความชื้นคงเหลือในเศษทองเหลืองน้อยลง ในงานวิจัยนี้พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ระเหยออกจากเศษทองเหลืองสูงสุดประมาณ 4%
3. ผลจากงานวิจัยยังพบว่าปริมาณการเกิดสแลก (Slag) หรือของเสียสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นที่คงเหลือในเศษทองเหลืองก่อนการหลอม หากก่อนการหลอมเศษทองเหลืองมีปริมาณความชื้นสูง จะทำให้เกิดสแลกมากขณะหลอม นอกจากนี้ยังมีผลต่อปริมาณการใช้พลังงานของเตาหลอมไฟฟ้าที่สูงขึ้น ด้วยขนาดช่องเปิด 150 cm จะได้ค่าพลังงานจำเพาะต่ำสุด $SEC \sim 1.08 \text{ kWh/kg}$

5 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทเอสซีจี (SCG Thailand) ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ทดสอบและการเก็บข้อมูล และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิตที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับการวิจัย และการนำเสนอผลงานวิจัย

6 เอกสารอ้างอิง

- [1] Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L., and Lävemann, E. (2015). Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, *Applied Energy*, 151, pp.157-167.
- [2] Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., and Tassou, S.A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications, *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, pp. 268-289.
- [3] Rao, Z., Zhao, Y., Huang, C., Duan, C., and He, J. (2015). Recent developments in drying and dewatering for low rank coals, *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, pp.1-11.
- [4] Xu, C., Xu, G., Yang, Y., Zhao, S., Zhang, K., and Zhang, D. (2015). An improved configuration of low-temperature pre-drying using waste heat integrated in an air-cooled lignite fired power plant, *Applied Thermal Engineering*, 90, pp.312-321.
- [5] Arink, T., and Hassan, M.I. (2017) Metal scrap preheating using flue gas waste heat, *Energy Procedia*, 105, pp.4788-4795.
- [6] Li, P., Li, X., and Li, F. (2020) A novel recycling and reuse method of iron scraps from machining process, *Journal of Cleaner Production*, 266, 121732.